

Многочисленные проекты систем широкополосного доступа LEO/MEO/HEO-HTS, предполагающие создание многоспутниковых группировок, предусматривают использование одних и тех же полос радиочастот в диапазонах Ku, Ka, Q/V. Разработанные модели позволяют провести анализ баллистического построения и оценку взаимных помех между любыми типами негеостационарных многоспутниковых систем.

В статье представлены результаты анализа баллистического построения системы “Экспресс-РВ” и оценка ЭМС систем OneWeb и “Экспресс-РВ” в Ku-диапазоне. Результаты анализа представлены для нескольких географических положений абонентских терминалов (от 60 град. с.ш. и выше) и показывают, что временные интервалы воздействия помех и значения C/I имеют значительную зависимость от их размещения в рабочей зоне “Экспресс-РВ”.

Результаты анализа совместной работы систем OneWeb и “Экспресс-РВ” в Ku-диапазоне

Analysis results collaboration satellite systems OneWeb and “Express RV” in Ku-band



Валентин Анпилов

Московский физико-технический институт, АО “ВИСАТ-ТЕЛ”

Valentin R. Anpilov

PhysTech-School of Radio Engineering and Computer Technologies
Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
Dolgoprudny, Russia
JSC “VSAT-TEL”, Moscow, Russia



Андрей Гриценко

Московский физико-технический институт, АО ИКЦ “Северная Корона”

Andrey A. Gritsenko

PhysTech-School of Radio Engineering and Computer Technologies
Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia



Юрий Чекушкин

Московский физико-технический институт

Yury N. Chekushkin

PhysTech-School of Radio Engineering and Computer Technologies Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia
JSC Information Space Center “Severnaya Corona”, Saint Petersburg, Russia

Ключевые слова:

негеостационарные системы, LEO/MEO/HEO-HTS, помехи

Keyword:

non-geostationary systems, LEO/MEO/HEO-HTS, interference

3а последние несколько лет опубликовано значительное количество информации о перспективах создания низкоорбитальных систем спутникового широкополосного доступа (ШПД) [1–2], основой которых являются много-



Numerous projects of broadband access systems LEO / MEO / HEO-HTS, involving the creation of multi-satellite groupings, in some cases involve the use of the same radio frequency bands in the Ku, Ka, Q / V bands. The developed models allowed the analysis of ballistic construction and the assessment of mutual interference between any types of non-geostationary multi-satellite systems.

The article presents the results of the analysis of the ballistic construction of the Express RV system and the evaluation of the EMC of OneWeb and Express RV systems in the Ku-band. It is shown that the satellite constellation of the Express RV system has the property of quasi-geostationarity, i.e. a subscriber on Earth always sees satellites in a small corner zone of 12×2 degrees. But the joint work of the Express RV and OneWeb systems creates mutual interference. It is shown that to counter conflict situations in the radio frequency spectrum, a decrease in the capacity of subscriber radio links and / or an increase in the size of subscriber antennas in the Express-RV system is required. The results of the analysis are presented for several geographic locations of subscriber terminals (from 600 N and above) and show that interference time intervals and C / I values have a significant dependence on their placement in the Express RV coverage area.



Игорь Зимин

Московский физико-технический институт

Igor V. Zimin

PhysTech-School of Radio Engineering and Computer Technologies
Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia

спутниковые группировки. Такие группировки планируются из сотен и даже тысяч небольших спутников класса “микро” в диапазонах Ku, Ka, Q/V фиксированной спутниковой службы (ФСС). Эти системы получили обозначение LEO-HTS, поскольку повторяют идеологию

многолучевого формирования рабочей зоны, свойственную геостационарным спутникам HTS. Очевидно, что создание микроспутников, развертывание и поддержание многоспутниковой группировки в рабочем состоянии требует реше-

ния многочисленных научно-технических задач. Но существуют две проблемы, которые остаются вне активного обсуждения, и решение их пока неизвестно. Первая проблема связана с созданием удобных и дешевых абонентских терминалов, оснащенных сканирующими антеннами [3, 4]. Вторая — это обеспечение электромагнитной совместимости проектируемых систем LEO-HTS между собой и с иными спутниковыми системами ФСС, в том числе уже действующими [5–8]. Ее решение для исключения помех приемным станциям, действующим геостационарным спутникам связи и вещания обеспечивается изменением пространственной ориентации с последующим выключением спутников LEO-HTS в моменты прохождения экваториальной зоны [5–7]. Однако вопросы ЭМС между проектируемыми спутниковыми системами LEO-HTS и проектируемыми спутниковыми системами на иных орбитах (MEO/HEO-HTS) пока не имеют однозначного ответа. Кроме того, нет адекватного аппарата моделирования таких ситуаций, одобренного международной организацией ИТУ.

