

Определение амплитуды, азимутальных и угломестных пеленгов и начальной фазы радиоизлучателя

© А.А. Грешилов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Содержание статьи относится к радиотехнике, в частности к радиопеленгации. Описан способ существенного повышения скорости и точности определения азимутальных и угломестных составляющих пеленгов и амплитуды сигналов при приеме радиосигналов одного источника радиоизлучения с использованием нелинейных (в том числе кольцевых) антенных систем (АС), состоящих из слабонаправленных элементов (вibratorов). Повышения точности и скорости определения пеленгов достигают за счет использования особенностей нелинейных АС, позволяющих устранить влияние на значения пеленгов неучтенной начальной фазы, и путем сведения алгоритма определения параметров сигнала к прямому расчету по элементарным формулам.

В работе исследована математическая модель определения амплитуды сигнала, азимутальных и угломестных пеленгов источника радиоизлучения и начальной фазы сигнала, которая включает в себя разделение произвольной нелинейной АС на логические части таким образом, чтобы не менее трех vibratorов находилось под разными углами к направлению отсчета. Измеренные комплексные амплитуды сигналов с выхода каждого элемента АС поступают в блок вычисления натуральных логарифмов, затем в вычислитель, куда вводятся аналитические выражения натурального логарифма от функции, описывающей комплексную огибающую выходов элементов АС. Действительные и мнимые части этой функции приравниваются действительным и мнимым частям натурального логарифма измеренных комплексных амплитуд сигналов, полученных с выхода каждого элемента АС. Из получаемой системы алгебраических уравнений определяют аналитические выражения для вычисления азимутального и угломестного пеленгов, а также начальной фазы сигнала.

Ключевые слова: пеленг, антенные системы, итерационный процесс, обратная матрица.

В процессе мониторинга радиоэлектронной обстановки имеет место пеленгация источников радиоизлучения (ИРИ), при которой необходимо определять азимутальные, угломестные пеленги ИРИ и амплитуду сигнала. Пеленгатор регистрирует излучение путем записи сигналов на элементах антенной системы (vibratorах). Выполняя различные действия над сигналами с vibratorов, определяют параметры излучения. Проблема заключается в выявлении того, какие действия над сигналами окажутся эффективнее в данном случае.

Задача радиопеленгации является *некорректной*. Большинство методов многосигнальной пеленгации на одной частоте, описанных в литературе, опирается на статистические методы проверки гипотез, на метод максимума правдоподобия, на сверхразрешающие методы

(например MUSIC) и др. [1–11]. Однако задача пеленгации ИРИ как *некорректная* задача не может быть надежно решена ни статистическими методами, достоверность результата которых определяется точностью полученных оценок параметров сигналов, ни методом наименьших квадратов в силу нелинейности и плохой обусловленности решаемой системы уравнений, ни сверхразрешающими методами, которые дают приемлемые результаты лишь при высоких соотношениях сигнал/шум и не обеспечивают разрешение ИРИ, имеющих близкие по значениям пеленги.

В традиционных подходах исследуют корреляционную матрицу и диаграмму направленности (ДН). При этом для определения азимутальных θ и угломестных пеленгов β ИРИ используется двумерная сетка по θ и β . Начальная фаза сигнала φ_0 , как правило, не учитывается (иначе пришлось бы вводить третью сетку по φ_0). Следует отметить, что коэффициент корреляции как момент второго порядка имеет большие доверительные интервалы. Поэтому интервальная оценка найденных значений пеленгов будет большой. В практических приложениях обычно интервальные оценки не исследуют.

Метод определения пеленгов ИРИ, приведенный в [1, 4], принят за прототип. В данном методе применяется только одна сетка, по которой определяют произведение $\cos(\theta - \gamma) \cos \beta$, где γ — угол между вибратором и направлением отсчета. Нелинейная АС здесь логически разделяется на две части таким образом, чтобы линии отсчета азимутальных пеленгов каждой из частей не были параллельны друг другу (системы координат, связанные с каждой из частей, были развернуты относительно друг друга). В каждой из частей выбирают опорный элемент (элемент, относительно которого проводят измерение набегов фаз на остальных элементах части АС). Одни и те же элементы АС могут входить в обе выделенные части одновременно. Любым методом, например, с помощью поиска максимумов квадрата модуля одномерного углового спектра, полученного посредством одномерного преобразования Фурье, вычисляют произведение косинусов азимутального и угломестного пеленгов для каждого ИРИ в системах координат, связанных с первой и второй логическими частями АС (в аналитическое выражение комплексной амплитуды сигнала на m -м элементе АС азимутальные и угломестные пеленги входят в качестве произведения их косинусов). Вычисления проводятся на основе набегов фаз на элементах АС относительно соответствующих опорных вибраторов.

