

УДК 621.396.41

Угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток¹

Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
г. Томск, 634050, Российская Федерация
dvp15@sibmail.com, dvd012@mail.ru, erofeev_dv@mail.ru*

Получено: 24 июля 2020 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 16 октября 2020 г.

Аннотация: Показано, что угловое разрешение источников сигналов в фазовых пеленгаторах с антенными системами в виде линейных решеток из слабонаправленных элементов может быть получено путем определения для каждого из источников своего набора полных периодов разностей фаз, утраченных при измерениях. Показано, что метод максимального правдоподобия, развитый для оценки угла прихода одного сигнала, пригоден для углового разрешения сигналов. Показана общность оснований для углового разрешения методом максимального правдоподобия и методом «суммирования косинусоид». Даны оценки точности пеленгования принимаемых сигналов.

Ключевые слова: фазовый пеленгатор, устранение неоднозначности, метод «суммирования косинусоид», разрешающая способность.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В. Угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 2. С. 162—170.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Денисов, В. П. Угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток / В. П. Денисов, Д. В. Дубинин, Д. В. Ерофеев // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 162—170.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Angular resolution of phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays

V. P. Denisov, D. V. Dubinin, and D. V. Erofeev
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
Tomsk, 634050, Russian Federation
dvp15@sibmail.com, dvd012@mail.ru, erofeev_dv@mail.ru

Received: July 24, 2020

Peer-reviewed: September 13, 2020

Accepted: October 16, 2020

Abstract: *It is shown that the angular resolution of signal sources in phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays of weakly directed elements can be obtained by determining for each of its sources a set of complete periods of phase differences lost during measurements. It is shown that the maximum likelihood method developed to estimate the angle of arrival of a single signal is suitable for angular resolution of signals. The common grounds for angular resolution are shown by the maximum likelihood method and the “cosine summation” method. Estimates of the accuracy of direction finding of received signals.*

Keywords: *phase direction finder, elimination of ambiguity, method of “cosine summation”, resolution.*

For citation (IEEE): V. P. Denisov, D. V. Dubinin, and D. V. Erofeev, “Angular resolution of phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 162–170. (In Russ.).

1. Введение

Рассматривается угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов, то есть способность одновременно пеленговать два или более источника радиоизлучения. Фазовый пеленгатор понимается в традиционном смысле [1]. Предполагается, что элементы антенной системы слабонаправленные, так что могут одновременно принимать сигналы из широкого углового сектора. Фазовые пеленгаторы применяются в радиоастрономии, радионавигации [2], радиолокации, системах радиоэлектронной борьбы [3, 4].

В фазовых пеленгаторах с антенными системами из слабонаправленных элементов разрешение неоднозначности фазовых измерений производится путем применения ряда разнесенных антенн и последующей обработки совокупности измеренных разностей фаз. Схожесть терминов «угловое

разрешение» и «разрешение неоднозначности измерений» заставляет нас подчеркнуть, что предмет рассмотрения статьи — угловая разрешающая способность. Вопросы угловой разрешающей способности радиопеленгаторов с антенными решетками широко обсуждаются в литературе, причем акценты делаются на сверхразрешение [5]. Для реализации такой возможности приемные тракты должны быть линейными. В фазовых пеленгаторах линейность приемных трактов не требуется. Кроме того, фазовые пеленгаторы беспоисковые по углу. Указанные особенности приводят к их широкому применению в системах радиоэлектронной борьбы. Реально угловое разрешение проявляется в способности пеленгования сигналов, одновременно попадающих в полосу пропускания приемника.

2. Теория и моделирование

Предположим, что антенная система пеленгатора представляет собой линейную решетку из N элементов и на ней образовано $n = N - 1$ фазометрических баз, как показано на рис. 1. Если на входе пеленгатора одна плоская волна, а фазовые погрешности на базах независимы и имеют равные дисперсии σ_φ^2 , плотность распределения вероятностей совокупности n измеренных разностей фаз, которую далее будем рассматривать как функцию правдоподобия параметра $v = \sin \alpha$, имеет вид [6]

$$L_\varphi(v) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\varphi}} \right)^2 \cdot \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \frac{(\varphi_i + k_i - n_{xi}v)^2}{2\sigma_\varphi^2} \right\}, \quad (1)$$

где φ_i — измеренная разность фаз на базе l_i , выраженная в рад/ 2π , k — целое число периодов разности фаз, утраченное при измерениях, n — число фазометрических баз, $n_{xi} = l_i / \lambda$.

