

УДК 621.396.663

Автоматическое амплитудное пеленгование интерферирующих радиоизлучений

Дворников С. В., Конюховский В. С., Симонов А. Н.

Постановка задачи: увеличение количества радиоизлучений приводит к интерференции попадающих в полосу пропускания радиоприемного устройства сигналов различных источников. Устойчивые к интерференции известные методы пеленгования используют структурно-статистическую избыточность для пространственного разделения источников радиоизлучений (ИРИ) и оценивания пеленгов. Это затрудняет их применение в условиях массогабаритных и временных ограничений. **Целью работы** является обеспечение интерференционной устойчивости узкобазисных малоэлементных амплитудных пеленгаторов за счет присущей им пространственной избирательности. Предлагается, не применяя частотной селекции, использовать спектральные различия радиоизлучений, выделяя пространственные параметры из интерференционной смеси сигналов в приемных каналах пеленгатора. **Используемые методы.** Решение задачи автоматического амплитудного пеленгования интерферирующих радиоизлучений основано на отыскании огибающей семейства кривых, в качестве которых используется годограф суммарного поля. Для формализации задачи измерения пеленгов рассмотрены два альтернативных подхода: на основе метода главных компонент и на основе кластерного анализа. **Новизна** представленного решения заключается в использовании гипотезы о том, что годограф суммарного поля касается огибающего его параллелограмма в точках, наиболее удаленных от центра изображения на индикаторе. Также к элементам новизны следует отнести использование скачка производной от функции, описывающей стороны параллелограмма, в качестве признака для нахождения его вершин. **Результат:** использование представленного решения по автоматическому пеленгованию интерферирующих радиоизлучений позволяет применить узкобазисные малоэлементные амплитудные пеленгаторы в сложной сигнально-помеховой обстановке. Проведенное моделирование показало возможность обнаружения многосигнальной ситуации и измерения пеленга на два ИРИ, при этом удастся добиться углового разрешения в один градус при отношении сигнал/шум 10 дБ за время, соответствующее одному периоду колебаний разностной частоты. **Практическая значимость:** представленное решение предлагается реализовать в средствах радиомониторинга, функционирующих в насыщенной сигнально-помеховой обстановке, когда налагаются дополнительные ограничения на их массогабаритные и временные показатели.

Ключевые слова: амплитудное пеленгование, автоматическое пеленгование, радиопеленгование, интерференция радиоизлучений.

Введение

Пеленгование источников радиоизлучений является одной из важнейших составляющих радиомониторинга [1-5] наряду с обнаружением, измерением параметров и распознаванием радиосигналов, перехватом сообщений и определением местоположения ИРИ. От эффективности пеленгования во многом зависят точность и достоверность добываемой системами радиомониторинга информации. Широкое применение кодирования, маскирования и шифрования

Библиографическая ссылка на статью:

Дворников С. В., Конюховский В. С., Симонов А. Н. Автоматическое амплитудное пеленгование интерферирующих радиоизлучений // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 67-81. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10104.

Reference for citation:

Dvornikov S. V., Konyukhovskiy V. S., Simonov A. N. Automatic Amplitude Direction Finding of Interfering Signals. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 1, pp. 67-81. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10104 (in Russian).

передаваемой информации приводит к тому, что нередко координатная и пеленговая информация остаются единственными достоверными и надежными сведениями об источниках радиомониторинга [6].

Функционирование средств пеленгования в настоящее время происходит в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, связанной с лавинообразным увеличением количества излучающих радиоэлектронных средств и преднамеренных помех [7, 8]. Это приводит к тому, что в полосу пропускания радиоприемного устройства пеленгатора попадает несколько сигналов от различных источников радиоизлучений, приводя к их интерференции. В средствах радиосвязи в этой ситуации возникает задача помехозащиты, когда необходимо выделить полезный сигнал абонента и исключить мешающие сигналы от других ИРИ. В средствах радиомониторинга при пеленговании, зачастую, все принимаемые радиоизлучения являются полезными, то есть получены от источников, представляющих интерес с точки зрения добывания информации. Тогда возникает задача одновременного пеленгования нескольких интерферирующих радиоизлучений.

Известно много эффективных методов пеленгования, которые достаточно хорошо изучены и успешно реализованы на практике [1-3, 9, 10]. Исторически первыми были амплитудные пеленгаторы от рамочных поворотных до широкобазисных стационарных. С развитием радиоэлектронных технологий, в частности с появлением высокоточных, высокостабильных опорных генераторов, более распространенными стали фазовые пеленгаторы. Частотные пеленгаторы основаны на использовании эффекта Доплера, возникающего при движении приемного антенного элемента относительно источника радиоизлучения. Кроме классических пеленгаторов в современных средствах радиомониторинга все чаще используют корреляционные методы пеленгования, опирающиеся на использование многоэлементных антенных систем и многоканальных приемных трактов. Следует также обратить внимание на перспективные собственно-структурные методы, обладающие повышенным пространственным разрешением, основанные на использовании статистических свойств радиосигналов и шумов.

Большинство традиционных пеленгаторов не рассчитаны на использование в условиях интерференции – наличие двух и более радиоизлучений в полосе приема приводит к значительной ошибке пеленга. Известны методы [11], обеспечивающие оценивание азимута и угла места на несколько ИРИ с одинаковыми несущими частотами. В этих методах, как правило, применяют виртуальное пространственное сканирование модельным вектором по амплитудно-фазовому распределению антенной решетки. Недостатком этих методов является то, что они требуют структурной или статистической избыточности, то есть количество антенных элементов и трактов приема должно превышать количество пеленгуемых источников радиоизлучений, а для повышения точности пеленгования требуется время для накопления статистических измерений. Это не позволяет их применить в условиях ограничений на массогабаритные и временные показатели.

