

Представлены результаты оценки требуемого числа спутников в составе космического сегмента спутниковой компоненты гибридной системы Direct-to-Device для прямого контакта с типовыми абонентскими устройствами сетей 4/5G на глобальном уровне и на территории России. Показано, что такая орбитальная группировка относится к типу группировок средней мощности, поскольку число спутников не превышает 100 при использовании низких круговых орбит. Приведен пример оценки бюджета абонентской радиолинии такого спутника при работе с типовым абонентским терминалом и показано, что спутник не может быть отнесен к классу малых и не могут быть достигнуты скорости каналов, аналогичные скоростям в системах спутникового широкополосного доступа.

Орбитальная группировка гибридной системы Direct-to-Device для обслуживания территории России



Валентин Анпилов

Заместитель генерального директора АО «ВИСАТ-ТЕЛ», к.т.н., доцент



Андрей Гриценко

Генеральный директор АО «ИКЦ «Северная корона», к.т.н.

В последнее время широко обсуждается тема интеграции наземных и спутниковых сетей подвижной радиосвязи. Основная идея — обеспечить для подвижного абонента бесшовный переход между спутниковой и сотовой сетью (и обратно) с учетом того, что в процессе

движения абонента у него имеется типовой (немодифицированный) терминал handset [1]. В итоге должна достигаться непрерывность обслуживания подвижного абонента с требуемым качеством.

Одним из вопросов при создании гибридной сети Direct-to-Device (D2D) является проблема организации орбитальной группировки. Далее приводится оценка мощности орбитальной группировки ($N_{ка}$ — число спутников), необходимой для глобального обслуживания и для

обслуживания России, если ограничиться широтой $40^\circ N$. В качестве примера приведена оценка бюджета абонентской радиолинии полезной нагрузки спутника.

О гибридных и интегрированных сетях

Следующим моментом, по которому нужна ясность, — это какие сети являются гибридными, а какие нужно отнести к интегрированным, и в чем между ними принципиальная разница.

Интегрированная сеть имеет как минимум две компоненты (спутниковая и наземная), которые функционируют независимо друг от друга. То есть такая сеть построена путем комбинирования двух составляющих. Подобное комбинирование, как правило, осуществляется на уровне абонентского устройства (АУ). Например, двухрежимный терминал Thuraya X5-Touch имеет слоты для двух СИМ-карт и, соответственно, имеет возможность работать как в спутниковой сети, так и в сотовой. В гибридной сети объединение осуществляется на уровне их систем

Ключевые слова:
Direct-to-Device, гибридная сеть

управления, а сервисы предоставляются в одной и той же полосе частот. В результате АУ воспринимает космические станции (КС) как наземные базовые станции (БС), объединенные в единую сеть, для доступа к которой нужна одна СИМ-карта. Поэтому переход работы абонентской линии с БС на КС и обратно происходит незаметно для пользователя, или бесшовно. Бесшовность — ключевое свойство гибридной сети. Этим достигается не просто интеграция, а глубокая интеграция (гибридизация) разных радиосетей.

Диапазоны частот гибридной сети

Очевидно, что диапазон частот для гибридной сети должен быть общим для сотового и спутникового операторов. Сегодня существуют два варианта решения этой задачи. Первый вариант предполагает использование диапазона частот L или S подвижной спутниковой службы (ПСС) для применения в спутниковой и сотовой сети. Этот путь предлагается консорциумом 3GPP и поддерживается традиционными операторами систем ПСС. Второй вариант революционный, поскольку предусматривает возможность использования спутниковой системой части полосы частот, выделенной для сотовой сети, в диапазоне, не распределенном таблицей частот для космической службы. Такие системы сегодня заявляются по п. 4.4 Регламента радиосвязи, а в перспективе планируется международная легализация такого решения на ВКР-27 (п. 1.13), которое получило название “дополнительное обслуживание из космоса” (является корректным переводом выражения *supplemental coverage from space (SCS)* [2]. Многие администрации связи находятся на стадии подготовки для разработки нормативных положений (в том числе и Россия), некоторые уже разрабатывают или разрабатывали проекты своих индивидуальных нормативных решений, но реально внедрила такое решение в свою нормативно-правовую базу пока только FCC (США) [3]. Второй вариант позволяет применять уже имеющиеся миллиарды типовых абонентских устройств сотовых сетей 4/5G для прямого контакта со спутником, поэтому является более предпочтительным. Первый вариант, по нашему мне-

нию, основано на соблюдении коммерческих интересов традиционных операторов ПСС.

