

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R S.1782

Возможности для глобального широкополосного доступа в интернет для систем фиксированной спутниковой службы

(Вопрос МСЭ-R 269/4)

(2007)

Сфера применения

Для того чтобы рассмотреть проблемы, поднятые и Ассамблеей радиосвязи, и ВКР-03, было выполнено предварительное исследование возможностей предоставления высокоскоростного доступа в интернет через спутник. В первом Приложении делается попытка идентифицировать подходящие полосы частот, распределенные фиксированной спутниковой службе (ФСС), и были выбраны пары полос шириной по 500 МГц в распределенных для ФСС диапазонах 11/14 ГГц, 20/30 ГГц и 40/50 ГГц. Для каждого из указанных случаев разработаны характеристики линий вверх и вниз, и рассчитаны значения пропускной способности для каждого спутника на основе данных о линиях непосредственной спутниковой связи с терминалами пользователей, оборудованных антеннами диаметром 30 см. Выполнена оценка суммарной пропускной способности таких систем для обслуживания эталонной зоны площадью 10 000 000 км². Во втором Приложении разработаны характеристики линий вверх и вниз в диапазонах 20/30 ГГц и 11/14 ГГц для системы, которая содержит линии непосредственной связи со спутником терминалов пользователей с антеннами диаметром 1,2 м, и снова рассчитаны значения пропускной способности для каждого спутника и суммарная пропускная способность. В третьем Приложении разработаны характеристики примерной системы, основанной на доступе пользователя через наземные линии радиосвязи к "коллективным" земным станциям и оттуда через спутник в диапазоне 20/30 ГГц или 11/14 ГГц к центральной земной станции, и еще раз рассчитаны значения пропускной способности для каждого спутника и суммарная пропускная способность.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что технология спутниковой связи способна повысить доступность высокоскоростных интернет-услуг в развивающихся странах, включая наименее развитые страны, страны, не имеющие выхода к морю, и островные государства, а также страны с переходной экономикой;
- b) что желательно определить технические и эксплуатационные характеристики систем фиксированной спутниковой службы (ФСС), которые могли бы упростить массовое производство оборудования простых терминалов пользователей по доступным ценам;
- c) что желательно оценить глобальную пропускную способность, которая может быть обеспечена в полосах частот, распределенных ФСС, системами, имеющими характеристики, определенные в п. b) раздела *учитывая*;
- d) что определения в п. b) раздела *учитывая* должны учитывать как возможность разработки систем специально для высокоскоростного доступа в интернет при помощи малых терминалов пользователей, так и тот факт, что некоторые существующие системы уже содержат оборудование для широкополосного доступа в интернет;
- e) что для широкополосного доступа в интернет через существующие системы ФСС используются земные станции различных размеров, разработанные также и для других применений и использующие другие полосы частот;
- f) что разработка стандартов для спутниковой технологии, упомянутой в п. a) раздела *учитывая*, для интернет применений содействует более широкому использованию спутниковой связи для доступа в интернет,

отмечая,

- a) что в Рекомендации МСЭ-R S.1783 описаны системы фиксированной спутниковой службы высокой плотности (HDFSS);
- b) что в Рекомендации МСЭ-R S.1709 описаны технические характеристики радиоинтерфейсов глобальных широкополосных спутниковых систем,

признавая,

- a) что частоты, распределенные ФСС, в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе могут использоваться для предоставления высокоскоростных интернет-услуг на глобальном уровне,

рекомендует

1 что в Приложениях 1, 2 и 3 описывается три возможных примера, которые могут использоваться для реализации глобального высокоскоростного доступа в интернет через ФСС.

Приложение 1

Возможности предоставления глобального¹ широкополосного² доступа в интернет через системы ФСС, разработанные для земных станций с малыми антеннами

1 Аспекты использования полос радиочастот

1.1 Подходящие полосы частот

Термин "в краткосрочной перспективе" относится к полосам частот, в которых спутниковая технология уже разработана. В настоящее время это полностью справедливо для распределенных ФСС полос частот в диапазонах 4/6 ГГц и 11/14 ГГц и частично справедливо для распределенных ФСС полос частот в диапазоне 20/30 ГГц. Можно ожидать, что "в среднесрочной перспективе", скажем в течение последующих десяти лет, будет полностью разработана спутниковая технология для полос 20/30 ГГц и, кроме того, появятся некоторые разработки в полосах 40/50 ГГц, хотя опыт подсказывает, что это развитие можно будет считать законченным только "в долгосрочной перспективе". В Статье 5 Регламента радиосвязи (PP) имеются распределения частот для ФСС в диапазонах выше 50 ГГц, но маловероятно, что значительное развитие в этих полосах произойдет раньше, чем в долгосрочной перспективе, поэтому здесь эти полосы не рассматриваются.

В предварительных исследованиях полосы частот 4/6 ГГц для интересующего нас применения не рассматривались на том основании, что в дешевых терминалах предполагается использование очень маленьких антенн, для которых маловероятно усиление, необходимое для работы с обычно используемыми спутниками с широкими лучами. Более того, полосы 4/6 ГГц уже интенсивно используются, поэтому, даже если бы существовали спутники С-диапазона с точечными лучами, земным станциям с очень маленькими антеннами и, соответственно, широкими лучами было бы трудно использовать частоты совместно с существующими службами. Следовательно, полосы 4/6 ГГц далее в настоящем Приложении не рассматриваются.

¹ В настоящем исследовании прилагательное "глобальный" означает в любом месте, которое может быть обслужено геостационарным спутником.

² В настоящем исследовании используется пример "широкополосного" доступа со скоростью пользователя 2 Мбит/с.

Также в предварительных исследованиях считалось, что высказанные в предыдущем параграфе соображения до определенной степени применимы также и в полосах 11/14 ГГц. Ограничения размера антенны земной станции здесь менее жесткие, чем для полос 4/6 ГГц, потому что усиление выше, и работа с точечными лучами (среднего размера) является более привычной, однако, как и в полосе 4/6 ГГц, неплановые частоты в полосах 11/14 ГГц в течение многих лет интенсивно используются, поэтому возможны проблемы, связанные с совместным использованием частот.

Считается, что распределенные ФСС полосы в диапазоне 20/30 ГГц по своей природе будут в ближайшем будущем наиболее подходящими для широкополосного доступа в интернет, поскольку их длины волн согласуются с очень маленькими антеннами, технология достаточно хорошо разработана, и интенсивность использования этой полосы пока еще относительно невелика. Кроме того, доступ в интернет физических лиц несовместим с используемыми до настоящего момента способами международного регулирования использования частот в подавляющем большинстве распределенных ФСС полос частот, т. е. с необходимостью координации каждой земной станции. Вероятность того, что терминалы пользователей будут в огромных количествах свободно продаваться в розницу и устанавливаться в жилищах и офисах, делает необходимым введение режима регулирования, подобного тому, который разрабатывается для систем фиксированной спутниковой службы высокой плотности (HDFSS). Далее для удобства частично повторяется п. 5.516В Регламента радиосвязи, на который ссылается ВКР-03 в своих рекомендациях по проведению исследования возможных глобальных широкополосных систем ФСС:

"Следующие полосы частот идентифицированы для использования в применениях фиксированной спутниковой службы высокой плотности:

17,3–17,7 ГГц	(космос-Земля) в Районе 1,
18,3–19,3 ГГц	(космос-Земля) в Районе 2,
19,7–20,2 ГГц	(космос-Земля) во всех Районах,
39,5–40 ГГц	(космос-Земля) в Районе 1,
40–40,5 ГГц	(космос-Земля) во всех Районах,
40,5–42 ГГц	(космос-Земля) в Районе 2,
47,5–47,9 ГГц	(космос-Земля) в Районе 1,
48,2–48,54 ГГц	(космос-Земля) в Районе 1,
49,44–50,2 ГГц	(космос-Земля) в Районе 1,
и	
27,5–27,82 ГГц	(Земля-космос) в Районе 1,
28,35–28,45 ГГц	(Земля-космос) в Районе 2,
28,45–28,94 ГГц	(Земля-космос) во всех Районах,
28,94–29,1 ГГц	(Земля-космос) в Районах 2 и 3,
29,25–29,46 ГГц	(Земля-космос) в Районе 2,
29,46–30 ГГц	(Земля-космос) во всех Районах,
48,2–50,2 ГГц	(Земля-космос) в Районе 2".

Следует отметить, что эти распределения добавлены к следующим суммарным полосам:

<i>Полосы 20/30 ГГц</i>	Глобальное распределение	плюс	Район 1	Район 2	Район 3
Линия вниз	500 МГц		400 МГц	1 000 МГц	–
Линия вверх	1 030 МГц		320 МГц	470 МГц	160 МГц
<i>Полосы 40/50 ГГц</i>					
Линия вниз	500 МГц		2 000 МГц	1 500 МГц	–
Линия вверх	–		–	2 000 МГц	–

Таким образом, предполагая, что полосы, предназначенные для глобального использования, могут одновременно использоваться в двух или трех Районах, для HDFSS в этих полосах частот для различных Районов идентифицирован следующий суммарный спектр:

Район 1 – 3400 МГц, линия вниз, 1350 МГц, линия вверх;

Район 2 – 3500 МГц, линия вниз, 3500 МГц, линия вверх;

Район 3 – 1000 МГц, линия вниз, 1190 МГц, линия вверх.

В этих суммарных значениях предполагается, что в Районе 1 для удовлетворения потребностей применений HDFSS на линии вниз потребуется более широкая полоса частот, чем на линии вверх, но в двух других Районах в обоих направлениях передачи ширина полос может быть одного порядка.

В том что касается полос 20/30 ГГц и 40/50 ГГц, настоящая Рекомендация ограничивается полосами частот, идентифицированными в п. 5.516В Регламента радиосвязи для всех трех Районов, т. е. 19,7–20,2 ГГц, 28,45–28,94 ГГц, 29,46–30,0 ГГц и 40,0–40,5 ГГц (см. таблицу 1).

Несмотря на то, что рекомендации ВКР-03 и Ассамблеи радиосвязи по проведению в МСЭ-R исследований по данной тематике предполагали использование полос частот, распределенных ФСС, выполненный в настоящем Приложении анализ частот ФСС в полосах 11/14 ГГц, дал бы аналогичные результаты, если был бы выполнен для соседних полос частот, распределенных радиовещательной спутниковой службе (РСС) (т. е. 11,7–12,5 ГГц в Районах 1 и 3 и 12,2–12,7 ГГц в Районе 2).

1.2 Современное использование полос частот фиксированной спутниковой службой

Для того чтобы оценить, насколько будущие спутники смогут удовлетворять требованиям широкополосного доступа в интернет в полосах частот, рассмотренных в § 2.1, необходимо определить, насколько интенсивно орбитально-спектральный ресурс в этих полосах частот либо уже используется существующими спутниковыми системами, либо будет в скором времени использоваться системами, которые уже разрабатываются для других применений ФСС. Отмечая, что сведения об изменениях текущего и планируемого использования различных полос частот можно получить из базы данных спутниковых сетей Бюро радиосвязи (SNS), в таблице 1 сравнивается количество применений ГСО/ФСС, использовавших до января 2005 г. участок спектра шириной 500 МГц в каждом из распределенных ФСС диапазонов 11/14 ГГц, 20/30 ГГц и 40/50 ГГц. Каждая из этих полос шириной 500 МГц (за исключением последней) распределена ФСС во всех трех Районах:

ТАБЛИЦА 1

Сравнение применений для распределения спектра

Распределение частот для ФСС	Ширина полосы	Направление передачи	Основное назначение	Число записей
10,95–11,2 ГГц } 11,45–11,7 ГГц }	500 МГц	Космос-Земля	Общие коммерческие применения ФСС	12 417
14,0–14,5 ГГц	500 МГц	Земля-космос		16 467
19,7–20,2 ГГц	500 МГц	Космос-Земля	Идентифицированы для HDFSS	5 245
29,5–30,0 ГГц	500 МГц	Земля-космос		4 830
40,0–40,5 ГГц	500 МГц	Космос-Земля	Идентифицированы для HDFSS	1 205
(48,2–48,7 ГГц ⁽¹⁾)	500 МГц	Земля-космос		(797)

⁽¹⁾ Этот участок полосы частот идентифицирован ВКР-03 для линий вверх HDFSS в Районе 2. Несмотря на то, что он не был аналогично идентифицирован в Районах 1 и 3, он добавлен, для того чтобы настоящая таблица могла охватывать линии вверх для дополнения линий в них в диапазоне 40 ГГц.

Вместе с тем фактом, что сегодня в диапазоне 11/14 ГГц работает много больше полезной спутниковой нагрузки, чем в более высоких полосах частот, информация в таблице 1 дает возможность сделать следующие выводы:

- Основные глобальные распределения ФСС в диапазоне 11/14 ГГц в настоящее время используются намного более интенсивно, чем те участки в диапазоне 20/30 ГГц, которые идентифицированы для будущего глобального использования HDFSS.
- Использование фиксированной спутниковой службой частот 40/50 ГГц, идентифицированных для будущего использования HDFSS, еще не началось.

2 Возможные технические характеристики

2.1 Спутниковые лучи

Исследования показали, что задача предоставления возможности высокоскоростного доступа в интернет через спутник с отдельных терминалов пользователей по приемлемым ценам может быть наилучшим образом решена при помощи систем, позволяющих использовать на стороне пользователя терминалов, оборудованных сверхмалыми антеннами (USAT). В настоящем исследовании в качестве примера используется антенна диаметром 30 см. Относительно небольшое усиление антенн таких терминалов, особенно в нижней части рассматриваемых диапазонов частот, может привести к умеренной пропускной способности спутника и, следовательно, к относительно невысокой стоимости космического сегмента на 1 бит информации, если только каждый спутник не разработан для многократного использования частот за счет множества точечных лучей.

В таблицах 3, 4 и 5 показаны относящиеся к настоящему исследованию соответствующие параметры из Приложений к Рекомендации МСЭ-R S.1328, а также приводятся данные о размерах точечных лучей, которые либо доступны уже сегодня, либо, вероятно, будут доступны в ближайшем будущем. Для полос частот 11/14 ГГц данные в таблице 3 увеличены на коэффициенты усиления приемных спутниковых антенн, полученные из ответов на Вопросник Бюро радиосвязи 1998 года. Можно предположить, что спутники, которые будут разработаны в ближайшем будущем для широкополосного доступа в интернет, будут содержать несколько точечных лучей ближе к узкому (т. е. с высоким усилением) краю диапазона в таблицах 3, 4 и 5. Аналогичным образом, параметры, показанные в таблице 2, выбраны как базовые значения для формализации описания пользовательских каналов соответствующих спутниковых систем. Предполагается, что для удобства эксплуатации подсистемы спутниковых антенн будут разработаны так, чтобы в каждой паре антенн передающий и приемный лучи были бы одинаковой ширины и чтобы их зоны обслуживания располагались в одинаковых фиксированных положениях на поверхности Земли.

ТАБЛИЦА 2

Выбранные характеристики спутникового точечного луча

Диапазон частот ФСС	11/14 ГГц	20/30 ГГц	40/50 ГГц
Усиление в центре луча (дБи)	42	50	55
Ширина луча по уровню –3 дБ (градусы)	1,4	0,6	0,3
Количество (<i>n</i>) двуполярных лучей приема/передачи на одном спутнике	12	32	64

Важно отметить, что с уменьшением ширины луча требования к точности его наведения повышаются и, следовательно, увеличивается сложность и стоимость регулирования зоны обслуживания луча.

