

Способ оценивания пеленгов на источники радиоизлучений в условиях интерференции

Evaluation method of bearing angles in relation to the radio signal sources under interference conditions

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Викторович

(practicdsv@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи

имени Маршала Советского Союза

С. М. Буденного» МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного),

профессор кафедры.

г. Санкт-Петербург

Симонов / Simonov A.

Алексей Николаевич

(simonovalexey2010@yandex.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ВАС им. С. М. Буденного.

г. Санкт-Петербург

Конюховский / Konyukhovskiy V.

Владимир Самуилович

(konyukhovskiy@yandex.ru)

кандидат физико-математических наук,

доцент.

ВАС им. С. М. Буденного.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: оценивание пеленгов – bearing angle evaluation; амплитудное пеленгование – amplitude bearing; интерферирующие радиоизлучения – interfering radio emissions.

В статье приведены результаты постановки и решения задачи оценивания пеленгов на два интерферирующих радиоизлучения. Кратко описаны основы построения и функционирования классического амплитудного пеленгатора. Рассмотрены условия, при которых возникает возможность одновременного визуального пеленгования нескольких радиоизлучений. Сформулирована задача автоматического оценивания пеленгов и раскрыты физические основы возможности ее решения. Приведены аналитические выражения для расчета пеленгов. Сделаны выводы о перспективах использования разработанного способа оценивания пеленгов на интерферирующие радиоизлучения.

The article presents the results of the formulation and solution of the problem of evaluation bearing angles for two interfering radio emissions. The fundamentals of construction and performance of the classical amplitude bearing finder are summarized. The conditions under which there is a possibility of simultaneous visual bearing of several radio emissions are considered. The problem of automatic bearing angle evaluation is formulated and the physical fundamentals of its solution are revealed. The analytical expressions for calculating the bearing angles are given. Conclusions are made about the prospects of using the developed method of evaluating bearing angles in relation to interfering radio emissions.

В настоящее время различные методы координатометрии находят самое активное применение в различных областях радиотехники [1–5]. Однако наибольшее распространение из них получили угломерный, угломерно-дальномерный и разностно-дальномерный способы определения координат источника радиоизлучений (ИРИ) [6–10], методология которых основана на измерении пеленгов на ИРИ и последующей оценке полученных результатов.

Основные положения теории координатометрии в достаточной степени проработаны, что позволяет на их основе создавать эффективные измерители [11–13].

Первоначально в классических пеленгаторах, построенных на аналоговых устройствах, задача пеленгования решалась на основе измерения отметки пеленга на визуальных экранах приемоиндикаторных устройств [6]. Однако бурное развитие технологий цифровой обработки позволило создавать принципиально новые алгоритмы, эффективность которых во многом определяется возможностями положенного в их основу научно-методического аппарата (НМА) [1].

С учетом указанных обстоятельств, в настоящей статье рассматривается аналитический способ оценивания пеленгов на два интерферирующих радиоизлучения.

В общем случае, классический амплитудный пеленгатор строится по схеме Эдкока (рис. 1), в которой пеленг формируется на основе сравнении разностных элек-

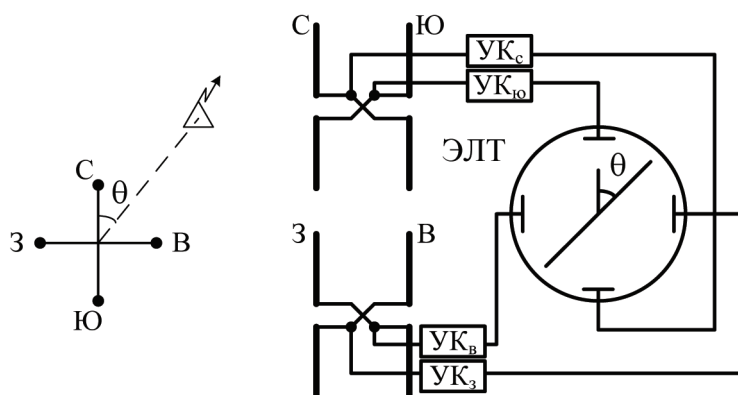


Рис. 1. Реализация метода сравнения на основе ППА

тродвижущих сил (ЭДС), наведенных в ортогональных пеленгационных парах антенн (ППА) [4, 5].