Минимальный угол места

Сценарий применения гибридной сети D2D, ориентированной на услугу относительно низкоскоростной передачи данных (экстренные оповещения, обмен сообщениями, голосовые сообщения и данные) в РФ предполагает, что в городах и большинстве населенных пунктов услуги системы D2D будут предоставляться наземной компонентой. Задача спутниковой компоненты — обеспечить доступ к услугам связи за пределами зон обслуживания наземной компоненты. Это означает, что при проектировании системы можно заложить небольшое значение минимального угла места (УМ) видимости спутников, например 8° (как в системе Iridium).

Нужно отметить, что мощность (число спутников) орбитальной группировки (ОГ) зависит прежде всего от высоты орбиты и минимально допустимого УМ. Если высота орбиты $h = 780$ км и минимальный УМ $= 8^\circ$, то потребное число спутников для глобального обслуживания известно и равно 66, как в системе Iridium.

Для гибридной сети более комфортной будет по возможности более низкая высота орбиты. Примем высоту орбиты $h = 500$ км. В этом случае диаметр зоны радиовидимости спутника составит 3400 км, наклон-

ная дальность 1835 км, а угол раскрытия конуса обслуживания от спутника — $133,3^\circ$. Угол $133,3^\circ$ не означает, что бортовые АФАР должны обеспечивать сканирование луча в пределах $\pm 66^\circ$. При наличии на КС нескольких АФАР каждая может обслуживать только свой, более узкий, угловой сектор. Это существенно упрощает физическую реализацию и снижает энергопотребление АФАР.

Мощность орбитальной группировки

В [4] было показано, что при УМ $< 20^\circ$ целесообразно использовать одноэшлонную ОГ на приполярных орбитах в соответствии с конструкцией Уолкера — Можаяева. Там же было приведено выражение для оценки мощности ОГ в функции УМ. Так, для системы Iridium (высота орбиты 780 км, УМ $= 8^\circ$) получаем требуемое число спутника $N_{ка} = 62$ (реально используется 66). Для высоты орбиты 500 км получаем мощность группировки $N_{ка} = 106$ спутников для глобального обслуживания.

Выполнив синтез ОГ при тех же самых исходных данных с использованием САПР “Альбатрос”, получим, что потребная мощность ОГ составляет $N_{ка} = 105$ спутников. Структура такой ОГ может быть описана так: [7; 15; 25.9; 12; 8] (подробнее в [5]). Мгновенная зона радиовидимости спутников такой ОГ представлена на рис. 1.

Мгновенная зона радиовидимости ОГ ($h = 500$ км, УМ $= 8^\circ$, $N_{ка} = 105$)

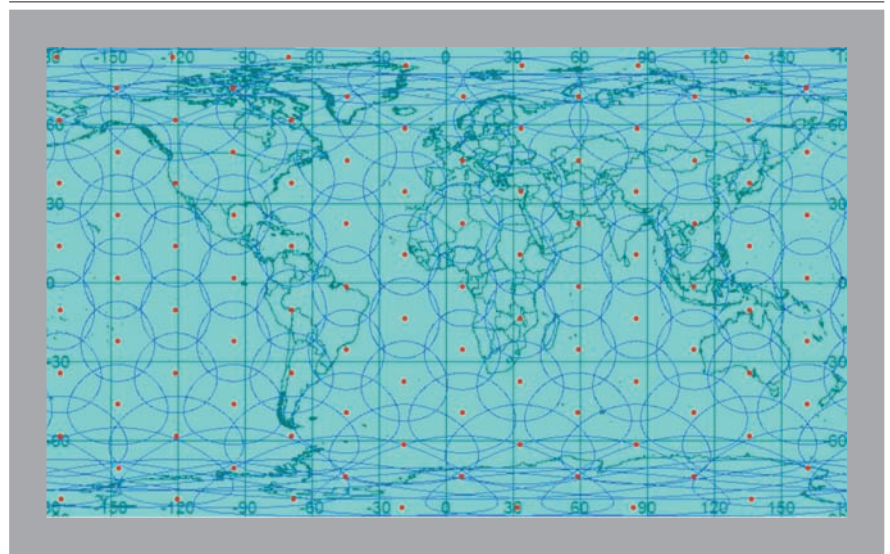


Рис. 1



Мгновенная зона радиовидимости ОГ ($h = 500$ км, $UM = 8^\circ$, $N_{ка} = 75$)

