

УДК 621.317.08

Г.Г. Порубов, В.П. Денисов

Алгоритм обработки сигналов в фазовых пеленгаторах с двумя линейными антенными решетками, расположенными под углом друг к другу

Предлагается алгоритм обработки сигналов в двухкоординатных фазовых радиопеленгаторах, антенные системы которых состоят из двух линейных решеток с произвольным количеством фазометрических баз в каждой, расположенных под углом друг к другу. Получены и проверены путем моделирования работы пеленгатора на ЭВМ соотношения для расчета вероятности разрешения неоднозначности фазовых измерений и СКО результатов измерений. Применение алгоритма приводит к упрощению обработки сигналов по сравнению с известными.

Ключевые слова: фазовый пеленгатор, разность фаз, пеленг.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-19-25

Предметом рассмотрения данной статьи является двухкоординатный фазовый пеленгатор, плоская антенная система которого состоит из двух линейных решеток, расположенных под углом друг к другу. Сложнейшей задачей обработки сигналов в подобных системах является устранение неоднозначности фазовых измерений и использование для оценки пеленга всей информации, содержащейся в совокупности разностей фаз на элементах антенной системы. Исторически первым и долгое время единственным методом обработки сигналов в многоканальных фазовых пеленгаторах был так называемый метод уточнений. Антенная система пеленгатора в виде линейной решетки содержала достаточно малую фазометрическую базу, обеспечивающую грубое, но однозначное пеленгование в заданном угловом секторе. Последовательное устранение неоднозначности от меньшей базы к большей обеспечивало однозначное пеленгование по самой большой базе [1, 2]. Недостатком данного подхода является то, что точность пеленгования определяется только одной базой, самой большой. Остальные измерения используются только для разрешения неоднозначности на этой базе. Часть информации о пеленге, содержащаяся в них, утрачивается.

Развитие статистических методов обработки информации привело к тому, что они стали применяться и для обработки неоднозначных измерений. Вся совокупность полученных разностей фаз стала использоваться для получения точного и однозначного измерения [3–7].

Основой статистического подхода является метод максимального правдоподобия. Первоначально он был развит для однокоординатных измерителей, а затем был применен к двухкоординатным пеленгаторам с антенными системами в виде плоской либо конформной решетки любой конфигурации [8, 9]. Метод не требует, чтобы одна из фазометрических баз обеспечивала однозначное измерение в заданном секторе, но базы должны относиться друг к другу как взаимно простые числа.

Недостатком метода является то, что для его реализации требуется знать закон распределения вероятностей погрешностей фазовых измерений. Другим недостатком метода является большой объем вычислений при корректном использовании.

Существуют также методы обработки совокупности измеренных разностей фаз, привязанные к антенным системам определенной структуры. Так, в статье [10] рассматривается пеленгатор, антенная система которого состоит из трех элементов, расположенных в линию. Производятся три измерения разностей фаз, одно из которых с позиции монографии [8] является избыточным. Метод обеспечивает однозначное измерение пеленга в широком секторе, если измерительные базы относятся между собой как иррациональное число, например число Фидия [10]. Как достоинство метода отмечается отсутствие необходимости иметь однозначную фазометрическую базу.

Рассматриваемый в данной статье метод также привязан к антенной системе определенной структуры. Это антенная система, состоящая из двух линейных решеток, расположенных под углом друг к другу. Статья является развитием прежней работы авторов, где линейные решетки расположены под углом девяносто градусов друг к другу [11]. Суть метода заключается в том, что вычисление углового положения источника радиоизлучения (ИРИ) выполняется сравнением совокупности измеренных разностей фаз (вектора измерений) с совокупностью расчетных разностей фаз, соответствующих некоторому углу прихода плоской волны, и подбор такого угла прихода, который наиболее соответствует результатам измерений. Применительно к пеленгаторам с линейными антенными решетками данный подход изложен в статье [12]. Его привлекательной стороной является то, что для вычислений не требуется знать закон распределения вероятностей погрешностей фазовых измерений. Специфическая конструкция антенной решетки не должна вызывать отторжения у читателя. Необходимость использования подобной решетки может быть вызвана конструкцией носителя пеленга-

тора. Пример встроенной антенной системы пеленгатора имеется, например, в работе [14]. В терминологии монографии [13] метод является непараметрическим.

