

Научная статья

УДК 654.165

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34



## Алгоритм автоматического размещения базовых станций транкинговых систем связи

Вячеслав Сергеевич Иванов, ✉ ivanovmirea1@yandex.ru

Увайсов Сайгид Увайсович, uvajsov@mirea.ru

Иванов Илья Александрович, ivanov\_ia@mirea.ru

МИРЭА – Российский технологический университет,  
Москва, 119454, Российская Федерация

**Аннотация:** Для повышения эффективности процесса проектирования транкинговых систем связи предлагается оригинальный алгоритм автоматического размещения базовых станций с учетом реальных условий распространения радиоволн. Проведенный анализ показал, что существующие методы позволяют размещать их вручную, с заданным шагом или автоматически, но без учета распространения радиоволн, что приводит к некачественному покрытию требуемой территории связью. Целью работы является снижение трудоемкости проектирования транкинговой системы связи, гарантированно покрывающей заданную зону обслуживания. Предлагается рассчитывать зоны обслуживания базовых станций с помощью статистической модели, а также с учетом дополнительных потерь на дифракцию на трассе распространения радиосигнала. Решение задачи автоматического размещения основано на использовании предложенной модифицированной модели Хата, учитывающей рельеф местности в местах нахождения базовой и портативной станций, а также на международной рекомендации по прогнозированию распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб. При автоматическом размещении выполняется критерий оптимальности, заключающийся в размещении минимального числа базовых станций, необходимых для покрытия требуемой территории. Элементом новизны представленного решения является то, что на первом этапе расчета определяется зона обслуживания базовой станции статистическим методом, на втором происходит уточненный расчет зоны обслуживания с учетом реальных условий распространения радиоволн на месте привязки, а на третьем – определяется зона гарантированного обслуживания абонентов. Использование предлагаемого алгоритма позволяет снизить трудоемкость процесса проектирования системы и определить достаточное число базовых станций, необходимых для покрытия заданной территории. Для применения алгоритма в реальной практике разработано соответствующее программное обеспечение. В подтверждение эффективности в работе приведены сравнительные расчеты затрат времени на проектирование транкинговой системы связи с применением разработанного программного обеспечения и широко применяемой программы RadioMobile.

**Ключевые слова:** транкинговые системы связи, зоны обслуживания, базовые станции, проектирование сетей, автоматическое размещение

**Ссылка для цитирования:** Иванов В.С., Увайсов С.У., Иванов И.А. Алгоритм автоматического размещения базовых станций транкинговых систем связи // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 5. С. 25–34. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34

## Automatic Placement Algorithm of Base Stations Trunking Communication Systems

Vyacheslav Ivanov, ✉ ivanovmirea1@yandex.ru

Saigid Uvajsov, uvajsov@mirea.ru

Ilya Ivanov, ivanov\_ia@mirea.ru

MIREA – Russian Technological University,  
Moscow, 119454, Russian Federation

**Abstract:** *to increase the efficiency of the trunking communication systems design process, an original algorithm for the automatic placement of base stations is proposed, taking into account the real conditions of radio wave propagation. The analysis showed that the existing methods allow you to place base stations manually, with a given step or automatically, but without taking into account the propagation of radio waves, which leads to poor-quality coverage of the required area with communication. The aim of the work is to reduce the complexity of designing a trunking communication system that is guaranteed to cover a given service area. It is proposed to calculate the service areas of base stations using a statistical model, as well as taking into account additional diffraction losses on the radio signal propagation path. The solution to the problem of automatic placement of base stations is based on the use of the proposed modified Hut model, which takes into account the terrain at the locations of the base and portable stations, as well as on the international recommendation for predicting signal propagation on a specific route for ground services. With automatic placement, the optimality criterion is fulfilled, which consists in placing the minimum number of base stations necessary to cover the required territory. An element of the novelty of the presented solution is that at the first stage of the calculation, the service area of the base station is determined by the statistical method, at the second stage, an updated calculation of the service area takes place taking into account the actual conditions of radio wave propagation at the binding site, and at the third stage, the zone of guaranteed customer service is determined. The use of the proposed algorithm makes it possible to reduce the complexity of the system design process and determine the sufficient number of base stations needed to cover a given area with communication. Appropriate software has been developed to apply the algorithm in real practice. To confirm the effectiveness of the algorithm, the paper presents comparative calculations of the time spent on designing a trunking communication system using the developed software and using the widely used RadioMobile program.*

**Keywords:** *trunking communication systems, service areas, base stations, network design, automatic placement*

**For citation:** Ivanov V., Uvajsov S., Ivanov I. Automatic Placement Algorithm of Base Stations Trunking Communication Systems. *Proceedings of Telecommun. Unive.* 2023;9(5):25–34. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34

## Введение

Транкинговые системы (ТС) – это один из видов систем подвижной связи наравне с сотовыми системами, системами персонального радиовызова и спутниковой связью. Особенность ТС заключается в автоматическом распределении ограниченного количества каналов между абонентами. Если сравнивать ТС с конвенциональными системами, то в последних существует проблема неравномерного использования каналов связи. За каждым каналом связи закрепляются определенные абоненты, которые находятся в ожидании, если канал занят, при свободных соседних каналах.

Отсюда появилась вышеуказанная проблема, которая в ТС не наблюдается. На данный момент территория нашей страны не покрыта связью полностью, т.к. операторы мобильной связи не устанавливают базовые станции (БС) в малонаселенных местах из-за низкой прибыли. Поэтому ТС используют крупные компании, занимающиеся добычей полезных ископаемых там, где нет мобильной связи. За счет высокой скорости установления соединения ТС используют службы спасения, а также службы безопасности, как государственные, так и коммерческие [1].

