

Перспективы развития высокоскоростных спутниковых систем связи

Генеральный директор, к.т.н. Гриценко Андрей Аркадьевич
АО «Информационный Космический Центр «Северная Корона»

Аннотация

Ключевой характеристикой высокоскоростной спутниковой HTS системы является скорость передачи информации в абонентской радиолинии на участке «вниз». Одним из основных факторов, определяющих достижимую скорость на этом участке, является энергетика радиолинии. В материале рассматриваются основные природные преференции, которые существенным образом влияют на энергетику спутниковых радиолиний. Оценивается энергетический выигрыш при использовании тех или иных типов орбит или диапазонов частот. Показано, что HTS системы на ГСО фактически достигли технологического предела по скорости передачи в абонентской линии, не способны обеспечить связь для подвижных абонентов, быстро заполнят рынок для стационарных станций и перейдут к жесткой конкуренции между собой. Показано также, что для HTS систем переход с ГСО на МЕО- и ЛЕО-типы орбит дает существенный энергетический выигрыш, а переход с Ku и Ka в V и W диапазоны спектра может привести к снижению коэффициента готовности спутниковой радиолинии. Данные факторы формируют необходимые условия для развертывания в ближайшей перспективе негеостационарных HTS спутниковых систем в Ku- и Ka-диапазонах спектра. Отмечается перспективность направления по проработке и развертыванию спутниковых систем оптического диапазона.

Актуальность

Спутниковые системы, как и любой другой продукт, ориентированный на удовлетворение тех или иных потребностей человечества, развиваются в условиях поиска лучшего предложения для потенциальных пользователей. Если не углубляться в детали, то можно обозначить три основных направления (или, пользуясь современной терминологией, тренда) в развитии спутниковых систем: рост скорости передачи информации, повышение мобильности и компактности абонентских станций (АС) и снижение стоимости услуг и АС. Причем возникает ощущение, что «много скорости» для потребителя уже никогда не будет, так как при приемлемом отношении цена/скорость весь доступный «скоростной ресурс» «поглощают» новые сервисы и снова возникает нехватка «скоростного ресурса».

Собственно, данные тренды и определили разработку и развертывание вначале отдельных спутников с высокой пропускной способностью HTS (High Throughput Satellites), а затем и проработку целых систем. По этим причинам аббревиатуру HTS правильнее будет расшифровывать уже как High Throughput System – системы с высокой пропускной способностью [1].

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

Энергетика спутниковой радиолинии

Очевидно, что чем выше скорость передачи информации в канале, тем больше для этого потребуются либо энергетика, либо потребной полосы частот, либо и того и другого. Безусловно, учитывая, что потребная полоса определяется множеством факторов, при этом практическая реализация системы возможна только при наличии доступной полосы частот. Однако в данном материале основное внимание уделим энергетике радиоканала и его влиянию на облик спутниковой системы. При этом, для упрощения, будем анализировать только абонентскую линию на участке «вниз», как наиболее важную для абонента.

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

$$\left(\frac{Eb}{No} \right) = (Pc - No) - Vi \quad (1)$$

где Pc – мощность сигнала на входе приемника, дБВт; No – спектральная мощность шума, дБВт/Гц; Vi – информационная скорость передачи, дБ(Бит/с).

В качестве примера, проведем оценку потребного увеличения энергетики радиоканала системы спутниковой связи Iridium Next, работающей в диапазоне частот 1.6 ГГц. Текущая реализуемая максимальная скорость передачи данных в системе составляет 2.4 Мбит/сек. Предположим, что требуемое значение Eb/No фиксировано и определяется используемой сигнально-кодовой конструкцией. Тогда, для повышения скорости передачи до 20 Мбит/сек или 50 Мбит/сек, как следует из выражения (1), необходимо дополнительно повысить энергетику радиоканала на 10 дБ и 13 дБ соответственно. Обеспечить такой подъем за счет соответствующего снижения значения параметра No затруднительно. Поэтому, основным фактором, способным существенно повлиять на скорость передачи, является мощность сигнала на входе приемника.

