

Обсуждаются две основные проблемы при создании систем LEO-HTS: дешевый абонентский сегмент для индивидуального использования и ЭМС со спутниковыми системами на ГСО и ВЭО. Анализ сведений о возможности создания “дешевых” ФАР (АФАР) в Ku/Ka-диапазонах не позволяют надеяться на достижение цены индивидуального абонентского терминала в \$100–300, заявляемых инвесторами проектов OneWeb и SpaceX.

Анализ проблем ЭМС систем LEO-HTS показывает, что проблема не только в решении этой задачи применительно к геостационарным системам FSS и BSS. Кроме того, будет ограничена возможность использования орбит типа ВЭО. Например, после развертывания системы OneWeb будет исключена эта возможность в Ku-диапазоне, поскольку превышение помех над полезным сигналом может достигать 22,6 дБ, а превышение допустимых в регламенте радиосвязи норм будет наблюдаться практически для 100% времени.

Проблемы реализации и имплементации систем LEO-HTS

Problems of realization and implementation LEO-HTS systems



Валентин Анпилов,

Заместитель генерального директора
ЗАО “ВИСАТ-ТЕЛ”, к.т.н., доцент
Valentin Anpilogov,

Deputy General Director
JSC “VSAT-TEL”, Ph.D.,
associate professor

Ключевые слова:

**негеостационарные системы связи,
НКО, ВЭО, ГСО, ЭМС**

Keywords:

**nongeostationary communications
system, LEO, HEQ, GEO, EMC**

The article discusses two main problems when creating LEO-HTS systems: Cheap subscriber segment for individual use and EMC of satellite GEO and HEO systems.

An analysis of the possibility of establishing a "cheap" phased array antennas in Ku / Ka-band does not allow to hope for achievement the price of the individual user terminal 100-300 \$, claimed by SpaceX and OneWeb investors.

Analysis of EMC problems for LEO-HTS systems shows that the problem is not only respect to geostationary FSS and BSS systems. Moreover, the use HEO orbits will be limited. For example, after deployment OneWeb system it will be excluded possibility HEO in the Ku-band, as the excess interference for the useful signal can be up to 22.6 dB and allowable in the Radio Regulations the rules will be not observed for almost 100% of the time.

Анализ использования различных типов орбит, в частности низких круговых полярных орбит, для создания глобальных систем связи и передачи дан-

ных на основе многоспутниковых группировок представлен в ряде публикаций [1]. Реализованы две системы с использованием полярных орбит: система персональной спутниковой связи Iridium и спутни-



ковая система передачи данных “Гонец”. Сегодня особый интерес представляют новые сверхинформативные глобальные системы LEO-HTS, поскольку их эффективность оценивается как более высокая даже по сравнению с системами HTS на ГСО [2]. При этом системы LEO-HTS (в отличие от систем HTS) обеспечивают глобальность обслуживания, а задержка при распространении сигнала в 30 раз меньше, чем при использовании спутника на ГСО. Однако переход к практической реализации систем LEO-HTS требует предварительного анализа целого ряда проблем. Напомним, что еще в середине 1990-х гг. были предприняты попытки создания подобных систем [3, 4]. Наиболее известна система Teledesic [5]. Все проекты середины 1990-х гг. [4], подобные современным проектам LEO-HTS, не увенчались успехом. В качестве одной из причин инвесторы современных систем LEO-HTS отмечают высокую стоимость создания предыдущих систем (например, стоимость системы Teledesic примерно \$9 млрд при эквивалентной стоимости одного спутника примерно \$10 млн, по исходному проекту \$7–8 млн [5]) и абонентского сегмента (<https://www.linkedin.com/pulse/can-spacex-succeed-leo-constellation-phil-thomas>). Предполагалось,

что стоимость самого простого абонентского терминала Teledesic будет составлять \$1 тыс. (<http://www.slideshare.net/abinas1/teledesic-14096612>).