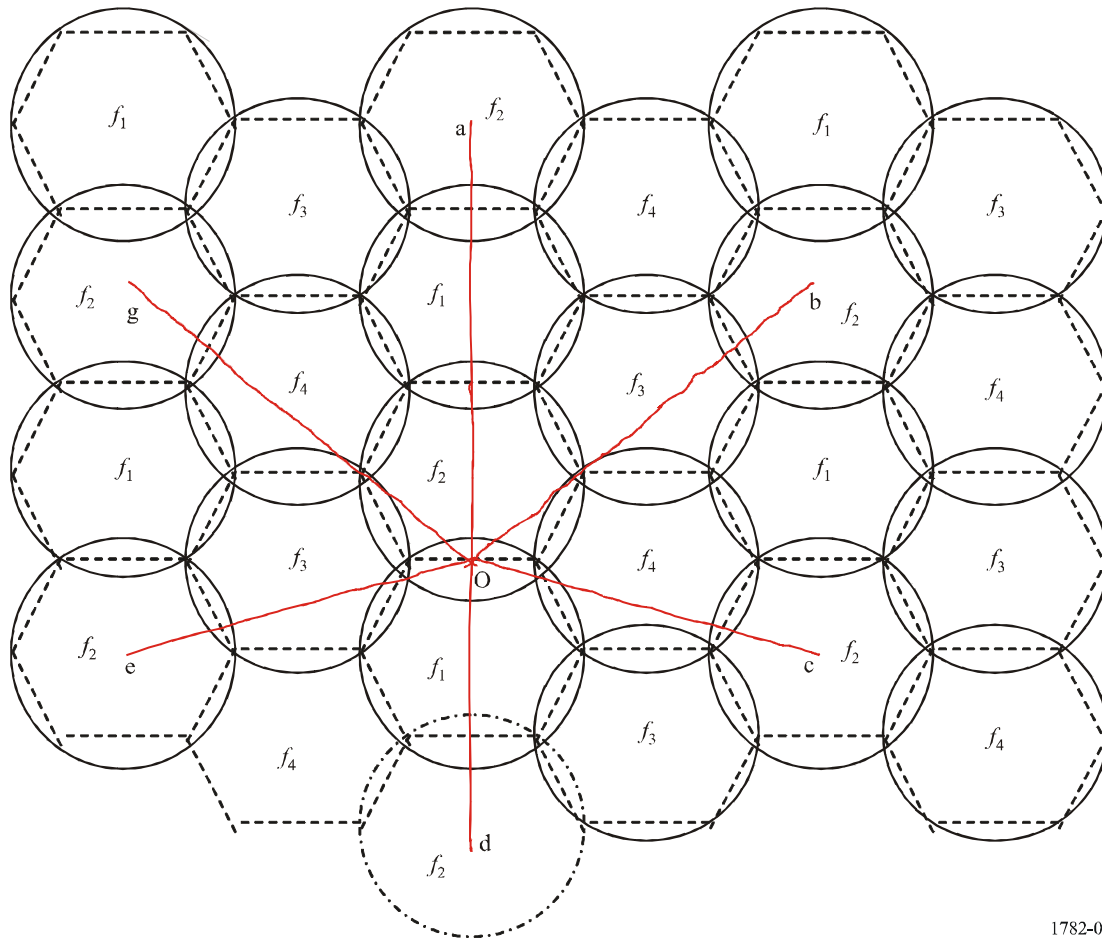
В свете развития технологии космических аппаратов последних лет разумно предположить, что будут созданы такие схемы подачи сигнала в антенну, которые компенсируют кривизну поверхности Земли, в результате чего все лучи, сформированные на данном спутнике, будут иметь круговые зоны обслуживания одинакового диаметра вне зависимости от направления наведения луча. Таким образом, за исключением случая наведения луча точно на подспутниковую точку, каждый луч будет иметь примерно эллиптическое сечение, а соотношение осей этого эллипса будет зависеть от

направления наведения относительно направления на подспутниковую точку. Значения ширины луча по большой (φ_a) и малой (φ_b) осям будет таким, что $((\varphi_a) \cdot (\varphi_b))^{0,5} = (\varphi_0)$, где (φ_0) – это ширина (кругового) луча по уровню -3 дБ луча, наведенного в подспутниковую точку.

Для формирования непрерывного покрытия при помощи множества лучей с круговыми зонами обслуживания, можно предположить шестиугольную топологию перекрытия, показанную на рисунке 1.

РИСУНОК 1

Шестиугольная топология для зон обслуживания перекрывающихся спутниковых лучей



1782-01

На рисунке 1 показана топология для многократного использования частот "один к четырем", предполагается, что каждый луч имеет двойную поляризацию. Учитывая практически реализуемые значения крутизны спада и первых боковых лепестков, например, описанные в Рекомендации МСЭ-R S.672, развязка между центром луча и ближайшей границей соседнего луча с той же частотой должна быть достаточной для обеспечения такого режима работы. Например, в точке "о" на границе одной из шестиугольных зон, обслуживаемой лучом с частотой f_2 , помехи, вносимые ближайшими лучами с той же частотой, можно рассчитать, зная внеосевые углы oa , ob , oc , od , oe и og , с вершиной на спутнике. Из геометрии этой диаграммы получим:

$$oa = 5(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ) = 2,165(\varphi_0)$$

$$ob = og = (\{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2 + \{3(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ)\}^2)^{0,5} = 1,984(\varphi_0)$$

$$oc = oe = (\{(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ)\}^2 + \{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2)^{0,5} = 1,561(\varphi_0) \text{ и}$$

$$od = 3(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ) = 1,299(\varphi_0)$$

ТАБЛИЦА 3

Размеры точечных лучей спутников ГСО/ФСС, предназначенных для работы в полосах 11/14 ГГц**а) Информация из Рекомендации МСЭ-R S.1328**

Таблица в приложениях к Рекомендации МСЭ-R S.1328 Спутниковая система	Таблица 2		Таблица 17	Таблица 29
	GSO-C	GSO-D	GSO-VX	Pan-Af
Пиковое усиление передающей антенны спутника (дБи)	30	30	33,5	32-38
Ширина передающего луча спутника по уровню -3 дБ (градусы)	(5,6)	(5,6)	(3,7)	(4,5-2,2)
Пиковое усиление приемной антенны спутника (дБи)			33,5	
Ширина приемного луча спутника по уровню -3 дБ (градусы)			(3,7)	
Поляризация	Круговая	Двойная круговая	Двойная круговая	Линейная
Количество лучей на спутнике				10

б) Информация из ответов на вопросник Бюро радиосвязи

Для девяноста линий из тех линий диапазона 11/14 ГГц, для которых были представлены данные, были указаны значения пикового усиления приемной антенны спутника, превышающие 30 дБи. Следовательно, соответствующие лучи имели ширину на уровне половинной мощности менее 6°, и такие лучи можно считать точечными.

Эти значения усиления лежали в диапазоне от 30,1 до 45,6 дБи, со средним значением 36,5 дБи, что соответствует ширине луча 5,5° (максимум), 0,93° (минимум) и 2,7° (среднее значение), соответственно.

ТАБЛИЦА 4

Размеры лучей спутников ГСО/ФСС, предназначенных для работы в полосах 20/30 ГГц; информация из Рекомендации МСЭ-R S.1328

Таблица в приложениях к Рекомендации МСЭ-R S.1328	Таблица 1		Таблица 2		Таблица 3			Таблица 5		Таблица 6	Таблица 12		Таблица 13
	GSO13	GSO20	GSO30	GSO F	GSO11	GSO12	GSO13	Система P		Система Q	GSO Ka-J		EKX
Пиковое усиление передающей антенны спутника (дБи)	46,5	43,5	55	49	49,5	33	46,5	53,2	46,2	49	41	47	48,4
Ширина передающего луча спутника по уровню -3 дБ (градусы)	(0,84)	(1,18)	(0,32)	(0,63)	0,44	(3,97)	1,4	0,3	0,6	0,55	(1,58)	(0,79)	(0,67)
Пиковое усиление приемной антенны спутника (дБи)	46,5	43,5	55	49	~50 ⁽¹⁾		~47 ⁽¹⁾	57,2	47,7	49			48,4
Ширина приемного луча спутника по уровню -3 дБ (градусы)	(0,84)	(1,18)	(0,32)	(0,63)	(~0,56)		0,9	0,3	0,6	0,55			(0,67)
Поляризация	Круговая	Двойная круговая	Двойная круговая		Двойная линейная	Круговая	Двойная круговая			Двойная круговая	Круговая	Круговая	Двойная
Количество лучей на спутнике					7 + 7	1	24 + 24						

¹⁾ Получено из значения G/T .

ТАБЛИЦА 5

Размеры лучей спутников ГСО/ФСС, предназначенных для работы в полосах 40/50 ГГц; информация из Рекомендации МСЭ-R S.1328

Таблица в приложениях к Рекомендации МСЭ-R S.1328	Таблица 17	Таблица 18	Таблица 19	Таблица 21	Таблица 22	Таблица 27	Таблица 28
Спутниковая система	GSO-VX	GSO-SV	GSO-LV	GSO-VI	GEOSAT-X	GSOV-B1	GSOV-B2
Пиковое усиление передающей антенны спутника (дБи)	49,0	58,0	52,0	53,0	56,5	51,5	53,1
Ширина передающего луча спутника по уровню -3 дБ (градусы)	(0,63)	0,15	0,15	(0,4)	(0,27)	0,3	(0,39)
Пиковое усиление приемной антенны спутника (дБи)	49,0	58,0	52,0	53,0			53,1
Ширина приемного луча спутника по уровню -3 дБ (градусы)	(0,63)	(0,22)	0,15	(0,4)			(0,39)
Поляризация	Двойная круговая	Двойная круговая	Двойная круговая	Двойная круговая	Двойная круговая	Линейная	
Количество лучей на спутнике		40		24	48	24	80

Примечания к таблицам 3, 4 и 5:

Цифры без скобок в данных таблицах взяты непосредственно из Рекомендации МСЭ-R S.1328. Значения ширины луча в скобках были получены из соответствующих значений пикового усиления следующим образом:

Для параболической антенны $G_m = 10 \log((4\pi)/\lambda^2(\pi D^2/4)\eta)$,

где:

G_m : пиковое усиление (дБи)

D : диаметр (м)

λ : длина волны (м)

η : коэффициент использования поверхности, скажем 0,65.

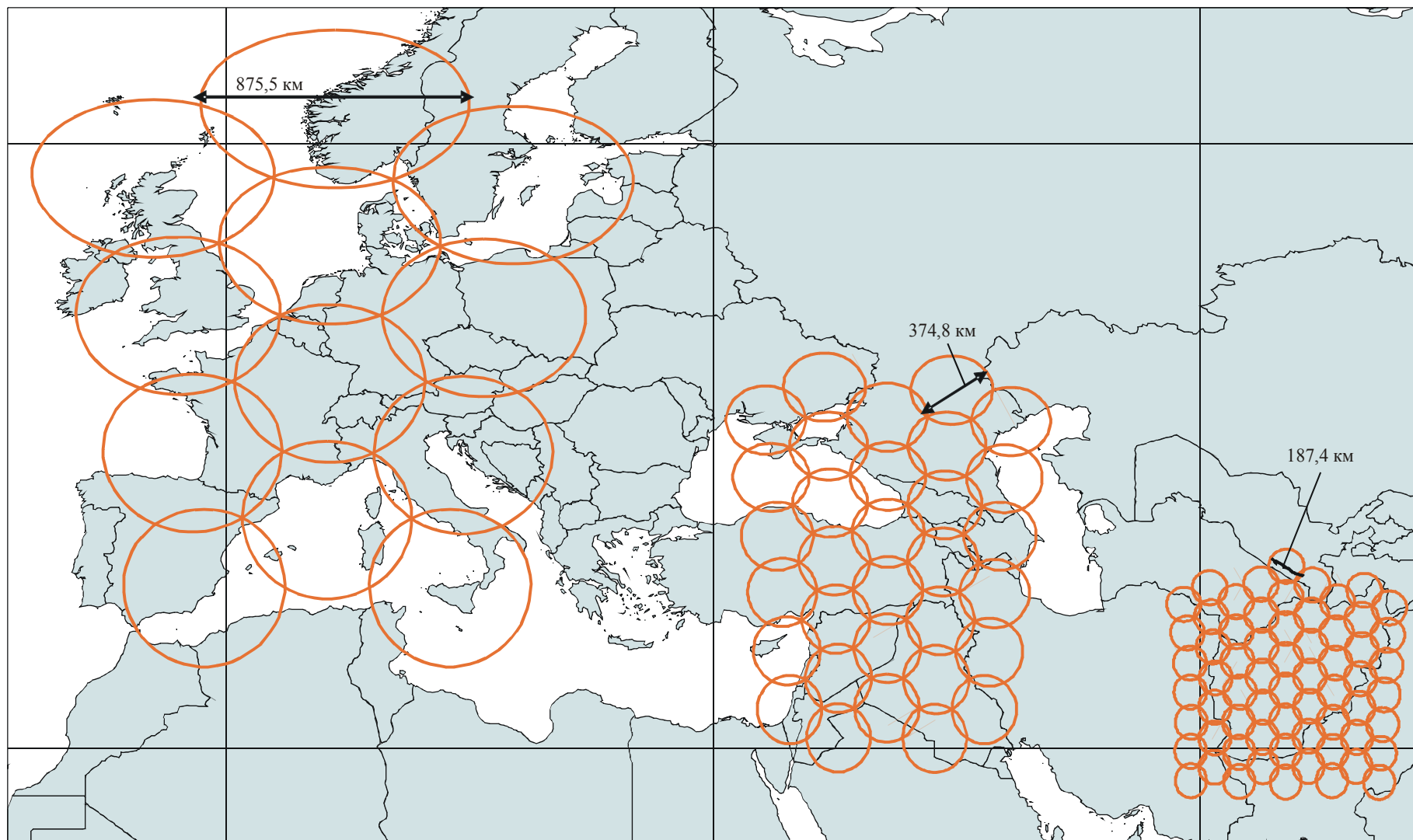
Отсюда $D/\lambda = (10^{0,05G_m})/(\pi\sqrt{0,65})$.

Кроме того, согласно эмпирическому выражению, ширина луча по половинной мощности составляет $\varphi_{-3} = 70\lambda/D$ градусов, тогда, заменяя D/λ , получаем: $\varphi_{-3} = (177,3)10^{-0,05G_m}$ градусов.

Пустые записи в таблицах встречаются потому, что в Рекомендации МСЭ-R S.1328 отсутствуют данные и они не могут быть надежно получены из имеющихся значений данных.

РИСУНОК 2

Примеры размещения лучей на спутниках ФСС, которые могли бы предоставить высокоскоростной доступ в интернет



Зоны обслуживания 12 лучей
в полосах частот 11/14 ГГц

Зоны обслуживания 32 лучей
в полосах частот 20/30 ГГц

Зоны обслуживания 64 лучей
в полосах частот 40/50 ГГц

Исходя из Рекомендации МСЭ-R S.672, для простых круговых и эллиптических лучей видно, что, если усиление в первом боковом лепестке на 25 дБ ниже пикового усиления, то, предполагая, что значения э.и.и.м. в центре каждого луча одинаковы и что соотношение ко-поляризованных и кросс-поляризованных составляющих в каждом луче также равно 25 дБ, получаем, что отношение несущей к помехе, обусловленной многократным использованием частот, определяется выражением:

$$(C/I)_{FR} = -10 \log(7 \{10^{-(25/10)}\}) = 16,5 \text{ дБ}$$

Вполне возможно, что на практике значение $(C/I)_{FR}$ будет еще больше, поскольку маловероятно, что все шесть помех будут соответствовать пикам боковых лепестков.

Примеры областей обслуживания геостационарных спутников, имеющих распределения лучей, показанные в таблице 2, изображены на рисунке 2. Можно отметить, что общая зона обслуживания резко уменьшается обратно пропорционально частоте.

2.2 Параметры примерной линии

В настоящем исследовании рассмотрен случай, когда отдельные пользователи имели непосредственный доступ к спутнику через терминалы USAT. Вариант архитектуры, при котором используются дополнительные земные станции, рассмотрен в Приложениях 2 и 3.

Выполнены расчеты, в результате которых для всех трех полос частот, описанных в § 1, получены параметры линий от пользователя до спутника. В расчетах использованы следующие предположения:

- Хотя земные станции пользователей построены на базе USAT, земные станции, с которыми они будут связываться через спутник и которые будут стыковаться с интернетом, могут содержать большие антенны и, следовательно, называться "базовыми станциями". Базовых станций может быть намного меньше, чем терминалов пользователей.
- Может использоваться модуляция QPSK с кодированием 3/4 FEC. Порог готовности достигается, когда КОБ пост-демодулятора падает до величины 1×10^{-6} , что соответствует значению $C/N = 8,5$ дБ. Допуская ухудшение, вносимое фидерной линией и помехами, обусловленными многократным использованием частот, описанное в § 2.1 ($C/I = 16,5$ дБ), требуемые пороговые значения $(C/N)_\uparrow$ и $(C/N)_\downarrow$ должны быть не менее 9,85 дБ.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Использование FEC с коэффициентом кодирования 1/2 и дополнительного кодирования, например, кодом Рида-Соломона, уменьшает требуемое значение C/N и, таким образом, уменьшает требования к значениям э.и.и.м. на линиях вверх и вниз, а также требования к рабочей мощности спутника. Турбо-кодирование – это еще одна возможность достижения аналогичных целей. Учитывая такое более устойчивое кодирование, к полученным ниже результатам добавляются результаты, основанные на пороговых значениях $(C/N)_\uparrow$ и $(C/N)_\downarrow = 7,0$ дБ.

