

УДК 621.317.08

Г.Г. Порубов, В.П. Денисов

## Устранение неоднозначности измерений в фазовых пеленгаторах с двумя ортогональными линейными антенными решетками

Предлагается алгоритм оценки пеленга в фазовых пеленгаторах с плоской антенной решеткой по совокупности разностей фаз сигналов, измеренных между элементами антенной системы. Антенная система представляет собой две линейные решетки, расположенные ортогонально. Алгоритм не чувствителен к закону распределения вероятностей погрешностей фазовых измерений. Алгоритм приемлем для пеленгаторов, оснащённых ортогональными линейными антенными решетками с любым числом фазометрических баз.

**Ключевые слова:** фазовый пеленгатор, разность фаз, разрешение неоднозначности, пеленг.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-2-7-12

Рассматриваются фазовые пеленгаторы с антенными системами в виде плоских антенных решеток. Подобные пеленгаторы обеспечивают одновременные измерения угловых координат источников радиоизлучения по азимуту и углу места и в настоящее время получили широкое применение.

В ряде случаев антенные системы двухкоординатных фазовых пеленгаторов представляют собой две линейные решетки, расположенные вдоль осей прямоугольной системы координат, как, например, в системах траекторных измерений космических аппаратов [1, 2]. Угловое положение источника сигнала определяется по разностям фаз, измеряемым между антеннами, образующими максимальные базы пеленгатора. Дополнительные базы служат для устранения неоднозначности.

В настоящее время известны методы обработки сигналов в многобазовых фазовых пеленгаторах с линейными антенными решетками, позволяющие устранить неоднозначность измерений разностей фаз и последующее вычисление пеленга по всей совокупности разностей фаз сигналов, принятых элементами антенной системы [3–8]. Для устранения неоднозначности используются фазовые соотношения на различных базах. Этот метод в настоящее время находит практическое применение как в фазовых пеленгаторах, так и в других видах многобазовых фазовых измерительных систем.

Статистический подход предусматривает устранение неоднозначности измерений и последующее вычисление пеленга по всей совокупности разностей фаз сигналов, принятых элементами антенной системы. При использовании данного метода не требуется однозначного измерения пеленга в рабочем угловом секторе хотя бы по одной из фазометрических баз.

Теоретической основой известных алгоритмов обработки совокупности измеренных разностей фаз является метод максимального правдоподобия, а измеряемая величина представляется параметром многомерного распределения вероятностей результатов измерений. Использование метода максимального правдоподобия для обработки сигналов в пеленгаторах с плоскими антенными решетками при-

ведено в работах [9, 10]. Для использования этого метода надо задаться многомерным распределением вероятностей погрешностей измерения разностей фаз. Обычно это многомерный нормальный закон распределения. В ряде случаев это оправдано, например, когда систематические погрешности устранены, а источником случайных ошибок являются шумы приемных устройств.

В данной статье в основу алгоритма положено сравнение вектора измеренных разностей фаз с вектором расчетных разностей фаз, вычисленных по результатам измерения на максимальных базах по методике, предложенной в работе [13].

В работе [9] рассмотрен принцип работы двухкоординатного фазового пеленгатора с антенной решеткой, базы которого располагаются вдоль осей прямоугольной системы координат.

На рис. 1 показаны азимут  $\alpha$  и угол места  $\beta$ , характеризующие положение объекта наблюдения  $C(x_c, y_c)$  относительно антенной системы, расположенной в плоскости  $x, O, y$ . Здесь и далее предполагается, что антенная система располагается в плоскости земли.

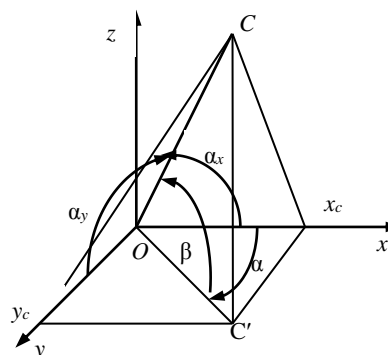


Рис. 1. Угловое положение объекта наблюдения в трёхмерном пространстве

На рис. 2 показано взаимное положение источника сигналов  $C(x_c, y_c, z_c)$  и антенн пеленгатора  $A_1(x_1, y_1)$  и  $A_2(x_2, y_2)$  в трёхмерном пространстве.