В процессе проектирования этих систем были начаты работы по решению проблем ЭМС, но с закрытием проектов эти работы были прекращены. Хотя в регламенте радиосвязи появились нормы на допустимые уровни плотности потока помех (статья 22 РР).

Ценовые проблемы

В 2015 г. инвесторы новых систем LEO-HTS заявили, что стоимость производства спутников LEO-HTS сегодня можно снизить в 20 раз (т.е. стоимость отдельного спутника \$500 тыс. и ниже), а стоимость абонентского терминала планируется в пределах \$100–300 для системы SpaceX и \$250 для системы OneWeb [6].

Столь рекордное снижение стоимости спутников планируется за счет серийности их производства. Так, компания OneWeb в апреле 2015 г. объявила о планах создания своего завода для серийного производства спутников (<http://oneweb.world/press-releases/2016/oneweb-satellites-unveils-the-worlds-largest-high-volume-satellite-manufacturing-facility>).

Надежды на снижение стоимости абонентских терминалов тоже связаны с серийностью производства фазированных антенных решеток для абонентских терминалов. При этом снижение стоимости абонентского терминала до \$100–300 по заявлениям инвесторов является одним из наиболее существенных факторов для коммерческого успеха проектов LEO-HTS.

В [7] представлен анализ параметров систем OneWeb и SpaceX с целью оценки реализуемости фазированных антенных решеток абонентских терминалов. Результаты этого анализа показывают, что для системы OneWeb себестоимость антенной системы абонентского терминала составит \$7700 тыс. (ФАР передающая 18x18 см, АФАР приемная 36x36 см), а для системы SpaceX примерно \$750 (ФАР передающая 13x13 см, АФАР приемная 22x22 см). Эти данные показывают, что заявленная стоимость абонентского терминала \$100–300 недостижима в обозримой перспективе.

Такой вывод косвенно подтверждают и сообщения компаний Kymeta, Phasor и C-Com Satellite Systems Inc., которые стремятся создать фазированные антенные решетки для абонентских терминалов систем GEO и LEO-HTS в Ku и Ka-диапазонах.

