



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.5>

УДК: 621.396.1

ВЫБОР ТОПОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ С ФАКТИЧЕСКИ ЗАДАНЫМИ ПОЗИЦИЯМИ ПРИЕМНЫХ ПУНКТОВ

С.С. Семенюк, И.Ю. Еремеев, А.В. Козлов, А.И. Косынкин, И.Д. Веселов

**Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
197158, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13**

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2023 г.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования выбора смешанной топологии измерений разностно-дальномерной системы с фактически заданными позициями приемных пунктов на основе критериев минимума модуля градиента функции разности дальностей и минимума модуля косинуса угла между градиентами функций разностей дальностей, соответствующих двум измерительным базам, с целью увеличения точности определения местоположения источника радиоизлучения.

Ключевые слова: определение местоположения, разностно-дальномерный метод, топология измерения координатно-информативных параметров.

Автор для переписки: Веселов Илья Дмитриевич, veselvi@rambler.ru

Введение

В настоящее время получили активное развитие многопозиционные системы определения местоположения (ОМП) источников радиоизлучений (ИРИ), функционирующие на основе разностно-дальномерного (РДМ) метода [1-4]. Известно, что точность оценивания координат ИРИ в значительной степени зависит от взаимного положения ИРИ и приемных пунктов системы. Вместе с тем, в условиях фактически заданных позиций приемных пунктов точность ОМП зависит и от выбора измерительных баз, т.е. пар приемных пунктов, относительно которых осуществляются измерения разностей дальностей. При этом под фактически заданными позициями понимается совокупность координат приемных пунктов системы ОМП ИРИ, которые по тем или иным причинам не могут быть изменены для формирования более удачной в заданных условиях геометрической конфигурации. Например, в следующих случаях:

- приемные пункты стационарны;
- приемные пункты двигаются по заданной траектории, а измерения координатно-информативных параметров осуществлены в некоторые моменты времени.

Совокупность заданных позиций приемных пунктов определяют пространственную топологию РДМ системы ОМП, которая неизменна при фактически заданных позициях приемных пунктов. Совокупность измерительных баз, используемых для оценивания разностей дальностей и расчета координат ИРИ, определяет топологию измерений РДМ системы ОМП. В ряде публикаций большое внимание уделяется синтезу пространственной топологии РДМ системы, при этом задача синтеза топологии измерений координатно-информативных параметров в научных публикациях не нашла должного внимания [4-11]. В данной статье исследованы вопросы выбора топологии измерений РДМ системы с фактически заданной пространственной топологией, обеспечивающей максимальную точность в точке расположения ИРИ в заданных условиях.

1. Синтез топологии измерений РДМ системы как задача выбора измерительных баз

Рассмотрим РДМ систему ОМП из N приемных пунктов. Положению ИРИ соответствует вектор координат $S = [x \ y \ z]^T$. Тогда расстояние от ИРИ до k -го приемного пункта с фактически заданным в определенный момент времени координатами $S_k = [x_k \ y_k \ z_k]^T$ описывается выражением

$$d_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2}. \quad (1)$$

Совокупность N дальностей d_k может быть представлена в виде вектор-столбца вида $D_{\langle N \rangle} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T$.

Паре приемных пунктов с номерами i и j соответствует разность дальностей до ИРИ

$$r_{i,j} = d_i - d_j, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad i \neq j. \quad (2)$$

Очевидно, что указанная разность дальностей при фактически заданных позициях приемных пунктов представляет собой функцию координат ИРИ, т.е. $r_{i,j} = r_{i,j}(x, y, z) = r_{i,j}(S)$.

В силу того, что измерение параметров местоположения в реальных условиях происходит с ошибками, оценка разности дальностей, соответствующей паре приемных пунктов с номерами i и j , может быть представлена в виде

$$\tilde{r}_{i,j} = c\Delta\tilde{t}_{ij} = r_{i,j} + \tilde{\eta}_{ij}, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad i \neq j, \quad (3)$$

где $\tilde{\eta}_{ij} = c(\Delta\tilde{t}_{ij} - \Delta t_{ij})$ – ошибка измерений разности дальностей от i -го приемного до источника и от j -го приемного пункта до источника, обусловленная погрешностями измерений разности моментов времени прихода радиосигналов ИРИ на приемные пункты;

c – скорость распространения электромагнитных колебаний;

Δt_{ij} – истинная разность моментов времени прихода радиосигналов в i -й и j -й приемный пункт;

$\Delta \tilde{t}_{ij}$ – оценка разности моментов времени прихода радиосигналов в i -й и j -й приемный пункт, полученная в результате измерений.

