УДК 527.62

Методика расстановки базовых станций системы локального позиционирования в рабочей зоне с препятствиями

М.Н. Крижановский✉, О.В. Тихонова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Резюме. В данной статье рассматриваются существующие методы расстановки базовых станций локальной системы позиционирования в рабочей зоне. Выбор способа расстановки станций во многом определяет конечную точность и экономическую целесообразность всей проектируемой системы. Обзор научной литературы показал, что в настоящее время отсутствует универсальная методика размещения базовых станций в рабочей зоне позиционирования. Существующие решения реализуют либо один из стандартных подходов размещения станций по сетке, либо воплощают метод перебора множества комбинаций размещений. Метод расстановки станций по сетке не приспособлен к условиям проектирования системы позиционирования в рабочей зоне сложной формы, разделенной внутри различными перегородками и массивными объектами, так как не учитывает особенности распространения радиосигнала. Метод перебора различных комбинаций размещения базовых станций в большинстве программных реализаций сводится к минимизации влияния геометрического фактора (Geometric Dilution of Precision – GDOP) на погрешность измерений расстояний до станций и так же не учитывает искажения навигационного сигнала, вносимые при прохождении сквозь различные препятствия. Поэтому разработка методики размещения базовых станций локальной системы позиционирования является актуальной проблемой и именно ее решению посвящена статья. Согласно предлагаемой методике, рабочая зона, содержащая на своей площади массивные препятствия, разбивается на выпуклые свободные подобласти в соответствии с жадным алгоритмом, в которых и осуществляется расстановка базовых станций. В результате работы над статьей выведены принципы для работы методики расстановки базовых станций и предложен универсальный алгоритм размещения станций в рабочих зонах с препятствиями.

Ключевые слова: система локального позиционирования, Dilution of Precision, геометрический фактор, жадный алгоритм, DOP, трилатерация.

Для цитирования: Крижановский М.Н., Тихонова О.В. Методика расстановки базовых станций системы локального позиционирования в рабочей зоне с препятствиями. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(2). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1579

The method of placing the base stations of the local positioning system in the work area with obstacles

M.N. Krizhanovsky✉, O.V. Tikhonova

MIREA – Russian University of Technology, Moscow, the Russian Federation

Abstract. This article discusses the existing methods of positioning the base stations of the local positioning system in the work area. The choice of the station placement method largely determines the final accuracy and economic feasibility of the entire designed system. A review of the scientific literature has shown that there is currently no universal method for placing base stations in the positioning work area. Existing solutions implement either one of the standard approaches of station placement on a grid, or embody a method of sorting through many combinations of placements. The method of placing stations on a grid is not adapted to the conditions of designing a positioning system in a complex-shaped work area divided internally by various partitions and massive objects, since it does not take into account

© Крижановский М.Н., Тихонова О.В., 2024

the peculiarities of radio signal propagation. The method of sorting through various combinations of base station placement in most software implementations is reduced to minimizing the influence of a geometric factor (Geometric Dilution of Precision - GDOP) on the measurement error of distances to stations and also does not take into account the distortion of the navigation signal introduced when passing through various obstacles. Therefore, the development of a methodology for the placement of base stations of a local positioning system is an urgent problem and the article is devoted to its solution. According to the proposed methodology, the working area containing massive obstacles on its area is divided into convex free subdomains in accordance with a greedy algorithm, in which the base stations are arranged. As a result of the work on the article, the principles for the operation of the base station placement methodology are outlined and a universal algorithm for station placement in work areas with obstacles is proposed.

Keywords: local positioning system, Dilution of Precision, geometric factor, greedy algorithm, DOP, trilateration.

For citation: Krizhanovsky M.N., Tikhonova O.V. The method of placing the base stations of the local positioning system in the work area with obstacles. *Modeling, Optimization and Information Technology.* 2024;12(2). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1579 (In Russ.).

Введение

Навигационные технологии с давних времен являются неотъемлемой частью многих сфер деятельности человека. С момента появления тенденции на роботизацию производственных, складских, добычных, логистических и других процессов, особое значение приобрело именно локальное позиционирование. Это связано в немалой степени с ограничениями, которые имеют глобальные спутниковые навигационные системы при позиционировании в закрытых пространствах. Мобильные автономные системы, будь то робот-грузчик на автоматизированном складе или беспилотный грузовик в карьере, для корректного выполнения своих функций постоянно нуждаются в информации о своем местоположении, измеряемой с точностью, зависящей от требований конкретного применения.

Задача обеспечения высокой точности позиционирования в локальных системах навигации является одной из самых актуальных в связи с тем, что без дополнительных мероприятий в базовом виде наиболее распространенные для решений локального позиционирования модули обеспечивают крайне низкую точность. Есть различные способы решения данных проблем, самым распространенным является введение дополнительных фильтрационных этапов или коррекция за счет взятия данных об одном объекте из разных систем навигации. Но не менее важным является такой фундаментальный фактор, как геометрия расстановки базовых станций в рабочей зоне.

Геометрический фактор

Оценка влияния расположения станций относительно позиционируемого объекта в глобальных навигационных спутниковых системах производится с помощью специально вводимой безразмерной величины DOP (Dilution of Precision), которая позволяет количественно оценить обеспечиваемое геометрическим фактором увеличение погрешности измерений координат.

Величина DOP рассчитывается как отношение ошибки измерений дистанций до маяков к ошибке определения координат.

$$DOP = \frac{\text{Ошибка позиционирования}}{\text{Ошибка измерения расстояния}} \quad (1)$$

На Рисунке 1 наглядно показано, как размещение базовых станций может влиять на погрешность измерения координат.