Расчет зон обслуживания БС производится с использованием статистических и детерминированных методов. В статистических методах моделируется окружность, на границах которой считается,

что обеспечивается качественная связь. Известно большое количество статистических моделей, среди которых модель Окумуры, модель Хата и др., с помощью которых можно рассчитать зону обслуживания БС. В детерминированных учитываются принципы теории распространения радиоволн и зона обслуживания имеет сложную геометрическую форму [2]. На рисунке 1 окружностью показана зона обслуживания БС, рассчитанная статистическим методом. На этом же рисунке в форме «амебы» представлена зона обслуживания БС, рассчитанная с учетом реальных условий распространения радиоволн.



Рис. 1. Зоны обслуживания БС

Fig. 1. BS Service Areas

Проектирование ТС связи ведется в различных программах, как отечественных (RadioPlanner), так и зарубежных (RadioMobile), которые позволяют с высокой точностью рассчитать зоны обслуживания БС. В данных программах пользователю необходимо указать технические характеристики приемопередающего оборудования, антенн и места установки БС. Если перед инженером-проектировщиком стоит задача минимизировать количество БС с целью сокращения финансовых затрат на развертывание ТС, то ему необходимо потратить определенное количество времени на подбор оптимальных мест установки БС.

В работе Л.Л. Егорова и соавторов [3] предложен алгоритм, который на основе метода наименьших квадратов осуществляет автоматический просчет кластерной системы БС сотовой связи. Данный алгоритм позволяет получить для проектировщика различные варианты решения для кластера различной размерности. При этом предполагается, что места расположений БС известны, и задача сводится к геометрическому варианту алгоритма расчета зон покрытия БС.

Работа Р.Р. Мухаджинова [4] посвящена применению генетического алгоритма в размещении БС, где на первом этапе происходит поиск места расположения, при котором в зоне обслуживания площадь теневых зон будет минимальная. Далее производится поиск теневых зон, обусловленных интерференцией основного сигнала с отраженными сигналами от подстилающей поверхности и объектов застройки. Затем проводится поиск оптимального расположения дополнительных ретрансляторов, обеспечивающих приемлемый уровень сигнала приемопередающих станций в теневых зонах.

В работе [5] К.А. Павловской решается задача размещения минимального количества БС на заданной территории с помощью генетического алгоритма. Сначала определяются различные варианты расстановки БС, далее производится выборка случайного числа БС1 и БС2 – наиболее «сильных хромосом» из общего количества. Затем начинается главный цикл, где происходит оценка родительских хромосом, с учетом расстояния радиуса  $R1$  и  $R2$  от каждой БС до каждого абонента.

В работе А.А. Мухтарова и О.Ю. Першина [6] предложены алгоритмы построения графов информационных потоков, позволившие формализовать задачи в виде соответствующих моделей математического программирования. Задача оптимального размещения БС решается с целью минимизации их общей стоимости, путем перебора возможных мест расположения.

В работе Р.Р. Аминовой [7] описан разработанный ею алгоритм определения расположения БС, который проходит по точкам координатной сет-

ки, наложенной на обслуживаемую территорию. Алгоритм начинает перебор точек и по итогам опроса всех точек размещает окружность в «наилучшей» точке. При этом все точки, которые находятся внутри окружности, не учитываются при дальнейших расчетах. Далее алгоритм повторяет свою работу до тех пор, пока не будут покрыты все точки.

Работа Е.С. Скакова и В.Н. Малыш [8] посвящена разработке модифицированных алгоритмов вероятностного поиска с запретами и мультистарта. Алгоритм мультистарта позволяет получить локальные решения, которые являются наилучшими на данный момент, что впоследствии приведет к оптимальному решению глобальной задачи.

Анализ данных работ показал, что автоматическое размещение БС с учетом реальных условий распространения радиоволн является актуальной задачей, позволяющей снизить трудоемкость проектирования ТС, гарантированно покрывающих заданную зону обслуживания.

#### Постановка задачи

Для расчета зон обслуживания БС по статистическим методам необходимо определить технические характеристики приемопередающего оборудования, антенн, а также статистическую модель для расчета. Алгоритм, представленный в данной работе, основан на модифицированной модели Хата, которая учитывает рельеф местности в местах нахождения базовой и портативной станций. Также алгоритм учитывает поправочный коэффициент на дополнительные потери, связанные с реальными условиями распространения радиоволн.

Задача автоматического размещения БС ТС может быть представлена в следующем виде:

- расчет допустимого уровня потерь на трассе распространения радиосигнала [9];
- расчет предварительного радиуса зоны обслуживания БС по модифицированной модели Хата;
- уточненный расчет зоны обслуживания БС с учетом потерь на дифракцию;
- вывод поправочного коэффициента радиуса зоны обслуживания, обеспечивающего качественную связь в любой точке нахождения ПС.

