

УДК: 528.8:621.396.96

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-291-305

С.С. Козин¹, С.М. Макеев², Д.О. Маркин³

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОСИГНАЛОВ В ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

АННОТАЦИЯ

Описано применение средств моделирования среды разработки имитационных моделей AnyLogic, позволяющих наглядно понять основные принципы определения местоположения подвижных объектов наблюдения, являющихся источниками радиоизлучения. В статье приводятся основные результаты исследований различных подходов к решению задачи позиционирования источников радиосигналов на основе измерения уровня его мощности базовыми станциями беспроводных сетей передачи данных. Задача позиционирования решалась в условиях высокой подвижности источника радиосигналов. Для решения задачи применялся комплекс методов: трилатерация, нечеткая логика, метод статистических испытаний (Монте-Карло), метод дроблений, а также эвристический. Полученные результаты апробировались в разработанных прототипах в форме имитационных моделей в среде AnyLogic. В качестве исходных данных использовались натурные измерения, произведенные в реальных условиях эксплуатации систем позиционирования. В рамках проведенной работы получены следующие основные результаты: реализация комплекса моделирующих алгоритмов, осуществляющих ряд случайных процессов: движение источников радиосигналов и распространение радиоволн; алгоритмы, реализующие аналитический расчет предполагаемой области местоположения на основе различных методов. Разработан комплекс имитационных моделей систем позиционирования, позволяющий наглядно представить определение местоположения источника радиосигнала в городских условиях с учётом его подвижности. Сформулированы выводы в отношении результатов проведенных исследований. Научная значимость работы заключается в разработке эвристического алгоритма позиционирования, основанного на секторном разбиении и нечёткой логике. Практическая ценность работы состоит в разработке комплекса алгоритмов и их практической реализации в виде приложений на языке Java для среды моделирования AnyLogic, позволяющих исследовать эффективность различных алгоритмов прогнозирования на точность позиционирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование, система позиционирования, трилатерация, нечёткая логика.

¹ Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, ул. Приборостроительная, д. 35, 302015, Орёл, Россия, *e-mail*: sergei_kozin@mail.ru

² Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, ул. Приборостроительная, д. 35, 302015, Орёл, Россия, *e-mail*: maksm57@yandex.ru

³ Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, ул. Приборостроительная, д. 35, 302015, Орёл, Россия, *e-mail* mdo@academ.msk.rsnet.ru

Sergey S. Kozin¹, Sergey M. Makeev², Dmitriy O. Markin³

MODELING THE PROCESS OF POSITIONING OF RADIO SIGNAL SOURCES IN GEOINFORMATION SYSTEMS

ABSTRACT

The application of the tools of the AnyLogic simulation model development environment is described, which makes it possible to clearly understand the basic principles of identifying mobile objects that are sources of radio emission. The article presents the main research results of various approaches to solving the problem of positioning radio signal sources based on measuring the level of its power by base stations of wireless data transmission networks. The positioning problem was solved under conditions of high mobility of the radio signal source. To solve the problem, a set of methods was used: trilateration, fuzzy logic, statistical test method (Monte Carlo), splitting method, as well as heuristic. The results obtained were tested in the developed prototypes in the form of simulation models in the AnyLogic environment. Field measurements made in real operating conditions of positioning systems were used as initial data. Within the framework of this work, the following main results were obtained: implementation of a complex of modeling algorithms that carry out a number of random processes: motion of radio signal sources and propagation of radio waves; algorithms that implement the analytical calculation of the estimated location area based on various methods. A complex of simulation models of positioning systems has been developed, which makes it possible to visualize the determination of the location of a radio signal source in an urban environment, taking into account its mobility. Conclusions are formulated regarding the results of the conducted research. The scientific significance of the work lies in the development of a heuristic positioning algorithm based on sector partitioning and fuzzy logic. The practical value of the work lies in the development of a set of algorithms and their practical implementation in the form of applications in the Java language for the AnyLogic modeling environment, which allow investigating the effectiveness of various predictive algorithms for positioning accuracy.

KEYWORDS: modeling, positioning system, trilateration, fuzzy logic.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития инфотелекоммуникационных технологий предоставляют все больше возможностей по доступу к услугам и данным с использованием беспроводных сетей передачи данных (БСПД). Вместе с тем возникает и угроза использования данных сетей в незаконных целях, связанных с распространением запрещенных сведений, несанкционированным доступом к защищаемой информации, сбором сведений о гражданах, организациях и других. Данное обстоятельство обуславливает объективную потребность в решении задачи оперативного определения местоположения (позиционирования) вероятного источника угрозы нарушения безопасности, в первую очередь, средствами самой беспроводной сети передачи данных.

