

УДК 621.396.969.182.3

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРАНЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В МНОГОШКАЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*Д. В. Дубинин, В. П. Денисов, А. А. Мещеряков**

Томский госуниверситет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Определяется верхняя граница вероятности правильного устранения неоднозначности измерений в многошальных фазовых измерительных системах, в которых все шкалы неоднозначны, а оценка измеряемой величины проводится методом максимального правдоподобия по совокупности измеренных разностей фаз, дополненным алгоритмом отбраковки (стирания) результатов измерений с аномально большими погрешностями. Аномально большими считаются погрешности, превосходящие половину основного лепестка функции правдоподобия. Основой получения результатов являются методы линейной алгебры, опирающиеся на геометрическую интерпретацию процесса разрешения неоднозначности измерений в пространстве полных разностей фаз. Изложение ведётся применительно к фазовым радиопеленгаторам, но легко переносится на другие виды фазовых многошальных радиосистем.

ВВЕДЕНИЕ

Многошальные фазовые измерительные системы широко используются в радиотехнике. Это фазовые дальномеры, фазовые разностно-дальномерные навигационные системы, фазовые пеленгаторы и т. д. В зарубежной статье изложение ведётся применительно к фазовым пеленгаторам, однако результаты легко переносятся на другие виды многошальных фазовых радиосистем.

Фазовые пеленгаторы — это устройства для определения направления на источник радиосигналов [1–3]. В переводной литературе их называют интерферометрами. Пеленг источника радиоизлучения определяется путём обработки разностей фаз сигналов, принимаемых слабонаправленными антеннами, образующими линейную, плоскую или объёмную (конформную) решётки. Для достижения высокой точности пеленгования требуется разносить антенны на расстояние, значительно превосходящее длину волны сигнала. В этом случае разность фаз сигналов превосходит интервал её однозначного определения. Для определения пеленга требуется предварительно устранить неоднозначность фазовых измерений. Результаты измерений принимают случайные значения вследствие собственных шумов приёмных устройств пеленгатора, паразитных фазовых сдвигов в приёмно-усилительных каналах и искажений радиоволн на трассе распространения.

Существуют различные алгоритмы разрешения этой неоднозначности [4–10]. В любом случае наряду с правильным разрешением неоднозначности, т. е. ситуацией, когда ошибка пеленгования мала, имеет место неправильное разрешение неоднозначности, когда эта ошибка аномально велика. Наибольшее значение вероятности правильного устранения неоднозначности даёт максимально правдоподобный алгоритм [3]. Для него были получены соотношения, устанавливающие верхнюю границу вероятности правильного устранения неоднозначности в зависимости от уровня фазовых погрешностей, числа фазометрических баз и типа антенной решётки [3, 11].

В работах [12–14] описан способ отбраковки результатов измерений с аномально большими ошибками в ситуации, когда измерения проводятся неоднократно. Использование этого способа позволило существенно (в несколько раз) снизить вероятность аномальных ошибок, однако исключить их полностью не удаётся.

* msch@rts.tusur.ru

В данной статье приводятся соотношения, определяющие максимальные (предельные) значения вероятности правильного устранения неоднозначности фазовых измерений при использовании такого способа отбраковки. Методика иллюстрирована на примере фазового пеленгатора с антенной системой из 4 антенн, образующих линейную решётку. В силу универсальности максимально правдоподобного алгоритма устранения неоднозначности данную методику можно применить к пеленгаторам с антенными системами в виде линейных, плоских или объёмных (конформных) решёток с произвольным расположением элементов, а также к другим многошкальным фазовым измерителям. При этом все фазометрические шкалы могут быть неоднозначны, а их отношения должны образовывать совокупность взаимно простых чисел.

1. ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим принцип максимального правдоподобия применительно к обработке сигналов в фазовых радиопеленгаторах.

