

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 654.165

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).57-68

ГРНТИ 49.43.29

Специальность ВАК 2.2.15

Научная статья

ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАНКИНГОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А.

МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия)

Аннотация В статье рассмотрено проектирование транкинговой системы связи с использованием предложенного метода автоматического размещения базовых станций и разработанного программного обеспечения. Целью работы является снижение трудоемкости проектирования транкинговых систем связи. В методе автоматического размещения особое внимание уделяется расчету необходимого количества каналов для организации связи между заданным количеством абонентов. Научная новизна представленного решения заключается в том, что в методе автоматического размещения базовых станций координаты мест их установки определяются с помощью предложенного жадного алгоритма, в котором расчет зон обслуживания базовых станций осуществляется на основе модифицированной модели Хата. Затем для полученных координат мест установки базовых станций проводится уточненный расчет зон обслуживания с учетом дополнительных потерь на дифракцию, тропосферное рассеивание и потерь в атмосферном волноводе. После чего определяется зона гарантированного обслуживания. Представлены результаты проектирования транкинговой системы связи в разработанном программном обеспечении, приведены графики зависимости времени расчета жадного алгоритма от площади территории, которую необходимо покрыть связью.

Ключевые слова: *транкинговые системы связи, частотно-территориальное планирование, автоматического размещение, зона обслуживания, системы подвижной связи*

Для цитирования: Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А. Частотно-территориальное планирование транкинговых систем связи // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 57-68. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).57-68

Research Article

FREQUENCY-TERRITORIAL PLANNING OF TRUNKING COMMUNICATION SYSTEMS

Ivanov V. S., Uvaysov S. U., Ivanov I. A.

MIREA-Russian technological university (Moscow, Russian Federation)

Abstract The article considers the design of a trunking communication system using the proposed method of automatic placement of base stations and the developed software. The aim of the work is to reduce the complexity of designing trunking communication systems. In the automatic placement method, special attention is paid to calculating the required number of channels for organizing communication between a given number of subscribers. The scientific novelty of the presented solution lies in the fact that in the method of automatic placement of base stations, the coordinates of their installation locations are determined using the proposed greedy algorithm, in which the calculation of the service areas of base stations is carried out on the basis of a modified Hut model. Then, for the obtained coordinates of the base station installation sites, an updated calculation of the service areas is carried out, taking into account additional diffraction losses, tropospheric scattering and losses in the atmospheric waveguide. After that, the guaranteed service area is determined. The results of the design of the trunking communication system in the developed software are presented, graphs of the dependence of the calculation time of the greedy algorithm on the area of the territory that needs to be covered by the connection are given.

Keywords: *trunking communication systems, frequency-territorial planning, automatic placement, service area, mobile communication systems*

For citation: Ivanov V. S., Uvaysov S. U., Ivanov I. A. Frequency-territorial planning of trunking communication systems // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 57-68. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).57-68

Введение

Система радиосвязи представляет совокупность радиоэлектронных средств и среды распространения, осуществляющих передачу информации от источника к получателю посредством радиоволн в открытом пространстве [1]. В системах радиосвязи, в первую очередь, выделяются системы подвижной связи: сотовая, транкинговая, персональная и спутниковая связь. Характерной чертой систем подвижной связи является возможность повторения одних и тех же радиочастотных каналов связи, что в свою очередь, позволяет сэкономить на получении разрешений их использования. Если территория, которую необходимо покрыть связью, делится на несколько зон(сот), то использование одинаковых частот в ближайших сотах нежелательно из-за появления взаимных помех.

В транкинговых системах связи (ТСС) обеспечивается автоматическое распределение каналов связи. В основе этой идеи лежит выделение определенного количества каналов всем пользователям системы [2]. То есть абоненты не закрепляются за определенными каналами связи, что решает проблему неравномерного использования доступных частот, когда один из каналов связи перегружен, а соседний практически всё время свободен. Такой принцип организации радиосвязи позволяет получить значительную экономию радиочастотного ресурса при большом количестве абонентов [3]. Благодаря высокой скорости установления соединения, менее 0,5 сек, возможности группового подключения и приоритизации, пользователями ТСС являются службы спасения, службы охраны и безопасности. Обеспечение безопасности на чемпионате мира по футболу в России в 2018 году велось с помощью ТСС. Помимо перечисленных выше служб ТСС пользуются крупные добывающие полезные ископаемые предприятия и сельскохозяйственные организации. В центре зоны, которую необходимо покрыть связью, устанавливается базовая станция (БС), в состав которой входит приемопередающее оборудование, антенно-фидерное оборудование, контроллеры управления и многое другое.

