

КОМПЛЕКСНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

Г.А. Фокин^{1*}

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: grihafokin@gmail.com

Информация о статье

УДК 621.396.969.36

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Фокин Г.А. Комплексная имитационная модель для позиционирования источников радиоизлучения в условиях отсутствия прямой видимости // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 85–101.

Аннотация: Идентификация прямой видимости при обработке навигационных измерений актуальна при позиционировании в условиях города, а также в условиях неоднородного рельефа местности, например, гор и холмов, когда прямая видимость между источником радиоизлучения и приемными станциями отсутствует. Целью настоящей работы является разработка комплексной имитационной модели для позиционирования источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом при отсутствии прямой видимости.

Ключевые слова: Non-Line-of-Sight, разностно-дальномерный метод, среднеквадратическая ошибка, источник радиоизлучения, имитационная модель.

I. Введение

Проблема идентификации прямой видимости и компенсации ошибок отсутствия прямой видимости при обработке навигационных измерений исследовалась на протяжении последних 20 лет [1-6] и является актуальной при позиционировании в условиях города, а также в условиях неоднородного рельефа местности, например, горы холмов, когда прямая видимость между источником радиоизлучения и одной и/или несколькими приемными станциями отсутствует, т. е. имеет место ситуация отсутствия прямой видимости (NLOS, от англ. Non-Line-of-Sight).

В случае NLOS принятый после переотражений сигнал оказывается задержанным и приходит позже, чем если бы он был принят в условиях наличия прямой видимости (LOS, от англ. Line-of-Sight) [7, 8].

Обработка измерений при наличии одного и/или двух переотраженных сигналов приводит к существенным ошибкам позиционирования, поэтому необходима предварительная идентификация источников отсутствия прямой видимости и компенсация ошибок NLOS путем исключения из

обработки на центральной (опорной) станции источников измерений от вероятных переотраженных сигналов; после исключения приемных станций – источников NLOS измерений – осуществляется повторная обработка, например, по методу наименьших квадратов [9-13].

Проанализируем состояния проблемы позиционирования источников радиоизлучения (ИРИ) в условиях NLOS для приложений так называемой пассивной радиолокации, когда определение местоположения осуществляется приемными станциями по собственному радиоизлучению передающего объекта локации.

В настоящее время различают два подхода к проблеме идентификации источников NLOS в задачах позиционирования в условиях отсутствия прямой видимости [1]:

а) совместный подход, когда в процессе идентификации источников NLOS участвуют несколько территориально распределенных приемных станций;

б) обособленный подход, когда в процессе идентификации источников NLOS участвует одна отдельно взятая приемная станция.

Обособленная идентификация источников NLOS измерений оперирует статистиками измеряемых параметров принимаемого сигнала отдельно взятой приемной станции и подразделяется на следующие категории:

а) обработка распределений дальномерных измерений принимаемых сигналов (в ситуации LOS статистики дальномерных измерений подчиняются нормальному распределению Гаусса с нулевым средним, а в ситуации NLOS – становятся положительно смещенными и отклоняются от гауссовского распределения [1]);

б) обработка первичных и вторичных параметров принимаемых сигналов, таких как профиль мощности, задержки, К-фактор Райса [7] и др.;

в) обработка дальномерных измерений, полученных на основе сравнения мощности и времени прихода сигнала, или обработка угломерных измерений [8].

Совместная идентификация источников NLOS измерений оперирует статистиками измеряемых параметров принимаемых сигналов всеми приемными станциями, участвующими в сеансе позиционирования, и подразделяется на категории:

а) идентификация источников NLOS измерений с использованием текущих измерений принимаемых сигналов и ситуационных картографических данных;

б) идентификация источников NLOS измерений исключительно с использованием текущих измерений принимаемых сигналов.

Учитывая представленную выше классификацию, рассмотрим далее проблему идентификации источников NLOS в задачах позиционирования ИРИ для случая совместного подхода на основе нескольких территориально распределенных приемных станций, оперирующих исключительно текущими измерениями принимаемых сигналов. Задача в такой постановке заслужила внимание и получила решение в следующих исследованиях.

В [2] проблема идентификации источников NLOS решается методом бинарной классификации гипотез, суть которой сводится к оценке распределений дальномерных измерений по определенным критериям.

В [3] для разностно-дальномерного метода (РДМ) было показано, что ошибки измерения разности времен прихода сигнала при отсутствии прямой видимости могут достигать нескольких сотен метров и существенно превышают по величине ошибки при измерениях в условиях наличия прямой видимости, распределение которых подчиняется нормальному закону.

В [4] для компенсации ошибок измерений при NLOS был предложен алгоритм взвешенных остатков (*Rwgh*, от *англ.* Residual weighting algorithm), принцип работы которого сводится к назначению весовых коэффициентов оценкам ко-

ординат, полученных из обработки дальномерных измерений от различных комбинаций приемных станций, участвующих в позиционировании.

В [5] предложен и исследован алгоритм идентификации источников ошибок NLOS: вычисляются дисперсии оценок координат, полученных из обработки остаточных разностно-дальномерных измерений после поочередного исключения из тестируемых комбинаций приемных станций – вероятных источников ошибок NLOS.

Недостатком представленных выше исследований [2-5] является упрощенный учет сбора разностно-дальномерных измерений, когда ошибки LOS моделируются распределением Гаусса с нулевым средним, а ошибки NLOS моделируются положительно смещенным, отличным от гауссовского распределением с ненулевым средним.

Более реалистичным представляется подход, учитывающий территориальное распределение ИРИ и приемных станций, а также передачу, прием, обработку и вычисление взаимных корреляционных функций (ВКФ) принятых сигналов для извлечения разностей времен прихода сигналов по максимумам ВКФ. Данный подход был реализован в комплексной имитационной модели (ИМ) [6], которая включает территориальное распределение приемных станций, ИРИ и препятствий, а также передачу, прием, обработку и вычисление ВКФ принятых сигналов.

Также в [6] был усовершенствован алгоритм совместной идентификации источников NLOS измерений, предложенный в [5]. Суть усовершенствования сводится к вычислению дисперсий оценок координат, полученных при обработке разностно-дальномерных измерений перебором опорных станций, относительно которых вычисляется разность расстояний. Однако данное усовершенствование не было реализовано средствами ИМ.

Недостатком комплексной ИМ в [6] является отсутствие учета потерь при распространении радиоволн (РРВ) между ИРИ и приемными станциями. Подобный учет был реализован в [9-12] при исследовании разностно-дальномерного метода позиционирования, однако полученные результаты применимы исключительно к специфическим радиосигналам PRS (от *англ.* Positioning Reference Signals), используемым в сетях LTE.

Целью настоящего исследования является оценка точности позиционирования источников радиоизлучения при совместной обработке разностно-дальномерных измерений территориально-распределенными приемными станциями в условиях NLOS средствами комплексного имитационного моделирования.

Для достижения поставленной цели в настоящем исследовании решаются следующие задачи:

1) доработка комплексной ИМ [6] для учета потерь РРВ;

2) программная реализация метода идентификации источников NLOS за счет вычисления дисперсий оценок координат, полученных:

– из обработки остаточных разностно-дальномерных измерений после поочередного исключения из тестируемых комбинаций приемных станций (вероятных источников ошибок NLOS [5]);

– перебором опорных станций, относительно которых вычисляется разность расстояний [6];

3) определение пороговых значений дисперсий оценок координат для достоверной идентификации источников NLOS.

Представленная далее усовершенствованная комплексная ИМ для позиционирования ИРИ разностно-дальномерным методом в условиях NLOS включает следующие моделирующие подсистемы:

а) территориальное распределение приемных станций, ИРИ и препятствий;

б) передача, затухание/запаздывание с учетом переотражений от препятствий и прием сигналов;

в) вычисление ВКФ принятых сигналов;

г) алгоритм идентификации приемных станций (источников отсутствия прямой видимости и компенсации ошибок NLOS).

Далее материал настоящего исследования представлен в следующем порядке. В разделе II представлена математическая модель сбора разностно-дальномерных измерений. В разделе III проиллюстрировано влияние отсутствия прямой видимости на точность позиционирования разностно-дальномерным методом. В разделе IV представлены методики обнаружения источников отсутствия прямой видимости по совокупности разностно-дальномерных измерений. В разделе V формализован алгоритм идентификации источников NLOS. В разделе VI описана комплексная имитационная модель, учитывающая потери РРВ [14], а также методика формирования и обработки промежуточных оценок и их дисперсий. В разделе VII подведены итоги проведенного исследования.

II. Математическая модель сбора разностно-дальномерных измерений

Позиционирование осуществляется в результате обработки на центральной станции разности времен прихода сигналов, принятых от ИРИ синхронизированными территориально распределенными N приемными станциями. Сигнал, принятый i -ой приемной станцией, $i = 1, \dots, N$ можно представить выражением:

$$r_i(t) = \alpha_i s(t - t_i) + n_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

где принятый полезный сигнал $\alpha_i s(t - t_i)$ является задержанной на $t_i = d_i/c$ копией переданного ИРИ сигнала $s(t)$, ослабленного в α_i раз при распространении на расстояние d_i между ИРИ и i -ой

приемной станцией; $n_i(t)$ – шум i -ой приемной станции (выборки шума приемных станций принимаются некоррелированными, гауссовскими с нулевым средним); $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Разности времен прихода сигналов обычно рассчитывают относительно одной приемной станции, называемой опорной (центральной). Исходными данными РДМ для обработки на опорной станции являются известные координаты приемных станций R_x и измеренные разности времен прихода сигналов $\Delta t_{ij} = t_i - t_j$, $i, j = 1, \dots, N$, по которым вычисляются разности дальностей Δd_{ij} :

$$\Delta d_{ij} = c \cdot \Delta t_{ij} = d_i - d_j, \quad (2)$$

где d_i – расстояние между ИРИ и i -ой приемной станцией R_x ; d_j – расстояние между ИРИ и j -ой приемной станцией R_x .

Пусть $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i]^T$ – вектор координат приемной станции R_x ; $\mathbf{x}_j = [x_j, y_j]^T$ – вектор координат приемной станции R_x ; $\mathbf{x} = [x, y]^T$ – вектор неизвестных координат ИРИ; $\|\cdot\|_2$ – евклидова норма, тогда d_i и d_j определяются выражениями:

$$\begin{aligned} d_i &= \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}\|_2 = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \\ d_j &= \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}\|_2 = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Разность дальностей $\Delta d_{ij} = d_i - d_j$ образует гиперболу – геометрическое место точек евклидовой плоскости, для которых абсолютное значение разности расстояний от ИРИ до двух выделенных точек R_x и R_x постоянно.

Из $N \cdot (N-1)/2$ возможных измерений Δt_{ij} статистически независимыми оказываются лишь $(N-1)$ разностей времен прихода [1]; линии постоянной разности Δd_{1i} рассчитывают относительно одной приемной станции, называемой опорной (центральной), например R_{x1} :

$$\Delta d_{1i} = d_1 - d_i, \quad (4)$$

где $i = 2, \dots, N$.

