

УДК 621.391

Локализация источников радиоизлучения подвижным приемником на основе измерений времени прихода периодических сигналов

Крыжко И. Б., Козьмин В. А., Сладких В. А.,
Токарев А. Б., Фатеев А. А.

Постановка задачи: Объектом локализации являются базовые станции (БС) сотовой связи. Оценка их координат на основе измерений времени прихода сигналов БС в территориально распределенные точки приёма позволяет определять расположение БС с высокой точностью, а тот факт, что БС со строгой периодичностью излучает в эфир наборы опорных сигналов, позволяет производить сбор данных и локализовывать БС единственным мобильным измерительным радиоприемным устройством (ИРПУ). **Целью работы** является разработка алгоритма обработки данных, собираемых единственным мобильным ИРПУ, для высокоточной локализации совокупности БС. **Новизна:** Разработанный алгоритм учитывает возможность излучения БС опорных сигналов в нескольких секторах; при этом опорные сигналы разных секторов по отношению друг к другу характеризуются случайным смещением во времени. Излучения от набора секторов алгоритм позволяет при оценке координат БС использовать синергично. **Результат:** Представлен алгоритм определения местоположения БС и математический аппарат, лежащий в его основе. Приведены теоретические и экспериментальные показатели точности. **Практическая значимость:** Продемонстрирована реализация алгоритма с использованием цифрового измерительного приемника. Показано, что практическое внедрение предложенного алгоритма позволяет осуществлять локализацию БС, находящихся в зоне радиодоступности, с типовой точностью порядка 100 м.

Ключевые слова: локализация, ТОА-метод, базовая станция системы связи, метод наименьших квадратов, случайные погрешности наблюдений.

Введение

Одной из задач, решаемых службами радиоконтроля, является поиск и локализация базовых станций (БС) сотовой связи для выявления несанкционированно работающих БС и проверки соблюдения частотно-территориального плана. Практика показывает, что в городских условиях, характеризуемых сложными условиями интерференции и отсутствием прямой видимости источников радиоизлучения (ИРИ), высокую точность локализации обеспечивают алгоритмы, основанные на измерении времени прихода сигналов от БС в территориально

Библиографическая ссылка на статью:

Крыжко И. Б., Козьмин В. А., Сладких В. А., Токарев А. Б., Фатеев А. А. Локализация источников радиоизлучения подвижным приемником на основе измерений времени прихода периодических сигналов // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 2. С. 87-104. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-087-104

Reference for citation:

Kryzhko I. B., Kozmin V. A., Sladkikh V. A., Tokarev A. B., Fateev A. A. Localization of radio sources by a mobile receiver based on measuring the time of arrival for periodic signals. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 2, pp. 87-104 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-087-104

распределенные пункты размещения измерительным радиоприемным устройством (ИРПУ) [1].

Отметим, что для формирования классической разностно-дальномерной системы (РДС) необходимы несколько работающих синхронно постов приёма, что позволяет измерять взаимные задержки прихода радиосигналов от локализуемых ИРИ на разные посты системы. Недостатками классических многопостовых РДС являются достаточно высокая стоимость, а при мобильном исполнении постов также сложность обеспечения высокоскоростного обмена данными и проблемы организации электропитания постов, их перебазирования по территории и синхронизации работы, если условия эксплуатации оказываются неблагоприятными для использования спутниковых систем радионавигации [2].

Особенностью же работы БС сотовой связи является периодическое излучение ею в эфир совокупности опорных сигналов. Каждая БС со строгой периодичностью излучает в эфир сигналы синхронизирующих последовательностей (ССП), а современные ИРПУ оснащены высокостабильными тактовыми генераторами, позволяющим оценивать изменение моментов прихода ССП на вход приёмника при его перемещении в пространстве. Это позволяет определять координаты БС на основе измерений единственного мобильного поста контроля.

Поскольку предлагаемый метод локализации БС основан на измерении времени прихода (time of arrival) опорных сигналов в разные точки пространства, далее будем кратко именовать его ТОА-методом. Следует отметить, что хотя в открытых источниках имеются работы по определению местоположения ИРИ, подобных БС, на основе ТОА-измерений, количество подобных работ невелико. Одной из работ, посвященных определению местоположения ИРИ единственным мобильным постом, перехватывающим поступающий от ИРИ периодический сигнал в разных точках на его траектории перемещения, является статья [3]. Эта работа демонстрирует работоспособность ТОА-метода при априори известном периоде излучения опорных сигналов, который, однако, может быть недостаточно стабильным. Несколько позже появились статьи [4, 5], в которых период излучения опорных сигналов неизвестен и определяется на основе обрабатываемых сигналов, среди которых могут наблюдаться пропуски. Вместе с тем перечисленные реализации ТОА-метода локализации не принимают во внимание, что БС систем сотовой связи, как правило, оснащают антеннами с секторными диаграммами направленности, а излучение ССП в разных секторах может производиться с случайным, значительным по величине смещением во времени. Это означает, что при перемещении мобильного поста контроля по маршруту движения эпизодически может происходить смена секторов обслуживания со случайной коррекцией временной привязки ССП. Как следствие, регистрацию ССП для разных секторов БС следует производить отдельно, а затем использовать совместную обработку накопленных сведений, согласованно используя данные, собранные для разных секторов излучения.

В настоящей работе представлен алгоритм локализации БС на основе оценки времени прихода сигналов БС в разные точки пространства, определяе-

мые маршрутом передвижения мобильного ИРПУ, а также математический аппарат для совместной обработки ССП, излучаемых разными секторами БС. Приведены примеры локализации БС, полученные при практической эксплуатации системы. Представлены сведения об обеспечиваемых на практике погрешностях локализации.

Метод локализации БС

Источниками первичных данных для оценки расположения БС служат периодически формируемые ССП, период τ излучения которых определяется реализуемым БС стандартом сотовой связи, а время наблюдения сигналов фиксируется на основе локальной шкалы времени ИРПУ.

