

Характеристики гиперсотовой архитектуры сетей широкополосного доступа для удалённых и малонаселённых территорий

А. Д. Золотуев

В статье рассматриваются вопросы проектирования сетей широкополосного доступа (ШПД) на труднодоступных, удалённых и малонаселённых территориях, в частности проводится расчёт радиуса и ёмкости соты, предлагается архитектура сети на основе ретрансляторов и высокопроизводительного протокола множественного доступа (MAC), также проводится экономический анализ и рассматриваются ключевые аспекты реализации предложенной архитектуры.

Ключевые слова: ШПД, труднодоступные территории, архитектура, MAC, ёмкость соты, экономический анализ.

1. Введение

Сегодня Интернет стал неотъемлемой частью жизни людей, доступность населения к которому без всяких преувеличений определяет уровень его благосостояния. Современные интернет-сервисы позволяют не просто общаться, развлекаться или искать информацию, но и полноценно работать, получать профессиональное образование и даже медицинскую помощь. К сожалению, развитие инфраструктуры Интернет требует значительных финансовых вложений, так как для обеспечения высокоскоростным или широкополосным доступом (ШПД) требуется создание телекоммуникационной сети на базе проводных и беспроводных технологий. Легче всего обеспечить широкополосным доступом в Интернет жителей больших городов, где высокая плотность населения обеспечивает хорошую рентабельность сети. На территориях же с низкой плотностью населения, труднодоступных и удалённых, созданная ШПД-инфраструктура имеет низкую рентабельность. Причиной тому является неадаптированность технологий с централизованной архитектурой, в частности 4G и 5G, к работе в условиях распределённой топологии транспортных потоков и низкого уровня концентрации трафика [1]. На данный момент, наверное, единственным эффективным решением для таких территорий является дорогостоящий спутниковый Интернет. В данной работе предлагается новый подход на основе гиперсотовой архитектуры и высокопроизводительного MAC, который потенциально позволит строить экономичные сети ШПД на территориях с низкой плотностью населения.

Статья является продолжением развития идей, предложенных в работах [1–5]: анализируются такие характеристики, как ёмкость, радиус покрытия и энергетика каналов, а также экономические показатели сети, построенной на базе гиперсотовой архитектуры. В начале статьи проводится обзор существующих решений. Далее в разделе 3 проводится расчет ёмкости и радиуса покрытия соты на основе анализа статистических данных по использованию различных типов сервисов в Интернет. В разделе 4 рассматриваются принципы гиперсотовой архитектуры. В разделе 5 проводится расчет бюджета канала для различных ёмкостей соты исходя из установленных ограничений. В разделе 6 проводится экономический анализ.

2. ШПД для сельских и малонаселённых территорий

На текущий момент в мире проблема обеспечения широкополосным доступом в Интернет на территориях с низкой плотностью населения широко обсуждается и не остается без внимания. Трендом в последние несколько лет является создание микроспутниковых сетей, обеспечивающих глобальное покрытие за счет большого числа низкоорбитальных аппаратов. Примерами таких проектов являются широко известные «Starlink» и «OneWeb» [6]. Очевидно, что таким сетям свойственны все недостатки спутниковых систем связи, в частности высокая задержка, дороговизна развертывания и высокая стоимость доступа – порядка 100 долларов США в месяц [7].

Если рассмотренные проекты основаны на спутниковом доступе, то проекты, предложенные в работах [8, 9], используют наземную инфраструктуру на базе оборудования Wi-Fi. В работе [8] разработчики предлагают использовать более мощные точки доступа и специально разработанный WiMAX-подобный протокол множественного доступа, адаптированный под физический уровень стандарта 802.11. Экономичность такой сети обеспечивается использованием доступного и достаточно дешевого оборудования Wi-Fi, работающего в нелицензированном диапазоне. В работе [9] помимо Wi-Fi используются возобновляемые источники энергии. Недостатками обоих проектов является Wi-Fi-ориентированность, так как стандарт 802.11 разрабатывался для применения в локальных беспроводных сетях и обладает соответствующими недостатками: сравнительно небольшая мощность передатчика, деградация MAC при увеличении расстояния между пользователями и точкой доступа, а также помехи от других Wi-Fi-сетей. И несмотря на то, что в работе [8] предлагается заменить стандартный MAC-протокол на более производительный, при постоянной эксплуатации такой сети снижается её надёжность из-за «кустарной» реализации MAC, основанной опять же на Wi-Fi-драйвере с открытым исходным кодом.

Интересным направлением для построения экономичных беспроводных сетей ШПД является применение стратосферных платформ НАР [10, 11, 12, 13] – беспилотных летательных аппаратов с установленной на них базовой станцией (БС) или ретранслятором (репитер). Концепция НАР реализована в недавно закрытом из-за своей нерентабельности проекте «Loon» от компании Google [14]. Основой проекта является применение воздушных шаров, перемещаемых за счет воздушных потоков в стратосфере. К шару прикрепляется полезная нагрузка с базовой станцией LTE, солнечными батареями и модулем оптической связи для передачи данных между шарами. По заверению разработчиков, проект был закрыт из-за трудностей в коммерческой реализации [15]. Отметим, что подход с условно «свободно» перемещающимися в стратосфере шарами не может гарантировать высокую надёжность соединения и скорее подходит для сервисов передачи данных, нежели голосовой связи, и к тому же требует очень большого числа воздушных шаров. Помимо Google проблемой обеспечения доступа в Интернет с помощью стратосферных платформ заинтересовалась компания Facebook, которая запустила свой собственный проект «Aquila», в отличие от «Loon» использующего дроны с тонкоплёночными солнечными батареями. На текущий момент проект приостановлен из-за проблем с системой посадки дронов, приведших к крушениям [16]. Существуют и другие проекты высотных телекоммуникационных платформ, которые на текущий момент находятся в разработке, например, китайский дрон «Meiying», работающий на солнечных батареях и несущий полезную нагрузку на базе Wi-Fi и в перспективе поддерживающий 6G [17]. Французский проект «Stratobus» использует дирижабль и может применяться для построения 4G- и 5G-сетей [18].