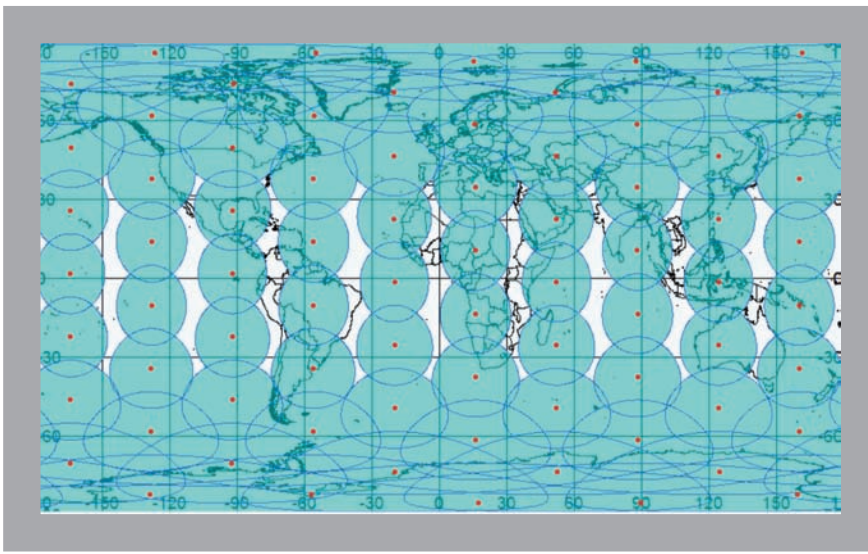


Рис. 2

Из рис. 1 видно, что обеспечивается непрерывное глобальное обслуживание, но если на первом этапе необходимо обеспечить только обслуживание территории России с учетом и сопредельных стран, то мощность ОГ может быть существенно снижена. Исследования показали, что такое региональное обслуживание может обеспечить ОГ мощностью $N_{ка} = 75$ спутников, имеющая следующую структуру: [5; 15; 36; 12; 8]. Мгновенная зона радиовидимости спутников такой ОГ представлена на рис. 2, ее структура показана на рис. 3.

Из рис. 2 видно, что услуги такой системы для прямого контакта КА и абонентского терминала сотовой

Структура ОГ для регионального обслуживания

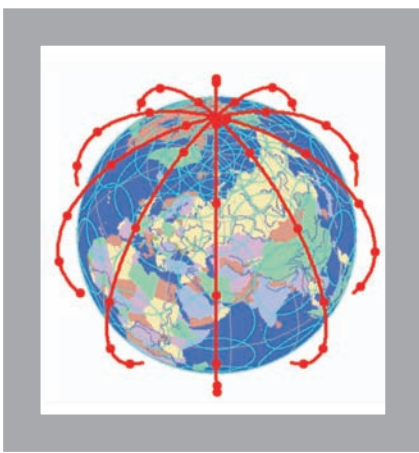


Рис. 3

сети потенциально доступны на глобальной основе, но гарантированы в любой момент времени только выше широты примерно 40° N. Применение межспутниковых линий в данном случае нецелесообразно и даже вредно, если рассматривать сеть как международную, поскольку региональные станции сопряжения (РСС) должны взаимодействовать с ядром сети каждого из национальных операторов сотовой сети, которые в соответствии с нормативно-правовыми положениями любой страны не допускают обработку трафика вне своей территории и имеют функции СОПМ или аналоги СОПМ.

Таким образом, мощность ОГ для глобального обслуживания при построении спутниковой компоненты гибридной сети D2D составит $N_{ка} = 105$, а для регионального обслуживания выше 40° N примерно $N_{ка} \leq 75$ спутников. При сдвигении границы зоны обслуживания выше 40° N число спутников уменьшается.