Иллюстрация решения проблемы ЭМС OneWeb и систем связи и вещания на ГСО

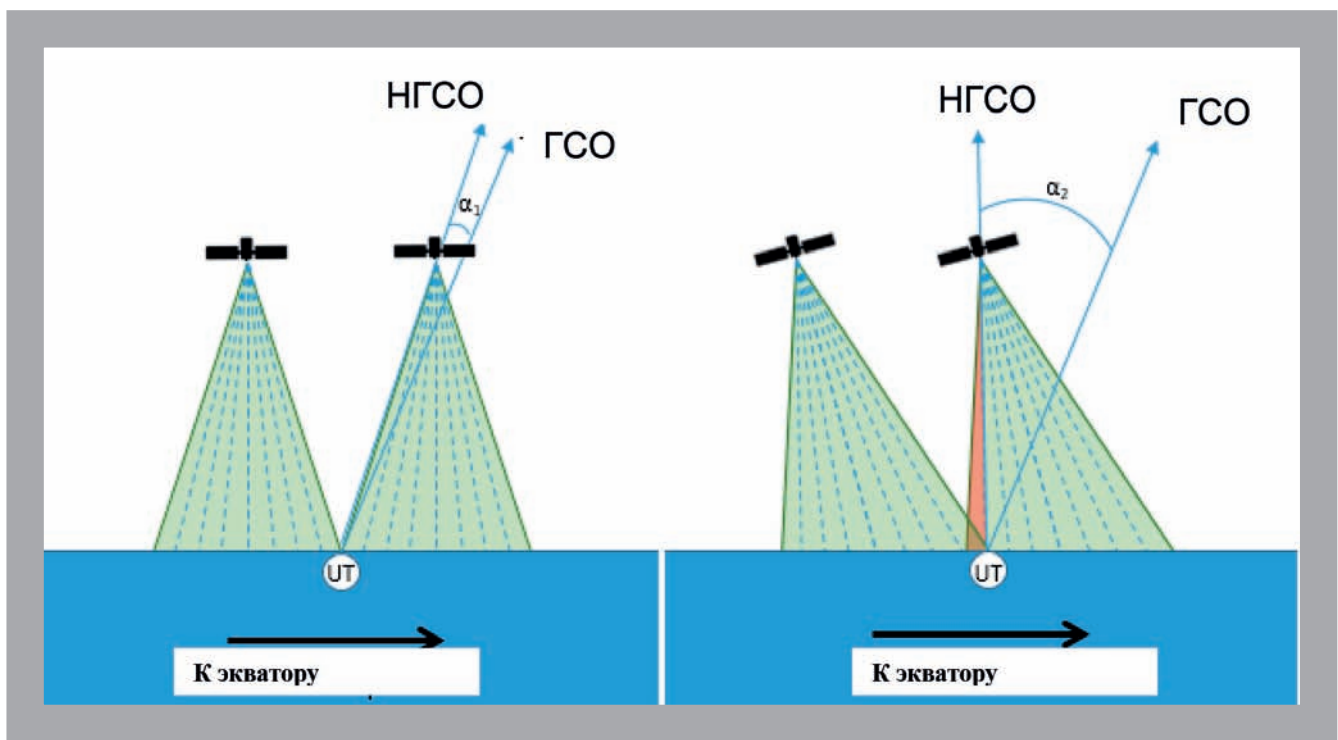


Рис. 1

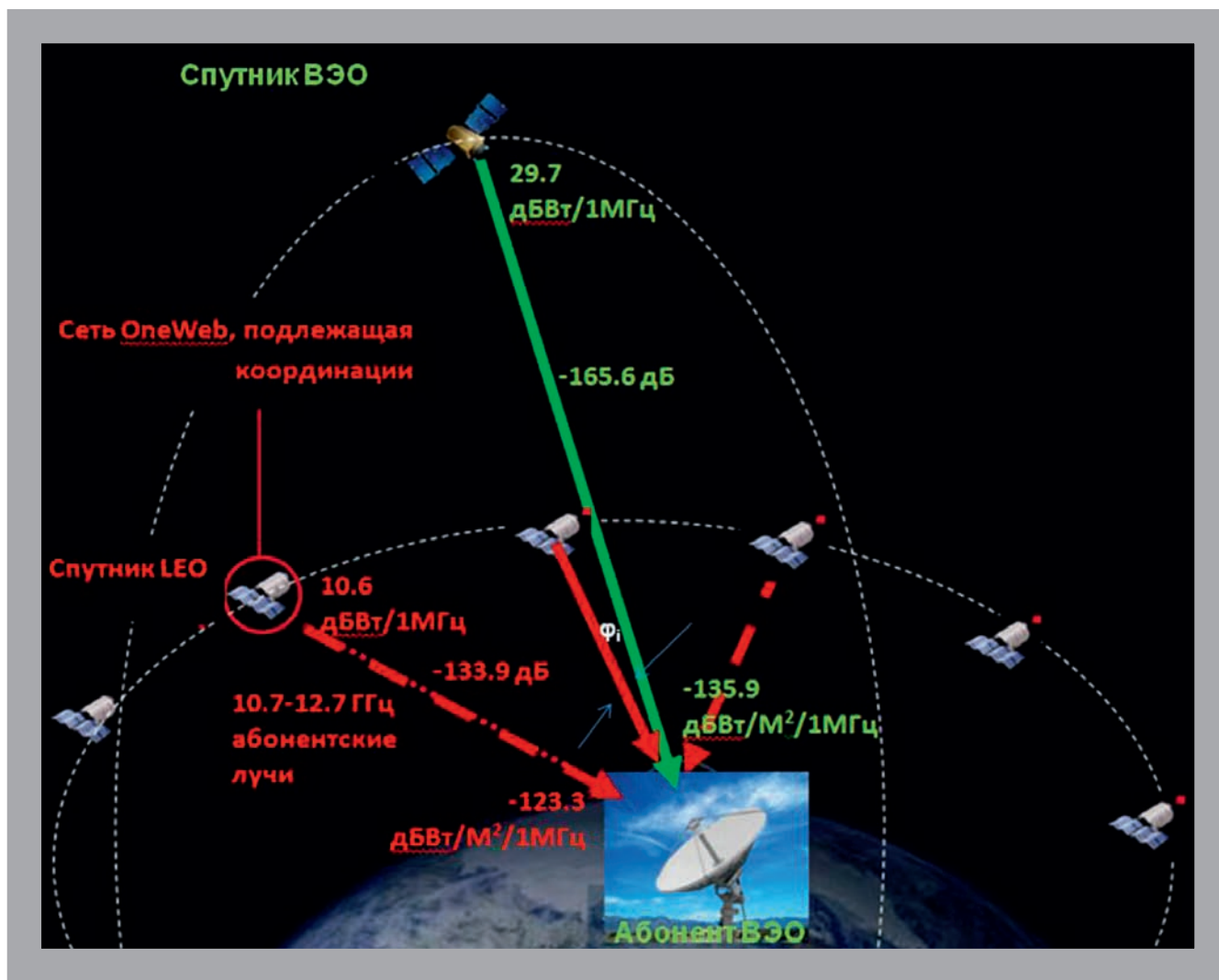


Рис. 2

Начиная примерно с 2013 г. идет активный поиск технологических решений реализации ФАР и АФАР для систем спутниковой связи в Ku и Ka-диапазонах, но по состоянию на 2016 г. реальные образцы, отвечающие заявлениям инвесторов систем LEO-HTS, не представлены. В основном сообщения касаются перспектив создания относительно дорогих фазированных антенных решеток абонентских терминалов коллективного пользования для подвижных средств. Компания NSR прогнозирует, что рынок таких фазированных антенных решеток к 2025 г. достигнет годовых продаж в объеме \$710 млн. Однако сведений о создании ФАР (АФАР), приемлемых для индивидуальных абонентских терминалов, пока нет. Например, в докладе [8] на конференции IEEE International Symposium on Phased

Array Systems and Technology в 2016 г. упоминается, что компания Kymeta разрабатывает антенны типа ФАР с электронным управлением лучом, цена которой для приемо-передающего режима не менее \$2 тыс. (\$1 тыс. за антенну). Планы выхода на рынок у компании намечены на 2017 г. (ранее планировался 2015 г.)

Проблемы ЭМС для систем ГСО

Спутники LEO-HTS создают помеху для земных станций, работающих в сетях FSS и BSS. Системы на основе спутников на негеостационарных орбитах всегда вторичны по отношению в системам на основе ГСО спутников.

В ряде публикаций [7, 9–11] отмечены проблемы обеспечения ЭМС между системами LEO-HTS (OneWeb в частности) с системами, работающими со