Предположим, что антенная система пеленгатора расположена в плоскости $x_1 O_1 z$ и поднята относительно земли на высоту h (рис. 1), а ось $O_1 y_1$ перпендикулярна к плоскости антенной решетки. Азимут α характеризует угловое положение объекта наблюдения $C(x_c, y_c)$ в плоскости земли, а угол места β – положение объекта относительно плоскости $x_1 O_1 y_1$.

Углы α_{x1} и α_z задают направление на объект наблюдения относительно осей координат $O_1 x_1$ и $O_1 z$. Обозначим направляющие косинусы принимаемой волны $\cos \alpha_{x1} = v_x$, $\cos \alpha_z = u_z$.

Используя рис. 1, получим следующие соотношения:

$$v_x = \cos \alpha_{x1} = \frac{O_1 x_{c1}}{O_1 C} = \sin \alpha \cos \beta, \quad (1)$$

$$u_z = \cos \alpha_z = \frac{O_1 0}{O_1 C} = \sin \beta, \quad (2)$$

где $O_1 x_{c1} = y_c C = OC \sin \alpha$, $O_1 C = OC / \cos \beta$, $O_1 0 = O_1 C \sin \beta$.

Отметим, что углы α_{x1} и α_z полностью определяют угловое положение источника радиоизлучения относительно осей $O_1 x_1$ и $O_1 z$.

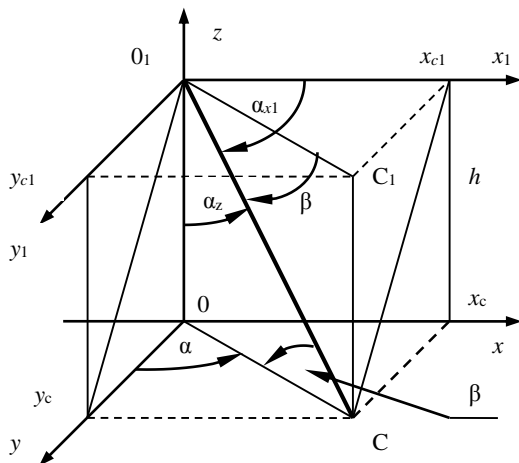


Рис. 1. Положение источника сигнала $C(x_c, y_c)$ и антенной системы пеленгатора (точка O_1) в трёхмерном пространстве

Линейные антенные решетки, образующие плоскую антенную решетку, относительно оси $O_1 z$ расположены симметрично под углами $\pm \theta$ (рис. 2). На рис. 2 приведены максимальные фазометрические базы линейных антенных решеток, образующих плоскую антенную решетку. Меньшие базы, используемые для разрешения неоднозначности измерений, будем называть дополнительными.

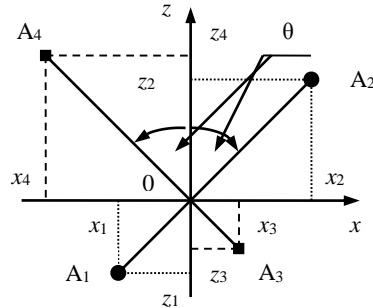


Рис. 2. Пример расположения антенн, образующих базы плоской антенной решетки пеленгатора

Перейдём к обозначениям баз и проекций баз на оси координат, принятым в работах по фазовым пеленгаторам: l_1 – база, образованная антеннами A_1, A_2 ; l_{11} – база, образованная антеннами A_3, A_4 ; $l_{x1} = (x_2 - x_1)$ – проекция базы l_1 на координатную ось x ; $l_{z1} = (z_2 - z_1)$ – проекция базы l_1 на координатную ось z ; $l_{x11} = (x_4 - x_3)$ – проекция базы l_{11} на координатную ось x ; $l_{z11} = (z_4 - z_3)$ – проекция базы l_{11} на координатную ось z .