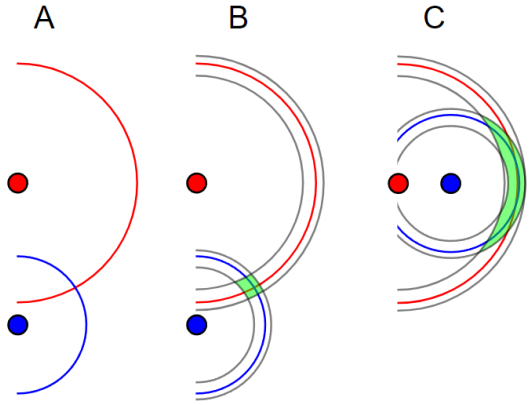

Рисунок 1 – Пример влияния размещения базовых станций на точность позиционирования объекта
Figure 1 – An example of the influence of the location of base stations on the accuracy of object positioning

В ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы) разделяют несколько видов DOP. DOP, связанный с ошибкой определения координат объекта в горизонтальной плоскости – HDOP (HorizontalDOP). DOP, связанный с определением высоты объекта – VDOP (VerticalDOP). Сумма квадратов VDOP и HDOP дает PDOP, описывающий ошибку полного определения координат:

$$PDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2.$$

При использовании времяпролетного метода определения расстояний, например, в ГНСС выделяют также TDOP (TimeDOP), связанный с ошибкой определения поправки часов объекта относительно часов базовых станций.

Исследования [1–8] адаптируют DOP для использования применительно к локальным системам локального позиционирования. В научных статьях при рассмотрении влияния геометрического фактора на рост погрешности измерений авторы сходятся во мнении, что GDOP имеет минимальное значение при нахождении станций на вершинах правильного многоугольника (с числом вершин, равным количеству станций), в геометрическом центре которого находится объект позиционирования.

Обзор литературы

В научной литературе представлено множество работ на тему оптимизации технологии локального позиционирования с целью повышения точности позиционирования и уменьшения стоимости за счет сокращения количества используемых базовых станций. Как правило, улучшение точности позиционирования пытаются улучшить за счет различных видов дополнительной математической обработки вычисляемых данных, но не менее важным фактором, определяющим параметры развертываемой системы, является конфигурация размещения базовых станций в рабочей зоне. В данном разделе проведем краткий обзор существующих наработок на тему методов размещения маяков, обеспечивающих работу локальной системы позиционирования в предполагаемой рабочей зоне.

Автор статьи [1] приводит программную методику расчета предпочтительного расположения базовых станций в рабочей зоне относительно позиционируемого объекта. Расчет оптимального расположения станций, обеспечивающего минимальную погрешность, осуществляется методом перебора 10^5 различных конфигураций расположения станций в зоне позиционирования. Зона разбивается на сетку с

определенным шагом по горизонтальным осям и по вертикали, чтобы ограничить возможное количество расположений базовых станций и объекта позиционирования. Далее автор выбирает среди опробованных конфигураций ту, которая обеспечивает наименьшую погрешность измерений (наименьший DOP). Как итог, оптимальная конфигурация, к которой стремится результат для четырех станций, являет собой размещение станций на вершинах правильного четырехугольника, в геометрическом центре которого находится позиционируемый объект. Минус данного решения применительно к локальным системам позиционирования заключается в том, что подбор оптимального размещения базовых станций осуществляется для фиксированного размещения позиционируемого объекта. Таким образом, при размещении рабочей зоны в непосредственной близости от базовых станций данный алгоритм не будет обеспечивать равномерного распределения величины погрешности измерений в рабочей зоне.

В статье [2] рассматриваются принципы локального позиционирования, и в том числе упоминается, что одним из центральных факторов, определяющих качество работы системы позиционирования, является геометрический фактор размещения базовых станций относительно позиционируемого объекта. Автор на основании уже существующих исследований делает вывод, что наименьшая погрешность позиционирования обеспечивается в том случае, если станции расположены симметрично относительно позиционируемого объекта. Наименьшая погрешность будет обеспечиваться в том случае, когда базовые станции размещены на вершинах правильного многоугольника, а позиционируемый объект находится в геометрическом центре данной фигуры. К слову, результаты, полученные в ходе моделирования автором статьи [1], подталкивают к аналогичному выводу. Исходя из этого, можно продолжить ассоциативный ряд и прийти к логичному утверждению, что для работы двумерной системы локального позиционирования оптимальным будет размещение станций на вершинах правильного треугольника, в центре которого находится позиционируемый объект. Это обусловлено тем фактом, что для корректной работы двумерной системы позиционирования необходимы, по меньшей мере, три базовых станции.

Также в материале [2] среди факторов, обусловливающих рост погрешности измерений, указывается эффект многолучевости, возникающий при наличии препятствий в помещении. Таким образом, сигнал от станции, не имеющей прямой видимости с объектом позиционирования, если оптимальных путей обхода препятствия не существует, проходит сквозь препятствие, неся значительные потери в мощности, или же достигает позиционируемого устройства путем многолучевых переотражений. Каждое переотражение значительно снижает мощность доходящего до объекта позиционирования сигнала.

В статье [3] автор проводит параллель между задачей размещения базовых станций и задачей расстановки охранников в художественной галерее, рассмотренной в труде [4]. Задача, связанная с картинной галереей, заключалась в поиске такой конфигурации расстановки охранников, которая обеспечивала бы охват каждой точки пространства в каждый момент времени как минимум одним охранником. Применительно к системам локального позиционирования автор выделяет потребность в создании методики, которая разместит базовые станции таким образом, чтобы каждый участок пространства имел покрытие от задаваемого числа станций, а не от одной.

Автор, подходя к планировке размещения станций, рассматривает 4 модели покрытия базовыми станциями областей рабочей зоны (Рисунок 1).

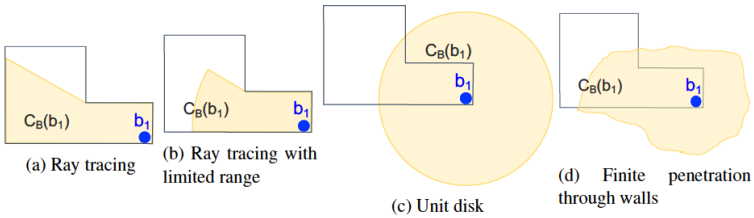

Рисунок 2 – Модели покрытия рабочей зоны базовой станцией
Figure 2 – Models of coverage of the working area by the base station

Модель трассировки лучей (Рисунок 2 а) показывает, что покрытие от станции обеспечивается на всех участках рабочей зоны, с которыми у базовой станции обеспечена прямая видимость. В идеальном мире эта модель обеспечивала бы высокую точность позиционирования, но в реальности с ростом дистанции растет степень влияния различных шумов на значение рассчитываемой дистанции. Таким образом, более оптимальной является вторая модель, являющаяся развитием первой. Модель трассировки лучей с ограниченной дальностью (Рисунок 2 б) повторяет собой предыдущую модель, но с ограничением по дальности распространения сигнала.