Мощность сигнала (дБВт) на входе приемника определяется соотношением:

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

где $P_{ум}$ – выходная мощность усилителя мощности (УМ) КА, дБВт; L_f – потери в антенно-волновом тракте КА, дБ; $G_{прд}$ – усиление бортовой антенны, дБи; L_o – ослабление в свободном пространстве, дБ; L_a – затухания 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:

$$L_o = 92.45 + 20 \lg(F) + 20 \lg(D), \quad (3)$$

где, F – частота, ГГц; D – дальность между КА и АС, км.

Прогноз значения суммарного затухания в атмосфере и дожде (L_a) выполняется в соответствии с Рекомендацией БР МСЭ Р.618-12 «Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос». Основными факторами, влияющими на величину затухания, являются рабочая частота излучения и угол места.

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

В процессе анализа нужно будет задаваться минимальным углом места видимости направления на спутник. Примем, что для HTS спутниковых систем значение этого параметра должно быть не менее 35 град для подвижных АС и не менее 10 град для стационарных АС. Но базовым типом АС будем считать подвижный.

Орбиты и их влияние на энергетику радиолинии

Спутниковые системы связи и вещания по ряду причин могут разворачиваться только на нескольких типах орбит: GEO (на высоте примерно 36 тыс. км над экватором), НЕО (положение КА на высоте от 36 до 47 тыс. км), МЕО (на высоте 8..12 или 19...21 тыс. км) и LEO (на высоте от 200 до 1500 км). Пространственное положение этих орбит представлено на рисунке 1.

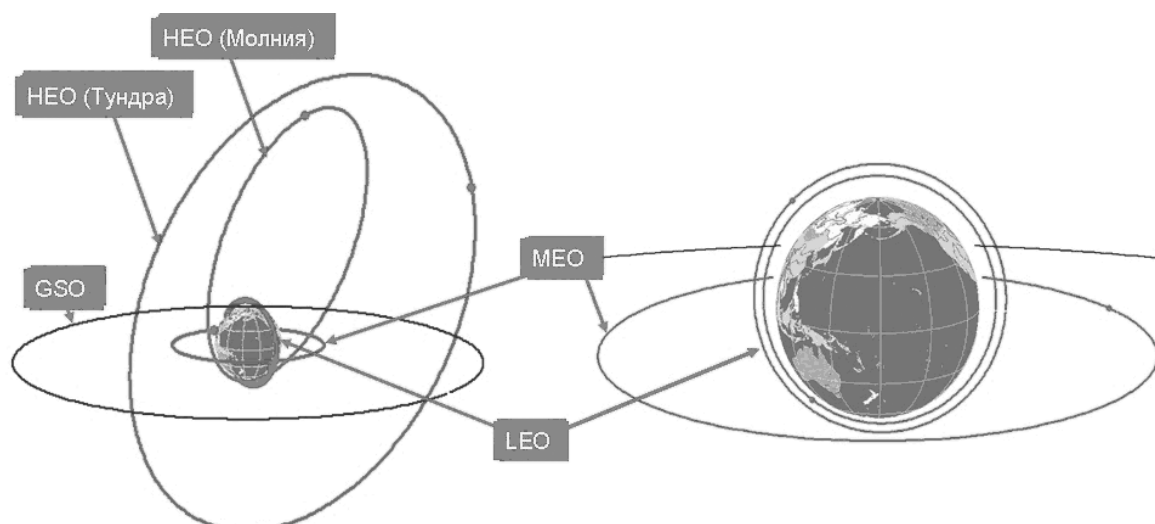


Рисунок 1 Пространственное положение основных типов орбит

Как видно из рисунка 1, тип орбиты определяет граничное значение дальности между КА и АС, и, как следует из (3), ослабление в свободном пространстве. Выполним расчет ослабления в свободном пространстве для разных типов орбит при условии положения АС на границе зоны радиовидимости, ограниченной углом места направления на спутник в 35 град. Результаты расчета, полученные для частоты 20 ГГц, представлены в Таблице 1. Параметр «Приращение» характеризует приращение ослабления относительно предыдущего значения с меньшей высотой положения КА.