#### Алгоритм автоматического размещения базовых станций транкинговых систем связи

В статистической модели Хата не учитывается рельеф местности, что в реальности может привести к отсутствию сигнала в различных местах нахождения ПС при расчете зоны обслуживания. Для предварительного расчета радиуса зоны обслуживания предлагается модифицировать модель Хата и учитывать разницу в высотах над уровнем моря  $\Delta h$  в местах нахождения БС и ПС [10]. Напри-

мер, если БС находится в точке с высотой 212 м над уровнем моря, а ПС находится в точке с высотой 208 м над уровнем моря, то разницу в 4 м прибавляем к высоте подвеса антенны БС. Тогда модель Хата для городской местности примет вид (1), где:  $L_U$  – уровень потерь на трассе распространения радиосигнала, дБ;  $f$  – частота передачи сигнала,

МГц;  $h_{BS}$  – высота подвеса антенны БС, м;  $h_{PS}$  – высота подвеса антенны ПС, м;  $\Delta h$  – разница в высотах над уровнем моря в местах нахождения БС и ПС, м;  $d$  – расстояние между объектами, км. Модель Хата для пригородной местности ( $L_{SU}$ ) и открытых сред ( $L_0$ ) представлена в виде (2) и (3) соответственно [11].

$$L_U = 69,55 + 26,16 \times \log_{10} f - 13,82 \times \log_{10}(h_{BS}; h_{BS} \pm \Delta h) - [0,8 + (1,1 \times \log_{10} f - 0,7) \times (h_{PS}; h_{PS} \pm \Delta h)] + [44,9 - 6,55 \times \log_{10}(h_{BS}; h_{BS} \pm \Delta h)] \times \log_{10} d \quad [\text{дБ}], \quad (1)$$

$$L_{SU} = L_U - 2 \times \left( \log_{10} \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4 \quad [\text{дБ}], \quad (2)$$

$$L_0 = L_U - 4,78 \times (\log_{10} f)^2 + 18,33 \times \log_{10} f - 40,94 \quad [\text{дБ}]. \quad (3)$$

Возможна и обратная ситуация, когда ПС находится в точке с большей высотой над уровнем моря. В таком случае разницу предлагается суммировать с высотой подвеса антенны ПС, либо вычитать из высоты подвеса антенны БС. Ограничением для предложенной модификации являются допустимые диапазоны значений высот подвеса антенн БС и ПС, за которые выходить нельзя. Для БС это значение от 30 до 100 м, для ПС – от 1 до 10 м. Поэтому данный способ не подходит для применения в горной местности, где слишком большие перепады высот.

После получения предварительного радиуса зоны обслуживания БС необходимо рассчитать дополнительные потери на дифракцию, расчет которых проводится по рекомендации Международного Союза Электросвязи [12]. Потери за счет дифракции вычисляются путем сочетания метода, основанного на конструкции Буллингтона, и метода расчета дифракции над сферической Землей. Этот метод обеспечивает оценку дифракционных потерь для трасс всех типов, в том числе, трасс над морем; над территорией, удаленной от моря; или над побережьем, независимо от того, является ли трасса гладкой или пересеченной, трассой прямой видимости или загоризонтной трассой. Сначала определяется промежуточная точка профиля с наибольшим наклоном линии от передатчика к точке, м/км:

$$S_{tim} = \max \left[ \frac{g_i + 500 \times C_e \times d_i \times (d - d_i) - h_{tc}}{d_i} \right], \quad (4)$$

где  $g_i$  – суммарная высота над уровнем моря и высота препятствия в  $i$ -й точке, м;  $d_i$  – расстояние от передатчика до  $i$ -й точки профиля, км;  $d$  – длина трассы, км;  $h_1$  – суммарная высота антенны и высота над уровнем моря в месте нахождения передатчика, м;  $h_{tc} = \max(g; h_1)$ , (м);  $C_e$  – эффективная кривизна Земли, км<sup>-1</sup>.

Далее рассчитывается наклон линии от передатчика к приемнику, предполагая трассу прямой видимости:

$$S_{tr} = \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \quad [\text{м/км}], \quad (5)$$

где  $h_n$  – суммарная высота антенны и высота над уровнем моря в месте нахождения приемника, м;  $h_{rc} = \max(g; h_n)$ , м.

Затем в зависимости от того, является ли дифракционная трасса трассой прямой видимости или загоризонтной трассой, определяются потери за счет дифракции на остром краю для точки Буллингтона:

$$L_{uc} = J(v_b) \quad [\text{дБ}], \quad (6)$$

где функция безразмерного параметра  $v$  определяется выражением (7). Потери за счет дифракции Буллингтона на трассе определяются выражением (8). Затем рассчитываются потери за счет дифракции над сферической Землей, рассчитав наименьшую высоту просвета между трассой над криволинейной Землей и лучом между антеннами – выражение (9), где:  $a_p$  – эффективный радиус Земли, км.

$$J(v) = 6,9 + 20 \times \log_{10}(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1), \quad (7)$$

$$L_{bull} = L_{uc} + (1 - e^{-\frac{L_{uc}}{6}}) \times (10 + 0,02d) \quad [\text{дБ}], \quad (8)$$

$$h_{se} = \frac{(h_{tesph} - 500 \times \frac{d_{se1}^2}{a_p}) \times d_{se2} + (h_{resph} - 500 \times \frac{d_{se2}^2}{a_p}) \times d_{se1}}{d} \quad [\text{м}]. \quad (9)$$

И требуемый просвет для нулевых потерь за счет дифракции:

$$h_{req} = 17,456 \times \sqrt{\frac{d_{se1} \times d_{se2} \times \lambda}{d}} \text{ [м]}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м.

После чего рассчитываются потери за счет дифракции над сферической Землей методом интерполяции:

$$L_{dsp} = \left(1 - \frac{h_{se}}{h_{req}}\right) \times L_{dft} \text{ [дБ]}, \quad (11)$$

где  $L_{dft}$  – потери за счет дифракции над сферической Землей, определяемые первым членом, дБ.