Как известно, из всех C_N^2 разностей $r_{i,j}$ линейно независимыми являются лишь $(N - 1)$ значений [1]. Так, для разностей дальностей $r_{n,m}$, $r_{n,k}$ и $r_{m,k}$ имеет место равенство $r_{m,k} = r_{n,k} - r_{n,m}$. Поэтому в N -позиционных системах выбор $(N - 1)$ разностей дальностей (измерительных баз), как правило, осуществляется с помощью разностной матрицы $B_{[N-1,N]}$, каждая строка которой состоит из нулей, одной единицы и одной минус единицы [5, 6, 10, 11]. Матрица $B_{[N-1,N]}$ характеризует топологию измерений РДМ системы. Например, разностная матрица, соответствующая топологии измерений типа «звезда» (рис. 1а), когда измерения проводятся относительно одного опорного приемного пункта, имеет вид [5, 6, 11]

$$B_{[N-1,N]} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В этом случае вектор $(N - 1)$ линейно независимых разностей дальностей может быть определен с помощью выражения вида.

$$R_{\langle N-1 \rangle} = B_{[N-1,N]} D_{ИД \langle N \rangle} = [r_{1,2}, r_{1,3}, \dots, r_{1,N}]^T. \quad (5)$$

Выражение **(Ошибка! Источник ссылки не найден.)** равносильно выбору первого приемного пункта в качестве опорного при оценивании разностей дальностей. При этом следует отметить, что если все разностные измерения формировать относительно j -го, а не относительно первого приемного пункта, то положение «1» и «-1» в каждой строке матрицы B изменится, однако, в каждой строке по-прежнему будет одна «1» и одна «-1».

Заданная топология измерений, определяемая вектором $R_{\langle N-1 \rangle}$, в заданной точке пространства S характеризуется геометрическим фактором, который может быть описан выражением вида [4-8]

$$k(S) = \frac{\sigma}{\sigma^{(рд)}} = \frac{\sqrt{\text{tr}((G^T G)^{-1})}}{\sigma^{(рд)}}, \quad (6)$$

где σ – среднеквадратическая ошибка (СКО) ОМП ИРИ;

$\sigma^{(рд)}$ – СКО определения разностей дальностей;

$$G = \left[\frac{\partial R_{\langle N-1 \rangle}}{\partial S} \right]^T - \text{матрица Якоби размером } (N-1) \times 3, \text{ элементами которой}$$

являются все частные производные первого порядка функции $R(S)$ в точке S [4 - 7];

$\text{tr}(\cdot)$ – след матрицы.

Другой вариант выбора линейно независимых разностей дальностей может быть осуществлен с помощью разностной матрицы, соответствующей топологии типа «лента» (рис. 1б) и имеющей вид [5, 6]

$$B_{[N-1, N]} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При использовании этой разностной матрицы вектор разностей дальностей имеет следующий вид

$$R_{\langle N-1 \rangle} = B_{[N-1, N]} D_{\text{ИД} \langle N \rangle} = [r_{1,2}, r_{2,3}, \dots, r_{N-1, N}]^T \quad (8)$$

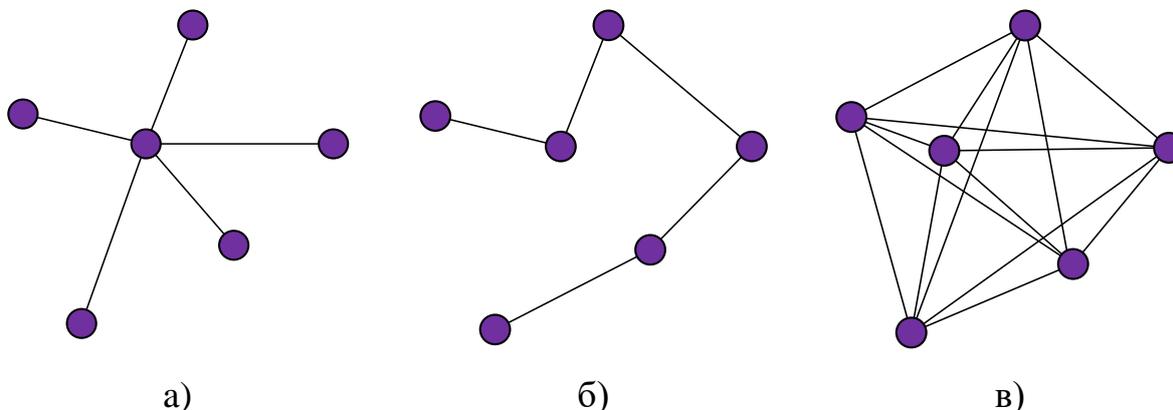


Рис.1. Топологии разностно-дальномерной многопозиционной системы: «звезда» (а), «лента» (б) и «полносвязная» (в)

Указанные топологии измерений имеют существенные недостатки. Во-первых, точность ОМП в соответствии с топологией «звезда» зависит от выбора опорного элемента, при этом выбор необходимо осуществить из N возможных вариантов. В свою очередь при использовании схемы «лента» выбор наилучшей топологии по критерию минимальной погрешности предстоит сделать из $\frac{n!}{2}$ вариантов. Произвольный выбор, не обусловленный применением перебора вариантов по критерию минимальной или допустимой погрешности, в обоих случаях может привести к неопределенному, в том числе худшему, по точности результату.

Во-вторых, использование только линейно независимых измерительных баз не всегда оправдано, поскольку измерение $\tilde{r}_{m,k}$ позволяет уточнить оценку координат, полученную по $\tilde{r}_{n,m}$ и $\tilde{r}_{n,k}$. Это обусловлено тем, что произвольной разности дальностей $r_{m,k}$ соответствует поверхность положения (или линия), параметры которой отличаются от параметров поверхностей (или линий) положения, формируемых разностями $r_{n,m}$ и $r_{n,k}$, т.е. она характеризуется другим геометрическим фактором. Данное утверждение подтверждается результатами имитационного моделирования процесса ОМП ИРИ по двум и трем измерениям разностей дальностей на плоскости, представленными рисунке 2. Так, несмотря на то, что во втором случае добавленное измерение $\tilde{r}_{1,2}$ (рисунок 2б) является линейно зависимым от $\tilde{r}_{1,3}$ и $\tilde{r}_{2,3}$, точность оценивания координат, характеризуемая размерами эллипса рассеивания, увеличилась в 1,4 раза. В первом случае геометрический фактор равен $k(S) = 12,5$, во втором $k(S) = 8,9$. При этом следует отметить, что двумерность имитационной модели в данном и последующих случаях имеет смысл наглядности представления, а результаты моделирования характерны и для трехмерного варианта решения задачи ОМП.

