

М. Г. Филатова, В. А. Алецкая, С. Г. Шпилевая

**ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КАЧЕСТВЕННОЙ МОБИЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗЬЮ
ПЕРИФЕРИЙНОГО НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА
КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

66

Поступила в редакцию 02.04.2021 г.

Рецензия от 16.04.2021 г.

Проанализированы проблемы, связанные с обеспечением устойчивой мобильной радиосвязью удаленных от областного центра населенных пунктов, расположенных на побережье Балтийского моря. На примере поселка городского типа Янтарный обоснована целесообразность внедрения сетей пятого поколения (5G). На основании учета физических процессов распространения радиоволн соответствующих частотных диапазонов, с учетом плотности застройки и рельефа местности выполнены расчеты зон уверенного радиоприема на исследуемой территории, определено оптимальное расположение базовых станций сотовой связи, обоснован выбор оборудования.

The paper analyzes the problems associated with the provision of stable mobile radio communication in remote settlements located on the Baltic Sea coast. On the example of the urban - type settlement of Yantarny, the expediency of implementing fifth-generation networks-5G-is justified. On the basis of accounting for the physical processes of radio wave propagation of the corresponding frequency ranges, taking into account the density of buildings and terrain, calculations of the zones of confident radio reception in the study area were performed, the optimal location of cellular base stations was determined, and the choice of equipment was justified.

Ключевые слова: радиоприем, мобильная радиосвязь, сети 5G (пятого поколения), диапазон частот, базовая станция, затухание сигнала

Keywords: radio reception, mobile radio-communication, 5G networks (fifth generation), frequency range, base station, signal attenuation

Одной из актуальных задач развития информационной инфраструктуры периферийных районов Калининградской области является их обеспечение надежной связью, гарантирующей предоставление абонентам качественных услуг и сервисов. Исходя из этого выполнена оценка существующего уровня развития сетей мобильной радиосвязи в одном из наиболее динамично развивающихся населенных пунктов прибрежной зоны – поселке городского типа Янтарный. Занимаемая поселком площадь – 26 км², официальная численность населения –



5557 жителей (за счет приезда отдыхающих в курортные периоды численность значительно возрастает). Специфика населенного пункта заключается в неоднородной плотности застройки, наличии нескольких парковых зон с достаточно высокой растительностью, а также обширной пляжной территории, где отсутствуют возможности организации проводной связи и, соответственно, востребованы услуги мобильной радиосвязи. В некоторых районах Янтарного помимо мобильных операторов действуют провайдеры, предоставляющие доступ к домашнему интернету.

Первичный анализ зон покрытия сетей, расположенных на рассматриваемой территории, показал, что мобильная связь в поселке реализуется посредством четырех операторов («Билайн», «МегаФон», «МТС», «Tele2»); в незначительной степени представлена сеть «Yota». На основании этого можно предполагать, что абоненты должны в достаточной степени обеспечиваться высокоскоростной мобильной связью 4-го поколения. Для оценки качества предоставляемых услуг выполнены тестовые измерения скорости передачи данных в сетях 4G. Измерения производились в жилых зданиях, расположенных вне зон прямой видимости базовых станций (БС) [1], при помощи абонентских устройств [2]. Анализ данных, полученных при помощи устройства Samsung Galaxy A10, позволяет считать, что оператор «Tele2» обеспечивает удовлетворительную скорость загрузки и передачи данных и относительно малую задержку. Оператор «МегаФон» в поселке Янтарном предоставляет высокоскоростную связь до 100 Мбит/с, качество которой тестировалось аналогичным способом и также показало в целом положительные результаты.

Аналогичным образом были измерены скорости передачи данных в сетях 2G, 3G и 4G, обслуживаемых ПАО «МТС» и обеспечивающих поселок голосовыми услугами и другими сервисами. Тестирование, выполняемое абонентским устройством Sony Xperia, проводилось на открытой местности. При этом параметры передачи оказались значительно хуже, чем у двух предыдущих операторов. Составление карты зон покрытия позволило сделать вывод, что качество услуг ПАО «МТС» в Янтарном не удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым абонентами к качеству сотовой связи, данная сеть обеспечивает наихудшую из рассматриваемых операторов среднюю скорость передачи данных и загрузки, вносит высокую задержку.

