

УДК 621.396.96

В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков

Алгоритм отбраковки аномально больших ошибок пеленгования фазовым пеленгатором

Рассматривается фазовый пеленгатор с антенной системой в виде линейной решетки, предназначенный для определения углового положения источника излучения в азимутальной плоскости. Работа пеленгатора строится на основании принципа максимального правдоподобия в предположении нормального распределения вероятностей фазовых ошибок в измерительных каналах. Проводится оценка модуля составляющей вектора фазовых погрешностей, приводящей к неправильному устранению неоднозначности измерений, и «стирание» измерений, где она превосходит установленный порог. Проводится сравнительный анализ теоретических и практических характеристик пеленгатора.

Ключевые слова: фазовый пеленгатор, антенная решетка, оценка пеленга.

Рассматривается фазовый пеленгатор с антенной системой в виде линейной решетки, состоящей из слабонаправленных элементов, предназначенный для определения углового положения источника излучения в азимутальной плоскости. Если источник радиоизлучения находится на значительном удалении от антенной системы пеленгатора, то фронт приходящей волны можно считать плоским (рис. 1).

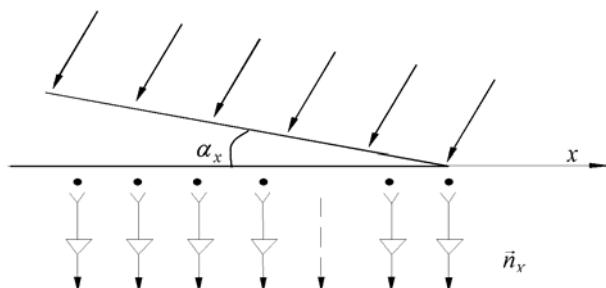


Рис. 1. Структурная схема антенной решетки

Оценка направляющего косинуса $v = \cos \alpha_X$, падающей на антеннную решетку плоской волны, полученная по принципу максимального правдоподобия, определяется путем весового суммирования полных разностей фаз $\bar{\Phi}$ [1]

$$v^* = \bar{\Phi}^T \bar{q}_v, \quad (1)$$

где \bar{q}_v – вектор весовых коэффициентов, который находится из соотношения $\bar{q}_v = \frac{\mathbf{B}_\phi^{-1} \bar{n}_X}{\bar{n}_X^T \mathbf{B}_\phi^{-1} \bar{n}_X}$;

\mathbf{B}_ϕ^{-1} – матрица, обратная корреляционной матрице фазовых ошибок; $\bar{\Phi} = \bar{\phi} + \bar{k}$, $\bar{\phi}$ – вектор измеренных разностей фаз в единицах 2π , все координаты которого не превышают по модулю значения $0,5$; \bar{k} – вектор неоднозначности – полное число разностей фаз, утраченных при измерении; \bar{n}_X – вектор масштабных коэффициентов, элементы которого равны отношению фазометрической базы к длине приходящей волны.

Если ошибки фазовых измерений распределены по нормальному закону с нулевыми средними значениями и известной корреляционной матрицей \mathbf{B}_ϕ , то дисперсия оценки направляющего косинуса σ_v^2 при правильном устранении неоднозначности измерений определяется соотношением

$$\sigma_v^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{\bar{n}_X^T \mathbf{B}_\phi^{-1} \bar{n}_X}.$$

Для получения оценки направляющего косинуса v^* необходимо предварительно устранить неоднозначность фазовых измерений или найти вектор неоднозначности \bar{k} .

