

Спутниковые системы класса HTS



Андрей ГРИЦЕНКО,
к. т. н., генеральный директор
АО «Информационный космический
центр «Северная Корона»

Вопросам анализа потенциальных пользователей, их требований, предпочтений, положению в социальной среде и т. д. посвящено огромное количество публикаций и работ, проводимых как российскими, так и зарубежными компаниями. Однако если не углубляться в детали, то можно обозначить три основных направления (в современной терминологии – тренда) в развитии спутниковых систем:

- увеличение скорости передачи информации;
- повышение мобильности и компактности абонентских станций (АС);
- снижение стоимости услуг и АС.

Причем зачастую возникает ощущение, что «много скорости» для потребителя уже никогда не будет – на новых скоростях реализуются новые сервисы, и скорости снова не хватает.

Собственно, перечисленные тренды и определили разработку

Современные спутниковые системы, как и любой другой продукт, ориентированный на удовлетворение тех или иных потребностей человечества, развиваются сегодня в условиях поиска лучшего предложения для потенциальных пользователей. И хотя в данной области многое определяется существующими возможностями технологий, в конечном счете именно пользователь является определяющим звеном всей цепочки.

и развертывание вначале отдельных спутников с высокой пропускной способностью HTS (High Throughput Satellites), а затем и проработку целых систем данного класса. По этим причинам аббревиатуру HTS более корректно расшифровывать уже как High Throughput System – системы с высокой пропускной способностью [1].

Основные свойства HTS-систем

Основной целью развертывания HTS-систем является обеспечение высокоскоростных каналов передачи информации (прежде всего, на линии «вниз») в интересах различных пользователей (стационарных, подвижных) на компактных абонентские станции при оптимальном соотношении цена/скорость.

Попробуем разобраться в том, какие факторы имеют определяющее значение в достижении ключевых качественных характеристик HTS.

Очевидно, чем выше скорость передачи информации в канале, тем больше потребуется энергии и, как правило, потребной полосы частот. Безусловно, учитываем, что потребная полоса определяется множеством факторов, при этом реализация системы возможна только при наличии доступной полосы частот. Однако в настоящем материале основное внимание уделим энергетике

радиоканала и ее влиянию на облик спутниковой системы.

Воспользуемся некоторыми известными соотношениями. В частности, в цифровых системах качественные характеристики канала определяются отношением «энергия на символ к спектральной мощности шума» E_b/N_0 на входе приемника, которое связано с информационной скоростью передачи следующим соотношением:

$$E_b/N_0 = (P_c - N_0) - V_{inf}, \quad (1)$$

где P_c – мощность сигнала на входе приемника, дБВт;

N_0 – спектральная мощность шума, дБВт/Гц;

V_{inf} – информационная скорость передачи, дБ (Бит/с).

Предположим, что требуемое значение E_b/N_0 фиксировано и определяется используемой сигнально-кодовой конструкцией. В качестве ориентира примем узкополосную систему Iridium Next, реализующую в диапазоне 1,6 ГГц максимальную скорость передачи информации до 2,4 Мбит/с.

Тогда, чтобы повысить скорость передачи до 20 или 50 Мбит/с, как это следует из выражения (1), необходимо дополнительно повысить энергетику радиоканала на 10 и 13 дБ соответственно. Обеспечить такой подъем за счет соответствующего снижения значения параметра N_0 затруднительно, поэтому основным фактором, способным существенным образом повлиять на скорость передачи, является мощность сигнала на входе приемника.

Мощность сигнала (дБВт) на входе приемника определяется соотношением:

$$P_c = P_{ум} - L_f + G_{прд} - L_o - L_a + G_{прм}, \quad (2)$$

где $P_{ум}$ – выходная мощность усилителя мощности (УМ), дБВт;

L_f – потери в антенно-волновом тракте, дБ;

$G_{прд}$ – усиление бортовой антенны, дБи;

L_o – ослабление в свободном пространстве, дБ;

L_a – затухание в атмосфере и дожде для заданного коэффициента готовности, дБ;

$G_{прм}$ – усиление антенны абонентской станции, дБи.

В свою очередь, ослабление в свободном пространстве определяется соотношением:

$$L_o = 92,45 + 20 \lg (Fghz) + 20 \lg (Dkm), \quad (3)$$

где $Fghz$ – частота, ГГц;

Dkm – радиальная дальность, км.

Прогноз значения суммарного затухания в атмосфере и дожде (L_a) выполняется в соответствии с Рекомендацией Р.618-11. Основными факторами, влияющими на значение затухания, являются частота излучения и угол места.

В совокупности все представленные соотношения и определяют модель нашего объекта – канала передачи со спутника на АС.