Следующая модель покрытия по радиусу действия (Рисунок 2 в) подразумевает, что покрытым считается все пространство, находящееся в пределах окружности с центром на базовой станции с заданным в зависимости от типа базовой станции радиусом. Этот метод имеет серьезный недостаток в виду того, что, проходя сквозь различные препятствия, сигнал может вести себя непредсказуемо, что негативно скажется на точности обеспечиваемой системой. И четвертая модель – модель (Рисунок 2 г), учитывающая при построении зоны покрытия эффекты многолучевости и ослабление сигнала при прохождении сквозь препятствия. Данная модель является наиболее приближенной к реальности, но ее расчет и использование являются наиболее сложными.

Из приведенного автором обзора можно сделать вывод, что наилучшее отношение вычислительной сложности и правдоподобности измерений обеспечивает модель трассировки лучей с ограниченной дальностью. Основной проблемой данной модели является определение позиционируемым объектом факта прямой видимости с конкретными станциями. Данную проблему удобно решить, используя алгоритмическое решение, представленное в программе [9]. В данной программе реализовано разделение станций на группы из маяков, имеющих взаимную прямую видимость. Группировка производится таким образом, чтобы обеспечивать позиционируемому объекту за счет описанного функционала определения ближайшей группы возможность определения диапазона станций, с которыми у объекта в данной точке пространства есть прямая видимость. Но стоит отметить, что использованное в программе [9] решение подразумевает, что в исходных данных для алгоритма должна уже содержаться карта расстановки базовых станций.

Исходя из рассмотренной научной литературы, можно сделать вывод, что в настоящее время **отсутствует универсальная методика размещения базовых станций в рабочей зоне позиционирования**. Существующие решения реализуют либо один из стандартных подходов, либо воплощают метод перебора множества комбинаций размещений. Методы расстановки в виде одной из стандартных структур размещения не приспособлены для рабочих зон сложных геометрических форм и не учитывают влияние геометрического фактора. Расстановка путем перебора всех возможных вариантов размещения с целью нахождения конфигурации, обеспечивающей наименьший средний DOP, позволяет учесть геометрический фактор, но полностью игнорирует наличие

препятствий, что может привести к отсутствию надежного покрытия как минимум тремя базовыми станциями всех точек рабочей зоны. Целью данной статьи является разработка методики размещения базовых станций для локальных систем позиционирования, позволяющая обеспечить каждую точку рабочей зоны наличием прямой видимости как минимум от трех базовых станций, для устранения влияния препятствий на точность позиционирования. Также предлагаемая методика должна учитывать влияние геометрического фактора на точность и принимать меры по минимизации данного фактора.

Метод расстановки станций

Проблема расстановки базовых станций в рабочей зоне локальной системы позиционирования заключается в поиске конфигурации, использующей наименьшее количество станций и обеспечивающей высокую точность позиционирования для всего множества точек пространства.

Обеспечить 100-процентное покрытие всех точек рабочей зоны с обеспечением минимальной погрешности возможно только за счет размещения меток максимально плотно во всех точках пространства, но по понятным причинам этот подход не может быть востребован. Поэтому при развертывании подобных систем, как правило, прибегают к помощи квалифицированного специалиста способного спланировать расстановку станций с учетом таких возможных проблем в распространении сигналов, как ослабление мощности сигнала при прохождении препятствий или эффект многолучевости. В противном случае используется один из классических методов расстановки.

Существует три общепринятых конфигурации расстановки: стандартная, краевая и смешанная (Рисунок 3).

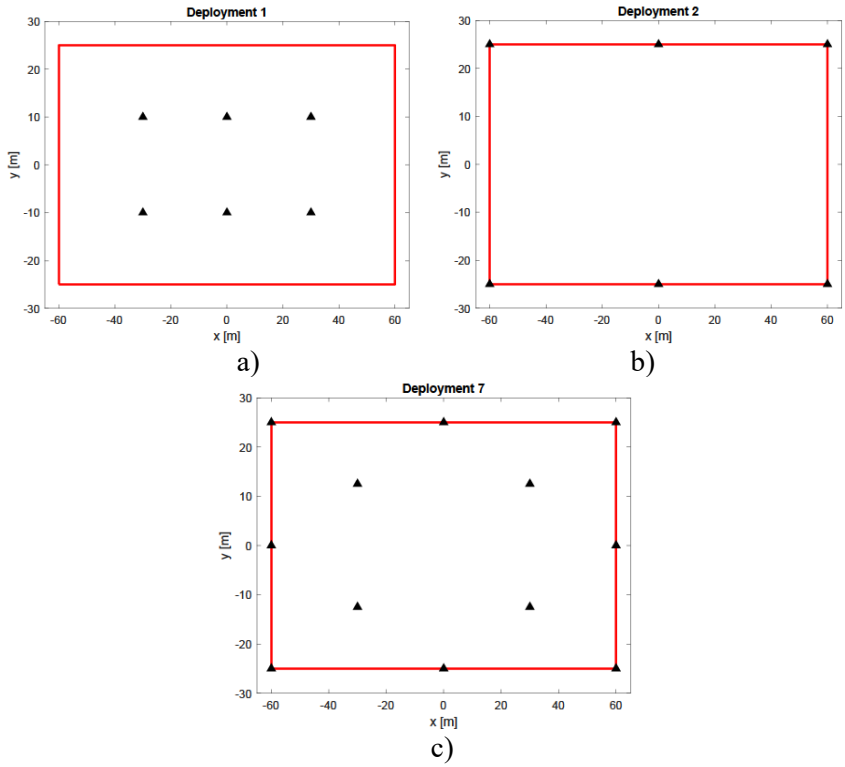

Рисунок 3 – Конфигурации расстановки станций: a) – стандартная расстановка; b) – краевая расстановка; c) – смешанная

Figure 3 – Station configurations: a) – standard arrangement; b) – edge arrangement; c) – mixed

Краевая конфигурация размещения станций (Рисунок 3 b) при использовании в обширной зоне позиционирования, почти всегда исключает возможность нахождения объекта позиционирования в окрестностях центра правильного многоугольника со станциями на вершинах, если позиционируемый объект не находится в близости к угловым или краевым областям пространства. Таким образом, в большинстве случаев обеспечивается минимальная величина площади с низким увеличением погрешности измерений за счет геометрического фактора.