Для понимания причин указанных выше недостатков проведем более подробный анализ расположенных в поселке базовых станций (БС) и мачтовых сооружений сотовой связи (рис. 1). Как показывает анализ, на территории Янтарного располагаются 7 БС, принадлежащих различным операторам, что теоретически позволяет:

- а) в основном обеспечить жителей и гостей поселка связью второго и третьего поколений;
- б) частично обеспечить территорию услугами связи 4G.

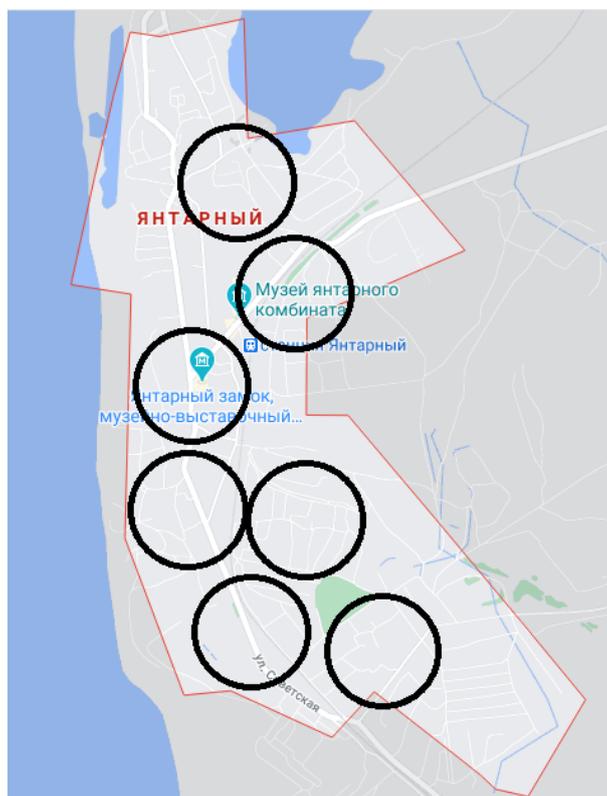


Рис. 1. Существующее расположение базовых станций в поселке Яantarный

Учитывая интенсивное развитие населенного пункта как курортно-туристической зоны можно заключить, что для реализации наиболее востребованных телекоммуникационных услуг и сервисов необходимо расширить и модернизировать существующие сети мобильной радиосвязи.

Реализовать подобное развитие возможно путем внедрения на исследуемой территории сетей пятого поколения – 5G [3], преимуществами которых являются более совершенные антенные технологии и более высокая пропускная способность каналов. На текущий момент разработаны и успешно внедряются три основных варианта таких сетей [4], отличающиеся друг от друга диапазонами используемых частот: низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. Самая распространенная из них – низкочастотная неавтономная версия NSA 5G, функционирование которой незначительно отличается от 4G и позволяет использовать те же самые технические сооружения, кроме «автономной» радиосистемы, известной как 5G-NR [3; 4]. За исключением Sprint, соты 5G-носителей имеют иную форму, чем у 4G, поэтому они теряют покрытие там, где отключается 4G-сигнал. Переход сети 5G в автономный режим может сопровождаться скачкообразным увеличе-



нием зон городского покрытия. Для наиболее быстрого и эффективного внедрения сетей пятого поколения требуется использование уже существующих полос радиочастот эволюционных сетей LTE-Advanced. Приказ Минкомсвязи России «Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации» [5] как ключевой регламентирующий документ определяет приоритетные для внедрения 5G частотные диапазоны. Тем не менее использование некоторых из них на текущий момент является трудновыполнимой задачей.