¹ Federal Security Guard of the Russian Federation Academy, st. Priborostroitel'naya, 35, 302015, Oryol, Russia,

e-mail: sergei_kozin@mail.ru

² Federal Security Guard of the Russian Federation Academy, st. Priborostroitel'naya, 35, 302015, Oryol, Russia,

e-mail: maksm57@yandex.ru

³ Federal Security Guard of the Russian Federation Academy, st. Priborostroitel'naya, 35, 302015, Oryol, Russia,

e-mail: mdo@academ.msk.rsnet.ru

Исследованиям вопросов использования БСПД в целях позиционирования источников радиоизлучения посвящены многочисленные исследования как отечественных, так и зарубежных ученых [Basiri, 2017, p. 1–12; Curran, 2011, p. 61–78; Mautz, 2009, p. 18–22; Uradzinski, 2017, p. 6509–6518]. Применение аппарата нечеткой логики для решения задачи позиционирования описано в трудах [Chen, 2016, p. 97–102; Kouyuncu, 2016, p. 121–128; Onofre, 2016, p. 169–177; Orujov, 2018, p. 335–348; Socha, 2016, p. 1–15]. Вопросами имитационного моделирования систем позиционирования посвящены работы [Камалов, 2020; Фокин, 2020].

Вместе с тем, точность современных систем позиционирования в совокупности с их сложностью, предъявляют повышенные требования к системам определения местоположения, которые в достаточной степени на данный момент не удовлетворены. Всё перечисленное выше обуславливает актуальность разработки новых алгоритмов определения местоположения подвижных источников радиосигналов, позволяющих повысить точность позиционирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки имитационной модели необходимо разработать алгоритмы, осуществляющие моделирование следующих процессов:

- моделирование псевдослучайного движения подвижного источника радиосигналов по территории города;
- моделирование скорости и ускорения подвижного источника радиосигналов по территории города;
- моделирование псевдослучайного процесса распространения радиосигналов в условиях города.

Для осуществления данных функций выбрана платформа имитационного моделирования AnyLogic. Схема модели представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема имитационной модели в среде AnyLogic

Fig. 1. Scheme of the simulation model in the AnyLogic environment

Блок-схема описанного выше алгоритма представлена на рисунке 2.

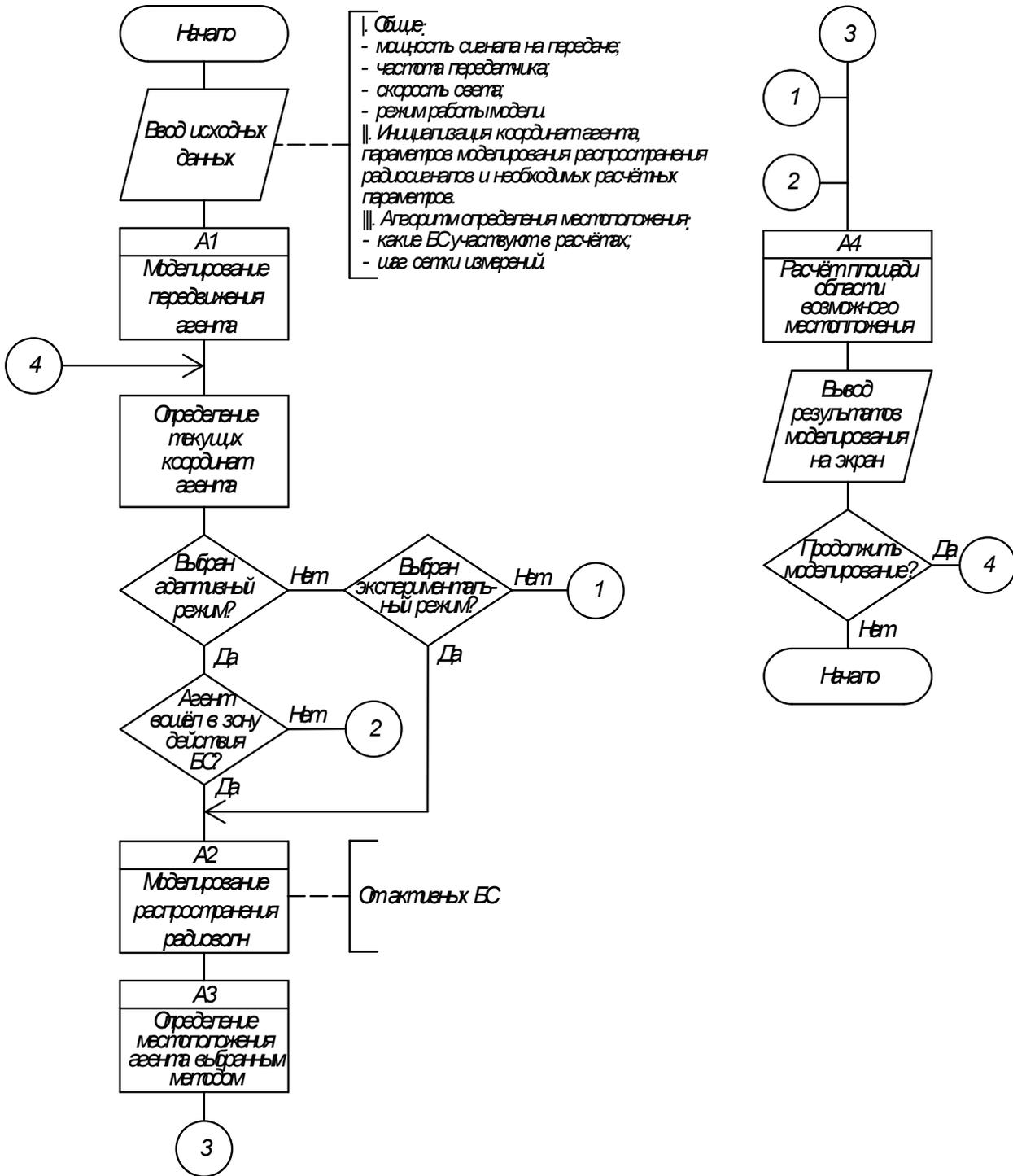


Рис. 2. Общий моделирующий алгоритм функционирования системы позиционирования подвижных источников радиосигналов