Стандартная конфигурация (Рисунок 3 a) подразумевает наличие областей обеспечения минимальной погрешности преимущественно в центральной части рабочего пространства, что также не является оптимальным результатом.

Из вышесказанного следует: смешанная конфигурация (Рисунок 3 c) является наилучшим решением по обеспечению максимальной площади зон с наименьшим влиянием геометрического фактора на увеличение погрешности определения местоположения позиционируемого устройства.

Идеальной зоной для построения системы локального позиционирования является выпуклый многоугольник, не имеющий на своей площади массивных препятствий или внутренних стен. К сожалению, на практике, как правило, приходится иметь дело с неидеализированными случаями. Следовательно, методика расстановки станций для локальной системы позиционирования должна быть адаптирована для наихудших случаев, а именно невыпуклых зон, содержащих препятствия.

К методике расстановки станций для двумерной системы локального позиционирования необходимо в целях обеспечения максимальной точности выдвинуть следующие требования:

– Отсутствие теневых зон. Каждая точка пространства рабочей зоны должна иметь прямую видимость как минимум от k+1 станций. Где k – количество измерений, в которых действует позиционирование.

– Покрытие должно быть равномерным для обеспечения в среднем одинакового значения точности позиционирования.

– Каждая изолированная или частично изолированная геометрией рабочей зоны или препятствиями область должна иметь как минимум k станций, размещенных в ней. Где k – количество измерений, в которых действует позиционирование. Это необходимо для обеспечения объекту позиционирования возможности производить измерения по определению своих координат от станций, с которыми имеется прямая видимость.

Изолированной областью может считаться часть рабочего пространства, граничащая с внутренними препятствиями рабочей зоны и не граничащая с остальной частью рабочей зоны. Частично изолированная область – область, граничащая с внутренними препятствиями, но также имеющая общую границу и с другими областями рабочей зоны.

Задача размещения станций с целью покрытия всего рабочего пространства является NP-сложной (выполняется в течение недетерминированного полиномиального времени, равного 2^n или $n!$). Можно ее упростить за счет разделения многоугольника, представляющего собой область позиционирования на выпуклые подобласти для упрощения решения задачи покрытия каждой точки хотя бы раз. Интерес для расположения станций могут представлять только области, в которые есть необходимость и возможность проникновения позиционируемого объекта, поэтому излишне узкие и неиспользуемые области можно заранее исключить из расчета конфигурации размещения станций.

При позиционировании методом трилатерации расстояния от объекта до станций рассчитываются на основании измеренного RSSI (Received Signal Strength Indicator).

Следовательно, наибольшее влияние на точность локации оказывают препятствия, находящиеся между объектом и станциями. В статье [10] рассматривается возможность уменьшения среднего значения погрешности позиционирования за счет учета потерь мощности сигнала при пересечении препятствий, информация о расположении в рабочей зоне которых заранее известна. Предлагается на стадии разработки системы индивидуально подходить к каждому частному случаю рабочей зоны, в которой планируется осуществлять позиционирование каких-либо объектов. В данной работе для учета препятствий предлагается заранее, исходя из известных данных о координатах расположения препятствий, все базовые станции системы, используемые для позиционирования, условно разделить на группы и выделить среди них опорные. Деление на группы производится по принципу нахождения группы по одну сторону от препятствий. Опорная станция выделяется, исходя из непосредственной близости к геометрическому центру области, занимаемой конкретной группой станций, ограниченной не обязательно замкнутым контуром препятствий. Позиционируемый объект согласно предлагаемому в статье алгоритму первым делом сверяет сигналы от опорных станций различных групп. Определив сильнейший из сигналов от опорных станций, при дальнейшем расчете дистанций на основании измерения RSSI (Received Signal Strength Indicator), позиционируемый объект сможет сделать вывод о том, что все станции, принадлежащие к группе, от опорной станции которой исходит сильнейший сигнал, находятся по одну сторону от препятствий с объектом. Таким образом, при расчете расстояния до этих станций нет нужды во внесении в формулу расчета расстояния от объекта до станции по зафиксированному RSSI дополнительных коэффициентов, масштабирующих потери мощности с расстоянием.

Дистанция по измеренному значению RSSI рассчитывается согласно отношению:

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \frac{d^n}{d_0},$$

где d_0 – калибровочное расстояние, составляющее, как правило, 1 метр; $P_r(d_0)$ – RSSI, получаемый приемником на калибровочном расстоянии; $P_r(d)$ – RSSI, получаемый приемником при измерении; d – измеряемое расстояние; n – коэффициент потери мощности сигнала, составляющий для воздуха от 2 до 4, в зависимости от наличия препятствий

Из этого равенства можно выразить ожидаемое значение RSSI на расстоянии d:

$$RSSI = RSSI_{d0} - 10\,n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \text{ [дБм]},$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\frac{RSSI_{d0} - RSSI}{10n}} \text{ [м]}.$$

Соответственно, для станций, относящихся к другим группам, дистанцию от объекта необходимо будет рассчитывать по формуле с увеличенным коэффициентом потери мощности сигнала n. Также, имея благодаря данной механике информацию о наличии прямой видимости со станциями, можно при позиционировании выбирать учитываемые в расчете координат станции не по наибольшей принимаемой мощности, а по критерию прямой видимости. При практическом использовании предложенного в работе [10] алгоритма для принятия решения о внесении корректировки в формулу расчета необходимо знать заранее карту препятствий в зоне покрытия.

