УДК 621.317.08

Г.Г. Порубов

Методика выбора дополнительных баз антенных структур многобазовых фазовых пеленгаторов для уменьшения вероятности регистрации ложных пеленгов

Рассматривается фазовый пеленгатор с антенной системой в виде линейной решетки, предназначенный для определения углового положения источника излучения в азимутальной плоскости. Работа пеленгатора строится в предположении нормального распределения вероятностей фазовых ошибок. Проводится оценка вероятностей ложного пеленгования. Предлагается методика выбора дополнительных баз антенных структур многобазовых фазовых пеленгаторов по критерию минимума вероятности ложного пеленгования. Методика основана на выборе дополнительного числа баз по определённому алгоритму. Дана аналитическая оценка уменьшения вероятности регистрации ложных пеленгов. Выполнена проверка характеристик фазового пеленгатора методом математического моделирования.

Ключевые слова: фазовый пеленгатор, математическое ожидание, разрешение неоднозначности, оценка пеленга.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-7-12

В фазовых пеленгаторах после измерения разностей фаз пеленгуемого источника излучения выполняется операция вычисления измеряемого пеленга. Основной функцией при вычислении пеленга является устранение неоднозначности измерения разности фаз на максимальной базе. При наличии ошибок измерения разностей фаз с некоторой вероятностью P_0 неоднозначность измеренной разности фаз устраняется правильно. Вычисленный пеленг будет правильным. При ошибочном устранении неоднозначности вычисленный пеленг будет ложным. Вероятность ложного пеленгования или вероятность аномальной ошибки оценивается по формуле [1]

$$P_L = 1 - P_0, \quad (1)$$

где P_0 – вероятности правильного устранения неоднозначности.

В работах [1–4] рассмотрены методы выбора оптимальных структур антенных решеток, обеспечивающих получение максимальных вероятностей правильного пеленгования. Результатом выбора оптимальной структуры антенной решетки будет уменьшение вероятности ложного пеленгования (1).

Для оптимальных антенных структур, выбранных в соответствии с техническими требованиями к фазовому пеленгатору, пути уменьшения вероятности ложного пеленгования методом увеличения вероятности правильного устранения неоднозначности при достигнутом уровне фазовых ошибок имеют предел.

Число регистраций правильного или ложного пеленга в общем виде оценивается по формуле

$$N_i = P_i m,$$

где P_i – вероятность правильного или ошибочного устранения неоднозначности; m – число измерений разностей фаз и вычислений пеленга при любом направлении прихода сигналов.

Вопрос уменьшения числа регистрации ложных пеленгов в общем объеме информации об измеренных пеленгах актуален.

Известен ряд способов уменьшения регистрации ложных пеленгов.

В работах [5, 6] предложен способ исключения аномально больших ошибок пеленгования и соответственно уменьшения вероятности регистрации ложных пеленгов. Способ основан на исключении (стирании) результатов измерения разностей фаз с большими фазовыми ошибками в процессе устранения неоднозначности.

Недостатком этого способа является исключение ряда возможных вычислений правильного пеленга, если ошибки измерения разности фаз превышают некоторый заданный уровень. Последнее ведёт к уменьшению величины вероятности правильного пеленгования, рассчитанной относительно числа измерений разностей фаз. В работе [5] показано, что число отсчетов, по которым определяется пеленг источника излучения, снижается до уровня 0,5 от числа измерений разностей фаз в зависимости от величины СКО измерения разности фаз и заданного порога.

В работах [1–3] предложен метод уменьшения регистрации ложных пеленгов увеличением числа баз антенной решетки. Эффект уменьшения регистрации ложных пеленгов очевиден. Однако метод имеет ряд недостатков.

Во-первых, поиск оптимальной структуры с увеличением числа баз выполняется методом многократного перебора различных структур, что требует больших временных затрат.