По существу, большинство проектов для сельских и малонаселенных территорий нацелено на создание сетей с централизованной архитектурой, неадекватной условиям труднодоступности и малонаселённости [1–3]. К тому же большинство из них ориентируется на существующие телекоммуникационные стандарты. В данной же работе предлагается иной подход, основанный на построении мультисервисных сетей с распределённой архитектурой.

3. Расчет ёмкости и радиуса покрытия соты

Как было замечено ранее, важным критерием при развертывании телекоммуникационной инфраструктуры на труднодоступных, удалённых и малонаселённых территориях является её рентабельность, зависящая от количества обслуживаемых абонентов. Как правило, на территориях с очень низкой плотностью населения используются беспроводные системы связи, как наиболее экономичные. Поэтому для оценки рентабельности сети на основе предлагаемой архитектуры проведем расчет ёмкости и радиуса зоны покрытия именно беспроводной сети.

Чтобы оценить ёмкость соты, проведем анализ статистики интернет-трафика в России и в мире для основных типов сервисов и спрогнозируем средний объём передаваемых данных одним пользователем. В табл. 1 представлены результаты анализа. Из-за отсутствия информации о количестве видеоконференций было сделано допущение, что пользователь в среднем совершает 10 видеосеансов в месяц при известной средней продолжительности видеоконференции, равной 31 мин [19]. Трафик для услуги телемедицины был рассчитан через среднее время, затрачиваемое на прием у врача в России [20], и среднее количество посещений больничных учреждений в год [21]. Средний объём данных на одного пользователя W рассчитаем по формуле:

$$W = \sum_k v_k \cdot (\bar{a}_u + \bar{a}_d) \cdot T_k \cdot f_k / S, \quad (1)$$

где v_k – скорость передачи данных для k -го сервиса (кбит/с), \bar{a}_u, \bar{a}_d – uplink и downlink асимметрии для k -го сервиса, $T_k \cdot f_k$ – трафик для k -го сервиса (сек.), S – производительность MAC-протокола.

Таблица 1. Результаты анализа статистики мультисервисных потоков данных

Приложения	Скорость, кбит/с (миним.)	Асимметрия	Трафик, с/сутки	Объем данных, Мбит/сутки
Цифровая телефония (VoIP)	8	1/1	800 [22]	12.8
Видеоконференции	128	1/1	620	158.72
Потоковое видео (просмотр фильмов и видео)	500 [23]	0.5/1	5016 [24]	3762
Потоковое аудио (прослушивание музыки, радио)	128	0.13/1	3723 [24]	536.11
Онлайн игры	3000[25]	0.17/1	1122 [23]	3938.22
Web-браузинг (социальные сети, новостные порталы, поисковые системы и др.)	64	0.5/1	12514.2 [23]	1201.36
Загрузка медиаконтента (видео, музыка, книги)	1000 [26]	0.05/1	5706.6 [23]	5991.93
Телемедицина	4000 [27]	1/1	19.7	157.6
Онлайн-обучение	1000 [28]	0.05/1	2982.9 [29]	15660.23
Общий объём данных на одного пользователя (W , без учета производительности MAC), Мбит/сутки			31418.97	
Общий объём данных на одного пользователя (W , без учета производительности MAC), Мбайт/сутки			3927.37	

Ёмкость соты рассчитаем через общую пропускную способность сети/соты T_c :

$$C_{cell} = \frac{T_c}{W}. \quad (2)$$

Пропускную способность зададим в виде соотношения:

$$T_c = m \cdot BW, \quad (3)$$

где m – количество передаваемых бит информации в одном символе алфавита M ; BW – ширина канала. Отметим, что данное соотношение соответствует пропускной способности по Найквисту для канала без шума и двухполосных типов модуляции, применяемых в системах беспроводной связи.

Учтём накладные расходы физического уровня, а также количество параллельных каналов (имеется в виду MIMO):

$$T_c = m \cdot BW \cdot n \cdot (1 - po), \quad (4)$$

где n – число параллельных каналов (1 – SISO, 2 – MIMO); po – доля накладных расходов физического уровня. В табл. 2 показаны результаты расчета ёмкости соты.

Таблица 2. Ёмкость соты

M	m	$BW, \text{МГц}$	n	po	S	$C_{cell, \text{абонентов}}$
2	1	10	2	0.1	0.9	45
4	2	10				90
16	4	10				179
2	1	20				90
4	2	20				179
16	4	20				357

Используя кривые Джиппа [30], определим среднюю абонентскую плотность для ШПД в России. Так как душевой ВВП в 2020 году составил 9972 долларов США [31], соответственно, абонентская плотность равна 3.2 %. Теперь, зная потенциальный спрос на ШПД, можно рассчитать зависимость радиуса соты от плотности населения, для чего воспользуемся известной формулой для площади окружности

$$S = \pi \cdot R^2 \quad (5)$$

и формулой для расчета плотности населения

$$q_{pop} = \frac{N}{S}, \quad (6)$$

где N – численность населения, которую можно выразить через абонентскую плотность q_{BRA} и ёмкость соты C_{cell}

$$N = 100 \frac{C_{cell}}{q_{BRA}}. \quad (7)$$

В результате для радиуса соты получаем следующее соотношение:

$$R_{cell} = \sqrt{\frac{100 \cdot C_{cell}}{q_{BRA} \cdot q_{pop} \cdot \pi}}, \quad (8)$$

где R_{cell} – радиус соты (км). Результаты расчета представлены на рис. 1.