Попробуем оценить некоторые предпочтения, которые дают системе не столько технические решения, сколько именно природные факторы. К таким факторам отнесем в первую очередь тип орбиты (точнее, ее высоту) и используемый диапазон частот.

В ряде случаев нужно задаваться минимальным углом места видимости на спутник. Для подвижных абонентов спутниковых систем класса HTS значение этого параметра должно быть не менее 35°.

Орбиты и их влияние на энергетику радиолинии

В интересах телекоммуникационных систем могут использоваться несколько типов орбит:

- GEO (на высоте примерно 36 тыс. км над экватором);

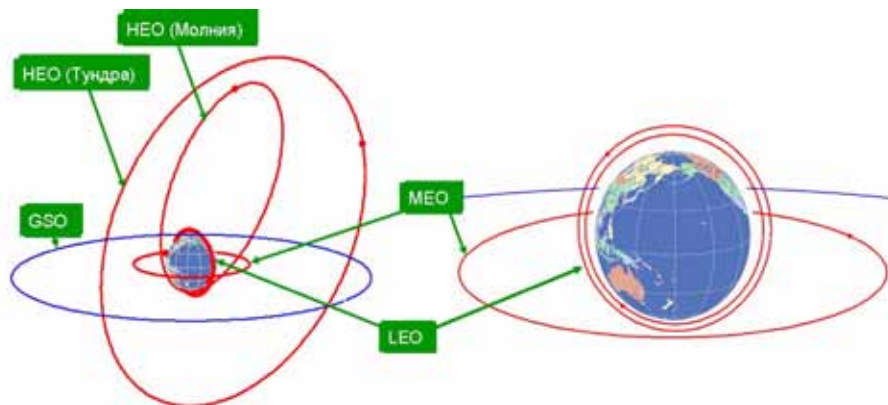


Рис. 1. Пространственное положение разных типов орбит

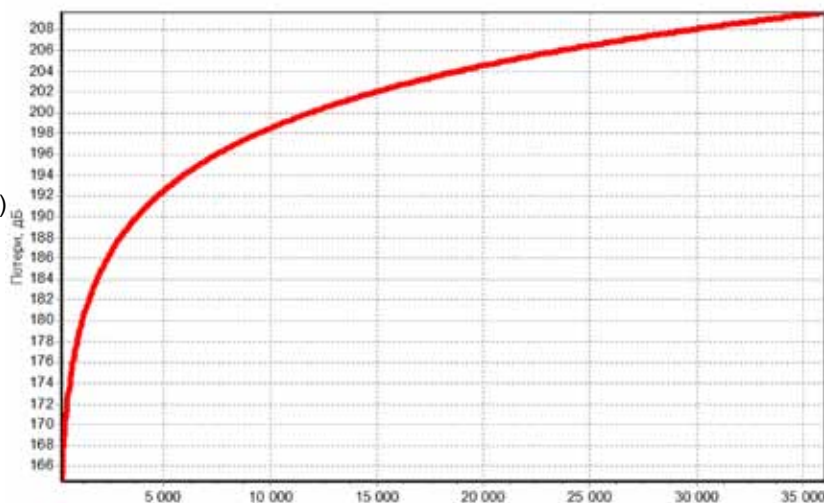


Рис. 2. Ослабление в свободном пространстве в функции дальности (км) для частоты 20 ГГц

- НЕО (положение КА на высоте от 37 до 47 тыс. км);
- МЕО (на высоте 8–12 или 19–21 тыс. км);
- ЛЕО (на высоте от 200 до 1500 км).

Пространственное положение этих орбит представлено на рис.1.

Первый важный фактор – это расстояние между КА и абонентской станцией (АС) и, соответственно, разное ослабление в свободном пространстве (см. рис. 1).

На рис. 2 представлен график изменения ослабления в функции

дальности, а в табл. 1 приведены табулированные значения для конкретных типов орбит при ограничении на угол места 35° на частоте 20 ГГц.

При переходе с GEO на МЕО образуется энергетический выигрыш в 10 дБ (см. табл. 1). При переходе с GEO на ЛЕО выигрыш может достигать от 24 дБ (высота орбиты 1500 км) до 33 дБ (высота орбиты 500 км) и даже до 40 дБ (высота орбиты 200 км).

Таблица 1. Ослабление в свободном пространстве для разных типов орбит

Тип орбиты	LEO	LEO	LEO	LEO	MEO	GEO	HEO
Высота, км	200	500	1000	1500	10 000	36 000	45 000
Дальность*, км	340	815	1550	2240	11 860	38 400	47 500
Ослабление, дБ	169	177	182	186	200	210	212
Приращение**, дБ	0	8	5	4	14	10	2

* Наклонная дальность до границы зоны, ограниченной по углу места 35°.