Азимутальные пеленги всех ИРИ, которые измерены в системах координат, связанных с различными логическими частями АС, отличаются на величину угла γ между соответствующими линиями отсче-

та пеленгов. Обозначим P_1 величину произведения косинусов азимутального и угломестного пеленгов k -го ИРИ, $k = 1, 2, \dots, K$, где K — количество ИРИ, полученных в системе координат, которая связана с первой логической частью АС. Величину аналогичного произведения, полученного в системе координат, которая связана со второй логической частью АС, обозначим P_2 .

Для вычисления азимутального и угломестного пеленгов k -го ИРИ в [1] получают следующие формулы:

$$\theta_k = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{P_2 - P_1 \cos \gamma}{P_1 \sin \gamma} \right\};$$
$$\beta_k = \arccos \left\{ \frac{P_1}{\cos \theta_k} \right\}.$$

И этот способ имеет следующие недостатки:

1) в расчетах не учитывается начальная фаза сигнала φ_0 , которая влияет на набег фаз, из которых и определяются пеленги. Поэтому искажаются значения пеленгов. В большинстве случаев фаза сигнала φ_0 не равна нулю;

2) высокая вычислительная сложность, обусловленная необходимостью введения одномерной сетки и вычисления одномерного преобразования Фурье, а как следствие, — временные затраты;

3) нелинейная АС логически разделяется на две части таким образом, чтобы линии отсчета азимутальных пеленгов каждой из частей не были параллельны друг другу (системы координат, связанные с каждой из частей, развернуты одна относительно другой).

В действительности следует разделить АС не менее чем на три части, чтобы исключить влияние начальной фазы φ_0 . Например, в угловой АС надо иметь не менее трех направлений, выходящих из одного центра под разными углами. Чем больше частей, тем точнее будут результаты.

В предлагаемом в настоящей работе способе сигналы рассматриваются как детерминированные (подверженные аддитивной помехе), оценки параметров которых подлежат определению.

Поясним предлагаемый алгоритм на примере круговой АС.

1. В круговой АС каждый элемент смещен на некоторый угол относительно другого элемента, т.е. круговая АС автоматически разделена на число областей, равное числу вибраторов. Восстанавливаем вектор комплексных амплитуд сигналов $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_M]^T$, полученных с выхода каждого элемента АС.

Вектор y восстанавливаем единожды для всей АС, когда проводим одно физическое измерение.

2. Запишем нелинейную систему уравнений, правая часть которой является аналитическим выражением комплексной амплитуды сигнала на m -м элементе АС, комплексной огибающей выходов элементов круговой АС:

$$y_m(\theta, \beta, t) = u \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 t + \varphi_0 + (2\pi/\lambda) R \cos(\theta - \gamma_m) \cos\beta \right] \right\}, \quad (1)$$

где $m = 1, \dots, n$; j — мнимая единица, $j = \sqrt{-1}$; θ — азимутальный пеленг; β — угломестный пеленг; γ_m — угол между m -м вибратором и направлением отсчета; f_0 — частота сигналов, излучаемых пеленгуемыми ИРИ; u — амплитуда сигнала; φ_0 — начальная фаза сигнала; t — время, в данном случае его можно положить равным нулю; λ — длина волны сигналов ИРИ; R — радиус антенной системы.

3. Запишем натуральный логарифм выражения (1):

$$\ln |y_m| + j \arg y_m = \ln u + j \left(2\pi \frac{R}{\lambda} \cos(\theta - \gamma_m) \cos\beta + \varphi_0 \right). \quad (2)$$

Обозначим $\arg y_m = P_m$ и приравняем, соответственно, действительные и мнимые части. Действительные части $u = |y_m|$, амплитуду u определили.

