

Представлены технические параметры системы OneWeb, сформулированные на основе анализа данных FCC. Приводятся результаты моделирования рабочей зоны спутников LEO-HTS на примере OneWeb. Показано, что эффективность системы OneWeb падает выше широт 57 град. Но остается заметно лучше, чем для современных геостационарных спутников HTS.

Анализ многолучевой рабочей зоны спутников OneWeb

An analysis of multibeam working area of satellites OneWeb



Валентин Анпилов

Заместитель генерального директора ЗАО "ВИСАТ-ТЕЛ", к.т.н., доцент
Valentin Anpilov

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



Андрей Гриценко

Генеральный директор АО "Информационный Космический Центр "Северная Корона", к.т.н.
Andrey Gritsenko

General Director of JSC "Information Space Center" Corona Borealis", Ph.D.

The article presents the technical parameters of the system OneWeb based on FCC data analysis. Presented the results of simulation for the working area of satellites LEO-HTS OneWeb as an example. It is shown that the efficiency of the system OneWeb falls above latitude 57 degrees. But its effectiveness is much better than of the modern geostationary satellites HTS.

Ключевые слова:
низкие круговые орбиты,
моделирование рабочей зоны
спутника, LEO-HTS

Keywords:
low circular orbit, the satellite
simulation working area, LEO-HTS

Последние несколько лет на рынке спутниковой связи особое внимание уделяется системам, реализуемым на основе многолучевых спутников. Сегодня уже реализован ряд таких систем с использованием многолучевых геостационарных спутников связи, которые получили название HTS (High-Throughput Satel-

lite). Особый интерес к таким системам вызван тем, что их технико-экономическая эффективность существенно выше, чем при использовании традиционных спутников [1, 2]. Дальнейшее развитие этого направления связывают с новыми проектами, которые предусматривают использование многоспутниковых группировок на низких и средних круговых орбитах. Такие системы получили обозначение LEO-HTS и MEO-HTS. Сегодня известно более десятка таких проектов. Большинство открытых публикаций, посвященных проектам LEO/MEO-HTS, не содержат достаточных технических сведений для оценки их перспективности. Среди этих проектов выделяется проект LEO-HTS OneWeb. Во-первых, этот проект поддержан инвестициями многих солидных компаний. Во-вторых, проектные технические параметры известны, и имеется частотная заявка в ИТУ-R на спутниковую сеть L5. Кроме того, в мае 2016 г. опубликованы первые официальные материалы, раскрывающие технические параметры OneWeb (представлены в лицензии FCC [4]). Анализ опубликованных материалов дает возможность в явном виде определить проектные тактико-технические параметры системы OneWeb, ее космического и земного сегментов. В табл. 1 представлены параметры, которые непосредственно заявлены в FCC, а также параметры, которые являются производными от них и определены на основе экспертной оценки авторов.



В данном случае рассматриваются проблемы формирования рабочей зоны. Цель данного анализа — оценка эффективности спутниковой системы LEO-HTS на основе результатов моделирования многолучевой рабочей зоны отдельных спутников и спутниковой группировки OneWeb.

Многолучевая рабочая зона абонентского сегмента

В [4] указано, что граница зоны обслуживания одного спутника определяется минимальным углом места абонентского терминала в 55 град. Это соответствует видимости Земли со спутника конуса с углом раскрытия 57,7 град. Диаметр зоны радиовидимости спутника с Земли в этом случае составляет примерно 1400 км.

На рис. 1 [4] представлен пример формирования многолучевой диаграммы направленности бортовой антенны спутника, в момент пересечения плоскости экватора. Из рис. 1 следует, что антенна Ku-диапазона формирует близкую к квадрату 48x48 град. угловую зону обслуживания по уровню усиления -3 дБ от максимума, состоящую из 16 абонентских лучей.

Моделирование диаграммы направленности рис. 1 с использованием пакета программ “Спутниковые технологии” дает ее отображение на поверхности Земли, что представлено на рис. 2 (отмечена граница радиовидимости при угле места абонентского терминала 50 град.).

Естественно, что в процессе движения спутников OneWeb по орбитам будет наблюдаться сложная изменяющаяся картина пересечения рабочих зон спутников на поверхности Земли. Для моделирования целесообразно ограничиться анализом группировки из трех спутников в составе полной космической группировки системы, состоящей из 720 спутников (см. табл. 1). Тогда можно принять, что смежные орбитальные плоскости разнесены на 10 град. по долготе восходящего узла. Соседние спутники в каждой плоскости имеют пространственный разнос 9 град. по средней аномалии и смещены относительно спутников в смежных плоскостях в шахматном порядке, т.е. фазовый угол между спутниками смежных плоскостей 4,5 град.