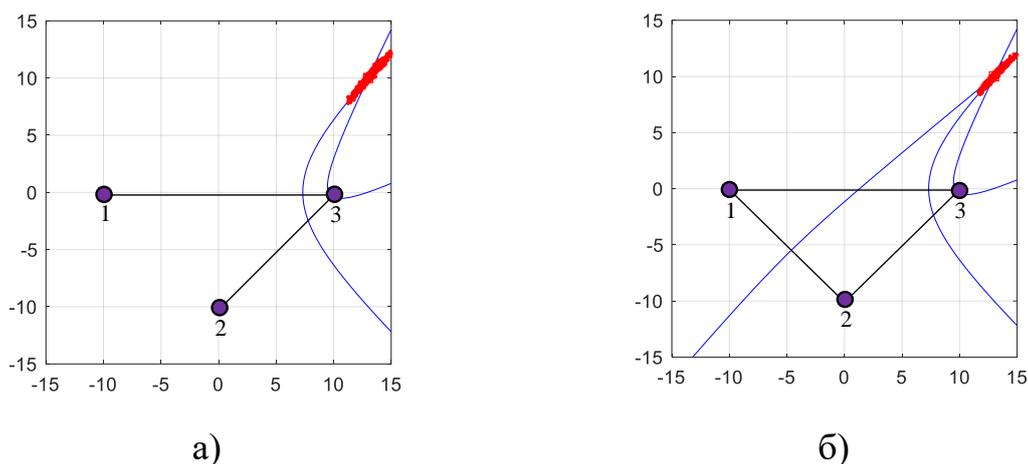


Рис. 2. Результаты моделирования ОМП ИРИ по двум линейно независимым (а) и трем линейно зависимым (б) измерениям разностей дальностей

В-третьих, результат выбора наилучшего варианта в топологиях равноточных измерений «звезда» и «лента» будет всегда уступать полносвязной топологии (рис 1в), когда используется C_N^2 измерений, соответствующих всем возможным измерительным базам N -позиционной разностно-дальномерной системы. На рисунке 3 представлены результаты имитационного моделирования процесса ОМП шестипозиционной РДМ системой с использованием топологий «звезда», «лента» и «полносвязная» с целью сравнения точности оценок координат. В первом случае геометрический фактор равен $k(S) = 5,3$, во втором $k(S) = 5,1$, в третьем $k(S) = 2,4$.

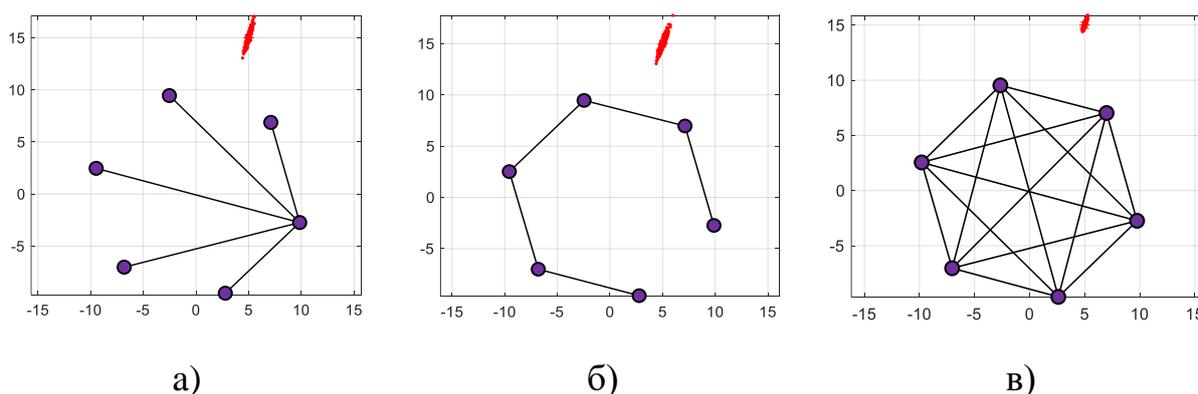


Рис. 3. Результаты моделирования ОМП ИРИ шестипозиционной разностно-дальномерной системой с топологиями «звезда» (а) «лента» (б) и «полносвязная» (в)

Таким образом, широко распространённые топологии равноточных измерений типа «звезда» и «лента» всегда уступают полносвязной топологии

измерений, обеспечивающей максимально достижимый геометрический фактор РДМ системы ОМП в условиях фактически заданных позиции приемных пунктов. Геометрический фактор полносвязной топологии может служить предельной границей при выборе наилучшего в заданных условиях варианта той или иной топологии равноточных измерений. В случае возникновения ограничений на реализацию полносвязной топологии измерений, имеет место необходимость выбора смешанной топологии измерений, то есть наилучших измерительных баз, используемых для оценивания координат ИРИ. С этой целью необходимо определить критерии выбора измерительных баз, составляющих синтезируемую топологию измерений.

