

## 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  $\Omega$  по окружности радиусом  $R$ .

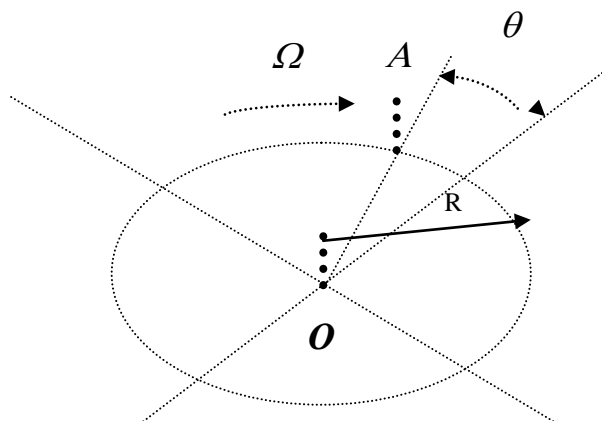


Рисунок 1 - К принципу работы доплеровских АРП

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  $\lambda$  – длина волны пеленгуемого сигнала.

$\beta$  - угол места на источник излучения;

$\theta$  - пеленг на источник излучения;

$\lambda$  - длина волны пеленгуемого сигнала;

$\Omega$  - 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  $768^\circ$ . 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, равного  $90^\circ$ , при использовании фазового детектора с линейной характеристикой в диапазоне  $0 \div 360^\circ$ , при угле места равном нулю.

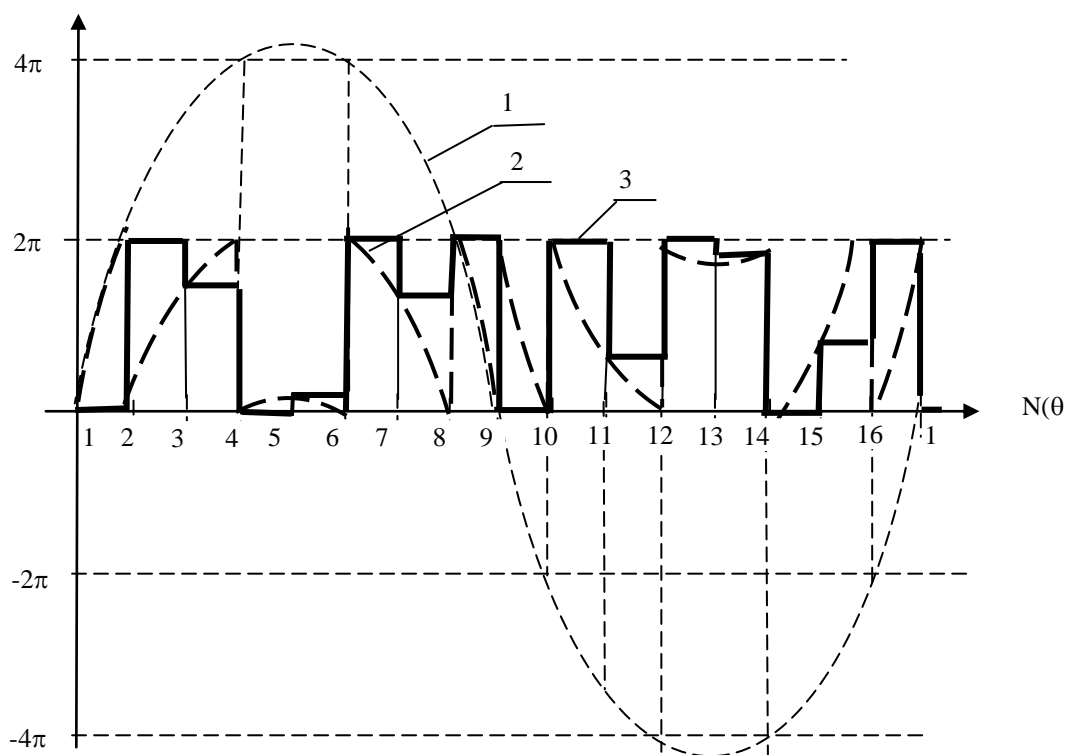


Рисунок 2 - К работе фазового детектора АРП

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  $(0 \dots +2\pi)$ . 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:  $\varphi_k$  - действительная разность фаз между кольцевым и центральным вибраторами АС;

$\varphi_k^-$  - разность фаз между кольцевым и центральным вибраторами АС с учетом неоднозначности.

В связи с изложенным, вместо действительных значений  $\varphi_k$ , имеем значения фазы с неоднозначностью  $\varphi_k^-$ .

Значения  $\varphi_k$  и  $\varphi_k^-$  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  $\varphi_{2-}$  выдаст значение  $\varphi_{2-}$ , вместо  $\varphi_{15}$  - значение  $\varphi_{15}$ , 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.

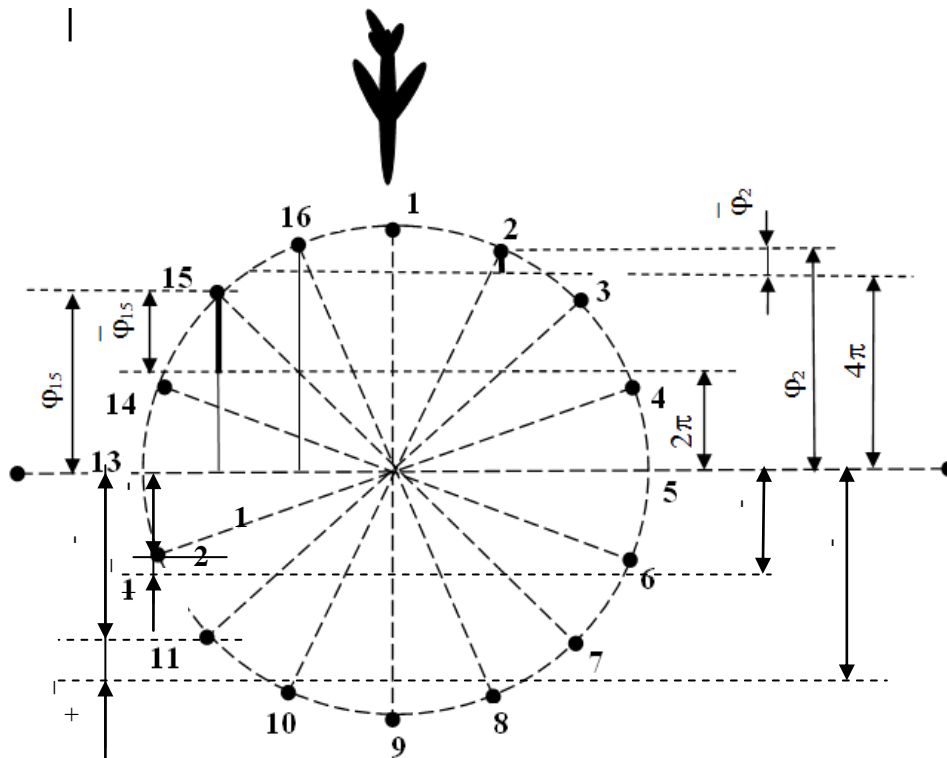
Элементы вектора дополнений имеют целочисленные значения и максимальные их абсолютные значения зависят от максимальной девиации фазы. Например, для  $\psi = 4,2\pi$  составляющие вектора дополнений будут принимать значения из ряда  $(-2; -1; 0; 1; 2)$ .

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  $\psi^2$ , 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  $\sigma_k$  – 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  $\psi^2$

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

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  $2\pi$  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.