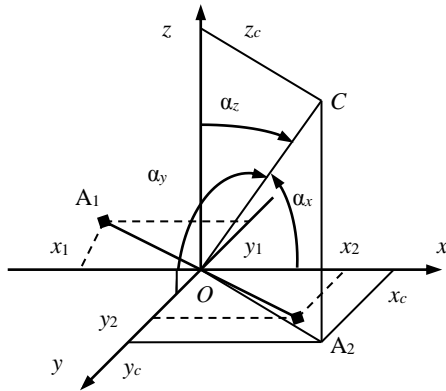


Рис. 2. Взаимное положение источника сигналов  $C$  и антенн пеленгатора в трёхмерном пространстве

Разность фаз сигналов, наведенных на антеннах  $A_1$  и  $A_2$ , определяется по формуле

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} [(x_1 - x_2) \cos \alpha_x + (y_1 - y_2) \cos \alpha_y], \quad (1)$$

где  $(x_1 - x_2)$ ,  $(y_1 - y_2)$  – проекции вектора  $\overline{A_1 A_2}$  на координатные оси.

Простейшая антенная система двухкоординатного фазового пеленгатора, имеющая вид креста, представлена на рис. 3.

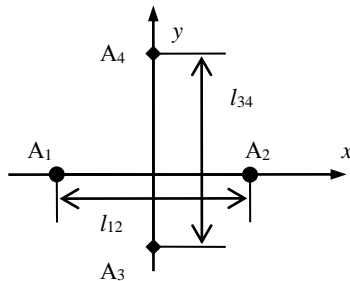


Рис. 3. Пример расположения антенн, образующих базы фазового пеленгатора на плоскости

При расположении баз вдоль осей координат (см. рис. 3) проекции вектора  $\overline{A_1 A_2}$  на оси координат в формуле (1) равны  $(x_1 - x_2) = l_{12}$  и  $(y_1 - y_2) = 0$ , а проекции вектора  $\overline{A_3 A_4}$  равны  $(x_3 - x_4) = 0$  и  $(y_3 - y_4) = l_{34}$ .

С учётом этого на основании формулы (1) разности фаз на ортогональных базах можно представить в виде [9]

$$\Phi_{12} = \frac{2\pi l_{12}}{\lambda} \cos \beta \cos \alpha, \quad (2)$$

$$\Phi_{34} = \frac{2\pi l_{34}}{\lambda} \cos \beta \sin \alpha, \quad (3)$$

где  $\Phi_{12}$  – полная разность фаз сигналов на антеннах  $A_1$ ,  $A_2$ ;  $\Phi_{34}$  – полная разность фаз сигналов на антеннах  $A_3$ ,  $A_4$ .

Из формул (2) и (3) получим соотношения для вычисления азимута  $\alpha$  и угла места  $\beta$  [9]

$$\alpha = \arctg \frac{\Phi_{34} l_{12}}{\Phi_{12} l_{34}}, \quad (4)$$

$$\beta = \arccos \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\Phi_{12}}{l_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Phi_{34}}{l_{34}}\right)^2}. \quad (5)$$

При традиционном построении двухкоординатных фазовых пеленгаторов основой для расчёта азимута и угла места являются формулы (4), (5).

Вычисление азимута и угла места по формулам (4, 5) выполняется в секторах  $\alpha = \pm 180^\circ$  по азимуту и  $\beta = (0-90)^\circ$  по углу места при наличии информации о полных разностях фаз в формулах (2), (3).

Вычисление измеряемого пеленга по формулам (4, 5) выполняется при устранении неоднозначности измерения разности фаз, что обеспечивается выбором структур линейных антенных решеток с учётом рабочих секторов по азимуту и углу места.

Для устранения неоднозначности воспользуемся алгоритмом, предложенным в работе [13] для линейных антенных решеток.

Представим антенную систему пеленгатора векторами относительных баз

$$\mathbf{n}_x = (n_{x1}, n_{x2}, \dots, n_{xn}), \quad (6)$$

$$\mathbf{n}_y = (n_{y1}, n_{y2}, \dots, n_{yn}), \quad (7)$$

где  $\mathbf{n}_x$  – вектор относительных баз антенной решетки, расположенной вдоль оси  $x$ ;  $\mathbf{n}_y$  – вектор относительных баз антенной решетки, расположенной вдоль оси  $y$ ;  $n_{xi} = l_i/\lambda$  и  $n_{yi} = l_i/\lambda$  – базы в длинах волн сигнала пеленгуемого источника (относительная база в терминологии монографии [9]).