Существуют различные алгоритмы устранения неоднозначности. Их качество оценивается вероятностью правильного устранения неоднозначности P_0 . Наивысшее значение дает максимально правдоподобный (или оптимальный) алгоритм, согласно которому в качестве оценки вектора неоднозначности \vec{k}^* выбирается такой вектор из общей совокупности векторов неоднозначности $\{\vec{k}\}$, который минимизирует квадратичную форму $\Pi_{\vec{\phi}}(\vec{k})$ [1]

$$\Pi_{\vec{\phi}}(\vec{k}) = (\vec{\phi} + \vec{k})^T \cdot \mathbf{G} \cdot (\vec{\phi} + \vec{k}), \quad (2)$$

где \mathbf{G} – квадратная матрица, ортогональная вектору \vec{n}_X , определяемая выражением

$$\mathbf{G} = \mathbf{B}_{\vec{\phi}}^{-1} - \frac{\mathbf{B}_{\vec{\phi}}^{-1} \vec{n}_X \vec{n}_X^T \mathbf{B}_{\vec{\phi}}^{-1}}{\vec{n}_X^T \mathbf{B}_{\vec{\phi}}^{-1} \vec{n}_X}.$$

Оценка вектора неоднозначности находится по формуле

$$\vec{k}^* = \arg \min_{\vec{k}_i \in \{\vec{k}\}} (\vec{\phi} + \vec{k}_i)^T \cdot \mathbf{G} \cdot (\vec{\phi} + \vec{k}_i).$$

Другим алгоритмом устранения неоднозначности, который является упрощением максимально правдоподобного, является квазиоптимальный алгоритм [2]. Для устранения неоднозначности этим способом вводится квадратная матрица \mathbf{C} размерами $n \times n$ (где n – число разностей фаз). Первые $n-1$ столбца матрицы \mathbf{C} составляют векторы неоднозначности опорной совокупности [1], а последний – целочисленный вектор \vec{e}_X , параллельный вектору масштабных коэффициентов $\vec{e}_X = \Delta v_{\text{одн}} \cdot \vec{n}_X$, $\mathbf{C} = (\vec{k}_1, \vec{k}_2, \dots, \vec{k}_{n-1}, \vec{e}_X)$. Матрица \mathbf{C} является матрицей перехода к новому базису. Ее детерминант по модулю равен единице.

Оценка вектора неоднозначности квазиоптимальным алгоритмом определяется следующим путем. Сначала находятся координаты вектора измеренных разностей фаз в новом базисе $\vec{\tilde{\phi}}$

$$\vec{\tilde{\phi}} = \mathbf{C}^{-1} \vec{\phi},$$

где \mathbf{C}^{-1} – матрица, обратная матрице \mathbf{C} .

Затем находятся координаты оценки вектора неоднозначности в новом базисе $\vec{\tilde{k}}^*$

$$\vec{\tilde{k}}^* = -\langle \vec{\tilde{\phi}} \rangle,$$

где $\langle \bullet \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

Оценка вектора неоднозначности в старом базисе \vec{k}^* определяется по формуле

$$\vec{k}^* = \mathbf{C} \vec{\tilde{k}}^*.$$

При использовании квазиоптимального алгоритма устранения неоднозначности оценка направляющего косинуса v^* , найденная по формуле (1), должна быть приведена к сектору однозначности $\Delta v_{\text{одн}}$.

Значение квадратичной формы (2) можно использовать для уменьшения вероятности погрешностей пеленгования, вызванных неправильным устранением неоднозначности измерений. Рассматриваемый максимально правдоподобный алгоритм основан на разложении вектора полных разностей фаз $\vec{\Phi} = \vec{\phi} + \vec{k}$ на две составляющие. Одна из них коллинеарна вектору баз \vec{n}_X в n -мерном пространстве измерений и соответствует углу прихода плоской волны на antennную систему пеленгатора. Соответствующие вычисления проводятся по формуле (1). Вторая составляющая ортогональна вектору \vec{n}_X . Квадрат ее модуля $\Pi_{\vec{\phi}}(\vec{k})$ вычисляется по формуле (2). При отсутствии фазовых погрешностей эта составляющая равна нулю. Ее наличие может привести к неправильному устранению неоднозначности.

Для снижения вероятности аномальных ошибок можно наложить ограничение на значение квадратичной формы $\Pi_{\vec{\phi}}(\vec{k}^*)$. Если значение не превышает некоторого порогового значения Δ :

$$\Pi_{\vec{\phi}}(\vec{k}^*) < \Delta, \quad (3)$$

то проводится измерение направляющего косинуса v^* . В противном случае измеренная совокупность разностей фаз отбрасывается или стирается. Таким образом,

$$P_H + P_C = 1,$$

где P_H - вероятность измерения оценки направляющего косинуса v^* ; P_C - вероятность стирания совокупности разности фаз.