Для максимизации точности, обеспечиваемой ТОА-методом, было бы полезно обеспечить привязку временных измерений к единой шкале Всемирного координированного времени (UTC), однако на практике обеспечить это удаётся не всегда. Вместо этого используется локальная шкала времени ИРПУ, формируемая его тактовым генератором. Это несколько снижает точность, однако в современных системах радиоконтроля (СРК) генераторы способны долговременно сохранять стабильность локальных шкал времени. К примеру, согласно публикации [6] кварцевые генераторы с двойным термостатированием (впрочем, как и ряд иных) обладают нестабильностью частоты порядка 10^{-10} . Это означает, что на интервалах времени в несколько минут погрешности локальной шкалы времени не превышают нескольких наносекунд, что оказывается достаточным для весьма точной локализации БС. Факт, что смещение (привязка «нуля») подобной локальной шкалы относительно UTC носит случайный характер, не является реальным препятствием к её использованию, а лишь означает, что регистрируемые ИРПУ моменты наблюдения опорных сигналов будут известны с точностью до некоторой неизвестной константы, устраняемой по ходу решения задачи.

Будем далее полагать, что анализируемая БС включает в себя M секторов и что частота опорного генератора приемника на протяжении процедуры локализации БС остаётся постоянной (хотя может и не совпадать с номиналом), а поэтому рассогласование шкалы времени с UTC можно считать изменяющимся по линейному закону. Тогда по отношению к локальной шкале времени ИРПУ моменты $t_{m,i}$ излучения ССП должны быть связаны между собой соотношениями

$$t_{m,i} = T_m + s_{m,i}\tau + kt_{m,i}, \quad (1)$$

где T_m – момент излучения стартовой (начальной) последовательности синхроимпульсов m -го сектора по локальной шкале времени ИРПУ, τ – период отсылки синхропоследовательностей, определяемый стандартом связи, $s_{m,i}$ – количество периодов отсылки ССП к моменту i -го измерения для m -го сектора, k – коэффициент, характеризующий рассогласование шкал времени БС и ИРПУ, определяемый рассогласованием частот опорных генераторов (отсутствует при син-

хронизации шкал времени БС и приёмника с шкалой UTC). Условимся заранее совокупность входящих в (1) стартовых моментов T_m и коэффициент k рассогласования шкал именовать далее вектором параметров, не зависящих от координат ИРИ:

$$\mathbf{L} = (T_1 \ T_2 \ \dots \ T_M \ k)^T. \quad (2)$$

Регистрируемые ИРПУ моменты $z_{m,i}$ наблюдения ССП запаздывают по отношению к $t_{m,i}$ на временной интервал, зависящий от взаимного расположения приёмника и ИРИ, а также демонстрируют волатильность значений, порождаемую различными случайными факторами. А потому последовательность измеренных моментов появления ССП может быть представлена в виде

$$z_{m,i} = t_{m,i} + c^{-1} \cdot \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(t_{m,i})\| + \xi_{m,i}, \quad (3)$$

где $t_{m,i}$ – моменты излучения ССП, c – скорость распространения электромагнитных волн, \mathbf{p} – координаты ИРИ, $\mathbf{r}(t_{m,i})$ – текущие координаты ИРПУ в i -й контрольной точке среди измерений, относящихся к m -му сектору, $\xi_{m,i}$ – случайная поправка, отражающая погрешности измерений.

Как следует из (3), значения $z_{m,i}$ зависят как от вектора параметров \mathbf{L} , так и от оцениваемых координат \mathbf{p} места расположения ИРИ. Объединенный вектор параметров, влияющих на результаты измерений $z_{m,i}$, запишем в виде

$$\mathbf{x} = (\mathbf{L}^T \ \mathbf{p}^T)^T. \quad (4)$$

Отметим, что значения $t_{m,i}$ могут быть получены на ИРПУ лишь расчетным путем, а непосредственно в измерениях недоступны. Как следствие, в выражении (3) вместо $\mathbf{r}(t_{m,i})$ на практике используются $\mathbf{r}(z_{m,i})$, однако даже если измерения производятся при движении мобильного ИРПУ, то применительно к любой реальной скорости передвижения разница $\mathbf{r}(z_{m,i}) - \mathbf{r}(t_{m,i})$ оказывается исчезающе малой. Что же касается слагаемого « $kt_{m,i}$ » в (1), то замена $t_{m,i}$ на $z_{m,i}$ будет сопровождаться появлением погрешности $k(z_{m,i} - t_{m,i})$. Величина рассогласования k для худших случаев не превосходит 10^{-7} и влиянием подобных малых поправок на оценивание координат ИРИ можно пренебречь. По указанным причинам замену $t_{m,i} \rightarrow z_{m,i}$ в двух упомянутых компонентах далее будем считать допустимой.

В предположении, что погрешности $\xi_{m,i}$ распределены по одному закону, согласно методу наименьших квадратов [7, 8] решение задачи локализации ИРИ по измерениям (4) сводится к задаче минимизации функционала

$$J(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{w}, \quad (5)$$

где \mathbf{x} – вектор неизвестных параметров, подлежащих определению (4), \mathbf{w} – вектор-столбец, состоящий из элементов

$$w_s = z_{m,i} - c^{-1} \cdot \left\| \mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{m,i}) \right\| - (T_m + s_{m,i}\tau + kz_{m,i}), \quad (6)$$

пронумерованных с использованием некоторого сквозного индекса s , соответствующего каждой уникальной паре индексов $\{m,i\}$, а \mathbf{R} – ковариационная матрица погрешностей измерений с элементами

$$R_{l,m} = M \left[\xi_l \xi_m \right]. \quad (7)$$

Если измерения (3) можно считать независимыми и равноточными, матрица \mathbf{R} будет иметь простой вид $\mathbf{R} = \sigma_\xi^2 \mathbf{I}$, где \mathbf{I} – единичная матрица (диагональная матрица, элементы на главной диагонали которой равны единице), и вид функционала (5) существенно упрощается:

$$J(\mathbf{x}) = \sigma_\xi^{-2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} = \sigma_\xi^{-2} \sum_s w_s^2. \quad (8)$$

Измерения (3) являются нелинейными, так что в допустимой зоне изменений \mathbf{x} может иметься несколько локальных экстремумов. Вследствие этого задача минимизации (5) или (8) решается в два этапа. На первом этапе происходит поиск приближений к локальным минимумам, после чего, на втором этапе, при необходимости происходит уточнение координат, например, итерационным методом Ньютона.