При моделировании первый из спутников разместим над экватором, т.е. широта 0 град. Второй спутник добавим в эту же плоскость, но выше на 9 град. Третий спутник разместим в соседней плоскости. Результат моделирования представлен на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что в экваториальной зоне лучи спутников разных плоскостей практически не пересекаются (точно согласуются). В пределах одной плоскости обеспечивается пересечение 2 лучей соседних спутников.

Сдвинем группировку на широту 30 град. (положение первого спутника на широте 30 град.). Результат моделирования представлен на рис. 4. Видно, что взаимное положение лучей спутников в одной плоскости не изменилось, но возникло пересечение лучей между спутниками разных орбитальных плоскостей.

Очевидно, что по мере продвижения спутников в сторону от экватора площадь пересечения зон обслуживания, формируемых спутниками в смежных плоскостях, возрастает, что иллюстрируется на рис. 3–6.

По мере удаления от экватора все отчетливее будет проявляться избыточность спутниковой группировки. Показательным примером избыточности спутниковой группировки является иллюстрация изменения рабочей зоны “цепочек” спутников в трех смежных орбитальных плоскостях (см. рис. 7).

Пример формирования многолучевой диаграммы направленности антенны спутника OneWeb

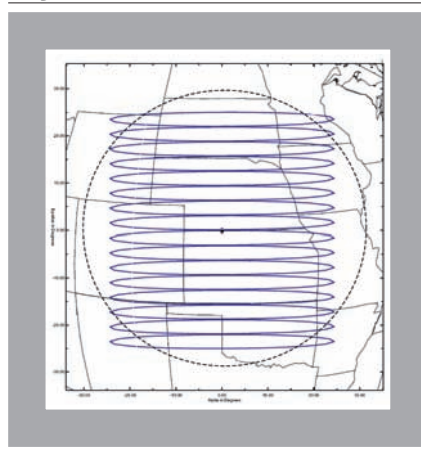


Рис. 1

Анализ рис. 7 показывает, что начиная с широтной отметки около 57 град. и выше, наблюдается пересечение лучей спутников, отстоящих друг от друга через одну орбитальную плоскость.

Предполагается, что абонентские терминалы в системе OneWeb будут иметь размер антенн 0,3–0,75 м. Ширина ДН-антенны 0,3 м по приему составляет примерно 6 град., а по передаче примерно 7,5 град. по уровню -3 дБ. Естественно, что на абонентский терминал, расположенный в зоне пересечения лучей, будут воздействовать помехи от своих спутников, а множество таких терминалов будет генерировать помехи для спутников в соседних орбитальных плоскостях. Этот процесс будет усиливаться по мере удаления от экватора.

Эта ситуация требует дополнительного моделирования, но предварительно можно отметить, что начиная с широт 55–57 град. и выше внутрисистемная электромагнитная обстановка будет резко ухудшаться. Кардинальным решением является последовательное выключение спутников в смежных плоскостях по мере приближения к Северному и Южному полюсам Земли. Один из алгоритмов выключения спутников, позволяющий обеспечить связь в высоких широтах, поясняется на рис. 8.

Возможны и варианты, которые предусматривают специальный частотный разнос спутников и/или выключение отдельных лучей. Но в