Первый из упомянутых диапазонов частот (694–790 МГц) позиционируется в качестве основного. Он включен в Дорожную карту Евросоюза по внедрению сетей 5G/IMT-2020 [6].

Второй диапазон (790–862 МГц) используется для целей военного и специального назначения, вследствие чего планирование сетей на эти частоты в данный момент представляется проблематичным.

Третий диапазон (1–6 ГГц) обладает хорошими характеристиками распространения радиоволн в условиях сельской, пригородной и городской местности, обеспечивает достаточно широкую полосу частот для организации высокоскоростных каналов с шириной спектра до 100 МГц, причем в этой полосе для внедрения сетей пятого поколения рассматриваются полосы 3400–3600 МГц, 3600–4400 МГц, 4400–5000 МГц.

Частоты свыше 6 ГГц предназначены для организации сверхвысокоскоростных каналов связи на небольших расстояниях от БС за счет использования каналов с шириной спектра до 400 МГц (разнос поднесущих частот SCS равен 240 кГц) при обеспечении сверхмалых задержек. Проблемой данного диапазона является значительное ослабление сигнала при распространении. Помимо этого, частоты 24,25–29,5 ГГц предназначены для обеспечения покрытия в хот-спотах, а также для обеспечения всех типов услуг, в особенности URLLC [2; 6]. Использование диапазонов частот свыше 30 ГГц на сегодняшний день не является целесообразным из-за необходимости использования очень малых сот, высокой стоимости внедрения и ряда других причин [7].

Согласно проведенному анализу, логичным будет рекомендовать к использованию в зоне 1 (рис. 2) частот 4800–4990 МГц, а в зоне 2 – 27,5–29,5 ГГц соответственно. Для каждой из указанных зон территории поселка необходимо выбрать соответствующее оборудование базовых станций.

В качестве антенно-радиомодульных устройств целесообразно использовать устройства Huawei AAU5313 NP для диапазона 4800–4990 МГц и Huawei NAAU5112 NR для диапазона 27,5–29,5 ГГц. Антенны данных моделей характеризуются хорошими массогабаритными характеристиками; имеют ширину диаграммы направленности $\sim 60^\circ$, что дает возможность построить шестисекторную базовую станцию без «темных зон» [5] уверенного радиоприема.

Далее определим уровень уверенного радиоприема, для чего, в первую очередь, выберем модель распространения радиосигнала. На качество принимаемого сигнала, как известно, влияют рельеф местности, плотность городской застройки, растительность и другие факторы [8].



Рис. 2. Зонирование исследуемой местности

Модель для всех местоположений представлена в виде уравнения

$$PL(d, f) = 10\alpha \lg d + \beta + 10\gamma \lg f + N(0, \sigma) \text{дБ},$$

где d – прямое расстояние между передающей и приемной станциями в трехмерной системе координат (м); f – рабочая частота (ГГц); α – коэффициент, связанный с увеличением потерь на трассе с расстоянием; β – коэффициент, связанный со значением смещения потерь на трассе; γ – коэффициент, связанный с увеличением потерь на трассе с частотой; $N(0, \sigma)$ – нулевая средняя гауссова случайная величина со стандартным отклонением σ (дБ).

Потери при распространении сигнала в свободном пространстве:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \lg(d / 1000) + 20 \lg f = 106,2 + 20 \lg(d / 1000).$$

В случае NLoS (*non line of sight*) [8] сигналы могут достигать станции с помощью механизмов дифракции или многолучевого распространения, которые могут представлять собой комбинацию механизмов дифракции и отражения.

В случае распространения в зоне 1 (городская застройка) модель пригодна для следующих параметров: $h_1 = 4 - 50$ м; $h_2 = 1 - 3$ м; $f = 800 - 5000$ МГц; $d = 20 - 1000$ м, где h_1 – высота базовой станции, h_2 – высота абонентского терминала.