Во-вторых, оценкой полученного результата для антенных структур с числом баз от трёх до пяти с одинаковыми или различными величинами максимальных баз являются слова: «Наилучшие антенные структуры фазовых пеленгаторов». Нет ни абсолютной, ни относительной оценки изменения вероятностных характеристик антенной структуры.

Выбор конкретной антенной структуры из ряда рекомендованных в этих работах структур затруднителен.

Методика

Рассмотрим предлагаемый подход к выбору дополнительных баз антенных структур фазовых пеленгаторов, обеспечивающих уменьшение вероятности регистрации ложных пеленгов.

Положим, что для конкретного фазового пеленгатора в соответствии с заданными техническими требованиями по одной из методик выбора оптимальных антенных структур [1, 3, 4] определена оптимальная структура антенной решетки

$$\vec{e} = (e_1, e_2, \dots, e_n), \quad (2)$$

Величину вероятностей правильного или ложного пеленгования можно вычислить по формуле (18), приведенной в [4]:

$$P_j = \int_{m_{2j}-z_{\phi 2}}^{m_{2j}+z_{\phi 2}} \dots \int_{m_{nj}-z_{\phi n}}^{m_{nj}+z_{\phi n}} w_{n-1}(y_2, \dots, y_n) dy_2 \dots dy_n, \quad (3)$$

где n – число баз пеленгатора; $z_{\phi i} = 0,5\Delta_i$ – разрешенная зона по фазе i -й базы; Δ_i – величины отклонения измеренной разности фаз с направления ложных пеленгов относительно измерений разности фаз с направления истинного пеленга для базы e_i , значения которых приведены в таблице [7, с. 30]; m_{ij} – величина математического ожидания измеренной разности фаз для базы e_i в j -й зоне неоднозначности максимальной базы e_1 ; $w_{n-1}(y_2, \dots, y_n)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины, определяемых по формуле (15), приведенной в [4]:

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

где σ_i^2 – дисперсия случайных величин фазовых ошибок приёмных каналов; e_1 и e_i – величины баз в целых числах; r_i – коэффициент корреляции ошибок измерения разности фаз для пары баз e_1 и e_i .

Формула (3) позволяет вычислить как вероятность правильного, так и вероятность ложного пеленгования. Отличие в написании формулы состоит в следующем. При вычислении вероятности правильного пеленгования математические ожидания по всем дополнительным базам e_i $m_{ij} = 0$ при величине $j = 0$. При вычислении вероятности регистрации любого из ложных пеленгов при величине $j = \pm(1, 2, 3, \dots)$ математические ожидания для дополнительных баз e_i распределены в пределах $0 \leq |m_{ij}| \leq 0,5$.

Под ложным пеленгом или зоной неоднозначности максимальной базы e_1 принимаем направле-

ния, отличные от истинного пеленга, для которых измеренные разности фаз имеют одинаковые значения, а полные разности фаз изменяются на величину $2\pi j$, где $j = \pm(1, 2, 3 \dots)$.

Величина математического ожидания определяется по формуле

$$m_{ij} = (e_i/e_1)j - \langle (e_i/e_1)j \rangle, \quad (4)$$

где $j = \pm(0, 1, 2, \dots, h/2)$ – номер зоны неоднозначности максимальной базы $e_1 = h$; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

Отношение e_i/e_1 в (4) определяет изменение разности фаз на базе e_i при изменении разности фаз на базе e_1 на величину 2π , выраженную в единицах рад/ 2π .

Вероятность правильного устранения неоднозначности оценивается по (3) при величине $j = 0$, когда математические ожидания (4) равны нулю. Вероятность регистрации каждого из ложных пеленгов оцениваются по (3) при задании различных величин $j = \pm(1, 2, \dots, h/2)$. При этом математические ожидания (4) для ряда дополнительных баз определяют величину смещения центра разрешенной зоны $\pm z_{\phi i}$ относительно нуля на величину $-0,5 \leq m_{ij} \leq 0,5$, что минимизирует вероятность ложного пеленгования.