Антенны базовых станций могут быть ненаправленными, то есть осуществлять передачу сигнала одинаковой мощности во всех направлениях, и направленными (секторными), когда сигнал излучается в определенном направлении. При использовании ненаправленных антенн абонентские станции принимают помехи от всех соседних станций, тогда как использование направленных антенн позволяет снизить уровень взаимных помех и более эффективно использовать частотный ресурс сети, чаще повторяя частоты в сотах. Совокупность ближайших сот, в которых невозможно использовать одни

и те же частотные каналы называется кластером. Размерность кластера определяется числом сот в его составе [4].

На рисунке 1 приведен пример кластеров с размерностью -3. Каждый кластер выделен цветом и состоит из трех сот, в которых используются три различные пары частот, одна на прием, другая на передачу. Повторное использование частот возможно в сотах, удаленных друг от друга на расстояние D, называемое защитным интервалом. Использование одних и тех же частотных каналов в смежных сотах невозможно. В общем случае расстояние D можно выразить по следующей формуле:

$$D = R * \sqrt{3C}, \quad (1)$$

где R – радиус соты, C – количество БС в кластере.

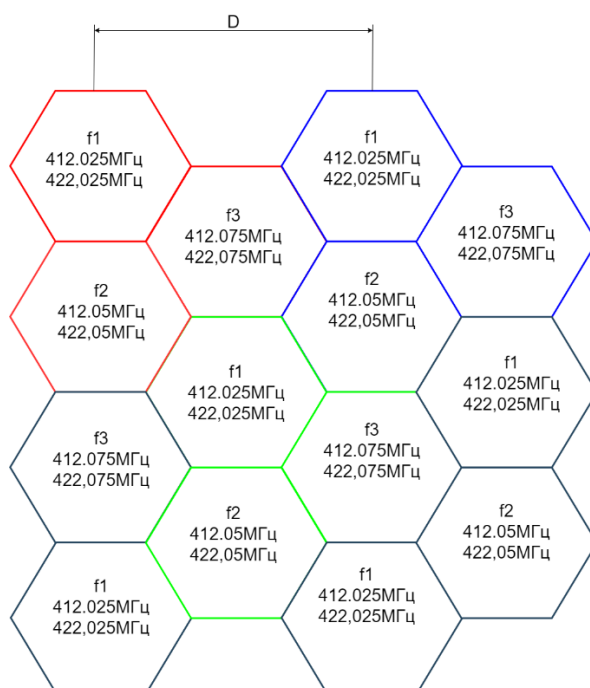


Рисунок 1. Трехэлементый кластер

Смежные базовые станции, использующие различные наборы частотных каналов, образуют группу из $C=3$ станций. Если каждой базовой станции выделяется набор из $m=2$ каналов с шириной полосы каждого $F_k=25$ кГц, то общая ширина полосы, занимаемая системой сотовой связи, составит:

$$F_C = F_k * m * C = 25 * 2 * 3 = 150 \text{кГц}. \quad (2)$$

Таким образом, величина C определяет минимально возможное число каналов в системе, поэтому ее часто называют частотным параметром системы, или коэффициентом повторения частот. Размер ячеек R определяет защитный интервал между ячейками. Уменьшение радиуса ячейки позволяет повысить

эффективность использования выделенной полосы частот, увеличить абонентскую емкость системы, уменьшить мощность передатчиков и чувствительность приемников базовых и подвижных станций. Что приводит к улучшению электромагнитной совместимости средств сотовой связи с другими радиоэлектронными средствами и системами. С другой стороны, чрезмерное уменьшение радиуса ячеек приводит к значительному увеличению числа пересечений подвижными абонентами границ ячеек, что может вызвать перегрузку устройств управления и коммутации системы, а также увеличить число случаев возникновения взаимных помех. В связи с этим в реальных условиях при выборе величины R приходится учитывать все вышеперечисленные обстоятельства и находить компромиссное решение.