Потери за счет дифракции для общей трассы теперь определяются выражением:

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsp} - L_{bulls}, 0\} \text{ [дБ]}. \quad (12)$$

Получим потери за счет дифракции  $L_{dp}$ , не превышаемые в течение  $p$  % времени, используя выражение:

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50}) \times F_i \text{ [дБ]}, \quad (13)$$

где  $L_{d50} = L_d = L_{d\beta}$ , при проценте времени среднего года, в течение которого превышает рассчитанный уровень сигнала  $p = 50$  %, дБ;  $F_i$  – коэффициент интерполяции.

Средние основные потери передачи, обусловленные дифракцией  $L_{bd50}$ , определяются выражением:

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \text{ [дБ]}, \quad (14)$$

где основные потери в свободном пространстве определяются выражением:

$$L_{bfs} = 92,45 + 20 \times \log_{10} f + 20 \times \log_{10} d \text{ [дБ]}. \quad (15)$$

Основные потери передачи, обусловленные дифракцией, которые не превышаются в течение  $p$  % времени (процент времени среднего года, в течение которого превышает рассчитанный уровень сигнала), определяются выражением:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \text{ [дБ]}, \quad (16)$$

где основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение  $p$  % времени:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \text{ [дБ]}. \quad (17)$$

Рассчитанные потери необходимо учитывать при расчете допустимого уровня потерь на трассе распространения радиосигнала. Исходя из полученной зоны обслуживания, можно определить гарантированную зону обслуживания в виде вписанной окружности, на границах которой устанавливается качественная связь (рисунок 2).

Далее для различных территорий выводится поправочный коэффициент, который затем учитывается при расчетах зон обслуживания, оставшихся БС многозоновой ТС. Формула выражения поправочного коэффициента такова:

$$K = \frac{(d_1 - d_2)}{d_1} \times 100 \%, \quad (18)$$

где  $d_1$  – диаметр предварительной зоны обслуживания, км;  $d_2$  – диаметр гарантированной зоны обслуживания, км.

Поправочный коэффициент рассчитывается заранее для всех территорий страны и при расчетах вычитается из предварительной зоны обслуживания, рассчитанной статистическим методом. Алгоритм, представленный в данной статье, хорошо подходит для территорий, располагающихся на Восточно-Европейской равнине, Западно-Сибирской равнине, а также в Арктической зоне. Применение алгоритма в городской местности малоэффективно из-за наличия большого количества объектов, на которых установка БС запрещена.



Рис. 2. Гарантированная зона обслуживания БС

Fig. 2. Guaranteed BS Service Area

Особенностью алгоритма является выполнение критерия минимизации, который заключается в минимальном количестве БС, необходимых для покрытия заданной территории связью.

На рисунке 3 представлен алгоритм автоматического размещения БС. На первом этапе происходит выбор территории на топографической карте, которую необходимо покрыть связью. Так как территория имеет сложную геометрическую форму, то необходимо определить минимальные и максимальные координаты по осям  $x$  и  $y$  и получить прямоугольный двумерный массив с определенной длиной ячейки (рисунок 4). Чем меньше ячейка, тем лучше будет результат, но тем больше будет и время расчета.

Далее происходит перебор всех точек, находящихся внутри выбранной территории. Опрошенная точка перемещается в базу посещенных. В конце каждой итерации происходит опрос на наличие непосещенных точек. Если таких точек не

осталось, то алгоритм завершает свою работу и выдает результат. Если остались непосещенные точки – алгоритм переходит к ним.

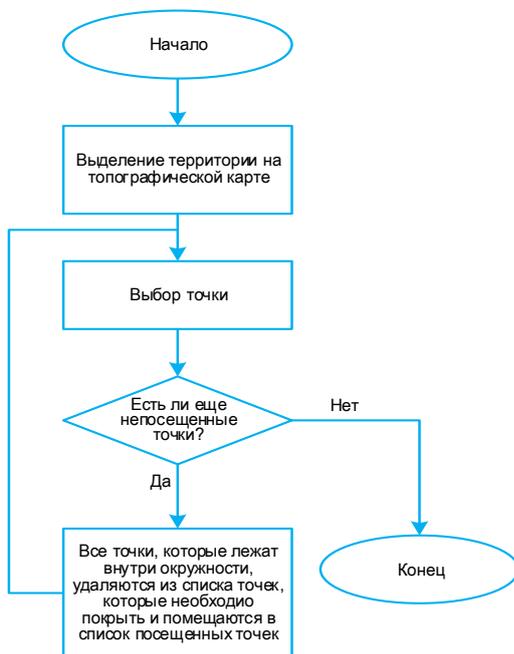


Рис. 3. Алгоритм автоматического размещения БС  
Fig. 3. Algorithm for Automatic Placement of BS

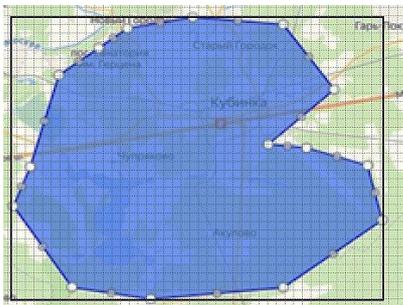


Рис. 4. Территория, которую необходимо покрыть связью  
Fig. 4. The Territory that Needs to be Covered by the Connection

Выбор точки осуществляется также на основе алгоритма (рисунок 5). Определяются координаты точки  $(x; y)$ . Далее происходит опрос: является ли данная точка непосещенной? Если она таковой является, то для нее определяется эмпирически выведенная переменная  $s$ , которая зависит от радиуса зоны обслуживания БС ( $r$ ) и количества точек ( $n$ ):

$$s = r^3 + n^5, \quad (19)$$

где  $r$  и  $n$  покрываются радиусом данной зоны обслуживания, но не покрыты другими радиусами.