Сектор однозначного пеленгования определяется всей совокупностью баз по каждой из линейных антенных решеток. Не будет существенным ограничением, если считать, что базы относятся друг к другу как простые целые числа.

Тогда можно записать

$$\mathbf{e}_x = \Delta_{\text{одн}} \mathbf{n}_x, \quad (8)$$

$$\mathbf{e}_y = \Delta_{\text{одн}} \mathbf{n}_y, \quad (9)$$

где  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  – векторы взаимно простых чисел (базы в целых числах);  $\Delta_{\text{одн}}$  – интервал однозначного пеленгования системой баз [9, 12].

Если относительные базы  $\mathbf{n}_x$  и  $\mathbf{n}_y$  взаимно простые числа,  $\mathbf{n}_x = \mathbf{e}_x/2$  и  $\mathbf{n}_y = \mathbf{e}_y/2$ , то интервал однозначного пеленгования в рабочих секторах  $\alpha = \pm 90^\circ$  и  $\beta = \pm 90^\circ$  для каждой из линейных решеток равен двум,  $\Delta_{\text{одн}} = 2$ .

Если  $\Delta_{\text{одн}} \neq 2$ , то фазовые соотношения на интервале однозначности, следующем из формул (8), (9), аналогичны имеющим место при  $\mathbf{n}_x = \mathbf{e}_x/2$  и  $\mathbf{n}_y = \mathbf{e}_y/2$  в секторе  $\Delta_{\text{одн}} = 2$  (угловой сектор  $\pm 90^\circ$ ).

Поэтому в дальнейшем будем рассматривать работу пеленгатора в этих секторах, считая, что от-

носительные базы – взаимно простые числа. Важно, что при таком подходе в секторе однозначности пеленгатора на каждой базе укладывается целое число «своих» секторов неоднозначности.

Для удобства выкладок условимся фазовые измерения представлять в величинах рад/2π, а базы представим в числах  $n_i = l_i/\lambda$ . Для краткости письма положим  $\text{Sin}\alpha = v$ ,  $\text{Cos}\alpha = u$  и  $\text{Cos}\beta = w$ . Тогда формулы (2), (3) можно представить в виде

$$\Phi_{xi} = n_{xi}wu + \delta_i = \phi_{xi} + \delta_i + k_{xi}, \quad (10)$$

$$\Phi_{yi} = n_{yi}vw + \delta_i = \phi_{yi} + \delta_i + k_{yi}, \quad (11)$$

где  $n_{xi}$  и  $n_{yi}$  – базы в длинах волн пеленгуемого источника сигнала;  $\phi_{xi}$  и  $\phi_{yi}$  – разности фаз, точно соответствующие углу прихода волны;  $k_{xi}$  и  $k_{yi}$  – число полных периодов разности фаз на базах  $n_{xi}$  и  $n_{yi}$ , утраченных при измерении в силу периодичности сигналов;  $\delta_i$  – ошибки измерения разности фаз.

Допустим, что по некоторому источнику, находящемуся по азимуту  $\alpha_r$ , и углу места  $\beta_r$ , выполнено измерение разностей фаз. В соответствии с формулами (10), (11) на  $i$ -й базе измеренная разность фаз будет

$$\phi_{xri} = \Phi_{xi} - \langle \Phi_{xi} \rangle, \quad (12)$$

$$\phi_{yri} = \Phi_{yi} - \langle \Phi_{yi} \rangle, \quad (13)$$

где  $\Phi_{xi}$ ,  $\Phi_{yi}$  – полные разности фаз;  $\langle \cdot \rangle$  – операция округления до ближайшего целого.