Вместе с тем известно свойство «визуальной избирательности» традиционного узкобазисного амплитудного пеленгатора, обеспечивающего определение пеленга на два и более ИРИ с использованием лишь двух каналов приема [9, 10]. Однако для его эффективного применения в современных условиях необходимы формализация задачи измерения азимутов на источники радиоизлучения и нахождение математических процедур цифровой обработки сигналов, которые заменят аналоговые процессы и визуальную индикацию результата пеленгования.

Постановка задачи

Одним из наиболее известных является классический амплитудный пеленгатор [12], построенный по схеме Эдкока (рис. 1).

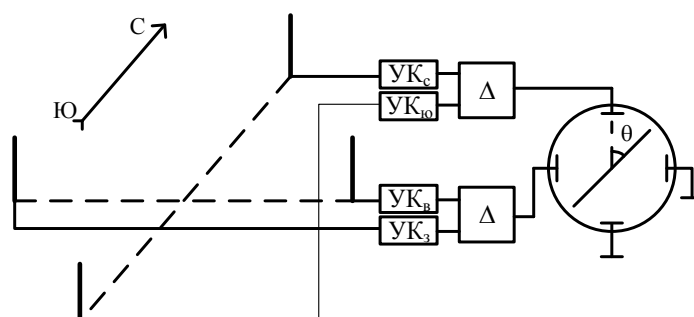


Рис. 1. Схема узкобазисного амплитудного пеленгатора

Информацию о направлении на ИРИ получают, используя амплитудные уравнения двух ортогональных узкобазисных ориентированных по сторонам света пеленгационных пар антенн (ППА), амплитуды разностных ЭДС которых можно представить в виде:

$$E_{\Delta \text{зв}} = 2E \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} b \sin \theta \cos \beta\right) = E_{\max} \sin \theta \cos \beta, \quad (1)$$

$$E_{\Delta \text{сю}} = 2E \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} b \cos \theta \cos \beta\right) = E_{\max} \cos \theta \cos \beta, \quad (2)$$

где $E_{\Delta \text{зв}}$, $E_{\Delta \text{сю}}$ – амплитуды разностных ЭДС в ППА «запад – восток» и «север – юг» соответственно; E – амплитуда ЭДС в антенном элементе; b – половина базы антенной системы; $E_{\max} = 4Eb\pi/\lambda$ – максимальное значение амплитуд разностных ЭДС; θ , β – азимут и угол места на ИРИ соответственно.

Из сравнения выражений (1) и (2) получают:

$$\theta = \arctg(E_{\Delta \text{зв}}/E_{\Delta \text{сю}}).$$

В описанном пеленгаторе сигналы с каждого антенного элемента (после усиления в УКс, УКю, УКз, УКв) объединяются на разность, а в качестве индикатора пеленга используется электронно-лучевая трубка. Разностные ЭДС с ППА «север – юг» и «запад – восток» подаются соответственно на вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины. Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) помимо индикации выполняет роль устройства для определения функции $\arctg$, поэтому на экране положение светящейся линии соответствует азимуту на ИРИ.

В [9, 10] доказана возможность и показан способ одновременного пеленгования нескольких ИРИ, частоты которых находятся в полосе пропускания приемных каналов описанного пеленгатора.

Если в полосе пропускания ($2\Delta\omega_n$) приемных каналов пеленгатора (см. рис. 1) попадают два синусоидальных колебания, соизмеримых по амплитуде, с частотами ω_1 и ω_2 , причем $\omega_2 - \omega_1 = \Omega < 2\Delta\omega_n$ и $\frac{|\omega_2 - \omega_1|}{\omega} \ll 1$, где $\omega = 0,5(\omega_1 + \omega_2)$, тогда суммарные напряжения на выходе вертикального и горизонтального каналов будут равны:

$$u_b(t) = U_{b1} \sin \omega_1 t + U_{b2} \sin \omega_2 t, \quad u_r(t) = U_{r1} \sin \omega_1 t + U_{r2} \sin \omega_2 t,$$

где $U_{b1} = U_1 \cos \theta_1$, $U_{r1} = U_1 \sin \theta_1$, $U_{b2} = U_2 \cos \theta_2$, $U_{r2} = U_2 \sin \theta_2$, $\theta_1 \neq \theta_2$.

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, а отклонения луча на экране ЭЛТ по осям Oy и Ox описываются выражениями

$$y = LU_b(t) \sin \omega_1 t, \quad x = LU_r(t) \sin(\omega_1 t - \Phi(t)),$$

где $U_b(t) = \sqrt{U_{b1}^2 + U_{b2}^2 + 2U_{b1}U_{b2} \cos \Omega t}$; $U_r(t) = \sqrt{U_{r1}^2 + U_{r2}^2 + 2U_{r1}U_{r2} \cos \Omega t}$;

$$\Phi(t) = \Phi_r(t) - \Phi_b(t); \quad \Phi_b(t) = \arctg \frac{U_{b2} \sin \Omega t}{U_{b1} + U_{b2} \cos \Omega t}; \quad \Phi_r(t) = \arctg \frac{U_{r2} \sin \Omega t}{U_{r1} + U_{r2} \cos \Omega t};$$

L – чувствительность ЭЛТ.

Уравнение движения луча в координатах xOy будет:

$$\frac{x^2}{L^2 U_r^2(t)} - 2 \frac{xy}{L^2 U_r(t) U_b(t)} \cos \Phi(t) + \frac{y^2}{L^2 U_b^2(t)} - \sin^2 \Phi(t) = 0. \quad (3)$$

Получено уравнение спирали с непрерывно изменяющимися во времени конфигурацией и наклоном звеньев. 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 источники радиоизлучений (рис. 2 а, б).