Поиск начального приближения координат БС

Учтём особенности обрабатываемых исходных данных. Источником проблем служит тот факт, что движение мобильного ИРПУ по маршруту, как правило, сопровождается замираниями сигналов и хаотичным чередованием секторов обслуживания. А потому вместо непрерывной и упорядоченной цепочки измерений $z_{m,i}$ исходные данные по каждому сектору представлены одной или несколькими фрагментарными цепочками измерений с неизвестными последовательностями значений $s_{m,i}$ в каждой цепочке. И вместо попыток восстановления неизвестных величин $s_{m,i}$ оказывается целесообразным перейти от слежения за абсолютными значениями $t_{m,i}$ к оценке их отклонений от равномерной сетки моментов времени с периодом τ :

$$\tilde{t}_{m,i} = t_{m,i} - \tau \cdot \text{round} \left[t_{m,i} / \tau \right] = T_m + kz_{m,i}. \quad (9)$$

Для конкретизации первого этапа расчетной процедуры локализации (вычисление начального приближения к координатам) сформируем соответствующую вектору \mathbf{L} матрицу не зависящих от расположения ИРИ коэффициентов \mathbf{H} , а также представим вектором $\tilde{\mathbf{t}}(\mathbf{p})$ зависимость отклонений (9) прогнозируемых моментов излучения ССП от расстояний между ИРПУ и ИРИ:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & z_{1,1} \\ 1 & 0 & 0 & z_{1,2} \\ & & & \\ 1 & 0 & 0 & z_{1,I_1} \\ 0 & 1 & 0 & z_{2,1} \\ & 1 & 0 & z_{2,2} \\ & & & \\ 0 & 1 & 0 & z_{2,I_2} \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & 1 & z_{M,1} \\ 0 & 0 & 1 & z_{M,2} \\ & & & \\ 0 & 0 & 1 & z_{M,I_M} \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{t}}(\mathbf{p}) = \begin{pmatrix} z_{1,1} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{1,1}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,1})\|}{c} \\ z_{1,2} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{1,2}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,2})\|}{c} \\ & & & \\ z_{1,I_1} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{1,I_1}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,I_1})\|}{c} \\ z_{2,1} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{2,1}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,1})\|}{c} \\ z_{2,2} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{2,2}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,2})\|}{c} \\ & & & \\ z_{2,I_2} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{2,I_2}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,I_2})\|}{c} \\ & & & \\ & & & \\ z_{M,1} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{M,1}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,1})\|}{c} \\ z_{M,2} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{M,2}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,2})\|}{c} \\ & & & \\ z_{M,I_M} - \tau \cdot \text{round} \left[\frac{z_{M,I_M}}{\tau} \right] - \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,I_M})\|}{c} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где I_m – количество измерений, выполненных для сектора с номером m .

Тогда оказывается возможным объединить данные, собранные для всех M секторов, в единой матричной форме

$$\mathbf{H}\mathbf{L} = \tilde{\mathbf{t}}(\mathbf{p}) + \xi, \quad (11)$$

Отметим, что по отношению к координатам \mathbf{p} функционал (5), является нелинейным, а по отношению к компонентам \mathbf{L} – линейным. Это означает, что при поиске минимума (5) целесообразно осуществлять первичный поиск по \mathbf{p} методом перебора, а вот для определения соответствующей текущим координатам \mathbf{p} компоненты \mathbf{L} можно использовать решение системы линейных уравнений. Действительно, для каждого варианта \mathbf{p} потенциального расположения ИРИ, оценку вектора \mathbf{L} можно рассчитать по правилу

$$\mathbf{L} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{t}}(\mathbf{p}). \quad (12)$$

При этом \mathbf{H} не зависит от проверяемых координат \mathbf{p} , а потому матрица $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ может вычисляться один раз для всех точек области допустимых значений \mathbf{p} .

При этом, очевидно, матрица $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ имеет вид

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} = \begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^{I_1} z_{1,i} \\ 0 & I_2 & 0 & \sum_{i=2}^{I_2} z_{2,i} \\ 0 & 0 & I_M & \sum_{i=1}^{I_M} z_{M,i} \\ \sum_{i=1}^{I_1} z_{1,i} & \sum_{i=2}^{I_2} z_{2,i} & \sum_{i=1}^{I_M} z_{M,i} & \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{I_m} z_{m,i}^2 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Как следствие, для поиска начального приближения координат ИРИ следует:

- 1) «накрыть» область возможных координат ИРИ относительно густой «сеткой» проверяемых значений \mathbf{p} ;
- 2) для каждой точки \mathbf{p} этой сетки (не задаваясь вопросом, насколько она близка к реальным координатам ИРИ) рассчитать в соответствии с (10), (12), (13) соответствующий проверяемым координатам \mathbf{p} вектор \mathbf{L} ;
- 3) для объединенного вектора \mathbf{x} рассчитать значение функционала (5) или (8) для каждой точки сетки. Сопоставляя получаемые значения, определить вектор, на котором достигается минимум $J(\mathbf{x})$. Использовать этот вектор \mathbf{x} в качестве начального для процедуры итерационного уточнения, описанной ниже.

Уточнение координат БС

Опишем процедуру итерационного уточнения вектора неизвестных параметров \mathbf{x} . Обозначим через \mathbf{x}_n приближение к \mathbf{x} , полученное n -м шаге. Применительно к входящей в \mathbf{x}_n оценке \mathbf{p}_n координат БС на n -м шаге итерации, невязки измерений будут равны

$$\Delta z_{m,i} = z_{m,i} - c^{-1} \cdot \left\| \mathbf{p}_n - \mathbf{r}(z_{m,i}) \right\| - \left((T_m)_n + s_{m,i} \tau + k_n z_{m,i} \right). \quad (14)$$

Линеаризуем уравнение (1) вблизи приближения объединенного вектора параметров \mathbf{x}_n , полученного на n -том шаге процедуры. Взаимосвязь между невязкой $\Delta z_{m,i}$, приращением координат $\Delta \mathbf{p}$ и приращениями прочих переменных может быть получена варьированием уравнения (3)

$$\Delta z_{m,i} \approx \Delta T_m + \Delta k z_{m,i} + c^{-1} \frac{\partial \left\| \mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{m,i}) \right\|}{\partial \mathbf{p}} \Bigg|_{\mathbf{p} = \mathbf{p}_n} \cdot \Delta \mathbf{p}; \quad (15)$$

входящая в (15) частная производная имеет вид

$$\frac{\partial \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{m,i})\|}{\partial \mathbf{p}} = \left(\frac{p_x - r_x(z_{m,i})}{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{m,i})\|}, \frac{p_y - r_y(z_{m,i})}{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{m,i})\|} \right).$$