Суммарная вероятность ложного пеленгования вычисляется по формуле

$$P_{LS} = 2 \sum_{j=1}^{h/2} P_j. \quad (5)$$

В процессе оценки вероятностей регистрации ложных пеленгов определяются номера зон неоднозначности j , для которых вероятность регистрации ложного пеленга максимальна.

Причиной большой вероятности регистрации ряда ложных пеленгов можно считать наличие малого числа дополнительных баз (в пределах до одной базы) с величинами математического ожидания (4) $m_{ij} \leq z_{\phi i}$.

Задача уменьшения вероятности регистрации ложных пеленгов решается выбором дополнительной базы e_{n+1} с величиной, обеспечивающей наибольшие значения математического ожидания $m_{(n+1)j}$ (4) для зон неоднозначности j , имеющих максимальные вероятности регистрации ложных пеленгов, найденных при оценке по (3).

После выбора дополнительной базы e_{n+1} можно оценить величины вероятностей правильного и ложного пеленгования со структурой антенной решетки $\vec{e} = (e_1, e_2, \dots, e_n, e_{n+1})$.

Основная функция, возлагаемая на дополнительную базу e_{n+1} , состоит в уменьшении вероятности регистрации ложных пеленгов. Для уменьшения

влияния выбранной дополнительной базы e_{n+1} на вероятность правильного устранения неоднозначности величина разрешенной зоны по фазе для данной базы $z_{\phi(n+1)} = 0,5\Delta_{n+1}$ определяется при максимальном значении $\Delta_{n+1} \leq 180^\circ$.

Уменьшить вероятность регистрации ложных пеленгов можно дополнительно, применив предложенный в работах [5, 6] способ исключения anomalно больших ошибок пеленгования, применив его к базе e_{n+1} , уменьшая величину разрешенной зоны $z_{\phi(n+1)} = 0,5\Delta_{n+1}$ с оценкой вероятности правильного устранения неоднозначности.

Оценка вероятностей

Оценку предлагаемой методики по уменьшению вероятности регистрации ложных пеленгов выполним на примере антенной решетки, приведенной на рис. 1. Предположим, что выбранная структура антенной решетки $\vec{e} = (e_1, e_2, e_3, e_4) = (18, 6, 9, 8)$, вариант 12 таблицы [7, с. 30], для пеленгатора оптимальна.

Рис. 1. Схема антенной решетки многобазового фазового пеленгатора с дополнительной базой e_5

В табл. 1 приведены результаты оценки вероятностей правильного и ложного пеленгования по (3) для четырехбазового пеленгатора с антенной структурой $\vec{e} = (e_1, e_2, e_3, e_4) = (18, 6, 9, 8)$. Величина СКО измерения разности фаз при расчетах принята равной 30 град.

Таблица 1

Результаты оценки вероятностей правильного и ложного пеленгования антенной структуры $\vec{e} = (18, 6, 9, 8)$

Зона неодно- значности	Величины баз			Вероят- ность P_j
	$e_2 = 6$	$e_3 = 9$	$e_4 = 8$	
	Математические ожидания			
1	2	3	4	5
j	$ m_{2j} $	$m_{3j} $	$ m_{4j} $	
0	0	0	0	0,842
± 1	0,333	0,5	0,444	$1,5 \times 10^{-8}$
± 2	0,333	0	0,111	0,035
± 3	0	0,5	0,333	$8,1 \times 10^{-6}$
± 4	0,333	0	0,222	0,013
± 5	0,333	0,5	0,222	$3,5 \times 10^{-6}$
± 6	0	0	0,333	0,031
± 7	0,333	0,5	0,111	$9,3 \times 10^{-6}$
± 8	0,333	0	0,444	$5,6 \times 10^{-5}$
9	0	0,5	0	$2,2 \times 10^{-7}$

В столбцах 2–4 табл. 1 приведены абсолютные значения математических ожиданий, вычисленных по (4), для баз e_2, e_3, e_4 .