Использование секторных антенн с узкими диаграммами направленности позволяет снизить уровень помех, т. к. сигнал излучается в одну сторону, а уровень излучения в противоположном направлении сокращается до минимума. Если использовать трехсекторные антенны с шириной диаграммы направленности 120° для каждой базовой станции (рисунок 2), то каждый сектор будет иметь свою полосу частот, что увеличит количество обслуживаемых абонентов. Возможны и другие варианты дробления ячеек, причём этот приём широко используется для участков сети с напряженным трафиком в интересах обеспечения необходимой ёмкости системы.

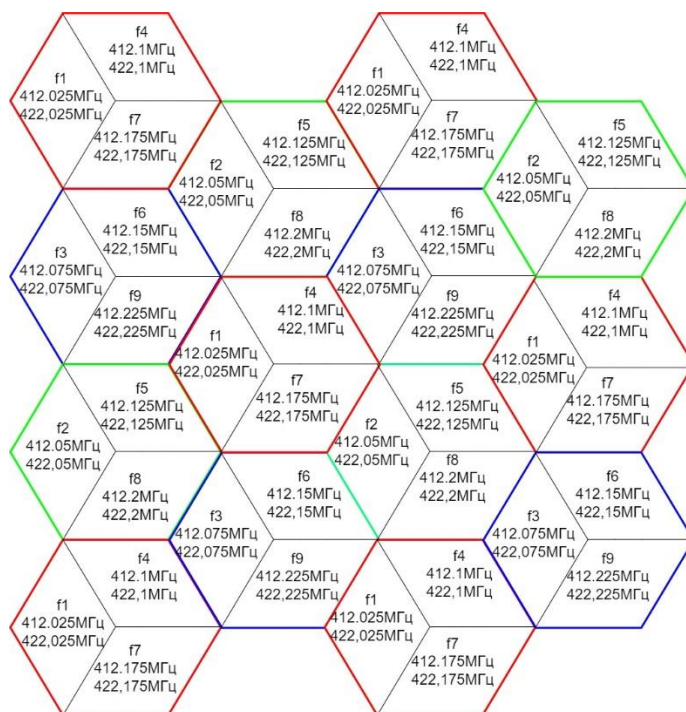


Рисунок 2. Семизлементный кластер

Деление территории, которую необходимо покрыть связью, на соты происходит на основе статистических и детерминированных методов

распространения сигналов в системах связи. В статистических методах вся обслуживаемая территория делится на ячейки равного размера, который определяется на основе известных моделей, таких как модель Окумуры, модель Окумуры-Хата, модель Лонгли-Райса и др. При расчете размеров ячеек на основе детерминированных методов тщательно рассчитывают и измеряют параметры системы, учитывают фактор влияния препятствий на трассе распространения радиосигнала, определяют оптимальные места расположения БС с учетом рельефа местности.

Частотно-территориальное планирование сети

Для обеспечения связью нужного числа пользователей необходимо иметь достаточное количество каналов связи. При определенном количестве каналов можно обслужить определенное количество абонентов, хотя, разумеется, в некоторых случаях абоненты в ответ на вызов будут получать отказ [5]. Транкинговая система связи является системой массового обслуживания – со случайным потоком вызовов, случайной их продолжительностью и конечным числом каналов обслуживания. В качестве первой математически корректной работы по теории массового обслуживания называют работу Эрланга «Теория вероятностей и телефонные разговоры», опубликованную в 1908 г. [6]. Для определения среднего трафика A , выражаемого в эрлангах, необходимо знать среднюю продолжительность обслуживания одного вызова T и среднюю частоту поступления вызовов λ в единицу времени. Для удобства рекомендуется использовать одну единицу времени для измерения T и λ . Формула среднего трафика:

$$A = T * \lambda \text{ [Эрл]} \quad (3)$$

Вызовы в системе связи могут сбрасываться (модель Эрланга В, система с отказами), становиться в очередь и ждать освобождения канала неопределенно долгое время (модель Эрланга С, система с ожиданиями), становиться в очередь и ждать освобождения канала в течение ограниченного интервала времени (модель Эрланга А). При оценках емкости систем подвижной связи обычно используется модель Эрланга В и модель Эрланга С, которые дают достаточно близкие результаты при малых вероятностях отказа $P_B=0,002\dots 0,05$.

