

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 004.9

Асланов Г.К., Казибеков Р.Б., Мусаева У.А., Тетакаев У.Р.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ ПРИ НЕИСПРАВНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗ ОРТОГОНАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ВИБРАТОРОВ

Aslanov G.K., Kazibecov R.B., Musayeva U.A., Tetakaev U.R.

PROVIDING EFFICIENCY OF AUTOMATIC DIRECTION FINDER IN CASE OF FAULTY ANTENNA SYSTEM WITH THE USE OF PHASES OF ORTHOGONAL VIBRATOR

Показана возможность обеспечения работоспособности квазидоплеровского широкодиапазонного автоматического радиопеленгатора при выходе из строя нескольких вибраторов антенной системы, за счет использования фазовых соотношений с исправных ортогонально расположенных вибраторах антенной системы.

Ключевые слова: *автоматический радиопеленгатор, антенная система, вибратор, неисправность, разность фаз.*

The possibility of providing a wide-range performance kvazidoplerovskogo automatic direction finder at failure of several vibrators antenna system through the use of phase relationships with serviceable.

Key words: *automatic direction finder, array system, vibrator, failure, phase difference.*

Выход из строя вибраторов антенной системы приводит к выходу из строя всего автоматического радиопеленгатора (АРП). Поэтому, для обеспечения бесперебойной работы радиопеленгатора, в случаях выхода из строя вибраторов антенной системы (АС), в аэропортах устанавливают по два комплекта АРП-75 стоимостью 5 миллионов рублей и выше каждая (при выходе из строя одного, включается второй).

Специалистами ОАО НИИ «Сапфир» предложено вместо информации неисправного вибратора использовать переработанную информацию с вибратора, расположенного противоположно неисправному.

При этом, при выходе из строя любых двух противоположно расположенных вибраторов, АРП становится неработоспособной.

В [1, 2] предлагаются алгоритмы, позволяющие обеспечить работоспособность АРП при наличии любых, не менее трех из шестнадцати, исправных вибраторов антенной системы. Эти алгоритмы работоспособны в диапазоне частот 100-150 МГц и не обеспечивает работоспособность в ДМВ диапазоне из-за возникновения фазовой неоднозначности.

Антенная система доплеровского АРП представляет собой вибратор A , вращающийся с угловой скоростью Ω по окружности радиусом R .

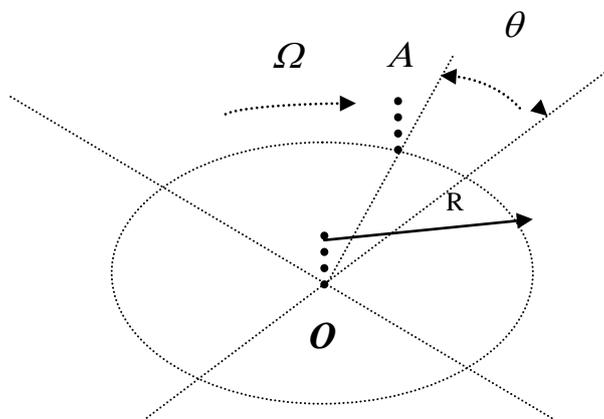


Рисунок 1 - К принципу работы доплеровских АРП

Текущая фаза принятого сигнала в доплеровском АРП, описывается выражением (1):

$$\varphi = \frac{2 \pi R}{\lambda} \cos \beta \cos (\Omega t - \theta), \quad (1)$$

где λ – длина волны пеленгуемого сигнала.

β - угол места на источник излучения;

θ - пеленг на источник излучения;

λ - длина волны пеленгуемого сигнала;

Ω - угловая скорость вращения вибратора антенны.

В настоящее время вместо механического сканирования используют электрическое переключение вибраторов кольцевой антенной решетки, создавая эффект вращения одного вибратора. По аналогии с доплеровскими АРП, данные радиопеленгаторы получили название квазидоплеровских.