В столбце 5 табл. 1 приведены результаты оценки вероятности регистрации каждого из пеленгов неоднозначности, вычисленных по (3).

Из табл. 1 видно, что максимальные величины вероятностей ложного пеленгования будут для зон неоднозначности $j = \pm 2, j = \pm 4$ и $j = \pm 6$.

Суммарная величина вероятности ложного пеленгования, вычисленная по (5), равна $P_{LS} = 0,158$ и совпадает с оценкой по (1).

Выполним поиск дополнительной базы e_5 , предъявив к ней единственное требование – получение наибольшего значения математического ожидания m_{5j} в зонах неоднозначности $j = \pm 2, j = \pm 4$ и $j = \pm 6$. Таким требованиям отвечают базы e_5 с величинами 4, 5, 13 или 14. Выбрана база $e_5 = 5$.

В табл. 2 приведены результаты оценки вероятностей правильного и ложного пеленгования пятибазового пеленгатора с антенной структурой $\vec{e} = (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5) = (18, 6, 9, 8, 5)$ при величине СКО измерения разностей фаз 30° .

Таблица 2

Результаты оценки вероятностей правильного и ложного пеленгования антенной структуры $\vec{e} = (18, 6, 9, 8, 5)$

Зона неодно- значно- сти	Величины баз				Вероят- ность P_j
	$e_2 = 6$	$e_3 = 9$	$e_4 = 8$	$e_5 = 5$	
	Математические ожидания				
1	2	3	4	5	6
j	$ m_{2j} $	$ m_{3j} $	$ m_{4j} $	$ m_{5j} $	
0	0	0	0	0	0,839
± 1	0,333	0,5	0,444	0,278	$5,5 \times 10^{-9}$
± 2	0,333	0	0,111	0,444	$4,3 \times 10^{-4}$
± 3	0	0,5	0,333	0,167	$6,8 \times 10^{-6}$
± 4	0,333	0	0,222	0,111	0,012
± 5	0,333	0,5	0,222	0,389	$1,9 \times 10^{-7}$
± 6	0	0	0,333	0,333	$5,1 \times 10^{-3}$
± 7	0,333	0,5	0,111	0,056	$9,2 \times 10^{-6}$
± 8	0,333	0	0,444	0,222	$3,5 \times 10^{-5}$
9	0	0,5	0	0,5	$3,5 \times 10^{-5}$

Величина разрешенной зоны по фазе для выбранной базы e_5 $z_{\phi 5} = 0,5\Delta_5$ при расчетах принималась равной $\Delta_5 = 180^\circ$.

Вероятность ложного пеленгования фазового пеленгатора с антенной структурой $\vec{e} = (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5) = (18, 6, 9, 8, 5)$ по (5) равна $P_{LS} = 0,0352$.

Из табл. 1 и 2 видно, что вероятности правильного пеленгования, вычисленные при равенстве $j = 0$, для четырехбазовых и пятибазовых антенных структур идентичны.

Таким образом, включение в антенную решетку фазового пеленгатора дополнительной базы, выбранной предложенным методом, уменьшает вероятность регистрации ложного пеленга в разы без изменения вероятности правильного пеленгования.

Моделирование

Методом математического моделирования выполнена оценка влияния дополнительной базы антенной структуры на уменьшение вероятности регистрации ложных пеленгов.

Математическое моделирование фазового пеленгатора выполнено для двух условий работы.

Первое условие – измерение разностей фаз и вычисление пеленга выполняется при приёме сигналов в пределах рабочего сектора.

Второе условие – измерение разностей фаз и вычисление пеленга выполняется при приёме сигналов в полусфере.

Моделирование выполнено для антенных структур $\vec{e} = (18, 6, 9, 8)$ и $\vec{e} = (18, 6, 9, 8, 5)$.

На рис. 2 приведен пример пеленгования источников излучения на проходе.