Объединив уравнения (15) для всех измерений, получим систему линейных алгебраических уравнений для шага уточнения

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_n) \Delta \mathbf{x}_n \approx \Delta \mathbf{z}_n, \quad (16)$$

где $\mathbf{G}(\mathbf{x}_n)$ является объединением всех строк (15), в которые приращения переменных $\Delta \mathbf{x} = (\Delta \mathbf{L}^T \Delta \mathbf{p}^T)^T$ входят линейно:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_n) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & (p_{nx} - r_x(z_{1,1}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,1})\| & (p_{ny} - r_y(z_{1,1}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,1})\| \\ 1 & 0 & \dots & 0 & (p_{nx} - r_x(z_{1,2}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,2})\| & (p_{ny} - r_y(z_{1,2}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,2})\| \\ \\ 1 & 0 & \dots & 0 & (p_{nx} - r_x(z_{1,I_1}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,I_1})\| & (p_{ny} - r_y(z_{1,I_1}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{1,I_1})\| \\ 0 & 1 & \dots & 0 & (p_{nx} - r_x(z_{2,1}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,1})\| & (p_{ny} - r_y(z_{2,1}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,1})\| \\ 0 & 1 & \dots & 0 & (p_{nx} - r_x(z_{2,2}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,2})\| & (p_{ny} - r_y(z_{2,2}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,2})\| \\ \\ 0 & 1 & \dots & 0 & (p_{nx} - r_x(z_{2,I_2}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,I_2})\| & (p_{ny} - r_y(z_{2,I_2}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{2,I_2})\| \\ \\ 0 & 0 & \dots & 1 & (p_{nx} - r_x(z_{M,1}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,1})\| & (p_{ny} - r_y(z_{M,1}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,1})\| \\ 0 & 0 & \dots & 1 & (p_{nx} - r_x(z_{M,2}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,2})\| & (p_{ny} - r_y(z_{M,2}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,2})\| \\ \\ 0 & 0 & \dots & 1 & (p_{nx} - r_x(z_{M,I_M}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,I_M})\| & (p_{ny} - r_y(z_{M,I_M}))/c \|\mathbf{p} - \mathbf{r}(z_{M,I_M})\| \end{pmatrix}, \quad (17)$$

а вектор невязок $\Delta \mathbf{z}_n$ формируется из компонент (14) сквозной перенумерацией измерений, аналогичной той, что использовалась в (6).

С использованием этих обозначений один шаг итерационного уточнения может быть записан в виде

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \left(\mathbf{G}^T(\mathbf{x}_n) \mathbf{G}(\mathbf{x}_n) \right)^{-1} \mathbf{G}^T(\mathbf{x}_n) \Delta \mathbf{z}_n, \quad (18)$$

а точность решения задачи локализации может быть оценена в форме

$$M(\Delta \mathbf{x} \Delta \mathbf{x}^T) = \sigma_\xi^2 (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1}, \quad (19)$$

где для переменных $\Delta \mathbf{x}$ и \mathbf{G} опущен индекс завершающей итерации.

Блок-схема итогового алгоритма обработки данных при локализации БС разработанным ТОА-методом представлена на рис. 1.