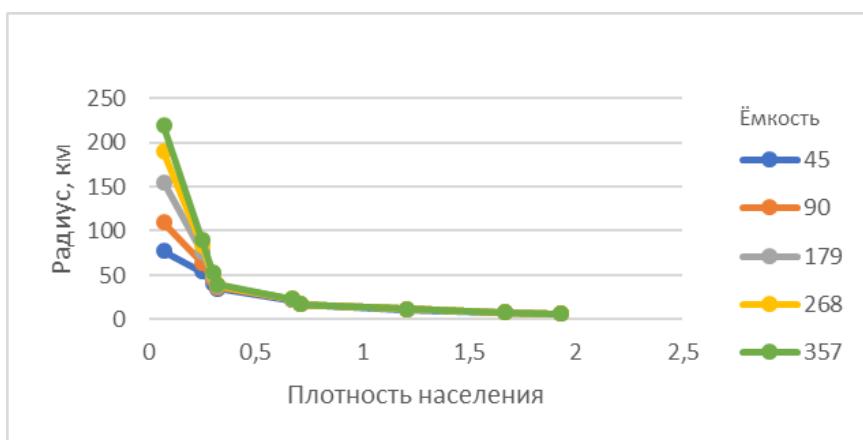


Рис. 1. Радиус соты в зависимости от плотности населения

Анализ полученных результатов показывает, что при экстремально малых плотностях населения ($0.07 \text{ чел}/\text{км}^2$) зона покрытия должна быть не менее 80 км, а при увеличении ёмкости соты – 200 км и более. При плотности населения более $0.3 \text{ чел}/\text{км}^2$ увеличение ёмкости соты приводит к менее значительным изменениям размеров зоны обслуживания. Известно, что увеличение зоны обслуживания накладывает новые ограничения на беспроводную сеть: 1) требуется увеличение высоты подвеса антенны базовой станции и повышение мощности передатчика; 2) необходимо применять толерантный к протяжённым радиоканалам MAC-протокол [2, 3]. Для достижения требуемых показателей в работе предлагается гиперсотовая архитектура распределенных мультисервисных сетей связи, основанная на применении протокола множественного доступа MFMAC, предложенного в работах [1–3].

4. Архитектура для труднодоступных и малонаселённых территорий

Гиперсотовая архитектура предусматривает использование различных технологий физического уровня, например, беспроводных и оптических линий связи, стратосферных платформ и наземных радиомачт, радиорелейных и спутниковых систем. Такая сеть работает как виртуальная шина под управлением единого протокола множественного доступа. В работах [1–3] был предложен высокопроизводительный MAC-протокол для сетей с распределённой архитектурой, эффективный в условиях протяжённых радиосред и обеспечивающий динамический QoS. На его принципах была разработана концепция сети с гиперсотовой архитектурой, представленная на рис. 2. Основными элементами архитектуры являются: активный ретранслятор, устанавливаемый на спутник или воздушную платформу либо на радиомачту, мост-маршрутизаторы с функцией селекции данных, шлюзы и серверы управления. Отметим, что применение ретрансляторов вместо базовых станций, а также повышение производительности MAC в перспективе позволяет повысить рентабельность сети.

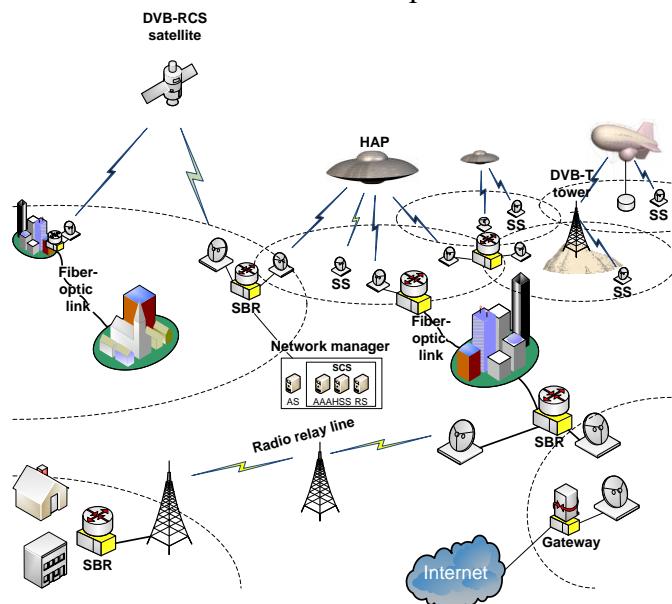


Рис. 2. Концепция гиперсотовой архитектуры

Представленная сеть строится на полносвязных линиях связи (multipoint-to-multipoint) с единым форматом кадра на уровне доступа к среде передачи. Управление доступом к среде происходит на игровом принципе с помощью менеджеров сети (network manager). Из-за ограничений на энергетику канала на границе зоны обслуживания в сотах большого радиуса предусматривается использование абонентских устройств с направленными антennами (фиксированный доступ), а в зонах с достаточной энергетикой (центр соты) – абонентских станций с всенаправленными антennами (мобильный доступ).

5. Бюджет канала

Оценим бюджет канала для гиперсотовых различных радиусов и ёмкостей, определенных в разделе 3, для случая фиксированного доступа (направленные антенны). Введем ограничения на мощность передатчика ретранслятора и усиление антенны абонентской станции (АС). Мощность передатчика ретранслятора примем равной 5 Ватт, а коэффициент усиления антенны АС – 16 дБи. Ограничение по мощности обусловлено применением возобновляемых источников энергии, а ограничение на усиление – размерами антенны в УВЧ-диапазоне. Для повышения дальности радиосвязи частоту несущей f примем равной 800 МГц. Потери распространения сигнала определим с помощью формулы для расчёта потерь в свободном пространстве, выраженной в децибелах [32]:

$$L_{FSPL} = 20\lg(R) + 20\lg(f) + 92.4 \text{ дБ}, \quad (9)$$

где R – расстояние между приёмником и передатчиком, или наклонная дальность, f – несущая частота в ГГц.

Вместо оценки расстояния между приёмником и передатчиком рассчитаем запас на потери сигнала L_e , состоящий из потерь в фидере, потерь на аппаратную реализацию, потерь позиционирования антенны и других потерь, кроме потерь распространения:

$$L_e = P_t + G_t + G_r + G_e - L_{FSPL} - M - S \text{ дБ}, \quad (10)$$

где P_t – мощность на выходе передатчика, G_t – коэффициент усиления антенны передатчика, G_r – коэффициент усиления антенны приёмника, M – запас на замирания, S – чувствительность приемника. Будем считать, что чем больше будет величина L_e , тем дешевле будет оборудование, так как требуется меньшая точность, например, для антенных систем. Параметры и результаты расчета для нисходящего канала представлены в табл. 3.