Алгоритм группировки станций, реализованный в программе [9], позволяет подготовить начальные данные о группировке станций для алгоритма, предложенного в статье [10].

Но даже наличие у позиционируемого устройства информации об отсутствии прямой видимости со станцией, расстояние до которой учитывается в расчете координат, позволяет лишь частично снизить погрешность. Так как препятствия могут быть из различного материала, а также могут иметь различную форму. Следовательно, внесение в формулу расчета расстояния дополнительного коэффициента, пусть и уменьшит погрешность, но не позволит достигнуть уровня точности, обеспечиваемого станциями, с которыми имеется прямая видимость.

Важной частью задачи расстановки станций является создание условий, при которых позиционируемый объект будет иметь возможность в большинстве случаев рассчитывать свои координаты, руководствуясь сигналами от станций, с которыми возможно установить прямую видимость. Создание таких условий повсеместно, приведет к использованию чрезмерно большого количества станций. Поэтому в целях оптимизации допустимо оставить неохваченными области, не востребованные для перемещения позиционируемым объектом в виде своего размера или отсутствия причины посещения.

Минимально необходимым количеством станций для решения двумерной задачи является 3. Чтобы произвольно размещенные в некоторой рабочей зоне станции были видны из любой точки, это пространство должно представлять собой выпуклый многоугольник. Следовательно, если разделить рабочее пространство на набор выпуклых многоугольников и в каждом разместить минимально необходимое количество станций, то проблема прямой видимости будет решена.

Предлагается алгоритм формирования набора выпуклых областей:

1. Проведение линий вдоль граней препятствий.

2. Выбор из сформированных проведенными линиями геометрических фигур, выпуклых многоугольников, внутри которых отсутствуют препятствия с использованием жадного алгоритма.

Рассмотрим данный алгоритм на примере представленной на Рисунке 4 карты рабочей зоны.

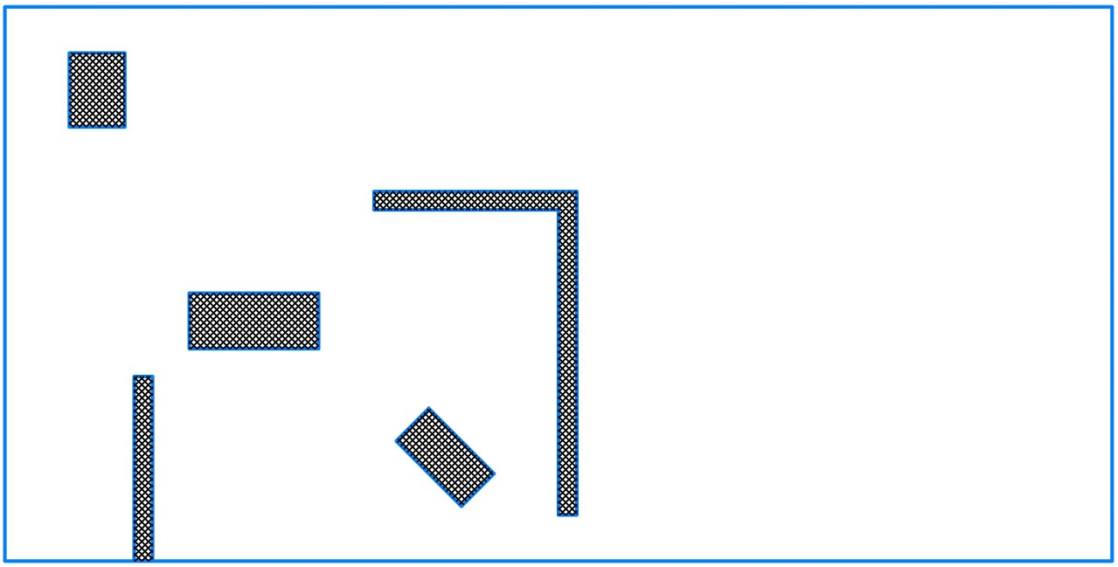

Рисунок 4 – Карта рабочей зоны с препятствиями
Figure 4 – Map of the work area with obstacles

Проведя линии вдоль граней препятствий, получим следующую картину, представленную на Рисунке 5.

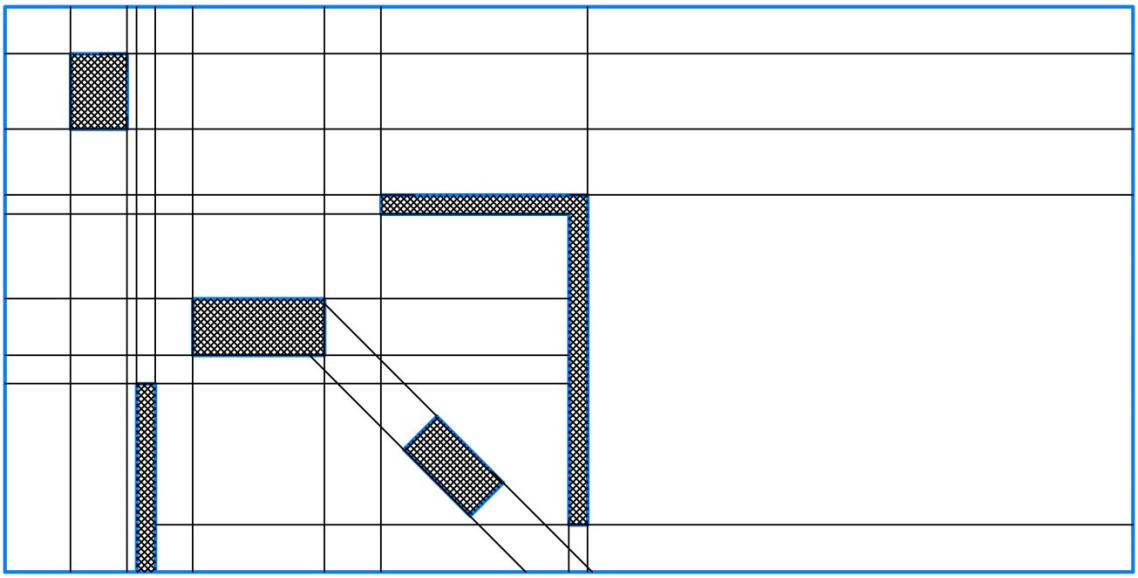

Рисунок 5 – Карта рабочей зоны с линиями, проведенными вдоль граней препятствий
Figure 5 – A map of the work area with lines drawn along the edges of obstacles