Ослабление в свободном пространстве для разных типов орбит Таблица 1

Тип орбиты	LEO	LEO	LEO	LEO	MEO	GEO	HEO
Высота положения КА, км	200	500	1000	1500	10000	36000	45000
Наклонная дальность, км	420	720	1560	2300	12400	40600	46000
Ослабление L_0 , дБ	171	176	182	186	200	211	212
Приращение, дБ	0	5	6	4	14	11	1

Диапазон частот и его влияние на энергетiku радиолинии

Проанализируем влияние используемого диапазона частот на энергетiku спутниковой радиолинии. Анализ будем проводить в диапазоне от 1 ГГц до 100 ГГц в полосах, выделенных для работы спутниковых служб. Изменение рабочей частоты сигнала повлияет, прежде всего, на следующие составляющие в уравнении радиолинии (2):

- ослабление в свободном пространстве;
- затухания на атмосферном участке (в атмосфере, дожде, облаках и от сцинтилляций);
- усиление антенн космической и абонентской станций.

Так как интерес представляет суммарный эффект, то сформируем таблицу, в которую занесем данные по трем основным составляющим и результирующее значение. Так как приращение при переходе от одного диапазона частот в другой зависит только от частоты и, в первом приближении, не зависит от других факторов, то в качестве основного параметра для анализа будем использовать именно «приращение».

Анализируемые диапазоны и контрольные номиналы частот представлены в Таблице 2. В Таблице 2 также представлены табулированные значения:

- ослабления в свободном пространстве при радиальной дальности 36 тыс. км;
- усиление от двух антенн (бортовая и наземная, диаметром 1 м);
- затухания в атмосферных газах.

Затухания на атмосферном участке включают, прежде всего, потери в атмосферных газах, в дожде, облаках и от тропосферных сцинтилляций. Учитывая, что потери в дожде, облаках и от сцинтилляций носят вероятностный характер, анализ проведем для условий «чистое небо», т.е. учтем только потери в атмосферных газах. На рисунке 2 представлены графики затуханий в функции частоты для углов места 10, 35 и 90 град. Табулированные значения затуханий для угла места 35 град представлены в Таблице 2.

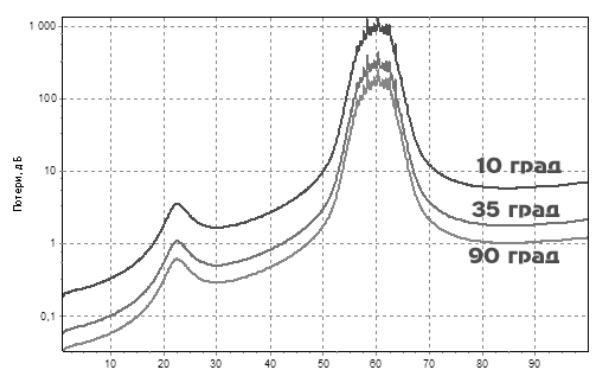
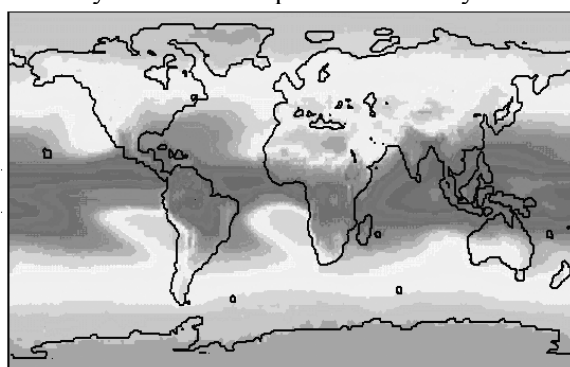


Рисунок 2 Затухания в атмосферных газах в полосе от 1 до 100 ГГц, на углах места 10, 35 и 90 град при положении ЗС в г. Санкт-Петербург

Табулированные значения основных параметров уравнения радиолинии Таблица 2

Диапазон частот	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. Антенные системы (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 град)							
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

Дождь и облака вносят дополнительные затухания в радиолинии. На рисунке 2 представлена карта затуханий в дожде и облаках для коэффициента готовности 99,5% и для значения угла места направления на спутник 35 град.