Радиус зоны обслуживания определяется на основе расчетов по модифицированной модели Хата. Далее значение переменной  $s$  сравнивается с наилучшим значением этой переменной. Если это первая итерация, то наилучшее значение – 0. После чего запоминаются координаты данной точки, и алгоритм переходит к следующей точке. Так проис-

ходит до тех пор, пока не будут посещены все точки. После чего выводится точка, переменная  $s$  которой имеет наибольшее значение, и в этой точке строится окружность с рассчитанным ранее радиусом (рисунок 6). Далее происходит все то же самое, но в переборе уже не участвуют точки, которые находятся внутри окружности.



Рис. 5. Алгоритм выбора точки  
Fig. 5. Point Selection Algorithm

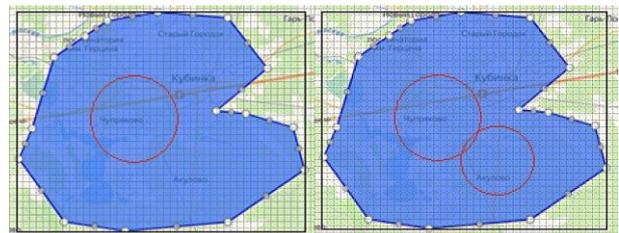


Рис. 6. Размещение БС в наилучших точках  
Fig. 6. Placing the BS in the Best Points

### Пример применения алгоритма

Рассмотрим работу алгоритма на примере размещения БС внутри территории, которую необходимо покрыть связью. Алгоритм применяется в веб-сайте, который на данный момент не доступен общему пользованию и находится в режиме тестирования. Для сравнения, полученные координаты внесем в программу RadioMobile для проверки полученных расчетов.

Пользователь на топографической карте местности выделяет территорию, которую необходимо покрыть связью, а также участки, в которых установка БС невозможна (водные препятствия, закрытые территории). Далее задается обязательный сокращенный набор параметров: среда распространения радиосигнала, частота передачи, высоты подвеса антенн.

Также существует расширенный набор параметров, а именно, технические характеристики приемопередающего оборудования: мощность передатчика, чувствительность приемника, коэффициенты усиления антенн, коэффициенты потерь в фидере. Если пользователь не обладает такой информацией, то он может оставить значение по умолчанию. После пользователю остается выбрать один из предложенных поправочных коэффициентов, который применяется для данной местности.

Для примера рассмотрим покрытие транкинговой связью территории возле п. Новый Бор Ямало-Ненецкого АО, где происходит нефтегазодобыча. Территории вокруг поселка полностью не покрыты мобильной связью операторов «Билайн» и «МТС», в связи с чем предприятию необходимо развернуть собственную связь (рисунок 7).

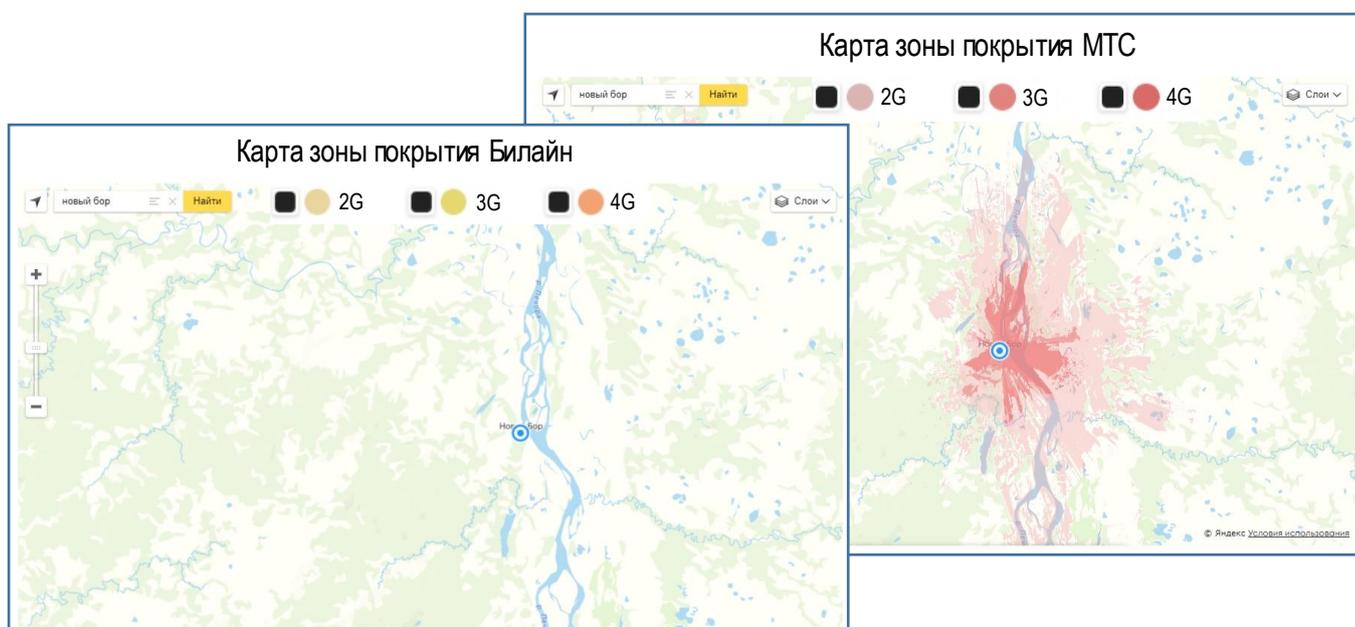


Рис. 7. Карта покрытия сотовых операторов «Билайн» (слева) и «МТС» (справа)