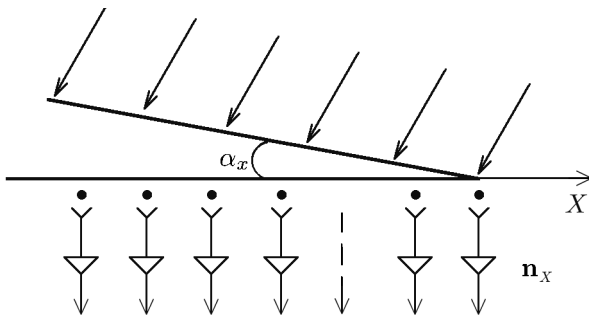


Рис. 1. Структурная схема антенной решётки

Пусть на линейную антенную решётку пеленгатора падает плоская волна, как показано на рис. 1. Угол прихода волны (пеленг на источник излучения) зададим направляющим косинусом $v = \cos \alpha_x$, который определяется по совокупности разностей фаз $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, измеренных между элементами антенной решётки.

Полная разность фаз на каждой из баз является суммой

$$\Phi = \varphi + \mathbf{k},$$

где $\mathbf{k}$ — вектор неоднозначности (его i -я координата равна целому числу периодов 2π изменения фазы, уложившихся на i -й базе и утрачиваемых при измерениях), φ — вектор измеряемых значений разности фаз в пределах от $-\pi$ до $+\pi$ в долях периода 2π (модули элементов этого вектора не превышают 0,5).

Оценка v^* направляющего косинуса по принципу максимального правдоподобия требует (как показано в работе [3]) вычисления взвешенных значений полной разности фаз, что в векторной форме можно записать в виде

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

где Φ^T — вектор полных разностей фаз на базах, индекс T — означает транспонирование, $\mathbf{q}_v$ — вектор весовых коэффициентов:

$$\mathbf{q}_v = \frac{\mathbf{B}_\varphi^{-1} \mathbf{n}_X^T}{\mathbf{n}_X^T \mathbf{B}_\varphi^{-1} \mathbf{n}_X},$$

$\mathbf{B}_\varphi$ — корреляционная матрица погрешностей фазовых измерений, $\mathbf{n}_X$ — вектор масштабных коэффициентов измерительных шкал.

Для фазового пеленгатора с антенной системой в виде линейной решётки имеем

$$\mathbf{n}_X^T = \left(\frac{l_1}{\lambda}, \frac{l_2}{\lambda}, \dots, \frac{l_n}{\lambda} \right),$$

где l_i — фазометрические базы ($i = 1, \dots, n$), λ — длина волны.

Для определения пеленга источника излучения по формуле (1) требуется устранить неоднозначность фазовых измерений, т. е. определить вектор неоднозначности $\mathbf{k}$. Качество устранения

неоднозначности можно характеризовать вероятностью правильного решения при её устранении P_0 , а в терминах работ [8, 9] — показателем успеха разрешения неоднозначности. Наибольшее значение этой вероятности достигается применением максимально правдоподобного алгоритма. Как показано в работах [3, 7], это эквивалентно выбору из совокупности возможных векторов неоднозначности $\{\mathbf{k}\}$ такого вектора $\mathbf{k}^*$, который минимизирует квадратичную форму

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

где

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

— квадратная матрица с рангом $(n - 1)$. Матрица $\mathbf{G}$ проецирует векторы из n -мерного пространства измерений на $(n - 1)$ -мерное подпространство, ортогональное к вектору $\mathbf{n}_X$, так что $\mathbf{G} \mathbf{n}_X = 0$ [3]. Следующие далее геометрические построения рассматриваются в этом подпространстве.

В работах [12–14] предложен алгоритм отбраковки аномально больших ошибок. В его основе лежит использование значения квадратичной формы (2). Если её значение не превышает некоторого порога Δ , т. е.

$$\Pi_{\varphi}(\mathbf{k}^*) < \Delta, \quad (3)$$

то принимается «положительное решение» — продолжить вычисление оценки направляющего косинуса v^* по данным фазовых измерений φ . Если условие (3) не выполняется, т. е. квадратичная форма (2) превышает установленный порог, то принимается «отрицательное решение». Соответствующая совокупность измеренных разностей фаз φ отбраковывается или «стирается».

Если обозначить P_M и P_E соответствующие вероятности решений «измерения» или «стирания», то $P_M + P_E = 1$.