Нужно отметить, что достаточно большой диаметр зоны радиовидимости спутника (3400 км) предполагает, что РСС работает сразу с несколькими спутниками и, по-видимому, должна предусматривать функцию управления “прыгающими” абонентскими лучами спутника в рабочей зоне своей ответственности. Это важно для обеспечения ЭМС с наземной компонентой гибридной сети и для компенса-

ции снижения энергетики абонентской радиолинии более чем на 11 дБ при максимальной наклонной дальности. Компенсация снижения энергетики абонентской линии приведет к увеличению массы и потребления бортовой АФАР. Подход к минимизации энергопотребления бортовой АФАР известен [6]. Более неопределенным представляется решение задачи ЭМС, поскольку требует дополнительных исследований и формализации допустимых значений отношения полезного сигнала к помехе (С/І) или помехи относительно шума (І/Ν) для РЭС, применяемых в диапазоне частот работы спутниковой компоненты гибридной сети D2D.

Оценка затенений при работе абонентов на малых углах места

Малые углы места могут приводить к затенению АУ в направлении спутника рельефом местности и местными предметами (здания, лес и др.). Однако так как угловое направление на низкоорбитальный спутник непрерывно меняется, то и время затенения не является величиной постоянной. Попытаемся сделать оценку его значения применительно к ОГ, реализуемой с однократным обслуживанием рабочей зоны, то есть при условии, что в процессе сеанса связи АУ видит только один спутник.

Предположим, что на радиогоризонте, уровень которого определен в 8° по УМ, есть некоторое здание, формирующее “тень” размером 10° по УМ и 10° по азимуту. На рис. 3 и 4 представлены графики изменения угловой скорости по УМ и азимуту в функции времени (формат “час:мин.”) для двух случаев:

- спутник проходит через точку зенита, при этом возможен вариант, что происходит изменение его видимости для АУ только по УМ (рис. 4);
- спутник проходит на малых углах места (менее 8°), при этом происходит изменение видимости спутника в основном по углу азимута (рис. 5.).

Из рисунков следует, что минимальная угловая скорость по УМ и азимуту при однократном перекрытии зон обслуживания составляет примерно 6...7 угл. мин/сек. Следовательно, максимальное время затенения для принятой ситуации будет не более 100 сек.

52 Пример оценки надежности и непрерывности контакта АУ и спутниковой компоненты гибридной системы D2D

Широта АУ, град.	P, %	dT макс., сек.
80	100	0
70	100	0
60	99,6	12
50	98,5	27
40	95,4	122

Таблица 1

Для обобщения полученного значения проведем имитационное моделирование работы спутниковой компоненты гибридной сети. Поместим затеняющее здание восточнее положения АУ. Тогда “тень” от здания даст увеличение границы радиогоризонта на 10° по УМ в диапазоне углов азимута от 85° до 95° . Запустим движение орбитальной группировки с высотой $h = 500$ км и на разных географических широтах отметках будем оценивать два параметра: надежность связи (P% – процент времени среднего года) и максимальное время перерыва в связи (dT). Результаты представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, частичные перекрытия видимости спутников местными предметами могут приводить к снижению надежности и непрерывности связи. Однако такие события являются краткосрочными. Отметим, что в сотовой сети, то есть сети подвижной радиотелефонной связи, доля несостоявшихся вызовов допускается до 5% [7]. Аналогичные требования должны быть в последующем формализованы и для гибридных спутниковых сетей.

Пример оценки энергетического бюджета абонентского канала

В качестве примера выполним оценку бюджета для абонентского канала низкоорбитального спутника на высоте 500 км в составе ОГ гибридной сети D2D для канала LTE с полосой 1,4 МГц на частотах сотового оператора в режиме FDD (880 МГц “вверх” и 925 МГц “вниз”). В табл. 2 приведены результаты такой оценки в условиях отсутствия потерь на ионосферные сцинтилляции, но учтено возможное

наличие значительной помехи, равной полезному сигналу ($C/I = 0$ для абонента гибридной сети). Кроме того, учтена необходимость минимизации энергопотребления передающих АФАР [6].

На спутнике должно быть расположено несколько АФАР. Из представленной оценки следует, что каждая однолучевая передающая АФАР имеет площадь примерно 2 кв. м при потреблении примерно 200 Вт (таких АФАР должно быть, например, три), и одна многолучевая приемная АФАР площадью 2,7 кв. м. Этот пример расчета показывает, что архитектура спутника должна быть плоской и иметь площадь, достаточную для размещения АФАР (например, 3 x 3 м минимум в данном примере). Таким образом, спутники ОГ гибридной системы D2D едва ли будут соответствовать классу малых спутников.