- Системы будут поддерживать терминалы пользователей с антеннами диаметром 30 см, что поможет минимизировать цены и упростит оборудование портативных терминалов. При этом усиление передающей антенны будет составлять 30,2 дБи на частоте 12,75 ГГц, 31,0 дБи на частоте 14 ГГц, 37,2 дБи на частоте 28,45 ГГц и 41,7 дБи на частоте 48,2 ГГц. Значения усиления приемной антенны будут составлять 28,7 дБи на частоте 10,7 ГГц, 28,9 дБи на частоте 10,95 ГГц, 34,0 дБи на частоте 19,7 ГГц и 40,1 дБи на частоте 40 ГГц.
- Минимальный рабочий угол места составит 10° на частоте 11/14 ГГц, 17° на частоте 20/30 ГГц и 25° на частоте 40/50 ГГц.
- Уровни э.и.и.м. будут установлены такими, чтобы они включали в себя следующие запасы для учета ухудшений из-за замираний в дожде в течение, как минимум, 99% времени в большинстве климатических зон:
 - линии вверх: 4,5 дБ на частоте 14 ГГц, 11 дБ на частоте 30 ГГц, 21 дБ на частоте 50 ГГц;
 - линии вниз: 3,5 дБ на частоте 11 ГГц, 7 дБ на частоте 20 ГГц, 20 дБ на частоте 40 ГГц.

Вполне вероятно, что для минимизации возможности создания помех, в полосах 30 и 50 ГГц на линии вверх будет использоваться регулировка мощности, возможно, за исключением, наиболее засушливых климатических зон. Однако в терминалах пользователей все равно потребуются использовать выходные каскады, способные создавать э.и.и.м., рассчитанную с учетом запасов, даже несмотря на то, что в течение большей части времени этот уровень будет значительно занижен. Регулировка мощности на линии вверх экономит емкость

аккумуляторов портативных терминалов, но, для того чтобы обеспечить нормальное значение КОБ, как минимум, $= 1 \times 10^{-9}$, значение э.и.и.м. для чистого неба должно поддерживаться на уровне примерно на 2,5 дБ выше порога готовности.

- Используемые в вычислениях минимальные значения усиления в луче спутника были на 3 дБ ниже значений, приведенных во второй строке таблицы 2, т. е. значений на границе луча.
- Шумовая температура на линии вверх, с учетом всех допущений на внешние помехи, составит порядка 800 К в полосе 14 ГГц, 1000 К в полосе 30 ГГц и 1200 К в полосе 50 ГГц.
- Шумовая температура на линии вниз, также с учетом всех допущений на внешние помехи, составит порядка 200 К в полосе 11 ГГц, 300 К в полосе 20 ГГц и 500 К в полосе 40 ГГц.
- Для терминов "широкополосный" и "высокоскоростной" применительно к доступу в интернет, в настоящем документе предполагается, что скорости передачи информации пользователя на спутник и от спутника составляют 2 Мбит/с. Для модуляции QPSK, в которой используется кодирование 3/4 FEC, в предположении, что используется 50-процентная фильтрация спада косинусной огибающей, эта скорость соответствует ширине полосы частот на одну несущую 1,6 МГц.

Использование этих предположений в уравнениях для расчета бюджета линии приводит к получению следующих уровней мощности несущей, которые должны подаваться в антенну абонентского терминала в условиях чистого неба (цифры в фигурных скобках {} соответствуют вышеприведенному предположению об использовании дополнительного кодирования с коррекцией ошибок, и соответствующая ширина полосы частот на одну несущую составит примерно 3 МГц).

полоса 14 ГГц:	14,3 дБВт (27 Вт), или с регулировкой мощности на линии вверх 12,3 дБВт (17 Вт); {11,5 дБВт (14 Вт)}	{9,5 дБВт (8,8 Вт)}
полоса 30 ГГц:	13,6 дБВт (23 Вт), или с регулировкой мощности на линии вверх 5,1 дБВт (3,2 Вт); {10,8 дБВт (12 Вт)}	{2,3 дБВт (1,7 Вт)}
полоса 50 ГГц:	19,2 дБВт (83 Вт), или с регулировкой мощности на линии вверх 0,7 дБВт (1,2 Вт); {16,4 дБВт (43 Вт)}	-2,2 дБВт (0,6 Вт)}

и получают следующие уровни мощности несущей, которые должны подаваться в передающую антенну спутника:

полоса 11 ГГц:	7,3 дБВт (5,4 Вт); {4,5 дБВт (2,8 Вт)}
полоса 20 ГГц:	4,4 дБВт (2,8 Вт); {1,6 дБВт (1,4 Вт)}
полоса 40 ГГц:	14,4 дБВт (27,5 Вт); {11,6 дБВт (14,3 Вт)}.

Предполагается, что регулировка мощности на линии вниз использоваться не будет и, следовательно, поскольку предполагаемые запасы на замирания в дожде существенно больше, чем 2,5 дБ, КОБ на линии вниз в направлении от концентратора до абонентского терминала во всех трех полосах частот в условиях чистого неба будет намного лучше, чем 1×10^{-9} .

Несмотря на то что санитарно-гигиенические требования не входят в компетенцию МСЭ, очень важно, чтобы те, кто планирует системы, были бы осведомлены о национальных и международных значениях защитных уровней и о рекомендациях по обеспечению их соблюдения, особенно в условиях повсеместного развертывания.

2.3 Пропускная способность спутника (C_s)

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Результаты, приведенные в настоящем разделе, а также приведенные в § 3, были рассчитаны для сигналов QPSK с кодированием 3/4 FEC. В конце этого раздела и в конце § 3 добавлена аппроксимация соответствующих результатов, полученных при более устойчивом кодировании, упомянутом в § 2.2.

Во многих спутниках связи выходная мощность транспондера составляет примерно 40 Вт при работе в насыщении с одной несущей, хотя для некоторых применений созданы спутники с более мощными транспондерами. На орбите работает некоторое количество спутников диапазона 14/11 ГГц с мощностью транспондеров от 90 до 120 Вт. В режиме с несколькими несущими для того, чтобы обеспечивать достаточно малое влияние интермодуляции, возникающей из-за многократного

использования частот, необходимо иметь выходную мощность примерно на 4 дБ ниже, что уменьшает используемую выходную мощность до примерно 16 Вт. Для значений выходной мощности спутника, рассчитанных в § 2.2, эти условия позволят обеспечить возможность работы в одном транспондере очень небольшого числа несущих (каждая с шириной полосы 1,6 МГц). В результате большое число транспондеров, требуемое для полного использования полосы шириной 500 МГц, приведет к неоптимальной загрузке, и, следовательно, предполагается, что будут применяться более мощные транспондеры. В настоящем документе предполагается, что для спутников в полосах 11/14 ГГц и 20/30 ГГц выходная мощность транспондера составляет 100 Вт в насыщении, т. е. 40 Вт при снижении выходного сигнала на 4 дБ. Для спутника в полосе 40/50 ГГц, учитывая, что на линии вниз требуется большой запас на замирания, предполагается, что выходная мощность транспондера составит 500 Вт в насыщении, т. е. 200 Вт при снижении выходного сигнала на 4 дБ. Следует отметить, что существуют пути противостояния замираниям, отличные от простого увеличения э.и.и.м. – например, адаптивное кодирование – и в ходе дальнейших исследований могут быть найдены альтернативные решения с использованием менее мощных транспондеров, что послужит цели ограничения энергопотребления, как в терминалах пользователей, так и на спутниках. Эта задача представляется приоритетной для случая 40/50 ГГц, поскольку, если в полосах 11 ГГц и 20 ГГц сегодня производятся спутниковые передатчики с мощностью 100 Вт, то для полосы 40 ГГц передатчики с мощностью 500 Вт еще не созданы.

Следовательно, для спутника полосы 20/30 ГГц число каналов шириной 2 Мбит/с, которые могут быть переданы через транспондер, равно $40/2,8 = 14$. Предполагая, что защитный интервал между каналами равен 10%, требуемая ширина полосы транспондера = $1,6 \times 1,1 \times 14 = 24,6$ МГц, и это соответствует разнесу по частоте между соседними транспондерами 25 МГц. При этом в каждом луче спутника допускается объединение пяти транспондеров, в результате чего суммарная ширина полосы луча = 125 МГц, а для четырех лучей – 500 МГц. Эти параметры соответствуют топологии для многократного использования частот "один-к-четырем", показанной на рисунке 1. Следовательно, суммарную пропускную способность такого спутника можно рассчитать как показано ниже:

$$\text{Пропускная способность} = (2 \text{ Мбит/с на несущую}) \times (14 \text{ несущих в транспондере}) \times (2 \text{ поляризации}) \\ \times (5 \text{ транспондеров в луче одной поляризации}) \times (32 \text{ луча}) = 8960 \text{ Мбит/с}$$

Аналогично рассчитанная пропускная способность спутника для полосы 11/14 ГГц составляет 3024 Мбит/с, а для полосы 40/50 ГГц – 16 128 Мбит/с. Разработанные выше схемы размещения транспондеров и лучей для спутников в каждой из трех полос частот показаны на рисунках 3, 4 и 5.

Отметим, что полученное число транспондеров для одного спутника очень велико. Спутник полосы 11/14 ГГц содержит 216 транспондеров, что можно реализовать, используя полупроводниковые выходные каскады, а требуемая рабочая мощность может составлять порядка 54 кВт. Для спутника полосы 20/30 ГГц получены следующие цифры: 320 транспондеров и 80 кВт, а для спутника полосы 40/50 ГГц они будут не менее 1152 транспондера и 1,44 МВт. Космический аппарат в полосах 11/14 ГГц и 20/30 ГГц оказывается довольно большим и относительно дорогостоящим³, поэтому в каждом случае важно рассматривать возможность разделения области обслуживания между двумя или несколькими совместно расположенными спутниками, каждый из которых будет иметь пропорционально меньшее число лучей и транспондеров и меньшую рабочую мощность. Использование этой возможности неизбежно для 40/50 ГГц, где область обслуживания необходимо разделить между примерно 20 более мелкими спутниками просто для того, чтобы уменьшить размеры и мощность каждого из них до порядков, соответствующих одному спутнику полосы 11/14 ГГц или 20/30 ГГц.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Применение более устойчивого кодирования с коррекцией ошибок может привести к получению планов размещения транспондеров, отличных от показанных на рисунках 3, 4 и 5, вследствие того, что для каждой несущей будет использована более широкая полоса частот, но по сравнению с вышесказанным основные параметры будут иметь примерно следующие значения:

Пропускная способность спутника:

11/14 ГГц – 1612 Мбит/с; 20/30 ГГц – 4778 Мбит/с; 40/50 ГГц – 8600 Мбит/с

Рабочая мощность спутника:

11/14 ГГц – 29 кВт; 20/30 ГГц – 43 кВт; 40/50 ГГц – 770 кВт

³ Стоимость создания и запуска большого, физически реализуемого спутника (в 2006 году) составляет несколько сотен миллионов долларов США.

РИСУНОК 3

Планы размещения транспондеров и лучей для спутника ФСС полосы 11/14 ГГц, пригодного для высокоскоростного доступа в интернет

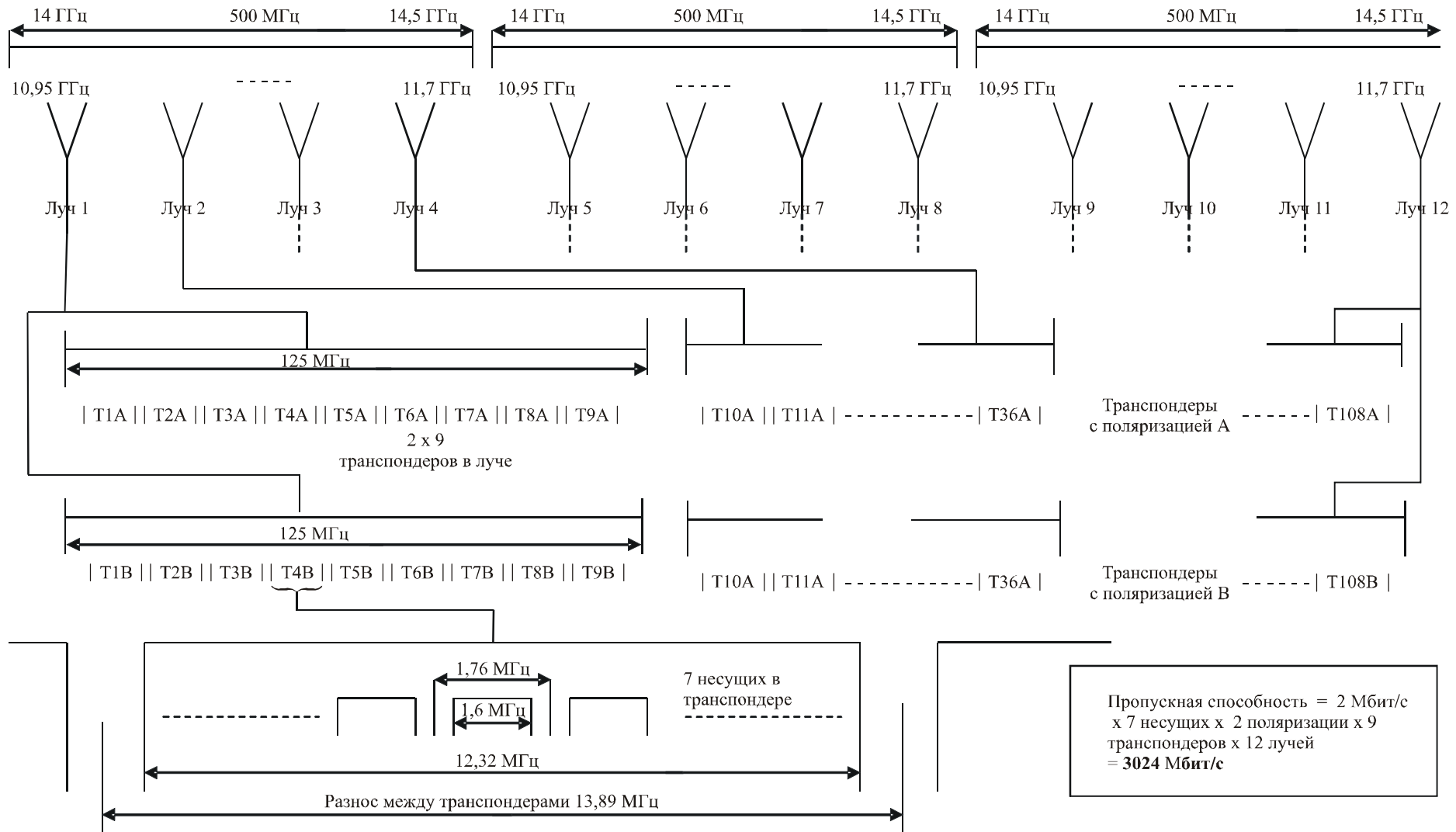


РИСУНОК 4

Планы размещения транспондеров и лучей для спутника ФСС полосы 20/30 ГГц, пригодного для высокоскоростного доступа в интернет