Таблица 3. Бюджет нисходящего канала (downlink)

Несущая, МГц	800		
Ширина канала, МГц	20		
Ёмкость соты	90	179	357
Модуляция	BPSK	QPSK	QAM-16
SNR, дБ	3	8.5	15
Чувствительность приёмника, дБм	-89.99	-84.49	-77.99
Шум-фактор приёмника, дБ	8		
Запас на потери, дБ	16.6	8.17	-1.3
Высота подвеса антенны абонентской станции, м	3		
Усиление антенны передатчика, дБи	16		
Высота подвеса антенны ретранслятора, км	17		
Усиление антенны приёмника, дБи	8		
Запас на замирания, дБ	3		
Радиус соты, км	109.7	154.8	218.6
Наклонная дальность, км	111	155.7	219.2
Потери распространения, дБ	131.4	134.3	137.3
Мощность передатчика, дБм/Ватт	36.99/5		

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение ёмкости соты приводит к уменьшению запаса L_e , в частности для ёмкости 357 абонентов при установленных ограничениях потери вообще недопустимы. Очевидно, что дополнительные потери в системе будут присутствовать всегда, в частности потери позиционирования антенны, поэтому в условиях установленных ограничений решением может стать уменьшение расстояния между приёмником и передатчиком за счет установки дополнительных ретрансляторов, как показано на рис. 3. Ретрансляторы с меньшими размерами зоны обслуживания в совокупности покрывают территорию требуемого радиуса, то есть формируют гиперсотову, а запас L_e увеличивается на 9 дБ. В такой схеме ретрансляторы на краю гиперсотовы взаимодействуют через ретрансля-

тор, устанавливаемый в её центре. На рис. 4 представлена схема кластера, состоящего из гиперсотов, объединяемых с помощью межплатформенных каналов (inter-HAP link) посредством маршрутизаторов (routing repeater), устанавливаемых на платформе.

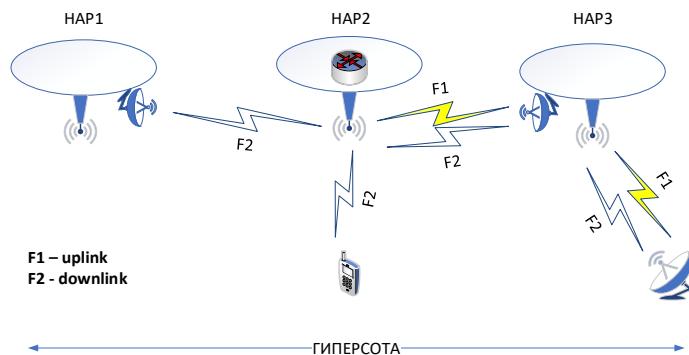


Рис. 3. Схема ретрансляции в гиперсоте

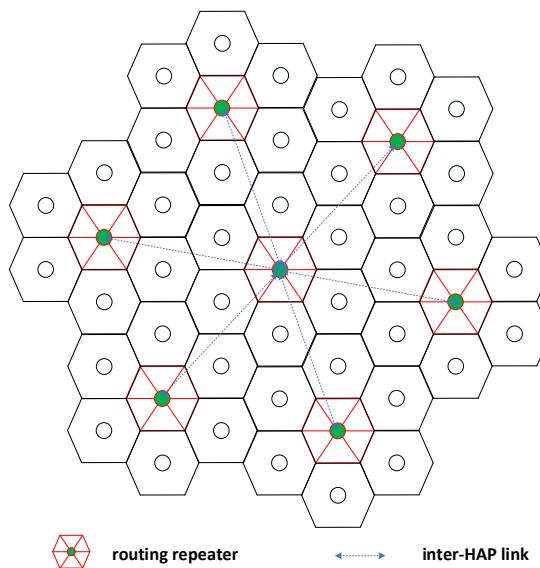


Рис. 4. Гиперсотовый кластер

В табл. 4 представлен расчет для восходящего канала (uplink) для QPSK-модуляции. Ключевым параметром в uplink является коэффициент усиления ретранслятора G_{amp} . Расчет бюджета для каналов «границный – центральный ретрансляторы» и «транспортного» (между двумя гиперсотами) не представлен в работе, но отметим, что на границном ретрансляторе помимо всенаправленной антенны устанавливается направленная, коэффициент усиления которой принят равным 18 дБи, а для транспортных каналов в предложенном анализе предусматривается использование передатчиков с меньшей мощностью и более широкой полосой (100 МГц), а также антенн с большим коэффициентом усиления для несущей 27 ГГц в диапазоне, выделенном для сетей пятого поколения 5G. Таким образом, для гиперсотовой архитектуры предлагается использование частот, выделенных для технологий 4G и 5G, из предположения, что эти диапазоны на труднодоступных и малонаселённых территориях будут не востребованы, что фактически решает проблему электромагнитной совместимости. При выбранных ограничениях на мощность передатчика для транспортного канала желательно использовать модуляцию BPSK, которая обеспечивает больший запас на потери. Используя характеристики оборудования (табл. 3, 4), проведем экономический анализ.

Таблица 4. Бюджет восходящего канала (uplink)

Несущая, МГц	800
Ширина канала, МГц	20
Ёмкость соты	179

Модуляция	QPSK
SNR, дБ	8.5
Чувствительность приёмника, дБм	-84.49
Шум-фактор приёмника, дБ	8
Запас на потери, дБ	17.31
Высота подвеса антенны, м	3
Мощность передатчика, дБм/Ватт	23.98/0.25
Усиление антенны передатчика, дБи	16
Высота подвеса антенны приемника, км	17
Усиление ретранслятора, дБ	13.01
Усиление антенны приёмника, дБи	8
Запас на замирания, дБ	3
Радиус соты, км	51.59
Наклонная дальность, км	54.31
Потери распространения, дБ	125.16

6. Экономический анализ

Программа обеспечения широкополосным доступом населения России уже давно является важным направлением государственной политики и в перспективе должна решить проблему «цифрового разрыва». На труднодоступных, удалённых и малонаселённых территориях, несмотря на достаточно большой срок реализации программы, население, особенно северной части Дальнего Востока, не имеет возможности пользоваться современной 4G-инфраструктурой. В таких регионах, как правило, развернуты сети третьего поколения, подключенные к сети Интернет через спутниковые каналы. С учетом большой заинтересованности со стороны государства в расчете экономических характеристик сделаем следующие допущения: 1) частоты для 4G и 5G свободны на потенциальных территориях для развертывания сетей с гиперсотовой архитектурой; 2) плата за частоту минимальна.