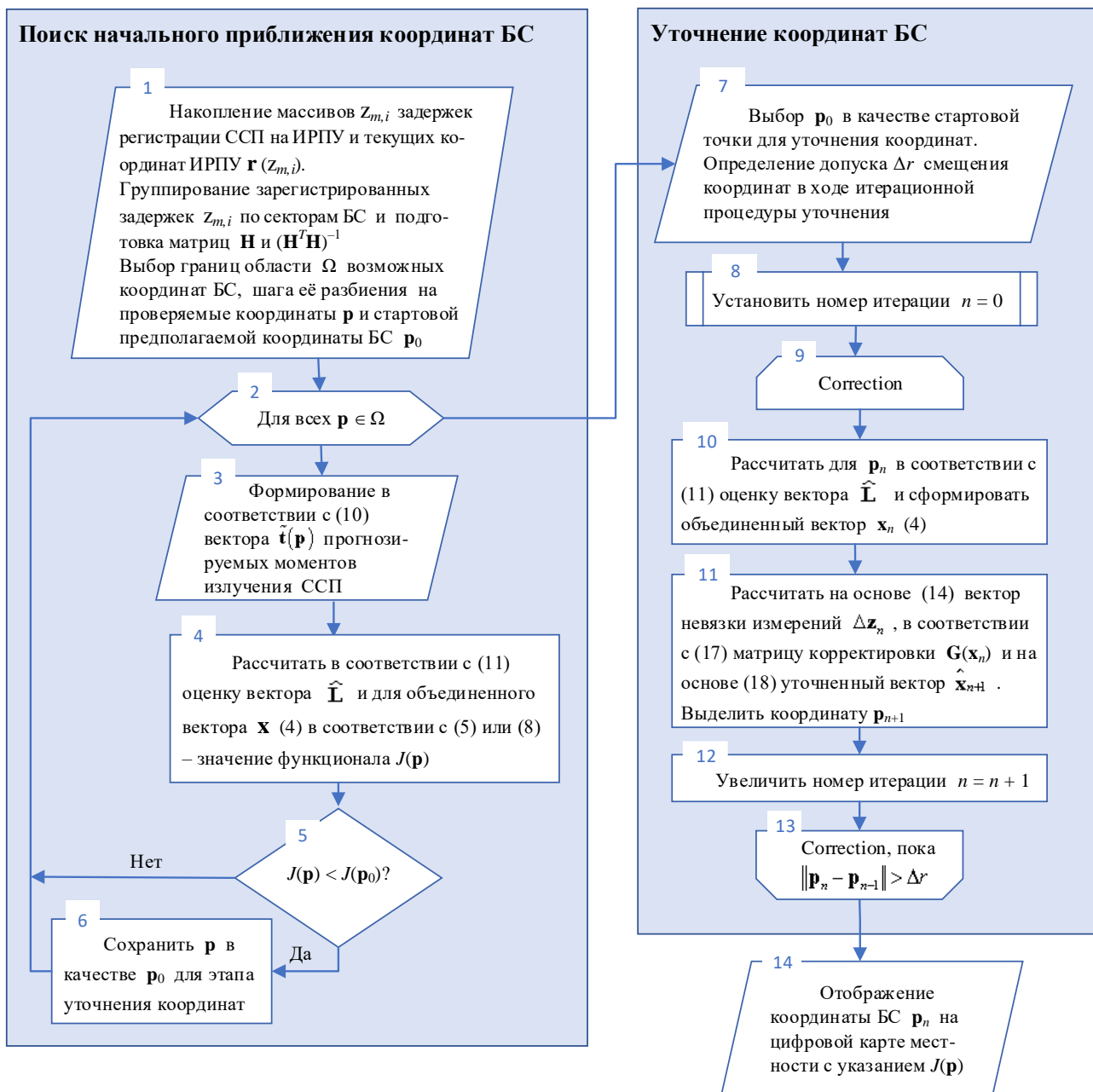


Рис. 1. Блок-схема алгоритма локализации БС

Исследование точности ТОА-алгоритма локализации БС

Для иллюстрации потенциальных точностных характеристик локализации ИРИ построим поле ожидаемых погрешностей, вычисленных по формуле (19). На рис. 2 - 5 представлены возможные поля погрешностей для случая перемещения мобильного поста по П-образной траектории с протяженностью каждой из сторон в 1 км и с регистрацией ССП в среднем через каждые 50 м этой траектории (точки наблюдения ССП представлены на рис. 2 - 5 красными маркерами). При расчетах предполагалось, что случайные поправки $\xi_{m,i}$, отражающие неточность измерений в (3), характеризуются среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_\xi = 167$ нс (что геометрически соответствует 50 м).

Перемещение мобильного поста по территории на практике будет сопровождаться сменой секторов БС, причем на процесс переключения будет влиять взаимное расположение БС и маршрута перемещения, а также ряд иных, трудно прогнозируемых заранее факторов. Вследствие проблематичности предсказания смены секторов БС было принято решение при моделировании формально приписать первому сектору излучение при движении ИРПУ по верхней части траектории, второму – по боковой, третьему – по нижней.

Анализируемый алгоритм локализации ИРИ не накладывает жёстких ограничений на размеры проверяемой области поиска координат ИРИ. Вместе с тем, при существенном удалении проверяемой позиции \mathbf{p} от траектории перемещения мобильного поста обеспечить приемлемую точность локализации становится проблематично. И при проведении моделирования поиск ИРИ было решено ограничить областью Ω , отстоящей от центра траектории перемещения не более чем на 2,5 км. Соответственно, на рис. 2-5 поиск возможных координат ИРИ производился на территории размером 5×5 км (которая в реальных испытаниях может быть и более широкой, и более компактной), а представленные на графиках линии уровня для разнообразных возможных координат размещения ИРИ показывают соответствующую такому размещению ожидаемую среднеквадратическую погрешность определения места расположения ИРИ.

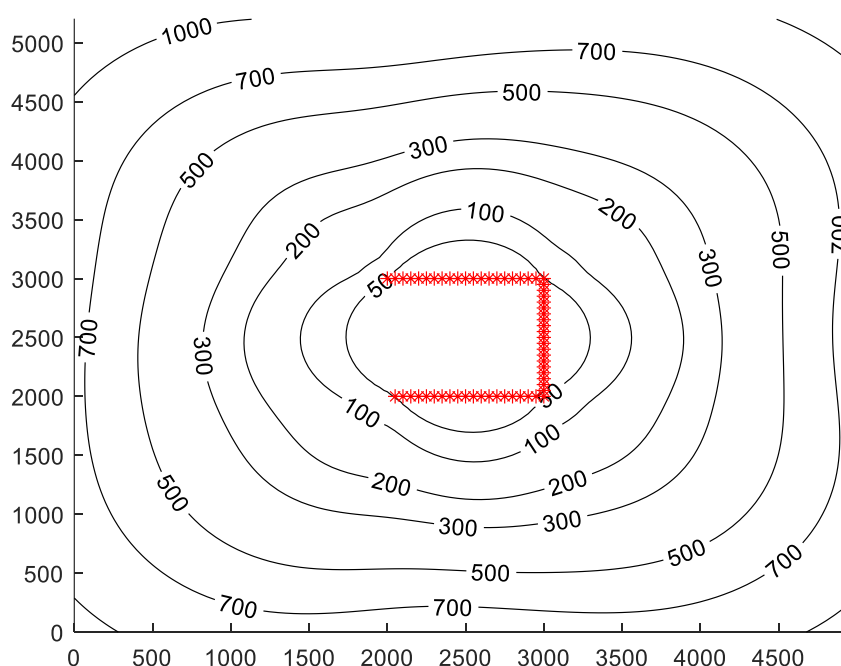


Рис. 2. Поле погрешностей при синхронизации локальных шкал и БС, и ИРПУ с шкалой Всемирного координированного времени (UTC) и регистрации ССП от одного сектора БС

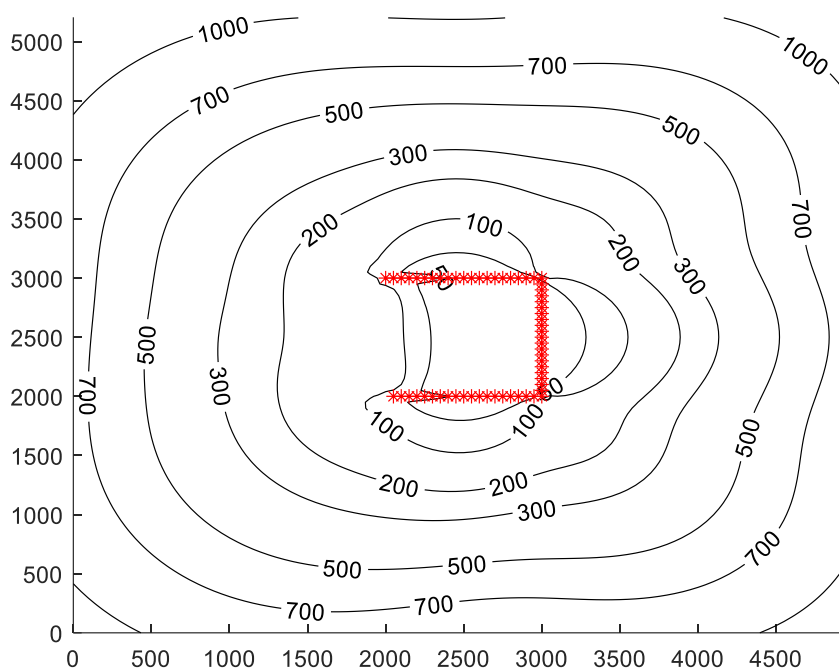


Рис. 3. Поле погрешностей без внешней синхронизации шкал времени и регистрации ССП от одного сектора БС