Наиболее рекламируемой сегодня системой LEO-HTS является система OneWeb. В [5, 6] уже отмечалось, что имеется серьезная проблема обеспечения совместной работы абонентов в Ku-диапазоне системы OneWeb и системы “Экс-

Типовая помеховая ситуация

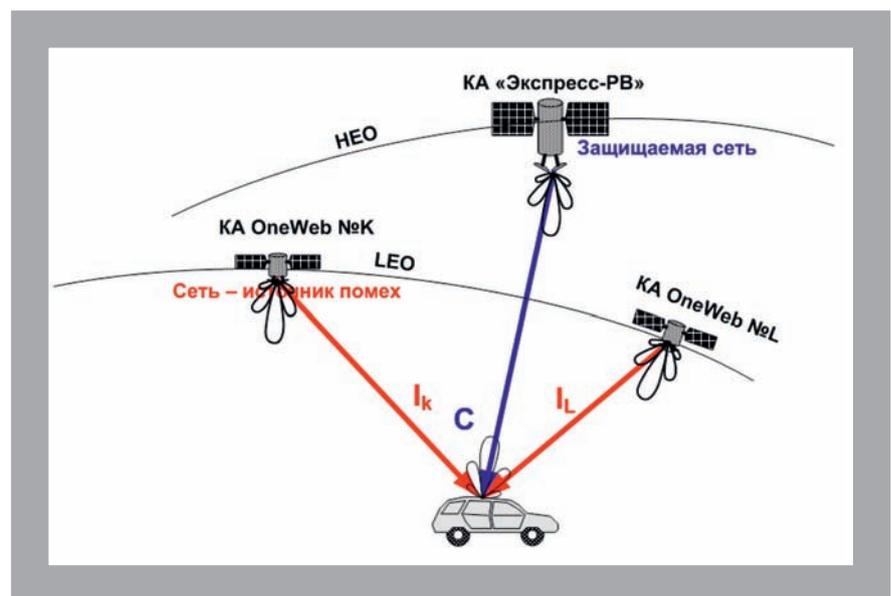


Рис. 1

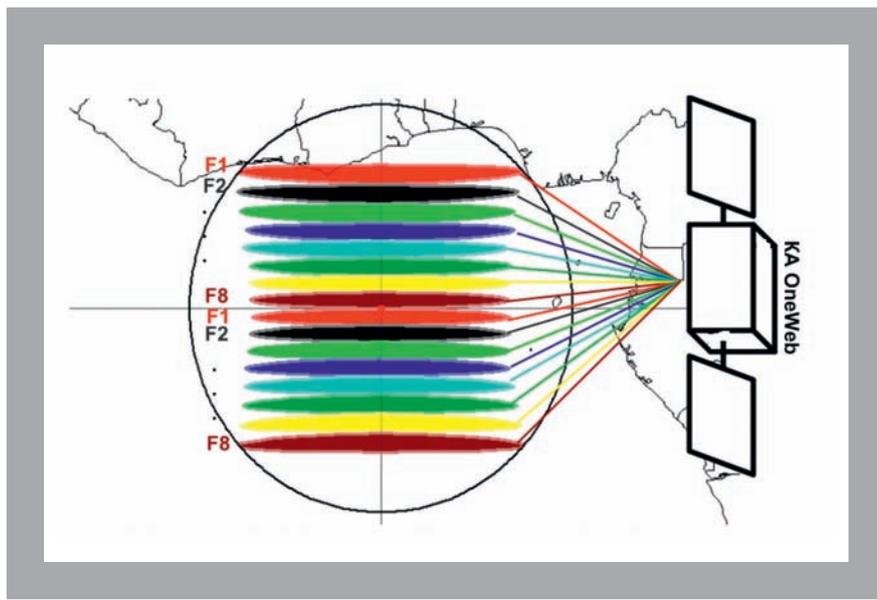


Рис. 2

Вид на небесную сферу в топоцентрической системе координат при положении наблюдателя в Санкт-Петербурге