При позиционировании ИРИ на плоскости необходимо найти пересечение, как минимум, двух гипербол, для чего требуется три приемные станции ($L = 3$); для позиционирования ИРИ в пространстве необходимо найти пересечение как минимум трех гипербол, для чего требуется четыре приемные станции ($L = 4$).

Далее проиллюстрируем влияние отсутствия прямой видимости на точность позиционирования разностно-дальномерным методом.

III. Влияние NLOS на точность позиционирования РДМ

Рассмотрим качественный пример влияния эффекта отсутствия прямой видимости на одной из приемных станций на точность позиционирования разностно-дальномерным методом. При нали-

чии прямой видимости каждое измерение разности дальностей Δd_{ij} определяет гиперболу, а пересечение гипербол определяет вероятное местоположение ИРИ. На рисунке 1 представлена ситуация, когда в сеансе позиционирования участвуют четыре приемные станции: три приемные станции Rx_1 , Rx_2 , Rx_4 имеют измерения LOS; одна приемная станция Rx_3 закрыта препятствием от ИРИ и имеет измерения NLOS, полученные в результате переотражения (что приводит к увеличению дальномерного измерения с d_3 до $d_3 = d_{31} + d_{32}$).

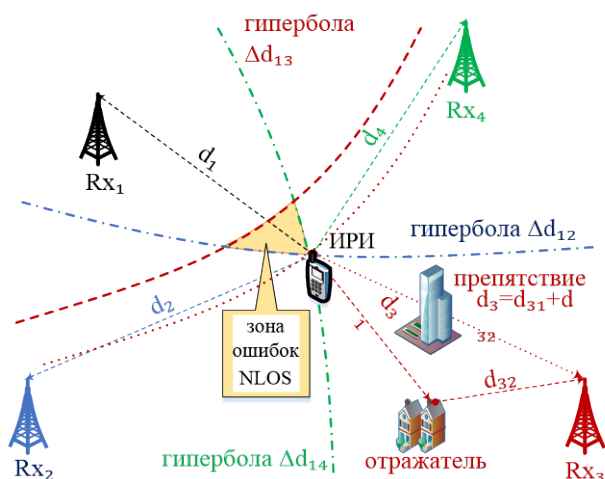


Рис. 1. Влияние эффекта NLOS на ошибку позиционирования разностно-дальномерным методом

Линии постоянной разности на рисунке 1 рассчитываются относительно одной опорной приемной станции Rx_1 . Если бы измерения на всех приемных станциях были получены по лучам прямой видимости, гиперболы d_{12} , d_{13} и d_{14} пересекались бы примерно в одной точке – истинном местоположении ИРИ, а зона ошибок LOS была бы небольшой. В результате отсутствия прямой видимости у приемной станции Rx_3 получаем следующую картину: гиперболы d_{12} и d_{14} , полученные в результате LOS измерений, пересекаются в одной точке, а гипербола NLOS измерений d_{13} смещается вверх и приводит к формированию, так называемой, зоны ошибок NLOS.

Рассмотрим количественный пример влияния эффекта NLOS измерений на одной из приемных станций на точность позиционирования. На рисунке 2 представлен пример территориального распределения ИРИ, четырех приемных станций и пересечения гипербол при отсутствии прямой видимости у третьей приемной станции Rx_3 (рисунок 2а) а также автокорреляционная функция (АКФ) используемого сигнала (подробнее в разделе VI) и соответствующие взаимные корреляционные функции и разности времен прихода сигналов (рисунки 2б, 2в). Показано пересечение двух гипербол, образованных разностью расстояний прямой видимости Δd_{12} и Δd_{14} для LOS станций Rx_2 и Rx_4 , которые корректно определяют искомое

местоположение ИРИ. Гипербола, образованная разностью расстояний Δd_{13} , наглядно показывает влияние ошибки отсутствия прямой видимости у приемной станции Rx_3 : образуется участок неопределенности (зона ошибок NLOS) для позиционирования ИРИ, сформированный пересечением гипербол LOS и гиперболы NLOS. Влияние NLOS у Rx_3 иллюстрируется также на графике ВКФ: корреляционный пик $C_{13}(t)$ отраженного сигнала $r_3(t)$ оказывается меньше бокового лепестка корреляционной функции $C_{12}(t)$ сигнала $r_2(t)$, пришедшего по лучу прямой видимости, что является следствием потерь РРВ сигнала $r_3(t)$ при увеличении пройденного пути в результате отражения от препятствия $Rx_3\text{refl}$.

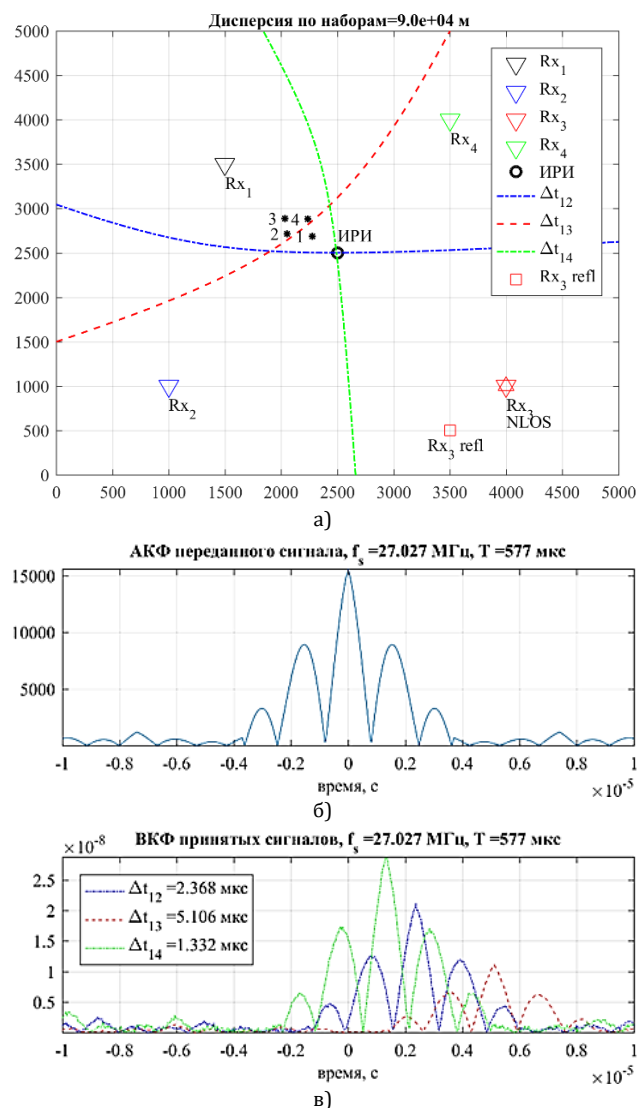


Рис. 2. Территориальное распределение ИРИ, 4-х приемных станций, препятствия, пересечения гипербол при NLOS у 3-й приемной станции и оценок координат относительно 4-й опорных станций (а), ВКФ принятых сигналов (б, в)

Также на рисунке 2 показаны оценки местоположений, вычисленные относительно различных опорных станций. Оценка 1 получена для случая, когда опорной станцией является Rx_1 ; при этом в позиционировании участвуют РДМ измерения

$\Delta d_{12}, \Delta d_{13}, \Delta d_{14}$ (гиперболы показаны на рисунке 2). Оценка 2 получена для случая, когда опорной станцией является Rx_2 (в позиционировании участвуют РДМ измерения $\Delta d_{23}, \Delta d_{24}, \Delta d_{21}$). Оценка 3 получена для случая, когда опорной станцией является Rx_3 (в позиционировании участвуют РДМ измерения $\Delta d_{34}, \Delta d_{32}, \Delta d_{31}$). Оценка 4 получена для случая, когда опорной станцией является Rx_4 (в позиционировании участвуют РДМ измерения $\Delta d_{41}, \Delta d_{42}, \Delta d_{43}$). Анализ полученных оценок показывает их разброс, а также значительное отклонение от истинного местоположения ИРИ. Наибольшее отклонение наблюдается у оценки, полученной для РДМ измерений относительно опорной станции Rx_3 , являющейся источником NLOS.

Для идентификации источников NLOS ранее была предложена метрика остаточной разности [3, 4] между оценкой разности расстояний $\hat{\Delta d}_{i1}$ и текущими измерениями разности расстояний $c \cdot \Delta t_{i1}$:

$$e_i = \hat{\Delta d}_{i1} - c \cdot \Delta t_{i1}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где оценка разности расстояний $\hat{\Delta d}_{i1}$ определяется выражением:

$$\hat{\Delta d}_{i1} = \hat{d}_i - \hat{d}_1 = \sqrt{(x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2} - \sqrt{(x_1 - \hat{x})^2 + (y_1 - \hat{y})^2}, \quad (6)$$

где $\hat{x} = [\hat{x}, \hat{y}]^T$ – оценка вектора неизвестных координат ИРИ.

При отсутствии прямой видимости на приемной станции Rx_i метрика остаточной разности e_i будет значительной и, следовательно, позволит идентифицировать источник NLOS. Для достоверной идентификации NLOS необходимо накопить несколько оценок e_i на протяжении некоторого интервала времени и затем выполнить их ранжирование (в этом недостаток данного приема для его использования в режиме реального времени).

Далее приведем методики обнаружения факта отсутствия прямой видимости по измерениям для различных конфигураций приемных станций.

IV. Методики обнаружения источников отсутствия прямой видимости

Пусть N – общее число приемных станций, участвующих в процессе позиционирования, K – число приемных станций – источников NLOS измерений, тогда минимально необходимое число приемных станций – источников LOS измерений L определяется выражением:

$$N - K \geq L. \quad (7)$$

При позиционировании на плоскости $L = 3$. В ряде исследований [4, 5] источники NLOS также, как и LOS измерений, участвуют в процессе позиционирования. В настоящем исследовании будем далее считать, что приемные станции с отсутствием прямой видимости идентифицируются и затем исключаются из процесса позиционирования, а число

оставшихся LOS источников превышает минимально необходимое в (7) на один для надежной идентификации NLOS измерений за один сеанс измерений в режиме реального времени, т. е. $L \geq 4$.

Рассмотрим пример, когда общее число приемных станций $N = 5$. Принимая во внимание тот факт, что минимально необходимое число приемных станций для определения местоположения на плоскости $L = 3$, можно сформировать 3 группы комбинаций приемных станций для позиционирования: а) 5 из 5 ($S_{5/5}$); б) 4 из 5 ($S_{4/5}$); в) 3 из 5 ($S_{3/5}$). Число комбинаций в каждой группе определяется биномиальным коэффициентом из n по k , или числом сочетаний из n по k :

$$C_n^k = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (8)$$

В комбинаторике сочетанием из n по k называется набор k элементов, выбранных из данного множества, содержащего n различных элементов. Наборы, отличающиеся только порядком следования элементов (но не составом), считаются одинаковыми, этим сочетания отличаются от размещений. Так, например, наборы {3-элементные сочетания, подмножества, $k = 3$ } {2, 1, 3} и {3, 2, 1} 5-элементного множества {1, 2, 3, 4, 5} ($n = 5$) являются одинаковыми (в то время как размещения были бы разными) и состоят из одних и тех же элементов {1, 2, 3}. Из $N \cdot (N-1)/2$ (размещений) возможных измерений Δt_{ij} статистически независимыми оказываются лишь $(N-1)$ (сочетаний) разностей времен прихода.