Рис. 2. Пример пеленгования источников излучения на проходе

При пеленгации источника излучения с уровнем мощности на входе приёмных устройств на уровне реальной чувствительности область существования сигналов, в пределах которой выполняется измерение разности фаз и вычисление пеленга, ограничена формой диаграммы направленности элементов антенной решетки. На рис. 2 это области S_1 и S_2 .

При пеленгации источника излучения с уровнем мощности, превышающем уровень реальной чувствительности приёмных устройств на (30–35) дБ, измерение разности фаз и вычисление пеленга возможно в полусфере с радиусом R .

Величина радиуса определяется дальностью до радиогоризонта.

Прямые C_1 и C_2 (см. рис. 2) представляют перемещение пеленгуемых источников излучения относительно пеленгатора, расположенного в точке O .

S_1 и S_2 – области приёма сигналов, ограниченные диаграммой направленности антенных элементов; R – максимальная дальность приёма сигнала; $\pm\alpha_p = |\pm 30^\circ|$ – рабочие сектора пеленгации.

Математическое моделирование выполнено при задании следующих условий: использован алгоритм устранения неоднозначности и вычисления пеленга

по [8]; рабочий сектор пеленгатора $\alpha_p = \pm 30^\circ$; диапазон изменения азимута задавался в пределах $\alpha = \pm 90^\circ$; при пеленгации в рабочем секторе пределы приёма сигналов ограничены величиной $\alpha = \pm 30^\circ$; величина СКО измерения разностей фаз 30 град; величины баз, выраженные в минимальной длине волны пеленгуемого сигнала, определены по формуле

$$\frac{l_i}{\lambda} \leq \frac{e_i}{1 + \sin(\alpha_p)};$$

максимальное число потерянных периодов измеренной разности фаз на максимальной базе при вычислении пеленга в пределах рабочего сектора определено по формуле

$$k_1 = \pm \left\langle \frac{e_1 \sin(\alpha_p)}{1 + \sin(\alpha_p)} \right\rangle,$$

где e_1 – максимальная база в целых числах; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого; число реализаций измерения разностей фаз при задании пеленга в пределах сектора $\alpha = \pm 30^\circ$ $n = 60$; число реализаций измерения разностей фаз при задании пеленга в секторах $\alpha = \pm (30^\circ \div 90^\circ)$ $m = 2 \times 60$.

На рис. 3 приведены результаты вычисления пеленга пеленгатором с антенной структурой $\vec{e} = (18, 6, 9, 8)$ при задании азимута в пределах сектора $\alpha = \pm 30^\circ$.

▲ Измеренный азимут при приёме сигналов в рабочем секторе

Рис. 3. Результаты вычисления пеленгов при приёме сигналов в пределах $\alpha = \pm 30^\circ$.

Пеленгатор с антенной структурой $\vec{e} = (18, 6, 9, 8)$

На рис. 4 приведены результаты вычисления пеленга пеленгатором с антенной структурой $\vec{e} = (18, 6, 9, 8, 5)$ при задании азимута в пределах сектора $\alpha = \pm 30^\circ$.

Из графиков рис. 3 и 4 видно, что введение в структуру антенной решетки одной дополнительной базы уменьшает вероятность регистрации ложных пеленгов в разы.

При задании азимута в пределах сектора $\alpha = \pm 90^\circ$ предполагалось наличие трёх источников излучения, не различимых по радиотехническим параметрам, расположенных произвольным образом в полусфере.

Рис. 4. Результаты вычисления пеленгов при приёме сигналов в пределах $\alpha = \pm 30^\circ$.