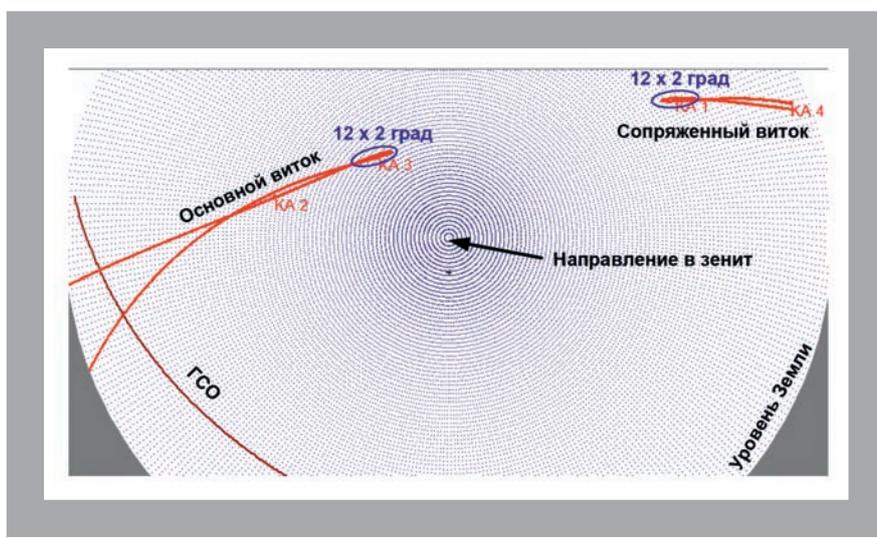


Рис. 3

пресс-РВ”, использующей орбиты типа “Тундра” (при моделировании не учитывались особенности многолучевого формирования рабочей зоны) и “Молния”[8]. В данной статье рассматривается проблема воздействия помех, создаваемых спутниками системы LEO-HTS, на приемные абонентские терминалы спутниковой системы НЕО-HTS с учетом особенностей формирования многолучевой рабочей зоны. Моделирование конфликтной ситуации в радиочастотном спектре выполнено с учетом предполагаемого баллисти-

ческого построения системы OneWeb (LEO-HTS) и системы “Экспресс-РВ” (HEO-HTS), использующей орбиты типа “Молния”.

Исходные параметры, принятые при моделировании

В системах LEO-HTS формируются многолучевые рабочие зоны. Причем в каждом луче используется часть общей полосы радиочастот, выделенной системе, но идентичная поляризация во всех лучах (например, абоненты принимают сигналы на правой поляризации, а передают на левой во всех лучах, или наоборот). В системах НЕО-HTS также формируются многолучевые рабочие зоны. Причем параметры спутниковой группировки обычно стремятся выбрать такими, чтобы наблюдался эффект квазигеостационарности [9], который в идеале позволяет применять абонентские терминалы с небольшими антеннами без сканирования луча или с минимальными углами сканирования. При этом поляризационный план спутника НЕО-HTS может предусматривать и левую, и правую поляризацию абонентских лучей. Но очевидно, что для обеспечения развязки абонентских лучей LEO-HTS и НЕО-HTS они должны быть ортогональны (развязка лучей в этом случае бесконечно большая). Однако идеальная круговая поляризация недостижима. В дальнейшем следует принять наихудшее значение коэффициента эллиптичности и борта, и земли. Например, при коэффициенте эллиптичности в пределах 0,7–0,8 развязка ортогональных сигналов с эллиптической поляризацией [10] составит $A_p = 12,3–16,2$ дБ (ориентация поляризационных эллипсов изменяется при движении спутника по орбите, от частоты и погодных условий, поэтому принят наихудший случай –

Радиотехнические параметры абонентских лучей

Параметр	OneWeb	“Экспресс-РВ”
Полоса радиочастот абонентских лучей на линии КА – Земля	10,7–12,7 ГГц	10,97–11,7 ГГц
Полоса частот абонентского луча	250 МГц	54 МГц
Абонентские лучи спутника	16 лучей 48 град. x 3 град. каждый	12 лучей 2,75 град. x 2,75 град. каждый
ЭИИМ в направлении границы луча	34,6 дБВт	54 дБВт
Спектральная плотность ЭИИМ в направлении границы луча	-13,4 дБВт/4кГц	-12,7 дБВт/4 кГц
Поляризация в абонентских лучах	Правая	Левая

Таблица 1



Пересечение спутником OneWeb угловых областей положения КА «Экспресс-РВ»