Отображение (см. рис. 1) рабочей зоны спутника OneWeb на земной поверхности

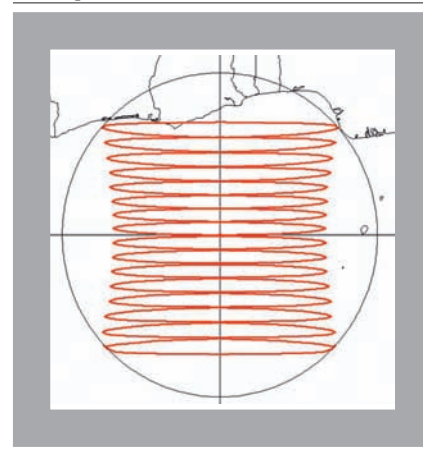


Рис. 2

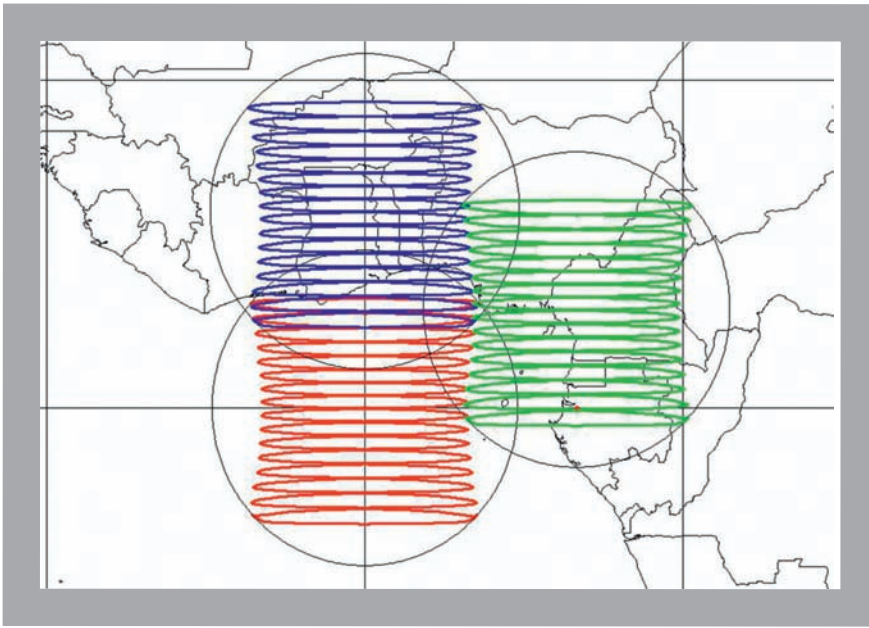


Рис. 3

Пример рабочей зоны тройки спутников в области широты 30 град.

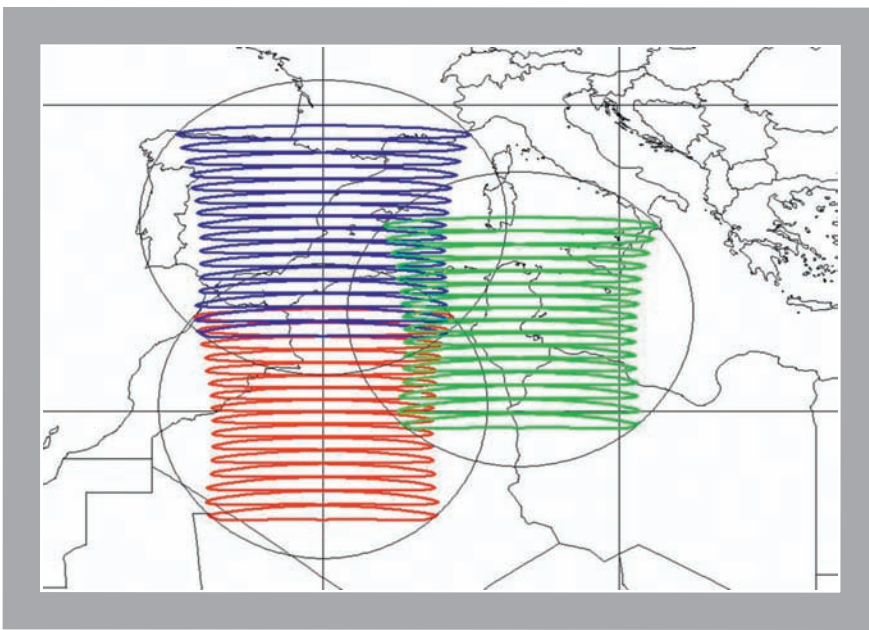


Рис. 4

конечном итоге все же придется выключать часть спутников, а эффективность самой системы будет резко снижена.

Формирование заявленной зоны обслуживания

Система OneWeb заявлена как система, предоставляющая услуги на глобальной основе. В техническом

плане это означает, что в любой момент времени в любой точке поверхности Земли для наземного абонента должен быть доступен хотя бы один спутник системы, который, в свою очередь, имеет доступ к наземной станции сопряжения.

Так как в системе не используются межспутниковые линии

связи, то для обеспечения “глобальности” зоны обслуживания потребуется развернуть достаточно большое число шлюзов. В качестве примера на рис. 9. представлено формирование зоны обслуживания при развертывании двух станций сопряжения (шлюзов). Первая расположена на экваторе, вторая на широте 60 град. Текущее мгновенное положение спутников системы обозначено точками на карте. Если спутник наблюдаем из точки положения шлюза на углах места более 10 град., то дополнительно отображаются зона радиовидимости (кружок красного цвета) и линия между спутником и шлюзом. Мгновенная зона радиовидимости спутников системы постоянно изменяется и не позволяет оценить реальную зону обслуживания. Поэтому практический интерес представляет гарантированная зона радиовидимости (ГЗРВ), в пределах которой гарантируется (с некоторой надежностью по времени) наблюдение хотя бы одного КА на углах места более 10 град. ГЗРВ системы OneWeb при развертывании двух шлюзов представлена на рис. 9 синим цветом. ГЗРВ формируется путем моделирования работы системы на достаточно большом промежутке времени с обработкой результатов моделирования.