Однако выполненная этим способом отбраковка не исключает неверного решения о вычислении по разрешённым измерениям. Соотношение (3), безусловно, выполняется для вектора $\mathbf{k}^*$, обеспечивающего наименьшую ошибку пеленгования, но может (с меньшей вероятностью) выполняться для других $\mathbf{k}$. Поэтому в работе [13] предлагается дополнительный критерий отбраковки измерений из группы разрешённых: неоднозначность разрешена правильно, если при вычислении направляющего косинуса окажется, что

$$|v_{\text{true}} - v^*| < \frac{0,5}{|e_X|_{\max}},$$

где $|e_X|_{\max}$ — максимальная по модулю координата целочисленного вектора $\mathbf{e}_X$, коллинеарного $\mathbf{n}_X$; v_{true} — истинное значение направляющего косинуса.

Таким образом, четыре события образуют полную группу в терминах теории вероятностей. Во-первых, правильное решение о проведении измерений: оценка пеленга получена без аномальной ошибки. Вероятность этого события — P_{CM} (вероятность правильного измерения пеленга). Во-вторых, неправильное решение о проведении измерений: оценка пеленга получена с аномальной ошибкой. Вероятность этого события — P_{FM} (вероятность ложного измерения пеленга). В-третьих, правильное решение об отбраковке измерений: оценка пеленга была бы получена с аномальной ошибкой. Вероятность этого события — P_{CE} (вероятность правильного стирания). В-четвёртых, неправильное решение об отбраковке измерений: оценка пеленга была бы получена без аномальной ошибки. Вероятность этого события — P_{FE} (вероятность ложного стирания).

Тогда

$$\begin{aligned} P_M &= P_{CM} + P_{FM}, & P_E &= P_{CE} + P_{FE}, \\ P_{CM} + P_{FM} + P_{CE} + P_{FE} &= 1. \end{aligned}$$

Вероятность правильного устранения неоднозначности фазовых измерений P_0 при использовании алгоритма отбраковки anomalно больших ошибок теперь определяется по формуле

$$P_0 = P_{CM}/P_M,$$

а вероятность anomalно большой ошибки P_A есть

$$P_A = P_{FM}/P_M.$$

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является получение методики расчёта предельного достижимого значения вероятности P_0 при условии отбраковки «сомнительных» измерений.

При отсутствии ограничения (3), налагаемого на квадратичную форму (2), вероятность правильного устранения неоднозначности определяется $(n-1)$ -мерным интегралом [3]

$$P_0 = \int \dots \int_D W(\mathbf{y}) d\mathbf{y}. \quad (4)$$

Здесь $W(\mathbf{y})$ — $(n-1)$ -мерная плотность распределения случайных величин

$$\boldsymbol{\eta}_i = \mathbf{k}_i^T \mathbf{G} \boldsymbol{\delta}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\delta}$ — вектор ошибок фазовых измерений, $\mathbf{k}_i$ — векторы неоднозначности из опорной совокупности [3].

Область интегрирования в формуле (4) задаётся системой неравенств вида $|\eta_i| \leq \mathbf{k}_i^T \mathbf{G} \mathbf{k}_j$ и названа в работе [3] собственной областью вектора неоднозначности. Собственные области векторов неоднозначности не пересекаются и плотно заполняют $(n-1)$ -мерное подпространство n -мерного пространства измерений, ортогональное к $\mathbf{n}_X$. Вектор $\mathbf{k}^*$ выбирается в зависимости от того, в какую из собственных областей попала проекция вектора $\boldsymbol{\varphi}$ на это подпространство. Пример собственных областей показан на рис. 2 для трёхшкальной системы. По форме собственные области представляют собой параллелепипеды [15]. Границы подпространства, в которых показаны собственные области, задаются проекцией на него n -мерного куба пространства фазовых измерений [3]. При любых погрешностях вектора измерений $\boldsymbol{\varphi}$ его проекция обязательно попадает в одну из собственных областей.