2. Определение критериев выбора измерительных баз в целях синтеза топологии измерений

Если расчет разностей дальностей реализуется по результатам измерений моментов времени, соответствующих фронтам принимаемых импульсов, существенных ограничений на вычисление оценки координат с использованием полносвязной топологии нет. Вместе тем, при использовании корреляционного способа оценивания разностей дальностей возможность реализации полносвязной топологии будет снижаться по мере увеличения числа приемных пунктов, что обусловлено ростом вычислительных операций, затрачиваемых на расчет взаимных задержек. В этом случае при ограничении на возможность корреляционной обработки только M пар радиосигналов для ОМП одного ИРИ возникает необходимость выбора наилучшей смешанной топологии измерений разностно-дальномерной системы ОМП с фактически заданными позициями приемных пунктов, реализуемой в заданных условиях.

При малых N и M задача выбора наилучшей комбинации M баз может быть решена расчетом геометрического фактора в заданной точке пространства для каждой комбинации. Однако, с ростом N и M число вариантов в задаче перебора растет существенно. Зависимость числа перебираемых комбинаций от N и M представлена на рисунке 4. Учитывая, что выбор наилучшей комбинации

измерительных баз необходимо производить для множества точек пространства, принадлежащих зоне контроля, такой перебор нецелесообразен. Поэтому следует использовать менее ресурсоемкие критерии выбора измерительных баз.

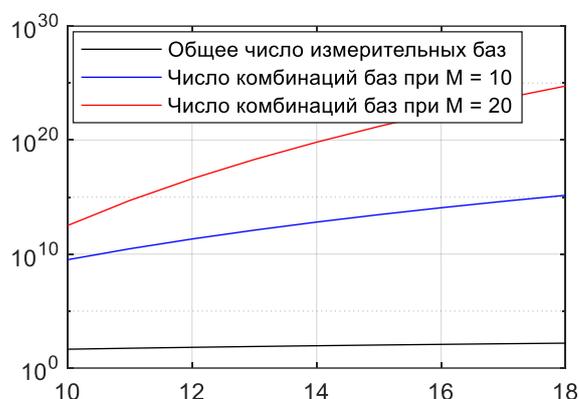


Рис. 4. Зависимость числа измерительных баз и их комбинаций от числа ПП

В силу того что влияние топологии измерений на точность ОМП ИРИ обусловлено свойствами поверхностей положения, определяемых используемым методом, а также их взаимной геометрической конфигурацией в окрестности точки расположения ИРИ, для синтеза наилучшей смешанной топологии измерений необходимо осуществить выбор измерительных баз, характеризуемых поверхностями положения, имеющими наилучшие параметры с точки зрения обеспечиваемой точности определения местоположения. Качество оценки поверхности положения в точке пространства определяется градиентом функции параметра местоположения. Так СКО ошибки определения поверхности положения в точке S , соответствующей измерительной базе, которая образована i -м и j -м приемными пунктами, определяется выражением вида

$$\sigma_{i,j}^{(m)}(S) = \frac{\sigma_{i,j}^{(pl)}(S)}{|P_{i,j}(S)|}, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad i \neq j, \quad (9)$$

где $P_{i,j}(S)$ – градиент функции разности дальностей $r_{i,j}(S)$ в точке S ;

$\sigma_{i,j}^{(pl)}(S)$ – СКО ошибки оценивания разности дальностей $\tilde{r}_{i,j}$;

$|x|$ – операция вычисления нормы вектора, если x – вектор, и

арифметического модуля числа, если x – скаляр.

Градиент $P_{i,j}(S)$ функции $r_{i,j}(S)$ определяется выражением вида

$$P_{i,j}(S) = grad r_{i,j}(S), = \nabla r_{i,j}(S), i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j, \quad (10)$$

где $\nabla = \left\{ \frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}, \frac{d}{dz} \right\}$ – векторный дифференциальный оператор набла (Гамильтона).

Таким образом, ошибка оценки поверхности положения $\sigma_{i,j}^{(min)}(S)$ в произвольной точке пространства обратна пропорциональна модулю градиента функции разностей дальностей. Это означает, что чем больше приращение функции разностей дальностей в точке пространства, тем меньше приращение ошибки поверхности положения при заданном приросте ошибки оценивания разностей дальностей.

Пусть имеет место некоторая площадь, соответствующая зоне контроля, с линейными размерами a и b . Разобьём ее на элементарные зоны в виде квадратов со сторонами Δl так, чтобы $a = \Delta l \alpha$ и $b = \Delta l \beta$, как это представлено на рисунке 5.

При этом каждому квадрату соответствует вектор координат его центра $S^{(p,q)} = [x^{(p,q)} y^{(p,q)} z^{(p,q)}]^T$, $p = 1(1)\alpha, q = 1(1)\beta$, а вся зона контроля характеризуется двумерным массивом координат центров элементарных квадратов $S_{[\alpha,\beta]} = \|S^{(p,q)}\|_{\alpha}^{\beta}$.