Полные разности фаз на базах l_1 и l_{11} , при измерении в $\text{рад}/2\pi$, определяются по формулам [8]

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{l_{x1}}{\lambda} \cos \alpha_{x1} + \frac{l_{z1}}{\lambda} \cos \alpha_z, \\ \Phi_{11} &= \frac{l_{x11}}{\lambda} \cos \alpha_{x1} + \frac{l_{z11}}{\lambda} \cos \alpha_z. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Подставляя из (1), (2) в (3) значения $\cos \alpha_{x1}$ и $\cos \alpha_z$, получим формулы, определяющие полные разности фаз на базах l_1 и l_{11} в зависимости от азимута и угла места:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{l_{x1}}{\lambda} \sin \alpha \cos \beta + \frac{l_{z1}}{\lambda} \sin \beta + \delta_1 = \varphi_i + k_1, \\ \Phi_{11} &= \frac{l_{x11}}{\lambda} \sin \alpha \cos \beta + \frac{l_{z11}}{\lambda} \sin \beta + \delta_{11} = \varphi_{11} + k_{11}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где α – азимут; β – угол места; φ_1, φ_{11} – измеренные разности фаз; δ_1, δ_2 – ошибки измерений разностей фаз; k_1, k_{11} – число полных периодов разностей фаз, утраченных при измерении на базах l_1 и l_{11} ; $l_{x1}, l_{z1}, l_{x11}, l_{z11}$ – проекции баз l_1 и l_{11} на оси координат.

Ошибки измерения разностей фаз являются составной частью результатов измерений, поэтому они исключены из правых частей формул (4).

Проекции баз l_1 и l_{11} на оси координат при положении антенных решеток относительно оси z под углами $\theta_1 = 90^\circ - \theta$ и $\theta_2 = 90^\circ + \theta$ (см. рис. 2) будут равны

$$\left. \begin{aligned} l_{x1} &= l_1 \cos \theta_1, \\ l_{z1} &= l_1 \sin \theta_1, \\ l_{x11} &= l_{11} \cos \theta_2, \\ l_{z11} &= l_{11} \sin \theta_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Представим полные разности фаз (4) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= \varphi_{x1} + k_{x1} + \varphi_{z1} + k_{z1} = \\ &= (\varphi_{x1} + \varphi_{z1}) + (k_{x1} + k_{z1}) = \Phi_1 + k_1, \\ \Phi_{11} &= \varphi_{x11} + k_{x11} + \varphi_{z11} + k_{z11} = \\ &= (\varphi_{x11} + \varphi_{z11}) + (k_{x11} + k_{z11}) = \Phi_{11} + k_{11}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где φ_{x1} , φ_{x11} и k_{x1} , k_{x11} – измеренные разности фаз и число полных периодов разностей фаз, утраченных при измерении на максимальных базах l_1 и l_{11} , зависящие от азимута (первые слагаемые формул (4)); φ_{z1} , φ_{z11} и k_{z1} , k_{z11} – измеренные разности фаз и число полных периодов разностей фаз, утраченных при измерении, зависящие от угла места (вторые слагаемые формул (4)).

Из формул (4) и (6) видно, что измеренные разности фаз φ_1 , φ_{11} на базах l_1 , l_{11} и число полных периодов разностей фаз, утраченных при измерении k_1 , k_{11} , определяются суммой, в которой одно из слагаемых зависит от азимута, а другое от угла места.

При равенстве баз l_1 и l_{11} их проекции на соответствующие оси координат будут равны по абсолютной величине (5). А различие по знаку проекций баз на координатную ось x (5) позволяет определить суммы измеренных разностей фаз и суммы числа потерянных полных периодов, определяемых независимо азимутом и углом места, по формулам

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{x1} + \varphi_{x11} &= \Phi_1 - \Phi_{11}, \\ \varphi_{z1} + \varphi_{z11} &= \Phi_1 + \Phi_{11}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} k_{x1} + k_{x11} &= k_1 - k_{11}, \\ k_{z1} + k_{z11} &= k_1 + k_{11}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Угол θ может быть выбран в пределах $0^\circ < \theta < 90^\circ$. При этом сохраняется возможность определения суммы измеренных разностей фаз и суммы их полных периодов, зависящих от азимута и угла места, по формулам (7), (8). Угол θ определяет положение линейных антенных решеток относительно осей координат и проекции каждой из баз l_1 и l_{11} на оси координат, обеспечивая равенство проекций на ось x и ось z .

Разности фаз и числа полных периодов разностей фаз, зависящие от азимута и угла места, по формулам (7), (8) используются далее для вычисления пеленгов по предлагаемому алгоритму.

Предположим далее, что линейные решетки, образующие антенную систему пеленгатора, содержат произвольное число фазометрических баз каждая.