Далее предлагается использование жадного алгоритма в выборе набора выпуклых многоугольников, очерчивающих области, не разделенные препятствиями. Жадный алгоритм предполагает, в первую очередь, выбор многоугольников, вмещающих в себя наибольшую площадь, не занятую прочими многоугольниками. Результат работы жадного алгоритма для предлагаемой области представлен на Рисунке 6.

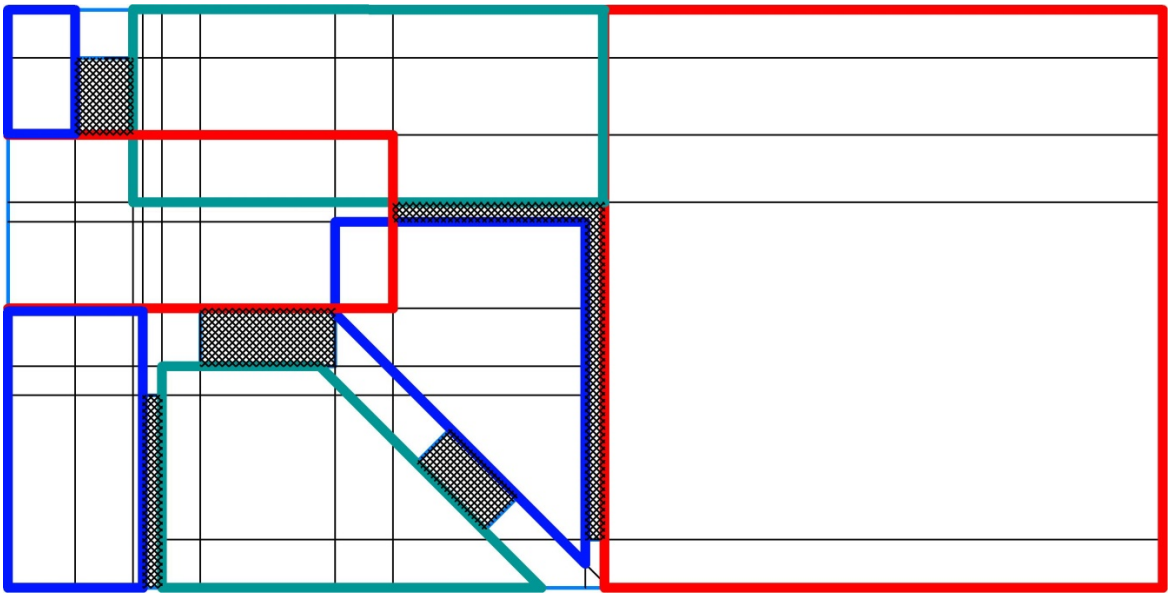

Рисунок 6 – Карта рабочей зоны с обозначенными выпуклыми подобластями, не имеющими на своей площади препятствий
Figure 6 – A map of the work area with marked convex details that do not have obstacles in their area

1) Если многоугольник может быть вписан в окружность с радиусом, равным половине радиуса покрытия используемых базовых станций, и площадь не меньше определенного пользователем минимума (данные границы выбираются исходя из габаритов позиционируемого устройства), то в его границах производится расстановка

базовых станций. Количество необходимых станций для такой области равно 3 (для двумерного случая).

Станции должны быть размещены, исходя из принципа обеспечения максимального среднего DOP для точек пространства рассматриваемого многоугольника. Это можно реализовать, расставив станции на границе многоугольника таким образом, чтобы они образовывали вершины фигуры, близкой к правильному многоугольнику. Или же можно воспользоваться алгоритмом, изложенным в статье [5] алгоритмом оптимальной расстановки станций путем поиска подходящей конфигурации с помощью эволюционного алгоритма. Если две станции, имеющие отношение к разным зонам, находятся на площади пересечения этих зон, то данные станции должны быть заменены одной, размещенной по координатам, являющимся средними для этих двух станций.

2) В случае если в рабочей зоне остался выпуклый многоугольник, не проходящий по выдвинутым ранее критериям по причине своей величины, то к такому многоугольнику применяется смешанная расстановка базовых станций, описанная в труде [3], структура такой расстановки представлена на Рисунке 3в.

При расстановке станций стоит отметить, что погрешность определения координат значительно возрастает в случае, когда более одной используемой в расчете станции и позиционируемый объект располагаются на одной линии. Этого позволяет избежать размещение станций в краевых областях, но не всегда это возможно.

Как описывается в литературе [11] при позиционировании методом трилатерации в стандартном случае используются для определения координат три сигнала от ближайших станций, имеющие наибольшую интенсивность. При условии, что препятствия оказывают значительное ослабление на проходящие сквозь них сигналы и имеют низкую отражающую способность, сигналы с наибольшей интенсивностью принадлежат станциям, с которыми установлена прямая видимость.

Следует учитывать, что на границе при выходе из одной зоны, представляющей собой выпуклый многоугольник, в другую наиболее интенсивные сигналы станций, с которыми вероятна прямая видимость, могут принадлежать станциям из разных сегментов рабочей зоны. Также возможен сценарий, когда переходом между зонами является пространство, в котором в виду его малого размера, согласно алгоритму, приведенному ниже, расстановка произведена не была. Пример таких зон выделен черным цветом на Рисунке 7. В данных областях точность определения координат может быть снижена за счет отсутствия 3 станций, с которыми имеется прямая видимость. В случае если прямая видимость в радиусе работы трех станций имеется в каждой точке подобной области, то за счет использования алгоритма, реализованного в программе [9], позиционируемый объект сможет выбирать данные, получаемые от станций с прямой видимостью.