спутниками на ГСО. Особо значима эта проблема в диапазоне частот Ku. Нормы на допустимые помехи для защищаемых земных станций систем связи и вещания установлены регламентом радиосвязи в ст. 22. После многих критических замечаний и запросов в FCC ряда компаний о том, что спутники OneWeb и SpaceX создадут значительные помехи для станций приема информации с геостационарных спутников (выше норм, допустимых в регламенте радиосвязи), компания OneWeb предложила решить эту задачу путем подворота спутников по тангажу в период их пролета в экваториальной зоне. До момента подлета спутника к экваториальной зоне космический аппарат переориентируется по тангажу примерно на 10 град. с целью обеспечения необходимого угла α (см. рис. 1). Затем после пролета экватора спутники подворачиваются по тангажу



в противоположную сторону. В момент пересечения плоскости экватора все лучи спутника выключаются. В пределах экваториального пояса (от 15 град. с.ш. до 15 град. ю.ш.) можно допустить частичное выключение лучей, что требует дополнительного моделирования. Такое решение принято, поскольку каждый спутник OneWeb формирует фиксированную неуправляемую группировку из 16 лучей. Решение о состоятельности этого способа обеспечения ЭМС между системой OneWeb и системами, работающими со спутниками связи и вещания на ГСО, будет принято комиссией FCC во второй половине 2017 г. (в ноябре 2016 г. был последний срок принятия претензий): https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-341034A1.pdf).