**Приращение относительно предыдущего значения.

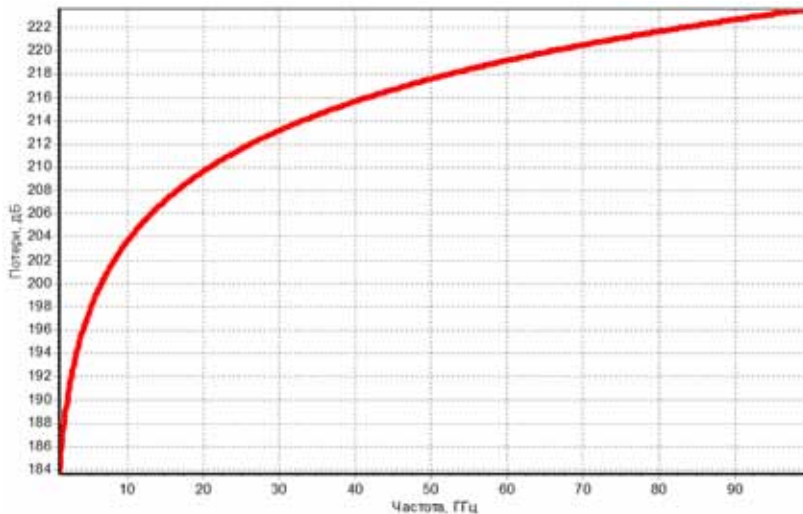


Рис. 3. Ослабление в свободном пространстве в функции частоты (ГГц) при дальности 36 тыс. км

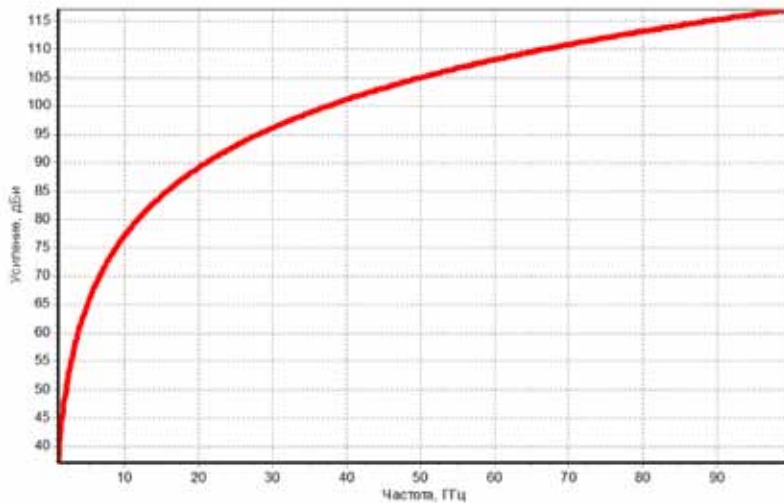


Рис. 4. Суммарное усиление (дБи) комплекта из двух антенн, диаметром 1 м каждая, в функции частоты излучения

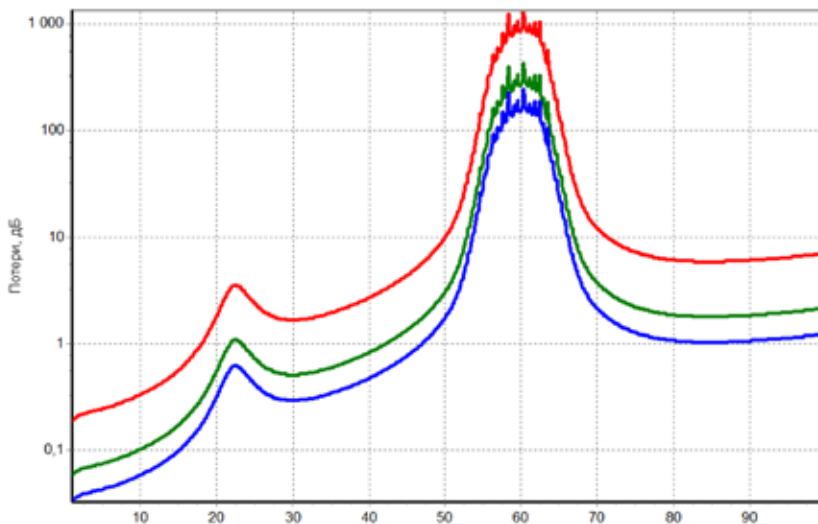


Рис. 5. Затухания в атмосферных газах в полосе от 1 до 100 ГГц, на углах места 10°, 35° и 90° при положении ЗС в г. Санкт-Петербурге

Диапазон частот и его влияние на энергетику радиолинии

Проанализируем влияние изменения диапазона частот на энергетику спутниковой радиолинии. Анализ будем проводить в диапазоне от 1 ГГц до 100 ГГц в полосах выделенных для работы спутниковых служб. Для определенности, расчеты будем производить для угла места 35°.