Частота поступления вызовов, являющаяся случайно величиной, за время t :

$$P_k = \frac{(\lambda * t)^k}{k!} * e^{-\lambda * t}. \quad (4)$$

При этом среднее число вызовов на интервале t равно:

$$k = \lambda * t. \quad (5)$$

Продолжительность обслуживания одного вызова – непрерывная случайная величина τ , которая описывается экспоненциальным распределением:

$$W(\tau) = \frac{1}{T} * e^{\frac{-\tau}{T}}. \quad (6)$$

В системе с отказами вероятность отказа определяется:

$$P_B = \frac{A^N / N!}{\sum_{n=0}^N (A^n / n!)}, \quad (7)$$

где N – количество каналов, A – трафик.

Формула 7 достаточно громоздка и на практике пользуются ее представлением в виде таблицы. По сокращенной таблице 1 можно определить требуемое количество каналов связи для обработки нагрузки трафика.

Таблица 1. Модель Эрланга В

Число каналов	Вероятность отказа P _B				
	0,002	0,01	0,02	0,05	0,1
1	0,02	0,01	0,02	0,05	0,11
2	0,07	0,15	0,22	0,38	0,6
5	0,9	1,36	1,66	2,22	2,88
10	3,4	4,5	5,1	6,2	7,5
20	10,1	12	13,2	15,2	17,6
30	17,6	20,3	21,9	24,8	28,1
40	25,6	29,01	31	34,6	38,79
50	33,9	37,9	40,26	44,53	49,56
60	42,4	46,95	49,64	54,57	60,4
70	51	56,11	59,13	64,67	71,29
80	59,7	65,4	68,7	74,8	82,2

В данной статье описан разработанный метод автоматического размещения БС, позволяющий снизить трудоемкость и сократить процесс проектирования ТСС (рисунок 3). На первом этапе метода на основе разработанного алгоритма определяются координаты места установки БС и происходит расчет зоны обслуживания БС статистическим методом на основе модифицированной модели Хата [7]. Далее происходит уточненный расчет зоны обслуживания с учетом дополнительных потерь на дифракцию, тропосферное рассеивание и потерь в атмосферном волноводе [8]. На третьем этапе выводится поправочный коэффициент и определяется зона гарантированного обслуживания БС.

Для проектирования ТСС разработан веб-сайт на языке программирования Python. В разработанном программном обеспечении (ПО) пользователю необходимо задать сокращенный и расширенный набор параметров. В сокращенном наборе указывается количество абонентов, которых необходимо обеспечить связью, среднее количество вызовов каждого абонента в час, средняя продолжительность вызовов, среда распространения сигнала, частота передачи и высоты подвеса антенн БС и портативной станции (ПС).