Возвращаясь к примеру с $N = 5$ и $L = 3$, оценим согласно (8) число сочетаний (комбинаций) в каждой группе:

а) в первой группе 5/5 возможна $C_5^5 = 1$ одна комбинация приемных станций: $S_{5/5} = \{Rx_{12345}\}$;

б) во второй группе 4/5 возможны $C_5^4 = 5$ пять комбинаций приемных станций: $S_{4/5} = \{Rx_{1234}, Rx_{1235}, Rx_{1245}, Rx_{1345}, Rx_{2345}\}$;

в) в третьей группе 3/5 возможны $C_5^3 = 10$ десять комбинаций приемных станций: $S_{3/5} = \{Rx_{123}, Rx_{124}, Rx_{125}, Rx_{134}, Rx_{135}, Rx_{145}, Rx_{234}, Rx_{235}, Rx_{245}, Rx_{345}\}$.

Общее число комбинаций определяется формулой:

$$M = \sum_{L=3}^N \binom{N}{L}, \quad (9)$$

и для рассматриваемого примера с $N = 5$ и $L = 3$ в трех группах равно 16.

Для формализации алгоритма и методик идентификации источников NLOS введем понятие набора и комбинации приемных станций, участвующих в сеансе позиционирования. Пусть n – индекс набора: $n = 1, \dots, N$, где N – общее число приемных станций; индекс набора n определяется индексом опорной приемной станции Rx_i , относительно которой накапливаются РДМ измерения.

Определим общее число приемных станций в комбинации как $L = 3, \dots, N$, тогда число приемных станций в комбинации помимо опорной определяется как $L - 1 = 2, \dots, N - 1$. Пусть c – индекс комбинации приемных станций; $c = 1, \dots, C$, где C – общее число комбинаций в наборе n . Обозначим через S_{nc} комбинацию c из L приемных станций Rx_i в наборе n . Общее число комбинаций C приемных станций в наборе n относительно одной опорной станции определяется выражением:

$$C = C_{N-1}^{L-1} = \binom{N-1}{L-1}. \quad (10)$$

Метрика остаточной разности для n -го набора из комбинаций S_{nc} , $c = 1, \dots, C$ приемных станций Rx_i была предложена в [4, 5]:

$$R_n = \sum_{Rx_i \in S_{nc}} [\hat{d}_{i1} - c \cdot \Delta t_{i1}]^2 \quad (11)$$

и является обобщением (5) для совокупности метрик остаточной разности по всем C комбинациям в n -ом наборе.

Для каждой отдельной комбинации приемных станций S_{nc} можно получить отдельную оценку местоположения ИРИ $\hat{x}_{S_{nc}} = [\hat{x}_{S_{nc}}, \hat{y}_{S_{nc}}]$; будем далее называть такие оценки промежуточными оценками по комбинациям. Усредняя промежуточные оценки по комбинациям в наборе, получаем промежуточную оценку по набору $\hat{x}_n = [\hat{x}_n, \hat{y}_n]^T$:

$$\hat{x}_n = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C \hat{x}_{S_{nc}}. \quad (12)$$

Усредняя промежуточные оценки по наборам, получаем окончательную оценку местоположения ИРИ $\hat{x} = [\hat{x}, \hat{y}]^T$:

$$\hat{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{x}_n. \quad (13)$$

Среднеквадратичная ошибка (СКО) позиционирования определяется выражением:

$$\text{СКО} = \sqrt{\|\hat{x} - x\|_2} \quad (14)$$

Для обнаружения и идентификации источников NLOS измерений в настоящем исследовании, как и в [6], вместо (11) используются метрики дисперсий промежуточных оценок по комбинациям в наборе и по всем наборам. Дисперсия промежуточных оценок по комбинациям в наборе определяется относительно средней оценки по комбинациям в наборе $\hat{x}_n$ выражением:

$$\sigma_n = D[\hat{x}_{S_{nc}}] = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C (\hat{x}_{S_{nc}} - \hat{x}_n)^2. \quad (15)$$

Дисперсия промежуточных оценок по всем наборам определяется относительно средней оценки по всем наборам $\hat{x}$ выражением:

$$\sigma = D[\hat{x}_n] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{x}_n - \hat{x})^2. \quad (16)$$

Проведенный в [6] анализ показал, что время, затрачиваемое нелинейным алгоритмом метода наименьших квадратов на оценку координат для одной комбинации из 5 приемных станций сопоставимо со временем на оценку координат для десяти комбинаций из 3 приемных станций. В первом случае мы получаем одну оценку координат, а во втором – 10 оценок. Принимая во внимание необходимость идентификации источников NLOS при сопоставимых вычислительных затратах, в реальном масштабе времени предпочтительным оказывается вариант перебора большего числа комбинаций из меньшего числа приемных станций в наборе, так как это позволяет оценить совокупные метрики остаточной разности для большего числа комбинаций (наборов) приемных станций. Так как минимально необходимое число приемных станций в наборе ($L = 3$ для позиционирования на плоскости) позволяет, согласно (10), максимизировать число возможных комбинаций в наборе относительно одной опорной станции из числа оставшихся $N - 1$ приемных станций, будем далее рассматривать комбинации из трех приемных станций.

Детализируем приведенный на рисунке 2 пример промежуточными оценками по комбинациям и наборам с помощью рисунка 3 с учетом принятых обозначений. Число наборов определяется числом приемных станций $N = 4$; индекс набора определяется индексом опорной приемной станции. Число приемных станций в комбинации (вместе с опорной станцией) $L = 3$. Общее число комбинаций из трех станций в наборе из четырех станций относительно опорной $C = C_{N-1}^{L-1} = C_3^2 = 3$.

Оценка $\hat{x}_1$ получена относительно Rx_1 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 1$ для трех комбинаций из трех станций $S_1 = \{Rx_{123}, Rx_{124}, Rx_{134}\}$; оценка $\hat{x}_2$ получена относительно Rx_2 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 2$ для трех комбинаций из трех станций $S_2 = \{Rx_{234}, Rx_{231}, Rx_{241}\}$; оценка $\hat{x}_3$ получена относительно Rx_3 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 3$ для трех комбинаций из трех станций $S_3 = \{Rx_{341}, Rx_{342}, Rx_{312}\}$; оценка $\hat{x}_4$ получена относительно Rx_4 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 4$ для трех комбинаций из трех станций $S_4 = \{Rx_{412}, Rx_{413}, Rx_{423}\}$.

Из анализа промежуточных оценок по комбинациям на рисунке 3 можно сделать следующий вывод. В каждом наборе оценок, за исключением набора $n = 3$ с опорной станцией Rx_3 , – источником NLOS измерений, присутствует промежуточная оценка, соответствующая истинному положению ИРИ. Эта промежуточная оценка получена на основе комбинации приемных станций без станции Rx_3 :

а) в наборе $n = 1$ истинному положению соответствует оценка, полученная на основе комбинации $S_{12} = \{Rx_{124}\}$;

б) в наборе $n = 2$ истинному положению соответствует оценка, полученная на основе комбинации $S_{23} = \{Rx_{241}\}$;

в) в наборе $n = 4$ истинному положению соответствует оценка, полученная на основе комбинации $S_1 = \{Rx_{412}\}$.

В связи с тем, что комбинации, отличающиеся только порядком следования элементов (но не составом), считаются одинаковыми, эти комбинации приводят к одинаковым оценкам местоположения $\hat{x}_{snc} = [\hat{x}_{snc}, \hat{y}_{snc}]$.

Подобный подход с получением промежуточных оценок для каждой опорной станции путем усреднения промежуточных оценок по комбинациям в наборе визуально подтверждает возможность обнаружения источника NLOS измерений: на рисунке 2 видно, что промежуточная оценка 3, полученная относительно опорной станции Rx_3 , имеет наибольшее отклонение от истинного местоположения ИРИ, так как ошибочное дальномерное измерение d_3 входит в каждую комбинацию разностно-дальномерных измерений в наборе $S_3 = \{Rx_{341}, Rx_{342}, Rx_{312}\}$.

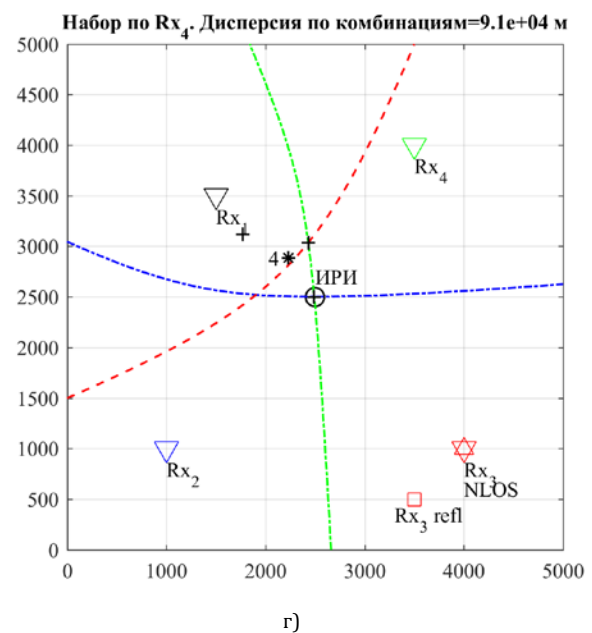
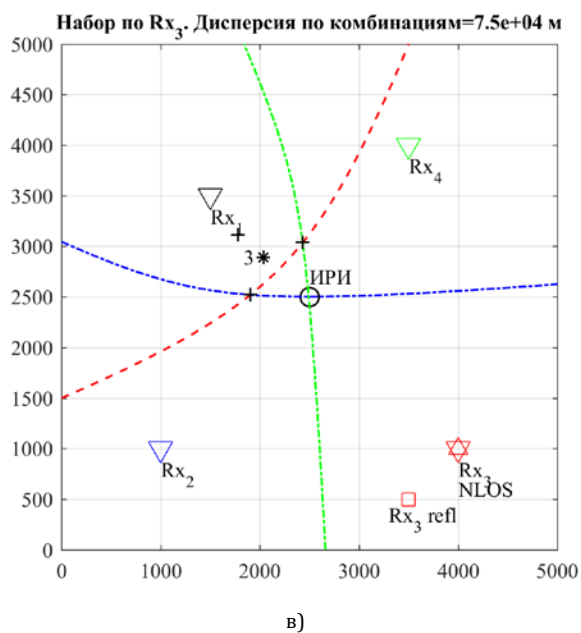
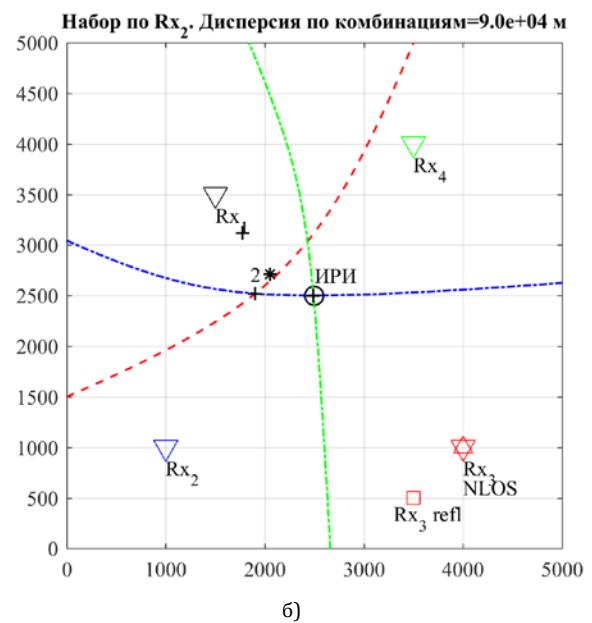
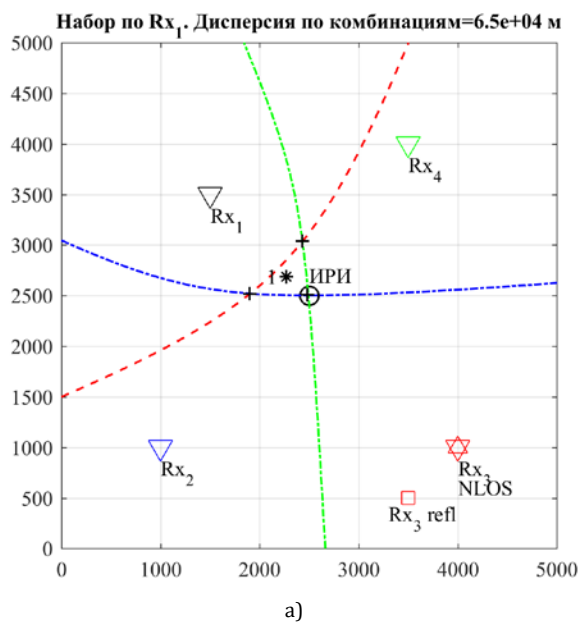