Пеленгатор с антенной структурой $\vec{e} = (18, 6, 9, 8, 5)$

Принимаем условие работы пеленгатора при отсутствии каких-либо дополнительных устройств, ограничивающих вычисление пеленга или регистрацию вычисленного пеленга при приёме сигналов от источников излучения, расположенных вне рабочего сектора. Таким образом, одновременно с измерением пеленга источника излучения, расположенного в секторе $\alpha = \pm 30^\circ$, выполняется измерение разности фаз, вычисление пеленга и регистрация вычисленных пеленгов по сигналам от источников излучения, расположенных в секторах $\alpha = \pm(30-90^\circ)$.

На рис. 5 приведены результаты вычисления пеленга пеленгатором с антенной структурой $\vec{e} = (18, 6, 9, 8)$ при задании азимута в пределах сектора $\alpha = \pm 90^\circ$. Число реализаций измерения разностей фаз $n + m = 180$.

Рис. 5. Результаты вычисления пеленгов при приёме сигналов в пределах $\alpha = \pm 90^\circ$.

Пеленгатор с антенной структурой $\vec{e} = (18, 6, 9, 8)$

На рис. 6 приведены результаты вычисления пеленга пеленгатором с антенной структурой $\vec{e} = (18, 6, 9, 8, 5)$ при задании азимута в пределах сектора $\alpha = \pm 90^\circ$. Число реализаций измерения разностей фаз $n + m = 180$.

Из графиков рис. 5, 6 видно, что включение дополнительной базы в состав антенной решетки

уменьшает в разы число регистраций ложных пеленгов при работе пеленгатора по сигналам источников излучения, расположенных в полусфере.

Рис. 6. Результаты вычисления пеленгов при приёме сигналов в пределах $\alpha = \pm 90^\circ$.

Пеленгатор с антенной структурой $\vec{e} = (18, 6, 9, 8, 5)$

По методике, приведенной в [5], выполнена оценка вероятностей правильного пеленгования.

Введём следующие обозначения: $P_{\text{ПИ}}$ – вероятность правильного измерения пеленга, $P_{\text{ЛИ}}$ – вероятность ложного измерения пеленга при приёме сигнала в пределах сектора $\alpha = \pm 30^\circ$, $P_{\text{ЛИ2}}$ – вероятность ложного измерения пеленга при приёме сигнала в пределах сектора $\alpha = \pm(30-90^\circ)$.

По результатам двадцатикратного моделирования определены средние величины регистрации правильного и ложных пеленгов. Вероятности правильного и ложного пеленгования определены как отношение зарегистрированного числа соответствующих пеленгов относительно заданного числа измерений разностей фаз.

Вероятность правильного пеленгования P_0 при приёме сигналов в секторе $\alpha = \pm 30^\circ$ оценивается по формуле

$$P_0 = \frac{P_{\text{ПИ}}}{P_{\text{ПИ}} + P_{\text{ЛП}}},$$

а вероятность правильного пеленгования P_{02} при приёме сигналов в секторе $\alpha = \pm 90^\circ$ оценивается по формуле

$$P_{02} = \frac{P_{\text{ПИ}}}{P_{\text{ПИ}} + P_{\text{ЛИ}} + P_{\text{ЛИ2}}}.$$

Результаты оценки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты оценки вероятностей правильного пеленгования четырёхбазовым и пятибазовым пеленгаторами

Вероятности	Векторы антенных структур	
	$\vec{e} = (18, 6, 9, 8)$	$\vec{e} = (18, 6, 9, 8, 5)$
$P_{\text{ПИ}}$	0,828	0,821
$P_{\text{ЛИ}}$	0,129	0,015
$P_{\text{ЛИ2}}$	0,102	0,017
P_0	0,865	0,982
P_{02}	0,782	0,962

Из табл. 3 видно, что введение одной дополнительной базы в состав антенной решетки позволяет существенно снизить вероятность ложного пеленгования при сохранении величины вероятности правильного измерения пеленга $P_{П}$.

Выводы

Увеличение числа баз антенной решетки позволяет существенно уменьшить вероятность регистрации ложных пеленгов.