Принятое пороговое значение C/N составляет минус 5 дБ, в условиях высоких внешних помех запасы для

канала “вниз” составляют примерно 4 дБ, а для канала “вверх” запасов практически нет. Соответственно, скорость канала “вниз” может достигать примерно от 1,2 Мбит/сек, а канала “вверх” всего 0,21 Мбит/с. Если помехи незначительны, то скорости каналов “вниз” достигают 2–3 Мбит/с, а “вверх” 0,5–2,6 Мбит/сек. Для увеличения скорости следует увеличивать апертуру бортовых АФАР. Увеличение площади апертуры в два раза даст приращение C/N на 3 дБ, но скорость в канале увеличится только в 1,2–1,3 раза. Этот вопрос требует отдельного исследования, но понятно, что достичь скоростей каналов, которые характерны для современных систем широкополосного доступа, невозможно.

Еще раз следует подчеркнуть, что представленный пример оценки бюджета абонентской радиолинии является только примером. Реальная задача более многогранная и требует дополнительных исследова-

График изменения угловой скорости по УМ, угл. мин/сек

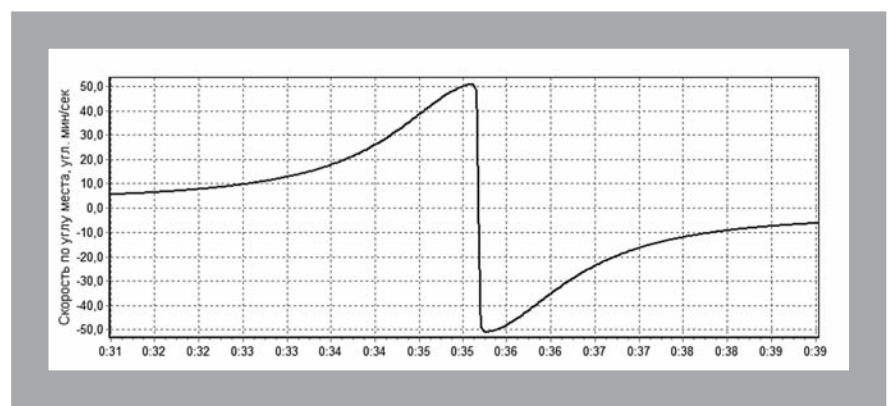


Рис. 4

График изменения угловой скорости по азимуту, угл. мин/сек

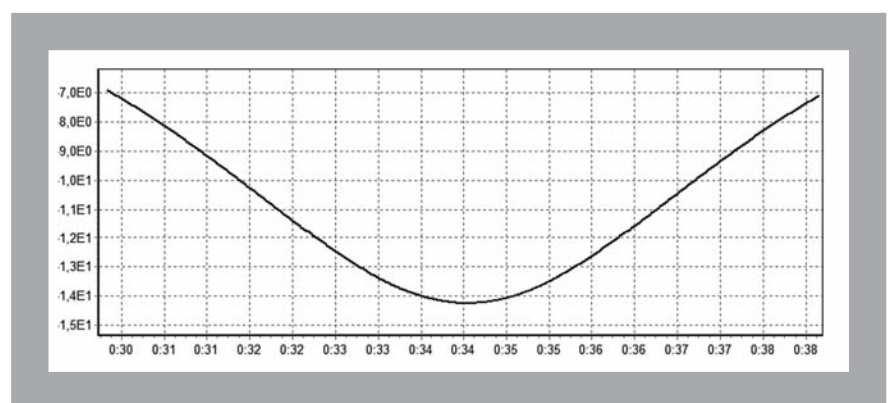


Рис. 5



Оценка бюджета абонентских радиолинии спутника гибридной сети D2D

Положение луча КА	В надире	Граница	В надире	Граница
Направление радиолинии	КА – Земля	КА – Земля	Земля – КА	Земля – КА
Полоса частот канала, кГц	1400	1400	1400	1400
Частота, МГц	925	925	880	880
Эквивалентный диаметр T_x антенны, м	1,00	2,00	0,125	0,125
ШДН T_x антенны, град.	21,1	10,5	177,3	177,3
Эффективная площадь T_x антенны, м ²	0,5	1,9	0,009	0,009
Усиление T_x антенны, дБи	17,5	23,5	0,0	0,0
Мощность излучения, Вт	2,0	20,0	0,2	0,2
ЭИИМ луча на канал, дБВт	20,5	36,5	-7,0	-7,0
Дальность D_{max} (минимум УМ = 8°), км	500	1835	500	1835
Потери в свободном пространстве, дБ	145,7	157,0	145,3	156,6
Поляризационные потери, дБ	3,0	3,0	3,0	3,0
Потери за счет сцинтилляций, дБ	0,0	0,0	0,0	0,0
Эквивалентный диаметр R_x антенны, м	0,13	0,13	1,80	2,20
Ширина ДН антенны, град.	162	162	12,3	10,1
Эффективная площадь R_x антенны, м ²	0,011	0,009	1,781	2,661
Усиление R_x антенны, дБи	1,10	0,5	22,8	24,6
Температура шума ПРМ $T_{ш}$, К	1163	1163	450	450
Добротность ПРМ $G_{прм}/T_{ш}$, дБ/К	-29,6	-30,2	-3,7	-1,9
Мощность сигнала на входе ПРМ, дБ/Вт	-128,1	-123,5	-132	-142
Отношение С/Н в центре луча, дБ	8,4	12,9	8,1	-1,4
Отношение С/Н на границе луча, дБ	5,4	9,9	5,1	-4,4
Отношение С/Н пороговое, дБ	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0
Максимальный запас в радиолинии, дБ	13,4	17,9	13,1	3,6
Предполагаемое отношение С/І, дБ	0,0	0,0	0,0	0,0
Значение $S/(N+I)$ в центре луча, дБ	-0,5	-0,2	-0,6	-3,8
Значение $S/(N+I)$ на границе луча, дБ	-0,9	-0,4	-1,2	-5,8
Запас в центре луча при помехах, дБ	4,5	4,8	4,4	1,2