Рис. 3. Пример территориального распределения ИРИ, 4 приемных станций, препятствия, пересечения гипербол при отсутствии прямой видимости у 3-й приемной станции и промежуточных оценок координат по комбинациям и по наборам

Однако дисперсии промежуточных оценок по комбинациям в наборе относительно каждой опорной станции, с точки зрения идентификации источника NLOS, не так очевидны: на рисунке 3 видно, что дисперсия σ_3 промежуточных оценок по комбинациям в наборе $n = 3$, полученных относительно приемной станции Rx_3 – источника NLOS измерений, ниже дисперсий σ_2 и σ_4 промежуточных оценок в наборах $n = 2$ и $n = 4$ соответственно, полученных относительно приемных станций Rx_2 и Rx_4 – источников LOS измерений. Это можно объяснить тем, что все промежуточные оценки по комбинациям в наборе $n = 3$ оказываются положительно смещенными, и дисперсия подобных оценок может оказаться ниже дисперсий оценок в наборах относительно приемных станций – источников LOS, где одна из оценок соответствует истинному положению ИРИ и, следовательно, может привести к повышению дисперсии в наборе.

Представленные выше оценки дисперсии для четырех наборов показывают, что отсутствие прямой видимости у одной из приемных станций приводит к существенному разбросу (до 104 м) промежуточных оценок как по наборам (рисунок 2), так и по комбинациям (рисунок 3) и, следовательно, позволяют с высокой вероятностью обнаружить присутствие источника NLOS измерений.

V. Алгоритм идентификации источников NLOS

Для надежной идентификации одного источника отсутствия прямой видимости за один сеанс измерений в режиме реального времени число оставшихся LOS источников должно превышать минимально необходимое, т. е. $L \geq 4$; при идентификации источников NLOS используется подход последовательного исключения каждой из опорных станций из набора обрабатываемых измерений.

Рассмотрим пример на рисунке 4: в сеансе позиционирования участвуют 5 приемных станций; гиперболы построены относительно станции Rx_1 ; приемная станция Rx_2 является источником NLOS измерений, поэтому гипербола Δd_{12} оказывается смещенной вверх относительно истинного местоположения ИРИ.

Для примера на рисунке 4 число наборов определяется числом приемных станций $N = 5$; индекс набора определяется индексом опорной Rx_i . Число приемных станций в комбинации (вместе с опорной станцией) $L = 3$. Общее число комбинаций из трех станций в наборе из пяти станций относительно одной опорной станции $C = C_{N-1}^L = C_4^3 = 6$. Промежуточные оценки по наборам $\hat{x}_n$ показаны на рисунке 4; промежуточные оценки по комбинациям $\hat{x}_{s_{nc}}$ для каждого набора – на рисунке 5.

Промежуточная оценка $\hat{x}_1$ получена относительно опорной станции Rx_1 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 1$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_1 = \{Rx_{123}, Rx_{124}, Rx_{125}, Rx_{134}, Rx_{135}, Rx_{145}\}$. Промежуточная оценка $\hat{x}_2$ получена относительно опорной станции Rx_2 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 2$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_2 = \{Rx_{234}, Rx_{235}, Rx_{231}, Rx_{245}, Rx_{241}, Rx_{251}\}$. Промежуточная оценка $\hat{x}_3$ получена относительно опорной станции Rx_3 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 3$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_3 = \{Rx_{345}, Rx_{341}, Rx_{342}, Rx_{351}, Rx_{352}, Rx_{312}\}$. Промежуточная оценка $\hat{x}_4$ получена относительно опорной станции Rx_4 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 4$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_4 = \{Rx_{451}, Rx_{452}, Rx_{453}, Rx_{412}, Rx_{413}, Rx_{423}\}$. Промежуточная оценка $\hat{x}_5$ получена относительно опорной станции Rx_5 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 5$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_5 = \{Rx_{512}, Rx_{513}, Rx_{514}, Rx_{523}, Rx_{524}, Rx_{534}\}$.

жующих оценок по набору $n = 1$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_1 = \{Rx_{123}, Rx_{124}, Rx_{125}, Rx_{134}, Rx_{135}, Rx_{145}\}$. Промежуточная оценка $\hat{x}_2$ получена относительно опорной станции Rx_2 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 2$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_2 = \{Rx_{234}, Rx_{235}, Rx_{231}, Rx_{245}, Rx_{241}, Rx_{251}\}$. Промежуточная оценка $\hat{x}_3$ получена относительно опорной станции Rx_3 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 3$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_3 = \{Rx_{345}, Rx_{341}, Rx_{342}, Rx_{351}, Rx_{352}, Rx_{312}\}$. Промежуточная оценка $\hat{x}_4$ получена относительно опорной станции Rx_4 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 4$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_4 = \{Rx_{451}, Rx_{452}, Rx_{453}, Rx_{412}, Rx_{413}, Rx_{423}\}$. Промежуточная оценка $\hat{x}_5$ получена относительно опорной станции Rx_5 усреднением промежуточных оценок по набору $n = 5$ для шести комбинаций из трех приемных станций $S_5 = \{Rx_{512}, Rx_{513}, Rx_{514}, Rx_{523}, Rx_{524}, Rx_{534}\}$.

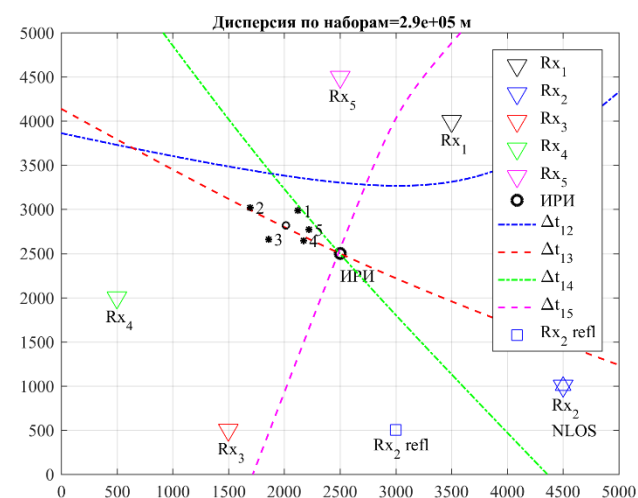
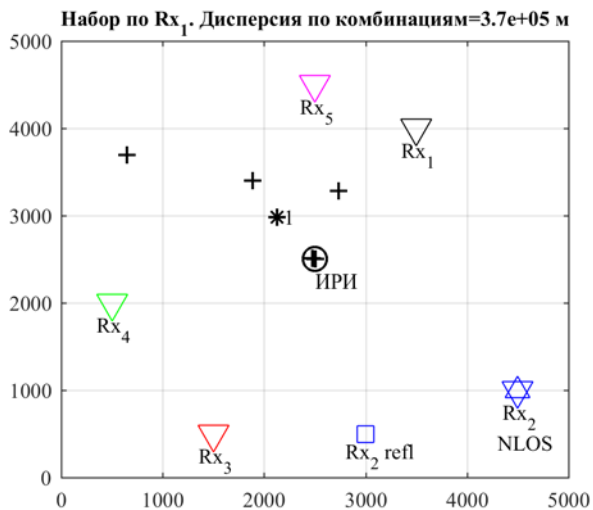
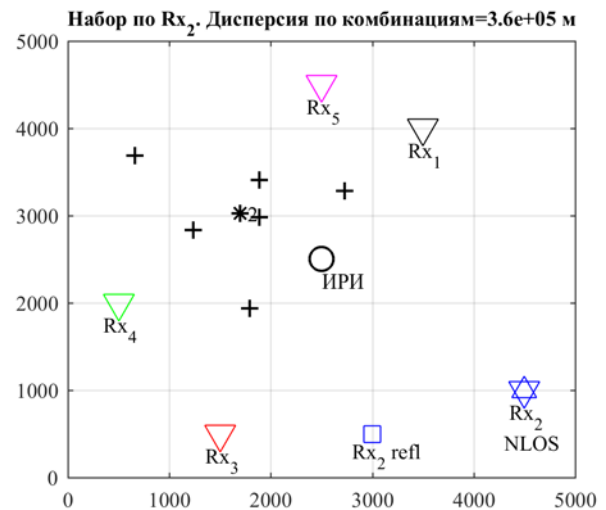


Рис. 4. Пример территориального распределения ИРИ, 5 приемных станций, препятствия, пересечения гипербол при отсутствии прямой видимости у 2-й приемной станции и оценок координат относительно 5 опорных станций

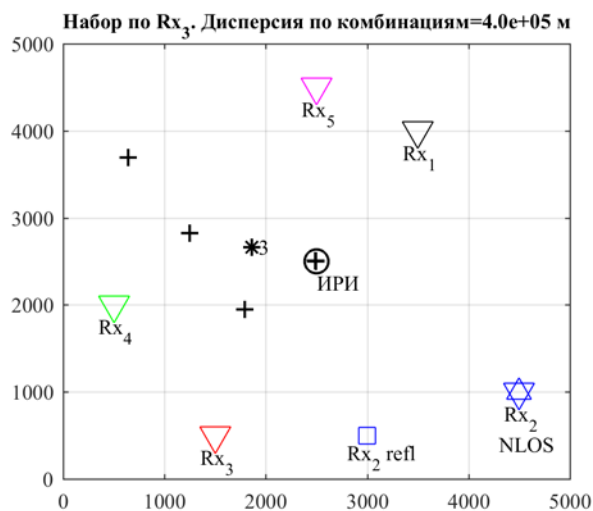
В соответствии с рисунком 4 оценка дисперсии по наборам составила $\sigma = 2,9 \cdot 10^5$ м. Рассмотрим оценки дисперсий по комбинациям на рисунке 6 (копия рисунка 5 с увеличениями). Оценка дисперсий комбинаций составила $\sigma_1 = 3,7 \cdot 10^5$ м (по набору $n = 1$); при этом три оценки существенно смещены относительно истинного местоположения ИРИ, а три оценки для комбинаций $\{Rx_{134}, Rx_{135}, Rx_{145}\}$, в которых исключено дальномерное измерение d_2 от источника NLOS Rx_2 , приводят к корректным оценкам местоположения ИРИ. Аналогичные выводы можно сделать для остальных наборов за исключением набора $n = 2$ относительно приемной станции Rx_2 – источника NLOS измерений: оценки по всем комбинациям $S_2 = \{Rx_{234}, Rx_{235}, Rx_{231}, Rx_{245}, Rx_{241}, Rx_{251}\}$ содержат ошибочное дальномерное измерение d_2 .