Капитальные вложения. Основные компоненты полезной нагрузки, характеристики и стоимость представлены в табл. 5. Анализ проводился для кластера из семи гиперсотов (рис. 3) на базе стратосферных платформ. Расчёт платы за частоту проводился согласно методике, предложенной в [33]. Так как на границе гиперсотовы используются направленные антенны, то для развертывания сети достаточно 40 МГц-полосы (uplink + downlink). Для повышения ёмкости соты предполагается использование технологии MIMO 2x2 с поляризационным разделением каналов, поэтому количество репитеров для одного НАР в расчете капитальных затрат равно двум. Цены на оборудование были найдены в сети Интернет на сайтах продавцов оборудования, а также у вендоров. Стоимость менеджера сети (сервера распределения ресурса) в расчете не учитывается, так как эту функцию из-за особенностей архитектуры может выполнять любой абонентский терминал с достаточной производительностью. Капитальные затраты на подсистему электростанции (ЭС) и летательный аппарат представлены в табл. 6. Так как напрямую их стоимость сложно оценить, то затраты на эти элементы были рассчитаны через удельные капитальные затраты на один Ватт электроэнергии и потребляемую мощность полезной нагрузки:

$$CAP_{HAP} = ic \cdot P_{pl}, \quad (11)$$

где CAP_{HAP} – капитальные затраты на электростанцию и летательный аппарат, ic – удельные капитальные затраты, P_{pl} – суммарная потребляемая мощность полезной нагрузки. Величины удельных капитальных затрат были взяты из [34, 35] для высотных привязных электростанций.

Годовые эксплуатационные расходы. В эксплуатационные расходы входят: годовой фонд оплаты труда (ФОТ), амортизационные отчисления (АО), материальные затраты (МЗ), аренда частоты, страховые взносы (СВ) и прочие расходы (ПР). Фонд оплаты труда рассчитывал-

ся исходя из допущения, что для обслуживания кластера достаточно двух инженеров-монтажников (оклад – 59200 рублей) и одного инженера по мониторингу и обслуживанию сети (оклад – 44400 рублей). Страховые взносы составляют 30 % от ФОТ, амортизационные отчисления – 5 % от первоначальной стоимости основных фондов, материальные затраты состоят из затрат на материалы и запасные части, составляющие 1 % от капитальных вложений. Прочие расходы составляют 40 % от ФОТ.

Аренда частоты. Плата за аренду частоты рассчитывалась по методике, предложенной в [33]. Расчёт проводился для диапазонов 800 МГц и 27 ГГц, коэффициента, учитывавшего перспективность технологии ($K_{ПЕРСП} = 0.001$), и коэффициента, учитывавшего интенсивность использования соответствующих выделенных полос радиочастот в субъекте Российской Федерации и сформированного на основании плотности населения на территории ($K_{РЕГ} = 0.2$). В табл. 7 представлена сводная таблица годовых эксплуатационных расходов.

Таблица 5. Капитальные вложения на полезную нагрузку

Наименование	Потребляемая мощность, Ватт	Другие характеристики	Количество	Стоимость единицы, руб	Стоимость, руб
Маршрутизатор и ретранслятор					
Антенна с технологией формирования луча	50	Усиление 31.5 дБи (27 ГГц)	7	763014	5341098
Приёмопередатчик		Максимальная мощность на выходе 32.5 дБм			
Устройство питания для антенны и приёмопередатчика	-		7	8584	60088
МАС-контроллер-маршрутизатор (на базе ПК)	300		7	37000	259000
Антенна всенаправленная с двойной поляризацией	-	8 дБи, 800 МГц	7	1850	12950
Корпус полезной нагрузки	-		7	222000	1554000
Бортовой компьютер	6		7	10804	75628
Репитер с переносом частоты	250		14	88800	1243200
Литиевый аккумулятор		Номинальное напряжение 12 В, ёмкость 200 А·ч	7	148000	1036000
Ретранслятор					
Антенна всенаправленная с двойной поляризацией	-	8 дБи, 800 МГц	42	1850	77700
Антенна направленная с двойной поляризацией	-	18 дБи, 800 МГц	42	22200	932400
Репитер с переносом частоты	250		84	88800	7459200
Корпус полезной нагрузки	-		42	111000	4662000
Бортовой компьютер	6		42	10804	453768
Литиевый аккумулятор		Номинальное напряжение	42	148000	6216000

		12 В, ёмкость 200 А·ч			
Общие затраты на обо- рудование					29383032
Другие расходы (30 %)					8814909.6
Разовая плата за частоту					2479
Всего:					38200420.6

Таблица 6. Капитальные вложения на подсистему электростанции

Тип платформы	Количество	Потребляемая мощность, Ватт	Общая мощность, Ватт	Удельная стоимость, руб/Ватт	Капитальные вложения, руб.
Ретранслятор	42	506	21252	132.46 [35]	2815039.92
Маршрутизатор и ретранслятор	7	856	5992	206.46 (132.46 + 74 [34])	1237108.32
Всего					4052148.24

Таблица 7. Годовые эксплуатационные расходы в рублях

ФОТ	4490157.2
СВ	1347044.2
АО	1671756.2
МЗ	422525.2
ПР	1796061.4
Аренда частоты	38117.4
ВСЕГО	9765661.6

Доходы. Предполагается, что за доступ в сеть пользователи платят фиксированную месячную сумму, к тому же учитываются доходы от продажи оборудования (пользовательские станции и комплектующие). В расчете принято, что продажа оборудования в первый год дает доход, равный 2220 рублям (30\$ США) с одного пользователя, что сопоставимо с доходностью от продажи смартфонов [36]. Срок окупаемости оценивался по принципу расчёта чистого денежного дохода NPV (net present value) [37] при ставке дисконтирования 15 %. На рис. 5 представлены графики окупаемости для разных тарифов.