В квазидоплеровских АРП фаза сигнала, принятого i -м кольцевым вибратором, измеренная относительно фазы центрального вибратора, определяется следующим выражением:

$$\varphi_i = \frac{2 \pi R}{\lambda} \cos \beta \cos \left(\frac{2 \pi (i - 1)}{N} - \theta \right), \quad (2)$$

где N - количество элементов (вибраторов) АС

i - номер кольцевого вибратора АС причем, вибратор направленный на север имеет №1.

При этом девиация фазы составляет:

$$\psi = \frac{2 \pi R}{\lambda} \cos \beta$$

При $\beta = 0$, девиация фазы будет максимальной.

Фазовая неоднозначность возникает в связи с тем, что фазовая характеристика, для квазидоплеровских АРП имеет вид ступенчатой синусоиды, при этом, рабочий диапазон фазового детектора равен $(-\pi \dots +\pi)$ или $(0 \dots +2\pi)$. Так как у современных аэродромных автоматических радиопеленгаторов диапазон рабочих частот находится в пределах 100-150; 220-400 МГц, при числе элементов антенной решетки равном 16, радиусе антенной системы равном 1,6 м, при угле места равном нулю ($\beta = 0$) максимальное значение выражения (2) равно 768° . То есть, возникает двухкратная неоднозначность.

На рисунке 2 приведен пример возникновения фазовой неоднозначности для 16 вибраторной антенной системы с радиусом 1,6 метра, пеленгующего сигнал на частоте 400 МГц с азимута, равном 90° , при использовании фазового детектора с линейной характеристикой в диапазоне $0 \div 360^\circ$, при угле места равном нулю.