Доказательство того, что линия (3) вписана в параллелограмм, в общем виде требует совместного решения систем уравнений, получаемых из (3):

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

В общем случае строгое решение задачи невозможно, так как получающиеся уравнения в общем виде не разрешаются. Однако это не является препятствием для визуального пеленгования, так как отсчет пеленгов производится с помощью поворотного визира, имеющего кроме центральной линии отсчета ряд параллельных ей линий, которые совмещаются со сторонами параллелограмма (см. рис. 2 а). Воздействие более чем двух сигналов в каждом канале на

индикатор ЭЛТ приводит к усложнению изображения на экране, при трех ИРИ изображение имеет вид параллелепипеда, представленного в аксонометрической проекции, причем по трем его ребрам определяются азимуты всех трех пеленгуемых источников (см. рис. 2 в).

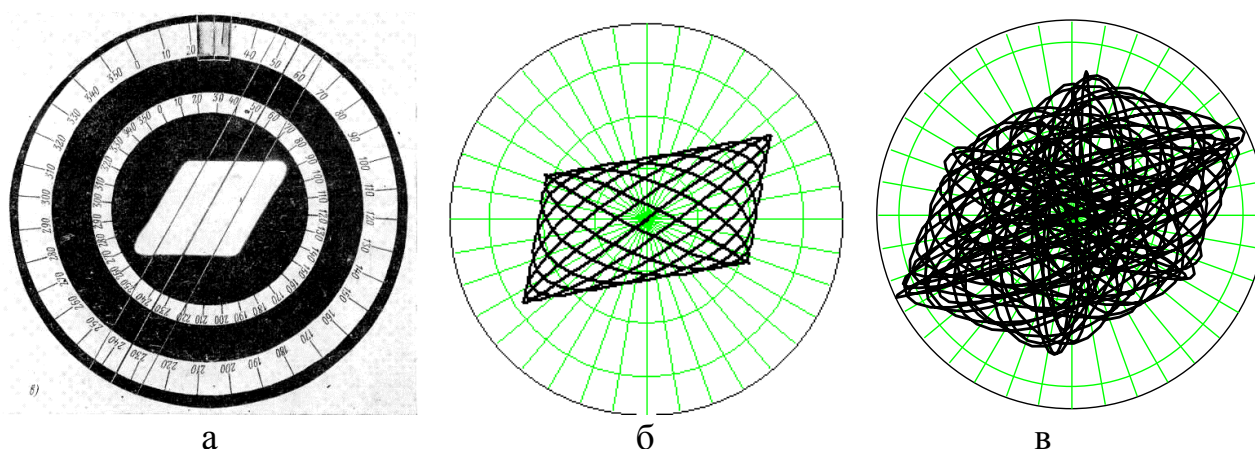


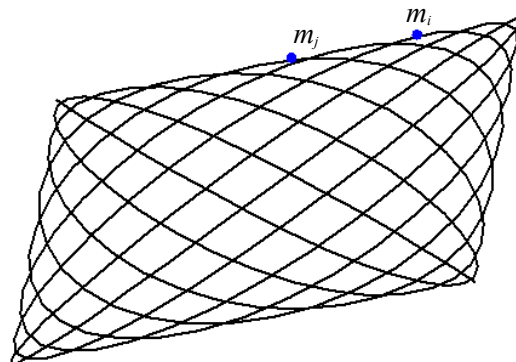
Рис. 2. Изображение на экране индикатора:
а – поворотный визир для отсчета пеленгов;
б – изображение при двух ИРИ;
в – изображение при трех ИРИ

Описанное свойство, получившее наименование визуальной избирательности, 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 расчета пеленгов на источники радиоизлучений в условиях интерференции. С этой целью разработан амплитудный метод автоматического одновременного измерения пеленгов на два интерферирующих радиоизлучения.

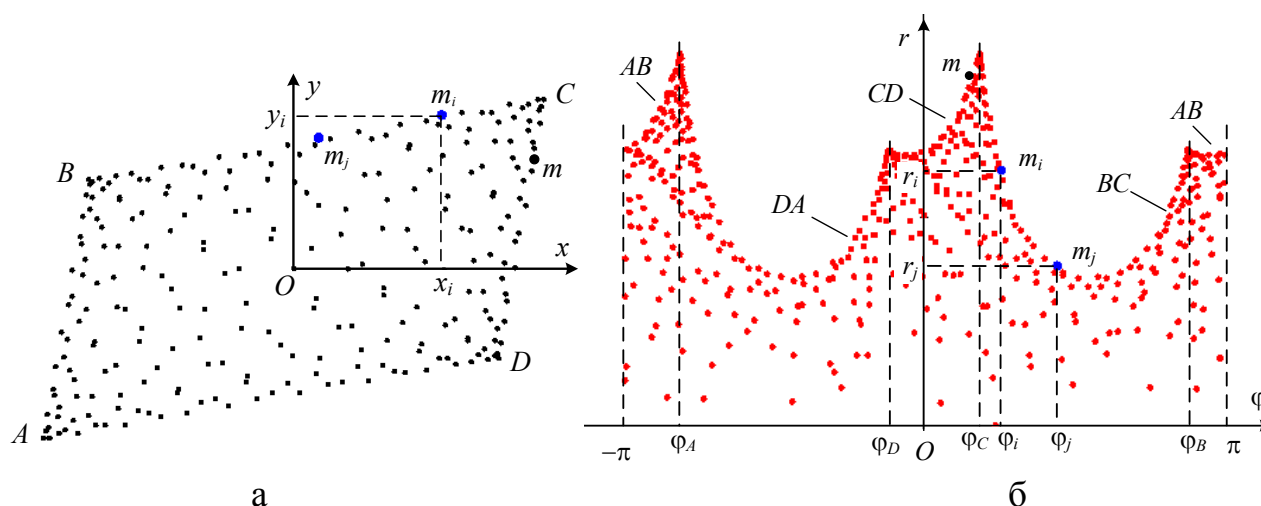
Метод автоматического амплитудного пеленгования интерферирующих радиоизлучений