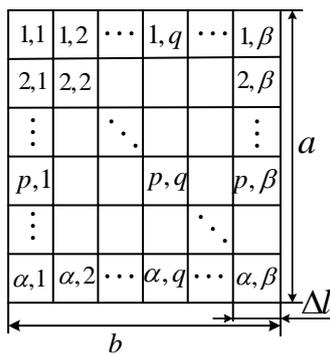


Рис. 5. Разбиение полосы контроля на элементы

На рисунке 6 представлено графическое представление функции разности дальностей для одной измерительной базы, распределение градиентов и модулей градиентов данной функции в двумерном пространстве, а именно в каждой точке массива $S_{[\alpha,\beta]}$. На указанных графиках видны области зоны $S_{[\alpha,\beta]}$,

соответствующие максимальным значениям модуля градиента функции разностей дальностей, т.е. максимальной скорости роста функции $r_{i,j}(S)$. Согласно выражению (9), указанные области соответствуют минимальным значениям погрешности оценивания поверхностей (в данном случае линий) положения.

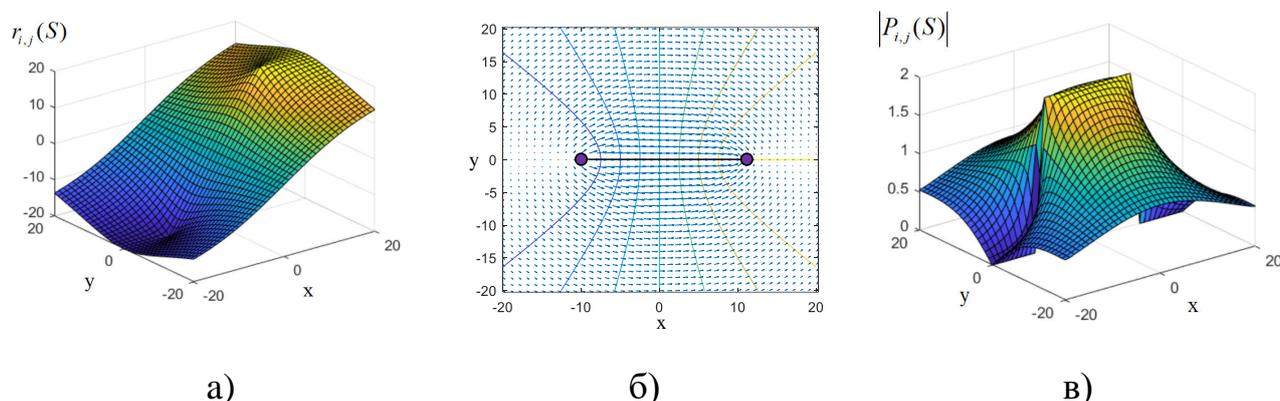


Рис. 6. Распределение разностей дальностей (а), градиента разностей дальностей (б) и модуля градиента разностей дальностей (в) на плоскости для одной измерительной базы

Следовательно, модуль градиента функции разностей дальностей в заданной точке пространства может быть использован в качестве параметра, позволяющего ранжировать измерительные базы по качеству ОМП с целью выбора наилучших баз при синтезе смешанной топологии системы ОМП. Это может быть осуществлено путем расчета множества градиентов $P_{\{C_N^2\}}(S) = \{P_{i,j}(S)\}$, $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$, $i \neq j$, соответствующих всем измерительным базам и отбора M наилучших.

Помимо модуля градиента на величину ошибки ОМП влияет и угол пересечения поверхностей положения, который определяет соотношение большой и малой полуосей эллипсоида ошибок рассеивания. Угол пересечения поверхностей положения может быть определен как угол пересечения касательных к этим поверхностям в заданной точке пространства. Градиент функции в заданной точке пространства перпендикулярен касательной плоскости, т.е. коллинеарен ее нормали. В свою очередь угол между плоскостями может быть определен как угол между их нормальными. Поэтому угол

между поверхностями положения в заданной точке пространства может быть охарактеризован с помощью формулы косинуса угла между векторами градиентов, а именно

$$\cos \alpha(S) = \frac{P_{i,j}(S)P_{n,m}(S)}{|P_{i,j}(S)||P_{n,m}(S)|}, \quad (11)$$

где $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$, $i \neq j$; $n, m \in \{1, 2, \dots, N\}$, $n \neq m$,

Следовательно, взаимная направленность градиентов функции разностей дальностей может быть использована в качестве второго параметра, характеризующего качество ОМП для заданной пары измерительных баз. В силу того, что знак величины $\cos \alpha$ не имеет значения, в качестве показателя качества ОМП заданной парой измерительных баз может быть использована величина $|\cos \alpha|$.

Таким образом, имеют место два показателя качества измерительных баз, которые могут выступить в качестве варьируемых параметров при выборе оптимальной топологии равноточных измерений, а именно:

- модуль градиента функции разности дальностей в заданной точке зоны контроля $|P_{i,j}(S)|$;

- модуль косинуса угла пересечения градиентов функции разностей дальностей в заданной точке контроля $|\cos \alpha|$. В свою очередь в качестве частных критериев выбора измерительных баз могут быть использованы критерий минимума модуля градиента функции разности дальностей $|P_{i,j}(S)| \rightarrow \min$ и критерий минимума модуля косинуса угла между градиентами двух функций разностей дальностей $|\cos \alpha| \rightarrow \min$.

3. Исследование комбинации частных критериев выбора измерительных баз

Для оценивания степени вклада каждого из указанных показателей в результирующую точность ОМП произведем расчет модулей градиентов и их углов пересечения для произвольной пары измерительных баз на плоскости.