Вектор баз на каждой из решеток в относительных единицах $n_i = l_i/\lambda$ запишем в виде

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_n), \quad (9)$$

где нижний индекс n – количество фазометрических баз.

Предположим также, что фазометрические базы относятся между собой как взаимно простые числа. Тогда можно записать:

$$\mathbf{e}_i = \Delta_{\text{одн}} \mathbf{n}_i, \quad (10)$$

где \mathbf{e}_i – вектор взаимно простых целых чисел, а коэффициент $\Delta_{\text{одн}}$ имеет смысл интервала однозначного пеленгования по каждой из линейных решеток, измеренного по направляющему косинусу.

Действительно, пусть разность фаз измеряется в рад/2 π . Тогда соотношение (10) представляет собой основную формулу фазовой пеленгации, связывающую направляющий косинус падающей волны с разностью фаз на разнесенных антеннах и измерительной базой, с той разницей, что в ней полные разности фаз на базах целые числа. При изменении угла прихода волны на величину, соответствующую $\Delta_{\text{одн}}$, полная разность фаз на каждой из фазометрических баз изменится на целое число периодов. Следовательно, измеряемая разность фаз не изменится, не изменится и индицируемый пеленг.

Будем полагать, что интервалы однозначного пеленгования по каждой из линейных решеток одинаковы. Методика расчета пространственного двумерного угла при заданных величинах $\Delta_{\text{одн}}$ в ортогональных плоскостях изложена в работе [9].

Для удобства выкладок условимся фазовые измерения представлять в рад/2 π и введём обозначения $\sin \alpha = v$, $\sin \beta = u$, $\cos \beta = w$.

Тогда формулу полной разностей фаз на i -й базе можно записать в виде формулы

$$\Phi_i = n_{xi}vw + n_{zi}u + \delta_i = \varphi_i + k_i, \quad (11)$$

где $n_{xi} = n_i \cos \theta_i$ и $n_{zi} = n_i \sin \theta_i$ – проекции базы $n_i = l_i/\lambda$ на оси координат в длинах волн сигнала пеленгуемого источника; φ_i – измеренная разность фаз с учетом погрешностей измерений; δ_i – погрешность измерений разности фаз; k_i – число полных периодов разности фаз Φ_i на базе l_i , утраченных при измерении в силу периодичности сигналов.

Предварительно определяется максимально возможное число полных периодов разностей фаз k_1 и k_{11} , утрачиваемых при измерении на максимальных базах в пределах рабочего сектора пеленгатора при $l_1 = l_{11}$, по формуле

$$k_i = \langle l_1 \sin \alpha \rangle, \quad (12)$$

где l_1 – максимальная база в целых числах; $\alpha = \pm \alpha_{\text{раб}}$ – рабочий сектор пеленгатора по азимуту; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

При выбранной величине угла θ определяются суммы проекций максимальных баз в относительных величинах на координатные оси x и z по формулам

$$\left. \begin{aligned} n_{1sx} &= n_1 \cos \theta_1 - n_{11} \cos \theta_2, \\ n_{1sz} &= n_1 \sin \theta_1 + n_{11} \sin \theta_2, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где n_1 и n_{11} – максимальные базы в относительных величинах.

Определяются шаги изменения пеленга по азимуту ($\sin \alpha$) и по углу места ($\sin \beta$) при изменении полной разности фаз на $k_1 2\pi$ на базах, определённых как суммы проекций максимальных баз на оси координат (13), по формулам

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= 1/n_{1sx}, \\ u_1 &= 1/n_{1sz}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Допустим, что по некоторому источнику, находящемуся на азимуте α_r , и под углом места β_r выполнено измерение разностей фаз. В соответствии с формулой (11) на i -й базе измеренная разность фаз будет

$$\varphi_{ri} = \Phi_i - \langle \Phi_i \rangle = \varphi_i, \quad (15)$$

где Φ_i – полная разность фаз; φ_i – измеренная разность фаз, соответствующая углу прихода волны; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