Информацию о направлении на ИРИ получают по результатам решения амплитудных уравнений двух ортогональных узкобазисных ППА, ориентированных по сторонам света. В результате сравнения амплитудных значений разностных ЭДС как отношение $E_{m\Delta_{зв}}$ к $E_{m\Delta_{сю}}$ получают [1]:

$$\frac{E_{m\Delta_{зв}}}{E_{m\Delta_{сю}}} = \frac{E_{m\max} \sin \theta \cos \beta}{E_{m\max} \cos \theta \cos \beta} = \operatorname{tg} \theta, \quad (1)$$

т. е.

$$\theta = \arctg \left(\frac{E_{m\Delta_{зв}}}{E_{m\Delta_{сю}}} \right), \quad (2)$$

где $E_{m\Delta_{зв}}$, $E_{m\Delta_{сю}}$ – амплитуды разностных ЭДС, наведенных в ППА "запад – восток" и "север – юг" соответственно; $E_{m\max} = 2E_m kb$ – максимальное значение амплитуд разностных ЭДС; E_m – амплитуда ЭДС в антенном элементе; $k = 2\pi/\lambda$ – волновой множитель; b – половина базы антенной системы; θ , β – азимут и угол места на ИРИ соответственно.

В результате, в классическом амплитудном пеленгаторе сигналы с каждого антенного элемента (после усиления в усилительных каналах УКс, УКю, УКз, УКв) объединяются для получения разностного значения, определяемого выражением (1), за счет особого порядка подключения ППА к устройству индикации пеленга, в качестве которого используется электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) [6].

Разностные ЭДС с ППА "север – юг" и "запад – восток" подаются соответственно на вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины ЭЛТ, которая по-мимо индикации выполняет и роль устройства для определения (вычисления) функции $\arctg$. В результате указанных операций на экране ЭЛТ положение светящейся линии соответствует азимуту на ИРИ.

Таким образом, выражения (1), (2) представляют аналитическую основу для реализации способа пеленгования одного ИРИ.

Однако на практике задачу пеленгования приходится решать в достаточно сложной сигнально-помеховой обстановке, когда на вход приемоиндикаторного устройства поступает аддитивно-мультипликативная смесь сигналов различных ИРИ, шумов и помех. В таких условиях метод пеленгования, строго базирующийся на аналитические выражения (1) и (2), не позволит получить приемлемые результаты.

Вместе с тем еще в [4, 6] было сделано предположение о принципиальной возможности одновременного пеленгования нескольких ИРИ, частоты которых находятся в полосе пропускания приемных каналов приемного устройства пеленгатора.

Для получения НМА реализации такого подхода рассмотрим следующую ситуацию.

Допустим, что в полосу пропускания ($2\Delta\omega_n$) приемных каналов пеленгатора (см. рис. 1) попадают два синусоидальных колебания, соизмеримых по амплитуде и с частотами ω_1 и ω_2 , причем

$$\omega_2 - \omega_1 = \Omega < 2\Delta\omega_n \text{ и } \frac{|\omega_2 - \omega_1|}{\omega} \ll 1,$$

где

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}.$$

Тогда суммарные напряжения на выходе вертикального и горизонтального каналов будут равны:

$$\begin{aligned} u_v(t) &= U_{mv1} \sin \omega_1 t + U_{mv2} \sin \omega_2 t, \\ u_r(t) &= U_{mr1} \sin \omega_1 t + U_{mr2} \sin \omega_2 t, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} U_{mv1} &= U_{m1} \cos \theta_1, \quad U_{mr1} = U_{m1} \sin \theta_1, \\ U_{mv2} &= U_{m2} \cos \theta_2, \quad U_{mr2} = U_{m2} \sin \theta_2, \quad \theta_1 \neq \theta_2. \end{aligned}$$

В рассмотренной ситуации напряжения двух сигналов в каждом канале могут быть представлены как биения в виде колебаний одной частоты ω_1 , но с переменными

во времени (с частотой Ω) амплитудой и фазой. Тогда отклонение луча на экране ЭЛТ по осям Oy и Ox будет описываться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} y &= kU_b(t) \sin \omega_1 t, \\ x &= kU_r(t) \sin(\omega_1 t - \Phi(t)), \end{aligned} \quad (4)$$

где $U_b(t)$, $U_r(t)$ – огибающая сигнала биений в вертикальном и горизонтальном канале соответственно; $\Phi(t) = \Phi_r(t) - \Phi_b(t)$; $\Phi_b(t)$, $\Phi_r(t)$ – медленно изменяющаяся начальная фаза высокочастотного заполнения в вертикальном и горизонтальном канале соответственно.