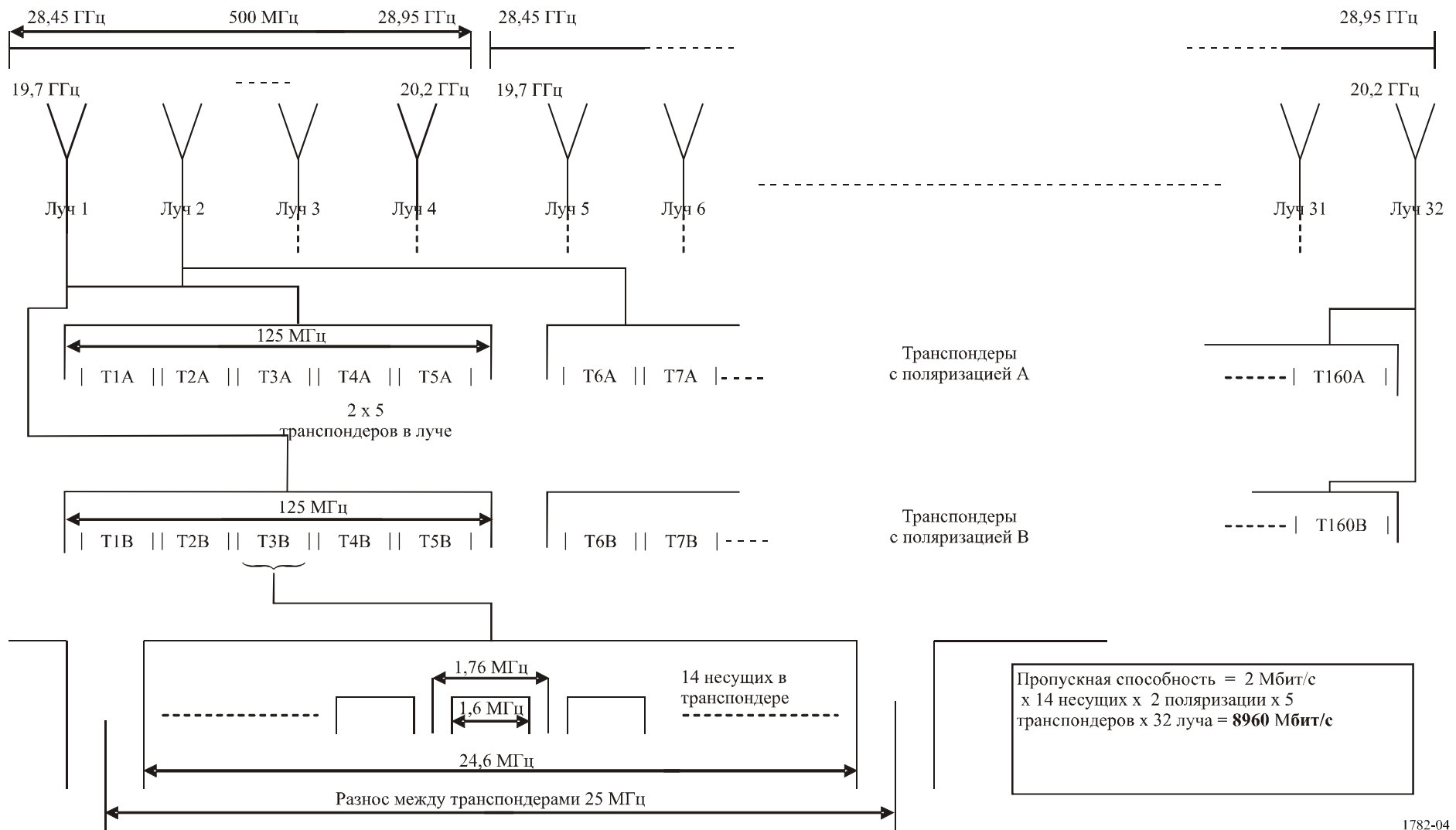
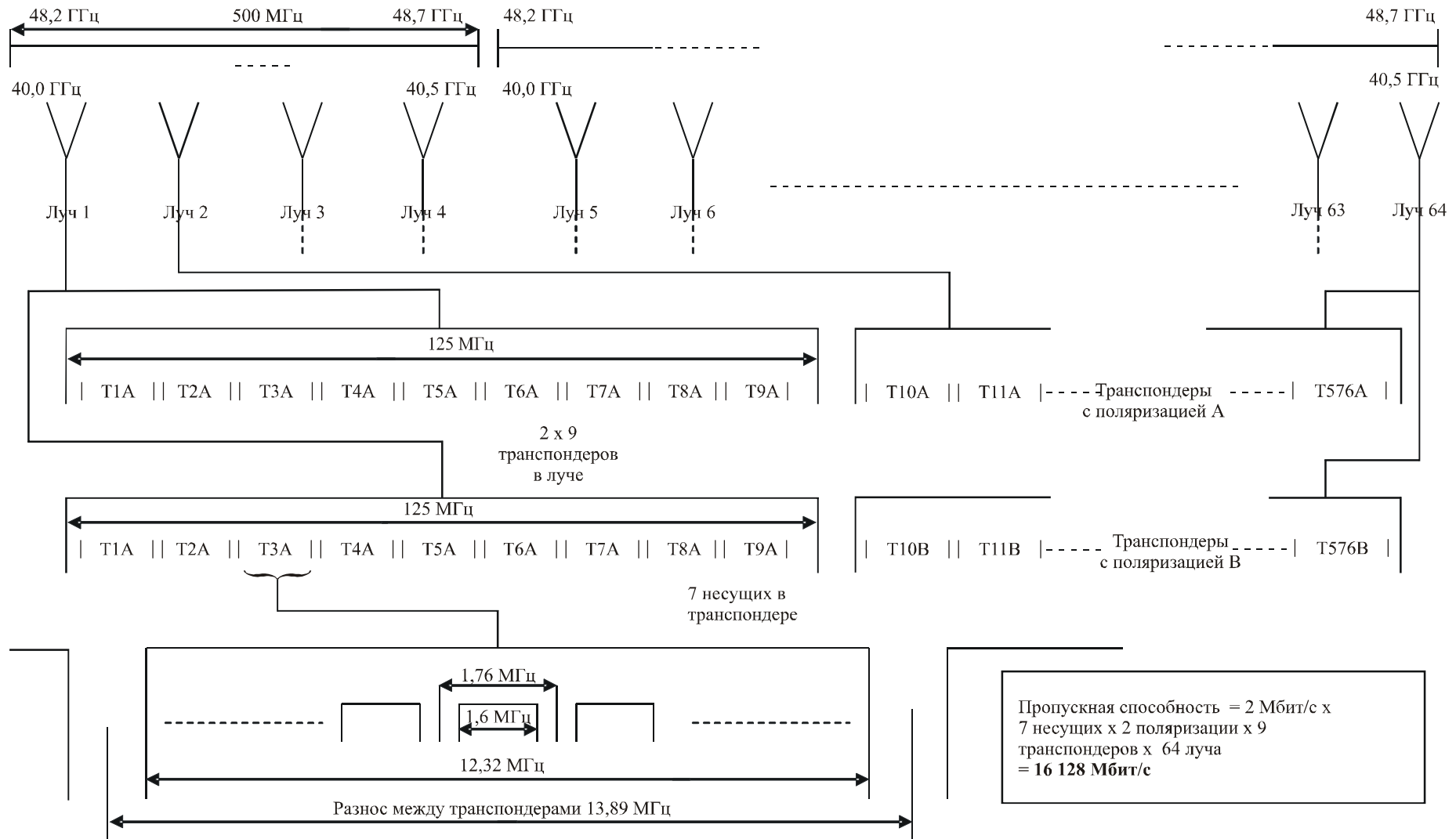


РИСУНОК 5

Планы размещения транспондеров и лучей для спутника ФСС полосы 40/50 ГГц, пригодного для высокоскоростного доступа в интернет

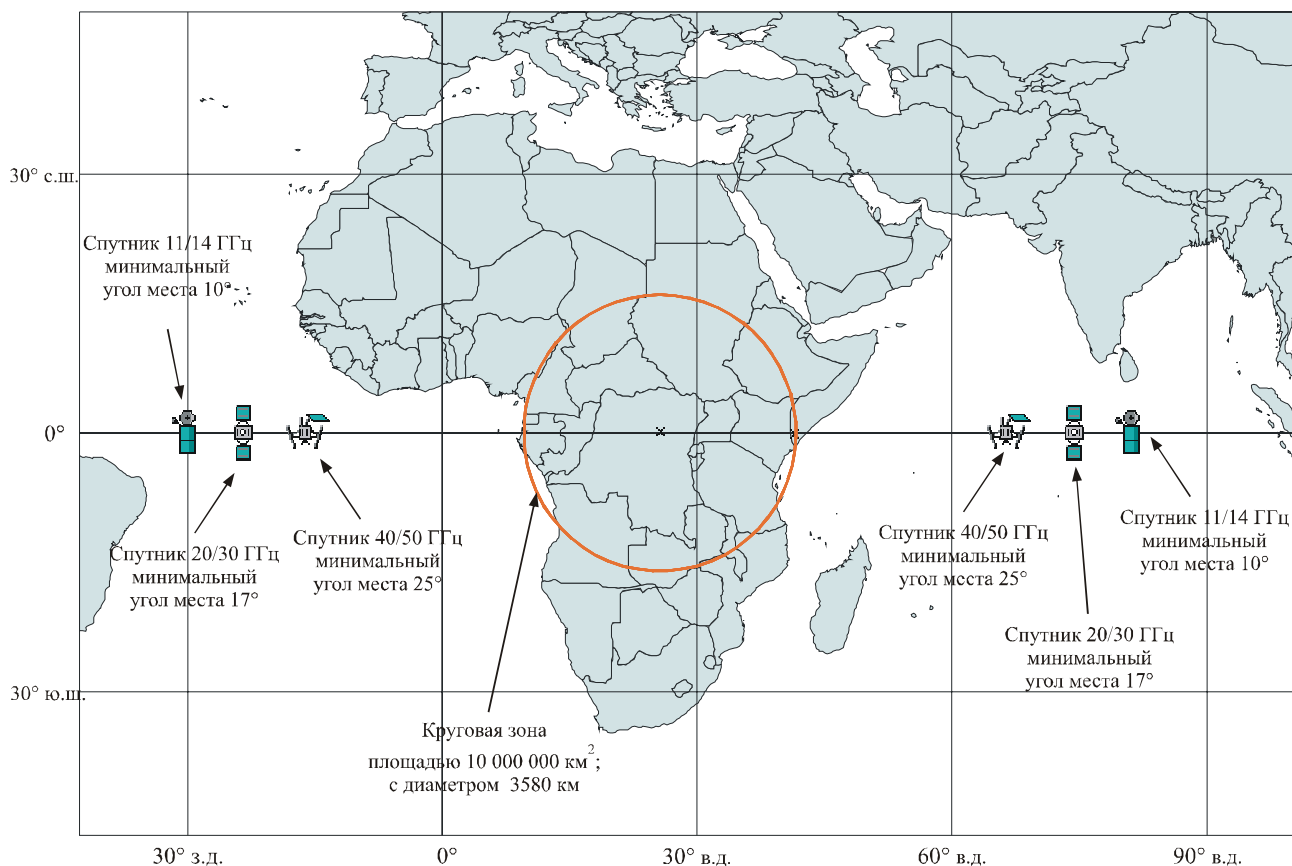


Что касается рабочей мощности спутника, важно отметить, что для платформ, разработанных на сегодняшний день, максимальным значением является примерно 20 кВт, поэтому здесь интересны способы уменьшения потребностей. В этом отношении имеет смысл исследовать возможность сохранения FDMA на линиях вверх при одновременном использовании TDMA на линиях вниз, поскольку это позволит избавиться от необходимости понижать мощность транспондера и, возможно, понизить на 4 дБ требования к рабочей мощности спутника.

3 Возможная суммарная пропускная способность (C_T)

Для того чтобы получить суммарную пропускную способность спутников ФСС для обеспечения широкополосного доступа в интернет в данной полосе частот, необходимо определить рассматриваемую географическую область. Среди возможных вариантов – полная поверхность Земли, общая площадь суши земной поверхности, поверхность Земли между определенными широтами (например, между 60° с.ш. и 60° ю.ш.), площадь суши между определенными широтами, площадь суши земной поверхности, плотность населения которой выше определенного минимума, и различные зоны определенных размеров или на определенных широтах. Для выбора наиболее приемлемого варианта предлагается провести исследования и дискуссии. Для целей настоящего первоначального исследования была выбрана круговая зона площадью $10\,000\,000\text{ км}^2$ с центром на экваторе. На рисунке 6 показан пример такой зоны, расположенной в Центральной Африке, хотя результаты будут одинаковыми для всех экваториальных зон.

РИСУНОК 6

Пример экваториальной зоны площадью 10 миллионов км^2 

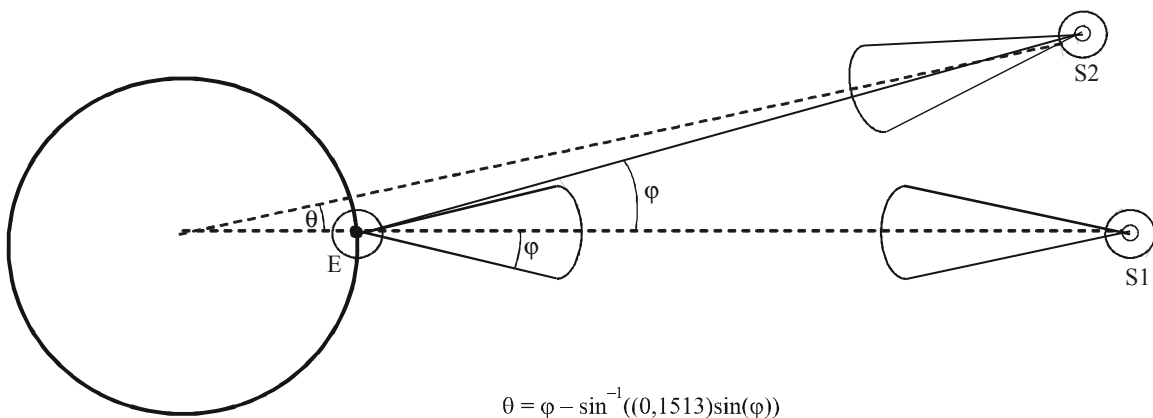
Вследствие того что в трех полосах частот минимальные углы места различны, для этих полос получены диапазоны долготы, находясь в которых геостационарный спутник может обслуживать рассматриваемую зону. Диапазоны показаны на рисунке 6, и численно выглядят следующим образом:

- для полосы 11/14 ГГц: от 30,1° з.д. до 81,0° в.д., диапазон долготы = 111,1°;
- для полосы 20/30 ГГц: от 23,4° з.д. до 74,3° в.д., диапазон долготы = 97,7°; и
- для полосы 40/50 ГГц: от 15,8° з.д. до 66,7° в.д., диапазон долготы = 82,5°.

Количество спутников, находящихся на орбите в пределах этих диапазонов, которые могут обслуживать рассматриваемую зону, используя одни и те же частоты и диаграммы направленности антенн, зависит от минимального разноса между соседними спутниками, который, в свою очередь, зависит от приемлемого уровня помех на линиях вверх и вниз одного спутника, создаваемых соседними с ним спутниками. Для того чтобы не оказывать значительного влияния на общие значения C/N , рассчитанные в § 3.2, отношение несущей к шуму от двух соседних спутников должно составлять, как минимум, примерно 20 дБ, и, следовательно, отношение несущей к шуму от каждого из этих двух спутников ($(C/I)_{ADJ}$) должно быть, как минимум, 23 дБ. Как показано на рисунке 7, уровень помех определяется главным образом величиной развязки, допускаемой диаграммами направленности приемной и передающей антенн абонентского терминала, а скорости спада диаграмм направленности приводят к тому, что влияние спутников, не являющихся соседними, оказывается пренебрежимо малым (в предположении, что расстояние между ними одинаково).

РИСУНОК 7

Помехи от соседнего спутника



$$\theta = \varphi - \sin^{-1}((0,1513)\sin(\varphi))$$

1782-07

Е – это земная станция пользователя, работающая со спутником S1, а трасса Е-S2 – это путь распространения помех в направлении на соседний спутник S2 и от него. Поскольку оба спутника S1 и S2 обслуживают одну и ту же зону, диаграммы направленности их антенн не обеспечивают достаточной развязки в направлении распространения помех. Помехи от Е к S2 возникают под углом φ от оси антенны станции Е, и под этим же углом от оси создаются помехи, принимаемые станцией Е от S2. Поскольку в настоящем исследовании рассматривается один тип сигнала, значения э.и.и.м. "полезных" и "мешающих" земных станций одинаковы, и значения э.и.и.м. "полезных" и "мешающих" спутников также одинаковы. Следовательно, в обоих случаях – для линий вниз и вверх:

$$(C/I)_{ADJ} = G_M - G(\varphi),$$

где:

G_M : усиление антенны Е в направлении оси антенны

$G(\varphi)$: усиление в направлении распространения помех.

Сохраняя сделанное ранее предположение о том, что диаметр антенны абонентского терминала составляет 30 см, для каждой из выбранных полос частот рассчитаны значения ширины луча (φ_0), соответствующие самой низкой частоте, они показаны в таблице 6.

ТАБЛИЦА 6

Максимальное число спутников, работающих на одних и тех же частотах и обслуживающих одну и ту же территорию ($\varphi_0 = 70 \cdot \lambda/D$)

Частота (ГГц)	10,95	14,0	19,7	28,45	40,0	48,2
Ширина луча (φ_0°)	6,39	5,0	3,55	2,46	1,75	1,45
φ_{min} (градусы)	8,84	6,92	4,91	3,40	2,42	2,01
θ_{min} (градусы)	7,51	5,88	4,17	2,89	2,05	1,71
N	14	18	23	33	40	48

Предполагается, что спад основного луча происходит по квадратичному закону $G(\varphi) = G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2$ дБи, и отсюда требуемая минимальная развязка обеспечивается, когда $G_M - (G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2) = 23$ дБ, т. е. когда $12(\varphi/\varphi_0)^2 = 23$ дБ. Подставив для минимального расстояния между спутниками $\varphi = 1,384\varphi_0$, получим значения φ_{min} , показанные в третьей строке таблицы 6. Соответствующие значения θ показаны в четвертой строке. Учитывая, что в полосах 11/14 ГГц для обычных сетей ФСС расстояние между спутниками, как правило, выбирается равным 3° (или 2° в Районе 2), значения θ_{min} в таблице 6 подчеркивают вероятные трудности обеспечения в этих полосах совместного использования частот с существующими системами. В полосе 20/30 ГГц значения θ_{min} также несовместимы с целевыми величинами разноса 3° или 2° , но по крайней мере в настоящее время здесь мало спутников, поэтому проблемы совместного использования частот являются во многом гипотетическими. В общем, полученные значения θ_{min} отражают тот факт, что применение терминалов с малыми антеннами ограничивает эффективность использования орбиты/спектра.