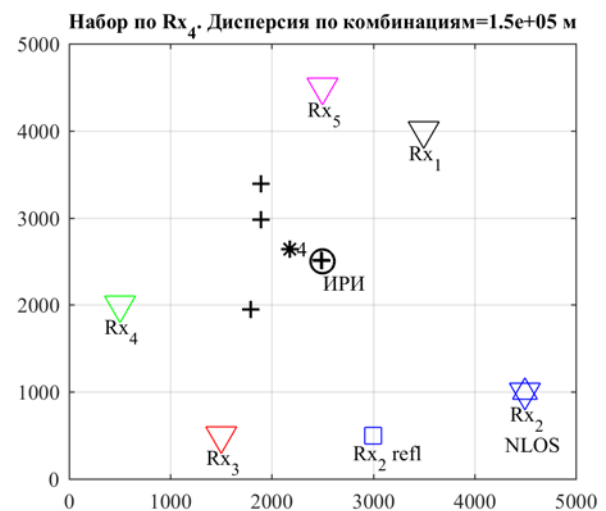
а)



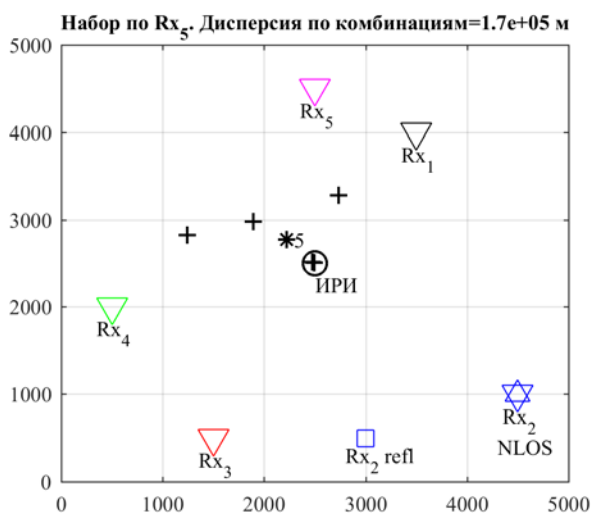
б)



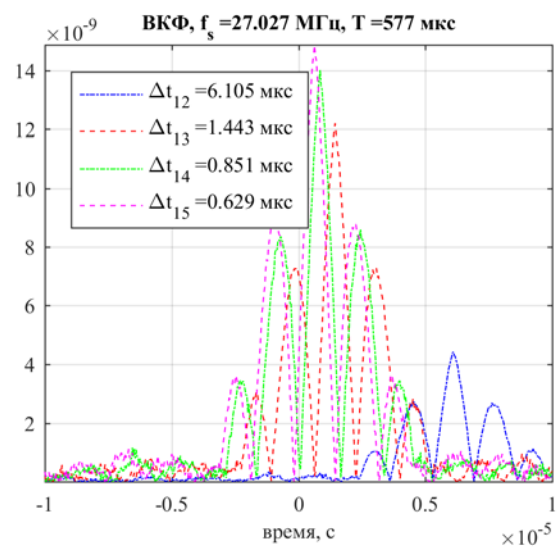
в)



г)



д)



е)

Рис. 5. Пример территориального распределения ИРИ, 5 приемных станций, препятствия, и промежуточных оценок по комбинациям и по наборам для 5 опорных станций

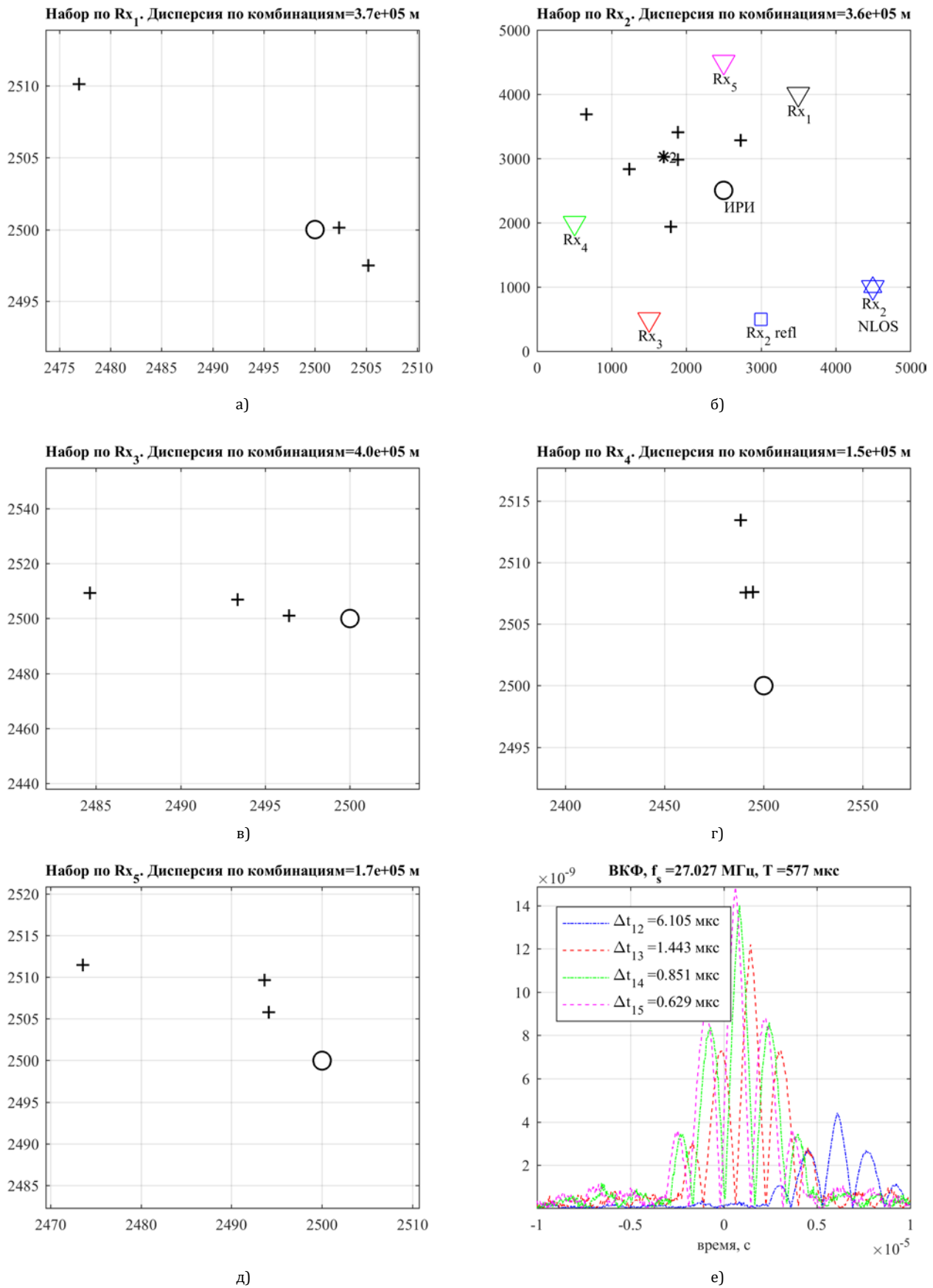


Рис. 6. Увеличенный пример территориального распределения ИРИ, 5 приемных станций, препятствия, и промежуточных оценок по комбинациям и наборам для 5 опорных станций

Очевидным подходом для компенсации ошибочных оценок, обусловленных наличием источника NLOS в наборе комбинаций, является идентификация и исключение этого источника из набора измерений. Так, например, для набора $n = 1$ следовало бы исключить комбинации $\{Rx_{123}, Rx_{124}, Rx_{125}\}$, содержащие ошибочное дальномерное измерение d_2 , и оставить комбинации $\{Rx_{134}, Rx_{135}, Rx_{145}\}$.

Рассмотрим подход последовательного исключения каждой из станций из набора обрабатываемых измерений, проиллюстрированный на рисунке 7. Для примера на рисунке 7 число наборов определяется числом последовательно исключаемых приемных станций $N = 5$; индекс набора определяется индексом исключаемой приемной станции. Число приемных станций в комбинации (вместе с опорной станцией) $L = 3$. Число оставшихся после исключения одной станции из набора приемных станций $N-1 = 4$. Общее число комбинаций из трех станций в наборе из оставшихся после исключения четырех станций относительно одной опорной станции $C = C_{N-2}^{L-1} = C_3^2 = 3$.

При исключении первой приемной станции Rx_1 получаем набор Rx_{2345} из четырех приемных станций; набор по опорной станции Rx_2 без Rx_1 для трех комбинаций из трех приемных станций $S_{2\setminus 1} = \{Rx_{234}, Rx_{235}, Rx_{245}\}$. При исключении второй приемной станции Rx_2 получаем набор Rx_{3451} из четырех приемных станций; набор по опорной станции Rx_3 без Rx_2 для трех комбинаций из трех приемных станций $S_{3\setminus 2} = \{Rx_{345}, Rx_{341}, Rx_{351}\}$. При исключении третьей приемной станции Rx_3 получаем набор Rx_{4512} из четырех приемных станций; набор по опорной станции Rx_4 без Rx_3 для трех комбинаций из трех приемных станций $S_{4\setminus 3} = \{Rx_{451}, Rx_{452}, Rx_{412}\}$. При исключении четвертой приемной станции Rx_4 получаем набор Rx_{5123} из четырех приемных станций; набор по опорной станции Rx_5 без Rx_4 для трех комбинаций из трех приемных станций $S_{5\setminus 4} = \{Rx_{512}, Rx_{513}, Rx_{523}\}$. При исключении пятой приемной станции Rx_5 получаем набор Rx_{1234} из четырех приемных станций; набор по опорной станции Rx_1 без Rx_5 для трех комбинаций из трех приемных станций $S_{1\setminus 5} = \{Rx_{123}, Rx_{124}, Rx_{134}\}$.

Ниже представлен результат работы имитационной модели по идентификации одного источника NLOS для примера на рисунке 7.