Очевидно, что при наличии двух колебаний с близкими частотами, результирующее движение луча в координатах xOy будет описываться уравнением спирали с непрерывно изменяющимися во времени конфигурацией и наклоном звеньев [1, 3].

При этом каждое звено спирали представляет собой фигуру, близкую к эллипсу, частота изменения формы и наклона большой оси которого равна $\Omega = \omega_2 - \omega_1$ ($\Omega = 2\pi F$, $F = f_2 - f_1$). Огибающая спирали будет представлять собой параллелограмм со сторонами – линиями пеленгов на первый и второй ИРИ (рис. 2,а).

Для доказательства указанного утверждения (свойства результирующего сигнала, проявляемого на ЭЛТ в виде спирали) исследуем параметры линии, являющейся огибающей семейства кривых (4) [14].

Искомый результат является совместным решением систем уравнений:

$$\begin{cases} y(x, \Omega t) = 0 & \text{и} & \frac{\partial y(x, \Omega t)}{\partial(\Omega t)} = 0, \\ x(y, \Omega t) = 0 & \text{и} & \frac{\partial x(y, \Omega t)}{\partial(\Omega t)} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

К сожалению, строгое аналитическое решение рассмотренной задачи невозможно, поскольку система уравнений (5) в общем виде не разрешается.

Однако это не является препятствием для его решения на основе визуализации результатов пеленгования, поскольку отсчет пеленгов производится с помощью поворотного визира, имеющего кроме центральной линии отсчета ряд параллельных ей линий, которые совмещаются со сторонами параллелограмма (см. рис. 2,б).

Отмеченное свойство определим как визуальную избирательность амплитудного пеленгатора. Оно является весьма ценным для практики и дает возможность использовать двухканальный радиопеленгатор для пеленгования интерферирующих радиоизлучений, которые невозможно разделить с помощью методов частотной избирательности.

Визуальный отсчет пеленга с помощью поворотного визира обладает большой наглядностью и за счет эвристических особенностей человека может разрешать наиболее сложные ситуации. Однако для автоматизированной обработки необходимо формализованное математическое решение задачи оценивания пеленгов на несколько ИРИ в условиях их интерференции.

Один из возможных подходов базируется на представлении движения луча на экране индикатора ЭЛТ в полярной системе координат.

Идея основана на том, что каждая точка огибающей семейства кривых, т. е. линии, являющейся стороной параллелограмма $ABCD$, в который вписана спираль (4), является при этом для фиксированного угла самой удаленной от центра изображения (центра индикатора) точкой самой спирали (рис. 3).

Каждая точка M линии на экране индикатора представлена в декартовой системе координатами (x, y) , которые соответствуют мгновенным значениям

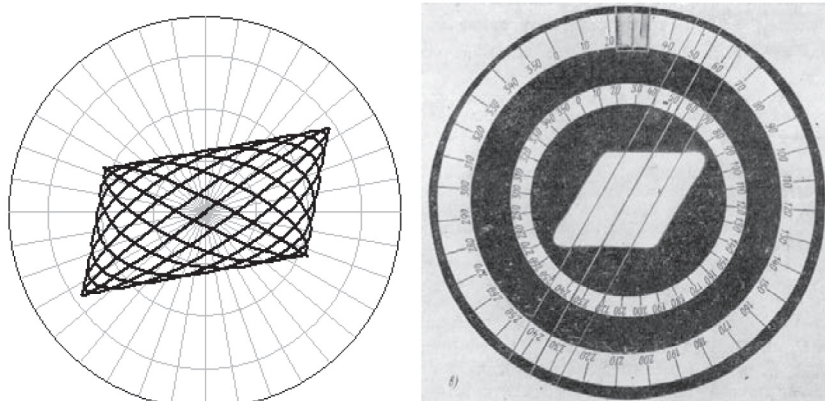


Рис. 2. Изображение на экране индикатора:
а – при двухсигнальном воздействии $\theta_1 = 10^\circ$, $\theta_2 = 80^\circ$;
б – поворотный визир для отсчета пеленгов