Поделив диапазоны долготы, показанные на рисунке 6, на θ_{min} , получим число спутников, работающих на одной частоте, которые могут обслуживать рассматриваемую территорию в каждой из выбранных полос шириной 500 МГц, и эти цифры приведены в пятой строке таблицы в виде значения " N ". Поскольку в настоящем исследовании рассматриваются только двусторонние соединения, соответствующие этому положению дел значения N определены для частот на линии вниз, и они показаны в таблице 6 жирным шрифтом.

Шестиугольную зону A внутри области обслуживания отдельного спутникового луча можно изобразить, используя геометрические выкладки, показанные на рисунках 1 и 2 для значения $A = 211\,375\,383(1 - \cos(d/222,63))$ км², где d – диаметр зоны обслуживания (км), как показано на рисунке 2. Таким образом, значения A , которые должны быть использованы, таковы:

$$A = 497\,683,88 \text{ км}^2 \text{ для полосы 11/14 ГГц, } 91\,238,83 \text{ км}^2 \text{ для полосы 20/30 ГГц и } 22\,810,94 \text{ км}^2 \text{ для полосы 40/50 ГГц}$$

Умножив площади этих областей обслуживания на число лучей на одном спутнике (n), взятое из таблицы 5, и затем разделив результаты на площадь эталонной зоны, показанной на рисунке 6, получаем число спутников типов, описанных в § 3, которые могут обслужить эталонную зону из одной позиции на ГСО. Это число необязательно должно быть целым, потому что могут существовать лучи, зоны обслуживания которых выходят за пределы эталонной зоны, и они представляют собой дробные части пропускной способности спутника, недоступной для пользователей, находящихся в пределах эталонной зоны. Суммарная пропускная способность C_T для эталонной зоны определяется выражением:

$$C_T = N \cdot C_S \cdot (10\,000\,000) / (A \cdot n) \text{ Мбит/с,}$$

где C_S – пропускная способность одного спутника, описанная в § 3.

Отсюда значения C_T для двусторонних каналов в полосах шириной 500 МГц будут примерно равны:

линия вниз 10,95–11,2 ГГц + 11,45–11,7 ГГц с линией вверх 14,00–14,50 ГГц – **71 {38} Гбит/с;**

линия вниз 19,7–20,2 ГГц с линией вверх 28,45–28,95 ГГц – **706 {380} Гбит/с;**

линия вниз 40,0–40,5 ГГц с линией вверх 48,20–48,70 ГГц – **4400 {2400} Гбит/с.**

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Цифры в скобках соответствуют предположению о более устойчивом кодировании с коррекцией ошибок.

Отмечая специальные цены на создание и запуск большого спутника, ясно, что предоставление пропускной способности таких порядков будет чрезвычайно дорогостоящим. Однако потенциальный рынок глобального высокоскоростного доступа в интернет соразмерно велик.

Эти значения пропускной способности предназначены для непрерывного использования и, поскольку предполагается, что скорость для отдельного пользователя составит 2 Мбит/с, максимальное число одновременно существующих двусторонних соединений равно половине пропускной способности каждой пары частот. Если отдельные каналы распределяются динамически в соответствии с поступающими запросами, то число пользователей будет больше числа доступных каналов и обратно пропорционально коэффициенту активности пользователей.

Значения пропускной способности спутника, показанные в § 2.3, и, следовательно, суммарные значения пропускной способности, приведенные в настоящем разделе, были рассчитаны для доступа в интернет через терминалы пользователей с диаметром антенн 30 см. Если бы предполагался больший диаметр, то были бы получены другие результаты, но для выполнения таких вычислений потребуются сначала принять решение о том, следует ли – в дополнение к изменению данных о диаметре антенны – изменить остальные предположения. Если бы все остальные предположения остались без изменений, то увеличение диаметра антенны до 60 см, например, позволило бы исключить кодирование 3/4 FEC и дало бы увеличение скорости передачи информации пользователя до примерно 2560 кбит/с, что повысило бы пропускную способность спутника на 28%, а суммарную пропускную способность для данной территории следовало бы умножить примерно на 2,5. Однако в зависимости от предполагаемого размера антенны может потребоваться пожертвовать некоторой частью увеличения пропускной способности, для того чтобы уменьшить требования к мощности передатчика абонентского терминала и/или к рабочей мощности спутника. В ином случае некоторая часть или все увеличение усиления антенны абонентского терминала может использоваться для пропорционального уменьшения усиления в спутниковом луче, увеличивая, таким образом, ширину каждого спутникового луча и обеспечивая обслуживание одной и той же территории меньшим количеством лучей. Очевидно, что оценка пропускной способности для большей антенны абонентского терминала должна основываться на соответствующих этому случаю предположениях.

4 Выводы

В настоящем Приложении описаны основные возможности того типа спутников ФСС, который способен обеспечить глобальный широкополосный доступ в интернет, и даны оценки суммарной пропускной способности, которая может быть обеспечена такими системами. Поскольку очень важно оставить место для уточнений результатов анализа и его адаптации к различным географическим и рыночным условиям, считается неправомерным включать в Регламент радиосвязи системные характеристики широкополосного доступа в интернет через спутник, и настоящую Рекомендацию следует периодически пересматривать в свете новых достижений.

Приложение 2

Возможности предоставления глобального широкополосного доступа в интернет через системы ФСС, разработанные для земных станций с большими антеннами

1 Общие положения

Системная архитектура, описанная в Приложении 1, была во многом определена выбором для земных станций пользователя антенн диаметром 30 см, которые попадают в категорию, которую иногда называют "терминалами со сверхмалыми антеннами", или USAT. Если предполагается применять пользовательские антенны большего размера, то требования к широкополосному доступу в интернет через спутник (за исключением портативности терминалов) могут быть удовлетворены с использованием системных архитектур различных типов, и следует отметить, что здесь рассматривается только один из возможных примеров.

Пригодность различных распределенных ФСС полос частот до 50 ГГц для предоставления широкополосного доступа в интернет рассматривается в § 1 Приложения 1, и нет необходимости повторять здесь эти рассуждения. На основании этого рассмотрения в настоящем Приложении определены параметры только для распределенных ФСС полос частот 20/30 ГГц и 11/14 ГГц, в обоих случаях предполагается использование одной и той же системной архитектуры.

Несмотря на то что для терминалов, отличных от USAT, вид системной архитектуры мало зависит от размера пользовательской антенны, этот размер все же оказывает заметное влияние и, следовательно, для настоящего Приложения необходимо выбрать широко используемый размер. В ответах на вопросник Бюро радиосвязи 1998 года, который касался земных станций диапазона 20/30 ГГц с антеннами диаметром от 0,3 м до 7,6 м, наиболее часто встречался диаметр 1,2 м. В ответах на тот же вопросник, который касался земных станций диапазона 11/14 ГГц с антеннами диаметром от 0,4 м до 18,0 м, точно также наиболее часто встречался диаметр 1,2 м. Следовательно, для настоящего примера был выбран диаметр 1,2 м, отметим, что земные станции, использующие антенны такого размера, относятся к станциям, называемым "терминалами с очень малыми антеннами" (VSAT).

Как и в Приложении 1, задачей является достижение скоростей передачи информации пользователя 2 Мбит/с в направлении на станцию пользователя и от нее. Здесь предполагается, что для каждого спутника используется метод многостанционного доступа FDMA и схема модуляции QPSK. В целях достижения разумной эффективности использования выходной мощности транспондера предполагается добавление кодирования FEC с коэффициентом 1/2.

2 Системная архитектура

Как и в Приложении 1, этот пример основан на конфигурации "звезда", в которой доступ к множеству абонентских земных станций обеспечивается при помощи спутниковых линий к одной центральной земной станции ("хабу"), соединенной с интернетом. Для того чтобы минимизировать влияние на показатели C/N линии между спутником и центральной станцией для исходящих и входящих каналов, предполагается, что на центральной станции используется большая антенна (диаметром 7,6 м). На рисунке 8 показано распределение каналов.

В настоящем примере спутники используют в обоих направлениях передачи – вверх и вниз полосу частот шириной 500 МГц, и эти полосы имеют вид, описанный ранее:

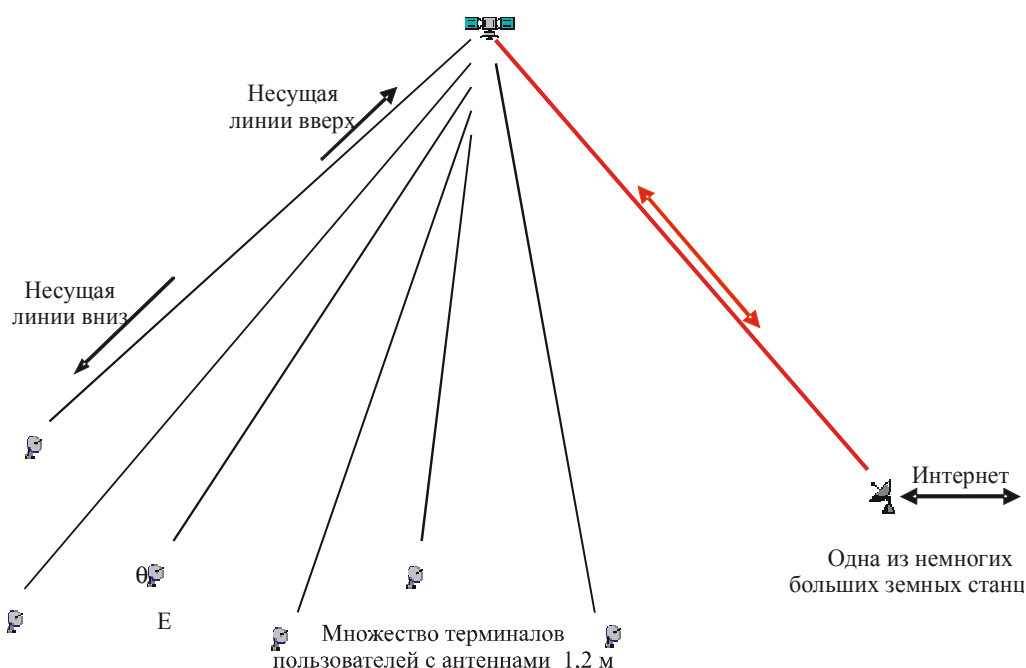
- Система 20/30 ГГц – 19,7–20,2 ГГц космос-Земля и 28,45–28,95 ГГц Земля-космос;
- Система 11/14 ГГц – 10,95–11,2 ГГц и 11,45–11,7 ГГц космос-Земля и 14,0–14,5 ГГц Земля-космос.

3 Область обслуживания

Для модуляции QPSK с кодированием 1/2 FEC на входе типичного демодулятора/декодера требуется обеспечить отношение C/N примерно равное 7,5 дБ для получения в выходном двоичном потоке КОБ $= 1 \times 10^{-6}$, которое можно считать порогом готовности для настоящего применения. Как и в Приложении 1, предполагается, что это значение КОБ должно обеспечиваться в течение, как минимум, 99% времени в большинстве климатических зон, для которых линия между пользователем и спутником должна быть разработана с учетом запаса на замирания в дожде, равного примерно 11 дБ на частоте 30 ГГц, 7 дБ на частоте 20 ГГц, 4,5 дБ на частоте 14 ГГц и 3,5 дБ на частоте 11 ГГц, при условии, что для системы диапазона 20/30 ГГц минимальный угол места составляет 17° и для системы диапазона 11/14 ГГц – 10°. Многие современные спутники оборудованы транспондерами, которые создают в режиме насыщения для одной несущей выходную мощность 40 Вт. Учитывая эти факторы вместе с тем фактом, что диаметр пользовательской антенны равен 1,2 м, и сделав соответствующие допущения на шумы, а также на внешние и внутренние помехи, в ходе расчетов канала было найдено, что потребуется спутниковый луч с шириной по половинной мощности, равной примерно 2°. Как можно видеть из таблиц 3 и 4, эти значения вполне соответствуют возможностям современной технологии.

РИСУНОК 8

Распределение каналов для широкополосного доступа в интернет через спутник с использованием VSAT станций



1782-08

На рисунке 9 показано, что непрерывная зона, примерно равная по площади круговой эталонной зоны $10\,000\,000\text{ км}^2$, описанной в Приложении 1 (рисунок 6), может быть обслужена при помощи восьми круговых лучей (от А до Н), каждый из которых имеет ширину 2° , расположенных таким образом, что границы их перекрытия образуют комбинацию взаимосвязанных шестиугольников. В § 2.1 Приложения 1 показано, что топология для многократного использования частот одним лучом из 4-х приводит к получению минимального отношения C/I , равного, как минимум, 16,5 дБ для помех из-за многолучевости.

4 Конфигурация полезной нагрузки спутника

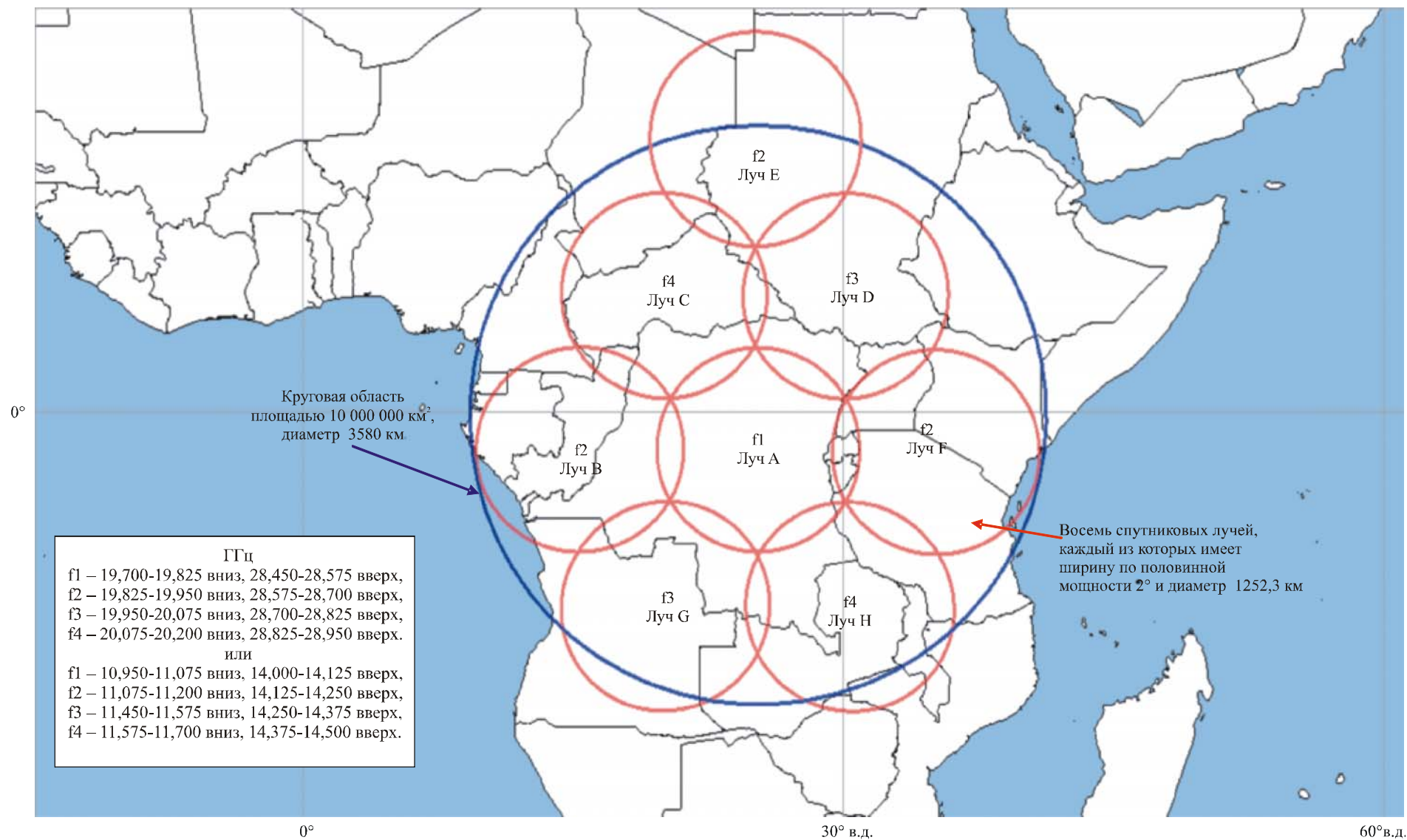
С учетом предположений о значениях параметров, сделанных в предыдущих разделах настоящего Приложения, на рисунке 10 показан соответствующий план транспондера, обеспечивающий оптимальное использование мощности и ширины полосы частот. Ширина полосы для каждой несущей определяется из выражения:

$$\{2 \text{ (скорость передачи в Мбит/с)/2 (QPSK)}\} \times 2/1 \text{ (кодирование 1/2 FEC)} \times 1,2 \text{ (формирование спектра)} = 2,4 \text{ МГц}$$

Допуская, что 18% ширины полосы транспондера используется на защитные интервалы между несущими, это значение соответствует расстоянию по частоте между несущими 2,84 МГц. Это допущение соответствует работе с 10 несущими в полосе частот транспондера шириной 28,4 МГц и, как будет показано далее, обеспечивает оптимальное использование выходной мощности транспондера. Дополнительный допуск 10% на защитные интервалы между транспондерами приводит к получению частотного разнеса между транспондерами, равному 31,25 МГц, что позволяет разместить четыре транспондера в полосе шириной 125 МГц – четвертой части полосы частот спутника. Таким образом, в каждом из восьми лучей, для которых области обслуживания по уровню половинной мощности показаны на рисунке 9, может разместиться по четыре транспондера с двумя направлениями поляризации (либо двойная линейная, либо право- и левосторонняя круговая). Следовательно, общее число транспондеров будет равно 64.