Лог-файл работы функции идентификации одного источника NLOS

Тест Rx for 1 NLOS

Rx=1 исключена. Набор Rx=2345. Дисперсия=1.45e+05

Rx=2 исключена. Набор Rx=3451. Дисперсия=8.61e+01

Rx=3 исключена. Набор Rx=4512. Дисперсия=1.05e+05

Rx=4 исключена. Набор Rx=5123. Дисперсия=2.62e+05

Rx=5 исключена. Набор Rx=1234. Дисперсия=4.17e+05

Из анализа промежуточных оценок по комбинациям на рисунке 7 можно сделать следующие вы-

воды. Во-первых, в наборе комбинаций $S_{2\setminus 1} = \{Rx_{234}, Rx_{235}, Rx_{245}\}$ с опорной станцией Rx_2 все промежуточные оценки оказываются смещенными относительно истинного местоположения ИРИ, так как набор содержит источник NLOS измерений – станцию Rx_2 . Во-вторых, в трех наборах присутствует по одной промежуточной оценке, соответствующей истинному местоположению ИРИ; корректная оценка получена на основе комбинации без станции Rx_2 – источника NLOS измерений: в наборе Rx_{4512} с комбинациями $S_{4\setminus 3} = \{Rx_{451}, Rx_{452}, Rx_{412}\}$ корректная оценка получена по комбинации Rx_{451} ; а в наборе Rx_{5123} с комбинациями $S_{5\setminus 4} = \{Rx_{512}, Rx_{513}, Rx_{523}\}$ корректная оценка получена по комбинации Rx_{513} ; в наборе Rx_{1234} с комбинациями $S_{1\setminus 5} = \{Rx_{123}, Rx_{124}, Rx_{134}\}$ корректная оценка получена по комбинации Rx_{134} . В-третьих, в наборе комбинаций $S_{3\setminus 2} = \{Rx_{345}, Rx_{341}, Rx_{351}\}$ при исключении второй приемной станции Rx_2 все три промежуточные оценки оказываются корректными и, следовательно, приводят к наименьшей дисперсии $\sigma_{3\setminus 2} = 8,61 \cdot 10^1$ м (рисунок 7).

Рассмотрим пример с двумя источниками NLOS измерений для случая шести приемных станций ($N = 6$). Подход, использованный при идентификации одного источника NLOS измерений, проиллюстрирован на рисунке 8 и показал, что поочередное исключение одной станции из анализируемых наборов не привело к успешной идентификации источника NLOS измерений, поэтому необходима обработка гипотезы о двух источниках NLOS измерений с последовательным исключением уже двух приемных станций.

Из анализа промежуточных оценок и их дисперсий по комбинациям после исключения одной приемной станции на рисунке 8 можно сделать вывод о том, что дисперсия промежуточных оценок по комбинациям σ_n после поочередного исключения одной станции из анализируемых наборов остается значительной (до 10^6 м), поэтому далее выполняется поочередное исключение двух вероятных источников NLOS измерений.

Для идентификации как одного, так и двух источников NLOS измерений, предлагается в качестве критерия использовать некое эмпирическое пороговое значение дисперсии промежуточных оценок по комбинациям σ_{thr} : если дисперсия промежуточных оценок по комбинациям превышает пороговое значение, т.е. $\sigma_n > \sigma_{thr}$ в данном наборе констатируется наличие одного или двух источников NLOS измерений; в противном случае делается заключение о том, что все станции в наборе имеют LOS измерения. На рисунке 9 представлена зависимость дисперсий оценок и ошибок позиционирования от отношения сигнал-шум для измерений прямой видимости LOS. Полученные результаты оценки дисперсий могут быть выбраны в качестве пороговых величин при идентификации NLOS источников.

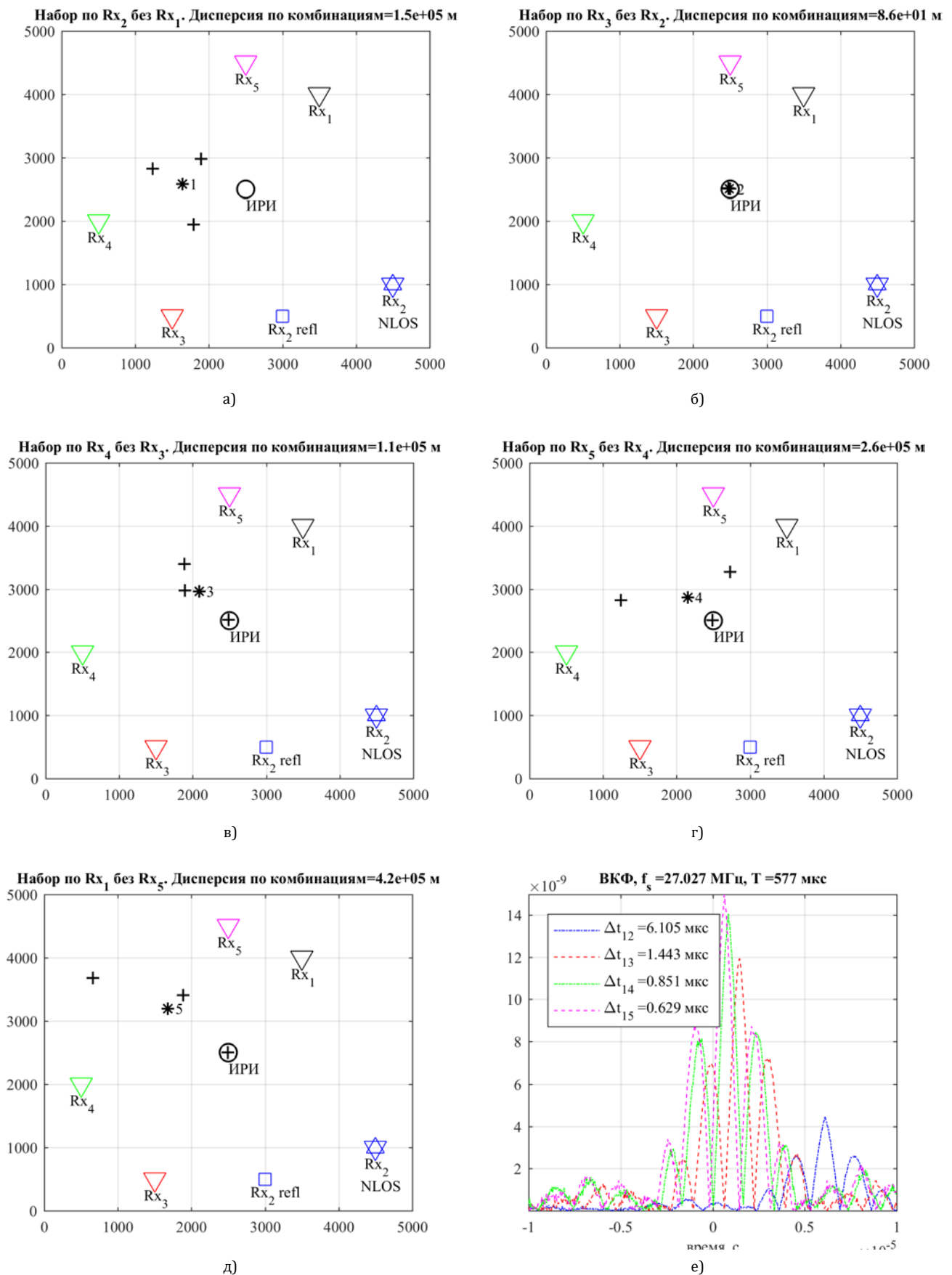


Рис. 7. Пример территориального распределения ИРИ, 5 приемных станций, препятствия, и промежуточных оценок по комбинациям и по наборам с поочередным исключением

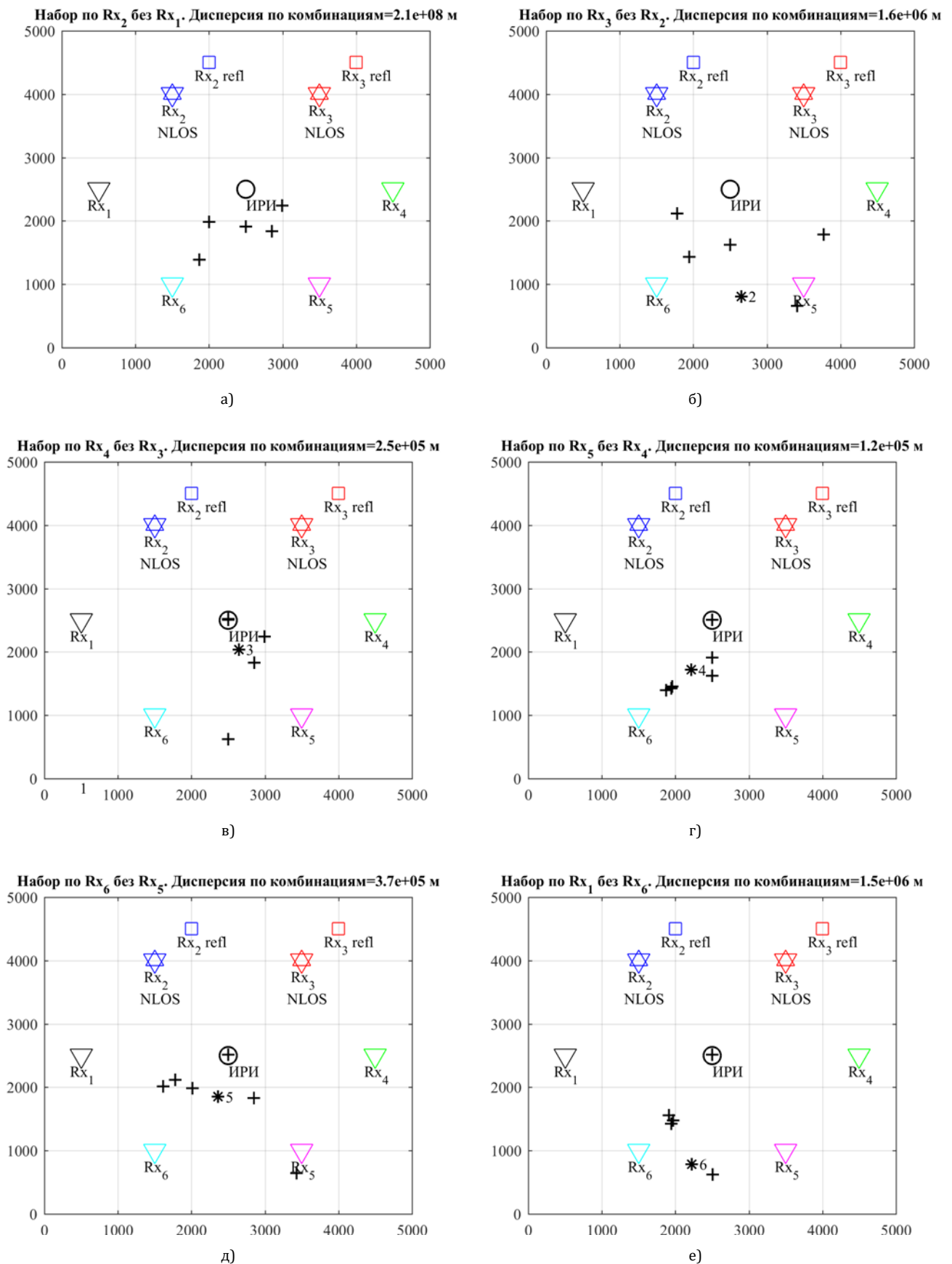


Рис. 8. Пример территориального распределения ИРИ, 6 приемных станций, 2 препятствий, и промежуточных оценок по комбинациям и по наборам с поочередным исключением для гипотезы об одном источнике NLOS измерений