Как видно из рис. 9, радиус ГЗРВ, обеспечиваемой одной приэкваториальной станцией сопряжения, составляет 20 град. по широте/долготе, что соответствует линейному расстоянию примерно в 2,2 тыс. км. При этом среднее число одновременно обслуживаемых КА составит около 20 спутников. При развертывании станции сопряжения в высоких широтах число одновременно обслуживаемых спутников может достигать в среднем 40 КА, при этом ГЗРВ “растягивается” по долготе. Однако ее “широтный” размер в 20 град. сохранится при любом положении станции.

Из рис. 9 следует, что одна из проблем в обеспечении глобального покрытия — поиск мест размещения станций сопряжения, “прикрывающих” акватории океанов. К сожалению, в настоящее время нет информации, уточняющей, как будет решаться эта проблема.



Пример рабочей зоны тройки спутников в области широты 50 град.

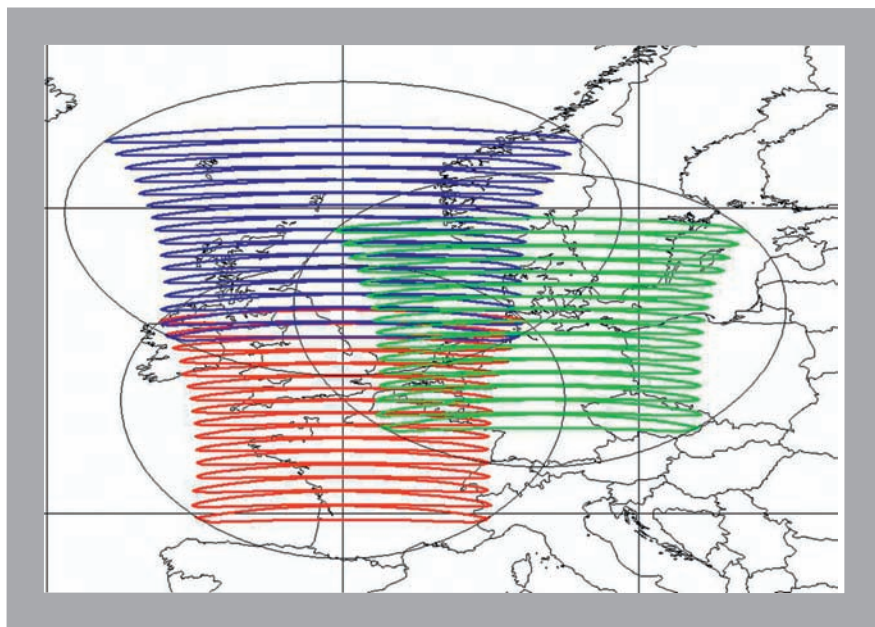


Рис. 5

Пример рабочей зоны тройки спутников в области широты 70 град.