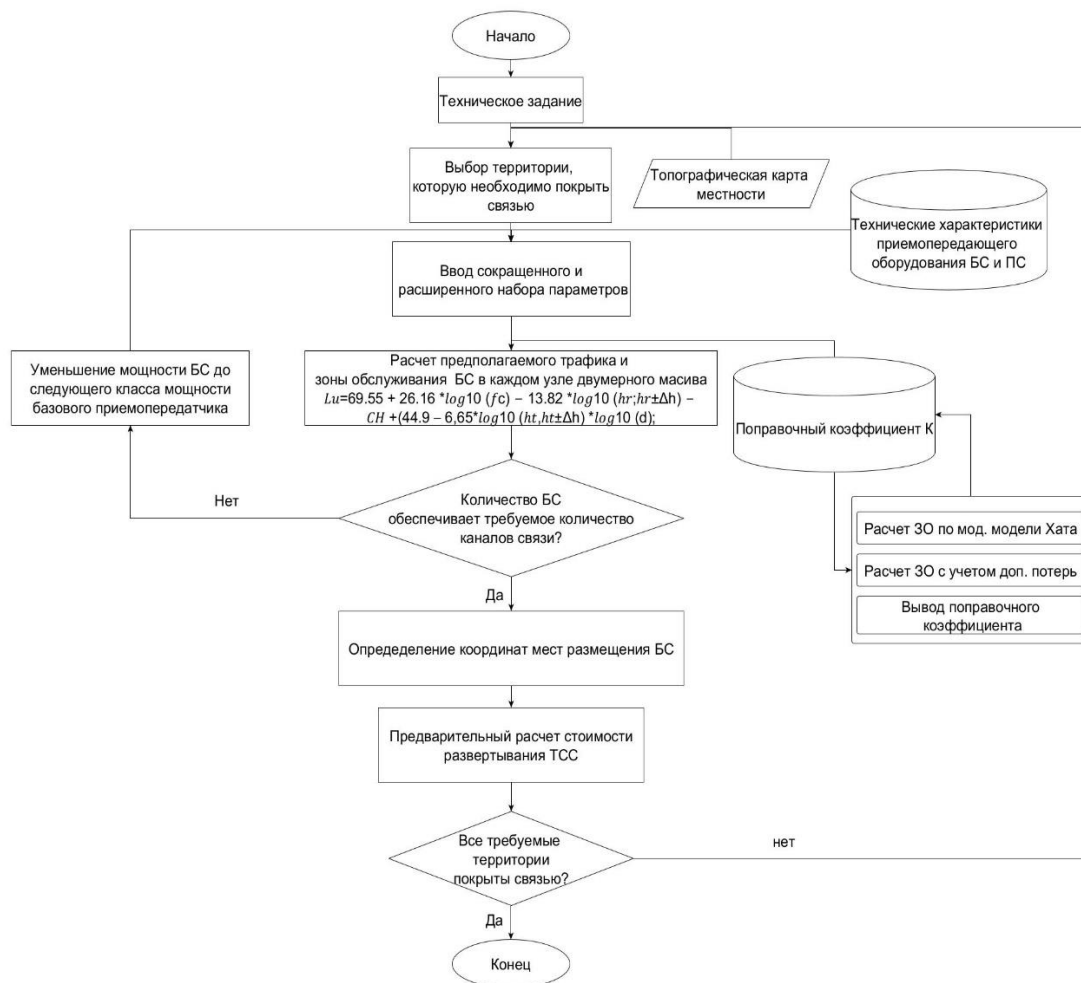


Рисунок 3. Метода автоматического размещения

Вышеперечисленные параметры являются обязательными. В расширенном наборе параметров задаются технические характеристики приемопередающего оборудования БС и ПС: мощности передатчиков, чувствительности приемников, коэффициенты усиления антенн, коэффициенты потерь в фидерах. Расширенный набор параметров можно заполнить «по умолчанию», тогда автоматически будут использоваться значения, занесенные в код разработчиками.

Рисунок 4. Интерфейс ПО

Проектирование транкинговой системы связи

Рассмотрим реализацию представленного метода в ПО на конкретном примере. Допустим, необходимо спроектировать ТСС в предполагаемом месте добычи нефти недалеко от города Ухта – Родине первой российской нефти. Известно общее количество абонентов – 130, средняя продолжительность вызовов – 15 сек или $1/240$ ч, среднее количество вызовов – 120 выз/час, высота подвеса антенны БС – 50 м, высота подвеса антенны ПС – 1,5 м. Требуется определить необходимое количество базовых станций (четырёхканальных) и координаты мест их размещения. В таблице 2 представлены технические характеристики приемопередающего оборудования БС и ПС.

Таблица 2. Технические характеристики приемопередающего оборудования

Параметры	БС	ПС
Мощность передатчика, дБм	44	30
Коэффициент потерь в фидере, дБм	-6	0
Коэффициент усиления антенны, дБм	8	-6
Чувствительность приемника, дБм	-106	-103

Определение необходимого количества каналов начинается с расчета трафика на одного абонента:

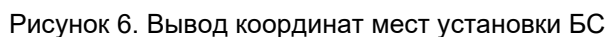
$$A = T * \lambda = \frac{1}{240} * 120 = 0,5 \text{ Эрл.} \quad (8)$$

Средний трафик на всех абонентов:

$$A_{\text{ср}} = A * 130 = 65 \text{ Эрл.} \quad (9)$$

Если требуется обеспечить вероятность отказа 0,01, то необходимое количество каналов – 80. Далее всё зависит от канальности используемых БС и способа использования радиочастот (TDMA, FDMA, CDMA). Предположим, что используется базовая станция с временным разделением каналов связи TDMA, количество несущих – 4. Такая базовая станция способна обеспечить абонентов 32 логическими каналами одновременного использования. Таким образом минимальное количество базовых станций, покрывающих заданную территорию и обеспечивающих требуемое количество каналов – 3.