Ниже представлен скрипт и результат работы ИМ по идентификации двух источников NLOS для примера на рисунке 8.

```
function [LocEst2, LocEstVar2, RxNlosEst, multipath] = ...
    LocationNlos(Rx, TDOA_est, LocEst1, multipath)
% Функция реализует подход
% последовательного исключения двух станций
% из набора обрабатываемых измерений для
% сценария двух источников NLOS
% In:
% Rx - матрица размера N*2 координат
% опорных станций
% TDOA_est - матрица размера N*(N-1) РДМ
% измерений для всех сочетаний станций
% Out:
% LocEst2 - оценка координат
% LocEstVar2 - дисперсия промежуточных
% оценок координат
% RxNlosEst - вектор признаков источников
% NLOS (1-LOS, 0-NLOS)
% multipath - признак условий NLOS
numRx = length(Rx); % число приемных станций N
% инициализация вектора признаков NLOS
RxNlosEst = ones(1, numRx);
% инициализация вектора индексов набора
RxInd = [1:1:numRx];
fprintf('Тест Rx for 2 NLOS\n');
% цикл по 1-й исключаемой приемной станции
for i = 1:numRx
% исключение станции Rx из набора.
% Формирование нового набора
Rxx1 = circshift(Rx, (i*(-1))); Rxx1 = Rxx1(1:(numRx-1),:);
% исключение индекса станции Rx из вектора
% индексов набора.
% Формирование нового вектора индексов набора.
RxInd1 = circshift(RxInd, (i*(-1))); RxInd1 =
RxInd1(1:(numRx-1));
% цикл по 2-й исключаемой приемной станции
for j = 1:numRx-1
% исключение станции Rx из набора.
% Формирование нового набора
Rxx2 = circshift(Rxx1, (j*(-1))); Rxx2 =
Rxx2(1:(numRx-2),:);
% исключение индекса станции Rx
% из вектора индексов набора.
% Формирование нового вектора индексов набора.
RxInd2 = circshift(RxInd1, (j*(-1))); RxInd2 =
RxInd2(1:(numRx-2));
k = i+j; % индекс новой опорной станции
if k > numRx
k = k - numRx;
end
% формирование индексов РДМ измерений
str=RxInd2(1);
col1=RxInd2(2)-str; if col1 < 0 col1 = col1 + numRx; end
col2=RxInd2(3)-str; if col2 < 0 col2 = col2 + numRx; end
col3=RxInd2(4)-str; if col3 < 0 col3 = col3 + numRx; end
col = [col1 col2 col3];
TDOA_est_str = TDOA_est(str, col);
[LocEst2(i,j,:), LocEstVar2(i,j)] =
Location(Rxx2, 1,TDOA_est_str);
fprintf('Rx%d%d исключена.
Набор Rx=%d%d%d%d.
Дисперсия=%8.2d\n',...
i, k, RxInd2, LocEstVar2(i,j));
end
end
```

```
% оценка обработанного набора с минимальной дисперсией
[LocEstVar2Min, LocEstVar2MinInd] =
min(LocEstVar2(:));
if LocEstVar2Min < 200
multipath = 0;
% исключение двух Rx привело к идентификации NLOS
[RxLosInd1, RxLosInd2] =
ind2sub(size(LocEstVar2),LocEstVar2MinInd);
RxNlosInd1 = RxLosInd1;
RxNlosInd2 = RxLosInd2 + RxNlosInd1;
if RxNlosInd2 > numRx
RxNlosInd2 = RxNlosInd2 - numRx;
end
RxNlosEst(RxNlosInd1) = 0; RxNlosEst(RxNlosInd2) = 0;
LocEst2 = squeeze(LocEst2(RxLosInd1,RxLosInd2,:));
LocEstVar2 = mean(LocEstVar2,2);
fprintf('1-й NLOS Rx=%d, 2-й NLOS Rx=%d\n',
RxNlosInd1, RxNlosInd2);
fprintf('Координаты = (%8.2d %8.2d)\n', LocEst2);
else
multipath = 3;
end
```

Лог-файл работы функции идентификация двух источников NLOS

Тест Rx for 1 NLOS

Rx=1 исключена. Набор Rx=23456. Дисперсия=2.12e+08
Rx=2 исключена. Набор Rx=34561. Дисперсия=1.64e+06
Rx=3 исключена. Набор Rx=45612. Дисперсия=2.51e+05
Rx=4 исключена. Набор Rx=56123. Дисперсия=1.19e+05
Rx=5 исключена. Набор Rx=61234. Дисперсия=3.69e+05
Rx=6 исключена. Набор Rx=12345. Дисперсия=1.53e+06

Тест Rx for 2 NLOS

Rx12 исключена. Набор Rx=3456. Дисперсия=2.67e+05
Rx13 исключена. Набор Rx=4562. Дисперсия=5.91e+04
Rx14 исключена. Набор Rx=5623. Дисперсия=6.39e+04
Rx15 исключена. Набор Rx=6234. Дисперсия=3.46e+05
Rx16 исключена. Набор Rx=2345. Дисперсия=4.72e+08
Rx23 исключена. Набор Rx=4561. Дисперсия=2.03e+00
Rx24 исключена. Набор Rx=5613. Дисперсия=1.45e+05
Rx25 исключена. Набор Rx=6134. Дисперсия=5.47e+05
Rx26 исключена. Набор Rx=1345. Дисперсия=2.66e+06
Rx21 исключена. Набор Rx=3456. Дисперсия=2.71e+05
Rx34 исключена. Набор Rx=5612. Дисперсия=1.21e+05
Rx35 исключена. Набор Rx=6124. Дисперсия=1.76e+05
Rx36 исключена. Набор Rx=1245. Дисперсия=3.24e+05
Rx31 исключена. Набор Rx=2456. Дисперсия=3.79e+04
Rx32 исключена. Набор Rx=4561. Дисперсия=6.88e+00
Rx45 исключена. Набор Rx=6123. Дисперсия=1.37e+04
Rx46 исключена. Набор Rx=1235. Дисперсия=1.61e+03
Rx41 исключена. Набор Rx=2356. Дисперсия=6.98e+04
Rx42 исключена. Набор Rx=3561. Дисперсия=8.92e+04
Rx43 исключена. Набор Rx=5612. Дисперсия=1.22e+05
Rx56 исключена. Набор Rx=1234. Дисперсия=1.80e+06
Rx51 исключена. Набор Rx=2346. Дисперсия=1.93e+08
Rx52 исключена. Набор Rx=3461. Дисперсия=2.40e+06
Rx53 исключена. Набор Rx=4612. Дисперсия=3.11e+05
Rx54 исключена. Набор Rx=6123. Дисперсия=1.42e+04
Rx61 исключена. Набор Rx=2345. Дисперсия=3.42e+08
Rx62 исключена. Набор Rx=3451. Дисперсия=2.40e+06
Rx63 исключена. Набор Rx=4512. Дисперсия=3.69e+05
Rx64 исключена. Набор Rx=5123. Дисперсия=1.54e+03
Rx65 исключена. Набор Rx=1234. Дисперсия=1.81e+06
1-й NLOS Rx=2, 2-й NLOS Rx=3

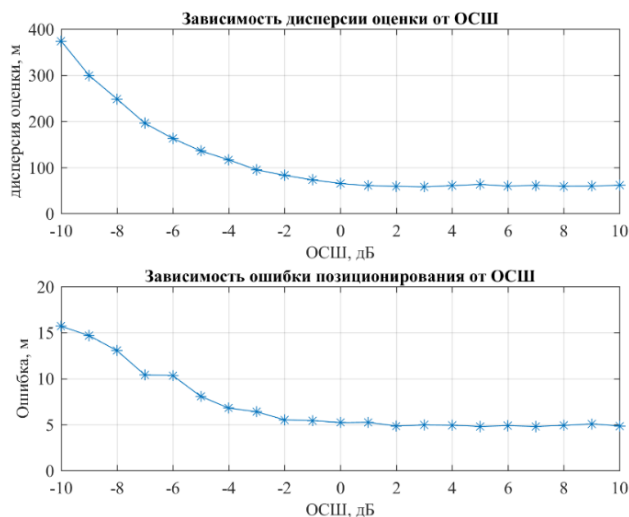


Рис. 9. Зависимость дисперсий оценок и ошибок позиционирования от отношения сигнал-шум для измерений прямой видимости LOS

Функциональная схема алгоритма обработки РДМ измерений в условиях NLOS представлена на рисунке 10: алгоритм производит сравнение дисперсий по наборам σ (15) и по комбинациям σ_n (16) с пороговыми значениями дисперсий σ_{thr} , полученными для измерений прямой видимости (LOS).

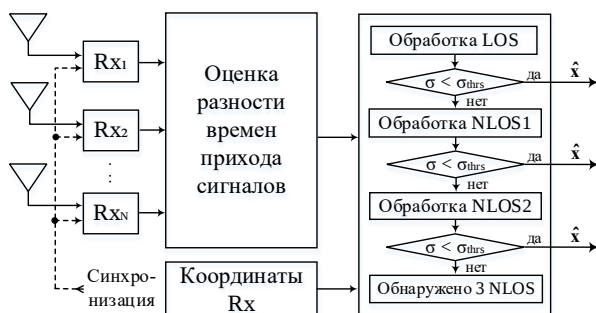


Рис. 10. Функциональная схема алгоритма обработки измерений РДМ в условиях отсутствия прямой видимости

VI. Комплексная имитационная модель

Функциональная схема ИМ для позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом в условиях отсутствия прямой видимости представлена на рисунке 11.

Потери распространения сигнала $r_i(t)$ в (1) определяются при $10 \text{ м} < d_1 < d_{bp}$; $d_{bp} < d_2 < 5000 \text{ м}$, как [13]:

$$PL = \begin{cases} 22 \cdot \log_{10}(d_1) + 28 + 20 \cdot \log_{10}(f_c) \\ 40 \cdot \log_{10}(d_2) + 7.8 - 18 \cdot \log_{10}(h'_{Rx}) \\ -18 \cdot \log_{10}(h'_{Tx}) + 2 \cdot \log_{10}(f_c) \end{cases} \quad (17)$$

где $d'_{bp} = 4h'_{Rx}h'_{Tx}f_c/c$ – пороговое расстояние;
 $h'_{Rx} = h_{Rx} - 1$ – эффективная высота антенны Rx;
 $h'_{Tx} = h_{Tx} - 1$ – эффективная высота антенны ИРИ;
 $h_{Rx} = 25 \text{ м}$ – фактическая высота антенны Rx;
 $h_{Tx} = 1.5 \text{ м}$ – фактическая высота антенны ИРИ;
 f_c – несущая частота.