В случае измерения оценки направляющего косинуса v^* возможны два исхода. Если выполняется условие $|v_{\text{ист}} - v^*| < \frac{0,5}{|eX|_{\max}}$, то неоднозначность фазовых измерений была разрешена правильно

но, и грубой ошибки оценки направляющего косинуса v^* удалось избежать [1]. В противном случае имеет место аномальная ошибка. Введем следующие обозначения: $P_{\text{ПИ}}$ - вероятность правильного измерения, $P_{\text{ЛИ}}$ - вероятность ложного измерения, $P_{\text{ПС}}$ - вероятность правильного стирания, $P_{\text{ЛС}}$ - вероятность ложного стирания. Тогда

$$P_H = P_{\text{ПИ}} + P_{\text{ЛИ}}, \quad P_C = P_{\text{ПС}} + P_{\text{ЛС}}, \quad P_{\text{ПИ}} + P_{\text{ЛИ}} + P_{\text{ПС}} + P_{\text{ЛС}} = 1.$$

Вероятность правильного устранения неоднозначности фазовых измерений P_0 определяется по формуле

$$P_0 = \frac{P_{\text{ПИ}}}{P_H},$$

а, соответственно, вероятность аномальной ошибки P_A -

$$P_A = \frac{P_{\text{ЛИ}}}{P_H}.$$

При отсутствии ограничения (3), налагаемого на значение квадратичной формы (2), определение значения вероятности правильного устранения неоднозначности фазовых измерений P_0 связано с вычислением $(n-1)$ -мерного интеграла

$$P_0 = \int_{D} \int W_{n-1}(y_1, \dots, y_{n-1}) dy_1 \dots dy_{n-1},$$

где $W_{n-1}(y_1, \dots, y_{n-1})$ - $(n-1)$ -мерная плотность распределения случайных величин y_1, \dots, y_{n-1} , элементы корреляционной матрицы которой равны $\vec{k}_i^T \cdot \mathbf{G} \cdot \vec{k}_j$, n - количество фазометрических баз.

Интегрирование ведется по $(n-1)$ -мерной области D , которая называется собственной областью вектора неоднозначности. На рис. 2 приведены собственные области нулевого вектора неоднозначности для оптимального и квазиоптимального алгоритмов устранения неоднозначности.

Из рис. 2 видно, что хотя площади собственных областей 2 и 3 одинаковы, собственная область вектора неоднозначности при использовании оптимального алгоритма лучше аппроксимирует эллипсоид рассеяния 1. Это приводит к более высоким значениям вероятности правильного устранения неоднозначности.

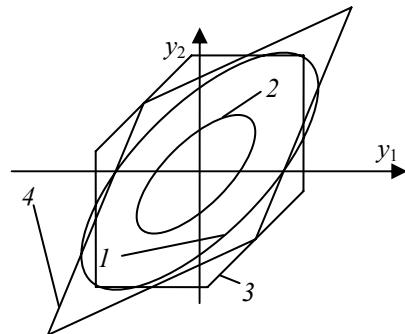


Рис. 2. Эллипсоид рассеяния (1), эллипсоид порогового ограничения S (2) и собственные области нулевого вектора неоднозначности для оптимального (3) и квазиоптимального (4) алгоритмов

Введение порогового ограничения (3), которому на рис. 2 соответствует эллипсоид S , приводит к тому, что для определения вероятности правильного измерения необходимо вычислить $(n-1)$ -мерный интеграл по области S . Вероятность правильного устранения неоднозначности фазовых измерений P_0 определяется по формуле

$$P_0 = \frac{\int_{S_0} \dots \int W_{n-1}(y_1, \dots, y_{n-1}) dy_1 \dots dy_{n-1}}{\sum_{i=0}^M \left[\int_{S_i} \dots \int W_{n-1}(y_1, \dots, y_{n-1}) dy_1 \dots dy_{n-1} \right]},$$

где S_0 - эллипсоид порогового ограничения, находящийся внутри собственной области нулевого вектора неоднозначности, S_i - эллипсоид порогового ограничения, находящийся внутри собственной области вектора неоднозначности \vec{k}_i , входящего в общую совокупность векторов неоднозначности $\vec{k}_i \in \{\vec{k}\}$, $i = \overline{0, M}$; $M+1$ - количество векторов неоднозначности общей совокупности $\{\vec{k}\}$.