По результатам измерений получим два n -мерных вектора разностей фаз (15), где n – число баз на каждой из линейных антенных решеток, образующих антенную систему,

$$\Phi_r = (\varphi_{r1}, \varphi_{r2}, \dots, \varphi_{rn}). \quad (16)$$

Определение числа потерянных периодов разностей фаз на каждой из максимальных баз выполняется сравнением векторов измеренных разностей фаз (16) с векторами расчётных разностей фаз

$$\Phi_p = (\varphi_{p1}, \varphi_{p2}, \dots, \varphi_{pn}). \quad (17)$$

Элементы вектора расчётных разностей фаз (17) находятся по нижеследующим формулам при последовательном задании числа утраченных периодов разностей фаз k_1 и k_{11} на максимальных базах в пределах, определяемых по формуле (12):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{pi} &= \frac{(\varphi_{r1} + k_1) l_i}{l_1} - \left\langle \frac{(\varphi_{r1} + k_1) l_i}{l_1} \right\rangle, \\ \varphi_{pi} &= \frac{(\varphi_{r11} + k_{11}) l_i}{l_{11}} - \left\langle \frac{(\varphi_{r11} + k_{11}) l_i}{l_{11}} \right\rangle, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где φ_{r1} , φ_{r11} – измеренные разности фаз на максимальных базах (15); k_1 , k_{11} – число полных периодов разностей фаз на максимальных базах; l_i – дополнительные базы; l_1 , l_{11} – максимальные базы; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

После каждого шага вычислений определяются разности

$$\Psi_i = (\varphi_{ri} - \varphi_{pi}) - \langle (\varphi_{ri} - \varphi_{pi}) \rangle, \quad (19)$$

где φ_{ri} – результат измерения разности фаз на дополнительной базе l_i ; φ_{pi} – результат вычисления разности фаз по формуле (18) на дополнительной базе l_i ; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

Условие правильного определения числа потерянных периодов разностей фаз k_1 , k_{11} на каждой из максимальных баз l_1 и l_{11} запишем в виде

$$|\Psi_i| \leq z_{\varphi i}, \quad (20)$$

где $i=2, 3, \dots, n$ – номера дополнительных баз; $z_{\varphi i}$ – разрешенная зона по фазе для дополнительной базы l_i , вычисленная по формуле

$$z_{\varphi i} = 0,5 \Delta_i, \quad (21)$$

где Δ_i – изменение разности фаз на дополнительной базе l_i , соответствующее изменению угла прихода волны на антенную систему, при котором разность фаз на максимальной базе l_1 изменяется на $k_1 2\pi$ радиан. Здесь используется термин «разрешенная зона по фазе», введенный в статье [14]. Очевидно,

$$\Delta_i = k_1 2\pi \frac{l_i}{l_1} - \left\langle k_1 2\pi \frac{l_i}{l_1} \right\rangle. \quad (22)$$

Разрешенная зона Δ_i на дополнительной базе l_i находится по формуле (22) при задании величины $k_1 \neq 0$ в пределах, следующих из формулы (12).

Если условие (20) не выполняется хотя бы по одной из дополнительных баз данной линейной антенной решетки, решение об определении числа потерянных периодов разностей фаз не принимается и поиск продолжается.

При выполнении условия (20) по всем дополнительным базам каждой из линейных антенных решеток принимается решение об определении числа потерянных периодов разностей фаз k_1 и k_{11} на максимальных базах l_1 и l_{11} .

В соответствии с формулой (7) определяются начальные значения синуса азимута и синуса угла места по результатам измерения разностей фаз на максимальных базах по формулам

$$\left. \begin{aligned} v_{\min} &= (\varphi_{r1} - \varphi_{r11})/n_{1sx}, \\ u_{\min} &= (\varphi_{r1} + \varphi_{r11})/n_{1sz}, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где φ_{r1} и φ_{r11} – измеренные разности фаз на максимальных базах l_1 , l_{11} (15); n_{1sx} , n_{1sz} – суммы проекций максимальных баз на оси координат, определяемые по формуле (13).

Вычисления синусов искомого пеленга выполняются по формулам

$$\sin \beta_{\text{иск}} = (u_{\min} + u_1 (k_1 + k_{11})), \quad (24)$$

$$\sin \alpha_{иск} = (v_{мин} + v_1(k_1 - k_{11})) / \cos \beta_{иск}, \quad (25)$$

где $v_{мин}$ и $u_{мин}$ – начальные значения синусов азимута и угла места по формулам (23); v_1 и u_1 – шаг изменения пеленгов при изменении полной разности фаз на величину $k_1 2\pi$ на базах n_{1sx}, n_{1sz} , вычисленных по формулам (13); k_1 и k_{11} – число потерянных периодов разностей фаз на максимальных базах l_1 и l_{11} , при задании которых в формулу (18) и при вычислении разности по формуле (19) выполняется условие (20).