Идея, положенная в основу метода, состоит в том, что каждая точка m , в которой годограф поля касается описывающего параллелограмма $ABCD$, является наиболее удаленной от центра по сравнению с другими точками, имеющими тот же полярный угол φ (рис. 3).

Для расчета азимутов теоретически достаточно для каждого ИРИ выбрать пару точек, расположенных на соответствующей стороне параллелограмма, и оценить угол наклона прямой, проходящей через них. Например, для нахождения азимута на первый ИРИ можно выбрать соответствующую ему сторону BC

$$\theta_1 = \arctg \frac{r_i \sin \varphi_i - r_j \sin \varphi_j}{r_i \cos \varphi_i - r_j \cos \varphi_j}. \quad (4)$$


В современных средствах пеленгования, построенных на аппаратно-программной платформе, все преобразования сигналов выполняются путем цифровой обработки отсчетов, полученных после дискретизации сигналов. Поэтому положение точки m с декартовыми (x, y) или полярными (r, φ) координатами при движении по отображаемой спирали будет также меняться дискретно, ее временная выборка будет представлять собой массив из N цифровых дискретных отсчетов $M = \{m_i\}, i = \overline{1, N}$, а изображение на индикаторе можно представить совокупностью N точек $m_i = (x_i, y_i)$ (рис. 4 а).

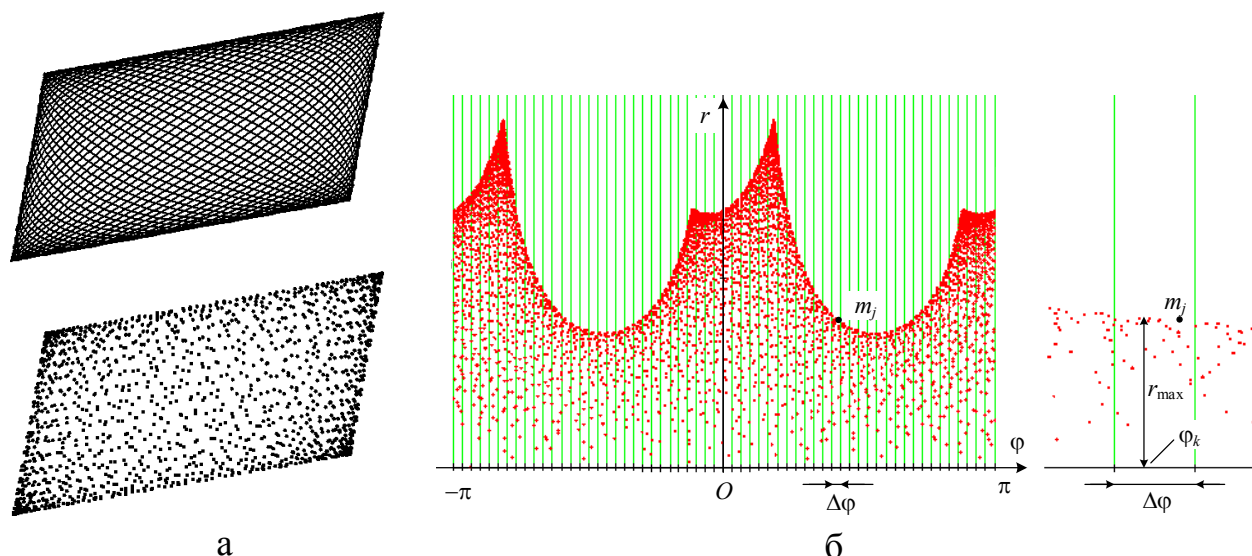


После преобразования в полярные координаты (r, φ) изображение полученного массива M изменится (см. рис. 4 б), однако на нем по-прежнему можно выделить положение соответствующих точек m и сторон параллелограмма

Дискретность отсчетов приводит к тому, что выбранные точки массива M , соответствующие максимальному удалению $r_{\max}$, смещены от сторон параллелограмма $ABCD$ (рис. 5). По этой причине азимуты на ИРИ, рассчитанные по формуле (4), будут иметь методическую ошибку.



Для снижения влияния указанной методической ошибки предлагается увеличивать выборку отсчетов сигналов (рис. 6 а) и выполнять так называемую гистограммную обработку, т. е. разбивать массив M на K интервалов $\Delta\varphi_k$ одинаковой длины $\Delta\varphi$ и в каждом из них находить максимальное $r_{\max}$ и соответствующее ему φ_k , $k = \overline{1, K}$ (рис. 6 б).



а – увеличение выборки сигналов; б – принцип гистограммной обработки

Результатом указанной гистограммной обработки будет массив $M_\Gamma = \{m_k\}$, $k = \overline{1, K}$, $K \ll N$, содержащий координаты отобранных точек $m_k = (r_k, \varphi_k)$ (рис. 7).