В данной программе реализован универсальный алгоритм разбиения станций на группы. Он позволяет в автоматизированном режиме подготовить минимально необходимые начальные данные для работы, изложенной в статье [10], «программы для реализации алгоритма позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности».

Соблюдение условия нахождения групп станций внутри областей, не имеющих внутри своих границ препятствий, обеспечивается при помощи критерия взаимной прямой видимости станций. Также, чтобы каждая группа была в состоянии самостоятельно обеспечивать позиционирование объекта, в ней должно быть не менее трех станций. Две станции, находящиеся в прямой видимости, считаться группой не могут. Алгоритм формирует в соответствии с предлагаемыми в работе требованиями набор групп станций, а также выделяет в каждой группе опорную станцию. В результате

выполнения алгоритма, сформированные группы имеют пересечения зон покрытия, благодаря чему у соседних групп отсутствует общая граница.

Таким образом, точность позиционирования в неохваченных изначально областях, имеющих прямую видимость с тремя базовыми станциями в каждой точке, сильно снижена не будет. Если какая-либо из рассматриваемых зон имеет области, в которых не выполняется условие прямой видимости трех станций, то в среднем более высокую точность по сравнению со стандартным методом трилатерации позволит обеспечить вычисление координат объекта с помощью алгоритма позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности, предложенного в статье [10]. Приведенный в этой статье алгоритм решает проблему определения наличия прямой видимости на границах групп за счет создания групп с пересекающимися областями покрытия.

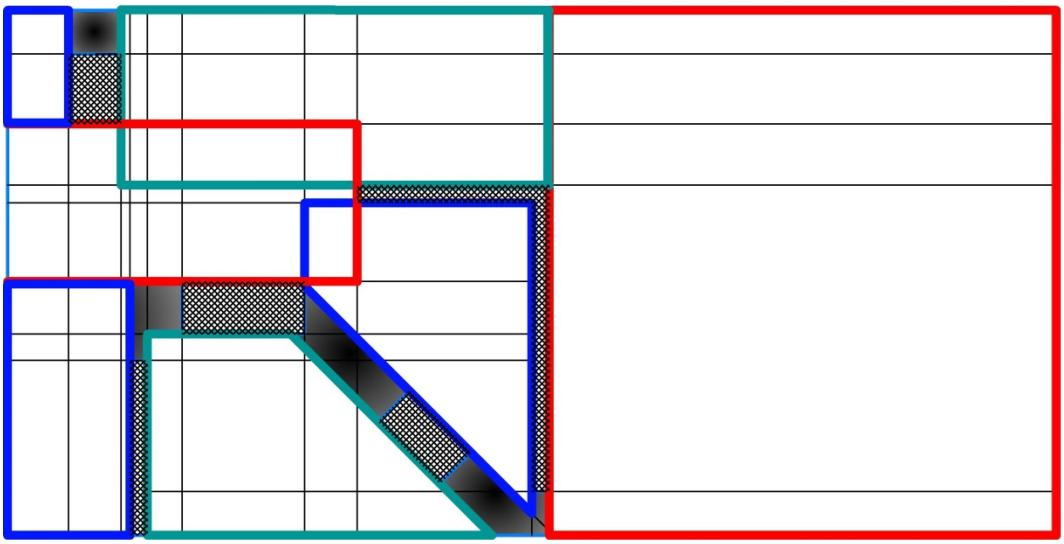

Рисунок 7 – Карта рабочей зоны с выделенными областями, не вошедшими в размеченные зоны
Figure 7 – Map of the work area with selected areas that are not included in the marked zones

Согласно изложенному в работе [10] материалу, для принятия решения о внесении корректировки в формулу расчета, необходимо знать заранее карту препятствий в зоне покрытия. А также предполагать, по какую сторону от ближайшего препятствия находится позиционируемый аппарат. Данный алгоритм предполагает предварительное разбиение станций на группы, например, за счет использования алгоритма [9]. Сравнение расстояний до опорных станций групп позволяет определить примерное местоположение объекта относительно препятствий и понять, сигнал от каких станций претерпевает дополнительное ослабление. В соответствии с информацией о том, от каких именно станций сигнал дополнительно ослаблен, можно внести изменения в формулу расчета дистанции и учесть ослабление.

На Рисунке 8 приведен пример расстановки станций в рассматриваемой зоне в соответствии с предлагаемой методикой.