Решая уравнение правдоподобия, получаем [6]:

$$v = \sum_{i=1}^n q_i \Phi_i = \sum_{i=1}^n q_i (\varphi_i + 2\pi k_i), \quad (2)$$

где $v = \sin \alpha$ — направляющий косинус приходящей волны по отношению к оси x (рис. 1), Φ_i — полная разность фаз на базе l_i , $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ — вектор весов, зависящий от структуры антенной системы.

Предположим, что на антенную систему приходят сигналы от двух (или более) источников радиоизлучения (ИРИ). Они создают единую совокупность измеренных разностей фаз $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$. Вычисление направляющего косинуса каждой из волн возможно по формуле (2) за счет опре-

деления для каждой из них своего набора полных периодов разностей фаз на фазометрических базах k_1, k_2, \dots, k_n . Это положение является основой для рассматриваемого ниже алгоритма. Направляющие косинусы каждой из волн при таком походе определяются с некоторой ошибкой.

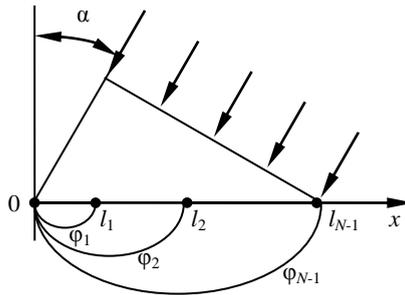


Рис. 1. Антенная система фазового радиопеленгатора.
 Fig. 1. Antenna system of phase direction finder

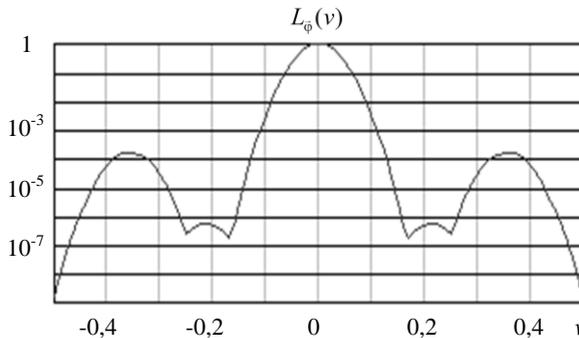


Рис. 2. Функции правдоподобия (4), $\vec{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$, $v_2 = 1/3$, $\gamma = 0$.
 Fig. 2. Likelihood function (4), $\vec{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$, $v_2 = 1/3$, $\gamma = 0$

Применим метод максимального правдоподобия к ситуации, когда на входе пеленгатора присутствует две плоские волны, так что разность фаз на базах определяется формулой [6]

$$\Phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} l_i v_1 + \operatorname{arctg} \frac{2R \sin \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] \cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] + R^2 \sin \left[\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}{1 + 2R \cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] \cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] + R^2 \cos \left[\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}, \quad (3)$$

где $v_1 = \sin \alpha_1$, α_1 — угол прихода первой волны, $v_2 = \sin \alpha_2$, α_2 — угол прихода второй волны, R — отношение амплитуд волн, γ — разность фаз приходящих волн на опорной антенне.

Запишем функцию правдоподобия направляющего косинуса более сильного сигнала v_1 , считая направляющий косинус второго сигнала, разность фаз сигналов γ и отношение амплитуд R фиксированными параметрами. Получим

$$L_{\Phi}(v_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{\Phi}^2} \cdot \sum_{i=1}^n (n_{xi} v_1 + \Delta\Phi_i - \Phi_i - [n_{xi} v_1 + \Delta\Phi_i - \Phi_i])^2 \right\}, \quad (4)$$

где $\Delta\Phi_i$ — второе слагаемое формулы (3), символ $[\bullet]$ означает округление до ближайшего целого.

На рис. 2 приведен пример расчета функции правдоподобия (4), выполненный для частного случая в среде MathCAD.

Видно, что графики имеют четкие экстремумы, соответствующие положению целей. В обоих случаях экстремумы значительно превышают боковые лепестки функции правдоподобия, сигналы разрешаются. Таким образом, метод максимального правдоподобия, оптимальный для оценки угла прихода единственного сигнала на входе пеленгатора, оказался работоспособным и для случая, когда сигналов два и способен их разрешать.

К сожалению, функция правдоподобия (4) зависит от разности фаз интерферирующих волн γ . Разрешение имеет место при $\gamma = 0$ и проблематично при других γ . Выходом из положения является усреднение функции правдоподобия по разности фаз γ , считая ее случайной величиной, равномерно распределенной на интервале $\pm \pi$. Моделирование показало, что в этом случае сигналы разрешаются, так же как при $\gamma = 0$. Предположение о равномерном распределении разности фаз соответствует разрешению некогерентных сигналов, что обычно рассматривается в теории [1].

Приведенные выкладки и графики показывают принципиальную возможность использования функции правдоподобия более сильного сигнала для углового разрешения. Однако достаточно быстродействующий алгоритм практической реализации такой возможности пока не разработан.