В программном обеспечении пользователь задает вышеперечисленные наборы параметров, на топографической карте выделяет территорию, которую необходимо покрыть связью. Если внутри заданной территории есть места, установка БС в которых невозможна, например, водные преграды, закрытые территории, то необходимо выделить специальным инструментом данные территории. После чего можно запустить расчет.



№ БС	Координаты
1	63.448719, 54.408681
2	63.424064, 54.428701
3	63.441981, 54.348621

На полузакрытом интервале, когда линия прямой видимости не пересекает рельеф местности и местных предметов, а зона Френеля пересекает, на распространение сигналов оказывает влияние подстилающая поверхность. На закрытом интервале линия прямой видимости пересекает рельеф местности, что может привести к существенному ослаблению сигналов на входе приемника и нарушении устойчивости на радиолинии.

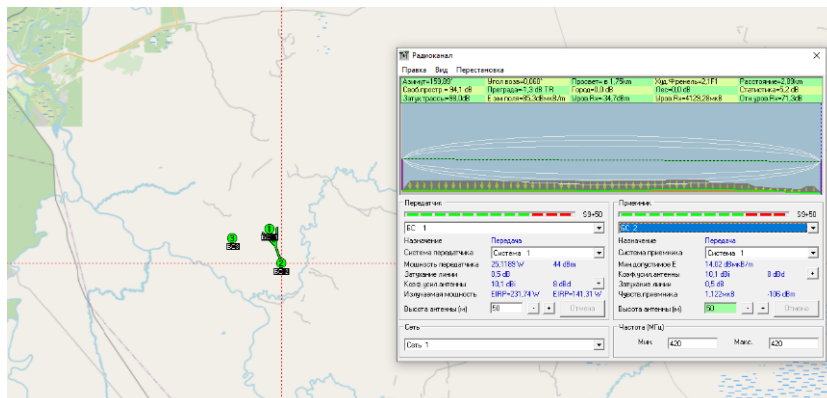


Рисунок 7. Профиль радиолинии BC1-BC3

Заключение

В результате работы предложен метод автоматического размещения БС внутри заданной территории, который позволяет снизить трудоемкость проектирования ТСС. Количество БС зависит от минимального количества каналов, необходимых для организации связи между заданным количеством абонентов. Разработано программное обеспечение, реализующее проектирование ТСС. Приведен пример проектирования ТСС в ПО. Представлены графики зависимости времени расчета координат мест размещения БС от площади территории, которую необходимо покрыть связью. На рисунке 8 представлена зависимость времени проведения расчета от площади территории, которую необходимо покрыть связью при высотах антенн $h_{BC}=50\text{м}$ и $h_{PC}=1,5\text{м}$.



Рисунок 8. Зависимость времени расчета размещения БС от площади территории при высотах антенн $h_{BC}=50\text{м}$ и $h_{PC}=1,5\text{м}$

Исходя из полученных значений, можно сделать вывод, что координаты мест размещения БС на территории, располагающейся в сельской местности, площадью 400 км² рассчитываются за 6,64 сек.

Уменьшив высоту подвеса антенны БС до 30м и повторив расчет получены данные, представленные на рисунке 9.

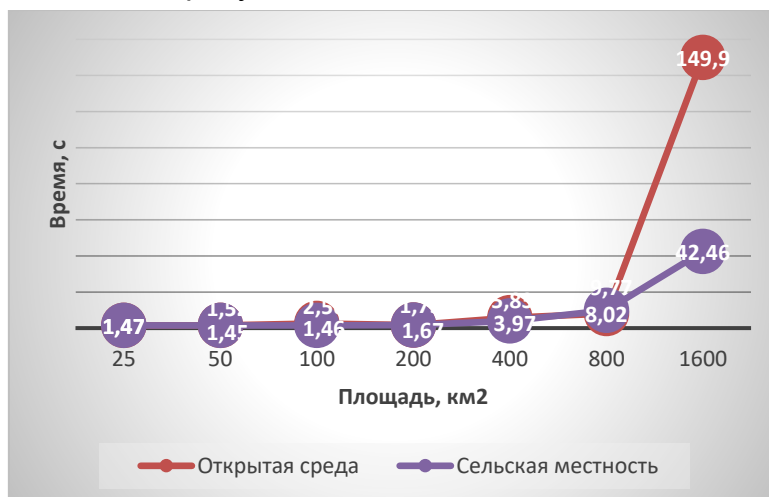


Рисунок 9. Зависимость времени расчета размещения БС от площади территории при высотах антенн $h_{БС}=30\text{м}$ и $h_{ПС}=1,5\text{м}$