Затухание (надежность 99,5%), 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.2 Карта затуханий в дожде и облаках

Анализ карты затуханий позволяет сделать некоторые выводы:

- глобальные HTS системы с высоким коэффициентом готовности в диапазонах Ka, V, W и выше практически не реализуемы, так как необходимо компенсировать дополнительные потери, прогнозируемые на уровне 60 дБ и более;
- компенсация потерь в дожде и облаках может осуществляться за счет значительного снижения скорости передачи и изменения сигнально-кодовых конструкций, но это уже будет не HTS система, точнее – это будет HTS система не постоянной готовности;
- в региональных системах, например, для обслуживания территории России, HTS системы высокой готовности могут быть реализованы в Ku, K и Ka диапазонах частот. При переходе в V и W потребуется компенсировать дополнительные потери в 40 дБ и 60 дБ

соответственно, что для коммерческих систем 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 то есть, то его нет», и именно поэтому коммерческая привлекательность таких систем, по мнению автора, пока под вопросом.

Природные предпочтения в спутниковой связи

Представленные результаты показывают, что существуют определенные природные предпочтения, которые в тех или иных условиях создают преимущества тем или иным спутниковыми системам. В частности, анализ результатов Таблицы 1 показывает, что при переходе с GEO на МЕО орбиты образуется энергетический выигрыш в 11 дБ. При переходе с GEO на LEO орбиты выигрыш может достигать от 25 дБ (высота орбиты 1500 км) до 35 дБ (высота орбиты 500 км) и даже до 40 дБ (высота орбиты 200 км).

Из таблицы 2 следует, что существенный энергетический выигрыш обеспечивается при переходе из L и S в C и Ku-диапазоны спектра. Дополнительные 4 дБ дает переход из Ku в Ka - диапазон частот. Использование более высокочастотной области спектра не дает существенного энергетического выигрыша, более того, существенно вырастают потери в дожде и облаках, что снижает коэффициент готовности радиолиний.

Системы на ГСО

В настоящее время развернут ряд HTS спутников на геостационарной орбите (ГСО). Ведутся работы по развертыванию новых в Ku и Ka диапазонах частот (SES, Intelsat Epic, Inmarsat-5, ViaSat и др.). Основной технологический упор делается на покрытие узкими (примерно 0.3...0.5 град) лучами значительных территорий. Значительное число лучей и необходимость компенсации существенных потерь на трассе предопределяют необходимость использования достаточно мощной системы энергоснабжения (СЭС), а также высокие массово-габаритные характеристики спутника.

Системы на ГСО, с точки зрения энергетики, не имеют никаких природных предпочтений. Повышение энергетики может достигаться только дальнейшим снижением ширины луча, что не всегда реализуемо. Кроме того, системы на ГСО не способны обеспечить необходимый для подвижных систем угол места 35 град на территории России. В качестве примера, на рисунке 3 представлены зоны радиовидимости КА серии Луч и Экспресс-АМУ1.

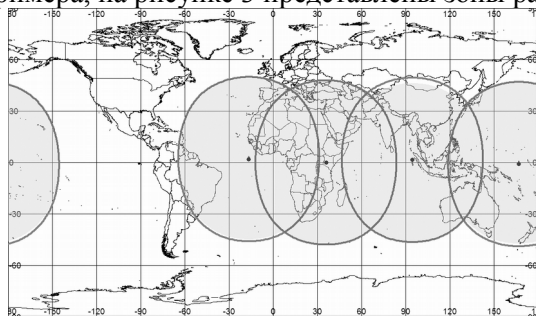


Рисунок 3 Зоны радиовидимости КА серии Луч и Экспресс-АМУ1 (УМ=35 град)