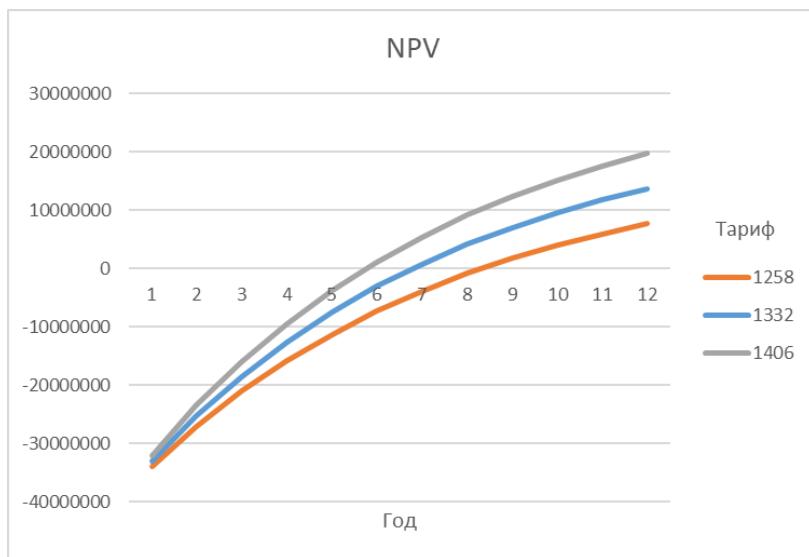


Рис. 5. NPV для разных тарифов в рублях

Анализ полученных результатов показывает, что при умеренной стоимости доступа в Интернет срок окупаемости сети на базе гиперсотовой архитектуры составляет 6 – 8.5 лет. Отметим, что средняя стоимость фиксированного ШПД в России составляет порядка 600

рублей в месяц [38], но несмотря на это тарифы, используемые в расчёте, сопоставимы со стоимостью ШПД в некоторых восточных регионах России, где есть инфраструктура оптоволоконной связи. В случае коммерческой реализации оператор сети сможет предложить пользователям более гибкую тарифную политику с меньшей минимальной стоимостью доступа. В данном же расчете тарифы ниже 1258 рублей значительно увеличивают срок окупаемости сети. Уменьшение ёмкости гиперсоты также приводит к росту срока окупаемости. На рис. 6 представлены расчёты срока окупаемости для коэффициента перспективности технологии, используемого при расчёте платы за спектр в сетях LTE ($K_{\text{ПЕРСП}} = 0.1$). Как видно из графика, повышение платы за аренду частоты при тех же тарифах резко снижает рентабельность сети, и для уменьшения срока окупаемости требуется повышение тарифа. На рис. 7 представлены расчеты срока окупаемости при более высоких КПД физического и канального уровней ($\rho_0 = 0.05$; $S = 0.95$). В данном случае срок окупаемости уменьшается до 4.5 – 6 лет при тех же тарифах за счёт повышения ёмкости соты и некотором увеличении радиуса соты.

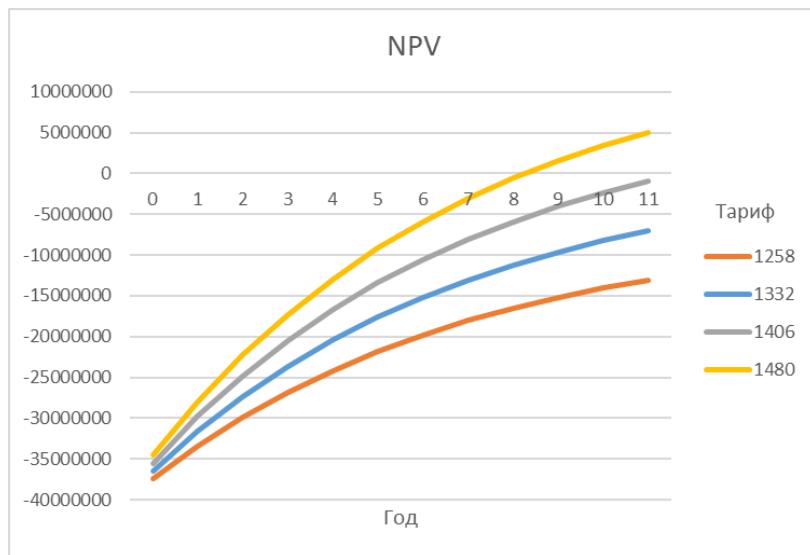


Рис. 6. NPV для $K_{\text{ПЕРСП}} = 0.1$ (LTE)

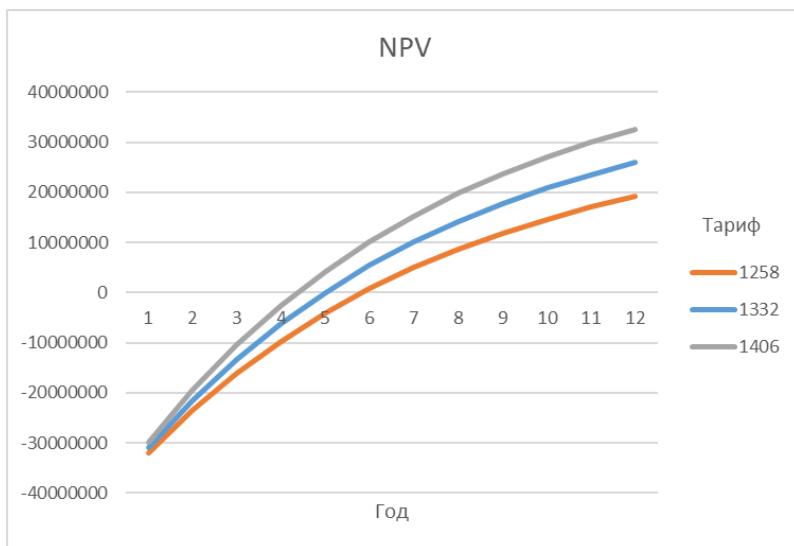


Рис. 7. NPV при меньших накладных расходах физического и канального уровней

В табл. 8 представлено сравнение предлагаемого решения с технологиями 4-го и 5-го поколений. Отметим, что плотность населения многих удаленных и труднодоступных регионов России не превышает 2 чел/км², в то время как для развертывания рентабельных сетей