Рассмотрим систему из двух измерительных баз, размещенных на плоскости в области $S_{[\alpha,\beta]}$, и произведем расчет величин $k(S)$, $|P_{1,2}(S)|$, $|P_{2,3}(S)|$ и $|\cos \alpha(S)|$ для каждой точки этой области. Размещение измерительных баз и распределение значений указанных величин в области $S_{[\alpha,\beta]}$ представлено на рисунке 7.

Результаты, представленные на рисунке 7 свидетельствуют о том, что наибольшим значениям геометрического фактора системы ОМП соответствуют одновременно и высокие значения модулей градиентов функций разностей дальностей, и углы между векторами градиентов, наиболее близкие к $\pi/2$. Указанное свойство свидетельствует о возможности применения приведенных показателей качества измерительных баз как совместно, так и отдельно.

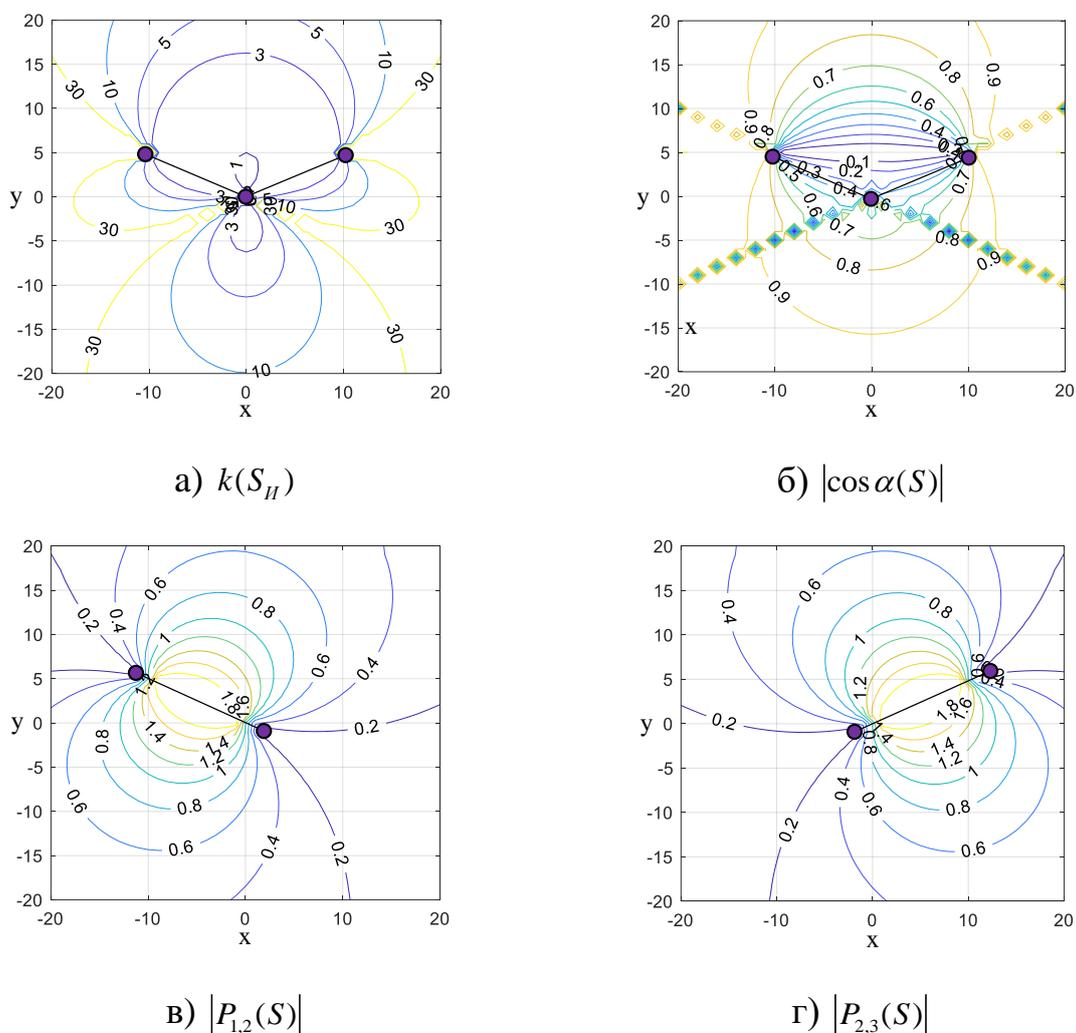


Рис. 6. Распределение геометрического фактора двухбазовой системы ОМП(а), модуля косинуса угла пересечения линий положения двух баз (б), модуля градиента функции разностей дальностей первой базы (в) и модуля градиента функции разностей дальностей второй базы (г) в зоне $S_{[\alpha,\beta]}$

Следует отметить, что в системе из N приемных пунктов имеет место C_L^2 величин $|\cos \alpha|$, где $L = C_N^2$, характеризующих углы между всеми парами измерительных баз. Поэтому при отборе измерительных баз целесообразно произвести расчет некоторого относительного угла, например, между градиентом и вектором, соответствующим отрезку между точкой расположения ИРИ и, например, центром масс координат приёмных пунктов системы ОМП. Пусть точка $S_c = [x_s \ y_c \ z_c]^T$ определяет центр масс системы ОМП, а ее координаты определяются выражением вида

$$S_c = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k. \quad (12)$$

Прямую, проходящую через точки $S^{p,q}$ и S_c , можно задать направляющим вектором $K^{p,q} = S_c - S^{p,q}$. Тогда в качестве модуля косинуса относительного угла может быть использовано выражение вида:

$$|\cos \theta^{(p,q)}| = \left| \frac{P_{i,j}^{(p,q)} \cdot K^{p,q}}{|P_{i,j}^{(p,q)}| |K^{p,q}|} \right|, \quad (13)$$

где $\theta^{(p,q)}$ – угол между градиентом $P_{i,j}^{(p,q)}$ функции $r_{i,j}$ в точке $S^{p,q}$ и направляющим вектором $K^{p,q}$.