РИСУНОК 9

Пример расположения спутникового луча для широкополосного доступа в интернет через спутник с использованием абонентских станций с антеннами 1,2 м



5 Бюджеты линий

Расчетное выражение для линий вверх и вниз между земной станцией и спутником имеет вид:

$$P_T + G_T - 20 \log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10 \log(BT) - (-228,6) = C/N \text{ дБ}, \quad (1)$$

где:

- P_T : мощность, подводимая к передающей антенне (дБВт)
- G_T : усиление передающей антенны (дБи)
- d : протяженность трассы между земной станцией и спутником (м)
- f : частота (Гц)
- F : запас (дБ) для компенсации замираний для требуемого процента времени
- G_R : усиление приемной антенны (дБи)
- B : ширина полосы несущей (Гц)
- T : шумовая температура линии (К)
- C/N (дБ): отношение на приемнике для обеспечения КОБ, равного порогу готовности.

Для того чтобы допустить ухудшение качественных показателей из-за теплового шума на линии от спутника до центральной станции, из-за многократного использования частот в нескольких лучах, из-за кроссполяризационных помех, из-за интермодуляции на спутнике и из-за помех от внешних источников, отношение несущей к тепловому шуму на линиях вверх и вниз между спутником и терминалом пользователя должно составлять не менее 8,5 дБ. Отметим, что отношение C/I для таких ухудшений в комбинации, которая приведет к получению общего отношения $C/(N+I) = 7,5$ дБ (соответствующего порогу готовности), составляет 14,4 дБ и, вероятно, что комбинация многократного использования частоты и кроссполяризационных помех ($C/I > 16,5$ дБ), интермодуляции ($C/I > 23$ дБи), шумов на линии до базовой станции ($C/I > 24$ дБ) и внешних помех ($C/I > 23$ дБ) будет не хуже этого значения (т. е. $> 14,39$ дБ).

Отсюда:

Линия вверх от земной станции пользователя в распределенной ФСС полосе 30 ГГц

Как в уравнении (1), где:

- $P_T = 11,3$ дБВт (13,5 Вт) (и примерно 3 дБВт в условиях чистого неба с регулировкой мощности на линии вверх (ulrc))
- $G_T = 49,19$ дБи (антенна диаметром 1,2 м на частоте 28,45 ГГц)
- $d \leq 39\,853\,746$ м (минимальный угол места 17°)
- $f = 28\,450\,000\,000$ Гц
- $F = 11$ дБ (замирания в течение $< 1\%$ времени)
- $G_R = 37,7$ дБи (граница спутникового луча шириной 2° по половинной мощности)
- $B = 2\,400\,000$ Гц
- $T = 1000$ К и, следовательно,
- $C/N = 8,5$ дБ.

Линия вверх от земной станции пользователя в распределенной ФСС полосе 14 ГГц

Как в уравнении (1), где:

- $P_T = 3,95$ дБВт (2,5 Вт) (и примерно 2 дБВт в условиях чистого неба с ulrc)
- $G_T = 43,19$ дБи (антенна диаметром 1,2 м на частоте 14,25 ГГц)

$$\begin{aligned}
 d &\leq 40\,583\,982 \text{ м (минимальный угол места } 10^\circ) \\
 f &= 14\,250\,000\,000 \text{ Гц} \\
 F &= 4,5 \text{ дБ (замирания в течение } < 1\% \text{ времени)} \\
 G_R &= 37,7 \text{ дБи (граница спутникового луча шириной } 2^\circ \text{ по половинной мощности)} \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Гц} \\
 T &= 800 \text{ К и, следовательно,} \\
 C/N &= 8,5 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

Линия вниз к земной станции пользователя в распределенной ФСС полосе 20 ГГц

Как в уравнении (1), где:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 2,1 \text{ дБВт (1,62 Вт)} \\
 G_T &= 37,7 \text{ дБи (граница спутникового луча шириной } 2^\circ) \\
 d &= 39\,853\,746 \text{ м (минимальный угол места } 17^\circ) \\
 f &= 19\,700\,000\,000 \text{ Гц} \\
 F &= 7 \text{ дБ (замирания в течение } < 1\% \text{ времени)} \\
 G_R &= 46,0 \text{ (антенна диаметром 1,2 м на частоте 19,7 ГГц)} \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Гц} \\
 T &= 300 \text{ К и, следовательно,} \\
 C/N &= 8,5 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

Линия вниз к земной станции пользователя в распределенной ФСС полосе 11 ГГц

Как в уравнении (1), где:

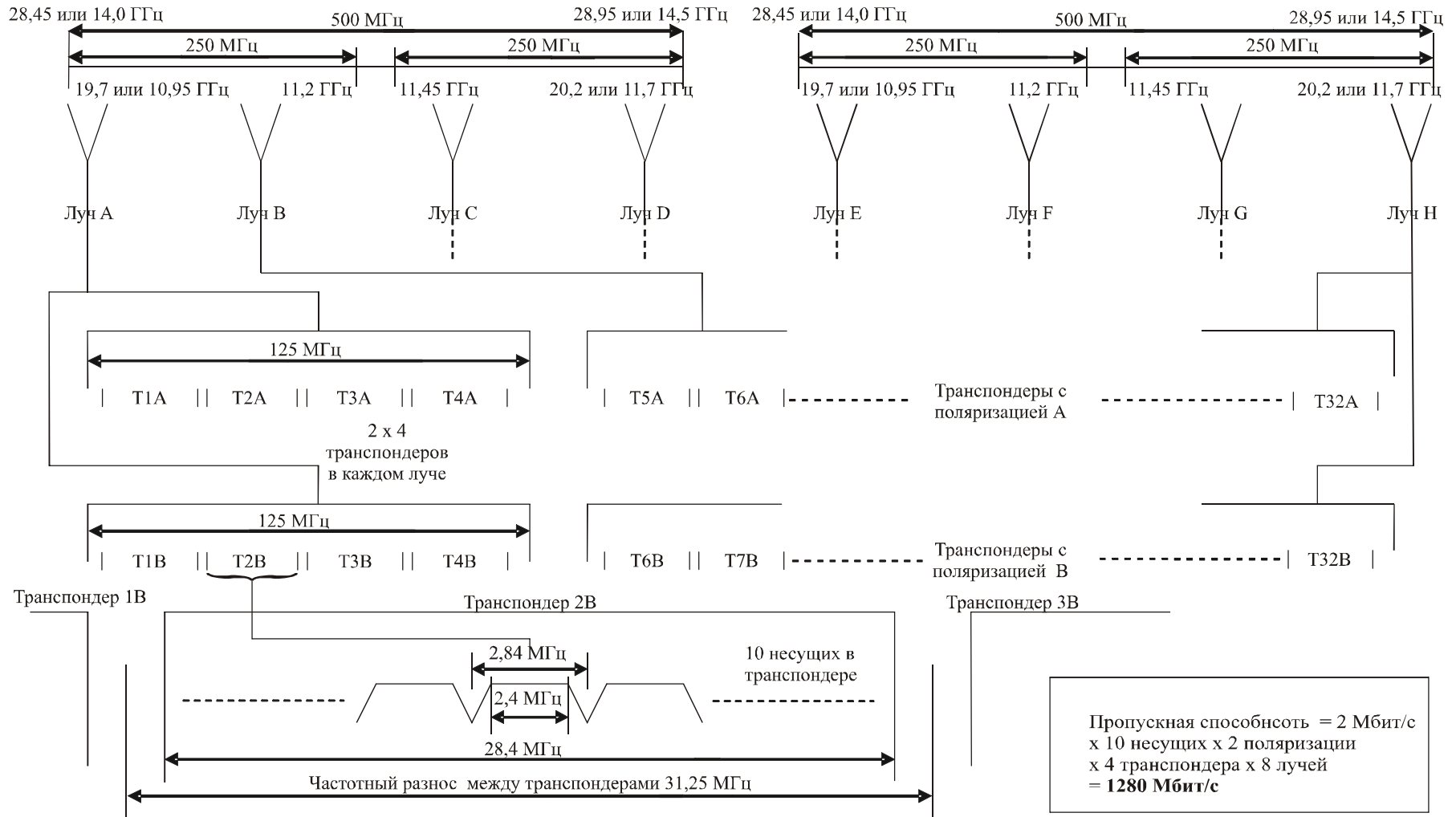
$$\begin{aligned}
 P_T &= 2,1 \text{ дБВт (1,62 Вт)} \\
 G_T &= 37,7 \text{ дБи (граница спутникового луча шириной } 2^\circ) \\
 d &= 40\,583\,982 \text{ м (минимальный угол места } 10^\circ) \\
 f &= 10\,950\,000\,000 \text{ Гц} \\
 F &= 3,5 \text{ дБ (замирания в течение } < 1\% \text{ времени)} \\
 G_R &= 40,9 \text{ (антенна диаметром 1,2 м на частоте 10,95 ГГц)} \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Гц} \\
 T &= 200 \text{ К и, следовательно,} \\
 C/N &= 13,6 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

Наиболее критичной среди этих линий является линия вниз на частоте 19,7 ГГц, для которой требуемая выходная мощность спутника на одну несущую (P_T) составляет 1,62 Вт. Поскольку суммарная выходная мощность для многих несущих транспондера, способного в режиме насыщения создавать для одной несущей мощность 40 Вт, составляет примерно 16 Вт (т. е. с запасом 4 дБ для ограничения интермодуляции), количество несущих, обеспечивающих скорость передачи 2 Мбит/с, в одном транспондере равно **10** (т. е. $\cong 16/1,62$) – как отмечено на рисунке 10.

В системе диапазона 11/14 ГГц меньший запас на замирания приводит к большему значению отношения C/N для 10 несущих в одном транспондере при мощности одной несущей 1,62 Вт, и более оптимальным будет использование в одном транспондере 11 несущих, при этом защитные интервалы между несущими уменьшаются примерно до 7,6%, и мощность спутника на одну несущую уменьшается до $16/11 = 1,45$ Вт.

РИСУНОК 10

Планы размещения транспондеров и лучей для спутника ФСС диапазонов 20/30 ГГц или 11/14 ГГц, пригодного для высокоскоростного доступа в интернет



6 Пропускная способность спутника (C_S)

Учитывая конфигурацию полезной нагрузки, показанную на рисунке 10, пропускная способность спутника составит:

$$(2 \text{ Мбит/с на несущую}) \times (10 \text{ несущих в транспондере}) \times (2 \text{ набора из 4 транспондеров в каждом луче}) \\ \times (8 \text{ лучей}) = \mathbf{1280 \text{ Мбит/с}}$$

Предполагая, что эффективность использования мощности для каждого транспондера равна 35% и что полезная нагрузка составляет 75% от потребностей спутника в мощности, требуемая суммарная рабочая мощность такого спутника составит примерно $(40 \text{ Вт} \times 2 \times 4 \times 8) / (0,35 \times 0,75) = 9752 \text{ Вт}$, скажем, **10 кВт**.

Для случая 11/14 ГГц, если используется 11 несущих на транспондер, пропускная способность составит 1408 Мбит/с.

7 Возможная суммарная пропускная способность (C_T)

В § 3 Приложения 1 показано, что диапазон долготы $97,7^\circ$ геостационарной орбиты может быть виден под углом места 17° и больше из любой точки эталонной зоны площадью $10\,000\,000 \text{ км}^2$. Показано также, что для минимального угла места 10° диапазон долготы составит $111,1^\circ$. С применением метода, описанного в настоящем разделе, подсчитано, что если абонентские земные станции оборудованы антеннами диаметром 1,2 м, то для обоих примеров – 20/30 ГГц и 11/14 ГГц – минимальное расстояние между спутниками, теоретически может быть меньше 2° . Однако, для минимизации риска возникновения помех из-за воздействия таких факторов, как несовершенство системы управления положением спутника, обычно регламентом устанавливается минимальный разнос 2° и, следовательно, это же значение предполагается здесь. Следовательно, количество спутников типа, который описывается в настоящем Приложении, работающих на одной и той же частоте и способных одновременно обслуживать эталонную зону, достигает 48 для случая 20/30 ГГц и 55 для случая 11/14 ГГц. Отсюда суммарная пропускная способность, которая потенциально может быть обеспечена спутникам настоящего типа для широкополосного доступа в интернет пользователей, находящихся внутри эталонной зоны, составит:

- для примера 20/30 ГГц: $48 \times 1280 = \mathbf{61,44 \text{ Гбит/с}}$,
- для примера 11/14 ГГц: $55 \times 1408 = \mathbf{77,44 \text{ Гбит/с}}$.

Однако, вероятно, что из-за необходимости совместно использовать частоты с существующими системами ФСС, в обозримом будущем некоторая часть этой пропускной способности не сможет быть реализована, особенно в более низких полосах частот.

Приложение 3

Пример глобального широкополосного доступа в интернет с использованием системы ФСС, разработанной для "коллективных" земных станций и местного наземного распределения

1 Общие положения

В Приложении 1 требовалось обеспечить непосредственный доступ для абонентских земных станций с антеннами диаметром 30 см, и эта задача определяла вид космического сегмента, т. е. применение спутников с несколькими максимально возможно узкими точечными лучами – и, следовательно, определяла тип требуемой системной архитектуры. Однако в настоящем Приложении, в котором доступ пользователю предоставляется посредством локальных радиосетей до относительно небольшого числа мест, оборудованных "коллективными" земными станциями, размер антенны, используемой на таких земных станциях, имеет меньшее значение, и появляется возможность использовать системную архитектуру различных типов. Существует множество возможностей (включая различные полосы частот) для реализации локальных наземных радиосетей, соединяющих пользователей с "коллективными" земными станциями. Следовательно, в настоящем Приложении

приводится только один пример системной архитектуры, которая обеспечит широкополосный доступ в интернет посредством локальных радиосетей, построенных вокруг "коллективных" земных станций. Этот пример основан на использовании в наземных радиосетях, соединяющих пользователя с центральной станцией и действующих в распределенной фиксированной службе (ФС) полосе частот 4 ГГц, метода многостанционного доступа FDMA с обычной модуляцией QPSK и кодированием 3/4 FEC. Такой выбор оказывает некоторое влияние на вид спутниковых линий между локальными земными станциями и центральной земной станцией, присоединенной к сети интернет, но не настолько сильное, чтобы ограничить возможности для приведенного здесь примера.

Несмотря на то что в рассматриваемом в настоящем Приложении примере для локального наземного распределения сигнала используется распределенная ФС полоса частот 4 ГГц, существует множество других возможностей для создания этого участка сети доступа, зависящих от типа услуг, например фиксированной или подвижной службы, и полосы частот. Выбор применения будет зависеть от множества таких факторов, как скорость передачи данных и требования к мощности; необходимый размер области обслуживания коллективной земной станции; совместное использование частот и координация с другими службами; а также регламентарные ограничения. Поскольку каждая из наземных сетей, связывающаяся с интернетом через один и тот же спутник, будет самодостаточной, в разных зонах можно будет использовать различные частотные распределения фиксированной (ФС) и/или подвижной (ПС) службам; это может быть очень удобным, например, когда область обслуживания спутника охватывает несколько стран.