4-го поколения требуется абонентская плотность более 100 абонентов на квадратный километр [39]. Сети же 5-го поколения требуют ещё больших экономических затрат по сравнению с сетями 4G [40].

Таблица 8. Сравнение с другими технологиями

Критерий \ Технология	4G	5G	Предлагаемая
Архитектура	Централизованная	Централизованная	Распределённая
Пропускная способность	Несколько десятков мегабит в секунду	Гигабитные скорости в миллиметровом диапазоне	Сопоставима с 4G при одинаковых схемах модуляции
Радиус зоны покрытия одной соты	До нескольких десятков км	~ до 1 км в миллиметровом диапазоне	Сопоставим с 4G
Стоимость оборудования	Стоимость БС высокая (несколько тысяч долларов США)	~ в 50 раз выше стоимости БС 4G [41]	Стоимость ретранслятора примерно в 5 раз ниже стоимости БС 4G
Перспективы развёртывания на территориях с низкой плотностью населения	Низкие <i>Сети развёртываются обычно в больших городах или на территориях, где есть оптоволоконная инфраструктура</i>	Низкие <i>Значительные капитальные затраты, даже для территорий с высокой плотностью населения.</i> <i>В качестве решения рассматривается фиксированный доступ [42], но радиус зоны покрытия небольшой (несколько сотен метров)</i>	Высокие <i>Окупаемость выше за счет применения более дешёвых ретрансляторов вместо дорогих БС</i>

7. Заключение

В работе рассмотрены вопросы построения сетей широкополосного доступа на труднодоступных, удаленных и малонаселенных территориях. Были получены зависимости радиуса соты от плотности населения, позволяющие приблизенно оценить размеры зоны покрытия беспроводной широкополосной сети для территорий с экстремально низкой плотностью населения. Проведен расчет бюджета канала, по результатам которого определены характеристики системы. Предложена гиперсотовая архитектура для создания телекоммуникационных сетей на удаленных, труднодоступных и малонаселенных территориях. Проведён экономический анализ. По результатам расчетов сделаны следующие выводы: 1) на территориях с малой плотностью населения для обеспечения рентабельности сети требуется увеличение площади обслуживания и ёмкости соты; 2) для увеличения ёмкости соты требуется уменьшение накладных расходов физического и канального уровней; 3) при ограничениях на энергетику канала для сот большого радиуса возможно применение дополнительных ретрансляторов.

Литература

1. *Markhasin A.* Ubiquitous and Multifunctional Mobile Satellite all-IP over DVB-S Networking Technology 4G with Radically Distributed Architecture for RRD Regions // International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC'07), Salzburg, Austria, 13–15 September, 2007. P. 99–103.
2. *Markhasin A.* Advanced Cost-Effective Long-Delay Broadband ATM Medium Access Control Technology and Multifunctional Architecture // IEEE International Communication Conference (ICC'2001), Helsinki, Finland, 11–14 June, 2001. V. 6. P. 1914–1918.
3. *Markhasin A.* QoS-Oriented Medium Access Control Fundamentals for Future All-IP/ATM Satellite Multimedia Personal Communications 4G // IEEE International Communication Conference (ICC'2004), Paris, France, June 2004. P. 3963–3968.
4. *Markhasin A.* Satellite-based fully distributed mesh hybrid networking technology DVB-S2/RCS-WiMAX for RRD areas // 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop, Italy, 13–15 September, 2010. P. 294–300.
5. *Markhasin A., Zolotuev A., Belenky V.* The 5G ubiquitous directional communication technologies of public e-health for rural and remote areas // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Russia, 21–27 October, 2019. P. 1002–1006.
6. Satellite constellations, a race is engaged // Space legal issues [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spacelegalissues.com/satellite-constellations-a-race-is-engaged> (дата обращения: март 2021).
7. Starlink // Wikipedia [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Starlink> (дата обращения: март 2021).
8. *Raman B., Chebrolu K.* Experiences in using Wi-Fi for Rural Internet in India // IEEE Communication Magazine. Jan. 2007. V. 45. P.104–110.
9. *McGuire C., Brew M., Darbari F., Stephan Weiss, Stewart R.W.* WindFi: Renewable energy wireless base station. URL: <http://www.steepestascent.com/> (дата обращения: март 2021).
10. *El-Jabu B, Stelle R.* Cellular Communications Using Aerial Platforms // IEEE Transactions on Vehicular Technology. May 2001. V. 50, № 3. P. 686–700.
11. *Aragon-Zavala A., Cuevas-Ruiz J. L., Delgado-Penín J. A.* High-Altitude Platforms for Wireless Communications. Ed. John Wiley and Sons, Ltd, Wiley-Blackwell, England, 2008.
12. *Davey L, Butler R, Buchanan R., Phillips R. W., Lee Y. C.* High altitude platform stations for Australia // Telecommunications Journal of Australia. 2008. V. 58, № 2–3. P. 301–308.
13. *Gawande V. N., Desai U. B., Raina A., Pant R. S.* Low-cost Wireless Internet Access for Rural Areas using Tethered Aerostats // IEEE Region 10 Colloquium and Third International Conference on Industrial and Information Systems, Kharagpur, India, December 8–10, 2008. P. 1–5.
14. Проект Loon // Loon [Электронный ресурс]. URL: <https://loon.com> (дата обращения: март 2021).
15. Google to shutdown Loon // Spacenews [Электронный ресурс]. URL: <https://spacenews.com/google-to-shut-down-loon> (дата обращения: март 2021).
16. Here's why Facebook is ending Aquila, its drone-delivered internet project // Techrepublic. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.techrepublic.com/article/heres-why-facebook-is-ending-aquila-its-drone-delivered-internet-project/> (дата обращения: март 2021).
17. Alphabet Again Exits Drones: Others Again Jump In // Idtechx [Электронный ресурс]. URL: <https://www.idtechex.com/en/research-article/alphabet-again-exits-drones-others-again-jump-in/22960> (дата обращения: март 2021).