На рисунке 3 представлен график зависимости потерь (затухания) сигнала от расстояния, на котором показаны кривая потерь по модели распространения NLoS для городской зоны (L_{nlos}), кривые максимально допустимых потерь для восходящего (L_{ul}) и нисходящего потока (L_{dl}). Таким образом, можно определить дальность связи по этим каналам в точках пересечения кривой модели и кривой МДП.

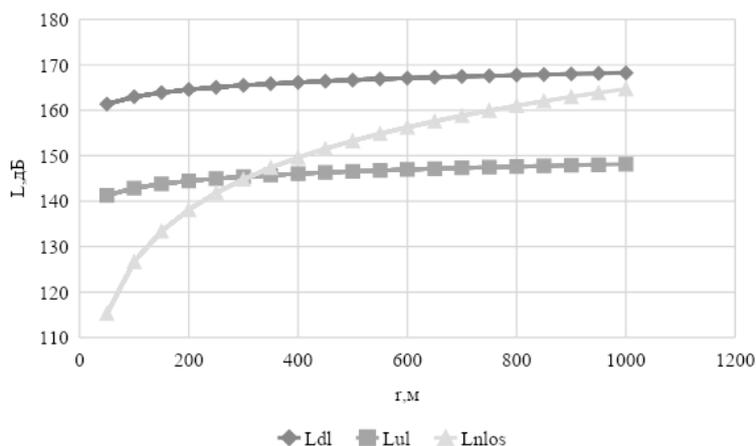


Рис. 3. График зависимости потерь (затухания) сигнала от расстояния

На основе графика можно заключить, что максимально допустимые потери для восходящей линии меньше, чем для нисходящей. Следовательно, восходящая линия будет ограничивающей по дальности связи. Максимальной дальностью связи является точка пересечения L_{ul} и L_{nlos} . В наземной радиосвязи линия вверх (UL) всегда энергетически слабее, чем линия вниз (DL), из-за разницы максимальной мощности передатчиков станций. Следовательно, максимальная дальность связи по графику для зоны 1 составит $R = 300$ м.

Проанализируем условия радиопокрытия для диапазона частот 28 ГГц (зона 2). На характеристики принимаемого сигнала в данном случае влияют три фактора: мелкомасштабное многолучевое замирание (a), крупномасштабное затухание (b) и потери на пути распространения (c) [8; 9]. Необходимые расчетные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные параметры для разных типов местности

Параметр	Город (А)	Пригород (В)	Сельская местность (С)
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

Примечание: в проектируемой зоне 2 преобладают трехэтажные постройки, поэтому для расчетов выбрана местность В. Высота антенны БС $h_{tx} = 17$ м, высота АС $h_{rx} = 1,5$ м. Частота 28 ГГц, поправка на эффект затухания 6 дБ, средний поправочный коэффициент наклона $\alpha = 3,2$.



При использовании адаптивной антенной системы следует понимать, что различные значения ширины луча могут быть реализованы путем объединения большего или меньшего числа элементов антенной решетки в массиве. Чем меньше ширина луча диаграммы направленности, тем выше должны быть коэффициент усиления и излучаемая мощность, что приводит к двум граничным условиям для расчета канала связи.

Мощность принимаемого сигнала зависит от расстояния между передатчиком и приемником. Для того чтобы рассчитать запас на замирания, необходимо вычесть из полученной мощности чувствительность приемника. Аналогичным образом производится расчет уровня мощности на входе приемника и запаса на замирания для остальных случаев.

Вычисление уровня мощности приемника и запаса на замирания для линии вверх при излучении узкого луча выполним по формулам

$$P_r = -42,16 - 43,12 \lg d - 0,69d,$$

$$M_{UL} = 55,84 - 43,12 \lg d - 0,69d.$$

Исходя из этого построим графики зависимости M_{DL} и M_{UL} для случая использования широкого и узкого луча от d для линий вверх и вниз (рис. 4).