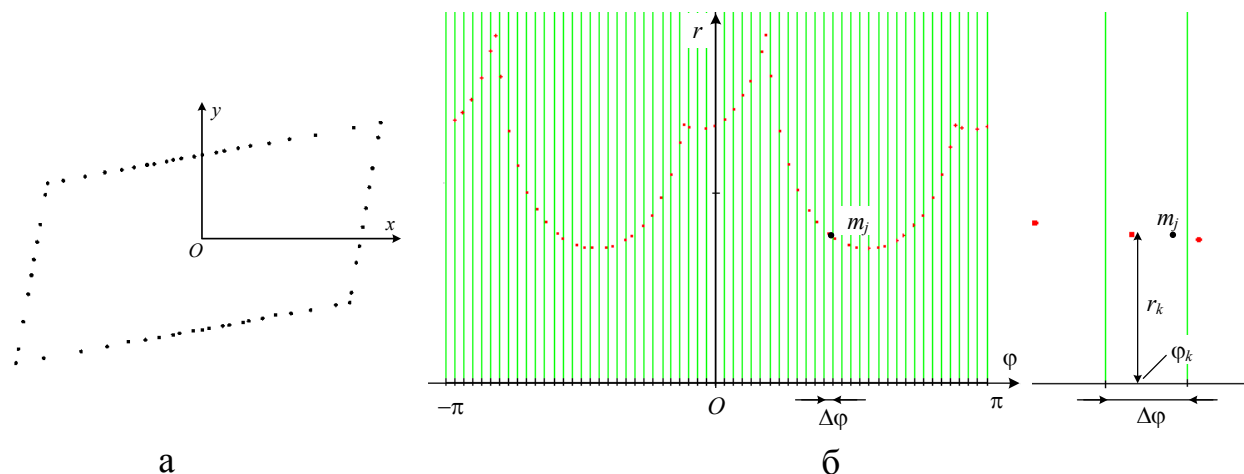


Рис. 7. Результаты гистограммной обработки:
а – для декартовых координат; б – для полярных координат.

Далее необходимо осуществить поиск вершин параллелограмма. Для этого предлагается воспользоваться признаком скачка производной от функции $r(\varphi)$ на границах отрезков AB , BC , CD и DA , т. е. критерием того, что при аргументах φ_A , φ_B , φ_C и φ_D (см. рис. 4 б) производная $r'(\varphi)$ резко изменяется. Такое изменение соответствует скачкообразному увеличению в вершинах параллелограмма абсолютного значения второй производной r по φ :

$$\begin{cases} |r''(\varphi)| \geq C, & \varphi \in (\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D), \\ |r''(\varphi)| < C, & \varphi \notin (\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D), \end{cases} \quad (5)$$

где C – значение порога, определяемое эмпирически.

При цифровой обработке производные следует записать в дискретной форме:

$$r'_k(\varphi) = \frac{r_{k+1} - r_k}{\varphi_{k+1} - \varphi_k}, \quad r''_k(\varphi) = \frac{r'_k - r'_{k-1}}{\varphi_k - \varphi_{k-1}}.$$

Результатом поиска по критерию (5) будут граничные значения φ_k , соответствующие вершинам параллелограмма $ABCD$, после чего имеется возможность разделить все точки (r_k, φ_k) на группы $M_l = \{m_{k_l}\}$, $l = \overline{1, 4}$, $k_l = \overline{1, K_l}$, где K_l – количество точек массива M_Γ для сторон AB , BC , CD , DA соответственно.

Для расчета азимутов на каждый ИРИ предлагается использовать метод главных компонент [13], для чего все точки $m_k = (r_k, \varphi_k)$ массива M_Γ преобразуются в декартовы координаты $m_k = (x_k, y_k)$:

$$x_k = r_k \cos \varphi_k, \quad y_k = r_k \sin \varphi_k.$$

Разброс координат (x_k, y_k) относительно каждой стороны параллелограмма приблизительно описывается эллипсом рассеяния [13], угловое положение большой оси которого равно углу наклона соответствующей стороны. Чтобы найти эти параметры необходимо для каждой группы точек M_l составить ковариационную матрицу:

$$\mathbf{R}_l = \begin{pmatrix} Dx_l & \text{cov}\{x, y\}_l \\ \text{cov}\{y, x\}_l & Dy_l \end{pmatrix},$$

где Dx_l , Dy_l – дисперсии, а $\text{cov}\{x, y\}_l$, $\text{cov}\{y, x\}_l$ – ковариации, соответственно, координат (x, y) для каждой стороны l .

Далее вычисляются собственные значения $\{\lambda_1, \lambda_2\}_l$ и собственные векторы $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2\}_l$ матриц $\mathbf{R}_l$. Будем считать, что собственные значения в $\{\lambda_1, \lambda_2\}_l$ расположены в порядке убывания. Информацию об азимуте на каждый ИРИ извлекают из углового положения l -й стороны, которую получают, используя собственные векторы, соответствующие большему собственному значению:

$$\theta_1 = \arctg \frac{v_{l1_0}}{v_{l1_1}}, \quad l = 1, 3;$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{v_{l1_0}}{v_{l1_1}}, \quad l = 2, 4,$$

где $\mathbf{v}_{l1} = (x_{l1}, y_{l1})^T$ – первый собственный вектор матрицы $\mathbf{R}_l$; x_l, y_l – координаты собственного вектора. Индекс "1" в $\mathbf{v}_{l1}$ указывает на собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению, параметр l устанавливает выбор соответствующей стороны параллелограмма.