Изложенный алгоритм применим к пеленгаторам с любым количеством антенн, образующих линейную или плоскую решетку, и различным схемам образования фазометрических баз. Рассмотрим его применительно к трехбазовому пеленгатору с линейной решеткой.

Эффективность введения порогового ограничения (3) была проверена с помощью компьютерного моделирования. Схема разнесения антенн, образующая фазовый пеленгатор с указанием фазометрических баз в миллиметрах, показана на рис. 3.

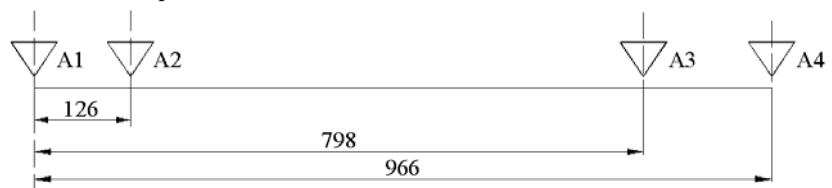


Рис. 3. Схема разнесения антенн фазового пеленгатора

На рис. 4 представлена теоретическая зависимость вероятности правильного устранения неоднозначности фазовых измерений P_0 от СКО фазовых ошибок при различных пороговых значениях Δ , а также значения P_0 при использовании квазиоптимального алгоритма устранения неоднозначности при отсутствии ограничения квадратичной формы (2).

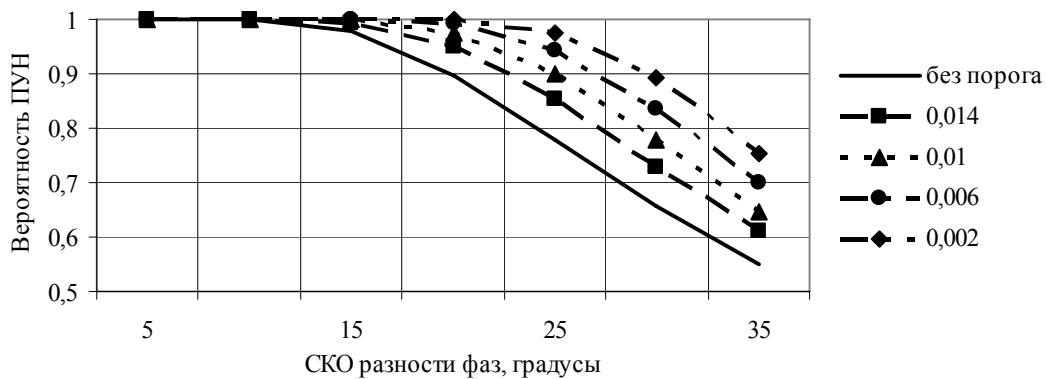


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного устранения неоднозначности (ПУН) от СКО разности фаз и значений порога квадратичной формы

Из рис. 4 следует, что введение ограничения значения квадратичной формы (2) позволяет существенно снизить вероятность аномальных ошибок. Например, при СКО разности фаз 25 градусов аномальные ошибки уменьшаются с 22 до 10% при $\Delta = 0,01$ и 6% при $\Delta = 0,006$.

Данное улучшение происходит за счет стирания «плохих» отсчетов измеренных разностей фаз или снижения вероятности измерения P_I . На рис. 5 приведена зависимость вероятности измерения от СКО фазовых ошибок при различных пороговых значениях Δ .

Из рис. 5 следует, что при введении ограничения значения квадратичной формы (2) снижается число отсчетов, по которым определяется пеленг источника излучения. Например, при СКО разности фаз 25 градусов число отброшенных измерений составляет 22% при $\Delta = 0,01$ и 51% при $\Delta = 0,006$.