Проблемы ЭМС для систем ВЭО

Очевидно, что и для систем, проектируемых на основе спутников на высокоэллиптических орбитах, проблема ЭМС не менее актуальна. Но задача усложняется многочисленностью типов орбит и изменением углового направления приемной антенны абонентского терминала, на который воздействует помеха.

Эквивалентная спектральная плотность ЭИИМ помехи, создаваемой спутником LEO-HTS, в фиксированный момент времени

$$W_i = K_{Гi} P_i G_t(\theta_i) / 4\pi N_i^2$$

$K_{Гi} = G_r(\varphi_i) / G_{r \max}$ – коэффициент пространственной селекции помехи за счет приемной антенны; $\theta_i = \theta_i(t)$ угол между осевым излучением луча LEO-HTS и направлением на приемную станцию спутника ВЭО;

Огибающая ДН приемной антенны 0,4 м в Ku-диапазоне (рек. S.1428 (для FSS) и ВО.1443 (для BSS))

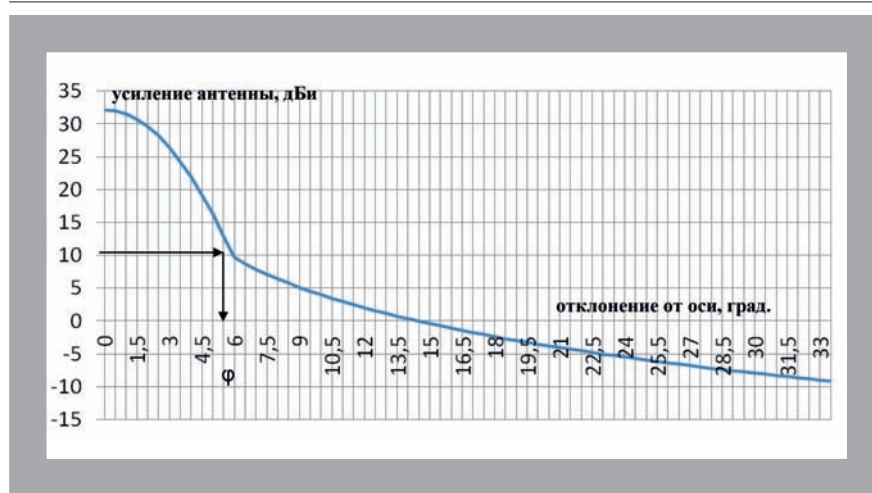


Рис. 3

$\varphi_i = \varphi_i(t)$ угол между направлением приемной станции на спутник ВЭО и направлением на спутник LEO-HTS; $G_t(\theta_i)$ – коэффициент усиления абонентского луча спутника LEO-HTS; P_i – спектральная плотность мощности передатчика абонентского луча спутника LEO-HTS в нормированной полосе частот; $N_i = N_i[t,(\psi; \lambda)]$ – наклонная дальность между спутником LEO-HTS и приемной станцией, работающей со спутником ВЭО; $G_r(\varphi_i)$ – коэффициент усиления антенны приемной станции, работающей со спутником ВЭО, в направлении на спутник LEO-HTS; $G_{r \max}$ – коэффициент усиления антенны в максимуме приемной станции, работающей со спутником ВЭО; $(\psi; \lambda)$ – географические координаты (широта, долгота) размещения приемной станции, работающей со спут-