Искомые пеленги вычисляются по формулам

$$\beta_{иск} = \arcsin(u_{мин} + u_1(k_1 + k_{11})), \quad (26)$$

$$\alpha_{иск} = \arcsin\left[\frac{v_{мин} + v_1(k_1 - k_{11})}{\cos \beta_{иск}}\right]. \quad (27)$$

Рассматриваемый алгоритм можно характеризовать вероятностью правильного вычисления пеленгов (не допускается грубых ошибок определения пеленга за счет неверного определения числа полных периодов разностей фаз) и точностью пеленгования при этом условии.

Условие отсутствия аномальных ошибок следует из алгоритма (20): они отсутствуют, если одновременно выполняются $2n$ соответствующих неравенств. Формулу для вычисления вероятности правильного пеленга (обозначим ее P_0) запишем в виде

$$P_0 = \int_{-z_{\phi i}}^{z_{\phi i}} \dots \int_{-z_{\phi 2n}}^{z_{\phi 2n}} w_{2n-2}(y_2, \dots, y_{2n}) dy_2, \dots, dy_{2n}, \quad (28)$$

где $w_{2n-2}(y_2, \dots, y_{2n})$ – плотность распределения вероятностей случайных величин ψ_i (19); $2n$ – общее число баз пеленгатора; $z_{\phi i}$ – разрешенная зона по фазе базы l_i (21).

Для дальнейших вычислений надо задать закон распределения вероятностей погрешностей фазовых измерений. Предположим, что это нормальные случайные величины с нулевыми средними значениями, равными дисперсиями σ_{ϕ}^2 . Тогда ψ_i также нормальные случайные величины с нулевыми средними значениями и СКО

$$\sigma_i = \sigma_{\phi} \sqrt{\frac{l_1^2 + l_i^2 - 2r_i l_1 l_i}{l_1^2}},$$

где r_i – коэффициент корреляции погрешностей фазовых измерений на i -й и первой (максимальной) базах.

На рис. 3 приведена зависимость вероятности правильного пеленгования от фазовых ошибок для антенной системы, состоящей из двух линейных антенных решеток. Оценка выполнена по формуле (28) для структур антенных решеток $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3) = (9, 6, 4)$ каждой, являющейся оптимальной по критерию максимума P_0 при заданных

габаритных размерах антенной системы и числе антенн.

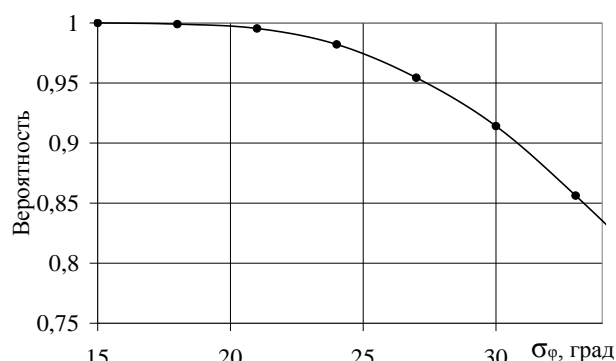


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного пеленгования от фазовых ошибок по формуле (28)

Точность пеленгования по азимуту и углу места определяется суммой проекций максимальных баз на оси координат, определяемых по формулам (13), и погрешностями фазовых измерений на максимальных базах. При вычислении начальных значений синуса азимута и синуса угла по формулам (23) ошибки фазовых измерений суммируются.

На рис. 4 представлена зависимость погрешностей пеленгования по азимуту и углу места от угла θ . Оценка выполнена для структур антенных решеток $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3) = (9, 6, 4)$. При моделировании СКО погрешностей фазовых измерений задавалась равной $\sigma_{\phi} = 25^\circ$.