Fig. 2. General modeling algorithm for the functioning of the positioning system of mobile radio signal sources

В качестве местности, в которой происходит процесс моделирования, выбрана часть города Орла. Некоторые участки местности, используемые при моделировании, представлены на рисунках 3 и 4.



Рис. 3. Участок местности моделирования

Fig. 3. Area modeling terrain



Рис. 4. Фрагмент карты города Орла

Fig. 4. Fragment of the map of the city of Oryol

В разработанном программном обеспечении предусмотрено два основных режима отображения. Первый, представленный на рисунке 3, представляет собой изображение некоторого участка города, в котором предполагается перемещение объекта наблюдения. Изображение является некоторым слоем в среде имитационного моделирования AnyLogic, поверх которого вручную прорисовываются функциональные объекты, на которых в дальнейшем предусматривается перемещение агента, в основном в их число входят дороги и перекрёстки (карта рассматриваемого участка города, в котором предполагается перемещение объекта наблюдения, преобразованная в отдельный шейп-файл).

Далее при помощи инструментов среды имитационного моделирования AnyLogic, изображения дорог в данном файле преобразуются в участки дорог, по которым и передвигается агент, представляющий собой подвижный источник радиосигналов). Второй режим отображения, изображённый на рисунке 4, представляет собой ГИС-карту, подгружаемую в режиме онлайн с сервера при помощи сервиса OpenStreetMap. В данном случае все объекты представляют собой не просто отдельно взятые изображения, а являются самостоятельными функциональными объектами являющимися объектами

реального мира, т.е. агент моделирования перемещается по реально существующим маршрутам, которого представлены в настоящем мире, данный функционал обеспечивает постоянно обновляемые карта и поставщик маршрутов сервиса OpenStreetMap.

С точки зрения адекватности модели и наиболее полного её соответствия реальному миру, более выгодным является второй режим работы системы, однако, в случае необходимости отображения окружающего мира и самого объекта в 3D, пример представлен на рисунке 5, пользователю необходимо выбирать первый режим работы.



Рис. 5. 3D-модель рассматриваемого участка местности
Fig. 5. 3D-model of the considered area of the terrain

Последовательность точек траектории движения реализована в виде цепи Маркова. Модель перемещения пользователей получена за счет анализа статистики перемещения пользователя мобильного устройства и с использованием встроенного приложения [Маркин, 2013] сбора данных о его перемещениях.

Для имитации перемещения источника радиосигналов в условиях города применялся некий конечный автомат, в котором решения о поворотах, разворотах и перемещении объекта по прямой принимались на основе матрицы вероятностей. То есть в случаях передвижения объекта наблюдения по определённому маршруту и приближения его к участку, на котором имеется возможность изменения траектории движения (в условиях города таковыми чаще всего являются перекрёстки, повороты, пересечения улиц и т.д.) решение о траектории дальнейшего следования выбирается на основе вероятности, сопоставленной с каждым из смежных путей возможного дальнейшего перемещения. Данные вероятности распределены по равномерному закону распределения, что позволяет смоделировать случайное перемещение объекта в условиях города. Модули формирования движения объекта представлены на рисунках 6 и 7.

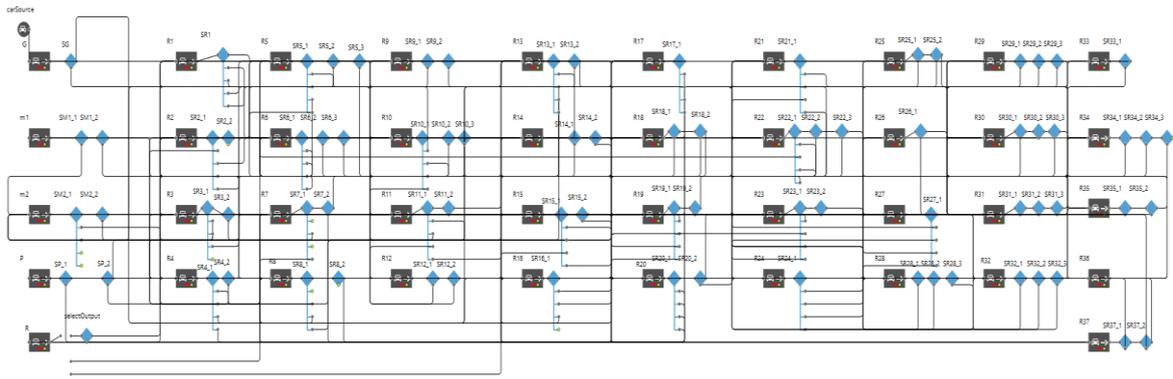


Рис. 6. Модель движения источника радиоизлучения в городских условиях на базе графических элементов управления в среде имитационного моделирования AnyLogic
 Fig. 6. A model of the movement of a radio emission source in an urban environment based on graphical controls in the AnyLogic simulation environment