Изменение частоты излучения повлияет прежде всего на следующие составляющие в уравнении радиолинии:

- ослабление в свободном пространстве;
- затухание на атмосферном участке (в атмосфере и дожде);
- усиление антенн космической и абонентской станций.

С увеличением частоты будет расти и частотная составляющая в уравнении расчета ослабления в свободном пространстве. На рис. 3 представлен график изменения ослабления при дальности радиолинии 36 тыс. км. В табл. 2 приведены расчетные значения для табулированных значений частоты. При переходе в более высокочастотную область спектра ослабление в свободном пространстве будет расти, но чем дальше, тем медленнее.

С увеличением частоты возрастает и усиление антенн (рис. 4). Табулированные значения представлены в табл. 2.

Затухания на атмосферном участке включают, прежде всего, потери в атмосферных газах, в дожде и облаках и от тропосферных сцинтилляций.

С учетом того, что потери в дожде, облаках и от сцинтилляций носят вероятностный характер, анализ проведем для условий «чистое небо», т. е. учетом только потери в атмосферных газах. На рис. 5 представлены графики затуханий в функции частоты для углов места 10°, 35° и 90°. Табулированные значения для угла места 35° приведены в табл. 2.

Существенный энергетический выигрыш обеспечивается при

Таблица 2

Диапазон	L, S	C	Ku	K	Ka	V	W
Частота, ГГц	2	6	12	20	30	40	70
1. Свободное пространство							
Ослабление, дБ	190	199	205	210	213	216	220
Приращение, дБ	0	9	6	5	3	3	4
2. Две антенны (1м и 1м)							
Усиление, дБ	49	68	80	89	96	101	111
Приращение, дБ	0	19	12	9	7	5	10
3. Атмосфера (УМ = 35)							
Потери, дБ	0,06	0,08	0,12	0,56	0,51	0,82	3,75
Приращение, дБ	0	0,02	0,04	0,44	-0,05	0,31	2,9
4. Суммарно							
Приращение, дБ	0	10	6	4	4	2	6

переходе из L- и S- в C- и Ku-диапазоны спектра (см. табл. 2). Дополнительные 4 дБ дает переход из диапазона частот Ku в Ka. Использование более высокочастотной области спектра не приносит существенных предпочтений.

Дождь и облака вносят дополнительные затухания, запас на парирование которых обеспечивает требуемую готовность радиолонии (по радиоклиматическим параметрам). На рис. 6 представлена карта затуханий в дожде и облаках для коэффициента готовности 99,5% и для значения угла места направления на спутник в 35°.

Анализ карты затуханий позволяет сделать некоторые выводы.

- Глобальные HTS-системы с высоким коэффициентом готовности абонентских линий в диапазонах K, V, W и выше практически не реализуемы, так как

необходимо компенсировать дополнительные потери, прогнозируемые на уровне 60 дБ и более.

- Компенсация дополнительных потерь может осуществляться за счет значительного снижения скорости передачи и изменения сигнально-кодированных конструкций, но это уже будет не HTS-система, точнее говоря, это будет HTS-система не постоянной готовности.
- В региональных системах, например, для обслуживания территории России, HTS-системы высокой готовности могут быть реализованы в диапазонах частот Ku, K и Ka. При переходе в V и W потребуются компенсировать дополнительные потери в 40 и 60 дБ соответственно, что достаточно проблематично, следовательно, это будут системы не постоянной готовности.

- В настоящее время не очень понятно, как отнесутся пользователи к HTS-системам не постоянной готовности: Интернет у них то есть, то его нет, именно поэтому коммерческая привлекательность подобных систем, по мнению автора, пока под большим вопросом.

Заявки БР МСЭ

Если по геостационарным HTS-спутникам доступная информация достаточно подробна и конкретна, то ситуация по НГСО HTS-системам принципиально иная. Предварительный анализ доступных материалов по этим системам показывает, что закладываемые технические решения зачастую меняются, значения отдельных параметров искажаются (не подтверждаются расчетом), некоторые тонкие эффекты, влияющие на эффективность системы, умалчиваются.

Анализ поданных за последние несколько лет заявок в БР МСЭ показывает, что наблюдаются две основные тенденции:

- увеличение мощности (количества КА) орбитальных группировок – от десятков и сотен КА до тысяч и десятков тысяч;
- разработка многозелонных орбитальных группировок, включающих несколько эшелонов в рамках одного типа орбиты (но с разным наклоном и/или высотой) либо разворачиваемых на разных типах орбит (LEO+HEO или LEO+MEO и т. д.).