Уменьшение вероятности регистрации ложных пеленгов обеспечивает удовлетворительную работу фазового пеленгатора при приёме сигналов источников излучения, расположенных в полусфере, без дополнительных устройств, ограничивающих регистрацию пеленгов по сигналам источников излучения, расположенных вне рабочего сектора.

Методика может быть применена не только для фазовых пеленгаторов с линейной антенной решеткой, но и для пеленгаторов с плоскими антенными решетками и для других видов многошкальных фазовых измерителей.

Литература

1. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2002. – 251 с.
2. Белов В.И. Оптимизация антенных структур фазовых пеленгаторов по критерию минимума вероятности аномальной ошибки / В.И. Белов, В.П. Денисов // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35, № 3. – С. 521.
3. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск: ТУСУР, 2007. – 147 с.
4. Порубов Г.Г. Методика выбора оптимальных структур антенных решеток фазовых пеленгаторов и оценка вероятностных характеристик / Г.Г. Порубов // Доклады ТУСУР, 2017. – Т. 20, № 1. – С. 5–9.
5. Денисов В.П. Алгоритм отбраковки аномально больших ошибок пеленгования фазовым пеленгатором / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 36–42.
6. Денисов В.П. Исключение аномально 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.
7. Порубов Г.Г. Методика расчёта антенных структур многобазовых фазовых пеленгаторов / Г.Г. Порубов, В.П. Денисов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37). – С. 25–32.
8. Порубов Г.Г. Алгоритм устранения неоднозначности и вычисления пеленга в многобазовых фазовых пеленгаторах / Г.Г. Порубов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 22–27.

Porubov G.G.

Methods of choosing the additional bases of aerial structures of multi-base phase direction finders to decrease the probability of registering false bearings

The phase direction finder with an aerial system in the form of linear lattice is considered in the article. It is intended to determine the angular position of the emission source in the azimuth plane. The direction finder operation is based on the assumption of the normal distribution of phase error probabilities. The assessment of probabilities of false bearing is carried out. The methods of choosing the additional bases of the aerial structures of multi-base phase direction finders by the criterion of the probability minimum of false bearing are suggested. The methods are based on choosing the additional number of bases according to a certain algorithm. The analytical assessment of reducing the probability of registering the false bearings is presented. The testing of the phase direction finder characteristics by mathematical modelling is carried out.

Keywords: direction finder, mathematical expectation, ambiguity resolution, estimation bearing.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-7-12

References

1. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Phase direction finder*. Tomsk, TUSUR Publishing, 2002. 251 p. (in Russ.).
2. Belov V.I., Denisov V.P. Optimization of aerial arrays structures in phase direction finders by the criterion of the probability minimum of the abnormal error. *Radio Engineering and Electronics*, 1990, vol. 35, no. 3, p. 521 (in Russ.).
3. Belov V.I. *The Theory of Phase Measurement Systems*. Tomsk, State University of Management Systems and Radio Electronics, 2007. 147 p. (in Russ.).
4. Porubov G. G. The method of choosing the optimal structures of antenna arrays of phase-finders and estimation of probabilistic characteristics. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 5–9 (in Russ.).
5. Denisov V.P., Dubinin D.V., Krutikov M.V., Meshcheryakov A.A. Algorithm of sorting the abnormally large errors in bearing by the phase direction finder. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 2 (26), p. 1, pp. 36–42. (in Russ.).
6. Denisov V.P., Dubinin D.V., Meshcheryakov A.A. 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.).
7. Porubov G.G., Denisov V.P. 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.).
8. Porubov G.G. Algorithm of eliminating ambiguity and calculating bearing for multi-base phase direction finders. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 22–27 (in Russ.).

Порубов Геннадий Гаврилович

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

Gennadiy G. Porubov

Engineer, OJSC «Novosibirsk Research Institute of Automatic Devices (NIAP)», Novosibirsk
87, Dzerzhinsky av., Novosibirsk, Russia, 630051
Phone: +7 (383) 279-52-28
Email: porub27@mail.ru