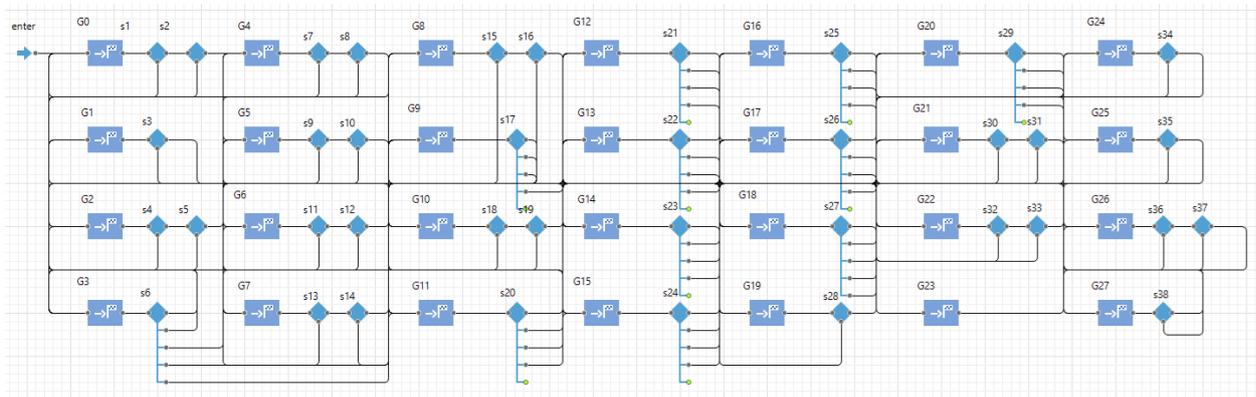


Рис. 7. Модель движения источника радиоизлучения в городских условиях на базе графических элементов управления в среде имитационного моделирования AnyLogic
 Fig. 7. A model of the movement of a radio emission source in an urban environment based on graphical controls in the AnyLogic simulation environment

Отличием данных модулей, реализованных в среде имитационного моделирования AnyLogic и соотнесённых как модели движения источника радиоизлучения в городских условиях в случае работы программного средства в различных режимах отображения (в виде слоя моделирования или в виде онлайн-подгружаемой карты геоинформационной системы (ГИС)), является то, что в первом случае объект выбирает необходимый дальнейший маршрут движения из тех, которые определены разработчиком (пользователем) заранее, а во втором случае выбор осуществляется из действительно существующих в реальном мире маршрутов, при этом в данном механизме движения указываются лишь конечные точки, до которых может добраться объект наблюдения, маршруты выбираются случайно, т.е. объект может добраться до указанного места назначения как по автомобильной, так по пешеходной, велосипедной или железнодорожной дороге. Данная особенность обеспечивает бо́льшую случайность передвижения источника радиоизлучения, что говорит о более высоком уровне адекватности модели.

Для имитации распространения радиосигналов в пространстве используется формула потерь для идеальной изотропной антенны:

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2}, \quad (1)$$

где P_t – мощность сигнала передающей антенны; P_r – мощность сигнала на приемной антенне; λ – длина волны радиосигнала, находящаяся из соотношения скорости света к частоте, несущей радиосигнала; R – расстояние, пройденное сигналом между двумя антеннами.

В качестве основных методов определения местоположения подвижного источника радиосигналов были выбраны метод трилатерации и нечёткой логики. Применение данных технологий для решения задач позиционирования подробно описано в работах [Вишнякова, 2013; Кондюрина, 2018; Маркин, 2015; Маркин, 2016]. В идеальных условиях уравнение для нахождения координат точки пересечения выглядят так:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = R_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = R_2^2 \\ \dots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = R_n^2 \end{cases}, \quad (2)$$

где (x, y) – координаты источника БСПД; (x_i, y_i) – координаты точек измерений агента, а n – их количество; R_i – рассчитанное расстояние от источника радиосигналов до точек измерения.

Из (1) получаем формулу для расчета радиуса для заранее известного источника радиосигналов:

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{P_r}}. \text{ прямоугольник ограниченный} \quad (3)$$

Реализация метода трилатерации в разрабатываемой системе представлена на рисунке 8.