Приравниваем мнимые части:

$$P_m = 2\pi \frac{R}{\lambda} \cos(\theta - \gamma_m) \cos\beta + \varphi_0$$

или

$$P_m = \cos(\theta - \gamma_m) \cos\beta + \widehat{\varphi}_0, \quad m = 1, \dots, n,$$

где $p_m = \frac{P_m \lambda}{2\pi R}$; $\widehat{\varphi}_0 = \frac{\varphi_0 \lambda}{2\pi R}$; $\gamma_1 = 0$ — начало отсчета.

4. Составим систему уравнений для пеленгов θ , β и начальной фазы сигнала $\widehat{\varphi}_0$:

$$\begin{aligned} \cos\theta \cos\beta + \widehat{\varphi}_0 &= p_1; \\ \cos(\theta - \gamma_2) \cos\beta + \widehat{\varphi}_0 &= p_2; \\ \cos(\theta - \gamma_n) \cos\beta + \widehat{\varphi}_0 &= p_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Решить систему (3) можно разными методами. Приведем следующий. Переносим $\widehat{\varphi}_0$ вправо, делим все уравнения на первое. Получаем новую систему уравнений:

$$\sin \gamma_2 \operatorname{tg} \theta (p_1 - \widehat{\varphi}_0) + (1 - \cos \gamma_2) \widehat{\varphi}_0 = p_2 - p_1 \cos \gamma_2;$$

$$\sin \gamma_3 \operatorname{tg} \theta (p_1 - \widehat{\varphi}_0) + (1 - \cos \gamma_3) \widehat{\varphi}_0 = p_3 - p_1 \cos \gamma_3;$$

$$\sin \gamma_n \operatorname{tg} \theta (p_1 - \widehat{\varphi}_0) + (1 - \cos \gamma_n) \widehat{\varphi}_0 = p_n - p_1 \cos \gamma_n,$$

или в матричном виде: $A\bar{\theta} = Y$,

где

$$A = \begin{pmatrix} \sin \gamma_2 & 1 - \cos \gamma_2 \\ \sin \gamma_3 & 1 - \cos \gamma_3 \\ \sin \gamma_n & 1 - \cos \gamma_n \end{pmatrix}; \quad \bar{\theta} = \begin{pmatrix} \operatorname{tg} \theta (p_1 - \widehat{\varphi}_0) \\ \widehat{\varphi}_0 \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} p_2 - p_1 \cos \gamma_2 \\ p_3 - p_1 \cos \gamma_3 \\ - \\ p_n - p_1 \cos \gamma_n \end{pmatrix}.$$

Отсюда решение

$$\begin{pmatrix} \operatorname{tg} \theta (p_1 - \widehat{\varphi}_0) \\ \widehat{\varphi}_0 \end{pmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T Y; \quad \cos \beta = \frac{p_1 - \widehat{\varphi}_0}{\cos \theta}. \quad (3)$$

Сразу получаем оценку начальной фазы сигнала φ_0 , затем определяем оценку азимутального пеленга θ из найденного значения $\operatorname{tg} \theta (p_1 - \widehat{\varphi}_0)$ и оценку угломестного пеленга β . Поскольку получены аналитические формулы для вычисления начальной фазы сигнала φ_0 , азимутального пеленга θ , а затем угломестного пеленга β , то для них достаточно просто вычислить дисперсии как для функции случайного аргумента [2, 3].

Следует отметить, что операции, имеющие место в формулах (2) и (3), не представляют большой вычислительной сложности, и, соответственно, для их выполнения требуются малые временные затраты. Если сравнивать предлагаемый способ со способом, описанным в работе [1], то в данном случае вместо одномерного преобразования Фурье вычисляют логарифм функции, описывающей комплексную амплитуду сигнала на m -м элементе, и аналитически получают формулы для непосредственного вычисления искоемых величин. Это также серьезно снижает вычислительную сложность, сокращает время обработки сигнала и уменьшает ошибку в определении пеленгов, поскольку в предлагаемом алгоритме учтена начальная фаза сигнала φ_0 , влияющая на значение пеленгов.

Предлагаемый способ можно применять в совокупности с любым способом пеленгации при регистрации одного или нескольких сигналов (многосигнальная пеленгация) для уменьшения вычислительных (а, соответственно, и временных) затрат на определение значений азимутальных и угломестных пеленгов ИРИ, так как вычисление произведения косинусов азимутального и угломестного пеленгов менее сложная операция, чем вычисление упомянутых пеленгов по отдельности. Тем более, что в предлагаемом методе не применяются одномерные, двух- и трехмерные сетки значений θ, β, φ_0 .