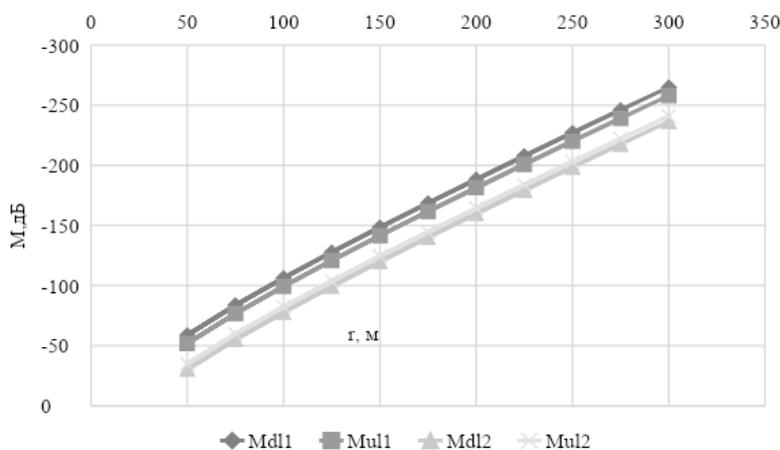


Рис. 4. График зависимости запаса на замирания от расстояния между передатчиком и приемником

По представленному графику можно сделать вывод о том, что максимальная дальность связи составит 150 м, следовательно, расстояние между двумя приемо-передающими модулями должно быть не более 300 м.

Все полученные значения не превышают максимально допустимую дальность связи, исходя из расчета зон радиопокрытия (табл. 2). Радиус соты будет минимальным значением дальности связи для каждой из зон.



Таблица 2

Определение радиуса соты

Зона	Дальность связи по графику, км	Дальность связи по трафику, км	Количество базовых станций
1	0,3	0,47	22
2	0,15	0,59	10

Следующим этапом является расстановка базовых станций пятого поколения gNB на рассматриваемой территории. При частотно-территориальном планировании необходимо обеспечить максимальную зону покрытия, учитывая при этом такие особенности, как рельеф местности, концентрацию абонентов и др. Общее количество базовых станций составляет 32 (табл. 2). Поскольку для каждой зоны выбраны разные частоты, то радиус действия, высота и количество базовых станций для каждой зоны различны. БС будут расположены как на зданиях, так и на опорах двойного назначения. Рекомендуемое расположение БС представлено на рисунке 5.

73

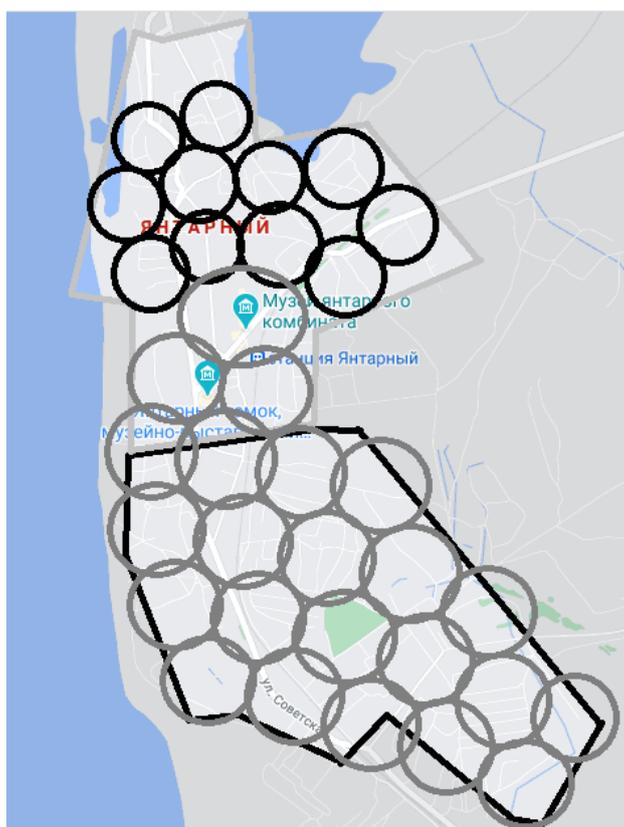


Рис. 5. План размещения БС на территории поселка



Некоторые БС находятся на местах ныне существующих, что сократит расходы при создании сети 5G за счет переиспользования частот с применением Massive MIMO [9] и использования различных методов модуляции.