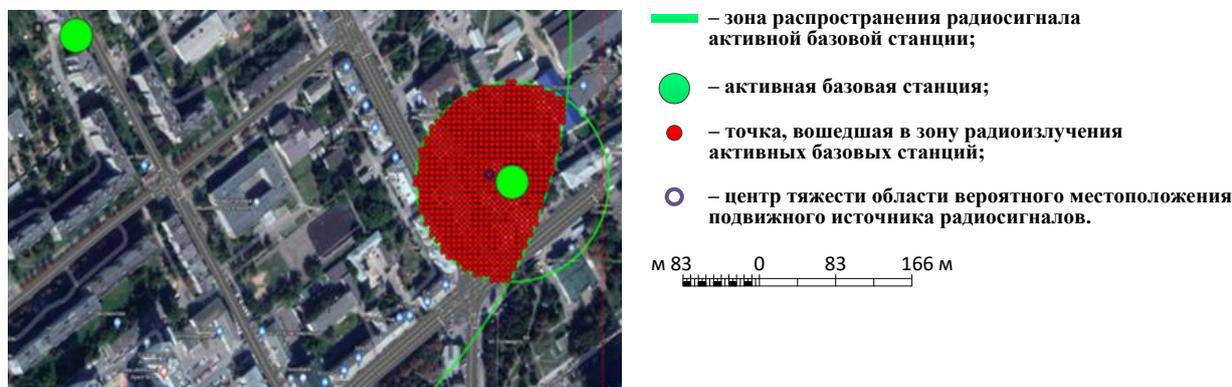


Рис. 8. Работа алгоритма трилатерации в разрабатываемой системе
 Fig. 8. Operation of the trilateration algorithm in the developed system

В идеальных условиях радиусы, вычисленные по формулам (2) и (3) будут равны, так как не вносятся погрешность. Математический аппарат, позволяющий учитывать погрешность в расчётах, реализован в нечёткой логике. Для поиска местоположения на основе нечёткой логики используется накопленная статистика с данными о максимальной и минимальной ошибке позиционирования. Благодаря такому подходу, зона предполагаемого местонахождения объекта из круга уменьшается до кольца (в двумерной плоскости). Демонстрация данного эффекта и работа данного метода в разрабатываемой системе показаны на рисунке 9.

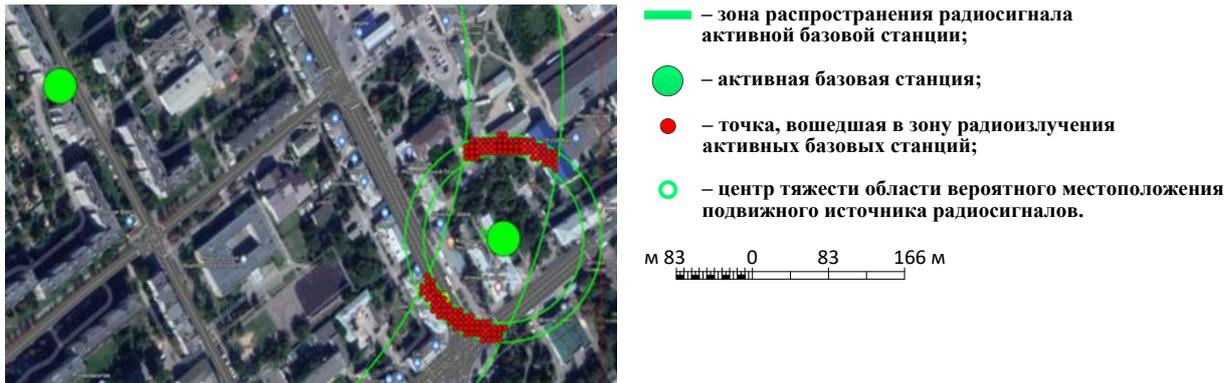


Рис. 9. Работа алгоритма нечёткой логики в разрабатываемой системе
 Fig. 9. Operation of the fuzzy logic algorithm in the developed system

Для определения более точного местоположения, необходимо произвести несколько расчетов, так как при большем количестве измерений, площадь поиска потенциального местоположения подвижного источника радиоизлучения уменьшается.

При построении множества окружностей, необходимо выбрать способ расчета площади криволинейных сложных фигур. Существуют различные способы расчета площади криволинейных фигур, необходимо выбрать менее затратный с точки зрения потребления памяти и более точный с точки зрения расчета, так как площадь является основным показателем качества алгоритма. Для расчета площади был выбран метод Монте-Карло. Данный метод работает по алгоритму, приведенному ниже.

1. Криволинейная площадь вносится в простую фигуру, чья площадь заранее известна, в нашем случае это прямоугольник ограниченный контролируемой зоной и горизонтом исследования.

2. Случайно вносятся точки на данную простую фигуру так, что координаты принадлежат простой фигуре и они случайны, так же координаты не должны повторяться. Для нашей системы случайность убрана, с целью более точного расчета площади. Для этого были перебраны все пиксели в простой фигуре.

3. После построения сложной фигуры, рассчитывается площадь по формуле:

$$S_{\text{иск}} = S \frac{K}{N},$$

где $S_{\text{иск}}$ – площадь искомой (сложной) фигуры; S – площадь известной фигуры;

K – количество точек, попавших в сложную фигуру; N – количество всех сгенерированных точек.

Для полной картины понимания, представлен рисунок 10 для двух точек измерения агентом.