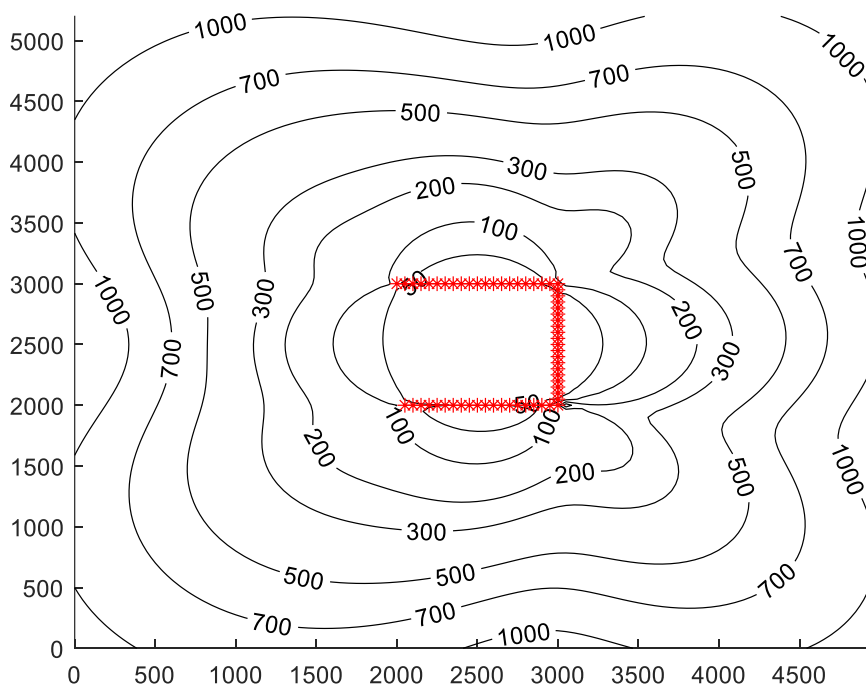


Рис. 4. Поле погрешностей при синхронизации локальных шкал и БС, и ИРПУ с шкалой Всемирного координированного времени (UTC) и регистрации ССП при измерениях сигналов трех секторов БС

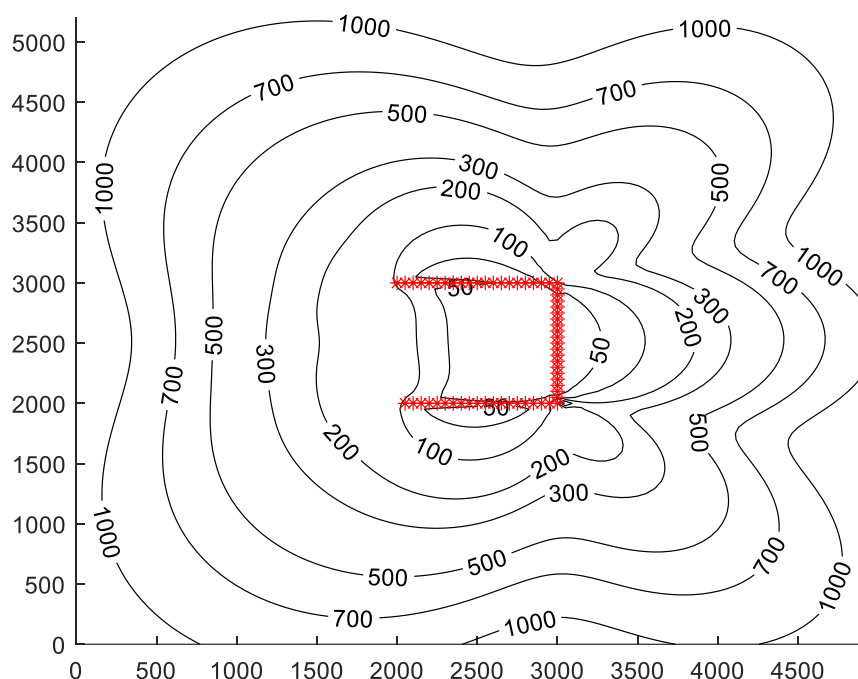


Рис. 5. Поле погрешностей без внешней синхронизации шкал времени и приёме ССП от трех разных секторов БС

Несколько лучшие показатели (меньшее ожидаемое СКО локализации ИРИ), представленные на рис. 2 и 4, соответствуют ситуации, когда шкалы времени опорных генераторов БС и ИРПУ синхронизированы с шкалой UTC, а потому нет необходимости оценивать коэффициент рассогласования шкал k , который обязан быть равным нулю. Если же синхронизация локальных шкал времени с шкалой UTC не гарантирована (рис. 3 и 5), то необходимость оценивания коэффициента k влечёт некоторый (незначительный) рост погрешности локализации.

Как непосредственно видно из анализа приведенных полей, появление дополнительных, требующих определения параметров (рассогласования частоты, смещение времен различных секторов относительно шкалы времени ИРПУ) хотя и сопровождается ухудшением точности локализации, но не приводит к принципиальным изменениям предполагаемых точностных характеристик.

Пример системы локализации ИРИ

Рассмотрим пример практической реализации системы локализации БС единственным мобильным постом радиоконтроля, реализованным на базе измерительного РПУ АРГАМАК-И (рис. 6) [9]. Измерительный радиоприёмник установлен на автомобильный носитель; для отслеживания передвижения по маршруту мобильный пост оснащен системой навигации (рис. 7).

На рис. 8 показан пример трека передвижения ИРПУ при проведении натурных испытаний. Перемещаясь по маршруту, пост радиоконтроля выполнял

поиск в эфире сигналов БС разных операторов; для каждой обнаруженной БС регистрировались моменты регистрации ССП (с группированием по секторам БС) и оценивалось расположение БС на местности.