ником ВЭО; i – номер спутника LEO-HTS; t – текущее время без учета задержек распространения сигналов на линиях LEO-HTS и ВЭО. Результат оценки уровня помехи в Ku-диапазоне, создаваемой спутником OneWeb, для земных станций приема информации со спутника на орбите типа “Тундра” показан на рис. 2. Параметры спутника OneWeb и приемной земной станции, работающей со спутником на орбите “Тундра” (приняты примерные значения на основе данных [12]), представлены в таблице 1). Огибающая диаграммы направленности иллюстрируется на рис. 3 для приемной антенны эквивалентного размера 0,4 м на частоте 12 ГГц (рек. S.1428 (для FSS) и ВО.1443 (для BSS)). На рис. 2 показаны оценки уровня сигнала (С), прини-

Параметры OneWeb и “Экспресс РВ”

Параметры канала КА-Земля спутника OneWeb, создающего помеху		
Высота круговой орбиты, км	1200	Максимальная наклонная дальность примерно 1400 км
Число спутников	648	Активные спутники
Число орбитальных плоскостей	18	
Число спутников в орбитальной плоскости	36	
Спектральная плотность ЭИИМ абонентского луча, дБВт/1 МГц	+10,6	$\max P_i G_t(\theta_i)$
Ширина ДН передающих лучей (16 лучей), град.	48x48	По уровню -3 дБ. 16 лучей 3x48 град.
Параметры канала КА-Земля спутника на ВЭО, на которые воздействует помеха		
Высота орбиты в апогее, км	47095	Максимальная наклонная дальность примерно $N_i = 54\ 000$ км
Спектральная плотность ЭИИМ, дБВт/1МГц	+29,7	$P G(\theta_{\max})$ на границе локальной зоны отклоненного луча в квазилинейном режиме
Ширина ДН передающего луча, град.	1,7x1,7	По уровню -3 дБ
Приемная антенна, м	0,4	Ширина ДН по уровню минус 3 дБ примерно 4–4,5 град. Усиление примерно $G_{r \max} = 32$ дБ, (см. рис. 3)
Сканирование луча приемной антенны, град.	+/-12,5	При трех спутниках на орбите “Тундра” [1]

Таблица 1

маемого на абонентской линии ВЭО-Земля и уровня помехи (I), генерируемой спутником OneWeb. Помеха даже от одного спутника OneWeb на 12,6 дБ превышает уровень принимаемого сигнала, т.е. $I/C = +12,6$ дБ. Очевидно, что в таких условиях прием информации со спутника ВЭО невозможен. Для обеспечения приема следует снизить помеху примерно на 22 дБ, т.е. отношение должно быть $I/C < -10$ дБ. В этом случае снижение C/N на приеме может быть приемлемым, примерно не более 0,3 дБ. Однако, как следует из рис. 3, это достигается, если угол между осевым излучением луча OneWeb и направлением на приемную станцию (антенна 0,4 м) спутника ВЭО будут более 6 град., т.е. $\theta_i \geq 6$ град. для достижения $K_{r1} = G_r(\varphi_i) / G_r \max = 22$ дБ. Учитывая многочисленность спутников, которые имеют угловой разнос в орбитальной плоскости и разнос в пространстве орбитальных плоскостей примерно 10 угловых градусов, выполнить это условие в любой момент времени невозможно. Практически постоянно для любой широты и долготы приемной станции, работающей с ВЭО, будет наблюдаться минимум один спутник OneWeb в угловом конусе при вершине 12 град. А в угловом конусе при вершине 25,5 град., т.е. для углов сканирования приемной антенны (слежение за спутниками на орбите “Тундра”), всегда будет находиться четыре спутника OneWeb (значение помех будет немногим больше, чем от одного спутника). Естественно, можно увеличивать пространственную селекцию за счет увеличения размера приемной антенны, но это резко снижает привлекательность систем на основе орбит ВЭО.

Естественно, что для всестороннего анализа ЭМС системы LEO-HTS (OneWeb в частности) и систем ВЭО необходимо многократное моделирование различных ситуаций в зависимости от географических координат приемной станции, размера ее антенны и возможных изменениях энергетики радиолиний (за счет погодных условий и различных вариантов загрузки спутника).