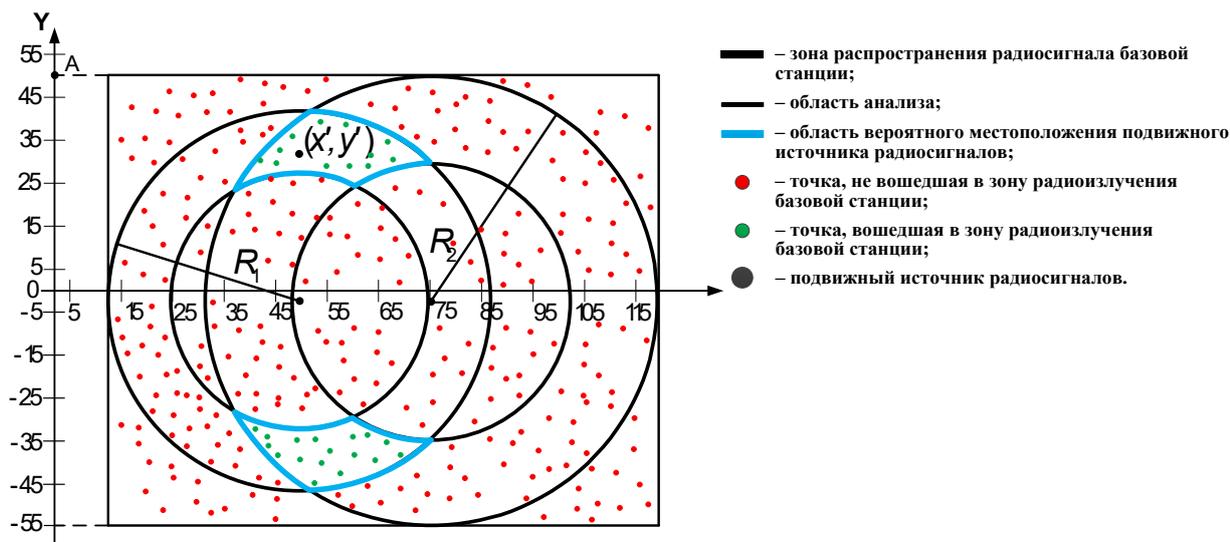


Рис. 10. Демонстрация работы метода Монте-Карло
 Fig. 10. Demonstration of the Monte Carlo method

Как видно из рисунков 9 и 10, при работе двух базовых станций (БС) возникают ситуации, в которых при работе алгоритма нечёткой логики область возможного нахождения подвижного объекта. Для устранения таких погрешностей и общего увеличения точности работы системы определения местоположения подвижного источника радиосигналов, был разработан эвристический алгоритм позиционирования (рис. 11) на основе разбиения области возможного местонахождения объекта.



Рис. 11. Блок-схема эвристического алгоритма позиционирования
 Fig. 11. Block diagram of a heuristic positioning algorithm

Центром тяжести области в рассматриваемой системе является точка, координаты которой вычисляются как среднее арифметическое между всеми точками, попавшими в заданную область. Центр тяжести может быть основным (без учета секторного разбиения) и частным (с учётом границ сектора разбиения).

Выбор сектора зависит от вычисленных расстояний между частными центрами тяжести каждого сектора и точкой, соотносённой с местоположением БС, предпочтительным является меньшее значение расстояния из получившихся.

Реализация данного алгоритма в разрабатываемой системе определения местоположения подвижного объекта представлена на рисунке 12 (в момент проведения вычислений).



Рис. 12. Работа эвристического алгоритма позиционирования в разрабатываемой системе

Fig. 12. The operation of the heuristic positioning algorithm in the developed system

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки эффективности методов и алгоритмов в разработанной системе определения местоположения подвижного источника радиосигналов был проведён ряд экспериментов при работе различного числа БС и различных алгоритмах определения местоположения.

Основными параметрами, относительно которых производится расчет эффективности разработанного прототипа программного средства, являются площадь области предполагаемого местоположения объекта наблюдения, а также расстояние от самого объекта до прогнозируемой, при помощи различных алгоритмов, точки.

Среднее число экспериментов для каждого из рассматриваемых случаев различно, и выбирается таким образом, чтобы именно при таком количестве испытаний процесс изменения параметров был наиболее приближен к эргодическому. Результаты эксперимента приведены в таблицах 1 и 2.

Табл. 1. Среднее значение площади возможного местоположения подвижного источника радиосигналов

Table 1. The average value of the area of the possible location of a mobile source of radio signals

Кол-во БС \ Алгоритм	Трилатерация, м ²	Нечёткая логика, м ²	Эвристический алг. прогн., м ²
Одна БС	7859,7	2092	2092
Две БС	1343,5	247	131,6
Три БС	386	33	16

Табл. 2. Среднее значение расстояния от прогнозируемой точки до подвижного источника радиосигналов

Table 2. The average value of the distance from the predicted point to the mobile source of radio signals

Кол-во БС \ Алгоритм	Трилатерация, м	Нечёткая логика, м	Эвристический алг. прогн., м
Одна БС	487,5	487,5	487,5
Две БС	286	270,7	11,2
Три БС	133	8,74	3,52

Из таблиц, представленных выше, видно, что наиболее точные результаты по двум рассматриваемым критериям эффективности разрабатываемой системы даёт использование эвристического алгоритма позиционирования. В свою очередь, метод трилатерации даёт наименее точные результаты по сравнению с другими алгоритмами рассматриваемой системы определения местоположения подвижных источников радиоизлучения, связано это с простотой реализации данного алгоритма по сравнению с другими предложенными.