Покажем, что некоторые характеристики разрешения сигналов на основе функции правдоподобия близки к получаемым при обработке сигналов методом «суммирования косинусоид» [7]. Его разрешающая способность рассмотрена в статье [8], а пример практической реализации с учетом необходимости усреднения по разности начальных фаз γ — в монографии [6].

При наличии на входе пеленгатора одной волны пеленг находится по максимуму суммы

$$S_{\varphi}(v) = \sum_{i=1}^n A_0 \cos(2\pi \cdot n_{xi} v - \varphi_i), \quad (5)$$

где φ_i — разность фаз на i -й базе.

Функция правдоподобия $L_{\varphi}(v)$ и «сумма косинусоид» имеют одинаковую структуру. Действительно, если $\varphi_i = 0$, то с учетом неоднозначности фазовых измерений сомножители функции правдоподобия (1) выражаются формулой

$$y(v_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{\varphi}^2} (n_{xi} v_1 - [n_{xi} v_1])^2 \right\} \quad (6)$$

На рис. 3а показано изменение сомножителей в зависимости от v_1 , на рис. 3б — одно из гармонических слагаемых функции (5) соответствующего масштаба

$$S_1(v_1) = A_0 \cdot \cos(2\pi \cdot n_{x1} v_1). \quad (7)$$

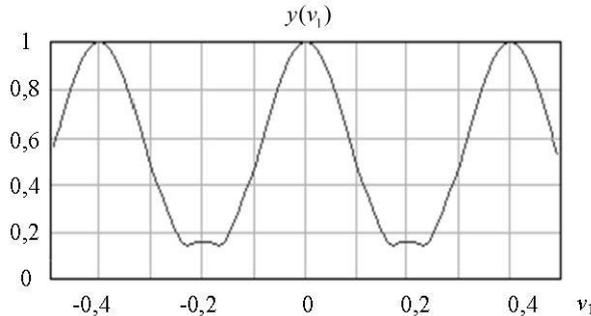
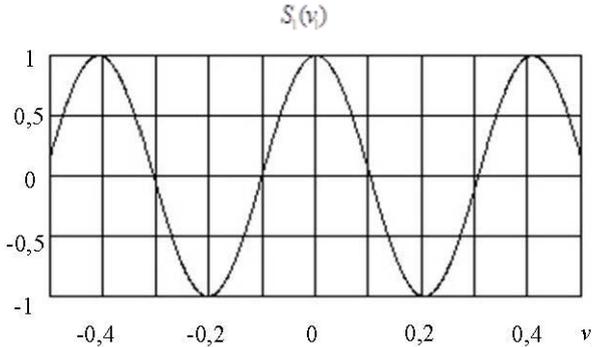


Рис. 3а. Один из сомножителей функции правдоподобия (7) $n_{x3} = 3$.

Fig. 3а. One of the factors of the likelihood function (7) $n_{x3} = 3$

Различие в области минимумов весьма значительно. Вместе с тем положение целей определяется по максимумам функций, которые формируются похожими компонентами и расположены в одних и тех же точках на оси v_1 .

Поэтому по данным, полученным с помощью «суммы косинусоид» можно судить о характеристиках разрешения методом максимального правдоподобия и точности пеленгования.

Рис. 3б. Одно из гармонических слагаемых функции (7) $n_{x3} = 3$.Fig. 3b. One of the harmonic terms of a function (7) $n_{x3} = 3$

В статье [9] показано, что если на входе пеленгатора два сигнала и $\gamma = 0$ «сумма косинусоид» представима в виде

$$S_{\varphi}(v) = \sum_{i=1}^n \frac{(1-R) [\cos[\pi x_i (v - v_1)] + R \cos[\pi x_i (v - v_2)]]}{\sqrt{B(i)}} \quad (8)$$

где

$$B(i) = 1 + R^4 + 4R^2 \cos^2[\pi x_i (v_2 - v_1) + \gamma] + 2R^2 \cos [2\pi x_i (v_2 - v_1)] + \\ 4(R^3 + R) \cdot \cos[\pi x_i (v_2 - v_1)] \cdot \cos[\pi x_i (v_2 - v_1) + \gamma] \\ v_1 = \sin \alpha_1, v_2 = \sin \alpha_2, \gamma = 0$$

Видно, что $S_{\varphi}(v)$ представляет собой сумму откликов пеленгатора на воздействия «сильной» и «слабой» целей, различающихся лишь параметром v_i . Если главный максимум отклика «слабой» цели расположен в точке максимума (минимума) «сильной», то его побочный максимум (минимум) совпадает с главным максимумом «сильной». Положение главных максимумов «сильной» и «слабой» целей при этом не изменяется. Ошибок пеленгования нет. Это положение имеет место и при пеленговании некогерентных сигналов по усредненному значению $S_{\varphi}(v)$.