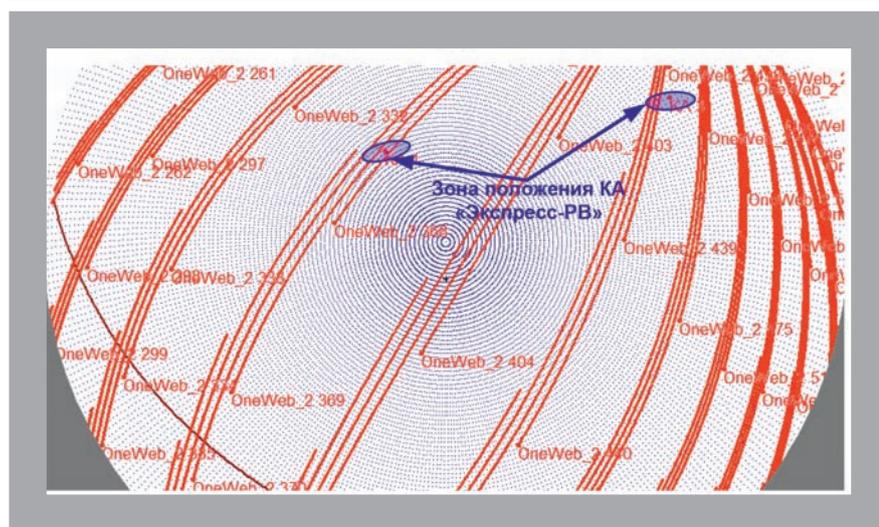


Рис. 4

совпадение больших осей поляризационных эллипсов). Но, кроме того, имеет место существенное снижение коэффициента эллиптичности в угловых направлениях, отличных от осевого направления излучения.

По данным [11] существенное уменьшение коэффициента эллиптичности наблюдается за пределами ширины диаграммы направленности. В максимумах первых двух боковых лепестков коэффициент эллиптичности снижается в 1,2 раза для неосесимметричных антенн. Соответственно, ориентироваться на уровень поляризационной развязки более $A_p = 10-12$ дБ нет оснований. С целью исключения неоднозначности получаемых при моделировании отношений полезного сигнала к помехе (C/I) за счет изменения поляризационных параметров прием, что поляризационной развязки лучей нет, но затем учтем ее в итоговом бюджете.

В табл.1 представлены принятые радиотехнические параметры абонентских лучей, а в табл. 2 – баллистические параметры спутниковых группировок.

На рис. 1 представлен типовой сценарий возникновения помех, обусловленных совместной работой двух систем. Как видно из рисунка, на вход демодулятора абонентской станции сети “Экспресс-РВ” будет поступать не только излучение сигнала (C), но и суммарное помеховое излучение (I) от всех ближайших спутников системы OneWeb.

Каждый спутник OneWeb формирует 16 пространственно разнесенных в направлении “север/юг” лучей, причем два ближайших к местной вертикали (MV) луча смещены относительно MV на 1,6 град. Все последующие лучи имеют фиксированный угловой разнос между собой в 3,1 град.[12].

Баллистические параметры спутниковых группировок

Параметр	OneWeb	“Экспресс-РВ”
КА в спутниковой группировке	648	4
Орбиты	Полярные: наклонение 87,9 град. 18 плоскостей по 36 КА; между плоскостями 10 град.	“Молния”: наклонение 62,8 град. Эксцентриситет – 0,722; Долгота апогея – 75 град. в.д.; Аргумент перигея (270 ± 1) град.; Орбиты разнесены на 90 град.
Рабочий участок высот орбиты	1200 км	от 39 500 км min 30 000 км

Таблица 2

Трансформация рабочих зон двух абонентских лучей шести спутников OneWeb

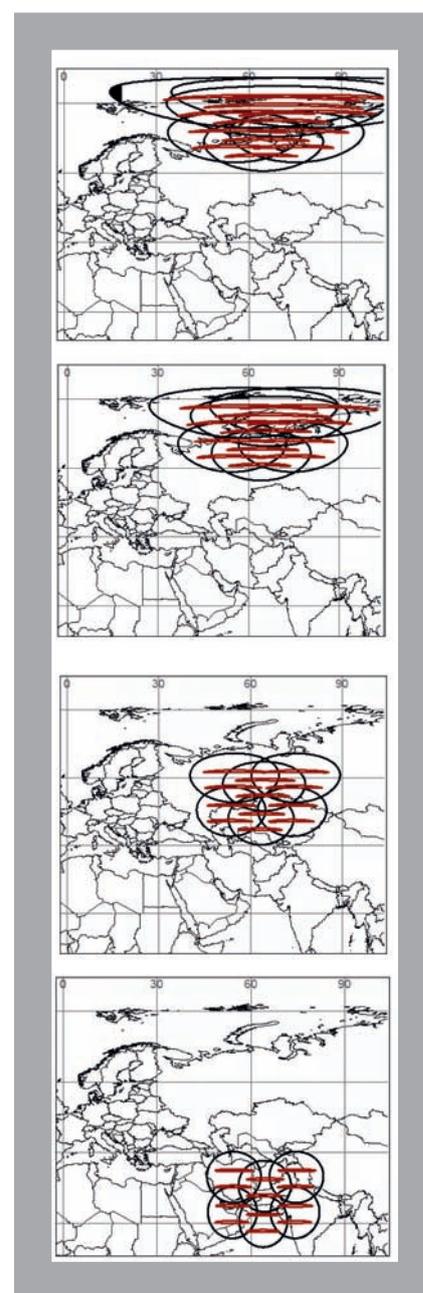


Рис. 5

Полосы частот лучей спутника OneWeb чередуются таким образом, что частоты повторяются два раза. Частотно-территориальный план спутника OneWeb представлен на рис. 2. Соответственно, на приемный терминал спутника “Экспресс-РВ” будут одновременно воздействовать два луча спутника OneWeb. Каждая такая пара лучей имеет свое пространственное положение, которое будет зеркально меняться для восходящих и нисходящих