Ослабление α_i принятого сигнала $r_i(t)$ в (1) определяется выражением: $\alpha_i = 10^{-PL_i/20}$, где PL_i – потери РРВ в дБ на расстоянии d_i , включая возможные отражения.

Подсистема кросс-корреляции реализуется на опорной станции и служит для оценки разности времен прихода Δt_{ij} , $i, j = 1, \dots, N$ путем вычисления взаимной корреляционной функции сигналов с i -ой и j -ой приемных станций:

$$C_{ij}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_{\tau}^T r_i(t)r_j^*(t-\tau)dt, \quad (18)$$

где T – интервал корреляции, или корреляционное окно, а τ – значение, максимизирующее ВКФ и определяющее разность времен прихода Δt_{ij} .

Для случая 4-х Rx на рисунке 3 матрица T разностей времен прихода сигнала имеет $N = 4$ строки и $N-1 = 3$ столбца:

$$T = \begin{bmatrix} \Delta t_{12} & \Delta t_{13} & \Delta t_{14} \\ \Delta t_{23} & \Delta t_{24} & \Delta t_{21} \\ \Delta t_{34} & \Delta t_{31} & \Delta t_{32} \\ \Delta t_{41} & \Delta t_{42} & \Delta t_{43} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Для случая 5 Rx на рисунке 5 матрица T имеет $N = 5$ строк и $N-1 = 4$ столбца:

$$T = \begin{bmatrix} \Delta t_{12} & \Delta t_{13} & \Delta t_{14} & \Delta t_{15} \\ \Delta t_{23} & \Delta t_{24} & \Delta t_{25} & \Delta t_{21} \\ \Delta t_{34} & \Delta t_{35} & \Delta t_{31} & \Delta t_{32} \\ \Delta t_{45} & \Delta t_{41} & \Delta t_{42} & \Delta t_{43} \\ \Delta t_{51} & \Delta t_{52} & \Delta t_{53} & \Delta t_{54} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Из выражений (19) и (20) следует, что для формирования набора относительно i -ой опорной станции достаточно выбрать из матрицы i -ю строку, а для исключения j -ой станции из набора достаточно исключить j -ый столбец.

Рассмотрим подсистему формирования сигнала. В качестве сигнала используется ФМ-2 с временными параметрами кадра GSM: символьная скорость в радиоканале GSM равна $r_{\text{sym}} \approx 270 \text{ кбит/с}$, а длительность информационного символа $t_{\text{sym}}/r_{\text{sym}} \approx 3,7 \text{ мкс}$. На точность оценки взаимной корреляционной функции сигналов с i -ой и j -ой приемных станций влияют, помимо прочих, два параметра: частота дискретизации сигнала и окно корреляции.

Частота дискретизации f_s влияет на точность оценки корреляционной функции следующим образом: с одной стороны, при малом f_s пик функции расширяется, что приводит к увеличению погрешности оценки Δt_{ij} , с другой стороны, при большом f_s объем вычислений $C_{ij}(\tau)$ увеличивается, что приводит к замедлению работы ИМ. Результаты моделирования показали, что увеличение f_s с 27 до 270 МГц слабо влияет на точность оценки, поэтому число выборок на символ было выбрано равным $\text{sps} = 100$, что, вместе с символьной скоростью $r_{\text{sym}} \approx 270 \text{ кбит/с}$, определило частоту дискретизации $f_s = r_{\text{sym}} \cdot \text{sps} = 27 \text{ МГц}$.

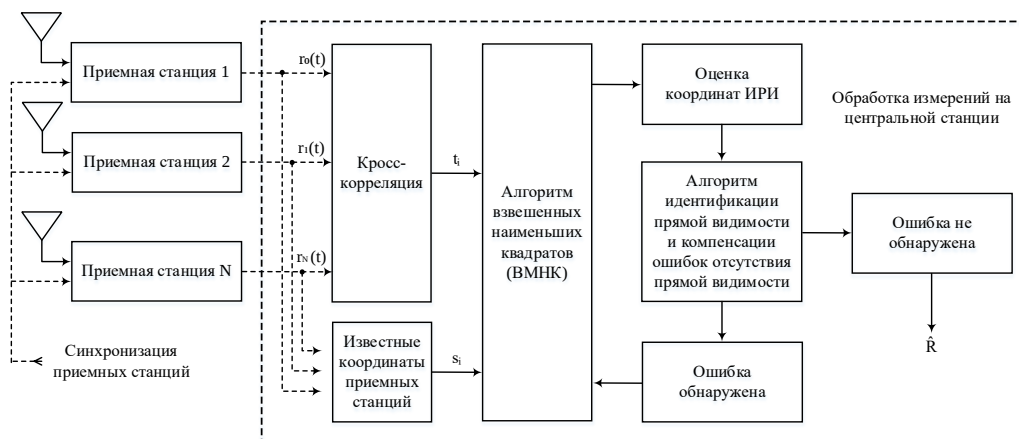


Рис. 11. Функциональная схема имитационной модели для позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом в условиях отсутствия прямой видимости

Размер окна (интервала) корреляции T влияет на точность оценки корреляционной функции следующим образом: с одной стороны, при малом T пик корреляционной функции расширяется, что приводит к увеличению погрешности оценки Δt_{ij} , с другой стороны, при большом T объем вычислений $C_{ij}(\tau)$ увеличивается, что приводит к замедлению работы ИМ. Также следует отметить, что боковые лепестки взаимной корреляционной функции могут привести к увеличению погрешности оценки Δt_{ij} особенно тогда, когда учитываются потери распространения: пример, когда корреляционный пик $C_{13}(t)$ отраженного сигнала $r_3(t)$ оказывается меньше бокового лепестка корреляционной функции $C_{12}(t)$ сигнала $r_2(t)$, пришедшего по лучу прямой видимости, представлен на рисунке 2. На выбор интервала корреляции T влияют также временные параметры используемого сигнала: для сигнала с временными параметрами кадра GSM размер слота составляет 577 мкс, поэтому использование $T > 577$ мкс представляется нецелесообразным.

Отношение сигнал-шум учитывается в ИМ следующим образом. Пусть мощность переданного символа равна $p_{\text{sym}} = 1$ Вт, тогда энергия переданного равна $e_{\text{sym}} = t_{\text{sym}} \cdot p_{\text{sym}}$, а амплитуда сигнала определяется выражением:

$$s = \sqrt{2e_{\text{sym}}/t_{\text{sym}}}. \quad (21)$$

Амплитуда шума определяется выражением:

$$n = \sqrt{(e_{\text{sym}}/t_{\text{sym}})/\text{SNR}}. \quad (22)$$

Представленная ИМ включает, помимо перечисленных ранее возможностей, методику формирования и обработки промежуточных оценок местоположений по комбинациям и по набору.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-3468.2018.9.

VII. Выводы

В настоящем исследовании представлен алгоритм и методики идентификации источников NLOS измерений для позиционирования ИРИ разностно-дальномерным методом в условиях отсутствия прямой видимости.

Для идентификации источников NLOS измерений в настоящем исследовании представлена программная реализация метода идентификации источников NLOS за счет вычисления дисперсий оценок координат, полученных, как из обработки остаточных разностно-дальномерных измерений после поочередного исключения из тестируемых комбинаций приемных станций – вероятных источников ошибок NLOS, так и перебором опорных станций, относительно которых вычисляется разность расстояний. Таким образом, показано, что дифференциация разностно-дальномерных измерений по комбинациям и наборам позволяет методом последовательного исключения станций с высокой вероятностью обнаружить источники NLOS измерений.

Работоспособность представленных алгоритма и методик проиллюстрирована графически на примере идентификации одного источника NLOS для случая 5-ти приемных станций и 2-х источников NLOS для случая 6-ти приемных станций. ИМ, позволившая получить представленные результаты, выгодно отличается от аналогичных исследований комплексным учетом вида сигнала и потерь РРВ, влияющих на точность корреляционной обработки.

В результате проведенного исследования получены пороговые значения дисперсий оценок координат для достоверной идентификации источников NLOS на рисунке 10. Полученные результаты оценки дисперсий могут быть выбраны в качестве пороговых величин при идентификации NLOS источников.

Список используемых источников

1. Zekavat R, Buehrer R.M. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. John Wiley & Sons, 2011.
2. Borras J, Hatrack P, Mandayam N.B. Decision Theoretic Framework for NLOS Identification // Vehicular Technology Conference. VTC 98. 48th IEEE, Ottawa, Ont. 1998. Vol. 2. PP. 1583–1587.
3. Wylie M.P., Holtzman J. The Non-Line-of-Sight Problem in Mobile Location Estimation // Proceedings of ICUPC – 5th International Conference on Universal Personal Communications, Cambridge, MA. 1996. Vol. 2. PP. 827–831.
4. Chen P.-C. A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation // Proceedings IEEE Wireless Communications Networking Conference. 1999. Vol. 1. PP. 316–320.
5. Cong L, Zhuang W. Non-Line-of-Sight Error Mitigation in TDOA Mobile Location // Proceedings IEEE Globecom. 2001. PP. 680–684.
6. Montminy M.B. Passive Geolocation of Low-Power Emitters in Urban Environments Using TDOA: дис. – Air Force Institute of Technology, Mar. 2007.
7. Фокин Г.А. Методика идентификации прямой видимости в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 78–82.
8. Фокин Г.А. Имитационное моделирование процесса распространения радиоволн в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 83–89.
9. Сиверс М.А., Фокин Г.А., Духовницкий О.Г. Позиционирование абонентских станций в сетях мобильной связи LTE разностно-дальномерным методом // Системы управления и информационные технологии. 2015. Т. 59. № 1. С. 55–61.
10. Сиверс М.А., Фокин Г.А., Духовницкий О.Г. Оценка возможностей метода разностно-дальномерного метода позиционирования абонентских станций в системах мобильной связи LTE средствами имитационного моделирования // Информационные технологии моделирования и управления. 2016. Т. 98. № 2. С. 149–160.
11. Sivers M., Fokin G. LTE Positioning Accuracy Performance Evaluation. Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9247. PP. 393–406.
12. Фокин Г.А. Оценка точности позиционирования абонентских станций в сетях LTE разностно-дальномерным методом // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник статей в 2 томах. СПб.: СПбГУТ. 2015. С. 170–173.
13. 3GPP TR 36.814 V9.2.0. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects, March 2017.

* * *

COMPLEX IMITATION MODEL OF RADIO EMISSION SOURCES'S POSITIONING IN THE NON-LINE-OF-SIGHT CONDITIONS

G. Fokin¹

¹The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Fokin G. Complex Imitation Model of Radio Emission Sources's Positioning in the Non-Line-of-Sight Conditions // Proceedings of Telecommunication Universities. 2018. Vol. 4. Iss. 1. PP. 85–101.

Abstract: *The identification of line of sight in the processing of navigational measurements is relevant for positioning in urban conditions, as well as in heterogeneous terrain such as mountains and hills, when there is no direct visibility between the radio source and the receiving stations. The purpose of this work is to develop a complex simulation model for positioning between radio sources using time difference of arrival method in non-line-of-sight conditions.*

Keywords: *Non-Line-of-Sight, Time Difference of Arrival, Root-Mean-Square Error, radio emission source, simulation model.*