Проведенные расчеты пропускной способности сети для двух проектируемых зон позволили рассчитать необходимое количество базовых станций, выполнить анализ зон уверенного радиоприема как по трафику, так и по энергетическому бюджету сети, обосновать оптимальное расположение БС gnB.

Таким образом, в работе решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих на сегодняшний день систем сотовой связи в поселке Янтарный, реализуемых с помощью семи базовых станций, которые обеспечивают покрытие территории сетями второго, третьего и четвертого поколений. При этом обнаружено, что в ряде районов неуверенно функционирует или отсутствует мобильный интернет и другие важные сервисы.

2. Исходя из плотности застройки, высоты зданий и количества потенциальных абонентов было выполнено зонирование территории. Для первой зоны с характерной высотой зданий ~20 м выбран частотный диапазон 4800–4990 МГц; для второй зоны – диапазон миллиметровых волн 28 ГГц (в этом районе высота зданий составляет ~15 м).

3. Для каждой из зон выбрано оборудование компании Huawei с соответствующим частотным диапазоном.

4. Выявлена пропускная способность (зона 1 – 198 000 Мбит/с, зона 2 – 120 000 Мбит/с), рассчитано необходимое количество БС (зона 1 – 22, зона 2 – 10).

5. Определены зоны уверенного радиоприема, которые исходя из трафика составили 466 м (зона 1) и 592 м (зона 2), исходя из энергетического бюджета сети – 300 м (зона 1) и 150 м (зона 2). Из полученных показателей выбраны наименьшие.

6. Выполнено примерное планирование расположения БС на местности.

Реализация предложенных рекомендаций позволит обеспечить поселок Янтарный надежной сотовой связью пятого поколения, обеспечивающей все существующие и перспективные потребности динамично развивающейся курортной зоны.

Список литературы

1. Гимадинов Р. Ф. Кластеризация в мобильных сетях 5G. Случай частичной мобильности // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. Т. 3, №2. С. 44–52.

2. Аминева А. В., Блохин А. В. Измерения в телекоммуникационных системах. Екатеринбург, 2015.

3. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Юрчук А. Б. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура. М., 2010.

4. Тихвинский В. О. Сети 5G и IoT – инновационная среда для цифровой экономики России // Электросвязь. 2017. №8. С. 18–24.



5. *Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации* : приказ №923 от 27.12.2019 г. Минкомсвязи России. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

6. *Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Коваль В. А.* Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. М., 2019.

7. 5G: NR; Radio Resource Control (RRC) : Protocol Specification (3GPP TS 38.331. 15.3.0 Release 15). ETSI, 2018. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138331/15.03.00_60/ts_138331v150300p.pdf (дата обращения: 30.03.2021).

8. *Teral S.* 5G best choice architecture. IHS Markit. White Paper. 30 Jan. 2019. URL: https://res-www.zte.com.cn/mediares/zte/Files/PDF/white_book/5g-best-choice-architecture.pdf (дата обращения: 30.03.2021).

9. *Расчет ослабления в свободном пространстве* : рекомендация МСЭ-R P.525-3. Сер. P: Распространение радиоволн. 2016. [Вып.] 11. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 30.03.2021).

Об авторах

Мария Германовна Филатова — студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: MGFilatova@stud.kantiana.ru

Виктория Александровна Алецкая — студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VAletsкая@stud.kantiana.ru

Светлана Геннадьевна Шpileвая — канд. пед. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SSHpilevaya@kantiana.ru

The authors

Maria G. Filatova, Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: MGFilatova@stud.kantiana.ru

Victoria A. Aletsкая, Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VAletsкая@stud.kantiana.ru

Dr Svetlana G. Shpilevaya, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SSHpilevaya@kantiana.ru