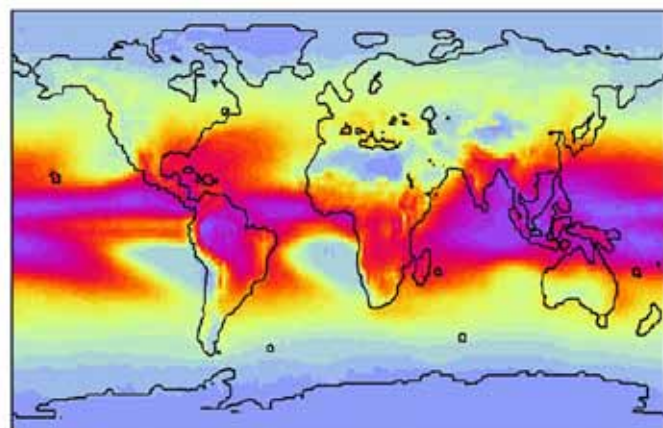


Рис. 6. Карта затуханий в дожде и облаках (надежность 99,5%)

Затухание, дБ

Ku	K	Ka	V	W
12,512	32,505	62,464	91,229	155,514
11,47	29,797	57,259	83,627	142,555
10,427	27,088	52,054	76,024	129,595
9,384	24,379	46,848	68,422	116,636
8,341	21,67	41,643	60,819	103,676
7,299	18,961	36,438	53,217	90,717
6,256	16,253	31,232	45,614	77,757
5,213	13,544	26,027	38,012	64,798
4,171	10,835	20,821	30,41	51,838
3,128	8,126	15,616	22,807	38,879
2,085	5,418	10,411	15,205	25,919
1,043	2,709	5,205	7,602	12,96
0	0	0	0	0

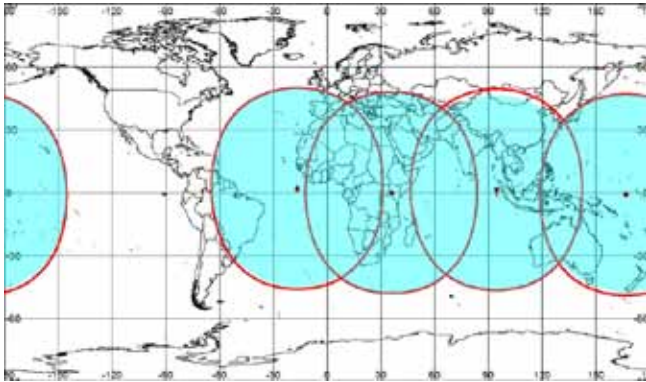


Рис. 7. Гарантированные зоны радиовидимости спутников серии «Луч» и АМУ1 на углах места 35°

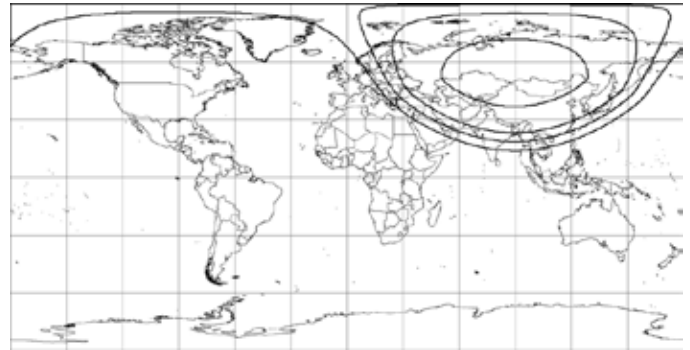


Рис. 8. ГЗРВ системы «Экспресс-РВ»/«Росинфоком»

Геостационарные системы

В настоящее время развернут ряд HTS-спутников на геостационарной орбите (ГСО). Ведутся работы по развертыванию новых в диапазонах частот Ku и Ka, в частности SES, Intelsat Epic, Inmarsat-5, ViaSat и др. Основной технологический упор здесь делается на покрытие узкими (примерно 0,3–0,5°) лучами обширных территорий.

Значительное количество лучей и необходимость компенсации существенных потерь на трассе определяют высокую потребную мощность системы энергоснабжения (СЭС), а также массогабаритные характеристики спутника. Вполне вероятно, что очень быстро масса HTS-спутника достигнет предельного значения, определяемого возможностями ракет-носителей. В этом случае в ближайшей перспективе можно ожидать жесткой конкуренции операторов HTS-систем на ГСО, так как получить существенное преимущество будет весьма сложно. Кроме того, с использованием геостационарных

HTS-спутников на территории России есть дополнительные ограничения, связанные с малыми углами места видимости спутников. Для работы подвижных абонентов необходимо, чтобы углы места на спутник были не менее 35°. Группировка спутников серии «Луч» и АМУ1 не способна обеспечить покрытие на углах места 35° большей части территории России (рис. 7).