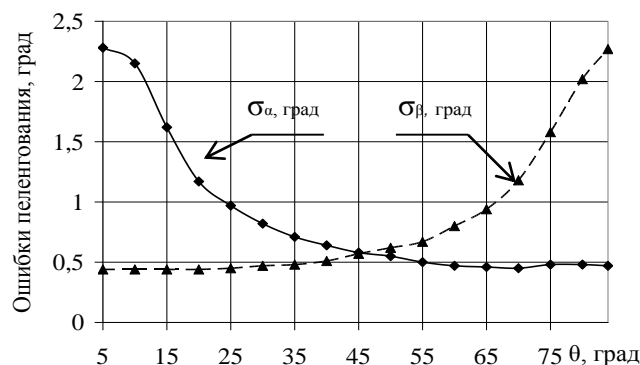


Рис. 4. Зависимость ошибки пеленгования по азимуту и углу места от величины угла θ :

- – σ_{α} ошибки пеленгования по азимуту;
- ▲ – σ_{β} ошибки пеленгования по углу места

Выводы

Теоретические выкладки и моделирование работы двухкоординатного фазового пеленгатора по предлагаемому алгоритму показали его состоятельность. Алгоритм удобен, когда условия размещения антенной системы пеленгатора на его носителе заставляют делать ее в виде двух линейных решеток с произвольным количеством фазометрических баз в каждой, расположенных под углом друг к другу. Предложена и опробована путем моделирования на ЭВМ методика расчета вероятности правильного

разрешения неоднозначности фазовых измерений и СКО азимута и угла места.

Работа выполнена в рамках проекта по госзадачу Минобрнауки РФ № FE-2023-0014.

Литература

1. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
2. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Академия, 2008. – 590 с.
3. Собцов Н.В. Оценка максимального правдоподобия в многошкальной фазовой измерительной системе // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, № 6. – С. 1180–1186.
4. А.с. 993146 СССР, МПК G01 25/00 (2000.01) Устройство разрешения неоднозначности фазовых измерений / И.Г. Неплохов. – Опубл.: 30.01.1983. Б.И. № 4. – С. 227.
5. Коротков П.И. Алгоритмы оценивания вектора параметров объекта для многоканальной фазовой измерительной системы: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Омск: Омск. гос. техн. ун-т, 2016. – 128 с.
6. Пензин В.К. Алгоритмы оперативной обработки многошкальных измерений по критерию максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35, № 1. – С. 97.
7. Кинкулькин И.Е. Глобальные навигационные спутниковые системы: алгоритмы функционирования аппаратуры потребителя. – М.: Радиотехника, 2018. – 325 с.
8. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Изд-во ТУСУРа, – 2002. – 251 с.
9. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2007. – 147 с.
10. Измерение пеленга многоканальным фазовым пеленгатором методом целочисленной минимизации функционала неоднозначности / Н.Е. Замарин, В.В. Корнев, Г.Л. Акопян, А.П. Ковалев // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 5. – С. 24–39.
11. Порубов Г.Г. Устранение неоднозначности измерений в фазовых пеленгаторах с двумя ортогональными линейными антенными решетками / Г.Г. Порубов, В.П. Денисов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 7–12.
12. Порубов Г.Г. Непараметрический алгоритм обработки сигналов в фазовых пеленгаторах с линейной антенной решеткой / Г.Г. Порубов, В.П. Денисов // Доклады ТУСУР. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 7–11.
13. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: в 3 кн. – Кн. 3. – М.: Сов. радио, 1976. – 288 с.
14. Порубов Г.Г. Методика выбора оптимальных структур антенных решеток фазовых пеленгаторов и оценка вероятностных характеристик // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 5–9.

Порубов Геннадий Гаврилович

Инженер ОАО «Научно-исследовательский институт автоматических приборов» (НИИАП), г. Новосибирск Дзержинского пр-т, 87, г. Новосибирск, Россия, 630051
Тел.: +7 (383-2) 79-52-28
Эл. почта: porub27@mail.ru

Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-36-70
Эл. почта: vadimdenisov418@gmail.com

Porubov G.G., Denisov V.P.

Algorithm for signal processing in the phase radio finders with two linear aeriels located at an angle to each other

The article suggests an algorithm of processing the signals in two-coordinated phase radio finders. The aerial systems of this finders consist of two linear aeriels with any number of phase-metric bases in each. The correlations for calculating the probability of ambiguity resolution of phase measurements and the standard error of the calculation results are obtained and checked by modeling the finder operation on computers. The use of the mentioned above algorithm simplifies the signal processing in comparison with the known ones.