Реализация алгоритма осуществляется в следующей последовательности.

1. Для функционирующей АС (до проведения измерений) аналитически вычисляется натуральный логарифм (2) от функции, описывающей комплексную огибающую выходов элементов АС (1).

2. Вычисляется натуральный логарифм измеренных комплексных амплитуд сигналов o'_m с каждого элемента АС.

3. Действительные и мнимые части полученного аналитического выражения натурального логарифма комплексной огибающей выходов элементов АС (2) приравнивают соответственно действительным и мнимым частям натурального логарифма o'_m .

4. Получают систему алгебраических уравнений, из которой определяют аналитические выражения для вычисления азимутального пеленга θ , угломестного пеленга β , начальной фазы сигнала φ_0 .

5. Согласно формулам (3), находят значения азимутального пеленга θ , начальной фазы сигнала φ_0 , а затем — угломестного пеленга β .

6. Поскольку известны аналитические выражения для расчета начальной фазы сигнала φ_0 , азимутального пеленга θ , а затем и угломестного пеленга β , то их дисперсии вычисляют как для функции случайного аргумента [2, 3].

При независимых переменных дисперсия функции $f(x)$ вычисляется по следующей формуле:

$$D[f(x)] = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} D(x_i).$$

В рассматриваемом случае в качестве $f(x)$ выступают формулы для $\cos\beta, \operatorname{tg}\theta, \varphi_0$; в качестве x_i — все другие переменные, входящие в

формулу, например, $\cos \beta = \frac{P_1 - \varphi_0}{\cos \theta}$. Тогда $f(x) = \cos \beta$; $P_1 \equiv x_1$; $\varphi_0 \equiv x_2$; $\cos \theta \equiv x_3$. $D(\cos \beta) = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \cos \beta}{\partial x_i} \right)^2 D(x_i)$.

В компьютер вводят матрицы A и Y , а также формулу (3), компьютер выдает два числа со своими среднеквадратичными отклонениями (СКО): значения $\operatorname{tg} \theta (P_1 - \hat{\varphi}_0) = a_1$; $\varphi_0 = a_2$. Тогда $\operatorname{tg} \theta = \frac{a_1}{P_1 - \hat{\varphi}_0}$

и $\varphi_0 = a_2$; $\cos \beta = \frac{P_1 - \varphi_0}{\cos \theta}$.

Можно поступить по-другому: записать функционал метода наименьших квадратов для второй системы — минимизировать

$$F = \sum_{i=2}^n (\sin \gamma_i \operatorname{tg} \theta (P_1 - \varphi_0) + (1 - \cos \gamma_i) \varphi_0 - P_i + P_1 \cos \gamma_i)^2.$$

Тогда значение $\operatorname{tg} \theta$ находим из условия $\frac{\partial F}{\partial \operatorname{tg} \theta} = 0$; φ_0 — из условия $\frac{\partial F}{\partial \varphi_0} = 0$; $\cos \beta = \frac{P_1 - \varphi_0}{\cos \theta}$.

Сравним результаты получаемых значений азимутального пеленга θ и угломестного пеленга β по прототипу и предлагаемым способом, используя три элемента АС (первые три уравнения): по предлагаемому способу

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{p_2 - p_3 + p_1 (\cos \gamma_3 - \cos \gamma_2)}{p_1 (\sin \gamma_2 - \sin \gamma_3)};$$

по прототипу —

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{p_2 - p_1 \cos \gamma_2}{p_1 \sin \gamma_2}.$$

Отличие очевидно. Из формулы (3) следует, что и угломестный пеленг β будет также иметь другое значение.