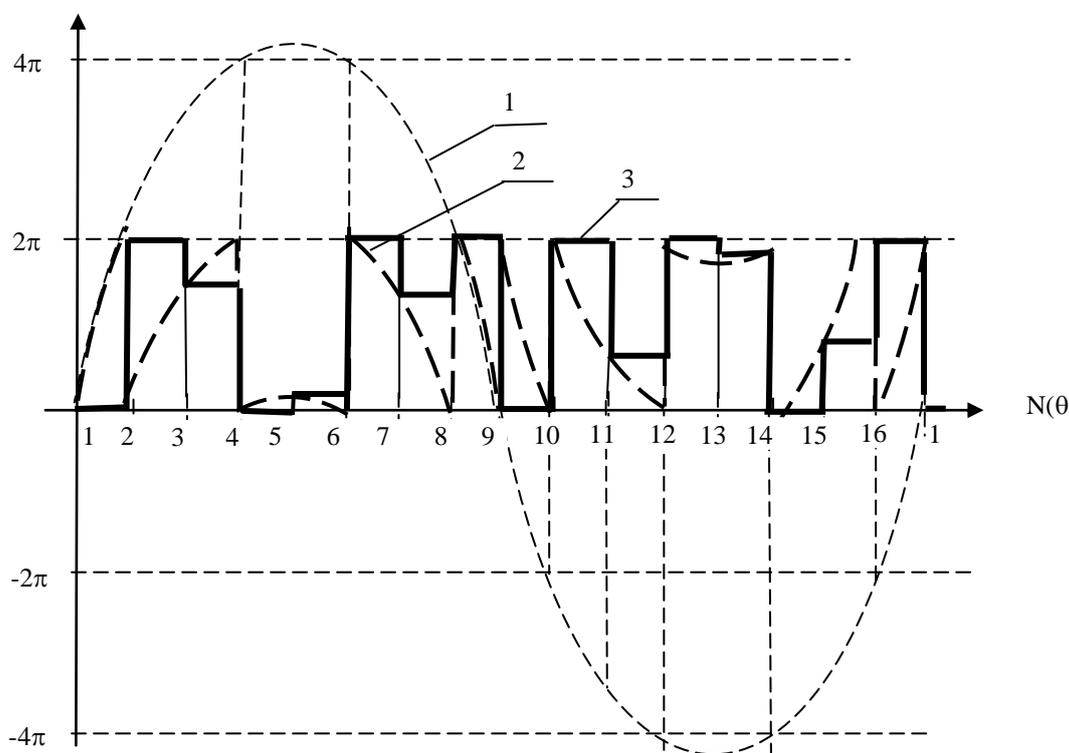


Рисунок 2 - К работе фазового детектора АРП

Кривая 1 соответствует действительному изменению разностей фаз между кольцевым и центральным вибраторами антенной системы при непрерывном вращении вибратора (девиация фазы $4,27\pi$).

Кривая 2 соответствует возникновению фазовой неоднозначности на выходе фазового детектора при непрерывном вращении антенны. Ступенча-

тая кривая 3 соответствует возникновению фазовой неоднозначности при дискретном переключении вибраторов.

Обычно, в АРП используются фазовые детекторы с прямолинейной характеристикой в диапазоне $(0...+2\pi)$. При этом, математически, процесс возникновения неоднозначности может быть описан следующим выражением:

$$\begin{cases} \varphi_k^- = \left\{ \frac{\varphi_k}{2\pi} \right\} & \text{при } \varphi_k > 0 \\ \varphi_k^- = 2\pi - \left\{ \frac{|\varphi_k|}{2\pi} \right\} & \text{при } \varphi_k < 0 \end{cases} \quad k=1, \dots, N \quad (3)$$

где: φ_k - действительная разность фаз между кольцевым и центральным вибраторами АС;

φ_k^- - разность фаз между кольцевым и центральным вибраторами АС с учетом неоднозначности.

В связи с изложенным, вместо действительных значений φ_k , имеем значения фазы с неоднозначностью φ_k^- .

Значения φ_k и φ_k^- связаны зависимостью (n -целое):

$$\bar{\varphi}_k = \varphi_k - 2\pi n, \text{ если } (2n - 1)\pi < \varphi_k < (2n + 1)\pi \quad (4)$$

для фазового детектора с рабочим диапазоном $(-\pi, \pi)$ и зависимостью:

$$\bar{\varphi}_k = \varphi_k - 2\pi n, \text{ если } 2\pi n < \varphi_k < 2(n + 1)\pi \quad (5)$$

для фазового детектора с рабочим диапазоном $(0, 2\pi)$.

Сказанное проясняется рисунком 3. Здесь, фазовый детектор для второго вибратора вместо разности фаз φ_{2-} выдаст значение φ_{2-} , вместо φ_{15} - значение φ_{15} , вместо $-\varphi_{11}$ значение $+\varphi_{11}$, а вместо $-\varphi_{12}$ выдаст $+\varphi_{12}$.

Для восстановления значений фаз $\bar{\varphi}_k$ необходимо произвести операцию

$$[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N] = [\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \dots, \bar{\varphi}_N] + 2\pi[n_1, n_2, \dots, n_N], \quad (6)$$

где $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$ - вектор действительных значений фаз, $[\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \dots, \bar{\varphi}_N]$ - вектор значений фаз, сформированных фазовым детектором;

$[n_1, n_2, \dots, n_N]$ - неизвестный вектор дополнений.

Задача разрешения неоднозначности сводится к нахождению вектора дополнений.

Элементы вектора дополнений имеют целочисленные значения и максимальные их абсолютные значения зависят от максимальной девиации фазы. Например, для $\psi = 4,2\pi$ составляющие вектора дополнений будут принимать значения из ряда $(-2; -1; 0; 1; 2)$.

Число возможных комбинаций значений вектора дополнений ограничено зависимостью, которой связаны его составляющие.

В общем случае он будет состоять из чередующегося ряда чисел, обра-

зующих симметричную ступенчатую функцию.

Предлагаемый метод разрешения неоднозначности основан на переборе всех возможных значений $[n_1, n_2, \dots, n_N]$.