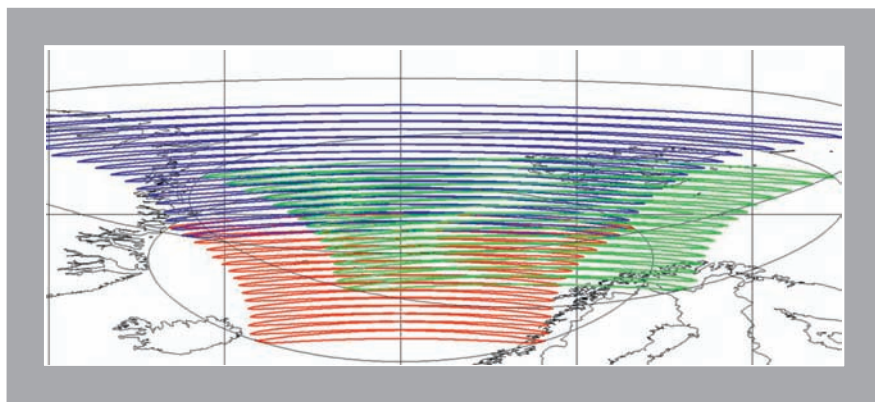


Рис. 6

Пример рабочей зоны цепочки спутников в трех смежных орбитальных плоскостях

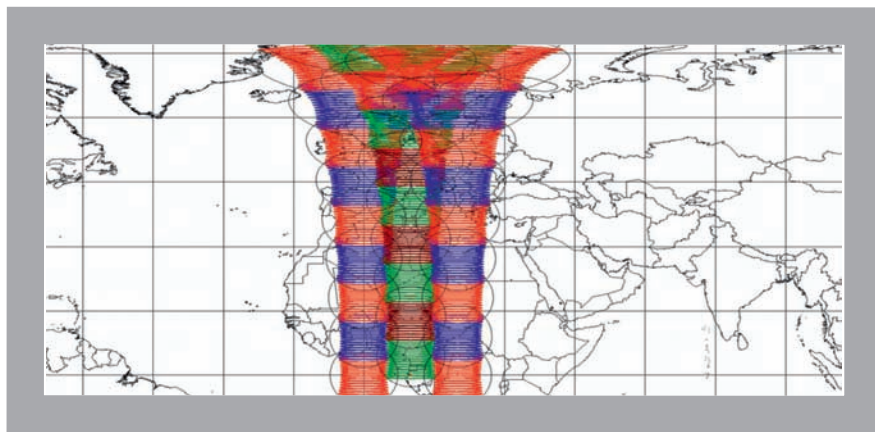


Рис. 7

Факторы снижения эффективности системы

Эффективность системы связи определяется многими факторами. Например, в [3] предложен многокритериальный подход с использованием весовых коэффициентов. Но в таких усложненных методиках всегда заложена субъективная основа. Субъективность проявляется и в формировании исходных данных, и в весовых коэффициентах значимости принятых критериев.

Наиболее универсальная и объективная оценка технико-экономической эффективности системы связи обусловлена себестоимостью передачи единицы информации. В простейшем случае в качестве такой оценки следует принять CAPEX системы, отнесенный к емкости системы (информационному ресурсу, выраженному в МГц, Мбит/с).

Так, в [2] приведена оценка технико-экономической эффективности системы связи, где в качестве критерия выступает значения CAPEX и ее информационный ресурс. Причем в качестве дополнительной составляющей учтено время (ΔT), которое доступно для пользователей системы. В [2, табл. 1] имеется опечатка (следует использовать обратную величину ($24/\Delta T$, где $\Delta T < 24$ часов), поэтому в табл. 3 представлена исправленная версия. АК показывают результаты моделирования применительно к системе OneWeb, самые большие потери эффективности обусловлены неизбежностью выключения спутников при обслуживании широт выше 55–57 град. Очевидно, что при оценках эффективности (см. табл. 3) системы OneWeb следует учитывать, что для 50% спутников $24/\Delta T = 1,58$ (принято, что спутник выключается для широт выше 57 град.).

В данном случае CAPEX системы OneWeb по проекту \$3,5 млрд без учета абонентских станций земного сегмента. Частотная емкость системы может быть определена достаточно однозначно — по данным табл. 2. Без учета защитных частотных интервалов емкость одного спутника OneWeb составляет 3600 МГц для прямых каналов и 2000 МГц для обратных каналов, т.е. в сумме $\Delta F = 5600$ МГц.

82 Технические параметры системы и спутников OneWeb (за основу приняты сведения, указанные в лицензии FCC)