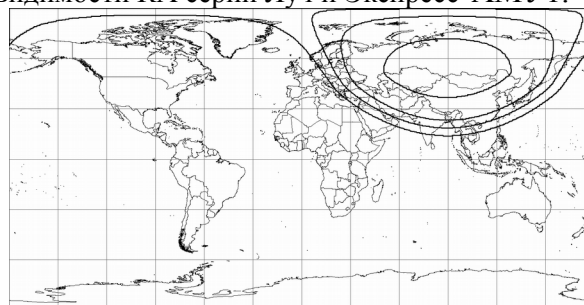


Рисунок 4 ГЗРВ системы Экспресс-РВ/Росинфоком (УМ= 30, 40, 45 и 60 град)

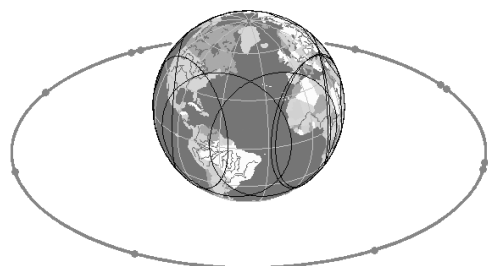
Системы на ВЭО

Системы, использующие высокоэллиптические орбиты (ВЭО) типа «Молния» и «Тундра», также не имеют предпочтений по энергетике радиоканала. Однако, в отличие от ГСО, они решают проблему малых углов места на территории России. Так в рамках проекта «Экспресс-РВ/Росинфоком», в котором принимают участие ФГУП КС, ООО «Небо-ГК», АО «ИКЦ «Северная Корона», прорабатывается система в составе 3...4 спутников на орбите типа «Тундра», которые обеспечивают гарантированную зону радиовидимости (ГЗРВ) для подавляющей части территории России на углах места более 45 град (рисунок 4).

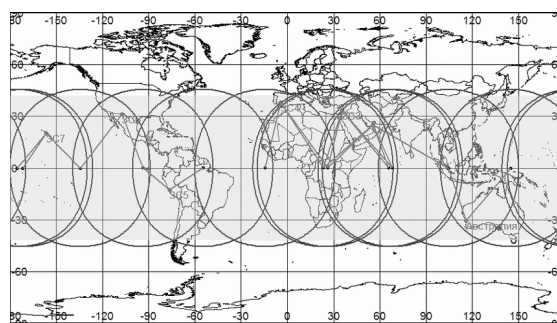
Системы на МЕО

В классе средневысотных круговых орбит (МЕО) в коммерческой эксплуатации находится система ОЗВ. На рисунке 5 представлена 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. Система работает в Ка-диапазоне. Заложенное ограничение по углу места – 20 град.



А) ОГ системы



Б) ГЗРВ системы (угол места 20 град)

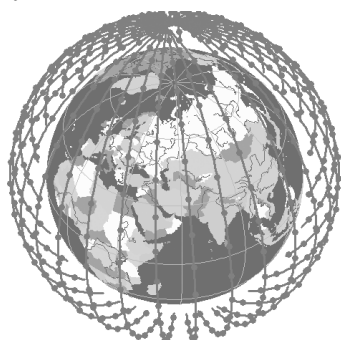
Рисунок 5 Система ОЗВ

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

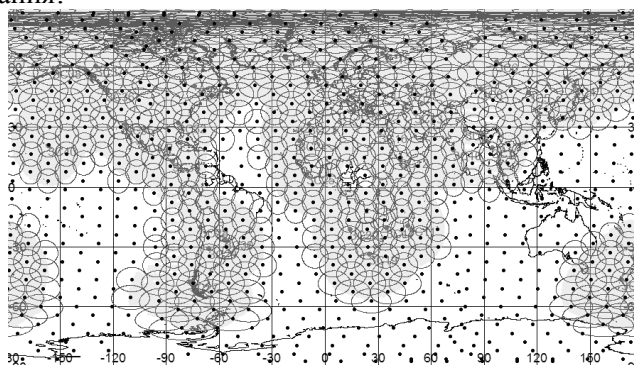
Системы на LEO

В классе LEO систем заявлена целая плеяда проектов: OneWeb, SpaceX, LeoSat, COMMSatellite и мн. др.