2 Аспекты использования полос радиочастот

В том что касается определения распределенных ФСС полос радиочастот, пригодных для рассматриваемого применения, здесь также применим первый абзац § 1.1 Приложения 1, но в данном случае необходимость использовать земные станции с очень маленькими антеннами не ограничивает используемые полосы частот диапазонами 4/6 ГГц и 11/14 ГГц, распределенными ФСС. В принципе, коллективные земные станции могут быть оборудованы антеннами любых размеров, хотя использовать для этой цели очень большие антенны было бы экономически неэффективно.

Обзор современного использования полос частот, распределенных спутниковым службам, приведен в § 1,2 Приложения 1, где сделан вывод о том, что распределенные ФСС полосы в диапазоне 20/30 ГГц в настоящее время используются менее интенсивно, чем распределения на более низких частотах, и что пока еще очень мало разработок систем ФСС в распределенных ФСС полосах частот 40/50 ГГц.

В связи с вышеизложенным в настоящем Приложении представлен пример системы коллективной земной станции и приведены параметры для ее реализации в полосах частот 20/30 ГГц, а также для ее реализации в полосах частот 11/14 ГГц. Отмечается, однако, что для всемирного применения в ближайшем будущем в более высоких полосах частот проблем с совместным использованием частот будет, вероятно, меньше, чем в более низких полосах частот.

3 Возможные технические характеристики

3.1 Системная архитектура

Системная архитектура для данного примера показана на рисунке 11, где четыре двунаправленных спутниковых луча с двойной поляризацией используют суммарную полосу частот шириной 500 МГц на линии вверх плюс 500 МГц на линии вниз (т. е. по 125 МГц на луч линии вверх и по 125 МГц на луч линии вниз). Каждый луч будет обслуживать четыре локальные коллективные земные станции с одной поляризацией плюс еще четыре с ортогональной поляризацией, связывая через спутник восемь земных станций с центральной земной станцией для соединения с интернетом. Таким образом, спутник обеспечивает доступ в интернет для 32 местных сообществ.

3.2 Локальные наземные радиосистемы

С каждой локальной земной станцией будет связана наземная радиосистема, приспособленная для обслуживания множества пользователей в радиусе примерно 3 км. Количество пользователей, которое может быть одновременно обслужено, будет зависеть от скоростей передачи, которые они используют, и коэффициентов активности на их соединениях. Для домашних пользователей интернета типичный коэффициент активности составляет порядка 30:1, а для офисных применений – порядка 10:1. Используемая пропускная способность варьируется в широких пределах от коротких

текстовых сообщений до видеоконференций. Термин "широкополосный интернет" обычно охватывает скорости от 256 кбит/с и до многих Мбит/с, но нижний предел повышается каждые несколько месяцев в соответствии с ростом ожиданий пользователей. Например, если предположить, что, скажем, 100 одновременно подключенных бизнес-пользователей желают работать со скоростью 2 Мбит/с в течение 10% времени, то для их обслуживания потребуется 20 Мбит/с и дополнительно еще 6 Мбит/с, которые могли бы использоваться совместно, скажем, 30×23 (пользователями со скоростью 256 кбит/с в потоке 6 Мбит/с) $\cong 700$ пользователями. Следовательно, такая пропускная способность может обеспечить одновременно 100 бизнес-пользователей плюс 700 домашних пользователей или, учитывая коммерческие аспекты, скажем, $150 + 1000$. Однако, если один из пользователей использует приложения, требующие очень интенсивного использования пропускной способности, например, ТВ в реальном времени, то этот пользователь займет значительную часть доступной емкости, если только оператор сети не установит правила совместного использования. Это вопрос управления сетью, который выходит за рамки настоящего исследования.

Для целей настоящего Приложения выбран следующий пример: 200 абонентов используют локальную сеть с коэффициентом активности 13%, следовательно, до 13 этих абонентов смогут вести одновременную передачу данных со скоростью 2 Мбит/с, и еще 13 будут иметь возможность вести одновременный прием данных со скоростью 2 Мбит/с в диапазоне 4 ГГц, распределенном ФС. При необходимости некоторым абонентам можно будет позволить одновременно и передавать и принимать данные со скоростью 2 Мбит/с или с более высокими скоростями, но в таком случае количество одновременно обслуживаемых активных абонентов будет пропорционально меньше, чем 26. Напротив, если некоторые абоненты работают со скоростями менее 2 Мбит/с, то количество одновременно обслуживаемых активных абонентов будет пропорционально больше, чем 26.

В настоящем примере предполагается, что абонентские линии в локальных наземных сетях (которые представляют собой сети "из пункта во множество пунктов") будут линиями FDMA и что в них используется модуляция QPSK с кодированием $3/4$ FEC. Выходные сигналы каждого коллективного терминала (т. е. наземная центральная станция плюс локальная земная станция) (например, тринадцать сигналов со скоростью 2 Мбит/с) в процессе цифрового мультиплексирования будут объединены в единый сигнал со скоростью 26 Мбит/с для последующей передачи на спутник, а входящие сигналы (например, тринадцать сигналов со скоростью 2 Мбит/с) будут выделены в процессе демуплексирования принятого со спутника сигнала со скоростью 26 Мбит/с.

3.3 Спутниковые линии

Предполагается, что на линиях вниз и вверх между коллективной земной станцией и спутником также используется модуляция QPSK с $3/4$ FEC, и на спутнике эти сигналы преобразуются в сигналы 16-QAM, предназначенные для передачи по каналам между спутником и центральной земной станцией. Поскольку для каждого луча будет существовать только одна центральная земная станция (или, возможно, одна такая станция для спутника, расположенная в точке, где перекрываются четыре луча), она может использовать одну антенну, достаточно большую для обеспечения на линиях вверх и вниз значений C/N , требуемых для сигналов 16-QAM. На центральной земной станции двоичные потоки со скоростью 26 Мбит/с преобразуются в форматы, необходимые для передачи данных в интернет и из него.

3.4 Область обслуживания

На рисунке 12 показано, что, если четыре спутниковых луча (двунаправленных, с двойной поляризацией) сформированы так, чтобы ширина луча по половинной мощности составляла примерно 3° , и направлены так, чтобы их области обслуживания пересекались в одной точке на экваторе, они могут вместе охватить общую территорию, площадью порядка $10\,000\,000\text{ км}^2$, что аналогично площади, использованной для базовых вычислений в Приложении 1 (см. рисунок 6 этого Приложения). Диапазоны частот, которые должны быть охвачены каждым из четырех лучей, для систем, реализованных в полосах 20/30 ГГц или в полосах 11/14 ГГц, показаны на рисунке 12. Как описано в Приложении 1, спутниковые антенны разрабатываются так, чтобы области обслуживания лучей оставались круговыми и имели одинаковый диаметр (1884,6 км на поверхности Земли), в какую бы зону земной поверхности они бы ни направлялись, вплоть до минимального угла места 17° для полос частот 20/30 ГГц или 10° для полос частот 11/14 ГГц.

Пример архитектуры для широкополосного доступа в интернет через локальные наземные радиосети плюс спутник

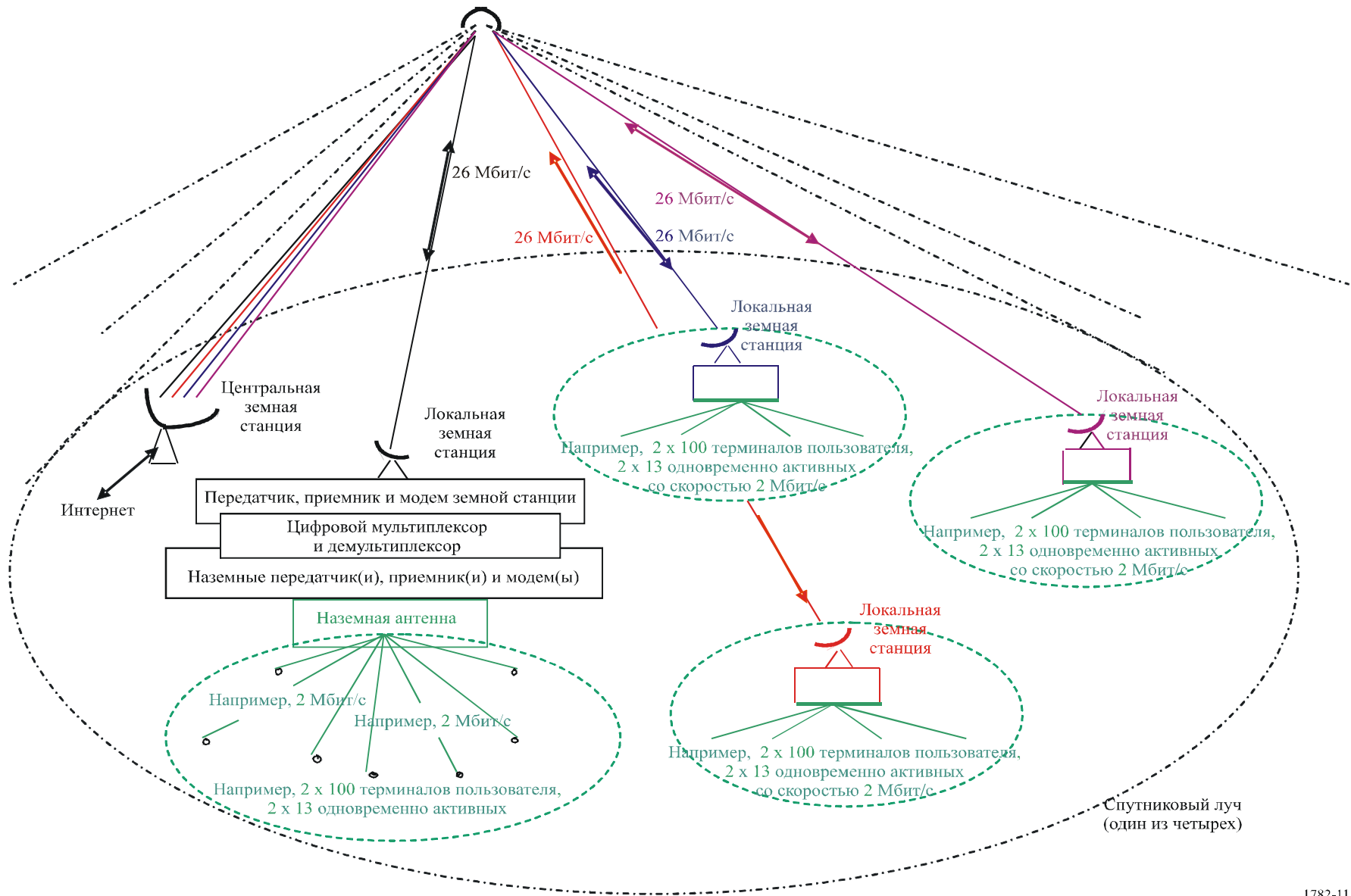
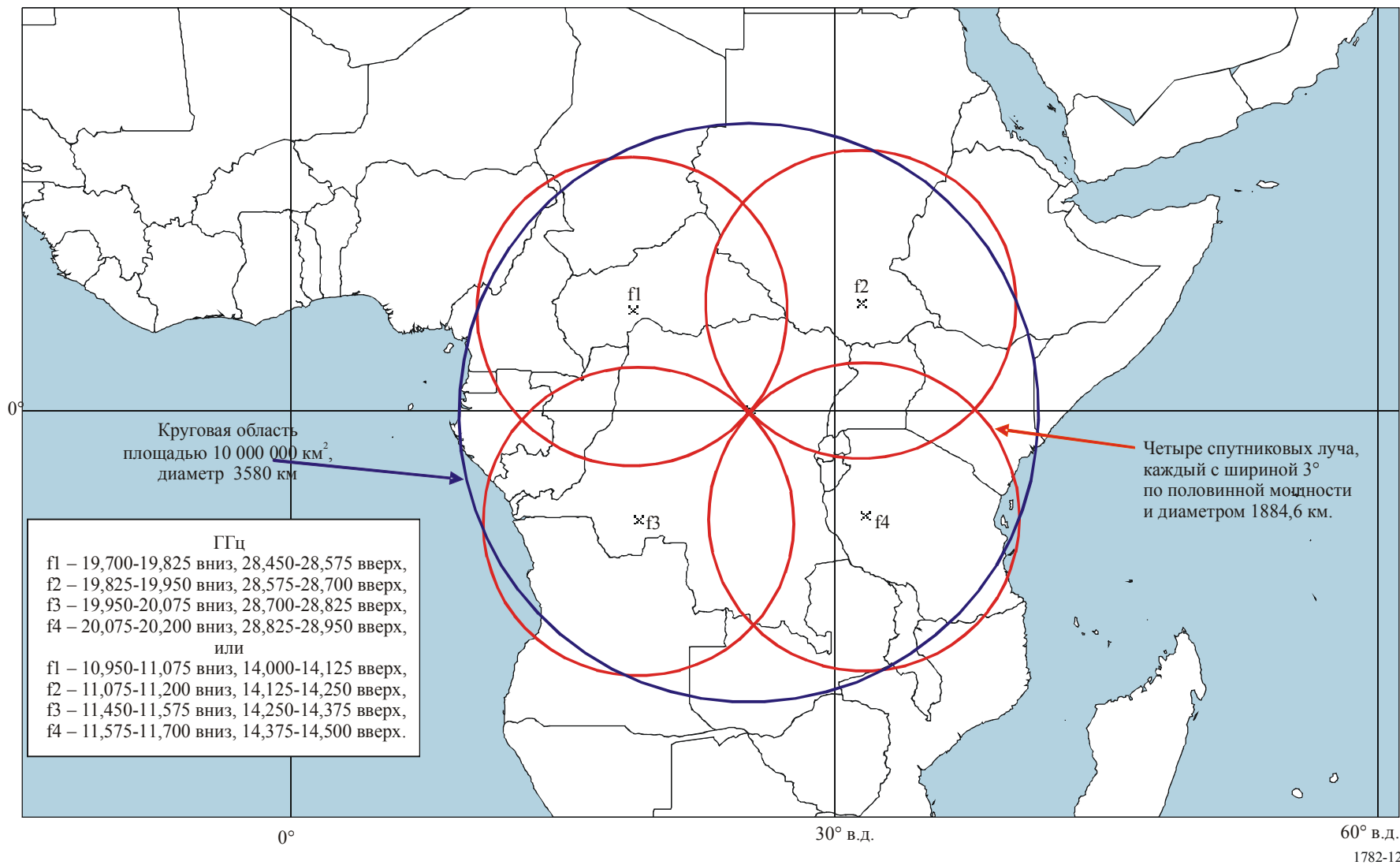


РИСУНОК 12

Пример расположения спутникового луча для широкополосного доступа в интернет через спутник и наземную радиосеть



3.5 Конфигурация полезной нагрузки спутника

Предполагаемая конфигурация полезной нагрузки спутника показана на рисунке 13, из которого можно видеть, что количество транспондеров, требуемое для полного использования полосы 500 МГц на линии вверх и на линии вниз, с использованием обеих поляризацій, составляет 64. Можно видеть также, что, применяя оборудование для преобразования модуляции исходящих потоков со скоростью 26 Мбит/с из QPSK в 16-QAM и наоборот для входящих потоков, можно обеспечить более эффективное использование полосы, чем в случае, когда предполагается использовать транспондеры без демодуляции. Для модуляции QPSK с кодированием 3/4 FEC ширина полосы сигнала со скоростью 2 Мбит/с составляет примерно $2 \times 1/2 \times 4/3 \times 1,2 = 1,6$ МГц, а ширина полосы сигнала со скоростью 26 Мбит/с составляет примерно $26 \times 1/2 \times 4/3 \times 1,2$ МГц = 20,8 МГц. Если порог готовности определен как точка, в которой значение КОБ достигает величины 1×10^{-6} , то общее отношение C/N , требуемое для таких сигналов в условиях замираний, составляет примерно 8,5 дБ, следовательно, допуская наличие шумов на других участках линии и наличие внешних помех, необходимо, чтобы каждый канал был разработан так, чтобы отношение C/N в условиях замираний составляло, как минимум, 9,5 дБ. Эти данные относятся к наиболее критичной линии в цепочке, которой в направлении передачи является линия от абонентского терминала до коллективного терминала, а в направлении приема – линия вниз от спутника до локальной земной станции. Остальные линии должны быть разработаны так, чтобы удовлетворялись требования по наибольшим значениям порогов C/N , с тем чтобы ограничить их влияние на сквозные качественные показатели.