Результаты исследования вопросов моделирования систем позиционирования подвижных источников радиосигналов на основе беспроводных сетей передачи данных показали следующее:

1. Алгоритм трилатерации позволяет определить местоположение подвижного объекта, но является наименее точным. Данный вывод обосновывается результатами экспериментов, проведённых в рамках работы данной системы, результаты, которых приведены выше.
2. Метод позиционирования на основе нечеткой логики позволяет значительно сузить область потенциального местоположения искомого подвижного источника радиосигналов, при этом, чем больше базовых станций предоставляют данные об уровне мощности радиосигнала от источника, тем меньше область потенциального местоположения и, соответственно, выше точность позиционирования.
3. Исследованный эвристический алгоритм позиционирования при совместной его работе с аппаратом нечёткой логики, а также применении метода линейного предсказания обеспечивает высокую точность определения местоположения подвижного источника радиосигналов. Обоснование данного вывода связано с тем, что данный алгоритм, основываясь на разбиении области, полученной при помощи нечёткой логики, позволяет убирать из рассмотрения те области, которые

удовлетворяют условиям распространения радиосигналов от БС, но в которых сам объект наблюдения не находится, что и обеспечивает большую точность позиционирования по сравнению с ранее рассмотренными алгоритмами.

ВЫВОДЫ

Работоспособность данной системы определения местоположения подвижных источников радиосигналов экспериментально проверена и подтверждена. Программные реализации методов, представленных в данной системе, зарегистрированы в ФИПС [Козин, 2020].

Основными направлениями дальнейшего совершенствования разработанного программного средства являются применение новых алгоритмов определения местоположения подвижного источника радиосигналов, направленных на большее уменьшение погрешностей при расчёте местоположения, предоставление пользователю программы возможности выбирать любой участок карты мира с высокой точностью детализации при помощи сервисов OpenStreetMap.

Реализованное программное средство может быть использовано для исследования, разработки и совершенствования систем определения местоположения подвижных источников радиосигналов. Полученные результаты могут быть использованы в области картографии и геоинформационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишнякова О.А., Лавров Д.Н., Лаврова С.Ю. Математическая модель обнаружения точки беспроводного доступа по измерениям мощности излучения разнесенными наблюдателям. Математические структуры и моделирование. 2013. № 2(28). С. 49–59.
2. Камалов Ю.Ю., Служивый М.Н. Имитационное моделирование мобильных систем связи в условиях городской застройки. Известия Самарского научного центра РАН, 2010. Т. 12. № 4(2). С. 341–345.
3. Козин С.С., Кузькин А.А., Маркин Д.О., Рябокони В.В., Свечников Д.А., Субботенко О.А. Программное средство определения местоположения подвижных источников радиосигналов на основе методов прогнозирования: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666496 Российская Федерация. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.12.2020 г.
4. Кондюрина А.А., Лавров Д.Н. Результаты эксперимента по обнаружению беспроводной точки доступа модифицированным методом трилатерации. Математические структуры и моделирование, 2018. № 2. С. 62–65.
5. Маркин Д.О. Исследование эффективности алгоритмов определения местоположения мобильных устройств внутри помещений. Вестник РГРТУ, 2015. № 54(1). С. 32–39.
6. Маркин Д.О., Комашинский В.В., Шекишев С.В. Анализатор контекста доступа мобильного устройства: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618388 Российская Федерация. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.09.2013 г.
7. Маркин Д.О., Макеев С.М. Модель системы определения местоположения мобильного устройства на основе метода статистических испытаний. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2016. № 2. С. 150–165.

8. *Фокин Г.А.* Технологии сетевого позиционирования 5G. СПб.: СПбГУТ, 2020. 466 с. DOI: 10.236724/2072-8735-2020-14-12-4-17.
9. *Basiri A., Lohan E.S., Moore T., Winstanley A., Petolta P., Hill C., Amirian P., Silva P.* Indoor location based services challenges, requirements and usability of current solutions. *Computer Science Review*, 2017. V. 24. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.03.002.
10. *Chen C.Y., Chen Y.J, Chen S.W., Shen C.Y., Hwang R.C.* A Fuzzy Indoor Positioning System with ZigBee Wireless Sensors. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2016. No 4(5). P. 97-102. DOI: 10.11648/j.jeee.20160405.12.
11. *Curran K., Furey E., Lunney T., Santos J., Woods D., McCaughey A.* An evaluation of indoor location determination technologies. *Journal of Location Based Services*, 2011. V. 5. No 2. P. 61–78. DOI: 10.1080/17489725.2011.562927.
12. *Koyuncu H., Yang S.H.* A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 2019. V. 10. No 5. P. 121–128. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.007.
13. *Mautz R.* Overview of current indoor positioning systems. *Geodezija ir kartografija*, 2009. V. 35. No 1. P. 18–22.
14. *Onofre S., Caseiro B., Pimentão J.P., Sousa P.* Using Fuzzy Logic to Improve BLE Indoor Positioning System. *Proc. of Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems. Technological Innovation for Cyber-Physical Systems*, 2016. P. 169–177. DOI: 10.1007/978-3-319-31165-4_18.
15. *Orujov F., Maskeli R., Damaševičius R., Ye Li W.W.* Smartphone based intelligent indoor positioning using fuzzy logic. *Future Generation Computer Systems*, 2018. No 89. P. 335–348. DOI:10.1016/j.future.2018.06.030.
16. *Socha M., Górká W., Kistorz I.* Fuzzy logic in indoor position determination system. *Theoretical and Applied Informatics*, 2016. V. 27. P. 1–15. DOI: 10.20904/272001.
17. *Uradzinski M., Guo H., Liu X., Yu M.* Advanced indoor positioning using zigbee wireless technology. *Wireless Personal Communications*, 2017. V. 97. No 4. P. 6509–6518.