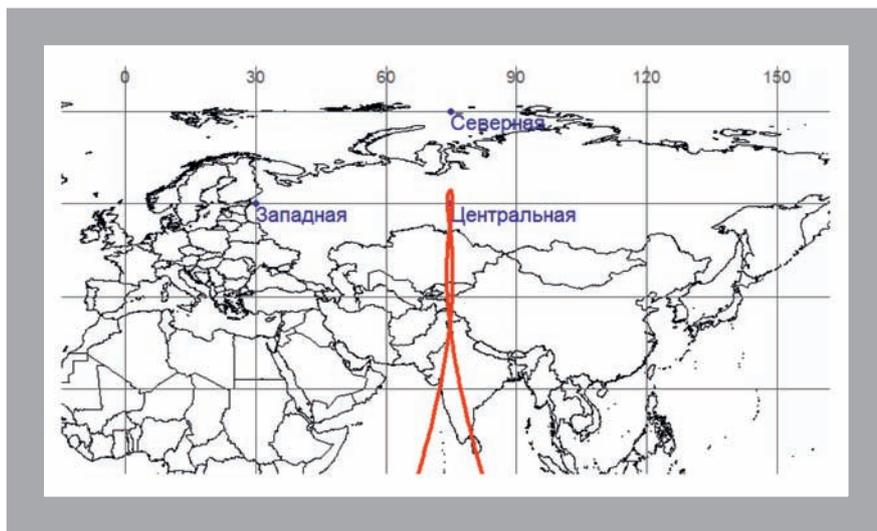


Рис. 6

щих спутников OneWeb.

Исследуемым параметром является отношение полезного сигнала (C), принимаемого абонентской станцией “Экспресс-РВ”, к помехе (I), создаваемой двумя лучами спутников OneWeb с совпадающими по частотам лучами, но без учета поляризационной развязки.

В качестве модели диаграммы направленности антенн абонентских станций использовалась модель, представленная в Рекомендации МСЭ-R S.1428.

Результаты моделирования

Моделирование работы системы “Экспресс РВ” показывает, что границы сканирования луча антенн абонентских терминалов в зависимости от их географического положения варьируется в небольших пределах и не выходят за 12 град. \times 2 град. (рис. 3). Это справедливо как для основного, так и для сопряженного витков (рис. 3). Однако большая ось этого углового эллипса имеет значительное изменение наклона. Таким образом, приемная абонентская антенна без сканирования может иметь усиление не более примерно 30 дБ, а размер ее апертуры примерно 61 \times 11 см. Сканирование в одной плоскости \pm 6 град. допустимо для антенн с диаметром раскрытия до 0,9–1 м, т.е. максимальное усиление примерно до 38дБ.

Пересечение спутником OneWeb

областей положения КА “Экспресс-РВ” может приводить к возникновению наиболее сильных помех (рис. 4), поскольку приемные антенны ориентированы в эти области. Лучи OneWeb создают зоны помех. На рис. 5 иллюстрируется положение и изменение этих зон для двух лучей, принятых при моделировании, на примере шестерки спутников OneWeb. Уровень помех в значительной степени зависит от географического расположения абонентской станции “Экспресс-РВ” и стратегии выключения смежных спутников OneWeb, поэтому выявить общие закономерности проблематично. Количественная зависимость C/I также зависит от расположения приемного абонентского терминала и размеров его антенны. Для анализа ЭМС между системами “Экспресс-РВ” и OneWeb было проведено моделирование совместной работы двух систем. Контроль уровней сигналов и помех осуществлялся в трех характерных точках: “Северная” (80 град. с.ш., 75 град. в.д.), “Центральная” (60 град. с.ш., 75 град. в.д.), “Западная” (60 град. с.ш., 30 град. в.д.). Взаимное положение трассы спутника “Экспресс-РВ” и контрольных точек представлено на рис. 6. Результаты в виде зависимости P от отношения C/I для антенн с разным диаметром представлены на рис. 7. Под P понимается доля времени (%) на шестичасовом интервале (временной интервал моделирования), в течение

которого значение C/I ниже заданного уровня.