Результаты компьютерного моделирования показали, что СКО оценки направляющего косинуса σ_v^* при правильном устранении неоднозначности практически не зависит от пороговых значений Δ .

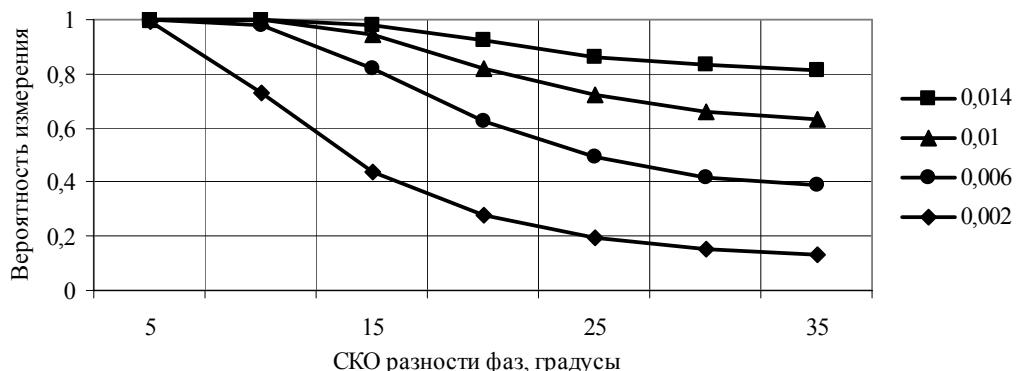


Рис. 5. Зависимость вероятности измерения от СКО разности фаз и значений порога квадратичной формы

Данная ситуация является следствием того, что по принятым условиям моделирования составляющая вектора фазовых погрешностей, коллинеарная вектору базы \vec{n}_X , и составляющая, ортогональная по отношению к \vec{n}_X , статистически независимы.

Помимо компьютерного моделирования, предлагаемая методика повышения точности фазового пеленгатора была проверена при обработке данных натурного эксперимента.

Экспериментальные исследования пеленгатора проводились на наземных трассах протяженностью от 6,7 до 6,9 км в сантиметровом диапазоне волн. Характеристики источника излучения и самого фазового пеленгатора подробно описаны в [3]. Измерения проводились на пересеченной местности к юго-западу от г. Томска. Пеленгатор располагался на территории радиофизического полигона ТУСУРа на правом берегу р. Томи с превышением 60 м. Передающие позиции располагались за левым берегом около д. Барабинка. Участки трассы представляли собой равнину с небольшим уклоном, покрытую луговой растительностью, покосами, пашнями и редколесьем.

Источник излучения располагался последовательно на трех позициях. Первая позиция считалась исходной. На нее была наведена антenna пеленгатора с помощью оптического визира с погрешностью не более 5 угловых минут. Отклонения разностей фаз от нуля на измерительных базах пеленгатора считались погрешностями и учитывались при измерениях на других позициях ИРИ. При измерениях антenna ИРИ максимумом ДН была ориентирована на пеленгатор, а направление антennы пеленгатора оставалось неизменным. Измерения разностей фаз проводились при излучении сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации сеансами по 10 с. Пример записи разностей фаз $\Delta\phi$ на фазометрических базах при расположении ИРИ на второй *а*) и третьей *б*) позициях дан на рис. 6.