В предположении о нормальности распределения вероятностей фазовых погрешностей $\boldsymbol{\delta}$ формула (4) принимает вид

$$P_0 = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{n-1} \det \mathbf{B}_\eta}} \int \dots \int_D \exp \left(-\frac{1}{2} \mathbf{y}^T \mathbf{B}_\eta^{-1} \mathbf{y} \right) d\mathbf{y}, \quad (6)$$

где элементы корреляционной матрицы $\mathbf{B}_\eta$ случайных величин $\boldsymbol{\eta}_i$ (5) определяются формулой $b_{ij} = \mathbf{k}_i^T \mathbf{G} \mathbf{k}_j$, где $i = 1, 2, \dots, n-1$; $j = 1, 2, \dots, n-1$.

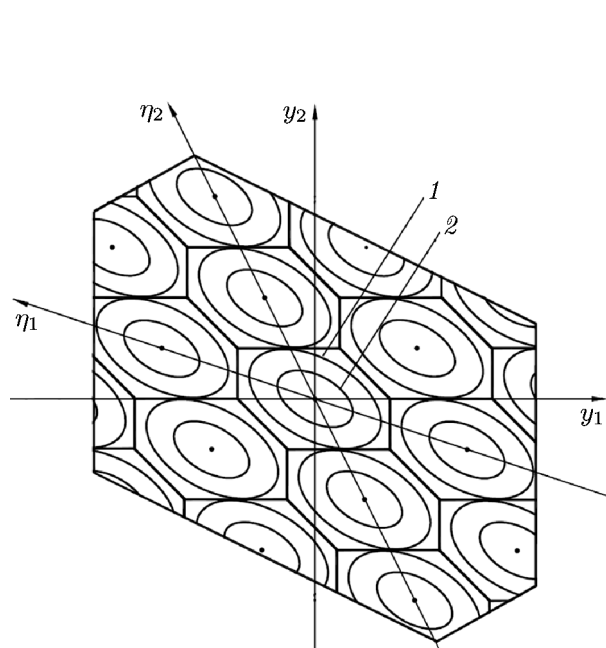


Рис. 2. Собственные области векторов неоднозначности и вписанные в них эллипсы равной плотности вероятности: 1 — $\mathbf{y}^T \mathbf{B}_\eta^{-1} \mathbf{y} = Q_n$, 2 — $\mathbf{y}^T \mathbf{B}_\eta^{-1} \mathbf{y} = Q$, $Q < Q_{\text{low}}$, $Q_{\text{low}} = 1/2 \min_i \mathbf{k}_i^T \mathbf{G} \mathbf{k}_j$

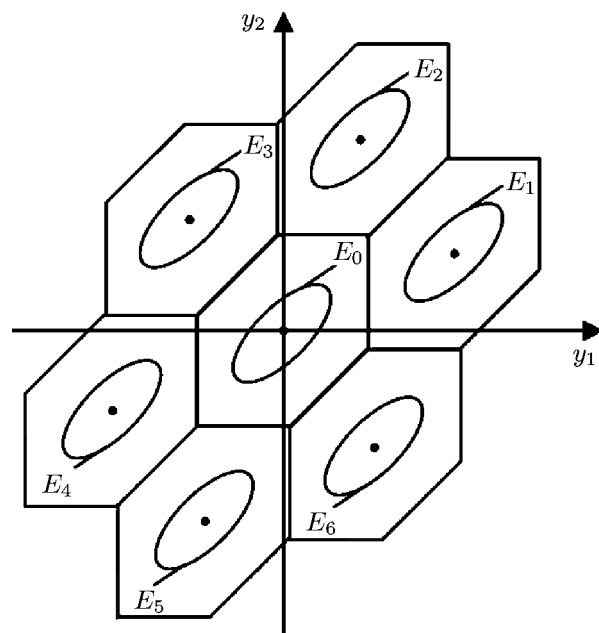


Рис. 3. Эллипсы пороговых ограничений E_i собственных областей векторов неоднозначности

Рисунок 2 и дальнейшие иллюстрации в статье приведены для трёхшкальных фазовых систем. Четырёхшкальные системы отобразить сложно, а системы большей размерности — невозможно.

Алгоритм (3) «разрешает» проводить аналогичные действия при условии попадания проекции вектора измерений φ в один из эллипсоидов $\mathbf{y}^T \mathbf{B}_\eta^{-1} \mathbf{y} = \Delta$, лежащих внутри одной из собственных областей.