Зададим вектор параметров, характеризующих поверхность положения разности дальности $r_{i,j}$ в точке $S^{(p,q)}$, в виде

$$U_{i,j}^{(p,q)} = U_{i,j}(S^{(p,q)}) = \langle k^{(p,q)}, |P_{i,j}^{(p,q)}|, |\cos \theta^{(p,q)}| \rangle. \quad (14)$$

Совокупность из C_N^2 векторов $U_{i,j}^{(p,q)}$ в каждой точке $S^{(p,q)}$ формируют множество вида $W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)} = \{U_{i,j}^{(p,q)}(S^{(p,q)})\}$. Произведем сортировку элементов множества $W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)}$ по величинам $|P_{i,j}^{(p,q)}|$ и $|\cos \theta^{(p,q)}|$ в произвольной точке $S^{(p,q)}$, например, в точке размещения ИРИ, как показано на рисунке 3, получив таким образом следующие множества:

$$\begin{aligned} {}_1W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)} &= SORT \downarrow \left(W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)}, |P_{i,j}^{(p,q)}| \right); \\ {}_2W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)} &= SORT \downarrow \left(W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)}, |\cos \theta_{i,j}^{(p,q)}| \right), \end{aligned} \quad (15)$$

Для отбора наилучших измерительных баз относительно точки $S^{(p,q)}$ по критерию минимума модуля градиента необходимо выбирать элементы множества ${}_1W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)}$, начиная с первого. Для отбора баз по критерию минимума модуля косинуса угла необходимо выбирать элементы множества ${}_2W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)}$, номера которых соответствуют последовательности вида

$$n = 1, N, 2, (N - 1), 3, (N - 2) \dots \quad (16)$$

Указанная последовательность выбора обеспечит наибольшее расхождение углов между градиентами поверхностей положения выбираемых измерительных баз.

В силу того, что необходимо синтезировать смешанную топологию системы ОМП, включающую M баз из L , критерий выбора может быть комбинированным. Это означает, что одновременно может быть выбрано Ω первых элементов множества ${}_1W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)}$ и Ψ элементов множества ${}_2W_{\{C_N^2\}}^{(p,q)}$, непересекающихся с Ω элементами, по правилу (16) и при $\Psi + \Omega = M$. На рисунке 8 представлено изображение линий равного геометрического фактора системы в зависимости от комбинации величин Ψ и Ω ($k^{(p,q)} = f(\Psi, \Omega)$) для системы из шести приемных пунктов и координат ИРИ, соответствующих исходным данным изображений на рисунке 3. Для точек 1, 2 и 3 графика представлены соответствующие заданным Ψ и Ω смешанные топологии и значения геометрического фактора. Геометрический фактор смешанных топологий 2 и 3 близок к геометрическому фактору полносвязной топологии, представленной на рисунке 3в.

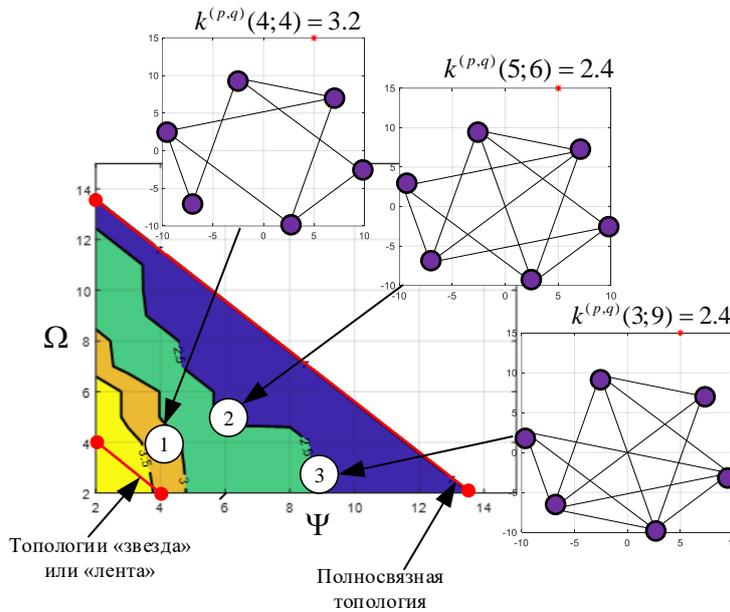


Рис. 8. Распределение геометрического фактора $k^{(p,q)} = f(\Psi, \Omega)$ по Ψ и Ω элементов выбора для системы из шести приемных пунктов

На рисунке 9 представлено изображение линий равного геометрического фактора системы из 9 приемных пунктов. Рисунки 8 и 9 свидетельствуют, что отбор измерительных баз по второму критерию дает лучший результат. Так, при выборе $\Psi = M$ элементов по критерию минимума модуля градиента геометрический фактор ниже, чем при выборе $\Omega = M$ по критерию модуля косинуса относительного угла.