Параметр	Значение	Примечание
Система OneWeb		
Орбиты:		Peter B. de Selding, OneWeb Satellites to open factory in Florida with eyes on business beyond OneWeb, SpaceNews, 18.04.2016.
Высота, км	1200	
Наклонение, град.	87,9	Peter B. de Selding OneWeb Pledges Vigilance on Orbital Debris Issue, SpaceNews, 15.10.2015
Орбита захоронения, км	1100x200	
Общее число активных спутников в составе космической группировки	648 с увеличением до 720	Всего по программе 900 с учетом резервных спутников, [4]
Число орбитальных плоскостей	18	
Число активных спутников в одной орбитальной плоскости	36 с увеличением до 40	
Запуски групповые	По 32 спутника на РН "Союз"	Предусмотрены дополнительно РН Virgin Galactic launch vehicles
Диапазон частот абонентских лучей, ГГц: КА-УТ УТ-КА	10,7-12,7 14,0-14,5 12,75-13,25*	* В США не используется, по данным сети L5 заявлен диапазон 10,7-12,75 ГГц
Диапазон частот фидерных лучей (GW), ГГц: КА-GW	17,8-18,6 18,8-19,3 19,7-20,2*	* В США не используется
GW-КА	27,5-29,1 29,5-30,0	
Каналы ТТ&С, ГГц: Земля - КА КА - Земля	27,0-27,5 19,7-19,77 19,265-19,3 (мониторинг ПН)	На линии вверх BPSK, на линии вниз QPSK, поляризация круговая
Центральные станции сопряжения (GW)	более 50	Не менее 4 в США, число GW уточняется. Каждая GW содержит не менее 10 антенных систем
Станции контроля и управления (ТТ&С)	Совмещены с некоторыми GW в высоких широтах	GW на территории США не используются для ТТ&С
Минимальный рабочий угол станций GW, град.	15	
Центры управления космической группировкой	2	Основной в США, резервный в Великобритании
Центры сетевого управления и контроля	2	Основной в Великобритании, резервный в США
Спутник OneWeb		
САС спутника, лет	7+	http://space.skyrocket.de/doc_sdat/oneweb.htm
Масса спутника, кг	<150	http://space.skyrocket.de/doc_sdat/oneweb.htm
СЭС спутника	Площадь солнечных батарей 3,5 м ²	Peter B. de Selding OneWeb Pledges Vigilance on Orbital Debris Issue, SpaceNews, 15.10.2015
Лучи GW спутника	Два луча, независимо перенацеливаемые	Форма ДН близка к кругу, используются ортогональные круговые поляризации, используется две параболические антенны
Ширина ДН луча GW, град.:		Примерно по уровню -3 дБ
КА-GW	3,0	
GW-КА	2,0	
Рабочая полоса частот луча GW, МГц	до 2000	По частотному плану 1600 МГц на линии вниз и 500 МГц вверх
Г/Т луча GW, дБ/К	+11,4	В максимуме
Плотность ЭИИМ луча GW, дБВт/1 МГц	+8,0	В максимуме 41 дБВт в луче
Число передатчиков в одном GW луче	2	Предположительно передатчики по 10 Вт
SFD для лучей GW, дБВт/м ²	-77,5	В заявке FCC -101,5...-77,5 (в заявке опечатка, подтверждается [5])
Число абонентских лучей спутника	16	Приемопередающие
Ширина ДН абонентского луча, град.	3x48	Используется приемная АФАР и передающая АФАР
Рабочая полоса частот абонентских лучей, МГц:		
УТ - КА	125	Занятая полоса частот 155 МГц на линии КА-GW в Ка-диапазоне
КА - УТ	225	Занятая полоса частот 250 МГц на линии GW-КА-Абонент
Г/Т абонентского луча, дБ/К	-1	В максимуме по данным FCC
Плотность ЭИИМ абонентского луча, дБВт/1 МГц	+10,6	В максимуме 34,1 дБВт (или -13,4 дБВт/4 кГц по данным FCC)
Число передатчиков в абонентском луче	1	Режим насыщения
SFD для абонентских лучей, дБВт/м ²	-101,5...-77,5	В заявке FCC -77,5 (в заявке опечатка, подтверждается [5])

Таблица 1



Технические параметры системы и спутников OneWeb (за основу приняты сведения, указанные в лицензии FCC)

Параметр	Значение	Примечание
Абонентские терминалы (UT)		
Размер антенн, м	0,3–0,75	
Число приемопередающих антенн	2	В случае антенной решетки нужно 4 полотна
Минимальный рабочий угол места, град.	55	
Режим многостанционного доступа	TDM/TDMA или TDM/FDMA	
Скорость потока TDM, Мс/с	225	Один поток в луче
Скорость потоков TDMA(FDMA), Мс/с	От 1,25 до 20,0	Многосигнальный режим
Сопряжение интерфейса	LTE/Wi-Fi	Радиус рабочей зоны LTE/Wi-Fi до 200 м
Станции в составе GateWay (GW)		
Число станций (антенных систем)	более 10	
Размер антенн, м	типовой 2,4	3,0, 4,6, 7,4 (разные, для использования в разных климатических условиях)
Максимальный ЭИИМ на поток TDM, дБВт	65	Рабочее значение 55 дБВт на один поток TDM 225 Мс/с
Г/Т, дБ/К	29	В максимуме для антенны 2,4 м
Минимальный угол места, град	15	
Режим многостанционного доступа	TDM/TDMA или TDM/FDMA	
Скорость потока TDM, Мс/с	225	8 потоков на одной поляризации
Скорость потоков TDMA(FDMA), Мс/с	От 1,25 до 20,0	Многосигнальный режим
Примечание: дополнительно см. http://www.satcom.guru/2016/04/oneweb-first-look-at-their-filing.html		