Значение вероятности P_0 не зависит от положения источника излучения в пределах сектора однозначного пеленгования. Поэтому в дальнейшем предполагается, что источник излучения находится на нормали к антенной решётке. В этом случае направляющий косинус равен нулю ($v = 0$) и все координаты вектора неоднозначности $\mathbf{k}$ также равны нулю: $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0$, где $\mathbf{k}_0^T = (0; 0; \dots; 0)$.

Введение порогового ограничения (3) означает, что в правильном определении пеленга $v = 0$ участвуют только те измеренные разности фаз φ , проекции которых оказываются внутри изображённого на рис. 3 эллипса E_0 , задаваемого уравнением $\mathbf{y}^T \mathbf{B}_\eta^{-1} \mathbf{y} = \Delta$.

Для определения вероятности измерения необходимо найти $(n - 1)$ -мерный интеграл по областям E_i всех векторов неоднозначности $\mathbf{k}_i$ из общей совокупности $\{\mathbf{k}_i\}$. Значение P_M можно определить по формуле

$$P_M = \sum_{i=0}^{M-1} \int_{E_i} \dots \int W(\mathbf{y}) d\mathbf{y}. \quad (7)$$

На рис. 3 показаны некоторые из собственных областей: собственная область нулевого вектора $\mathbf{k}_0$ и соседние к ней области, которые дают наиболее существенный вклад в сумму (7).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Введение порогового ограничения (3) приводит к тому, что вероятность правильного измерения $P_{\text{СМ}}$ находится как $(n-1)$ -мерный интеграл по области E_0 :

$$P_{\text{СМ}} = \int_{E_0} \dots \int W(\mathbf{y}) d\mathbf{y}. \quad (8)$$

Учитывая, что уравнение области интегрирования $\mathbf{y}^T \mathbf{B}_\eta^{-1} \mathbf{y} = \Delta$ совпадает с эллипсоидом равной плотности распределения вероятности случайных величин η_i (5), вероятность $P_{\text{СМ}}$ равна

$$P_{\text{СМ}} = P \{ \chi_{n-1}^2 \leq \Delta \}.$$

Случайная величина χ_{n-1}^2 распределена по закону «хи-квадрат» с $n-1$ степенями свободы.

Вероятность правильного устранения неоднозначности P_0 определяется по формуле

$$\frac{P_{\text{СМ}}}{P_M} = \frac{\int_{E_0} W(\mathbf{y}) d\mathbf{y}}{\sum_{i=0}^{M-1} \int_{E_i} W(\mathbf{y}) d\mathbf{y}}, \quad (9)$$

где E_0 и E_i — эллипсоиды порогового ограничения, расположенные внутри собственных областей нулевого вектора неоднозначности и векторов неоднозначности $\mathbf{k}_i \in \{\mathbf{k}_i\}$ соответственно; $i = 1, \dots, M-1$; M — число векторов неоднозначности общей совокупности $\{\mathbf{k}_i\}$.

Снижение величины порога Δ приводит к уменьшению вероятностей измерений P_M и правильных измерений $P_{\text{СМ}}$, а также к увеличению вероятности правильного устранения неоднозначности P_0 .

Найдём верхнюю границу P_0^{max} вероятности правильного устранения неоднозначности при использовании алгоритма отбраковки anomalously больших ошибок пеленгования. Для этого рассмотрим геометрический смысл интеграла (4) для трёхбазового пеленгатора, антенная система которого образует линейную решётку. Для получения значения $P_{\text{СМ}}$ необходимо вычислить интеграл (8) по двумерной области E_0 :

$$P_{\text{СМ}} = \iint_{E_0} W(y_1, y_2) dy_1 dy_2. \quad (10)$$

Интеграл (10) определяет объём цилиндра (который расположен на рис. 4 в центре), в основании которого лежит эллипс E_0 и который сверху ограничен функцией плотности распределения вероятностей $W(y_1, y_2)$.