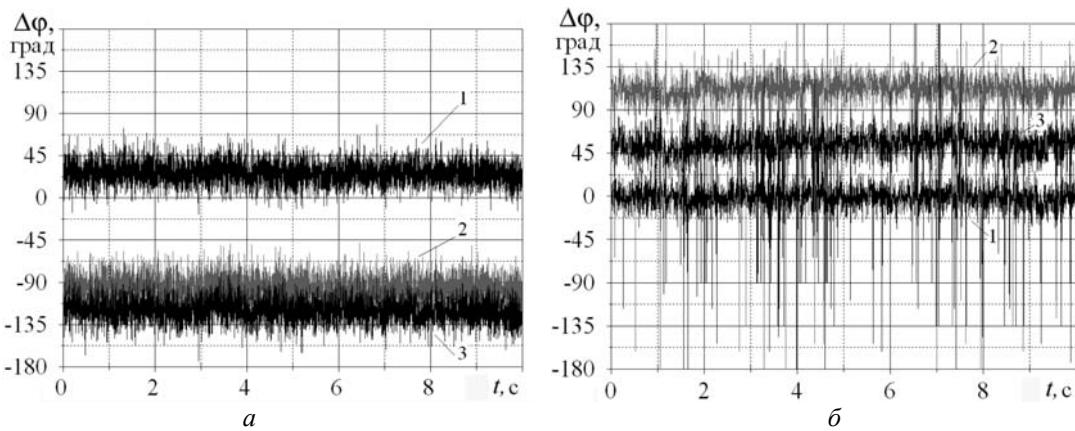


Рис. 6. Пример записи разности фаз сигнала на выходах антенн, образующих базы:
1 – 126 мм, 2 – 798 мм и 3 – 966 мм при расположении ИРИ на *а* – второй и *б* – третьей позиции

Эффективность введения порогового ограничения (3) на значения квадратичной формы (2) иллюстрируется рис. 7. При отсутствии ограничения (3) вероятность правильного устранения неоднозначности для первого положения источника излучения равна 0,999, для второго – 0,968, для третьего – 0,948. При введении порога она увеличивается.

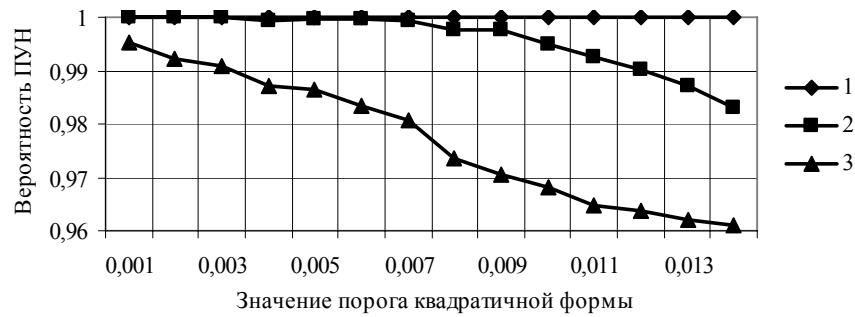


Рис. 7. Зависимость вероятности правильного устранения неоднозначности (ПУН) от значений порога квадратичной формы

На рис. 8 представлена зависимость СКО направляющего косинуса источника излучения σ_v^* от СКО фазовых ошибок при различных пороговых значениях Δ .

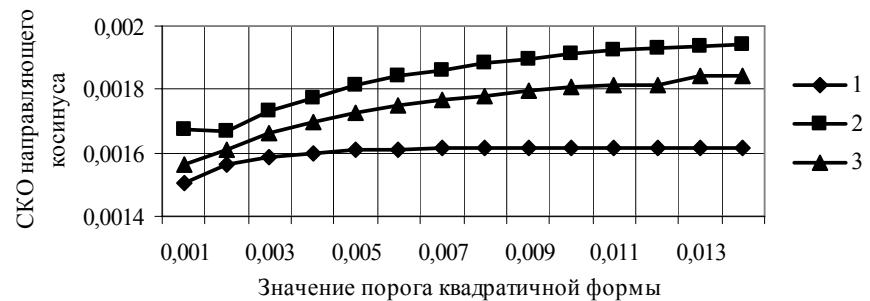


Рис. 8. Зависимость СКО оценки направляющего косинуса σ_v^* от значений порога квадратичной формы при расположении ИРИ на позициях 1, 2, 3

При отсутствии ограничения (3) и правильном устранении неоднозначности для первого положения источника излучения СКО направляющего косинуса равно 0,001614, для второго – 0,001943, для третьего – 0,001857.

В отличие от теоретических расчетов, при уменьшении величины Δ точность пеленгования возрастает. При значении $\Delta=0,002$ точность пеленгования источника излучения, находящегося во второй точке, возрастает на 14%, при $\Delta=0,006$ – на 5%. При положении источника в третьей точке – соответственно на 13 и 5%.