Рис. 6. РПУ АРГАМАК-И



Рис. 7. Размещение приемной и навигационной антенн на крыше автомобиля

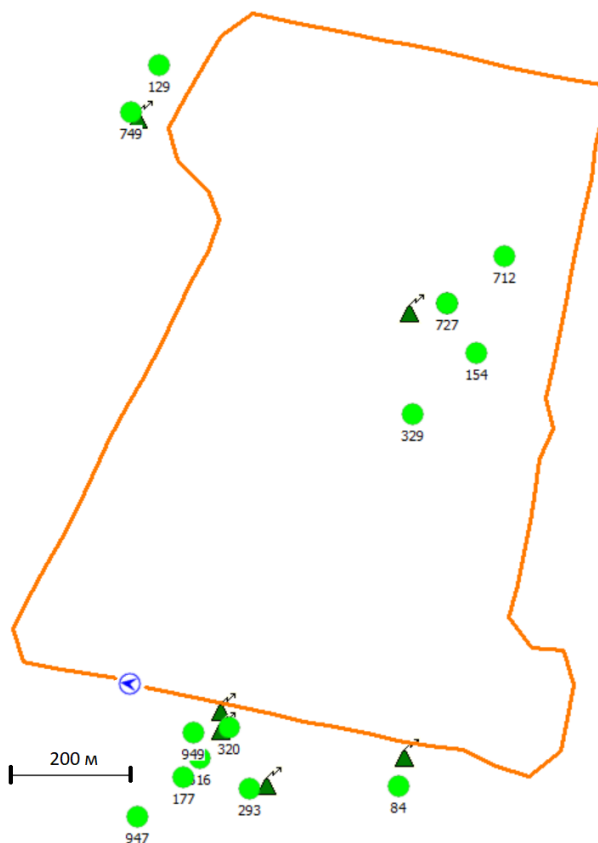


Рис. 8. Результаты натурных испытаний системы локализации БС

Результаты локализации БС с соблюдением масштаба показаны на рис. 8 круговыми маркерами (цифры рядом с маркером указывают идентификационный номер БС). Истинные места размещения БС (реперные точки) отмечены на рис. 8 треугольными маркерами. Разброс расчетных позиций БС (кружки) по отношению к реперным точкам показывает, что достаточно часто погрешность локализации составляет менее 100 м, однако для некоторых БС ошибка может достигать 200 м.

Более точные и детальные сведения о качестве локализации БС разработанным алгоритмом представлены в таблице 1, где приведены не только итоговые погрешности определения координат БС, но и указано количество измерений, использованных для локализации.

В целом результаты, представленные в таблице 1, соответствуют по порядку величинам ожидаемых погрешностей, представленных на рис. 2-5. Среднеквадратическая погрешность определения координат в проведенных натуральных испытаниях составила $\sigma = 110,18$ м.

Таблица 1 – Погрешность оценивания координат БС разработанным ТОА-алгоритмом

№ п/п	Идентификатор обнаруженной БС	Технология	Количество измерений	Расстояние до реперной точки, м
1	154	LTE	32	138,68
2	624	LTE	45	64,76
3	616	LTE	30	66,52
4	320	UMTS	11	40,27
5	84	LTE	28	59,11
6	177	UMTS	16	108,23
7	712	GSM	35	181,31
8	949	GSM	101	64,15
9	749	UMTS	22	11,9
10	129	GSM	120	85,31
11	947	LTE	31	208,19
12	727	LTE	45	64,76
13	293	UMTS	63	32,39
14	329	GSM	85	179,65

Заключение

Традиционным способом повышения точности локализация источников радиоизлучений в условиях городской застройки является увеличение количества постов сбора данных, однако использование многопостовой системы локализации далеко не всегда оказывается приемлемым на практике. Однако, если объектами локализации оказываются источники, радиоизлучение которых ха-

рактируется периодической временной структурой, то для таких ИРИ предлагаемый в работе метод обеспечивает локализацию даже при использовании единственного мобильного поста, оснащенного одноканальным измерительным радиоприёмным устройством. К числу ИРИ, местоположение которых можно эффективно определять подобным способом, относятся базовые станции (БС) сотовой связи поколений 2G, 3G, 4G, 5G.

Перемещаясь по маршруту, мобильный пост периодически принимает опорный сигнал БС, тем самым создавая массив территориально разнесенных измерений. В работе представлен математический аппарат, обеспечивающий локализацию БС на основе высокоточной оценки моментов регистрации её опорных сигналов, произведена теоретическая оценка точностных показателей разработанного алгоритма, а также приведены результаты практической апробации, подтвердившие, что предложенный метод локализации обеспечивает точность, достаточную для эффективного решения задач радиоконтроля. Показано, что типовая среднеквадратическая погрешность определения координат БС с помощью разработанного алгоритма составляет около 100 м.

Разработанный алгоритм реализован в серийно выпускаемом отечественном малогабаритном анализаторе радиосетей АРСЕНАЛ-И [9], предназначенном для анализа, идентификации и измерения параметров цифровых и аналоговых радиосетей, определения местоположения источников радиоизлучения.

Исследованный в работе алгоритм локализации может быть использован при разработке других средств и систем радиоконтроля, обеспечивающих определение координат источников радиоизлучения.

Литература

1. Козьмин В. А., Павлюк А. П., Токарев А. Б. Сравнение угломерного и разностно-дальномерного методов местоопределения по критерию охвата территории при радиоконтроле // *Электросвязь*. 2014. № 2. С. 37-40.
2. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты / под ред. А. М. Рембовского. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2022. – 488 с.
3. Tzoreff E., Bobrovsky B. Z., Weiss A. J. Single receiver emitter geolocation based on signal periodicity with oscillator instability // *IEEE Transactions on signal processing*. 2014. Vol. 62. No. 6. P. 1377–1385.
4. Liu Y., Guo F., Yang L., Jiang W. Source localization using a moving receiver and noisy TOA measurements // *Signal Processing*. 2016. Vol. 119. P. 185–189.
5. Zou Y., Wan Q. Emitter source localization using time-of-arrival measurements from single moving receiver // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2017. P. 3444–3448. DOI:10.1109/ICASSP.2017.7952796
6. Кочемасов В., Хасьянова Е. Термостатированные кварцевые автогенераторы // *Компоненты и технологии*. 2018. № 1. С. 46–50.
7. Simon D. *Optimal State Estimation: Kalman, H-infinity, and Nonlinear Approaches*. – New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. – 526 p.

8. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений: квазиправдоподобные оценки. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 304 с.
9. ИРКОС. Каталог. Автоматизированные системы и технические средства радиоконтроля [Электронный ресурс]. 2024. – URL: <https://www.ircos.ru/zip/cat2024.pdf> (дата обращения 31.01.2025).

References

1. Kozmin V. A., Pavlyuk A. P., Tokarev A. B. Sravnenie uglomernogo i raznostno-dalnomernogo metodov mestoopredeleniya po kriteriyu okhvata territorii pri radiokontrolе [Comparison of Angle-Of-Arrival and Time-Difference-Of-Arrival methods of sources location by the criterion of territory coverage during radio monitoring]. *Electrosvyaz Magazine*, 2014, no. 2, pp. 37-40. (in Russian)
2. Rembovsky A. M., Ashihmin A. V., Kozmin V. A. *Avtomatizirovannye sistemy radiokontrolya i ikh komponenti* [Automated radio monitoring systems and their components]. Moscow. Goryachaya liniya–Telekom, 2022. 488 p. (in Russian)
3. Tzoreff E., Bobrovsky B. Z., Weiss A. J. Single receiver emitter geolocation based on signal periodicity with oscillator instability. *IEEE Transactions on signal processing*, 2014, vol. 62, no. 6, pp. 1377–1385.
4. Liu Y., Guo F., Yang L., Jiang W. Source localization using a moving receiver and noisy TOA measurements. *Signal Processing*, 2016, vol. 119, pp. 185–189.
5. Zou Y., Wan Q. Emitter source localization using time-of-arrival measurements from single moving receiver. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2017, pp. 3444–3448. DOI:10.1109/ICASSP.2017.7952796
6. Kochemasov V., Khasyanova E. Termostatirovannye kvartsevie avtogeneratori [Thermostated quartz auto generators] *Components&Technologies*, 2018, no. 1, pp. 46–50. (in Russian)
7. Simon D. *Optimal State Estimation: Kalman, H-infinity, and Nonlinear Approaches*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. 526 p.
8. Mudrov V. I., Kushko V. L. *Metodi obrabotki izmerenii: kvazipravdopodobnie otsenki* [Measurement processing methods: quasi-realistic estimates]. Moscow, Radio&Communications, 1983. 304 p. (in Russian)
9. IRCOS JSC. Catalog. Automated systems and technical means of radio monitoring. 2024. Available at: <https://www.ircos.ru/zip/cat2024.pdf> (accessed 31.01.2025). (in Russian)

Статья поступила 10 февраля 2025 г.

Информация об авторах

Крыжко Игорь Борисович – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем. Воронежский государственный университет. Старший научный со-

трудник научно-исследовательского сектора. АО «ИРКОС». Область научных интересов: алгоритмы радиоконтроля. E-mail: kryzhkoib@ircos.vrn.ru

Козьмин Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, доцент. Директор по научной работе. АО «ИРКОС». Область научных интересов: алгоритмы радиоконтроля. E-mail: kv@ircos.vrn.ru

Сладких Владимир Александрович – кандидат технических наук. Начальник научно-исследовательского сектора. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиоконтроль, цифровая обработка сигналов. E-mail: sladkihva@ircos.vrn.ru

Токарев Антон Борисович – доктор технических наук, доцент. Старший научный сотрудник НИС. АО «ИРКОС». Профессор кафедры радиотехники. Воронежский государственный технический университет. Область научных интересов: широкополосный радиоконтроль, алгоритмы цифровой обработки сигналов. E-mail: TokarevAB@ircos.vrn.ru

Фатеев Александр Андреевич – научный сотрудник. НПЦ «Дельта». Область научных интересов: алгоритмы радиопеленгации. E-mail: fateev_aa@amm.vsu.ru

Адрес: 129626, Россия, Москва, ул. Звездный бульвар, д. 21

Localization of radio sources by a mobile receiver based on measuring the time of arrival for periodic signals

I. B. Kryzhko, V. A. Kozmin, V. A. Sladkikh,
A. B. Tokarev, A. A. Fateev

Purpose. The object of localization is the base stations (BS) of cellular communications. The estimation of coordinates based on measurements of the BS signals time of arrival at geographically distributed reception points allows determining the location of BS with high accuracy. The fact that BS strictly periodically emits sets of reference signals allows data collection and localization of BS by a single mobile measuring radio receiver (MMRR). **The aim of the work** is to develop an algorithm for processing data collected by a single MMRR in order to accurately localize a set of BS. **Novelty.** The developed algorithm takes into account the possibility of BS emitting reference signals in several sectors; at the same time, reference signals of different sectors in relation to each other are characterized by a random shift in time. The algorithm allows to use radiations from a set of sectors synergistically when estimating the coordinates of the BS. **Results.** The algorithm for determining the location of BS and the mathematical apparatus underlying it are presented. Theoretical and experimental accuracy indicators are given. **Practical relevance.** The implementation of the algorithm using the digital measuring radio receiver is demonstrated. It is shown that the practical implementation of the proposed algorithm makes it possible to localize BS with a typical accuracy of about 100 m.

Key words: localization, TOA method, base station of the communication system, least squares method (LSM), random errors of observations.

Information about Authors

Igor Borisovich Kryzhko – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor of the Department of Software Development and Information Systems Administration. Voronezh State University. Senior Researcher at the Research sector. JSC «IRCOS». Field of research: Algorithms for Radio Monitoring. E-mail: kryzhkoib@ircoc.vrn.ru

Vladimir Alekseevich Kozmin – Ph.D. of Engineering Sciences, docent. Director for scientific works. JSC «IRCOS». Field of research: Algorithms for Radio Monitoring. E-mail: kv@ircoc.vrn.ru

Vladimir Alexandrovich Sladkikh – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of the Research Sector. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, digital signal processing. E-mail: sladkihva@ircoc.vrn.ru

Anton Borisovich Tokarev – Advanced Doctor of Engineering Sciences, docent. Senior Researcher at the Research sector. JSC «IRCOS». Professor of the Department of Radio Engineering. Voronezh State Technical University. Field of research: wideband radiomonitoring, digital signal processing algorithms. E-mail: tokarevab@ircoc.vrn.ru

Alexander Andreevich Fateev – Researcher at the Research sector. SPC «Delta». Field of research: direction finding algorithms. E-mail: fateev_aa@amm.vsu.ru
Address: Russia, 129626, Moscow, Zvezdny Bulvar str. 21.