Таблица 1

Пример формирования рабочей зоны в северных широтах

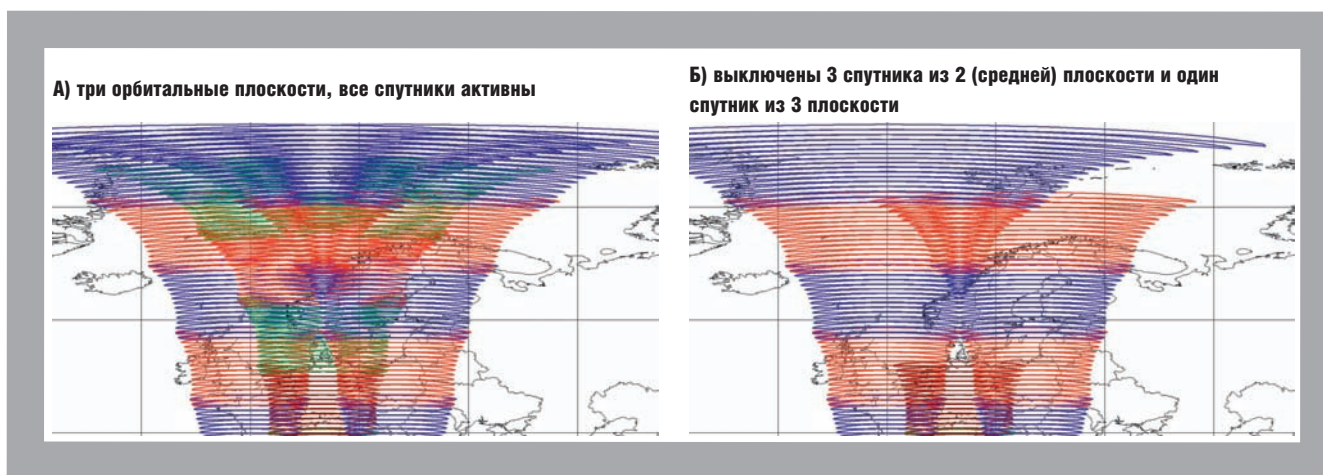


Рис. 8

Соответственно, $\eta_f = 24/\Delta T * \text{CAPEX} / \Delta F = 1372 \text{ \$/МГц}$. Это значение примерно в 3,6 раза лучше, чем этот показатель для HTS спутника Viasat-2 [2] (запуск перенесен с 2016 г. на 2017 г.).

Кроме того, из результатов моделирования (см. рис.10) следует, что максимальное время работы с одним спутником составит 4 минуты. За эти 4 минуты пользователь (абонентский терминал UT) будет последовательно передаваться из луча в луч. Среднее время работы в луче составит $4/16 = 0,25$ мин., или 15 сек. Это полное время с учетом временных интервалов для обеспечения необходимых процедур хэндо-

вера. Следует учитывать и то, что станция сопряжения (GW) каждые 12 минут будет передавать пользователя от спутника к спутнику (минимальный рабочий угол антенны GW принят 15 градусов). Все эти процедуры требуют наличия служебной информации при формировании структуры кадров в канале связи на физическом, канальном и транспортном уровнях. Это, безусловно, дополнительно снижает информационную эффективность системы.

Заключение

Анализ изменения рабочей зоны в процессе движения спутников OneWeb показывает, что на ши-

ротах выше 57 град. необходимо выключить 50% спутников. Непосредственно у полюсов включенными могут остаться только 2–3 спутника. Это заметно снижает эффективность системы, что характерно для любых орбит Уолкера-Можаева [5]. Кроме того, расходуется время на организацию хэндовера пользователей между лучами, спутниками и станциями сопряжения. В совокупности эффективность спутников и системы ухудшается как минимум в 1,58 раза. Однако итоговая потенциальная технико-экономическая эффективность системы OneWeb остается очень высокой, примерно в 3,5 раза

$$\eta_r = 24/\Delta T * C / (\sum R_{ij_u} + \sum R_{ij_d})$$

C = затраты на создание системы (без абонентского сегмента);

$\sum R_{ij_d}$ = информационная скорость потоков в направлении абонента по всей сумме j спутников и i лучей;

$\sum R_{ij_u}$ = информационная скорость потоков от абонента по всей сумме спутников и лучей;

ΔT = часов в сутки, которые емкость системы доступна в заявленной рабочей зоне

$$\eta_f = 24 / \Delta T * C / (k_u \sum \Delta F_{ij_u} + k_d \sum \Delta F_{ij_d})$$

$k_u \sum \Delta F_{ij_d}$ = полезная полоса частот в лучах в направлении абонента;

$k_d \sum \Delta F_{ij_u}$ = полезная полоса частот в лучах в направлении от абонента

$$\eta_a = 24/\Delta T * C / [(\sum R_{ij_d}/r_d) \xi]$$

r_d – скорость доступа, гарантированная абоненту;

ξ – коэффициент переподписки [9]

Таблица 2

выше, чем для геостационарного спутника HTS Viasat-2.