Качественный вид помех, воздействующих на приемные абонентские терминалы с антенной 0,35 м системы “Экспресс-РВ” на шестичасовом интервале, показывается на рис. 8 для контрольной точки “Северная”. Каждый график иллюстрирует характер помех на разных частотах, соответствующих конкретным парам лучей спутника OneWeb. Из восьми пар лучей спутника OneWeb, использующих одинаковые частоты, на рис. 8 представлены результаты моделирования только для четырех. На рис. 8а и 8б изображена работа пар лучей (1 и 9) и (8 и 16). В этой конфигурации лучи 1 и 16 отклонены на угол 23,5 град. от местной вертикали в северном и южном направлениях соответственно, а лучи 8 и 9 — на 1,6 град. от местной вертикали. На рис. 8в и 8г. представлена работа пар лучей (4 и 12) и (5 и 13). В этой конфигурации 4-й и 13-й лучи отклонены на угол 14,1 град. от местной вертикали в северном и южном направлениях соответственно, а лучи 5 и 12 — на 11 град. от местной вертикали. Если принять, что указанная конфигурация лучей соответствует движению спутника в нисходящем потоке, то через некоторое время ситуация изменится на противоположную, поскольку в контрольной точке движение спутников уже будет в восходящем потоке. В этом случае спутник как бы развернется на 180 град. относительно оси местной вертикали. При этом из-за несимметричности угловых смещений лучей одного номинала частоты относительно местной вертикали картина помех может сильно измениться. В частности, на рис. 8 хорошо видно, что разные пары лучей, имеющие разные угловые разносы, по-разному воздействуют на приемник абонентской станции. Например, на рис. 8а видно, что при положении абонентской станции системы “Экспресс-РВ” в точке “Северная” угловая дискриминация между электрическими осями абонентской станции и луча проходящего над ней спутника OneWeb минимальна, что приводит к существенному падению отношения C/I . При этом для любой точки в пределах зоны обслуживания си-