Кроме метода главных компонент можно предложить альтернативный метод обработки массива M_r , основанный на разбиении множества точек $m_k = (x_k, y_k)$ на кластеры. Для этого, используя множество $\{m_k\}$, сформируем множество векторов $A = \{\mathbf{a}_k\}$, $\mathbf{a}_k = \overrightarrow{m_k m_{k+1}}$, $k = \overline{1, K-1}$, такое, что

$$\mathbf{a}_k = \begin{pmatrix} x_{k+1} - x_k \\ y_{k+1} - y_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_k \\ \Delta y_k \end{pmatrix}.$$

Векторы $\mathbf{a}_k$ можно рассматривать как векторы производных по сторонам параллелограмма, которые образуют с осью Ox углы

$$\gamma_k = \arctg \frac{\Delta y_k}{\Delta x_k}.$$

Массив $\{\gamma_k\}$ можно разбить на четыре кластера, соответствующие сторонам параллелограмма (рис. 8). Для этого сначала находят минимальное $\gamma_{\min}$ и максимальное $\gamma_{\max}$ значения в массиве и рассчитывают среднее $\gamma_{avr} = 0,5(\gamma_{\max} + \gamma_{\min})$ между ними. Значение γ_{avr} позволяет разделить массив $\{\gamma_k\}$ на два кластера. Каждый кластер задается множеством индексов элементов, содержащихся в нем. Аналогично производится разбиение каждого из по-

лученных кластеров. В результате индексы $k_l = \overline{1, K_l}$, $l = \overline{1, 4}$, соответствующие сторонам параллелограмма, попадают в четыре различных кластера.

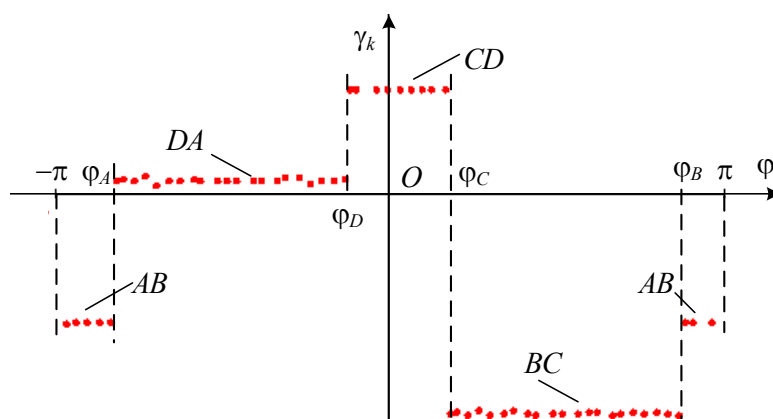


Рис. 8. Результаты гистограммной обработки

Для расчета азимутов на каждый из двух ИРИ следует усреднить значения γ_k , сгруппированные по параллельным сторонам:

$$\theta_1 = 0,5 \left(\frac{\sum_{k_1} \gamma_k}{K_1} + \frac{\sum_{k_3} \gamma_k}{K_3} \right), \quad \theta_2 = 0,5 \left(\frac{\sum_{k_2} \gamma_k}{K_2} + \frac{\sum_{k_4} \gamma_k}{K_4} \right).$$

Результаты моделирования

Оценка возможностей разработанного метода автоматического амплитудного пеленгования интерферирующих радиоизлучений выполнена методом Монте-Карло путем имитационного моделирования на ЭВМ. В основу показателя эффективности положена оценка разрешающей способности по азимуту. В качестве критерия срыва разрешения использовано превышение средней за два ИРИ среднеквадратической ошибки (СКО) пеленгования над разницей азимутов на них

$$\sigma_{\theta_{cp}} > \Delta\theta,$$

где $\sigma_{\theta_{cp}} = \sqrt{0,5(\sigma_{\theta_1}^2 + \sigma_{\theta_2}^2)}$; $\Delta\theta = |\theta_1 - \theta_2|$; σ_{θ_1} , σ_{θ_2} и θ_1 , θ_2 – соответственно СКО пеленгования и азимуты первого и второго ИРИ.

Кроме традиционных статистических испытаний методом Монте-Карло предложено дополнительно обратиться к свойству метода главных компонент, заключающемуся в том, что описываемый эллипсом рассеяния разброс координат точек (x_k, y_k) относительно каждой стороны параллелограмма может характеризоваться величиной его малой полуоси. Для оценивания разброса следует использовать меньшие собственные значения λ_{l2} ковариационных матриц $\mathbf{R}_l$, а СКО пеленгования находить, нормируя его относительно большего собственного значения λ_{l1} :

$$\sigma_{\theta_l} = \arctg \sqrt{\frac{\lambda_{l2}}{\lambda_{l1}}},$$

где σ_{θ_l} – СКО пеленгования.

Результаты моделирования для двух вариантов длительности τ выборок сигналов (один и десять периодов разностной частоты F) при различных отношениях сигнал/шум (ОСШ) q представлены на рис. 9.