Уменьшение порога Δ приводит к уменьшению площади эллипса E_0 . Тогда объём цилиндра стремится к произведению площади эллипса S на значение плотности распределения $W(y_1, y_2)$ в центре эллипса, $y_1 = 0$, $y_2 = 0$. Приближённое значение $P_{\text{СМ}}$ определяется соотношением

$$P_{\text{СМ}} \approx S W(0; 0) = \frac{S}{2\pi \sqrt{\det \mathbf{B}_\eta}}. \quad (11)$$

Значения плотности распределения $W(y_1, y_2)$ в центрах эллипсов $E_1, E_2, \dots, E_{M-1}$, соответствующих иным векторам неоднозначности (которые расположены на рис. 4 вокруг центрального цилиндра), равны соответственно $K \exp\{-0,5d_1^2\}$, $K \exp\{-0,5d_2^2\}$, $\dots$, $K \exp\{-0,5d_M^2\}$, где

$$K = \frac{1}{2\pi \sqrt{\det \mathbf{B}_\eta}}, \quad d_i^2 = \mathbf{k}_i^T \mathbf{G} \mathbf{k}_i.$$

Приближённое значение вероятности ложного измерения P_{FM} можно найти по формуле

$$P_{\text{FM}} \approx \frac{S \exp(-0,5d_1^2)}{2\pi \sqrt{\det \mathbf{B}_\eta}} + \frac{S \exp(-0,5d_2^2)}{2\pi \sqrt{\det \mathbf{B}_\eta}} + \dots + \frac{S \exp(-0,5d_M^2)}{2\pi \sqrt{\det \mathbf{B}_\eta}}.$$

Учитывая, что площади S всех эллипсов одинаковы, и подставляя полученные соотношения в формулу (9), получим выражение, определяющее верхнюю границу вероятности правильного устранения неоднозначности при отбраковке anomalously больших ошибок:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{M-1} \exp(-0,5d_i^2)}. \quad (12)$$

Данная формула справедлива для фазовых пеленгаторов, антенные системы которых образуют линейную, плоскую или объёмную решётки, а также для фазовых измерительных систем иных видов. Различие состоит только в матрице $\mathbf{G}$, которая используется при вычислениях. Число слагаемых, входящих в сумму (12), можно ограничить, т. к. функция плотности распределения уменьшается экспоненциально с ростом величины d_i^2 , т. е. по мере удаления возможного ложного измерения от истинного. Наиболее существенно на сумму (12) влияют те слагаемые, которые соответствуют векторам неоднозначности опорной совокупности и их простейшим линейным комбинациям. На рис. 3 изображены собственные области именно таких векторов. В общем случае для фазовых пеленгаторов с антенной системой в виде линейной решётки число векторов неоднозначности равно $J = 2(2^{N-2} - 1)$, в виде плоской решётки — $J = 2(2^{N-3} - 1)$, в виде объёмной (конформной) решётки — $J = 2(2^{N-4} - 1)$, где N — число антенных элементов [3]. Формула (12) приблизительно определяет вероятность P_0 при любом значении порога Δ . Она становится точной при $\Delta \rightarrow 0$, когда области интегрирования E_i неограниченно уменьшаются, так что в их пределах плотности распределения случайных величин η_i (5) можно считать постоянными и равными $K \exp\{-0,5d_i^2\}$. Таким образом, получается соотношение, которое более строго, чем формула (12), определяет верхнюю границу вероятности правильного устранения неоднозначности фазовых измерений $P_0 < P_0^{\max}$ при использовании алгоритма отбраковки anomalously больших ошибок:

$$P_0^{\max} = \frac{1}{1 + 2 \sum_{i=1}^{J/2} \exp(-0,5d_i^2)}. \quad (13)$$

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [14] приведены результаты, которые подтверждают эффективность порогового ограничения (3) для фазового пеленгатора, схема разнесения антенн которого приведена на рис. 5.