Fig. 7. Coverage Map of Beeline (on the Left) and MTS (on the Right) Mobile Operators

Синим цветом на карте выбрана территория, которую необходимо покрыть связью (рисунок 8). Алгоритм размещает 2 БС внутри замкнутого контура с выводом координат мест установки. Радиусы зон обслуживания БС составляют:  $R_1 = 10000$  м,  $R_2 = 10250$  м. Затем полученные координаты БС1 (66.368312 С.Ш.; 51.754582 В.Д.) и БС2 (66.482650 С.Ш.; 51.659751 В.Д.) указываем в программе RadioMobile, задав при этом тот же самый набор параметров. В результате получаем те же самые радиусы зон гарантированного обслуживания, в которых нет зон с невозможностью приема. На рисунке 9 представлена зона обслуживания БС1, а на рисунке 10 – БС1 и БС2.

Рисунок 11 демонстрирует количество времени, затраченное на проектирование ТС связи в разработанном программном обеспечении (ПО) на осно-

ве предложенного алгоритма и проектирование в программе RadioMobile. Исходными данными, которые необходимо ввести, являются: мощность передатчика БС – 44дБм; мощность передатчика ПС – 30 дБм; чувствительность приемника БС – 106 дБм; чувствительность приемника ПС – 103 дБм; коэффициент потерь в фидере антенны БС – 6 дБм; коэффициент потерь в фидере антенны ПС – 0 дБм; коэффициент усиления антенны БС – 8 дБм; коэффициент усиления антенны ПС – 6 дБм; высота подвеса антенн БС – 50 м; высота подвеса антенн ПС – 1.5 м; частота передачи сигнала.

В разработанном ПО пользователем задаются все вышеперечисленные параметры, определяется территория, которую необходимо покрыть связью и внутри которых установка БС невозможна, и записывается расчет.