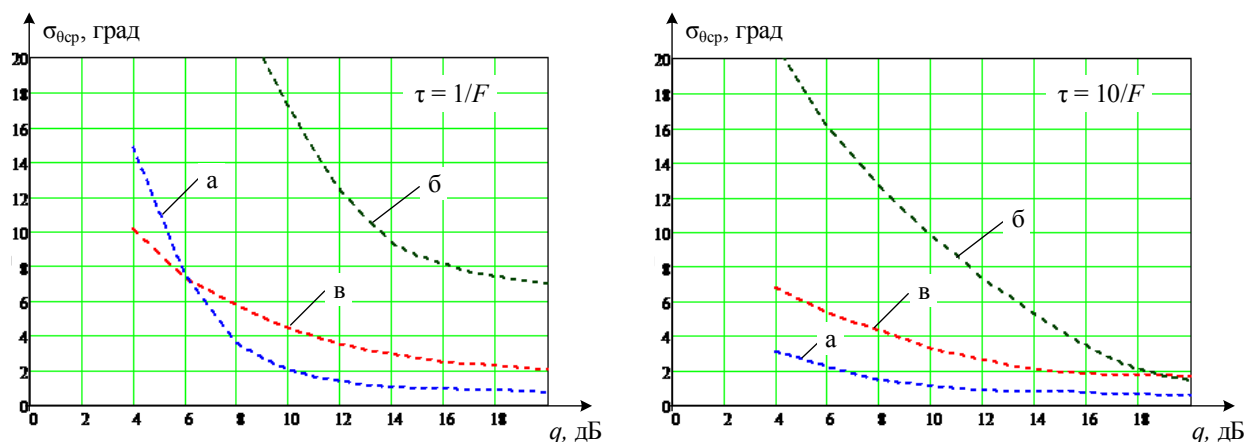


Рис. 9. Зависимость разрешающей способности от ОСШ:

а – оценка по методу главных компонент; б – оценка по методу кластерного анализа; в – оценка на основе отношения собственных значений

Анализ полученных зависимостей (рис. 9) показал следующее.

1. Более высокой разрешающей способностью обладает метод главных компонент. Этот результат является ожидаемым, так как данный метод основан на собственных векторах ковариационных матриц $\mathbf{R}_l$, то есть наилучшим образом использует все имеющиеся в сигналах корреляционные свойства.

2. Для метода главных компонент отмечено парадоксальное превышение точности пеленгования в условиях интерференции (рис. 9) по сравнению с односигнальной ситуацией [12]. Объяснение этого кроется в том, что даже выборка длиной всего в один период разностной частоты ($\tau = 1/F$) все же содержит определенный набор статистических данных. Использование этого набора и приводит к повышению точности по сравнению с оценкой для односигнальной обстановки, полученной по мгновенным отсчетам.

3. Применение метода кластерного анализа возможно только при значительных ОСШ ($q > 20$ дБ). Причиной этого, предположительно, является неполное использование статистических связей рассчитанных значений γ_k , так как при формировании массива $\{\gamma_k\}$ используются только соседние отсчеты выборки $\{\mathbf{a}_k\}$.

4. Как и ожидалось метод оценивания на основе отношения собственных значений уступил в точности методу главных компонент, так как в нем заложена раздельная по координатам (x_k, y_k) обработка статистических данных.

5. Неожиданным, хотя и предсказуемым, явилось обнаруженное смещение оценки методами главных компонент и на основе отношения собственных значений, вызванное нелинейностью второго порядка звеньев спирали (3). Конечно, различными алгоритмическими «хитростями» указанное смещение можно компенсировать, однако для этого необходимы определенные априор-

ные данные об ИРИ, которые на практике заменяются их оценками. Для аналитического устранения указанного смещения в дальнейших исследованиях предполагается решить эту частную научную задачу.

Выводы

Разработанный метод автоматического амплитудного пеленгования интерферирующих радиоизлучений является алгебраически-статистическим решением задачи расчета азимутов на ИРИ, он не требует визуальных индикаторов для снятия измерений, легко формализуется и поэтому может быть успешно реализован на любых устройствах цифровой обработки сигналов.

Литература

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / под ред. А. М. Рембовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 624 с.
2. Липатников В. А., Царик О. В. Методы радиоконтроля. Теория и практика. Монография. – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2018. – 608 с.
3. Poisel R. A. Electronic Warfare Target Location Methods. – Artech House, Norwood MA, 2005. – 272 p.
4. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. – М.: Радиотехника, 2004. – 432 с.
5. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетцентрических войнах начала XXI века. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2017. – 546 с.
6. Кудрявцев А. М., Смирнов А. А., Федянин А. В. Алгоритм "трассовой" обработки данных радиомониторинга // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. № 1 (93). С. 38-42.
7. Челышев В. Д., Якимовец В. В. Зарубежные радиоэлектронные системы наземного и спутникового мобильного радиосервиса. – СПб.: ВАС, 2012. – 388 с.
8. Агиевич С. Н., Волощук Э. В., Круглов С. А., Луценко С. А., Пономарев А. А. Способ радиоподавления спутниковых каналов управления // Патент на изобретение RUS 2677261, опубл. 16.01.2019, бюл. № 2.
9. Мезин В. К. Автоматические радиопеленгаторы. – М.: Сов. радио, 1969. – 216 с.
10. Кукес И. С., Старик М. Е. Основы радиопеленгации. – М.: Сов. радио, 1964. – 640 с.
11. Комарович В. Ф., Никитченко В. В. Методы пространственной обработки радиосигналов. – Л.: ВАС, 1989. – 278 с.
12. Симонов А. Н., Волков Р. В., Дворников С. В. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учебное пособие / под ред. А. Н. Симонова. – СПб.: ВАС, 2017. – 248 с.
13. Налимов В. В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 208 с.