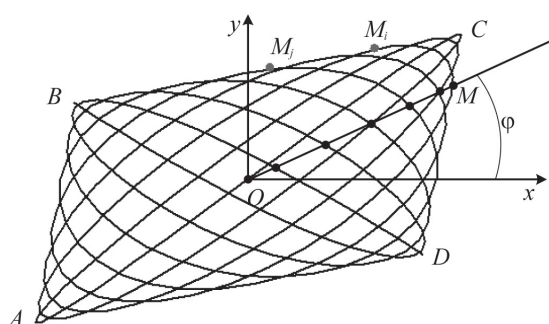


Рис. 3. Принцип оценивания пеленга для способа визуальной избирательности

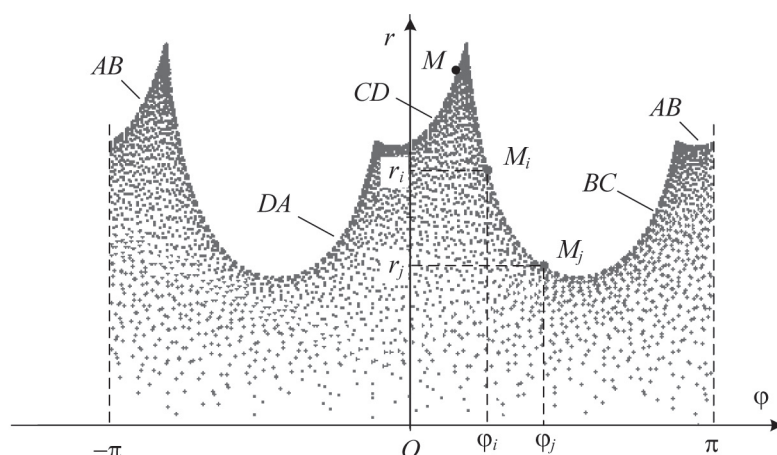


Рис. 4. Графическое представление массива данных

напряжений в каналах пеленгатора:

$$\begin{aligned} x &= u_r(t), \\ y &= u_\phi(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку декартова система координат может быть легко преобразована в полярную, точке M будут соответствовать координаты (r, ϕ) :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \phi = \arctg \frac{y}{x}. \quad (7)$$

После такого преобразования появляется возможность поиска для каждого угла ϕ максимального удаления r , которое и будет соответствовать искомой точке, находящейся на стороне параллелограмма (см. рис. 3). Такой поиск может быть текущим, т. е. при изменении во времени текущих координат (r, ϕ) при каждом повторяющемся ϕ сохраняется значение r , если оно превышает предыдущие значения, полученные при этом ϕ . Однако более рациональным решением видится проведение отложенного поиска. При таком поиске текущие значения координат точек сохраняются в массив данных, который затем обрабатывается.

Для раскрытия физической сущности предложенного способа, полученный массив целесообразно

представить на графике (рис. 4), на котором удобно иллюстрировать как положение точки M , так и сторон параллелограмма $ABCD$.

Тогда для оценивания азимутов достаточно для каждого ИРИ только лишь выбрать пару точек из выделенных на этапе поиска и расположенных на соответствующей стороне параллелограмма, а затем оценить угол наклона прямой, проходящей через них.

Например, для нахождения азимута на первый источник радиоизлучения можно выбрать соответствующую ему сторону BC (или DA) (см. рис. 2, 3), для которой, выделив две произвольные точки $M_i = (r_i, \phi_i)$ и $M_j = (r_j, \phi_j)$, рассчитать угол ее наклона, используя выражение

$$\theta_1 = \arctg \frac{r_i \sin \phi_i - r_j \sin \phi_j}{r_i \cos \phi_i - r_j \cos \phi_j}. \quad (8)$$

Аналогичным образом рассчитывается азимут на второй ИРИ, только для него необходимо выбирать точки, находящиеся на сторонах AB или CD .