Системы на НЕО

В России прорабатывается один из первых проектов HTS-систем на ВЭО. В работе над проектом «Экспресс-РВ»/«Росинфоком» принимают участие ФГУП КС, ООО «Небо-ГК», АО «ИКЦ «Северная Корона». В рамках проекта планируется реализовать региональную HTS-систему, включающую три-четыре спутника на ВЭО орбите типа «Тундра».

Ключевое отличие этой системы от ГСО заключается в обеспечении значительных углов места на территории РФ. Гарантированная зона радиовидимости (ГЗРВ) системы для углов места 30, 40, 45 и 60°

представлена на рис. 8. На большей части территории России, включая Северный морской путь, углы места на HTS-спутник будут превышать 45°. Это принципиальное достоинство HTS-систем на ВЭО: всего три спутника обеспечивают непрерывное покрытие территории России на высоких углах места.

Системы на МЕО

В классе средневысотных круговых орбит (МЕО) в коммерческой эксплуатации находится система ОЗВ. На рис. 9 представлены структура орбитальной группировки (ОГ), а также ГЗРВ системы и положение шлюзов. Красными линиями обозначены направления от шлюзов на обслуживаемые спутники системы. Орбитальная группировка включает 12 спутников, два из которых в резерве. Система работает в диапазоне Ka. Заложенное ограничение по углу места – 20°.

Проект оказался коммерчески успешным, что позволило компании заявить о начале работ по реализации его полярного дополнения.

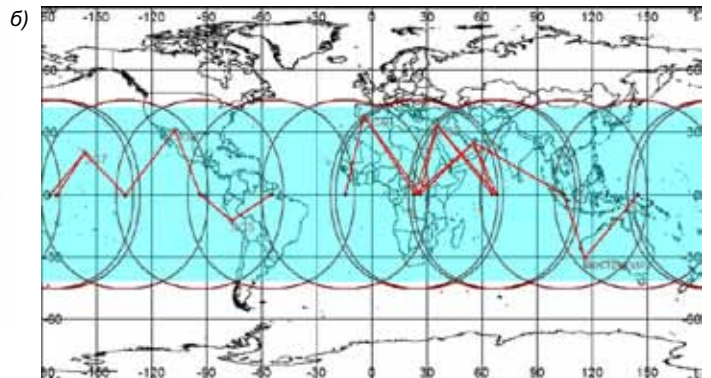


Рис. 9. Система ОЗВ: а) ОГ системы, б) ГЗРВ системы (угол места 20°)

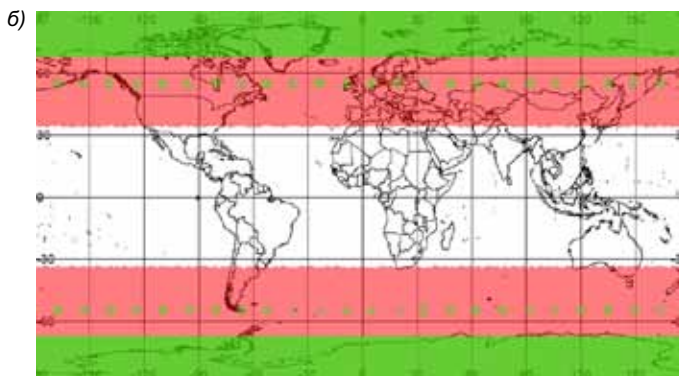
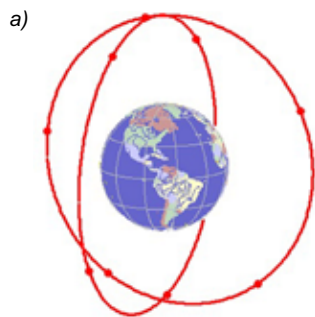


Рис. 10. Система «Скиф»: а) ОГ системы, б) ГЗРВ системы (угол места 20 и 30°)

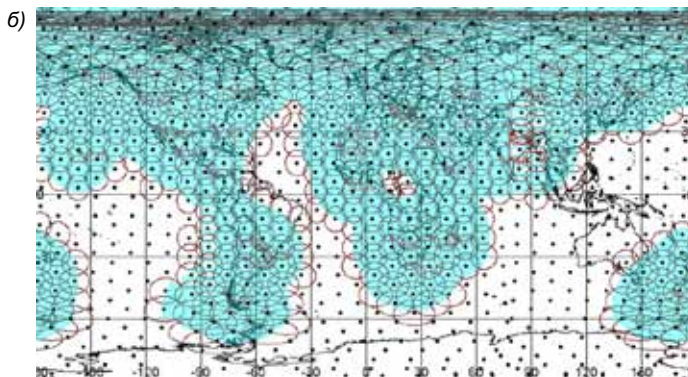
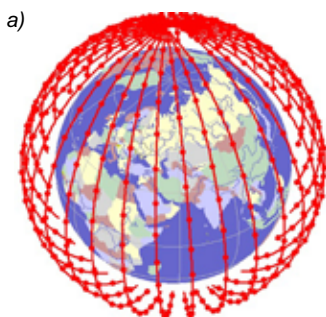