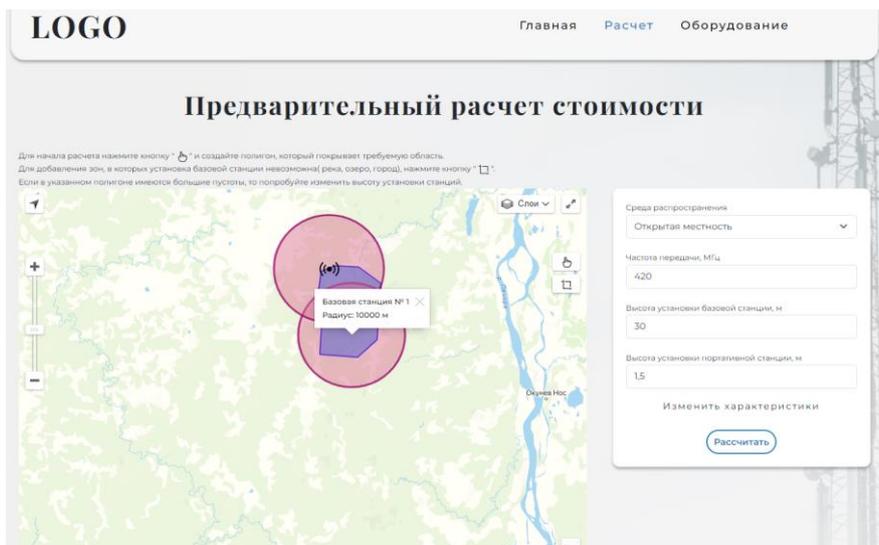


Рис. 8. Работа алгоритма

Fig. 8. Algorithm Operation

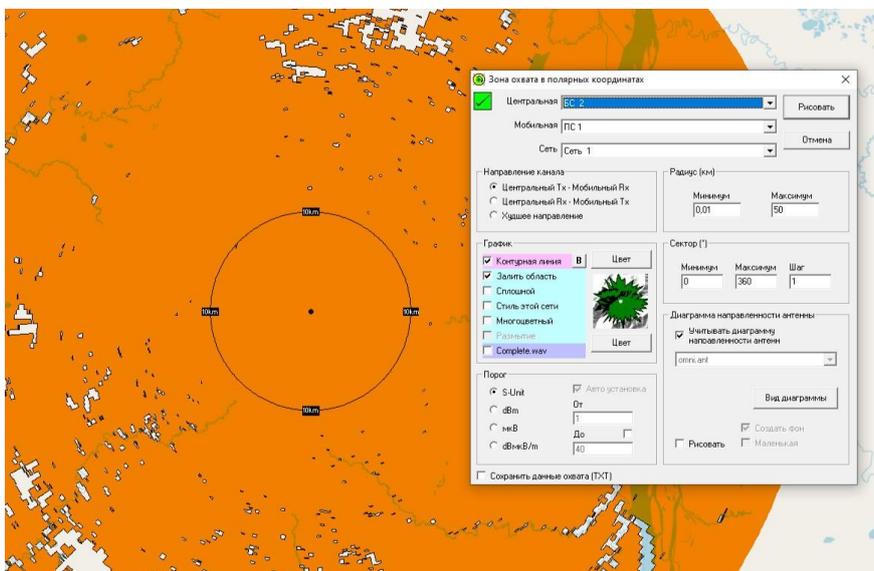


Рис. 9. Зона обслуживания БС1

Fig. 9. BS1 Service Area

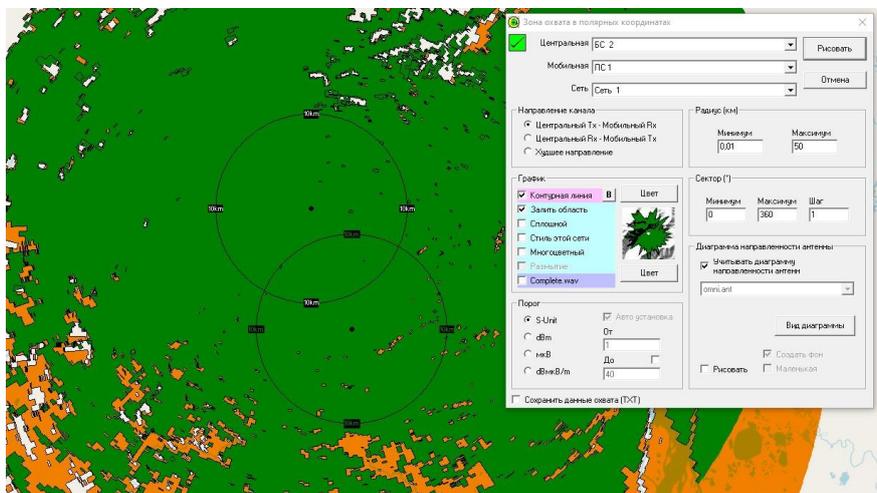


Рис. 10. Зона обслуживания БС1 и БС2

Fig. 10. BS1 and BS2 Service Area

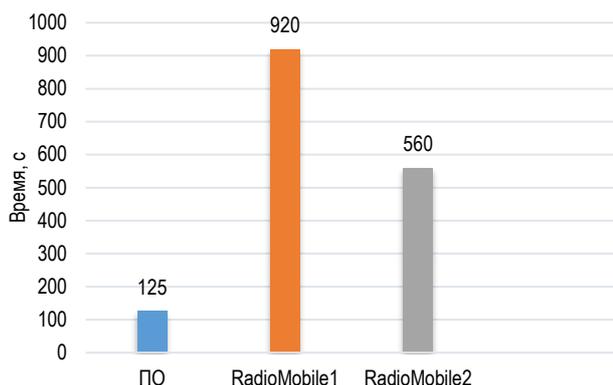


Рис. 11. Время, затраченное на проектирование ТС

Fig. 11. Time Spent on Design TS

В программе RadioMobile необходимо загрузить карту высот интересующего региона, а также указать ее размеры. Предполагается, что карта высот для всех регионов страны уже скачана на ПК пользователя и время на поиск и скачивание не учитывается. Далее для удобства отображения накладывается карта местности, указывается место размещения БС и задаются все ее вышеперечисленные параметры; затем строится карта зоны покрытия. В данной программе проведено два испытания: в первом случае расстановка БС осуществлялась вручную, на основе анализа топографической карты, во втором – БС размещались в местах, координаты которых получены из разработанного ПО.

Из результатов, представленных в гистограмме, следует, что количество времени, затраченное на проектирование ТС связи в разработанном ПО, в 4 раза меньше (125 с) времени, затраченного на проектирование в программе RadioMobile; при вводе координат мест установки БС (560 с), полученных из ПО, в 7 раз меньше, чем количество времени, затраченное на проектирование в программе RadioMobile при поиске мест размещения БС вручную (920 с).

#### Список источников

1. Сакалема Д.Ж. Подвижная радиосвязь. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 512 с.
2. Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Михайлов П.А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 224 с.
3. Егоров Л.Л., Кологривов В.А., Мелихов С.В. Алгоритм расчета зон покрытия базовых станций сотовой связи // Доклады Томского Государственного Университета систем управления и радиоэлектроники. 2009. № 1-1(19). С. 15–19.
4. Мухаджинов Р.Р. Применение генетического алгоритма к решению задачи «Размещение станций систем мобильной связи» // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 1. С. 165–167.
5. Павловская К.А. Применение генетического алгоритма для решения задач размещения базовых станций в сетях пятого поколения // Информатика и кибернетика. 2019. № 4(18). С. 29–34.
6. Мухтаров А.А., Першин О.Ю. Размещение базовых станций широкополосной беспроводной сети связи для обслуживания заданного множества рассредоточенных объектов // Двенадцатая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем mlsd'2019» (Москва, Россия, 01–03 октября 2019). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 609–612. DOI:10.25728/mlsd.2019.1.0610
7. Аминова Р.Р. Разработка алгоритма первоначального размещения базовых станций сетей широкополосного радиодоступа на этапе частотно-территориального планирования // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (АКТО-2016, Казань, Россия, 10–12 августа 2016). Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2016. Т. 2. С. 338–342.

#### Заключение

Представленный алгоритм автоматически размещает минимальное количество БС внутри территории, которую необходимо покрыть связью, с учетом статистического метода расчета и реальных условий распространения радиоволн.