По результатам измерений получено два  $n$ -мерных вектора измеренных разностей фаз, где  $n$  – количество баз каждой из линейных антенных решеток, образующих плоскую антенную решетку пеленгатора:

$$\Phi_{xr} = (\phi_{xr1}, \phi_{xr2}, \dots, \phi_{xrn}), \quad (14)$$

$$\Phi_{yr} = (\phi_{yr1}, \phi_{yr2}, \dots, \phi_{yrn}). \quad (15)$$

Для устранения неоднозначности измерения разности фаз на максимальных базах выполняется сравнение векторов измеренных разностей фаз (14, 15) с  $n$ -мерными векторами расчётных разностей фаз независимо по каждой из линейных антенных решеток

$$\Phi_p = (\phi_{p1}, \phi_{p2}, \dots, \phi_{pn}). \quad (16)$$

Предварительно определяется максимально возможное число полных разностей фаз, потерянных при измерении на максимальных базах  $e_{x1}$  и  $e_{y1}$ , в пределах секторов  $\pm 90^\circ$  по азимуту и углу места

$$k_{x1} = \langle n_{x1}wu \rangle, \quad (17)$$

$$k_{y1} = \langle n_{y1}vw \rangle, \quad (18)$$

где  $n_{x1}$  – максимальная база антенной решетки, расположенной вдоль оси  $x$ ;  $n_{y1}$  – максимальная база антенной решетки, расположенной вдоль оси  $y$ .

Компоненты вектора расчётных разностей фаз (16) при последовательном задании числа потерянных периодов разностей фаз на максимальных базах  $k_{xi}$  и  $k_{yi}$  в пределах, определяемых по формулам (17), (18), находятся по формулам

$$\phi_{xpi} = (\phi_{xr1} + k_{x1})e_{xi}/e_{x1} - \langle (\phi_{xr1} + k_{x1})e_{xi}/e_{x1} \rangle, \quad (19)$$

$$\phi_{ypi} = (\phi_{yr1} + k_{y1})e_{yi}/e_{y1} - \langle (\phi_{yr1} + k_{y1})e_{yi}/e_{y1} \rangle, \quad (20)$$

где  $\phi_{xr1}$ ,  $\phi_{yr1}$  – измеренные разности фаз на максимальных базах (12), (13);  $e_{xi}$ ,  $e_{x1}$ ,  $e_{yi}$ ,  $e_{y1}$  – дополнительные и максимальные базы, в целых числах;  $\langle \cdot \rangle$  – операция округления до ближайшего целого.

После каждого такта задания чисел  $k_{x1}$ ,  $k_{y1}$  при вычислении разностей фаз по (19), (20) определяются разности

$$\Psi_{xi} = (\phi_{xri} - \phi_{xpi}) - \langle (\phi_{xri} - \phi_{xpi}) \rangle, \quad (21)$$

$$\Psi_{yi} = (\phi_{yri} - \phi_{ypi}) - \langle (\phi_{yri} - \phi_{ypi}) \rangle, \quad (22)$$

где  $\phi_{xri}$ ,  $\phi_{yri}$  – результаты измерения разности фаз на дополнительных базах  $n_{xi}$  и  $n_{yi}$  (12), (13);  $\phi_{xpi}$ ,  $\phi_{ypi}$  – результаты вычисления разности фаз по (19), (20) на дополнительных базах  $n_{xi}$  и  $n_{yi}$ ;  $\langle \cdot \rangle$  – операция округления до ближайшего целого.

Условие устранения неоднозначности на максимальной базе запишется в виде

$$|\Psi_i| \leq z_{\phi i}, \quad (23)$$

где  $i = 2, 3, \dots, n$  – номера дополнительных баз;  $z_{\phi i}$  – величина разрешенной зоны по фазе для дополнительной базы  $n_i$ , вычисленная по формуле

$$z_{\phi i} = 0,5\Delta_i, \quad (24)$$

где  $\Delta_i$  – отклонение измеренной разности фаз на дополнительной базе  $e_i$  с направлений, отличных от истинного пеленга, для которых на максимальной базе  $e_1$  разность фаз изменяется на  $k_1 2\pi$  радиан. Мы используем здесь термин «разрешенная зона по фазе», введенный в статье [13]. Очевидно

$$\Delta_i = k_1 2\pi \frac{e_i}{e_1} - \left\langle k_1 2\pi \frac{e_i}{e_1} \right\rangle, \quad (25)$$

где  $e_i$ ,  $e_1$  – дополнительная и максимальная базы в целых числах.

Величины  $\Delta_i$  на дополнительных базах  $e_i$  находятся по формуле (25) при задании величины  $k_1 \neq 0$  в пределах, определяемых формулами (17), (18).

Если условие (23) не выполняется хотя бы по одной из дополнительных баз, то решение об устранении неоднозначности не принимается и поиск продолжается. При выполнении условия (23) по

всем дополнительным базам данной линейной антенной решетки принимается решение об устранении неоднозначности на максимальной базе.