Рис. 11. Система OneWeb: а) ОГ системы, б) ГЗРВ системы (угол места 55°)

Ведутся работы и в рамках российского проекта МЕО HTS-системы «Скиф». Параметры его постоянно уточняются. Сейчас предполагается, что ОГ будет включать одну, а затем и вторую плоскость – по пять спутников в каждой. На спутниках будут использованы многолучевые антенны. Рабочий диапазон частот – Ка. Структура ОГ и ГЗРВ представлены на рис. 10.

Системы на LEO

В классе LEO систем заявлена целая плеяда проектов: OneWeb, SpaceX, LeoSat, COMMStellation и многие другие.

Наиболее известным проектом стал OneWeb. На первом этапе ОГ системы будет включать 18 плоскостей – по 36 КА в каждой. Всего получается 648 КА. Высота орбиты – 1200 км. Наклонение – 87,9°. Масса спутника – 150 кг. Диапазон частот – Ки. Межспутниковые линии отсутствуют, но должна быть развернута сеть из 55–75 станций сопряжения (шлюзов). Скорость передачи в абонентских линиях – до 50 Мбит/с. Запуск первого спутника заявлен на 2018 г.

На рис. 11 представлена структура ОГ и ГЗРВ для угла места 55°, полученная по результатам имитационного моделирования.

Система не относится к глобальной – на значительных территориях морей и океанов обслуживание не обеспечено из-за сложности в размещении шлюзов (см. рис. 11). Более подробно особенности работы системы OneWeb рассмотрены в [2, 3].

Орбитальная группировка проекта SpaceX (рис. 12) будет разворачиваться на орбитах высотой 1150 км и наклоном 53°. В ОГ будут 32 плоскости – по 50 КА (плюс два КА резерв в каждой плоскости), всего получается 1600 КА. Диапазон частот абонентских станций – Ки. Используются лазерные межспутниковые линии.

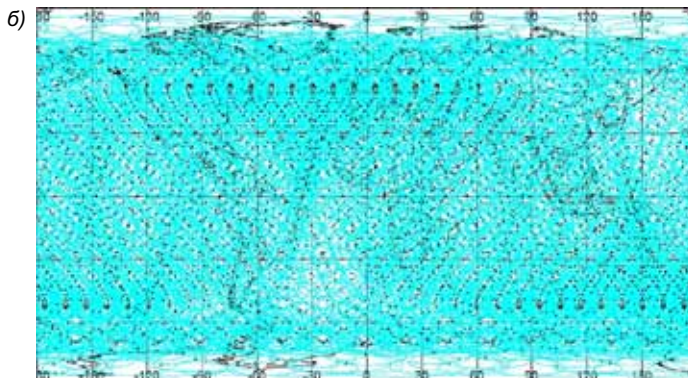
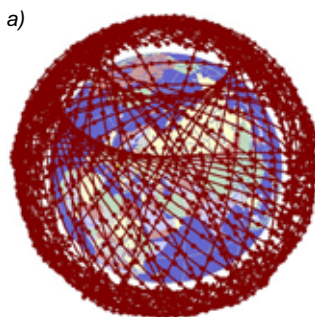