Наиболее известным проектом стал OneWeb. На первом этапе ОГ системы будет включать 18 плоскостей по 36 КА в каждой. Всего – 648 КА. Высота орбиты 1200 км. Наклонение 87.9 град. Масса спутника 150 кг. Диапазон частот – Ku. Межспутниковые линии отсутствуют, но должна быть развернута сеть из 55...75 станций сопряжения (шлюзов). Скорость передачи в абонентских линиях – до 50 Мбит/сек. Запуск первого спутника заявлен на 2018 г. На рис.6 представлена структура ОГ и ГЗРВ для угла места 55 град, полученная по результатам имитационного моделирования.



А) ОГ системы



Б) ГЗРВ системы (угол места 55 град)

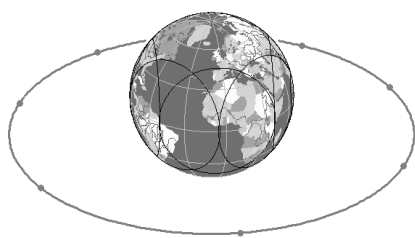
Рисунок 6 Система OneWeb

Как видно из рисунка, система не относится к глобальной – на значительных территориях морей и океанов обслуживание не обеспечено из-за сложности в размещении шлюзов. Более подробно, особенности работы системы OneWeb рассмотрены в [2,3].

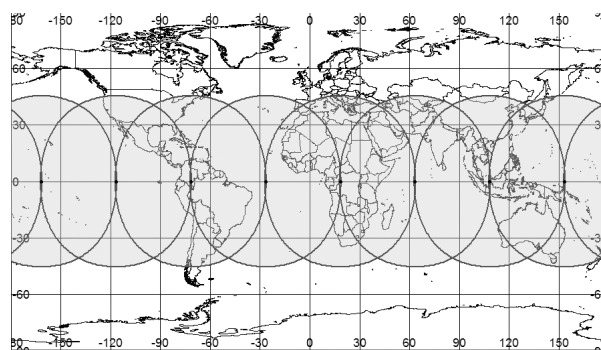
Лазерные HTS спутниковые системы

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 приведет с одной стороны к росту потерь в свободном пространстве с 254 дБ до 282 дБ (т.е. на 28 дБ), но с другой стороны это компенсируется ростом усиления «антенн» примерно на 88 дБ. В результате энергетический выигрыш составит существенные 60 дБ.

В настоящее время 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/сек. Структура ОГ и ГЗРВ представлены на рисунке 7.



А) ОГ системы



Б) ГЗРВ системы

Рисунок 7 Система Laser Light.

В России также ведутся работы по проработке возможностей использования 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 число HTS-спутников на ГСО способно обеспечить почти глобальное покрытие, быстро достигнуть предельных для ГСО систем скоростей и фактически полностью перекрыть потребности пользователей в этом сегменте по критерию цена/скорость.
3. Учитывая, что дальнейшее повышение скорости передачи информации для ГСО HTS спутников будет связано с дальнейшим ростом их массово-габаритных характеристик, которые и так будут находиться на пределе, ожидать дальнейшего существенного изменения на этом рынке не приходится.
4. Негеостационарные HTS системы обладают значительными потенциальными возможностями по предоставлению высокоскоростных пользовательских каналов. Более того, они имеют значительные природные преференции 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 HTS спутниковых систем не постоянной готовности (надежностью 60%... 80%).
6. К перспективному направлению следует отнести проработку и развертывание спутниковых систем с абонентскими линиями в оптическом диапазоне и скоростями передачи информации в сотни Гбит/сек. Данные системы относятся к системам не постоянной готовности. Однако использование принципов разнесения и интеграция с наземными высокоскоростными сетями может сделать их крайне эффективными и полезными.

Литература

1. Гриценко А.А. Высокоскоростные спутниковые системы LEO/MEO/NEO-HTS - текущее состояние и перспективы развития, Доклад на Форуме 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, стр.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.
4. Аболищ 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.