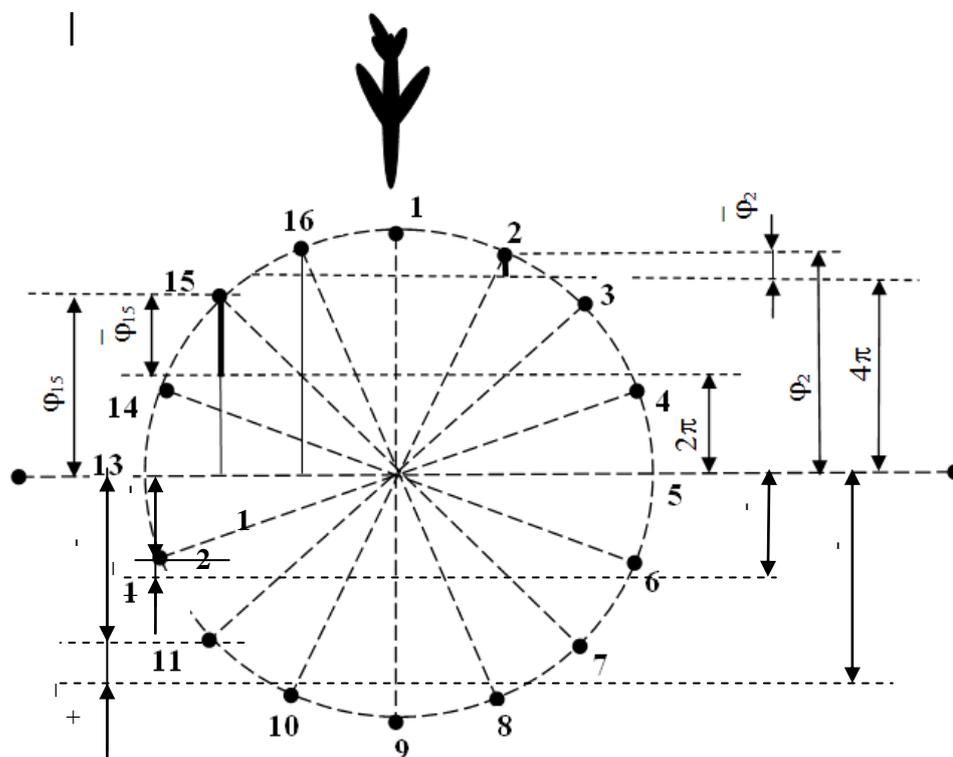


Рисунок 3 - Возникновение фазовой неоднозначности в кольцевой антенной решетке АРП

При этом в каждом из вариантов перебора по (6) находится вектор действительных значений фаз $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$, который проверялся на соответствие функциональной зависимости (1) по определенному критерию.

Путем смещения индексации элементов вектора дополнений и перебора различных ступенчатых структур обнаруживаются значения, которые обеспечивают восстановление по выражению (6). Всего для разрешения неоднозначности в памяти процессора необходимо хранить $M=m \cdot N$ вариантов векторов дополнений, где m – число различных возможных ступенчатых структур.

Если имеется M вариантов значений вектора дополнений, то имеем матрицу размером $N \cdot M$

$$D = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1N} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{M1} & n_{M2} & \dots & n_{MN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Соответственно, получим матрицу фаз размера

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdot & \varphi_{1N} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdot & \varphi_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \varphi_{M1} & \varphi_{M2} & \cdot & \varphi_{MN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

где элементы матрицы формируются по принципу

$$\varphi_{lk} = \bar{\varphi}_k + n_{lk}2\pi, \quad l = 1, 2 \dots M, \quad k = 1, 2 \dots N \quad (9)$$

Из (2) следует, что для N , кратных четырем (что имеет место на практике),

$$\varphi_{k+\frac{N}{4}} = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\beta \sin\left(\frac{2\pi(k-1)}{N} - \theta\right). \quad (10)$$