Искомые значения полных разностей фаз на базах  $e_{x1}$  и  $e_{y1}$  определяются по формулам

$$\Phi_{x \text{ иск}} = \phi_{x1} + k_{x1}, \quad (26)$$

$$\Phi_{y \text{ иск}} = \phi_{y1} + k_{y1}, \quad (27)$$

где  $\phi_{x1}$ ,  $\phi_{y1}$  – измеренные разности фаз на максимальных базах (12), (13);  $k_{xi}$  и  $k_{yi}$  – число полных периодов разностей фаз, потерянных при измерении на максимальных базах, при которых после вычисления вектора расчётных разностей фаз по формулам (19), (20) и сравнении с вектором измеренных разностей фаз по формулам (21), (22), выполняется условие (23) по всем дополнительным базам.

Вычисление искомого азимута  $\alpha_p$  и угла места  $\beta_p$  выполняется по формулам аналогичным формулам (4), (5).

$$\alpha_p = \arctg \frac{\Phi_{y \text{ иск}} e_{x1}}{\Phi_{x \text{ иск}} e_{y1}}, \quad (28)$$

$$\beta_p = \arccos \sqrt{\left(\frac{\Phi_{x \text{ иск}} \Delta_{\text{одн}}}{e_{x1}}\right)^2 + \left(\frac{\Phi_{y \text{ иск}} \Delta_{\text{одн}}}{e_{y1}}\right)^2}, \quad (29)$$

где  $\Phi_{x \text{ иск}}$ ,  $\Phi_{y \text{ иск}}$  – найденные значения полных разностей фаз по формулам (26), (27);  $e_{x1}$ ,  $e_{y1}$  – максимальные базы в целых числах;  $\Delta_{\text{одн}}$  – интервал однозначного пеленгования системой баз.

Интервал однозначного пеленгования в соответствии с выражениями (8), (9) определяется по формуле

$$\Delta_{\text{одн}} = e_i / n_i,$$

где  $e_i$  – база в целых числах;  $n_i = l_i / \lambda$  – база в длинах волн сигнала пеленгуемого источника.

Проверка предлагаемого алгоритма устранения неоднозначности и вычисления пеленгов выполнена методом математического моделирования. При моделировании выбраны линейные антенные решетки с векторами баз  $\mathbf{e}_x = (e_{x1}, e_{x2}, e_{x3}, e_{x4}) = (18, 9, 12, 10)$  и  $\mathbf{e}_y = (e_{y1}, e_{y2}, e_{y3}, e_{y4}) = (12, 6, 8, 7)$  (варианты 11 и 9 таблицы из статьи [12]).

Значения полных разностей фаз на максимальных базах  $e_{x1}$  и  $e_{y1}$ , вычисленные при устранении неоднозначности по формулам (26), (27), приведены на рис. 4.

Азимут в соответствии с величинами полных разностей фаз (см. рис. 4) вычисляется по формуле

$$\alpha_{\text{выч}} = \begin{cases} \alpha_p & \text{при } \Phi_{x \text{ иск}} \geq 0, \\ 180^\circ + \alpha_p & \text{при } \Phi_{x \text{ иск}} < 0, \text{ и } \Phi_{y \text{ иск}} \geq 0, \\ -180^\circ + \alpha_p & \text{при } \Phi_{x \text{ иск}} < 0, \text{ и } \Phi_{y \text{ иск}} < 0. \end{cases} \quad (30)$$

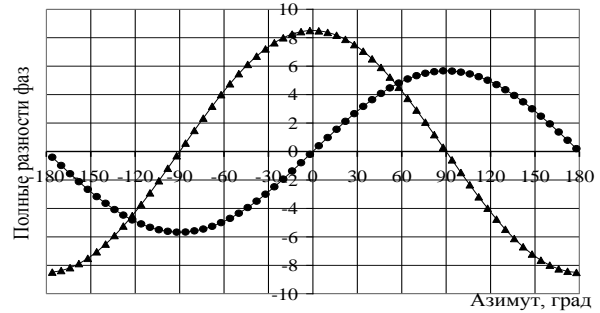


Рис. 4. Полные разности фаз на максимальных базах: ▲ –  $\Phi_{x \text{ иск}}$  по формуле (26); ● –  $\Phi_{y \text{ иск}}$  по формуле (27)

При моделировании азимут и угол места задавались в пределах  $\alpha_r = \pm 180^\circ$  и  $\beta_r = 50^\circ$ .