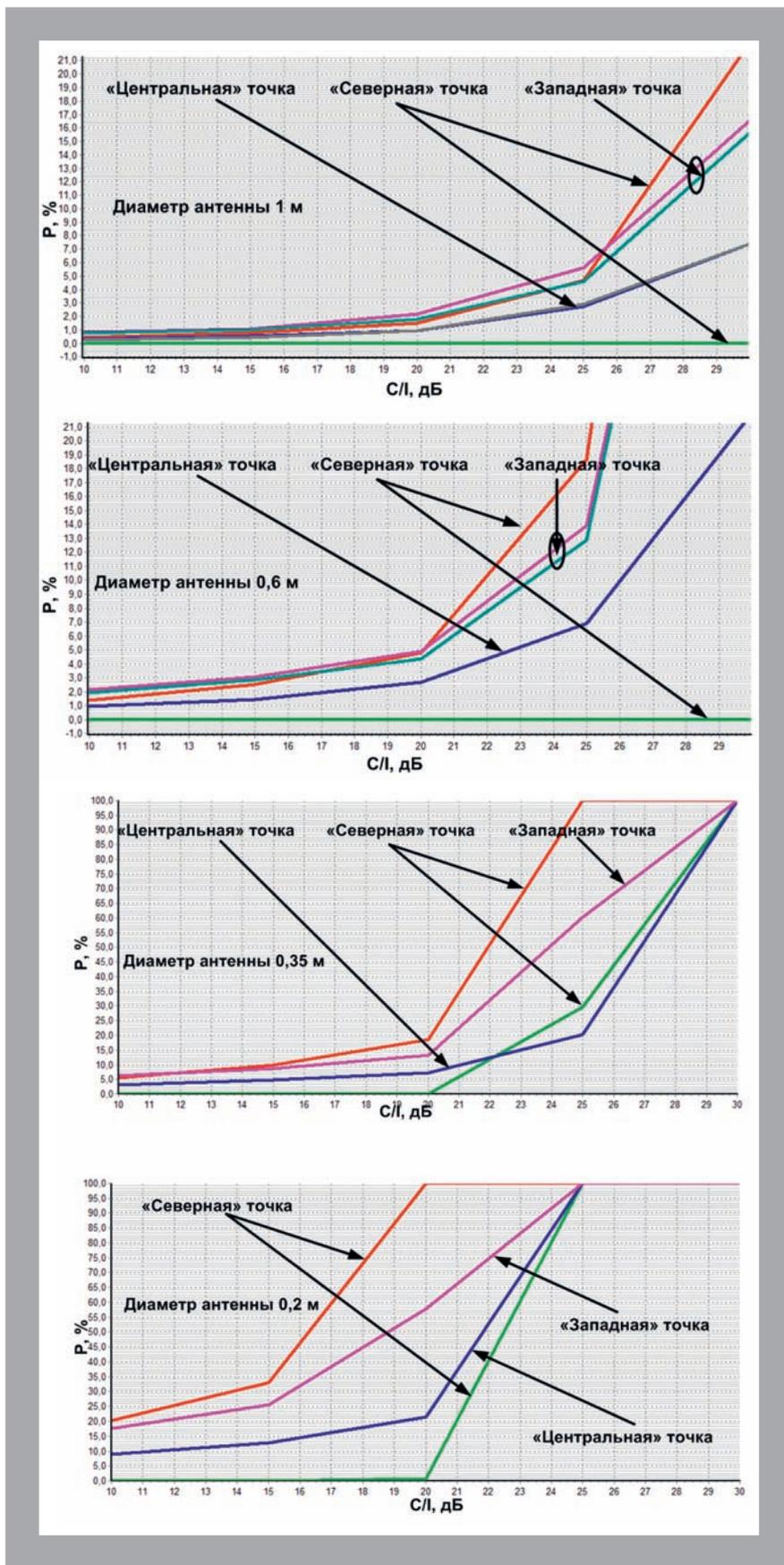


Рис. 7

стемы «Экспресс-РВ» помеха формируется только одним из лучей спутника OneWeb, в то время как второй луч практически не оказывает существенного воздействия.

Значения C/I, представленные на рис. 8, не учитывают дополнительную поляризационную развязку $A_{пол.}$. В итоге для оценки допустимого порогового C/N (ограничивает выбор сигнально-кодовых конструкций) можно использовать соотношение $C/N < C/I + A_{пол.} - 12,2$ дБ, которое следует из рекомендации S.741.

Выводы

Разработанная баллистическая модель позволяет анализировать негеостационарные многоспутниковые системы типа LEO/МЕО/НЕО-НТС, оценить требования к абонентским терминалам и обеспечению их электромагнитной совместимости.

На примере проектных параметров системы «Экспресс-РВ» (орбиты типа «Молния») показано, что приемные абонентские терминалы могут иметь антенны без сканирования, если их ширина ДН не менее 12 град. x 2 град., что соответствует максимальному размеру антенны примерно 0,61x0,11 м (эквивалентная круглая антенна 0,35 м) на частоте 11 ГГц.

Представленные оценки показывают, что значение C/I существенно зависит от географического положения приемной антенны и ее размера. Чем больше размер антенны, тем меньше временной интервал воздействия помех, но достичь высоких значений коэффициента готовности каналов невозможно.

Оценки C/I для приемного абонентского термина «Экспресс-РВ», расположенного на территории России, в том числе в Арктическом регионе, иллюстрируют наличие существенного воздействия помех от спутников OneWeb, даже с учетом поляризационной развязки, снижающей их уровень на величину $A_{пол.}$. Парирование помех частично возможно за счет применения в системе «Экспресс-РВ» сигнально-кодовых конструкций, которые имеют низкое пороговое значение C/N.

Литература:

1. Анпилогов В.Р., Урличич Ю.М. Тенденции развития спутниковых

54

Отношение С/П на входе приемника абонентского терминала с антенной 0,35 м системы “Экспресс-РВ” на шестичасовом интервале на частотах разных лучей спутников системы OneWeb:

- а) помехи от пары лучей (1 и 9);
- б) помехи от пары лучей (8 и 16);
- в) помехи от пары лучей (4 и 12);
- г) помехи от пары лучей (5 и 13)