Именно высокая потенциальная эффективность систем LEO/MEO-HTS привлекает особое внимание инвесторов. Но многочисленность проектов LEO/MEO-HTS уже порождает и проблемы. Эти проблемы в основном связаны с электромагнитной совместимостью с иными системами [6, 7] и между собой. Кроме того, может оказаться проблематичным кооперация с между-

народным участием стран в процессе реализации системы [8] с учетом ограниченности частотного ресурса.

Литература

1. Анпилогов В. Эффективность низкоорбитальных систем спутниковой связи на основе малых космических аппаратов // Технологии и средства связи. – 2015. – № 4. – С. 62–67.

2. Анпилогов В., Урличич Ю. Тенденции развития спутниковых технологий и критерии оценки их технико-экономической эффективности // Технологии и средства связи. – 2016. – № 2. – С. 46–53.

3. Сидоренко И.А., Евтушенко М.А. Оценка эффективности систем спутниковой связи на GEO, MEO и LEO // Научные Ведомости. – БелГУ. Серия Экономика. Информатика. – 2015. – № 19 (216). Выпуск 36/1. – С. 160–169.

4. Oneweb non-geostationary satellite system, attachment. Technical Information to Supplement Schedule S. Материалы FCC.

5. Степанов А, Акимов А., Гриценко А., Чазов В. 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.

6. Анпилогов В. Проблемы реализации LEO-HTS // Технологии и средства связи. Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание-2017”. – 2016. – № 6-2. С. 30

7. Анпилогов В., Шишлов А. Эйдус А. 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. Liu Yue, Liao Chunfa, The Development of Foreign Satellite Internet Constellation, Science & Technology Review, 2016,34 (7) (刘悦, 廖春发, 国外新兴卫星互联网星座的发展 科技导报2016, 34 (7)).

9. Анпилогов В. Р. Методика вероятностной оценки пропускной способности многолучевой спутниковой сети массового обслуживания / В. Р. Анпилогов, А. А. Афонин // “Электросвязь”. – 2011. – № 7. – С. 45-47

Пример формирования ГЗРВ (99,99% времени) при наличии двух станций сопряжения

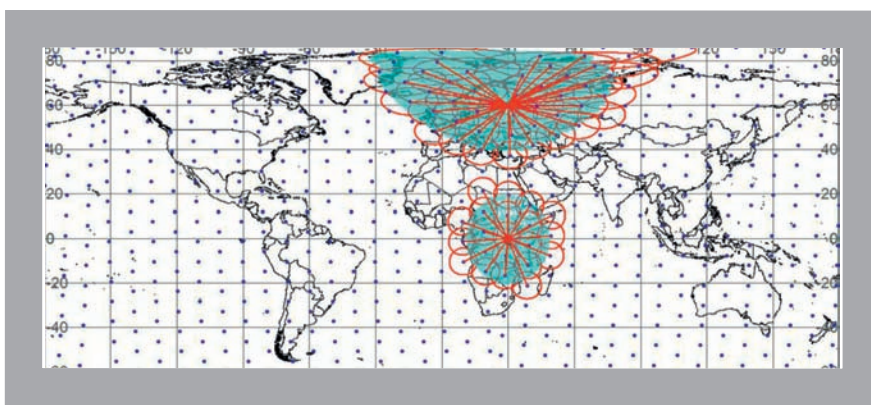


Рис. 9

Изменение угла места видимости спутника

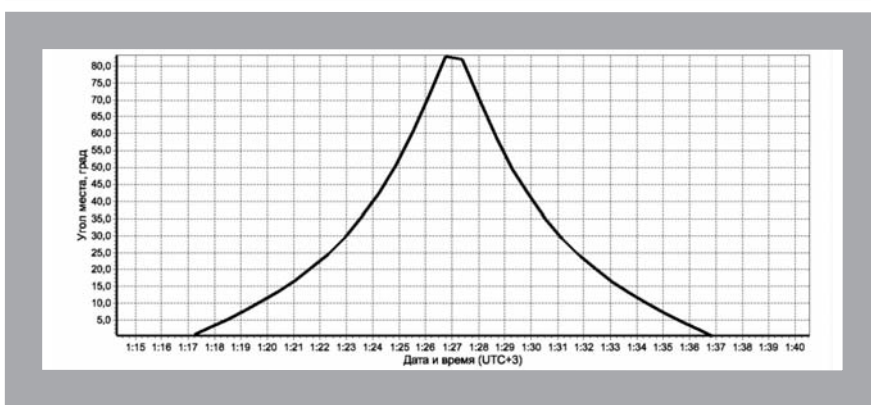


Рис. 10