Результаты вычисления  $\alpha_{\text{выч}}$  по формуле (30) и  $\beta_p$  по формуле (29) при отсутствии фазовых ошибок и при задании фазовых ошибок стационарным нормальным случайным процессом с нулевым средним и СКО  $\sigma_\phi = 33^\circ$  приведены на графиках рис. 5.

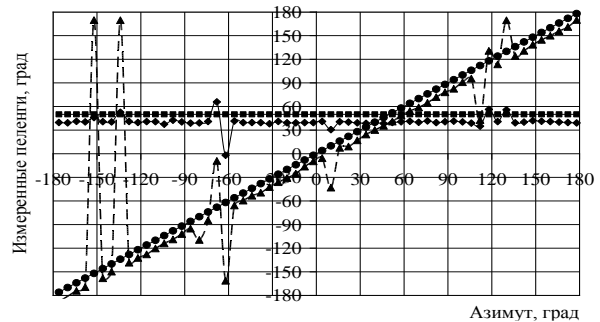


Рис. 5. Результаты вычисления азимута и угла места:

- – азимут при отсутствии фазовых ошибок;
- ▲ – азимут при фазовых ошибках  $\sigma_\phi = 33^\circ$ ;
- – угол места при отсутствии фазовых ошибок;
- ◆ – угол места при фазовых ошибках  $\sigma_\phi = 33^\circ$

Результаты вычисления азимута и угла места при задании фазовых ошибок смещены на минус  $10^\circ$  для наглядности.

Предложенный алгоритм можно оценить вероятностью правильного вычисления пеленгов (отсутствие грубых ошибок вычисления пеленга за счет неверного определения числа полных периодов разностей фаз, утраченных при измерении) и СКО пеленгования при этом условии. Для вычисления этих данных надо задать закон распределения вероятностей фазовых погрешностей. Оценка вероятности правильного пеленгования выполнена по методике, предложенной в работе [14].

Формула для оценки вероятности правильного пеленгования (обозначим ее  $P_0$ ) непосредственно следует из условия устранения неоднозначности (23)

$$P_0 = \int_{-z_{\phi 1}}^{z_{\phi 1}} \dots \int_{-z_{\phi 2n}}^{z_{\phi 2n}} w_{2n-2}(y_3, \dots, y_{2n}) dy_3 \dots dy_{2n}, \quad (31)$$

где  $2n$  – общее число баз пеленгатора;  $z_{\phi i}$  – разрешенная зона по фазе базы  $e_i$  (24);  $w_{2n-2}(y_3, \dots, y_{2n})$  – плотность распределения вероятностей случайных величин  $\psi_i$  (23).

Погрешности фазовых измерений на максимальных базах при вычислении вектора расчётных разностей фаз по формулам (19), (20), сохраняются и суммируются с погрешностями измерения на дополнительных базах при определении величин разностей по (21), (22). Если погрешности измерений случайные величины с нулевыми средними значениями, равными дисперсиями  $\sigma_{\phi}^2$  и коэффициентом корреляции  $r_i$ , то СКО разности (23) можно вычислить по формуле

$$\sigma_i = \sigma_{\phi} \sqrt{\frac{e_1^2 + e_i^2 - 2r_i e_1 e_i}{e_1^2}}$$

Для корректного вычисления СКО пеленгования надо знать условное распределение вероятностей совокупности случайных величин при условии выполнения неравенства (23). Чтобы не преодолевать математические трудности, можно воспользоваться цифровым моделированием для конкретных условий. Подобный пример содержится в статье [15]. Верхнюю границу СКО можно оценить, считая, что точность определяется самыми большими базами.

На рис. 6 приведены зависимость вероятности правильного пеленгования от СКО фазовых ошибок, полученная по формуле (31), и результаты оценки вероятности правильного пеленгования при вычислении азимута и угла мест по формулам (30), (29).