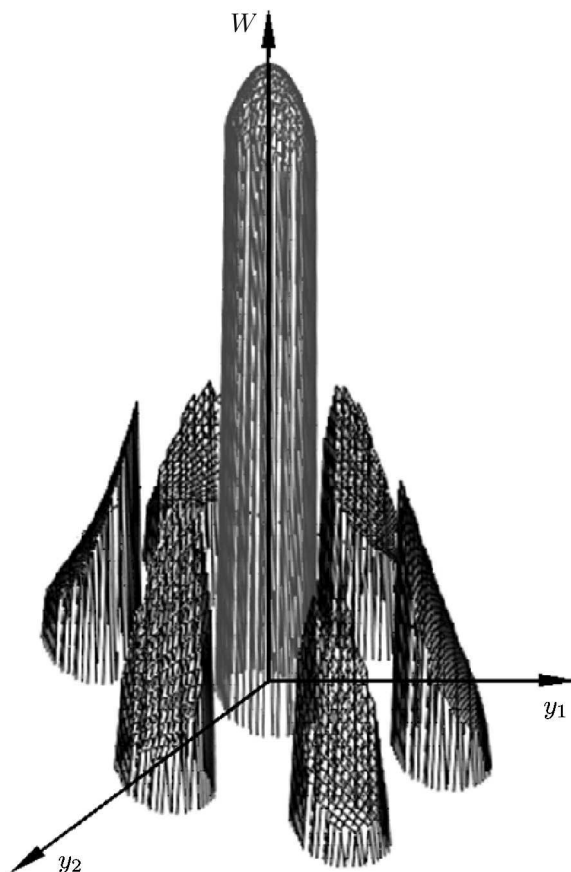


Рис. 4. Геометрические построения в пространстве проекций разностей фаз на подпространство, ортогональное $\mathbf{n}_x$

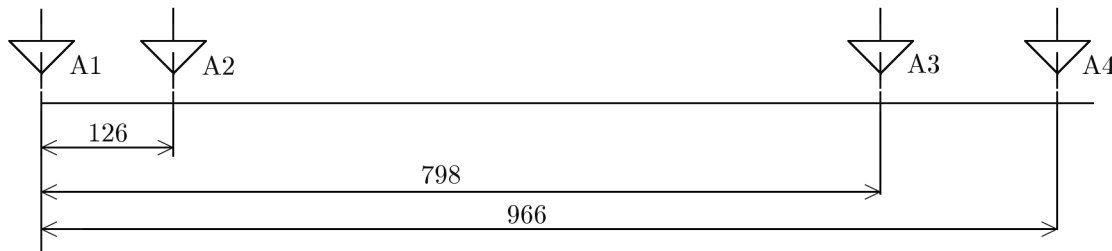


Рис. 5. Антенная система фазового пеленгатора (фазометрические базы выражены в миллиметрах)

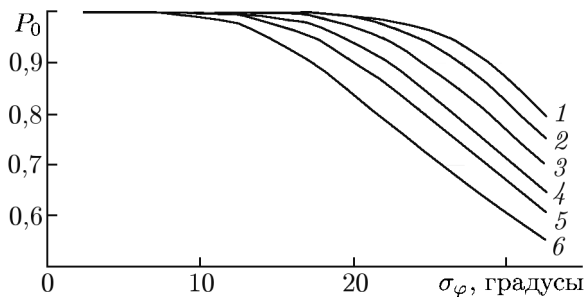


Рис. 6. Зависимость верхней границы вероятности правильного устранения неоднозначности $P_0^{\max}$ (кривая 1) и условной вероятности правильного устранения неоднозначности P_0 от среднеквадратичного отклонения σ_φ разности фаз при $\Delta = 0,2\Delta_{\max}$; $\Delta = 0,5\Delta_{\max}$; $\Delta = 0,7\Delta_{\max}$; $\Delta = \Delta_{\max}$ (кривые 2–5 соответственно) и отсутствии порогового ограничения (кривая 6)

тичной формы (2). Это означает, что найдена граница улучшения точности пеленгования источника радиосигналов, и подтверждает применимость формулы (13) для практических расчётов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика расчёта верхней границы вероятности правильного устранения неоднозначности в многошкальных фазовых измерительных системах при использовании алгоритма отбраковки результатов измерений, приводящих к аномально большим ошибкам в процессе разрешения неоднозначности. Показана её физическая природа. С помощью моделирования на ЭВМ проведена проверка теоретических положений данной методики. Она может быть применена к любым видам многошкальных фазовых измерительных систем, в частности к фазовым пеленгаторам с линейными, плоскими или конформными антенными решётками.