Рассмотрим числовой пример. На круговой АС радиусом 50 м на частоте 1 МГц при соотношении сигнал/шум, равном 10, зарегистрирован сигнал. На первых трех вибраторах зарегистрированы следующие фазы: $P_1 = 35^\circ$, $P_2 = P_3 = 45,98^\circ$. Угол между эле-

ментами АС $\gamma_m = 30^\circ$. Подставим исходные данные в формулу

$$P_m = 2\pi \frac{R}{\lambda} \cos(\theta - \gamma_m) \cos\beta + \varphi_0.$$

Для первого вибратора получим

$$35 = \frac{2 \times 180 \times 50 \times 1 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \cos\theta \cos\beta + \varphi = 60 \cos\theta \cos\beta + \varphi_0.$$

Аналогично для второго вибратора:

$$45, 98 = 60 \cos(\theta - 30) \cos\beta + \varphi_0;$$

для третьего —

$$-45, 98 = 60 \cos(\theta - 60) \cos\beta + \varphi_0.$$

По формулам (3) получены значения: $\theta = 45^\circ$; $\beta = 45^\circ$; $\varphi_0 = 5^\circ$. СКО θ равно $0,006^\circ$, СКО β равно $0,009^\circ$.

По формулам прототипа (без учета начальной фазы сигнала φ_0)

$$\theta_k = \arctg \left\{ \frac{P_2 - P_1 \cos\gamma}{P_1 \sin\gamma} \right\} \quad \text{и} \quad \beta_k = \arccos \left\{ \frac{P_1}{\cos\theta_k} \right\} \quad \text{получено:} \quad \theta = 41,8^\circ;$$

$\beta = 38,5^\circ$. С увеличением значения φ_0 ошибка резко возрастает.

Модельный расчет пеленга проводился на компьютере с процессором с тактовой частотой 2 ГГц. Время счета составило ка $0,001$ с. В ручном режиме для расчета потребуется примерно 1 мин, так как в каждом измерении изменяются только значения P_m .

Таким образом, определение азимутальных и угломестных пеленгов, а также начальной фазы одного зарегистрированного ИРИ не представляет никаких трудностей. Отсутствует необходимость использовать процедуры корреляции, которые ведут к интервальным оценкам параметров в сотни процентов. Описанный выше метод позволяет получать искомые оценки за тысячные доли секунды.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грешилов А.А., Плохута П.А. *Способ определения азимутальных и угломестных пеленгов источников радиоизлучения с повышенным быстродействием*. Патент РФ № 2380720, МПК G01S5/04, 27.01.2010.
- [2] Грешилов А.А. *Математические методы принятия решений*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 584 с.
- [3] Грешилов А.А. Некорректные задачи цифровой обработки информации и сигналов. 2-е изд., доп. Москва, Университетская книга; Логос, 2009, 360 с.

- [4] Грешилов А.А., Плохута П.А. *Способ многосигнальной пеленгации источников радиоизлучения на одной частоте*. Патент РФ № 2382379, С2, бюл. № 5, 20.02.2010.
- [5] Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А. *Фазовый метод определения координат*. Москва, Сов. радио, 1979.
- [6] Царьков Н.М. *Многоканальные радиолокационные измерители*. Москва, Сов. радио, 1980, 192 с.
- [7] Уфаев В.А. *Обнаружение сигналов и оценивание их параметров при многоканальном приеме*. Москва, МО РФ, 1983, 162 с.
- [8] Радзиевский В.Г., Уфаев В.А. Алгоритмы обнаружения и пеленгования совокупности частотно неразделимых радиосигналов. *Радиотехника*, 2005, № 9, с. 56–69.
- [9] Артемов М.Л., Дмитриев И.С., Москалева Е.А. Исследование возможности пространственной селекции двух источников радиоизлучения трехэлементной антенной решеткой. *Радиолокация, навигация, связь. Тр. 10-й Юбилейной Междунар. конф.* Воронеж, 2004, т. 2, с. 1378–1382.
- [10] Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Радио и связь, 1982, 680 с.
- [11] Козьмин В.А, Сладких В.А., Токарев А.Б. Различение источников радиоизлучения на основе данных панорамного пеленгования. *Антенны*, 2008, вып. 7–8, с. 92–94.

Статья поступила в редакцию 05.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Грешилов А.А. Определение амплитуды, азимутальных и угломестных пеленгов и начальной фазы радиоизлучателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1162.html>

Грешилов Анатолий Антонович родился в 1939 г., окончил Московский инженерно-физический институт в 1964 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ, в том числе более 30 монографий, 27 авторских свидетельств и патентов в области разработки математических методов учета неопределенности исходной информации в задачах математической физики, распознавания образов, прогнозирования и в других технических приложениях. e-mail: agresh@mail.ru