Keywords: phase radio finder, phase difference, bearing.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-19-25

References

1. *Torticheskie osnovy daiolokatsii: uchebnoe posobie dlya vusjv* [Theoretical fundamentals of radiolocation: manual for higher institutions] edited by V.E. Dulevitch. Moscow, *Soviet Radio*, 1978, 608 p. (in Russ.).
2. *Radio tekhnicheskie sistemy: uchebnik dlya vusov* [Radiotechnical systems: manual for higher institutions] edited by Yu.M. Kazarinov. Moscow, «Academiya», 2008, 590 p. (in Russ.).
3. Sobtsov N.V. *Otsenka maksimal'nogo pravdopodobiya v mnogoshkalinoi fazovoj izmeritel'noy sisteme* [Estimation of maximum verisimilitude in the multiscale phase measurement system]. *Radio Engineering and Electronics*. 1973, vol. 18, no. 6, 1180 p. (in Russ.).
4. Nepochkov I.G. *Ustrojstvo razresheniya neodnoznachnosti fazovykh izmerenij* [Device for solving the ambiguity of phase measurements]. Authorship Certificate USSR, no. 993146, 1983.
5. Kоротков P.I. *Algoritmy otsenivaniya vektora parametrov dlya mnogokanal'noj fazovoj izmeritel'noj sistemy* [Algorithms of estimating the vector of object parameters for the multichannel phase measurement system]. Dissertation for the Candidate of Sciences degree. Omsk State Technical University, 2016, 128 p. (in Russ.).
6. Penzin V.K. *Algoritmy operativnoj obrabotki mnogoshkalnykh izmerenij po kriteriyu maksimal'nogo pravdopodobiya* [Algorithm of operational processing of multiscale measurements by the criterion of maximum verisimilitude]. *Radio Engineering and Electronics*, 1990, vol. 35, no. 1, 97 p. (in Russ.).
7. Kinkulkin I.E. *Global'nye navigatsionnye sputnikovye sistemy: algoritmy funktsionirovaniya apparatury potrebitelya* [Global navigation satellite systems: algorithms of functioning the user devices]. Moscow, *Radio Engineering*, 2018, 325 p. (in Russ.).
8. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatori* [Phase radio direction finders]. Tomsk. Publishing office of TUSUR University, 2002, 251 p. (in Russ.).
9. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritel'nykh sistem* [Theory of phase measurement systems]. Tomsk. Publishing office of TUSUR University, 2007, 147 p. (in Russ.).

10. Zamarin N.E., Kornev V.V., Akopyan G.L., Kovalev A.P. *Ismerenie pelenga mnogokanalnym fazovym pelengatorom metodom tselochislennoj minimisatsii funktsionala neodnosnachnosti* [Bearing measurement by multi-channel phase radio finder through a method of integral minimization of ambiguity functional] // *Radiotechnics*, 2023. vol. 87, no. 5, pp. 24–39 (in Russ.).

11. Porubov G.G., Denisov V.P. *Ustranenie neodnosnachnosti izmerenij v fazovykh pelengatorah s dvumja ortogonalnymi linejnymi antennymi reshetkami* [Eliminating the measurement ambiguity in phase direction finders with two orthogonal linear aerial arrays]. *Proceedings of TUSUR University*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 7–12 (in Russ.).

12. Porubov G.G., Denisov V.P. *Neparametrichesky algoritm obrabotki signalov v fazovykh pelengatorah s linejnoi antennoi reshetkoi* [Nonparametric algorithm of processing the signals in phase direction finders with a linear aerial array]. *Proceedings of TUSUR University*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 7–11 (in Russ.).

13. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical fundamentals of static radio engineering]. In 3 pt., pt. 3. Moscow, *Soviet Radio*, 1976. 288 p. (in Russ.).

14. Porubov G.G. *Metodika vybora optimalnykh struktur antnykh reshetok fazovykh radiopelengatopov i otzhenka*

veroyatnostnykh kharacteristics [Methods of choosing the optimal structures of the aerial arrays of the phase direction finders and the estimation of the probable characteristics]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 5–9 (in Russ.).

Gennady G. Porubov

Engineer, Joint Stock Company «NIIAP», Novosibirsk
87, Dzerzhinsky pr., Novosibirsk, Russia, 630051
Phone: +7 (383-2) 79-52-28
Email: porub27@mail.ru

Vadim P. Denisov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Radio Engineering Systems (RTS),
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-36-70
Email: vadimdenisov418@gmail.com