18. What's up with Stratobus? // Thales [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/whats-stratobus> (дата обращения: март 2021).
19. Video Conferencing Statistics (All you need to know!) // SkillScouter [Электронный ресурс]. URL: <https://skillscoutter.com/video-conferencing-statistics/> (дата обращения: март 2021).
20. Время лечит // Российская газета [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2015/09/11/med.html> (дата обращения: март 2021).
21. Минздрав подсчитал, как часто россияне ходят в больницу // LIFE [Электронный ресурс]. URL: <https://life.ru/p/1249249> (дата обращения: март 2021).
22. 75 Key VoIP Statistics: 2020/2021 Data Analysis & Market Share // Financesonline [Электронный ресурс]. URL: <https://financesonline.com/voip-statistics/> (дата обращения: март 2021).
23. Internet Speed Requirements for Video Streaming // Lifewire [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lifewire.com/internet-speed-requirements-for-movie-viewing-1847401> (дата обращения: март 2021).
24. Медиапотребление в России // Deloitte [Электронный ресурс]. URL: <https://www2.deloitte.com/ru/ru/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/media-consumption-in-russia.html> (дата обращения: март 2021).
25. How Much Speed Do I Need for Online Gaming? // HighSpeedInternet.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.highspeedinternet.com/resources/how-much-speed-do-i-need-for-online-gaming> (дата обращения: март 2021).
26. Broadband Speed Guide // Federal communications commission [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fcc.gov/consumers/guides/broadband-speed-guide> (дата обращения: март 2021).
27. What is the recommended bandwidth for different types of health care providers? // HealthIT.gov [Электронный ресурс]. URL: <https://www.healthit.gov/faq/what-recommended-bandwidth-different-types-health-care-providers> (дата обращения: март 2021).
28. What is the minimum required internet speed or bandwidth for eLearning courses? // Dive into Math and Science [Электронный ресурс]. URL: <https://diveintomath.reamaze.com/kb/self-paced-elearning-courses/what-is-the-required-bandwidth-for-elearning-courses> (дата обращения: март 2021).
29. Average time spent per week on online learning worldwide in 2018, by method (in hours) // Statista [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/953222/online-learning-average-time-week-mode-worldwide/> (дата обращения: март 2021).
30. Абилов А. В., Жукова Е. А. Влияние экономики и образования на развитие инфокоммуникаций в мире // Информационное общество. 2011. № 3. С. 15–27.
31. Российская Федерация – ВВП на душу населения // knoema [Электронный ресурс]. URL: <https://knoema.ru/Российская-Федерация/ВВП-на-душу-населения/> (дата обращения: март 2021).
32. Склар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
33. Расчет и взимание платы за использование радиочастотного спектра // Роскомнадзор [Электронный ресурс]. URL: <https://rkn.gov.ru/communication/p552/> (дата обращения: март 2021).
34. How StratoSolar stores energy at a low cost // StratoSolar [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stratosolar.com/low-cost-energy-storage.html> (дата обращения: март 2021).

35. *Ippolito M. Reaction Paper to the Recent Ecorys Study KI0118188ENN.en.pdf Challenges for the commercialization of Airborne Wind Energy Systems // Project «KiteGen Carousel».* November, 2018. 53 p.
36. Сколько зарабатывают с каждого устройства производители смартфонов? // Mobinfo.uz [Электронный ресурс]. URL: <http://mobinfo.uz/skolko-zarabatyvayut-skazhdogo-ustrojstva-proizvoditeli-smartfonov.html> (дата обращения: март 2021).
37. *Arnold T. How net present value is implemented // A pragmatic guide to real options.* Palgrave Macmillan, New York, 2014. P.1–13.
38. Дешевле, чем в США: сколько стоит интернет в России // Газета.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazeta.ru/business/2019/11/04/12794210.shtml> (дата обращения: март 2021).
39. Золотуев А. Д. Широкополосный доступ через высотные ретрансляторы для малонаселенных и труднодоступных территорий Сибири и Дальнего Востока // Инфосфера. 2012. № 56. С. 19–20.
40. 5G обойдется в 610 миллиардов. PwC подсчитала расходы на развитие сетей нового поколения в России // РБК [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2018/05/22/5b0292189a794785d1afe222> (дата обращения: март 2021).
41. A 5G base station is quite expensive – why destroy it? // Gizchina [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gizchina.com/2020/04/05/a-5g-base-station-is-quite-expensive-why-destroy-it/> (дата обращения: март 2021).
42. Is 5G the silver bullet for rural areas? // Glasgow. Chamber of commerce Gizchina [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glasgowchamberofcommerce.com/news/news/2020/november/12/is-5g-the-silver-bullet-for-rural-areas/> (дата обращения: март 2021).

*Статья поступила в редакцию 29.05.2021;
переработанный вариант — 08.09.2021.*

Золотуев Андрей Дмитриевич

ст. преп. кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-693-932, e-mail: andrew.gold@mail.ru.

Hypercellular architecture characteristics of the broadband access networks for rural and remote areas

A. Zolotuev

The article deals with the design of broadband access networks in rural, remote and difficult for access territories. In particular, the calculation of the radius and capacity of the cell is carried out, the network architecture based on repeaters and a high-performance multiple access protocol (MAC) is proposed, an economic analysis is also carried out and key aspects of the implementation of the proposed architecture are considered.

Keywords: broadband access, difficult for access territories, architecture, MAC, cell capacity, economic analysis.