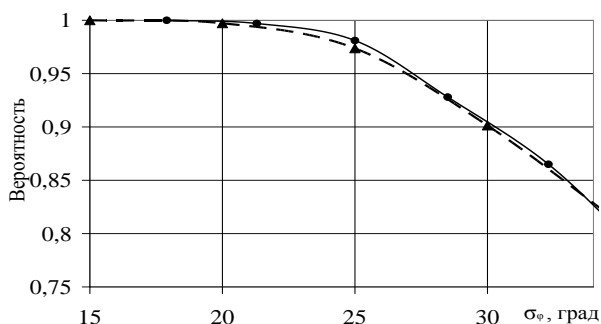


Рис. 6. Зависимости вероятностей правильного пеленгования от фазовых ошибок:  $\blacktriangle$  – вероятность правильного пеленгования по формуле (31);  $\bullet$  – вероятность правильного пеленгования по результатам моделирования

Из графиков (см. рис. 6) видно максимальное совпадение ожидаемой вероятности правильного пеленгования при вычислении пеленгов по данному алгоритму с оценкой вероятности правильного пеленгования, выполненной по формуле (31).

### Выводы

Сравнительный анализ предлагаемого метода устранения неоднозначности и вычисления пеленгов с теоретической оценкой вероятности правильного пеленгования, приведенного на рис. 6, подтвердил эффективность предлагаемого алгоритма вычисления пеленга.

Алгоритм прост, для вычисления пеленга достаточно вектора измеренных фаз.

Алгоритм может быть рекомендован к использованию в двухкоординатных пеленгаторах с антенными системами в виде двух ортогонально расположенных линейных решеток с произвольным количеством элементов.

Работа выполнена в рамках проекта по госзадачу Минобрнауки РФ № FEWM-2020-0039.

### Литература

1. Менгел Т. Сопровождение спутника Земли и передача данных по радио // Искусственный спутник Земли. – М.: Сов. радио, 1957. – С. 46–59.
2. Бугаев Ю.Н. История РЛС в ОКБ МЭИ // История отечественной радиолокации. – М.: Изд. дом «Столичная энциклопедия», 2011. – С. 447–468.
3. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск. Изд-во ТУСУР, 2007. – 147 с.
4. Пензин В.К. Алгоритмы оперативной обработки многошкальных измерений по критерию максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35, № 1. – С. 97.
5. Коротков П.И. Алгоритмы оценивания вектора параметров объекта для многоканальной фазовой измерительной системы: дис. ... канд. техн. наук. – Омск: Омский гос. техн. университет, 2016. – 128 с.
6. Патент RU 2580827 С1. Способ угловой ориентации объекта / В.Н. Рашутняк, Д.Д. Дмитриев, Ю.Л. Фатеев, В.Н. Тяпкин, Н.С. Кремез, Е.Н. Гарин. – Опубл. 10.04.16. – Бюл. № 10.
7. Кинкулькин И.Е. Глобальные навигационные спутниковые системы: алгоритмы функционирования аппаратуры потребителя. – М.: Радиотехника, 2018. – 325 с.
8. А.с. 993146 СССР. МПК G01R 25/00 (2000/01) Устройство разрешения неоднозначности фазовых измерений / И.Г. Неплохов. – Опубл. 30.01.1983. – Б.И. № 4. – С. 227.
9. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. – 251 с.
10. Армизонов А.Н. Применение метода максимального правдоподобия к обработке сигналов в фазовых пеленгаторах с плоскими антенными решетками / А.Н. Армизонов, В.П. Денисов // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40, № 5. – С. 727.
11. 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.
12. Порубов Г.Г. Методика расчёта антенных структур многобазовых фазовых пеленгаторов / Г.Г. Порубов, В.П. Денисов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37). – С. 25–32.
13. Порубов Г.Г. Алгоритм устранения неоднозначности и вычисления пеленга в многобазовых фазовых пеленгаторах // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 22–27.
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.
15. Денисов В.П. Исключение anomalously больших ошибок пеленгования в процессе устранения неоднозначности измерений в фазовых пеленгаторах, реализующих метод максимального правдоподобия / В.П. Денисов,

Д.В. Дубинин, А.А. Мещеряков // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 10. – С. 957–963.

### Порубов Геннадий Гаврилович

Инженер, ОАО «НИИАП», г. Новосибирск  
Дзержинского пр-т, 87, г. Новосибирск, Россия, 630051  
Тел.: 8 (383-2) 79-52-28  
Эл. почта: porub27@mail.ru

### Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р тех. 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: dvp15@sibmail.com

Porubov G.G., Denisov V.P.