На рис.4 показаны погрешности пеленгования «сильной» и «слабой» целей $v_{\text{изм}} - v_{\text{ист}}$ в зависимости от положения последней для одиннадцати-базового пеленгатора $\mathbf{n}_x = (1, 2, \dots, 11)$. Видно, что при расположении «слабой» цели в максимумах и минимумах кривой $S_{\varphi}(v)$ (10) погрешности пеленгования равны нулю. Они максимальны в середине интервала между ними и при этом не превышают 0,25 интервала однозначного пеленгования по самой большой базе пеленгатора [9].

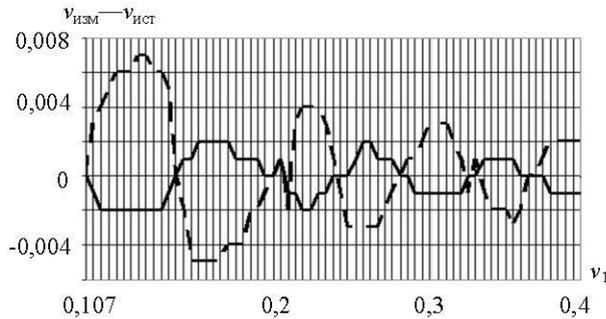


Рис. 4. Погрешности пеленгования целей:
—— «сильная»; - - - - «слабая».

Fig. 4. Target finding errors:
—— “strong” - - - - “weak”

3. Заключение

Основные результаты данной работы заключаются в следующем:

1. Показано, что при наличии на входе фазового радиопеленгатора с антенной системой в виде линейной решетки двух плоских волн их угловое разрешение возможно на основе сопоставления каждой из них своей совокупности полных разностей фаз, утраченных при измерениях. Таким образом, угловое разрешение в фазовых радиопеленгаторах тесно связано с устранением неоднозначности фазовых измерений.

2. Показано, что при наличии на входе пеленгатора двух плоских волн функция правдоподобия более сильного из них может использоваться для углового разрешения. Если волны не когерентны, требуется усреднение функции правдоподобия по разности фаз принимаемых волн.

3. Проведен сравнительный анализ углового разрешения на основе функции правдоподобия и методом «суммирования косинусоид». В основе каждого из алгоритмов лежат похожие функции, поэтому относительно просто реализуемый метод «суммирования косинусоид» можно использовать для оценки характеристик разрешения методом максимального правдоподобия.

4. Оценена точность пеленгования более «слабой» цели, которая, как известно, в нелинейной системе давится более сильной. Показано, что в эквидистантных решетках максимальная ошибка пеленгования не превосходит 1/4 интервала однозначного пеленгования по самой большой фазометрической базе.

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

Список литературы

1. Дулевич В. Е., Коростелева А. А., Клюев Н. Ф., Мельник Ю. А. и др. Теоретические основы радиолокации : Учебн. пособие для вузов. 2-е изд. М. : Сов. радио, 1978. 608 с.
2. Фатеев Ю. Л. Определение пространственной ориентации объектов по сигналам радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Исследовано в России. 2004. № 70. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.ru/articles/2004/071.pdf> (дата обращения 10.04.20).
3. Смирнов Ю. А. Радиотехническая разведка. М. : Военное издательство, 2006. 454 с.
4. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М. : Вузовская книга, 2011. 800 с.
5. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М. : Радио и связь, 2003. 200 с.
6. Денисов В. П., Дубинин Д. В. Фазовые радиопеленгаторы. Томск : ТУСУР, 2002. 251 с.
7. Белов В. И. Теория фазовых измерительных систем. Томск: ТУСУР, 1994. 102 с.
8. Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В. Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20, № 4. С. 11—16.
9. Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В. Анализ разрешающей способности обзорных фазовых радиопеленгаторов // Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23, № 1. С. 7—13.

Информация об авторах

Денисов Вадим Прокопьевич, д-р техн. наук, профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа, г. Томск, Российская Федерация.

Дубинин Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа, г. Томск, Российская Федерация.

Ерофеев Денис Вадимович, аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа, г. Томск, Российская Федерация.

Information about the authors

Denisov Vadim Prokopyevich, dr. sciences, professor of the dept radio engineering systems of TUSUR, Tomsk, Russian Federation.

Dmitry Dubinin, cand. tech. sciences, associate professor of the dept radio electronics and information protection of TUSUR, Tomsk, Russian Federation.

Erofeev Denis Vadimovich, postgraduate student of the dept. of radio engineering systems of TUSUR, Tomsk, Russian Federation.