Заключение

1. Одной из существенных проблем при реализации систем на основе LEO-HTS является отсутствие эффективных технологических решений

создания дешевых ФАР (АФАР) с электронным сканированием луча. Причем в обозримой перспективе пока нет оснований надеяться на решение этой задачи применительно к абонентским терминалам систем спутниковой связи в Ku- и Ka-диапазонах. Но исследовательские работы в этом направлении необходимы.

2. Упрощенный анализ проблем ЭМС систем LEO-HTS показывает, что нет адекватных решений, которые позволяют использовать эти системы с иными спутниковыми сетями в совместных полосах радиочастот. Например, создание системы OneWeb (как любой иной подобной системы) практически закрывает возможность реализации систем на основе спутников ВЭО в диапазоне частот 10,7–12,7 ГГц. Учитывая, что в Федеральной космической программе России рассматривается несколько перспективных проектов с использованием орбит ВЭО (“Экспресс РВ”, “Полярная Звезда”, в том числе при реализации проектов для Арктики [13–15]), проблема ЭМС с проектируемыми системами LEO-HTS в Ku/Ka/Q/V-диапазонах наиболее актуальна именно для России и требует международного обсуждения на уровне ITU-R.

Литература:

1. Степанов А., Акимов А., Гриценко В., Чазов О. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи // Технологии и средства связи. Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание 2016”. – 2015. – № 6-2. – С. 72–87.
2. Анпилогов В., Урличич Ю. Тенденции развития спутниковых технологий и критерии оценки их технико-экономической эффективности // Технологии и средства связи. – № 2. – 2016. – С. 46-53.
3. James R. Stuart. Teledesic infrastructure architecture, design features and technologies. First International Conference on Integrated Micro-Nanotechnology for Space Applications. – South Shore Harbor Resort and Conference Center. – Houston. TX. 30 Oct. – 2 Nov. 1995.
4. Анпилогов В. Спутниковая связь и вещание. Перспективы в XXI веке // Технологии и средства связи. Каталог “Спутниковая связь-2000”. [online]. Доступ через: http://www.vsat-tel.ru/library/art_14.htm.

5. Анпилогов В. Система спутниковой связи и передачи данных TELEDESIC – глобальные планы // Broadcasting. – № 4. – 2001. С.

6. L. Cordeiro. OneWeb aposte em terminal de US \$250 para conectar o planeta, Converge Comuni-cações. 15.10.2015. [online]. Доступ через: <http://convergecom.com.br/tele-time/15/10/2015/oneweb-aposte-em-terminal-de-us-250-para-conectar-o-planeta>].

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

8. Eli Brookner. Metamaterial advances for radar and communications. 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. – 18–21 October, 2016.

9. Peter B. de Selding OneWeb Gets (Slide) Decked by Competitor at CASBAA / SpaceNews. October 28, 2015.

10. Доступ через: http://licensing.fcc.gov/myibfs/download.do?attachment_key=1150595.

11. Peter B. de Selding Intelsat Asks FCC To Block SpaceX Experimental Satellite Launch / SpaceNews. July 22, 2015.

12. Локшин Б. Об одной возможности организации подвижной связи с ВЭО в Ku-диапазоне // Технологии и средства связи. Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание-2014”. – 2013. – № 6-2. – С. 18–20.

13. Анпилогов В. О проблемах спутниковой связи и вещания в Арктике // Технологии и средства связи. Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание-2014”. – 2013. – № 6-2. – С. 24–31.

14. Шалагинов А. Проекты многофункциональных спутниковых систем для Арктических регионов России // Технологии и средства связи. Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание-2014”. – 2013. – № 6-2. – С. 16–17.

15. Кукк К. Низкоорбитальная комбинированная спутниковая система связи и мониторинга, в том числе для Арктического региона // Технологии и средства связи. Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание-2014”. – 2013. – № 6-2. – С. 38–40.