### Eliminating the measurement ambiguity in phase direction finders with two orthogonal linear aerial arrays

The algorithm of estimating the bearing in phase direction finders with a flat aerial array is suggested according to a set of differences in signal phases measured between the elements of the aerial system. The aerial system presents two linear lattices located orthogonally. The law of distributing the error probabilities of the phase measurements does not influence the algorithm. The algorithm can be applied for the direction finders equipped with the orthogonal linear lattices having any number of phase-measuring bases.

**Keywords:** phase direction finder, difference in phases, resolution of ambiguity, bearing

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-2-7-12

#### References

1. Mengel T. *Soprovozhdenie sputnika zemli i peredacha dannikh po radio. V knige Iskustvennii sputnik zemli* [Tracking the terrestrial satellite and transmitting the data by radio. In book Artificial terrestrial satellite]. Moscow, *Soviet Radio*, 1957. pp. 46–59 (in Russ.).
2. Bugaev Yu. N. *Istoriya RLS v OKB MEI. V knige «Istoriya otechestvennoi radiolocatsii». Izd. Dom Stolichnaya entsiklopediya* [History of radiolocation stations in the experimental design bureau of Moscow Power Engineering Institute. In book History of national radiolocation. Moscow, Publ. House Metropolitan Encyclopedia], 2011, pp. 447–468 (in Russ.).
3. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritelnykh sistem* [Theory of phase measurement systems]. Tomsk. Publishing office of TUSUR University, 2007. 147 p. (in Russ.).
4. Penzin V.K. *Algoritmy operativnoy 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.).
5. Korotkov P.I. *Algoritmy otsenivaniya vektora parametrov objekta dlya mnogokanal'noy fazovoy izmeritel'noy sistemy* [Algorithms of estimating the vector of object parameters for the multichannel phase measurement system]. PhD thesis. Omsk, Omsk State Technical University, 2016, 128 p. (in Russ.).
6. Ratushnyak V.N., Dmitriev D.D., Fateev Ju.L., Tyapkin V.N., Kremez N.S., Garin E.N. *Sposob uglovoj orientatsii*

objekta [Method of the object angular orientation]. Patent RF no. 2580827, 2016.

7. Kinkulkin I.E. *Global'nye navigatsionnye sputnikovye sistemy: algoritmy funkcionirovaniya apparatury potrebitelya* [Global navigation satellite systems: algorithms of functioning the user devices]. Moscow, *Radio Engineering*, 2018, 325 p. (in Russ.).

8. Neplokhov I.G. *Ustrojstvo razresheniya neodnoznachnosti fazovykh izmerenij* [Device for solving the ambiguity of phase measurements]. Authorship Certificate USSR no. 993146, 1983.

9. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatory* [Phase radio direction finders]. Tomsk, Publishing office of TUSUR University, 2202, 251 p. (in Russ.).

10. Armizonov A.N., Denisov V.P. *Primenenie metoda maksimal'nogo pravdopodobiya k obrabotke signalov v fazovykh pelengatorah s ploskimi antennymi reshetkami* [Application of the maximum likelihood method to processing the signals in phase direction finders with a flat aerial lattice]. *Radio Engineering and Electronics*, 1995, vol. 40, no. 5, p. 727 (in Russ.).

11. 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.).

12. Porubov G.G., Denisov V.P. *Metodika rascheta antennih struktur mnogobazovih fazovykh pelengatorov* [Methods of calculating the structures of antenna arrays for multi-base phase direction finders]. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, vol. 37, no. 3, pp. 25–32 (in Russ.).

13. Porubov G.G. *Algoritm ustraneniya neodnaznachnosti i vichisleniya pelenga v mnogobazovih fazovykh pelengatorah* [Algorithm of eliminating ambiguity and calculating bearing in multi-base phase direction finders]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 22–27 (in Russ.).

14. Porubov G.G. *Metodika vybora optimalnykh struktur antenykh reshetok fazovykh radiopelengatorov i otsenka veroyatnostnykh kharakteristik* [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.).

15. Denisov V.P., Dubinin D.V., Meshcheryakov A.A. *Isklyuchenie anomal'no bol'shikh oshibok pelengovaniya* [Exclusion of abnormally large errors of bearing during the process of eliminating the measurement ambiguity in phase direction finders implementing the method of maximum probability]. *Radio Engineering and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 10, pp. 957–963 (in Russ.).

### Gennadiy G. Porubov

Engineer, OJSC «НИИАП», 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, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-36-70  
Email: dvp15@sibmail.com