Даже приближенные вычисления показывают различия между фазовыми значениями ϕ_i и ϕ_j порядка $\pi/6$. При этом различие значения r_i , относительно r_j составит около 40%.

Выбор самих точек в пределах соответствующей стороны может быть произволен, однако более удаленные друг от друга точки будут обеспечивать большую точность, максимальная точность оценивания будет обеспечиваться при выборе вершин параллелограмма.

Разработанный способ оценивания пеленгов на источники радиоизлучений в условиях интерференции является алгебраически-статистическим решением задачи расчета азимутов на ИРИ. Одним из его достоинств является то, что он не требует визуальных индикаторов для снятия измерений, легко формализуется и поэтому может быть успешно реализован на любых устройствах цифровой обработки сигналов.

Заметим, что разработка представленного способа не означает завершения изучения особенностей пеленгования интерферирующих радиоизлучений. Направлениями дальнейших исследований могут стать вопросы нахождения условий, при которых обеспечивается состоятельность и эффективность оценок пеленгов, влияния параметров самих радиоизлучений на точность пеленгования, оценивание ошибок пеленгования в различных условиях.

Кроме того, интересным видится применение разработанного подхода для вторичной обработки методов совместного представления энергии обрабатываемой выборки на частотно-временной или частотно-пеленговой плоскости [15].

Литература

1. Симонов, А. Н. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников радиоизлучений: Учебное пособие / А.Н. Симонов, Р.В. Волков, С.В. Дворников. – СПб.: ВАС, 2017. – 248 с.
2. Белоцерковский, Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства: Учебник для техникумов / Г.Б. Белоцерковский. – М.: Радио и связь, 1975. – 336 с.
3. Дворников, С. В. Способ позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе поляризационно-адаптивной обработки радиосигналов от реперных станций / С.В. Дворников, А.Н. Симонов, С.В. Богдановский // Телекоммуникации. – 2017. – № 8. – С. 36–42.
4. Мезин, В. К. Автоматические радиопеленгаторы / В.К. Мезин. – М.: Сов. радио, 1969. – 216 с.
5. Оценка влияния свойств сигнала PRS LTE на точность позиционирования / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2017. – № 4. – С. 94–103.
5. Demmel, F. Practical Aspects of Design and Application of Direction-Finding Systems / F. Demmel // Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation / T. Tuncer ; ed. by B. Friedlander. – Elsevier Inc, 2009.
6. Кукес, И. С. Основы радиопеленгации / И.С. Кукес, М.Е. Старик. – М.: Сов. радио, 1964. – 640 с.
7. Дворников, С. В. Теоретические основы координатометрии источников радиоизлучений / С.В. Дворников, В.Н. Саяпин, А.Н. Симонов. – СПб.: ВАС, 2007. – 80 с.
8. Волков, Р. В. Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений / Р.В. Волков. – СПб.: ВАС, 2013. – 116 с.
9. Симонов, А. Н. Пространственно-поляризационная модель источника радио-излучения на основе математики кватернионов / А.Н. Симонов, С.В. Богдановский // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 5. – С. 60–64.
10. Основы построения и функционирования угломерно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений / под ред. С.В. Дворникова. – СПб.: ВАС, 2008. – 104 с.
11. Schmidt, R. O. A Signal Subspace Approach to Multiple Emitter Location and Spectral Estimation : Dissertation / R.O. Schmidt. – Stanford University, 1981, Nov.
12. Horing, H. C. Zur Empfindlichkeitssteigerung automatischer Großbasis-Doppler-Peiler durch Einsatz eines Summationsverfahrens vor der Demodulation : Dissertation / H.C. Horing. – TU Munchen, 1970.
13. Исследование зависимости геометрического фактора топологии для разностно-дальномерного метода позиционирования / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2017. – № 2. – С. 86–93.
14. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с.
15. Дворников, С. В. Модификация частотно-временных описаний нестационарных процессов на основе показательных и степенных функций / С.В. Дворников, А.М. Сауков // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14, № 3. – С. 76–85.