References

1. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin B. A. *Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva* [Radiomonitoring – problems, methods, tools]. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom Publ., 2010. 624 p. (in Russian).
2. Lipatnikov V. A., TSarik O. V. *Metody radiokontrolya. Teoriya i praktika. Monografiia* [Methods of radiomonitoring. Theory and practice. Monograph]. Saint Petersburg, Humanitarian National Research Institute «Natsrazvitie» Publ., 2018. 608 p. (in Russian).
3. Poisel R. A. *Electronic warfare target location methods*. Artech House, Norwood MA, 2005. 272 p.
4. Radzievsky V. G., Sirota A. A. *Teoreticheskie osnovy radioelektronnoy razvedki* [Theoretical basis of radioelectronic reconnaissance]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 432 p. (in Russian).
5. Makarenko S. I. *Informatsionnoe protivoborstvo i radioelektronnaia borba v setetsentricheskikh voynakh nachala XXI veka. Monografiia* [Information warfare and electronic warfare to network-centric wars of the early XXI century. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2017. 546 p. (in Russian).
6. Kudryavtsev A. M., Smirnov A. A., Fedyanin A. V. Algorithm of "route" processing of radiomonitoring data. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2010, no. 1 (93), pp. 38-42 (in Russian).
7. Chelyshev V. D., Yakimovets V. V. *Zarubezhnye radioelektronnye sistemy nazemnogo i sputnikovogo mobil'nogo radioservisa* [Foreign ground and satellite mobile radioservice radioelectronic systems]. Saint Petersburg, Military Telecommunications Academy Publ., 2012. 388 p. (in Russian).
8. Agievich S. N., Voloshchuk E. V., Kruglov S. A., Lutsenko S. A., Ponomarev A. A. Method of radiosuppression of satellite control channels. Patent Russia, no. RUS 2677261, Publish. 16.01.2019, bul. no. 2 (in Russian).
9. Mezin V. K. *Avtomaticheskie radiopelengatory* [Automatic direction finder]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1969. 216 p. (in Russian).
10. Kukes I. S., Starik M. E. *Osnovy radiopelengatsii* [Basics of radio direction finding]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1964. 640 p. (in Russian).
11. Komarov V. F., Nikitchenko V. V. *Metody prostranstvennoy obrabotki radiosignalov* [Methods of spatial processing of radio signals]. Leningrad, Military Telecommunications Academy Publ., 1989. 278 p. (in Russian).
12. Simonov A. N., Volkov R. V., Dvornikov S. V. *Osnovy postroeniya i funktsionirovaniya uglomernykh sistem koordinatometrii istochnikov radioizluchenij* [Basics of construction and functioning of triangulation emitters location systems]. Saint Petersburg, Military Telecommunications Academy Publ., 2017. 248 p. (in Russian).
13. Nalimov V. V. *Teoriya ehksperimenta* [Theory of experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 208 p. (in Russian).

Статья поступила 5 ноября 2018 г.

Информация об авторах

Дворников Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры радиосвязи. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: радиомониторинг, формирование и анализ сигналов, координатометрия источников радиоизлучений, помехозащищенность радиолиний. E-mail: practicsdv@yandex.ru

Конюховский Владимир Самуилович – кандидат физико-математических наук, профессор. Профессор кафедры математики. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: аналитическая геометрия, векторная алгебра, цифровая обработка сигналов и изображений, компьютерное моделирование. E-mail: konyukhovsky@yandex.ru

Симонов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент. Докторант. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: радиомониторинг, анализ и обработка сигналов, пеленгование и координатометрия источников радиоизлучений. E-mail: sanmailbox@yandex.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Automatic Amplitude Direction Finding of Interfering Signals

S. V. Dvornikov, V. S. Konyukhovsky, A. N. Simonov

Problem statement. Increasing number of radio emissions leads to interference of signals of different sources falling into the bandwidth of the radio receiver. Sustainable to the interference of the known methods of direction finding use structural and statistical redundancy for spatial separation of emitters and the estimation of the bearing. This makes it difficult to use them in conditions of mass and time constraints.

The aim of the work is to ensure the interference stability of narrow-band low-element amplitude direction finders due to their inherent spatial variability. It is proposed to use the spectral differences of radio emissions, highlighting the spatial parameters of the interference mixture of signals in the receiving channels of the direction finder, without using frequency selection. **Methods.** The solution of the problem of automatic amplitude bearing of interfering radio emissions is based on finding the envelope of the family of curves, as which the total field hodograph is used. Two alternative approaches are proposed for formalization of bearing measurement: on the basis of principal components method and on the basis of cluster analysis. **The novelty** of the presented solution lies in the use of the idea that the hodograph of the total field concerns the envelope of its parallelogram at the points most distant from the center of the image on the indicator. Also, the elements of novelty include the use of a jump derived from the function describing the sides of the parallelogram, as a sign for finding its vertices. **Result.** The use of the proposed solution for automatic direction finding of interfering radio emissions makes it possible to apply narrow-band small-element amplitude direction finders in a complex signal-noise environment. The simulation showed the possibility of detecting a multi-signal situation and measuring the bearing on two emitters, while it is possible to achieve an angular resolution of one degree at a signal/noise ratio of 10 dB in a time corresponding to one period of oscillations of the difference frequency. **Practical relevance.** The presented solution is suggested to use in radiomonitoring equipment, operating in the saturated signal-to-interference about the situation when you have additional restrictions on their dimensions and weight.

Key words: amplitude direction finding, automatic direction finding, radio direction finding, interference of radio signals.

Information about Authors

Sergey Viktorovich Dvornikov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Professor at the Department of radio communications. Military Telecommunications Academy named after Marshal of the Soviet Union S. Budyonny. Field of research: the radiomonitoring, formation and analysis of signals, emitters location, noise immunity of radio links. E-mail: practicdsv@yandex.ru

Vladimir Samuilovich Konyukhovsky – Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Professor. Professor at the Department of mathematics. Military Telecommunications Academy named after Marshal of the Soviet Union S. Budyonny. Field of research: analytical geometry, vector algebra, digital signal and image processing, computer simulation. E-mail: konyukhovsky@yandex.ru

Alexey Nikolaevich Simonov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Doctoral Candidate. Military Telecommunications Academy named after Marshal of the Soviet Union S. Budyonny. Field of research: radiomonitoring, signal analysis and processing, direction finding and location of emitters. E-mail: sanmailbox@yandex.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy avv., 3.