REFERENCES

1. *Basiri A., Lohan E.S., Moore T., Winstanley A., Petolta P., Hill C., Amirian P., Silva P.* Indoor location based services challenges, requirements and usability of current solutions. *Computer Science Review*, 2017. V. 24. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.03.002.
2. *Chen C.Y., Chen Y.J, Chen S.W., Shen C.Y., Hwang R.C.* A Fuzzy Indoor Positioning System with ZigBee Wireless Sensors. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2016. No 4(5). P. 97–102. DOI: 10.11648/j.jeee.20160405.12.
3. *Curran K., Furey E., Lunney T., Santos J., Woods D., McCaughey A.* An evaluation of indoor location determination technologies. *Journal of Location Based Services*, 2011. V. 5. No 2. P. 61–78. DOI: 10.1080/17489725.2011.562927.
4. *Fokin G.A.* Technologies of 5G network positioning. Saint-Petersburg: SPbSUT, 2020. 466 p. (in Russian). DOI: 10.236724/2072-8735-2020-14-12-4-17.
5. *Kamalov Yu.Yu., Sluzhivy M.N.* Simulation modeling of mobile communication systems in urban development. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016. T. 12. No 4 (2). P. 341–345. (in Russian).
6. *Koyuncu H., Yang S.H.* A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 2019. V. 10. No 5. P. 121–128. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.007.
7. *Kozin S.S., Kuzkin A.A., Markin D.O., Ryabokon V.V., Svechnikov D.A., Subbotenko O.A.* Software for determining the location of mobile sources of radio signals based on

- forecasting methods: certificate of state registration of a computer program No 2020666496 Russian Federation. Registered in the Register of computer programs on 10.12.2020 (in Russian).
8. *Kondyurina A.A., Lavrov D.N.* Results of an experiment on detecting a wireless access point by a modified trilateration method. *Mathematical structures and modeling*, 2018. No 2. P. 62–65 (in Russian).
 9. *Markin D.O.* Study of the effectiveness of algorithms for determining the location of mobile devices in the room. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2015. No 54–1. P. 32–39 (in Russian).
 10. *Markin D.O., Komashinsky V.V., Shekshuev S.V.* Access context analyzer for a mobile device: certificate of state registration of a computer program No 2013618388 Russian Federation. Registered in the Register of computer programs 09.06.2013 (in Russian).
 11. *Markin D.O., Makeev S.M.* Model of a system for determining the location of a mobile device based on a statistical test method. *Bulletin of the Tula State University. Technical sciences*, 2016. No 2. P. 150–165 (in Russian).
 12. *Mautz R.* Overview of current indoor positioning systems. *Geodezija ir kartografija*, 2009. V. 35. No 1. P. 18–22.
 13. *Onofre S., Caseiro B., Pimentão J.P., Sousa P.* Using Fuzzy Logic to Improve BLE Indoor Positioning System. *Proc. of Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems. Technological Innovation for Cyber-Physical Systems*, 2016. P. 169–177. DOI: 10.1007/978-3-319-31165-4_18.
 14. *Orujov F., Maskeli R., Damaševičius R., Ye Li W.W.* Smartphone based intelligent indoor positioning using fuzzy logic. *Future Generation Computer Systems*, 2018. No 89. P. 335–348. DOI:10.1016/j.future.2018.06.030.
 15. *Socha M., Górka W., Kostorz I.* Fuzzy logic in indoor position determination system. *Theoretical and Applied Informatics*, 2016. V. 27. P. 1–15. DOI: 10.20904/272001.
 16. *Vishnyakova O.A., Lavrov D.N., Lavrova S.Yu.* Mathematical model of detection of wireless access by measuring the radiation power by spaced observers. *Mathematical structures and modeling*. Omsk: Omsk State University, 2013. No 2 (28). P. 49–59 (in Russian).
 17. *Uradzinski M., Guo H., Liu X., Yu M.* Advanced indoor positioning using zigbee wireless technology. *Wireless Personal Communications*, 2017. V. 97. No 4. P. 6509–6518.
-