Для получения координат мест размещения БС на территории того же размера потребовалось 3,97 сек. Увеличение скорости расчета связано с тем, что радиус зоны обслуживания БС при высоте подвеса антенны 50 м больше, чем при высоте подвеса антенны 30 м, в связи с чем проводятся дополнительные расчеты для определения максимального радиуса зоны обслуживания БС.

Список литературы

1. Сакалема Д. Ж. Подвижная радиосвязь. Москва: Горячая линия - Телеком, 2012. 512 с.
2. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи / перевод с польского Н. И. Рудинского. Москва: Горячая линия - Телеком, 2006. 536 с.
3. Садамовский А. С. Приёмо-передающие радиоустройства и системы связи: учебное пособие. Ульяновск: УЛГТУ, 2007. 238 с.
4. Бабков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование: учебное пособие / 2-е изд., испр. Москва: Горячая линия - Телеком, 2007. 224 с.
5. Ратынский М. В. Основы сотовой связи. Москва: Радио и связь, 1998. 248 с.
6. Майзер Х., Эйджин Н., Тролл Р. [и др.] Исследование операций: в 2-х т. / под редакцией Дж. Моудера, С. Элмаграби; перевод с английского И. М. Макарова, И. М. Бескровного. Москва: Мир, 1981. Т. 1: Методические основы и математические методы. 712 с.
7. Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А. Алгоритм расчета зоны обслуживания базовой станции транкинговой системы связи // Научные технологии. 2023. 4. 12-20. DOI: 10.18127/j19998465-202304-0

8. Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб «из пункта в зону» в диапазонах УВЧ и ОВЧ: рекомендация МСЭ-R P.1812-4. Женева: ITU, 2015. 34 с. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1812-4-201507-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 21.12.2023).

References

1. Sakalema D. J. Mobile radio communication. Moscow: Hotline - Telecom, 2012. 512 p.
2. Wesolovsky K. Mobile radio communication systems / translated from Polish by N. I. Rudinsky. Moscow: Hotline - Telecom, 2006. 536 p.
3. Sadomovsky A. S. Receiving and transmitting radio devices and communication systems: a textbook. Ulyanovsk: ULSTU, 2007. 238 p.
4. Babkov V. Yu., Voznyuk M. A., Mikhailov P. A. Mobile communication networks. Frequency-territorial planning: a textbook / 2nd ed., ispr. Moscow: Hotline - Telecom, 2007. 224 p.
5. Ratynsky M. V. Fundamentals of cellular communication. Moscow: Radio and Communications, 1998. 248 p.
6. Maizer H., Agin N., Troll R. [et al.] Operations research: in 2 volumes / edited by J. Mouder, S. Elmagrabi; translated from English by I. M. Makarov, I. M. Beskrovny. Moscow: Mir, 1981. Vol. 1: Methodological foundations and mathematical methods. 712 p.
7. Ivanov V. S., Uvaisov S. U., Ivanov I. A. Algorithm for calculating the service area of the base station of the trunking communication system // High-tech technologies. 2023. 4. 12-20. DOI: 10.18127/j19998465-202304-02
8. A method for predicting signal propagation on a specific route for ground services "from point to zone" in the UHF and VHF bands: recommendation ITU-R P.1812-4. Geneva: ITU, 2015. 34 p. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1812-4-201507-I !!PDF-R.pdf (accessed: 21.12.2023).

Информация об авторах

Иванов Вячеслав Сергеевич – аспирант, МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9827-1690, ivanov_vs@mirea.ru

Увайсов Сайгид Увайсович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-1943-6819, uvajsov@mirea.ru

Иванов Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент, МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-1266-0228, ivanov_ia@mirea.ru