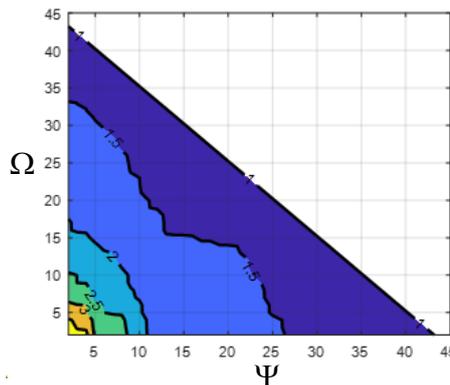


Рис. 8. Распределение геометрического фактора $k^{(p,q)} = f(\Psi, \Omega)$ по Ψ и Ω элементов выбора для системы из восьми приемных пунктов

Таким образом, синтез смешанной топологии путем выбора измерительных баз по приведённым частным критериям позволяет снизить влияние геометрического фактора на точность ОМП в заданной точке пространства по сравнению с топологиями «звезда» и «лента». Однако, в силу

того что геометрический фактор системы меняется в зависимости от местоположения ИРИ, для каждого элемента массива $S_{[\alpha, \beta]}$ будет иметь место своя смешанная топология, выбор которой может быть осуществлен на основе приведенных показателей и критериев. Кроме того, указанные показатели и критерии выбора смешанной топологии измерений может быть применены для уточнения оценок координат ИРИ, полученных с использованием произвольной топологии.

Следует отметить, что в случае неравноточности измерений требуется учет параметров принятых радиосигналов (в первую очередь отношение сигнал/шум), по которым производятся измерения координатно-информативных параметров. Поэтому рассмотренный подход формирования частных критериев может быть использован в качестве основы для формирования и исследования критериев выбора смешанной топологии неравноточных измерений координатно-информативных параметров как при реализации разностно-дальномерного метода, так и других методов определения местоположения.

Заключение

Точность оценивания координат ИРИ в многопозиционных РДМ системах в значительной степени зависит от взаимного положения ИРИ и приемных пунктов системы. В условиях фактически заданных позиций приемных пунктов указанная зависимость проявляется во влиянии взаимного положения измерительных баз, используемых для оценивания параметра местоположения, и ИРИ на точность ОМП. Совокупность используемых измерительных баз в этом случае определяют топологию измерений РДМ системы. Наилучшей по точности ОМП при равноточности измерений является полносвязная топология. Однако, реализация полносвязной топологии может иметь ограничения по количеству измерительных баз. В этом случае может быть синтезирована смешанная топология измерений с использованием критериев минимума модуля градиента функции разности дальностей и минимума модуля косинуса угла между градиентами функций разностей дальностей, соответствующих двум

измерительным базам. Выбор смешанной топологии измерений позволяет существенно увеличить точность ОМП по сравнению с применением классических топологий «лента» и «звезда». Рассмотренный подход может быть использован в качестве основы для формирования и исследования критериев выбора смешанной топологии неравноточных измерений координатно-информативных параметров.

Литература

1. Перечень поставляемого оборудования и программного обеспечения: Альманах // Авиателекоминвест. URL: <https://aviatelecominvest.com/#block-4> (дата обращения: 02.12.2022).
2. Multilateration (MLAT) Concept of use // ИКАО. URL: https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/mlat_concept.pdf (дата обращения: 15.12.2022).
3. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. *Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты*. Москва, Горячая линия - Телеком. 2017. 424 с.
4. Семенюк С.С., Христичан Е.В., Саниев Р.Р. Обоснование подхода к снижению вариативности геометрического фактора системы определения координат воздушных объектов по технологии MLAT. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.14>
5. Семенюк С.С., Уткин В.В., Бердинских Л.Н. Геометрический фактор разностно-дальномерной сети датчиков в пространстве. *Научные технологии*. 2012. №8. С.66-73.
6. Абакумов А.Н., Семенюк С.С. Исследование влияния геометрической конфигурации разностно-дальномерной системы на точность определения местоположения абонентских терминалов спутниковых систем связи. *Труды ВКА им. А.Ф. Можайского*. Санкт-Петербург. 2014. Ч.1. №634. С.40-50.

7. Лопатин Е.А., Семенюк С.С. Метод разбиения множества распределенных в пространстве датчиков на разностно-дальномерные группы определения местоположения при оперативном мониторинге радиообстановки. *Доклады ТУСУРа*. Томск. 2011. Ч.1. №2(24). С.25-33.
8. Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В. Исследование зависимости значения геометрического фактора снижения точности от топологии пунктов приема. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2018. №2. С.99-104.
9. Гайчук Ю.Н., Печурин В.В., Серебряков Ю.И. Исследование погрешности определения местоположения источников радиоизлучений группой беспилотных летательных аппаратов. *Научные технологии*. 2016. №12. С.34-39.
10. Torrieri D.J. Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1984. V.AES-20. №3. P.183-198. <https://doi.org/10.1109/TAES.1984.310439>.
11. Кондратьев В.С. *Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. Цветкова В.В.* Москва, Радио и связь. 1986. 264 с.

Для цитирования:

Семенюк С.С., Еремеев И.Ю., Козлов А.В., Косынкин А.И., Веселов И.Д. Выбор топологии измерений разностно-дальномерной системы определения местоположения источников радиоизлучений с фактически заданными позициями приемных пунктов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.5>