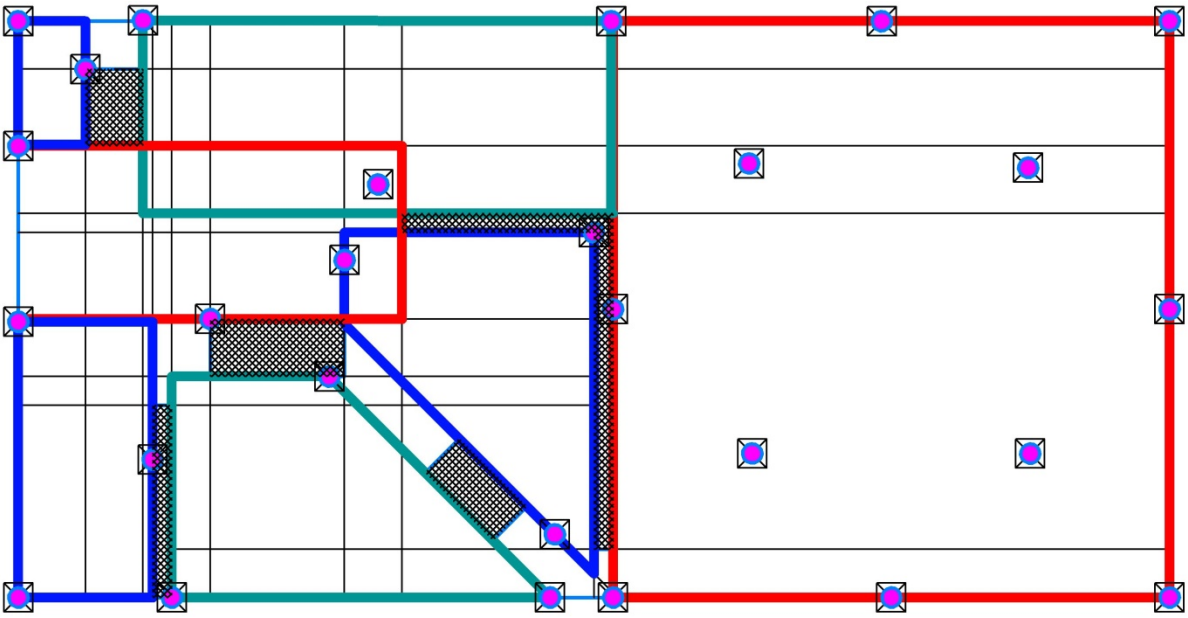

Рисунок 8 – Карта рабочей зоны с расставленными базовыми станциями
Figure 8 – Map of the work area with the base stations located

Заключение

Предложенная методика расстановки станций является универсальным инструментом, применимым для различных рабочих зон. Она позволяет при расстановке базовых станций обеспечить каждую точку рабочей зоны наличием прямой видимости как минимум от трех базовых станций для устранения влияния препятствий на точность позиционирования. Также предлагаемая методика за счет применения метода перебора по среднему значению DOP для всех точек рассматриваемого полигона учитывает влияние геометрического фактора на точность и позволяет выбрать оптимальную конфигурацию размещения на каждом отдельно выделенном полигоне рабочей зоны, представляющем собой выпуклый многоугольник, на которые предварительно разбивается вся зона позиционирования.

Использование данного алгоритма позволяет унифицировать и упростить процесс расчета минимально необходимого количества станций и координаты для расстановки базовых станций. Совместно с «программой для реализации алгоритма позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности» и «программой разбиения множества базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы» данная методика может выступать как программно-методический комплекс для проектирования систем локального позиционирования в рабочих зонах с препятствиями, снижающими точность позиционирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Фокин Г.А. Модель поиска топологии локальной дальномерной системы позиционирования 5G по заданному геометрическому фактору. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы.* 2021;(4):27–38. https://doi.org/10.24412/2221-2574-2021-444-27-38
Fokin G.A. Search model for topology of local range-measuring system in 5G positioning as per pre-set geometric factor. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems.* 2021;(4):27–38. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2221-2574-2021-444-27-38

2. Ahlander J., Posluk M. Deployment Strategies for High Accuracy and Availability Indoor Positioning with 5G. URL: https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1440620 (Accessed 10th March 2024).
3. Rajagopal N., Chayapathy S., Sinopoli B., Rowe A. Beacon placement for range-based indoor localization. In: *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 04-07 October 2016, Alcala de Henares, Spain.* IEEE; 2016. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/IPIN.2016.7743626
4. O'Rourke J. *Art Gallery Theorems and Algorithms.* New York: Oxford University Press Oxford; 1987. 282 p.
5. Famili A., Stavrou A., Wang H., Park J.-M. iDROP: Robust Localization for Indoor Navigation of Drones with Optimized Beacon Placement. *IEEE Internet of Things Journal.* 2023;10(16):14226–14238. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3280084
6. Löffler S., Becker I., Bückert C., Hofstedt P. Enhanced Optimal Beacon Placement for Indoor Positioning: A Set Variable Based Constraint Programming Approach. In: *Informatics in Control, Automation and Robotics – 20th International Conference, ICINCO 2023: Proceedings of the 20th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2023): Volume 1, 13-15 November, Rome, Italy.* SCITEPRESS – Science and Technology Publications; 2023. P. 70–79. https://doi.org/10.5220/0012203400003543
7. Bais A., Kiwan H., Morgan Y. On Optimal Placement of Short Range Base Stations for Indoor Position Estimation. *Journal of Applied Research and Technology.* 2014;12(5):886–897. https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)70595-4
8. Wu Z., Yao Z., Lu M. Optimal Beacon Deployment for Positioning in Cluttered Indoor Environments. *IEEE Sensors Journal.* 2023;23(4):4256–4266. https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3234562
9. Крижановский М.Н., Иванов В.С., Литвинов С.В., Тихонова О.В. *Программа разбиения множества базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы:* опубл. 25.04.2024. Свидетельство о регистрации прав на программное обеспечение № 2024619654.
Krizhanovskii M.N., Ivanov V.S., Litvinov S.V., Tikhonova O.V. *Programma razbieniya mnozhestva bazovykh stantsii lokal'noi sistemy pozitsionirovaniya na peresekayushchiesya gruppy:* publ. 25.04.2024. Software copyright registration Certificate № 2024619654.
10. Крижановский М.Н. Моделирование алгоритма учета препятствий при расчете локации в системах ближнего позиционирования. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.* 2023;192(1):14–20.
Krizhanovsky M.N. Modeling of the algorithm for taking into account obstacles in the calculation of location in short-range positioning systems. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM = Electromechanical matters. VNIIEM studies.* 2023;192(1):14–20. (In Russ.).
11. Lee B., Woo D.-M., Park M.-K., Kim S. Development of self-localizer using collaboration of trilateration and triangulation. In: *2014 11th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 19-21 August 2014, Xiamen, China.* IEEE; 2014. P. 729–733. https://doi.org/10.1109/FSKD.2014.6980926

ИНФОРМАЦИЯОБАВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тихонова Ольга Вадимовна, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов,

Olga V. Tikhonova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radioelectronic Systems and Complexes,

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.
e-mail: o_tikhonova@inbox.ru
ORCID: 0009-0009-4013-9182

MIREA – Russian University of Technology, Moscow, the Russian Federation.

Крижановский Михаил Николаевич, ассистент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.
e-mail: mihakri007@mail.ru
ORCID: 0009-0009-2710-0128

Mikhail N. Krizhanovsky, Assistant of the Department of Radioelectronic Systems and Complexes, MIREA – Russian University of Technology, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 20.05.2024; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 11.06.2024.

The article was submitted 20.05.2024; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 11.06.2024.