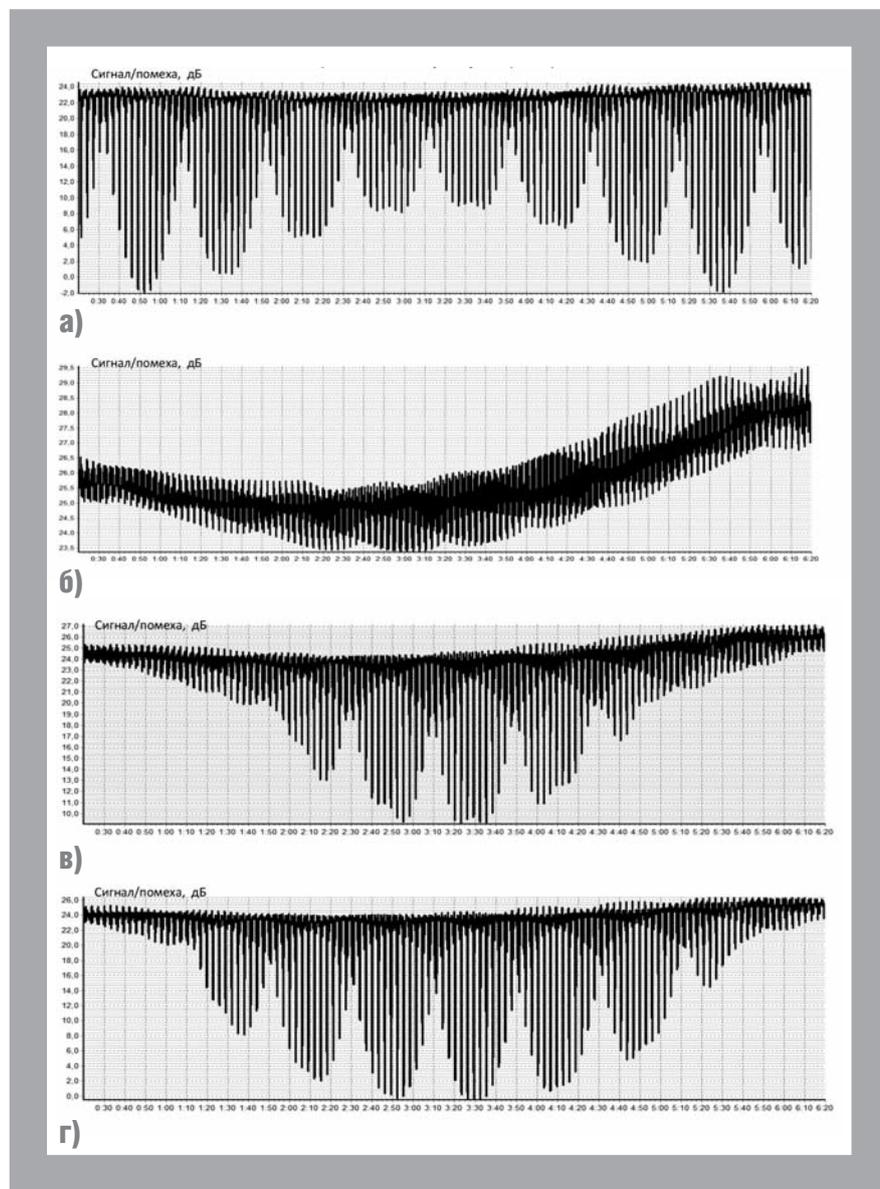


Рис. 8

технологий и критерии оценки их технико-экономической эффективности // Технологии и средства связи. — 2016. — № 2. — С. 46–53.

2. Чекушкин Ю., Зимин И., Яковец А. Обзор систем в Ku- и Ka-диапазонах, созданных на основе спутников HTS, и анализ перспективных проектов // Технологии и средства связи. — 2017. — № 6, специальный выпуск “Спутнико-

вая связь и вещание — 2018”. — С. 80–83.

3. Анпилогов В.Р., Шишлов А.В., Эйдуc А.Г. Анализ систем LEO-HTS и реализуемости фазированных антенных решеток для абонентских терминалов // Технологии и средства связи. — 2015. — № 6–2, Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание — 2016”. — С. 14–26.

4. Анпилогов В. О фазированных антенных решетках Ka-диапазона на основе метаматериала // Технологии и средства связи. — 2015. — № 5. — С. 66–67.

5. Анпилогов В. Проблемы реализации и имплементации систем LEO-HTS // Технологии и средства связи. — 2016. — № 6–2, специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание — 2017”. — С. 30–34.

6. Анпилогов В., Гриценко А. Результаты моделирования многоспутниковых систем связи на низких и высокоэллиптических орбитах и оценка помеховой обстановки при совместном использовании полос радиочастот // Технологии и средства связи. — 2017. — № 6–2, специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание — 2018”. — С. 42–46.

7. Kirtay S. Broadband satellite system technologies for effective use of the 12–30 GHz radio spectrum // Electronics & Communication Engineering Journal, 2002, April. P.79–88.

8. Локшин Б. Негеостационарные системы фиксированной спутниковой связи: состояние и перспективы развития // Электросвязь. — 2018. — № 2. — С. 30–39.

9. Степанов А., Акимов А., Гриценко В., Чазов О. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи // Технологии и средства связи. 2015. — № 6–2, специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание — 2016”. — С. 72–87.

10. Sichak W., Millazo S. // Proc. IRE, 36, № 8, 1948, pp. 997–1001 (сб. статей Антенны эллиптической поляризации, под редакцией к.т.н. Шпунтова А.И., 1961. — С. 90–102).

11. Результаты моделирования с использованием программного комплекса “Дизайн” (АО Радиофизика), исполнитель И.Л. Виленко.

12. Draft revision ECC Report 271 Compatibility and sharing studies related to NGSO satellite systems operating in the FSS bands 10.7–12.75 GHz (space-to-Earth) and 14–14.5 GHz (Earth-to-space).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (договор № 03.G25.31.0269) в рамках реализации постановления Правительства РФ № 218