Для модуляции 16-QAM ширина полосы сигнала со скоростью 26 Мбит/с составляет примерно $26 \times 1/4 \times 1,2 = 7,8$ МГц. Это позволяет разместить в полосе одного луча шириной 125 МГц, для каждой поляризации, четыре канала шириной 20,8 МГц плюс четыре канала шириной 7,8 МГц с защитными интервалами между каналами, составляющими примерно 8,5%. Однако, поскольку в каждом канале шириной 7,8 МГц используется модуляция 16-QAM, такой канал должен быть разработан так, чтобы выполнялись требования по порогу готовности, т. е. в условиях замираний C/N должно быть равно примерно 25 дБ (для КОБ = 1×10^{-6}).

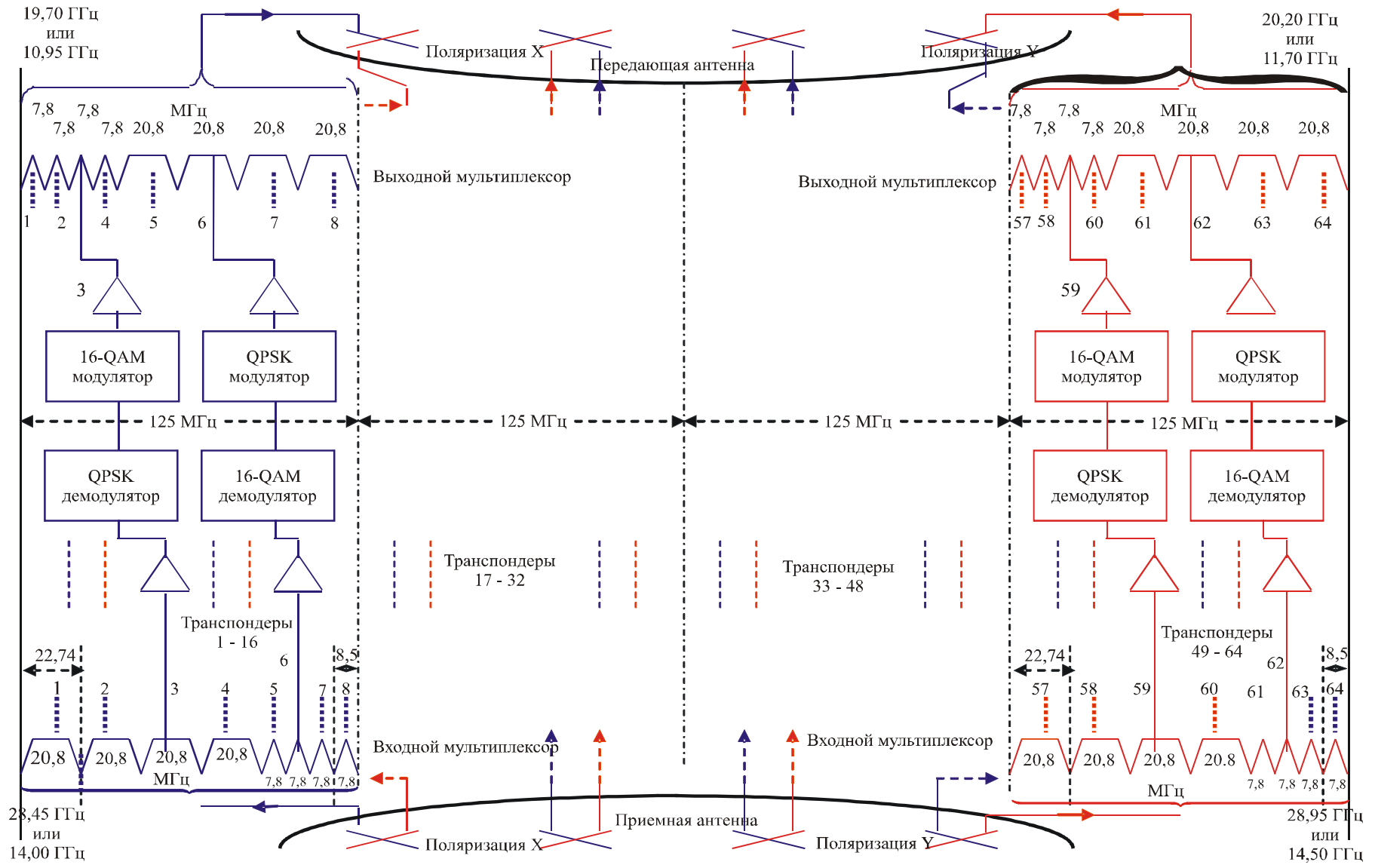
Преобразование между модуляциями QPSK + FEC и 16-QAM в каждом транспондере увеличивает сложность полезной нагрузки спутника, но не настолько, как обработка на борту. Аналогичная полезная нагрузка, основанная на "прозрачных" транспондерах способна обеспечить только примерно две трети этой емкости.

3.6 Бюджеты линий

На основании данных из предыдущих параграфов в следующих расчетах бюджетов линий приводятся важнейшие параметры для локальных наземных радиолучевых диапазонов 4 ГГц, а также для спутниковых линий в диапазонах 20/30 ГГц и 11/14 ГГц:

РИСУНОК 13

Пример архитектуры полезной нагрузки спутника для широкополосного доступа в интернет через спутник и наземную радиосеть



3.6.1 Локальные наземные линии

Линия от абонентского терминала до локальной земной станции в полосе частот 4 ГГц

$$P_T + G_T - 20 \log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10 \log(BT) - (-228,6) = C/N \text{ дБ}, \quad (2)$$

где:

$$\begin{aligned} P_T &= 3 \text{ дБВт (2 Вт)} \\ G_T &= 0 \text{ дБи (малая направленность)} \\ d &\leq 3000 \text{ м} \\ f &= 4\,000\,000\,000 \text{ Гц} \\ F &= 20 \text{ дБ (замирания и блокировка)} \\ G_R &= 10 \text{ дБи (для всех азимутов)} \\ B &= 1\,600\,000 \text{ Гц} \\ T &= 4000 \text{ К и, следовательно,} \\ C/N &= 9,5 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Линия от локальной земной станции до абонентского терминала в полосе частот 4 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$\begin{aligned} P_T &= 5,4 \text{ дБВт (3,5 Вт)} \\ G_T &= 10 \text{ дБи (для всех азимутов)} \\ d &\leq 3000 \text{ м} \\ f &= 3\,750\,000\,000 \text{ Гц} \\ F &= 20 \text{ дБ (замирания и блокировка)} \\ G_R &= 0 \text{ дБи (малая направленность)} \\ B &= 1\,600\,000 \text{ Гц} \\ T &= 4000 \text{ К и, следовательно,} \\ C/N &= 12,5 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

3.6.2 Линии между локальной земной станцией и спутником

Линия вверх от локальной земной станции в распределенной ФСС полосе частот 30 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$\begin{aligned} P_T &= 24 \text{ дБВт (251 Вт)} \\ G_T &= 53,63 \text{ дБи (антенна диаметром 2 м на частоте 28,45 ГГц)} \\ d &\leq 39\,853\,746 \text{ м (минимальный угол места } 17^\circ) \\ f &= 28\,450\,000\,000 \text{ Гц} \\ F &= 11 \text{ дБ (замирания в течение } < 1\% \text{ времени)} \\ G_R &= 34 \text{ дБи (граница спутникового луча шириной } 3^\circ \text{ по половинной мощности)} \\ B &= 20\,800\,000 \text{ Гц} \\ T &= 1000 \text{ К и, следовательно,} \\ C/N &= 12,5 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Линия вверх от локальной земной станции в распределенной ФСС полосе частот 14 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$P_T = 16,7 \text{ дБВт (47 Вт)}$$

$$G_T = 47,63 \text{ дБи (антенна диаметром 2 м на частоте 14,25 ГГц)}$$

$$d \leq 40\,583\,982 \text{ м (минимальный угол места } 10^\circ)$$

$$f = 14\,250\,000\,000 \text{ Гц}$$

$$F = 4,5 \text{ дБ (замирания в течение } < 1\% \text{ времени)}$$

$$G_R = 34 \text{ дБи (граница спутникового луча шириной } 3^\circ \text{ по половинной мощности)}$$

$$B = 20\,800\,000 \text{ Гц}$$

$$T = 800 \text{ К и, следовательно,}$$

$$C/N = 12,5 \text{ дБ.}$$

Линия вниз к локальной земной станции в распределенной ФСС полосе частот 20 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$P_T = 13 \text{ дБВт (20 Вт)}$$

$$G_T = 34 \text{ дБи (граница спутникового луча шириной } 3^\circ)$$

$$d = 39\,853\,746 \text{ м (минимальный угол места } 17^\circ)$$

$$f = 19\,700\,000\,000 \text{ Гц}$$

$$F = 7 \text{ дБ (замирания в течение } < 1\% \text{ времени)}$$

$$G_R = 50,44 \text{ (антенна диаметром 2 м на частоте 19,7 ГГц)}$$

$$B = 20\,800\,000 \text{ Гц}$$

$$T = 300 \text{ К и, следовательно,}$$

$$C/N = 10,7 \text{ дБ.}$$

Линия вниз к локальной земной станции в распределенной ФСС полосе частот 11 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$P_T = 7,8 \text{ дБВт (6 Вт)}$$

$$G_T = 34 \text{ дБи (граница спутникового луча шириной } 3^\circ)$$

$$d = 40\,583\,982 \text{ м (минимальный угол места } 10^\circ)$$

$$f = 10\,950\,000\,000 \text{ Гц}$$

$$F = 3,5 \text{ дБ (замирания в течение } < 1\% \text{ времени)}$$

$$G_R = 45,34 \text{ (антенна диаметром 2 м на частоте 10,95 ГГц)}$$

$$B = 20\,800\,000 \text{ Гц}$$

$$T = 200 \text{ К и, следовательно,}$$

$$C/N = 10,7 \text{ дБ.}$$

3.6.3 Линии между центральной земной станцией и спутником

Линия вверх от центральной земной станции на спутник в распределенной ФСС полосе частот 30 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 24,7 \text{ дБВт (295 Вт)} \\
 G_T &= 63,88 \text{ дБи (антенна диаметром 6,5 м на частоте 28,45 ГГц)} \\
 d &= 38\,377\,622 \text{ м (угол места } 32,7^\circ) \\
 f &= 28\,450\,000\,000 \text{ Гц} \\
 F &= 16 \text{ дБ (замирания в течение } < 0,1\% \text{ времени)} \\
 G_R &= 36 \text{ дБи (в пределах } 1^\circ \text{ от оси спутникового луча)} \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Гц} \\
 T &= 1000 \text{ К и, следовательно,} \\
 C/N &= 25,0 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

Линия вверх от центральной земной станции на спутник в распределенной ФСС полосе частот 14 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 14,3 \text{ дБВт (26,9 Вт)} \\
 G_T &= 57,86 \text{ дБи (антенна диаметром 6,5 м на частоте 14,25 ГГц)} \\
 d &= 38\,656\,773 \text{ м (угол места } 29,5^\circ) \\
 f &= 14\,250\,000\,000 \text{ Гц} \\
 F &= 6,5 \text{ (замирания в течение } < 0,1\% \text{ времени)} \\
 G_R &= 36 \text{ дБи (в пределах } 1^\circ \text{ от оси спутникового луча)} \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Гц} \\
 T &= 800 \text{ К и, следовательно,} \\
 C/N &= 25,0 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

Линия вниз к центральной земной станции в распределенной ФСС полосе частот 20 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 15,4 \text{ дБВт (35 Вт)} \\
 G_T &= 36 \text{ дБи (в пределах } 1^\circ \text{ от оси спутникового луча)} \\
 d &= 38\,377\,622 \text{ м (угол места } 32,7^\circ) \\
 f &= 19\,700\,000\,000 \text{ Гц} \\
 F &= 12 \text{ дБ (замирания в течение } < 0,1\% \text{ времени)} \\
 G_R &= 60,68 \text{ дБи (антенна диаметром 6,5 м на частоте 19,7 ГГц)} \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Гц} \\
 T &= 300 \text{ К и, следовательно,} \\
 C/N &= 25,0 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

Линия вниз к центральной земной станции в распределенной ФСС полосе частот 11 ГГц

Как в уравнении (2):

где:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 9,7 \text{ дБВт (9,3 Вт)} \\
 G_T &= 36 \text{ дБи (в пределах } 1^\circ \text{ от оси спутникового луча)} \\
 d &= 38\,656\,773 \text{ м (угол места } 29,5^\circ) \\
 f &= 10\,950\,000\,000 \text{ Гц} \\
 F &= 8 \text{ дБ (замирания в течение } < 0,1\% \text{ времени)} \\
 G_R &= 55,58 \text{ дБи (антенна диаметром } 6,5 \text{ м на частоте } 10,95 \text{ ГГц)} \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Гц} \\
 T &= 200 \text{ К и, следовательно,} \\
 C/N &= 25,0 \text{ дБ.}
 \end{aligned}$$

4 Пропускная способность спутника (C_S)

Как может быть получено из значений на рисунках 11 и 13, каждый из 64 транспондеров в этом примере будет работать в режиме с одной несущей и будет передавать сигнал со скоростью 26 Мбит/с. Следовательно, суммарная пропускная способность спутника составит $C_S = 64 \times 26 = 1664$ Мбит/с.

В режиме работы "одна несущая на транспондер" снижения мощности не требуется, поэтому из вышеприведенных расчетов бюджета линии можно видеть, что для систем диапазона 20/30 ГГц будет достаточно иметь транспондеры, способные обеспечивать в режиме насыщения мощность 35 Вт, а для систем диапазона 11/14 ГГц будет достаточно иметь транспондеры, способные обеспечивать в режиме насыщения мощность 9,3 Вт. Требования к мощности каскадов, расположенных до выходных каскадов, относительно невелики, поэтому, предполагая, что эффективность преобразования мощности составляет 33% от общего значения, рабочая мощность, которую необходимо подать в полезную нагрузку, составит примерно $(64 \times 35)/0,33 = 6,8$ кВт для спутника диапазона 20/30 ГГц, или $(64 \times 9,3)/0,33 = 1,8$ кВт для спутника диапазона 11/14 ГГц.

Интенсивное применение на каждой коллективной земной станции оборудования мультиплексирования и буферизации позволит получить максимальное число оконечных пользователей, которых можно будет одновременно обслуживать в такой сети.

5 Возможная суммарная пропускная способность (C_T)

Как рассчитано в § 3 Приложения 1, предполагаемые минимальные углы места (17° для полосы 20/30 ГГц и 10° для полосы 11/14 ГГц) приводят к получению следующих диапазонов значений долготы для точек стояния спутников, обслуживающих круговую эталонную зону площадью $10\,000\,000 \text{ км}^2$, которая показана на рисунке 12:

- для полосы 20/30 ГГц: от $23,4^\circ$ з.д. до $74,3^\circ$ в.д., диапазон долготы = $97,7^\circ$;
- для полосы 11/14 ГГц: от $30,1^\circ$ з.д. до $81,0^\circ$ в.д., диапазон долготы = $111,1^\circ$.

Используя метод, описанный на рисунке 7 и в связанном с ним тексте, можно показать, что минимальный разнос по долготе между спутниками типа, описанного в настоящем Приложении, необходимый для того, чтобы обеспечивался достаточно низкий уровень помех от соседнего спутника, для обоих случаев технически намного меньше градуса. Однако, учитывая другие факторы, такие, как практическую реализацию управления спутником, лицензирующие органы, как правило, разрешают минимальный разнос 2° для соседних спутников, работающих на одной частоте и обслуживающих одну территорию, и, следовательно, здесь разумно предположить это же значение. Следовательно, рассчитанное общее количество систем диапазона 20/30 ГГц того типа, который описывается в настоящем Приложении, которые могут обслужить эталонную зону, будет равно 48, а для полосы 11/14 ГГц число таких систем равно 55.

Следовательно, рассчитанная суммарная пропускная способность, которая потенциально может быть обеспечена системами описанного здесь типа в экваториальной зоне площадью 10 000 000 км², при использовании линии вверх с шириной полосы 500 МГц и линии вниз с шириной полосы 500 МГц составит $48 \times 1664 \text{ Мбит/с} = 79,872 \text{ Гбит/с}$ для рассматриваемой в примере полосы частот 20/30 ГГц и $55 \times 1664 \text{ Мбит/с} = 91,52 \text{ Гбит/с}$ для рассматриваемой в примере полосы частот 11/14 ГГц. Однако из-за необходимости совместного использования частот с существующими системами ФСС вероятно, что в обозримом будущем некоторая часть этой пропускной способности не сможет быть реализована, особенно в более низких полосах частот.