Запас на границе луча при помехах, дБ	4,1	4,6	3,8	-0,8

Таблица 2

ний. Программная платформа для решения такой задачи в среде “Альбатрос” имеется и непрерывно совершенствуется с учетом возникновения новых задач имитационного моделирования космических систем, и не только относящихся к системам связи.

Выводы и рекомендации

Орбитальная группировка спутниковой компоненты гибридной сети D2D, ориентированная для обслуживания территории РФ и близлежащих государств, должна содержать не более 100 спутников и по классификации [5] относится к

группировкам средней мощности. Если ограничиться обслуживанием территории России выше 40° N, то число спутников составляет не более 75.

Габариты спутника в значительной степени будут определяться размерами АФАР (передающими и при-

емной), а его энергопотребление зависит от передающих АФАР. Размер АФАР определяет достижимую скорость в абонентских каналах, которая принципиально ниже, чем в системах спутникового ШПД, но достаточна для представления практически всех сервисов “интернет”.

Литература

1. Report ITU-R M.2514-0 Vision, requirements and evaluation guidelines for satellite radio interface(s) of I M T - 2 0 2 0 . https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2514-2022-PDF-E.pdf (дата обращения 24.11.2024).
2. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-400678A1.pdf> (дата обращения 24.11.2024).
3. <https://www.federalregister.gov/documents/2023/04/12/2023-07214/single-network-future-supplemental-coverage-from-space-space-innovation> (дата обращения 24.11.2024).
4. Анпилогов В., Гриценко А. О построении орбитальных группировок большой мощности на LEO для телекоммуникационных систем // Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание – 2023”. С. 48–52.
5. Анпилогов В., Гриценко А. Оптимальные низкоорбитальные группировки // Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание – 2022”. С. 44–47.
6. Анпилогов В.Р., Денисенко В.В., Левитан Б.А., Козлов В.Н., Шитиков А.М., Шишлов А.В. Уменьшение энергопотребления передающей активной фазированной решетки низкоорбитального спутника связи с “прыгающим” лучом // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 8. С. 733–741.
7. Приказ Минцифры России от 25 ноября 2021 г. № 1229 “Об утверждении требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования”.

Компания SES создаст среднеорбитальный сегмент системы IRIS²

В декабре 2024 г. компания SES подписала контракт на создание сегмента МЕО европейской системы IRIS². Готовность сегмента МЕО для штатной эксплуатации планируется в 2031 г. Низкоорбитальная система OneWeb не включена в состав IRIS². Общие затраты на проект IRIS² в декабре 2024 г. оцениваются в 10,6 млрд евро (ЕС 6 млрд, ЕКА 0,55 млрд, частные компании 6 млрд).