Рис. 12. Система SpaceX: а) ОГ системы, б) ГЗРВ системы

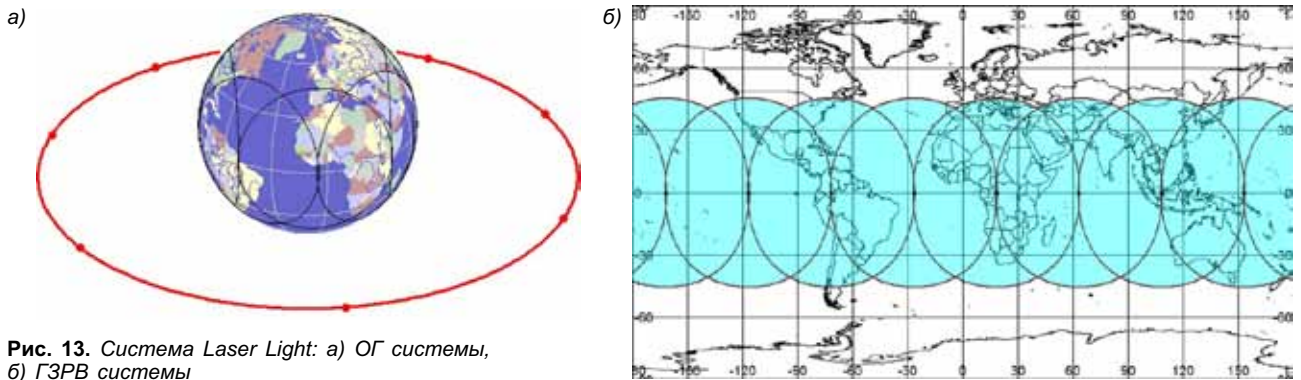


Рис. 13. Система Laser Light: а) ОГ системы, б) ГЗРВ системы

Лазерные HTS-системы

Особое внимание в последнее время уделяется проблемам создания лазерных систем спутниковой связи. Для развертывания таких систем может быть использована полоса 200–400 ТГц, характеризующаяся относительно малыми потерями энергии в атмосфере.

Действительно, переход, например, системы на МЕО (высота 10 тыс. км) с Ku-диапазона в оптический, с одной стороны, приведет к увеличению потерь в свободном пространстве с 254 дБ до 282 дБ (т. е. на 28 дБ), с другой стороны, это компенсируется ростом усиления «антенн» примерно на 88 дБ. В результате энергетический выигрыш составит существенные 60 дБ.

Сейчас готовится к реализации первый проект такой системы – Laser Light. Система чем-то напоминает ОЗВ, так как будет включать 8–12 спутников на экваториальной орбите высотой 8050 км. В системе будут реализованы абонентские линии в полосе 191,6–196,5 ТГц, обеспечивающие скорость передачи информации до 100–200 Гбит/с. Структура ОГ и ГЗРВ представлены на рис. 13.

В России ведутся работы по анализу возможностей развертывания лазерных систем спутниковой связи. Так, например, в [4] рассматривается системная стратегия пространственно-временной многоспутниковой связи (ПВ НО-МСС) в миллиметровом и оптическом диапазонах волн.

Основные выводы

и рекомендации

1. Потребность в спутниковых HTS-системах очевидна.

2. Небольшое количество HTS-спутников на ГСО способно обеспечить почти глобальное покрытие (например, проекты SES, Intelsat Epic, Inmarsat-5, ViaSat), быстро достигнуть предельных (для ГСО-систем) скоростей и фактически полностью перекрыть потребности пользователей в этом сегменте по критерию цена/скорость.
3. Дальнейшее повышение скорости передачи информации для ГСО HTS-спутников связано с ростом их массогабаритных характеристик, которые и так будут на пределе, поэтому ожидать существенного изменения на данном рынке не приходится.
4. НГСО HTS-системы обладают значительными возможностями по предоставлению высокоскоростных пользовательских каналов. Более того, они имеют существенные природные предпочтения по сравнению с HTS КА на ГСО. Выигрыш по энергетике относительно КА на ГСО может достигать 35 дБ.
5. Для коммерческих HTS-систем наиболее удачными являются Ku- и Ka-диапазоны радиочастотного спектра. Переход в более высокочастотную часть (V, W и выше), с одной стороны, не дает существенного энергетического выигрыша, с другой – потребует дополнительных затрат на компенсацию затуханий в дожде и облаках. Диапазоны частот выше 40 ГГц целесообразно использовать либо для организации фидерных линий, либо для построения спутниковых систем HTS не постоянной готовности (например, с надежностью 60 или 80% – это зависит от радиоклимата региона).

6. К перспективному направлению следует отнести проработку и развертывание спутниковых систем с абонентскими линиями в оптическом диапазоне и скоростями передачи информации в сотни Гбит/с. Такие системы, вероятно, будут системами не постоянной готовности. Однако, использование принципов разнесения и интеграция с наземными высокоскоростными сетями могут сделать их крайне эффективными и полезными. ■

Литература:

1. Гриценко А.А. *Высокоскоростные спутниковые системы LEO/MEO/HEO-HTS – текущее состояние и перспективы развития*. Форум CSTB.Telecom & Media, Москва, 8 февраля 2017 г.
2. Анпилогов В.Р., Гриценко А.А. *Анализ многолучевой рабочей зоны спутников OneWeb // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание» – 2017. С. 78–86.*
3. Гриценко А.А. *Моделирование многоспутниковых группировок на негеостационарных орбитах (на примере системы OneWeb) // Конференция «Высокоинформативные системы связи и вещания HTS и LEO/MEO-HTS»*. Аналитический центр при Правительстве РФ, Москва, 14 декабря 2016 г.
4. Аболиц А.И., Гриценко А.А. *Пространственно-временная низкоорбитальная многоспутниковая связь (ПВ НО-МСС) в миллиметровом и оптическом диапазонах волн: Доклад на IX Международном форуме «Профессиональная радиосвязь, спутниковая связь и навигация»*, Москва, 01–02 октября 2015 г.