Элементом новизны данного решения является то, что на первом этапе расчета определяется зона обслуживания БС статистическим методом, на втором этапе происходит уточненный расчет зоны обслуживания с учетом реальных условий распространения радиоволн на месте привязки, а на третьем этапе определяется зона гарантированного обслуживания абонентов. К исследованиям, в которых предлагается автоматическое размещение БС, можно отнести работы для сотовой связи [2–6, 8]. Однако в данных работах используются другие алгоритмы, в которых не учитываются реальные условия распространения радиоволн на месте нахождения БС и ПС. Проведено сравнение полученных результатов в программе RadioMobile, в ходе которого подтверждены зоны гарантированного обслуживания БС, а также получены данные, показывающие, что время проектирования ТС связи в разработанном ПО на основе представленного алгоритма в 4 раза меньше, чем время проектирования ТС в программе RadioMobile с известными координатами мест расположения БС.

Алгоритм, представленный в работе, может быть применен для проектирования ТС связи при освоении Арктической зоны, а также на равнинных территориях. Его использование для размещения БС в городе нецелесообразно, так как установка БС возможна лишь в определенных и разрешенных местах. В дальнейшем планируется доработка ПО и разработка метода размещения БС, методики проектирования зон обслуживания БС, основанных на представленном алгоритме.

8. Скаков Е.С., Малыш В.Н. Использование алгоритмов мультистарта и поиска с запретами для решения задачи размещения базовых станций // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3(76). С. 99–106. DOI:10.15217/issn1684-8853.2015.3.99
9. Иванов В.С., Хаджийская Е.Ю. Расчёт зоны покрытия транкинговой системы связи // XIX Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (Сочи, Россия, 01–10 октября 2022). М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2022. С. 345–350.
10. Иванов В.С., Увайсов С.У., Иванов И.А. Алгоритм расчета зоны обслуживания базовой станции транкинговой системы связи // Научные технологии. 2023. Т. 24. № 4. С. 12–20. DOI:10.18127/j19998465-202304-02
11. Овчинников А.М., Воробьев С.В., Сергеев С.И. Открытые стандарты цифровой транкинговой радиосвязи. М: Эко-Трендз, 2000. 166 с.
12. Рекомендация МСЭ-R P.1812-4 (07/2015). Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб "из пункта в зону" в диапазонах УВЧ и ОВЧ.

## References

1. Sakalema D.J. *Mobile Radio Communication*. Moscow: Goriachaia liniia Telekom Publ.; 2012. 512 p.
2. Babkov V.Ju., Voznjuk M.A., Mihajlov P.A. *Mobile Communication Networks. Frequency-Territorial Planning*. Moscow: Goriachaia liniia – Telekom Publ.; 2007. 224 p.
3. Egorov L.L., Kologrivov V.A., Melihov S.V. Algorithm for Calculating Coverage Areas of Cellular Base Stations. *Proceedings of TUSUR University*. 2009;1-1(19):15–19.
4. Muhadzhinov R.R. Application of the genetic algorithm to the solution of the problem "Placement of stations of mobile communication systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2009;1:165–167.
5. Pavlovskaja K.A. A Genetic Algorithm is Used to Solve the Problems of Placing Base Stations in Fifth-Generation Networks. *Informatika i kibernetika*. 2019;4(18):29–34.
6. Muhtarov A.A., Pershin O.Ju. Placement of base stations of a broadband wireless communication network to serve a given set of dispersed objects. *Proceedings of the XIIth International Conference on Management of Large-Scale Systems Development mlSD'2019", 01–03 October 2019, Moscow, Russia*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ.; 2019. p.609–612. DOI:10.25728/mlsd.2019.1.0610
7. Aminova R. Development of the Initial Base Stations Placement Algorithm for Broadband Radio Access Networks on the Frequency-Territorial Planning Stage. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation on New Technologies, Materials and Equipment of the Russian Aerospace Industry, AKTO-2016, 10–12 August 2016, Kazan, Russia, vol.2*. Kazan: Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan Publ.; 2016. p.338–342.
8. Skakov E.S., Malysh V.N. Multi-Start and Tabu Search Algorithms in Base Station Location Problem. *Information and Control Systems*. 2015;3(76):99–106. DOI:10.15217/issn1684-8853.2015.3.99
9. Ivanov V.S., Hadzhiskaja E.Ju. Calculation of coverage area of trunking communication system. *Proceedings of the XIXth International Scientific and Practical Conference on Innovation, Information and Communication Technologies, 01–10 October 2022, Sochi, Russia*. Moscow: Assotsiatsiia vypusnikov i sotrudnikov VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo sodeistviia sokhraneniui istoricheskogo i nauchnogo nasledii VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo Publ.; 2022. p.345–350.
10. Ivanov V.S., Uvajsov S.U., Ivanov I.A. Algorithm for Calculating the Service Area of the Trunking Communication System Base Station. *Science Intensive Technologies*. 2023;24(4):12–20. DOI:10.18127/j19998465-202304-02
11. Ovchinnikov A.M., Vorobyov S.V., Sergeev S.I. *Open Standards of Digital Trunking Radio Communication*. Moscow: Eco-Trends Publ.; 2000. 166 p.
12. Rec. ITU-R P.1812-4. *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the UHF and VHF bands*. 2015.

Статья поступила в редакцию 14.07.2023; одобрена после рецензирования 14.10.2023; принята к публикации 16.10.2023.

The article was submitted 14.07.2023; approved after reviewing 14.10.2023; accepted for publication 16.10.2023.

## Информация об авторах:

**ИВАНОВ**  
Вячеслав Сергеевич

аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств МИРЭА – Российский технологический университет  
 <https://orcid.org/0000-0001-9827-1690>

**УВАЙСОВ**  
Сайгид Увайсович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств МИРЭА – Российский технологический университет  
 <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

**ИВАНОВ**  
Илья Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств МИРЭА – Российский технологический университет  
 <https://orcid.org/0000-0003-1266-0228>