Отбраковка измерений с аномально большими ошибками в процессе разрешения неоднозначности хорошо зарекомендовала себя на практике [12–14]. Результаты данной статьи позволяют установить предел увеличения точности измерений, который зависит от соотношения масштабных коэффициентов шкал (например, измерительных баз фазового радиопеленгатора) и корреляционной матрицы фазовых погрешностей, а также повлиять на выбор оптимального порогового значения Δ , при котором будет соблюден баланс между увеличением вероятности правильного устранения неоднозначности и уменьшением вероятности измерений. Выбор порога зависит от области применения измерительной системы. Рассчитывая порог Δ , а также возможное улучшение точности, надо учитывать возможное количество измерений. В ряде случаев оно велико, так

На рис. 6 представлена зависимость условной вероятности правильного устранения неоднозначности фазовых измерений P_0 при условии, что измерение состоялось, и верхней границы $P_0^{\max}$ от среднеквадратичного отклонения σ_φ разности фаз. Порог Δ задаётся в долях от максимально возможного значения, равного $\Delta_{\max} = \sigma_\varphi^2 (d_{\min}/2)^2$.

Из рис. 6 видно, что введение порогового ограничения квадратичной формы (2) привело за счёт стирания «плохих» измеренных разностей фаз и снижения вероятности измерения P_M к существенному уменьшению вероятности аномальных ошибок. При всех значениях среднеквадратичного отклонения разности фаз график зависимости $P_0^{\max}$ проходит выше графиков зависимостей P_0 для любых значений порога квадратичной формы (2).

что можно одновременно получить существенное повышение точности при приемлемой вероятности правильного измерения, например когда в процессе радиомониторинга пеленгатор работает по импульсной радиолокационной станции.

Работа выполнена по государственному заданию Минобрнауки РФ (проект 8.7348.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lipsky S. E. Microwave passive direction finding. Raleigh, USA: SciTech Publishing, Inc., 2004. 320 p.
2. Справочник по радиолокации / Под ред. М. И. Скольника. В 2 томах. Книга 1. М: Техносфера, 2014. 672 с.
3. Денисов В. П., Дубинин Д. В. Фазовые радиопеленгаторы: Монография. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2002. 251 с.
4. Денисов В. П. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1977. Т. 20, № 7. С. 63.
5. Белов В. И. // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 10. С. 2225.
6. Белов В. И. // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 8. С. 1657.
7. Белов В. И. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, № 8. С. 1642.
8. Verhagen S., Teunissen P. // J. Guidance, Control, Dynamics. 2006. V. 29, No. 4. P. 981.
9. Teunissen P. // Wuhan University J. Natural Sci. 2003. V. 8, No. 2. P. 471.
10. Кинкулькин И. Е. Глобальные навигационные спутниковые системы. Алгоритмы функционирования аппаратуры потребителя. М.: Радиотехника, 2018. 328 с.
11. Денисов В. П., Дубинин Д. В., Сластион В. В. // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45, № 3. С. 327.
12. Денисов В. П., Колядин Н. А., Мухомор К. Е., Скородумов М. П. // Радиотехника. 2013. № 2. С. 10.
13. Денисов В. П., Дубинин Д. В., Мещеряков А. А. // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 10. С. 957.
14. Денисов В. П., Дубинин Д. В., Мещеряков А. А. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 10. С. 63.
15. Александров А. Д. Выпуклые многогранники. М.: ГИТТЛ, 1950. 428 с.

Поступила в редакцию 5 апреля 2019 г.; принята в печать 31 мая 2019 г.

EXTREME PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE MEASUREMENT DISAMBIGUATION IN MULTISCALE PHASE-MEASURING SYSTEMS

D. V. Dubinin, V. P. Denisov, and A. A. Mescheryakov

We determine the upper limit on the correct measurement disambiguation probability in multiscale phase-measuring systems in which all scales are ambiguous. The measured value is estimated by the maximum likelihood method from the total of measured phase differences supplemented by an algorithm for rejecting (erasing) measurement results with anomalously large errors. Errors that exceed one-half of the main lobe of the likelihood function are considered anomalously large. The results are obtained by the methods of linear algebra with a geometric interpretation of the measurement disambiguation process in the space of total phase differences. The method was applied to phase direction finders, but can easily be adapted to other types of multiscale phase radio systems.