Принцип предлагаемого разрешения фазовой неоднозначности по значениям фаз на ортогональных вибраторах антенной системы заключается в том, что сумма квадратов фаз для любых двух ортогонально расположенных вибраторов (в которых разрешена фазовая неоднозначность) равна ψ^2 , т.е

$$\varphi_k^2 + \varphi_{k+\frac{N}{4}}^2 = \left(\frac{2\pi R}{\lambda} \cos\beta\right)^2 = \psi^2 \quad (11)$$

Реально равенство (11) не будет строгим из-за наличия шумов и фазовой неидентичности вибраторов кольцевой антенной решетки.

Тогда справедливо:

$$\varphi_k^2 + \varphi_{k+\frac{N}{4}}^2 = \psi_k^2, \quad \psi_k^2 = (\psi + \sigma_k)^2 \quad (12)$$

где σ_k – ошибка измерения, не превышающая наперед заданной величины.

Для расчета могут быть использованы любые две ортогонально расположенных вибратора антенной системы, причем номер k -го ортогонального i -му вибратору находится по выражению:

$$k = \left\{ \frac{i+N/4}{N} \right\} N \quad (13)$$

при этом, если $k=0$, то принимается значение $k=N$.

В идеальном случае, когда фазовые неидентичности вибраторов равны нулю и отсутствуют помехи, то для двух пар ортогонально расположенных вибраторов отношение значений ψ^2

$$\frac{\varphi_i^2 + \varphi_{i+\frac{N}{4}}^2}{\varphi_j^2 + \varphi_{j+\frac{N}{4}}^2} = \frac{(\psi \pm \delta_i)^2}{(\psi \pm \delta_j)^2} \quad (14)$$

должно быть равно 1. На практике из-за наличия помех это отношение не равно 1. Выражение (15)

$$\left| \frac{\psi^2 \pm \delta_i}{\psi^2 \pm \delta_i} - 1 \right| \leq U_0 \quad (15)$$

может быть использовано для оценки качества операции восстановления значений фаз вибраторов антенной системы.

Истинным значениям фаз будут соответствовать те значения из матрицы (8), для которых U_0 является минимальным.

Значение пеленга может быть найдено по восстановленным значениям фаз сигналов с вибраторов антенной системы по методу наименьших квадратов [3].

Для повышения точности пеленгования необходимо увеличить массив разностей фаз за счет использования информации со всех ортогонально расположенных исправных вибраторов, предварительно разрешив в них фазовую неоднозначность.

Это может быть сделано путем вычисления расчетных значений фаз вибраторов по выражению (2). После чего, взять кратные 2π значения с расчетных значений фаз и добавить к ним $\overline{\varphi_k}$.

Сказанное можно математически записать следующим образом:

$$\varphi_k = \left[\frac{\frac{2\pi R}{\lambda} \cos\beta \cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{N}\right) - \theta}{2\pi} \right] 2\pi + \overline{\varphi_k} \quad (16)$$

Таким образом, показана возможность обеспечения работоспособности широкодиапазонного АРП при нескольких неисправных вибраторах антенной системы.

Библиографический список:

1. Асланов Т.Г., Казибеков Р.Б., Тетакаев У.Р. Об одном методе обеспечения работоспособности фазовых автоматических радиопеленгаторов при неисправных вибраторах антенной решетки. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь, наука, инновации».г. Грозный, 10-12 ноября 2013.
2. Казибеков Р.Б. Обеспечение работоспособности фазовых автоматических радиопеленгаторов при неисправных вибраторах кольцевой антенной решетки. Электронный журнал «Молодежный научно-технический вестник», Эл No. ФС77-51038. <http://sntbul.bmstu.ru/doc/640424.html>.
3. Проектирование фазовых автоматических радиопеленгаторов. Саидов А.С., Тагилаев А.Р., Алиев Н.М., Асланов Г.К. – М.: Радио и связь, 1995 г.