Очевидно, это связано с тем, что флюктуации «угла прихода» радиоволны на антеннную систему пеленгатора, вызванные процессами на трассе распространения, сопровождаются фазовыми погрешностями, приводящими к увеличению квадратичной формы (2). Чем больше угловые флюктуации, тем больше значение формы (2). Большие флюктуации «стираются» за счет ограничения формы (2), что обуславливает вид графиков рис. 8.

На рис. 9 показаны временные зависимости оценки направляющего косинуса источника радиоизлучения без ограничения квадратичной формы (рис. 9, *а*) и при наличии ограничения $\Delta=0,006$ (рис. 9, *б*). ИРИ находился на третьей позиции, что соответствует значению направляющего косинуса $v=-0,0139$. Резкие отклонения от этого значения соответствуют аномальным ошибкам. Сравнивая между собой рис. 9, *а* и 9, *б*, можно увидеть, что количество выбросов на рис. 9, *б* заметно сократилось, что свидетельствует об уменьшении аномальных ошибок.

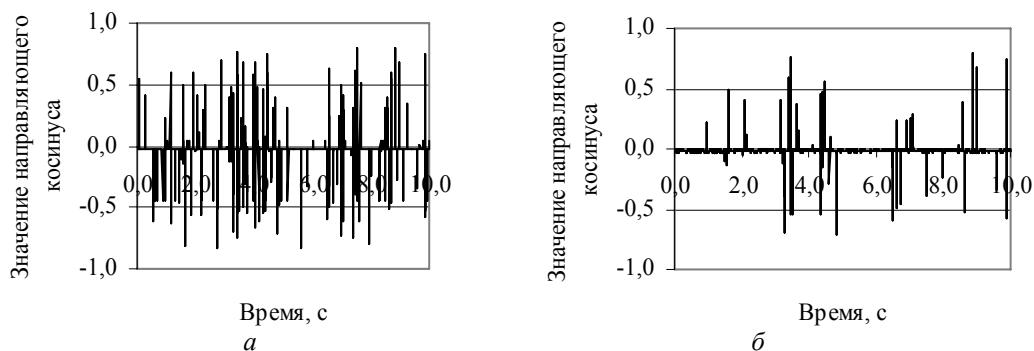


Рис. 9. Пример измерений оценки направляющего косинуса ИРИ
а – без ограничения значений квадратичной формы; *б* – при пороговом значении $\Delta=0,006$

Результаты проделанной работы показывают, что за счет отбрасывания ряда отсчетов измеренных разностей фаз можно существенно (в несколько раз) понизить вероятность аномальных ошибок пеленгования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 12-08-01112 «Анализ и научное обобщение результатов многолетних экспериментальных исследований в области распространения радиоволн, выполненных в ТУСУРа».

Литература

1. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 251 с.
2. Белов В.И. Квазиоптимальный алгоритм устранения неоднозначности в многошкольной фазовой измерительной системе // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35, № 8. – С. 18–42.
3. Исследование работы фазового пеленгатора с квазиоптимальным устранением неоднозначности на наземных трассах / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – №2 (24), ч. 1. – С. 7–15.

Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. радиотехнических систем (РТС) ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-36-70

Эл. почта: dvp@ms.tusur.ru

Дубинин Дмитрий Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа

Тел.: (382-2) 53-30-77

Эл. почта: dima@info.tusur.ru

Крутиков Михаил Владимирович

Зав. лабораторией распространения радиоволн НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-39-69

Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

Мещеряков Александр Алексеевич

Канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-34-55

Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

Denisov V.P., Dubinin D.V., Krutikov M.V., Mescheryakov A.A.

Algorithm of abnormal direction errors rejecting for phase finder

The phase finder with a linear array as antenna system for angle source location in azimuth plain is considered. The maximum likelihood principle in assumption of phase errors normal probability distribution in measuring channel is used. The phase errors vector components leading to ambiguous estimation of radiation source location is analyzed. The product is verified by experiment.

Keywords: phase finder, antenna array, estimation bearing.