

Формирование устойчивых оценок направления источников радиоизлучения

М. Е. Шевченко¹, В. Н. Малышев² Б. П. Подкопаев³

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹M_E_Shevchenko@mail.ru, ²vm@ieee.org,

³bpodkopaev@mail.ru

Д. О. Задирако⁴, Д. Н. Файзуллина⁵

АО «НИИ «Вектор»

⁴deemazadirako@yandex.ru, ⁵dilara89@yandex.ru

А. С. Черепанов

СПбПУ

ascherspb@mail.ru

Аннотация. Устойчивость оценок направлений источников радиоизлучения при пеленговании достигается цензурированием или предотвращением появления аномальных оценок, обусловленных многолучевостью. Цензурирование аномальных оценок, содержащихся в базе данных, повышает точность пеленгования и не накладывает ограничений на число пеленгуемых сигналов. Разделение сигналов, приходящих по различным лучам, и их последующее пеленгование предотвращает появление аномальных оценок. Приводятся результаты обработки баз данных и записей реальных сигналов.

Ключевые слова: цензурирование аномальных оценок азимута; пеленгование; антенная решетка; многолучевость

I. ВВЕДЕНИЕ

При радиомониторинге в широкой полосе частот для каждого частотного отсчета, в котором обнаружен сигнал источника радиоизлучения (ИРИ), формируются оценка его направления: азимута θ и угла места β . Оценки $\hat{\theta}$ и $\hat{\beta}$ записываются в базу данных, по которой строятся частотно-азимутальные, частотно-угломестные и частотно-временные панорамы. По этим панорамам можно визуально оценить полосу частот, занимаемую ИРИ, его направление и длительность сигнала.

Кроме достоверных оценок направлений ИРИ в базе данных иногда появляются аномальные оценки азимута, которые хотя сформированы при высоком отношении сигнал-шум, но существенно отклоняются от истинных значений.

Одной из причин появления аномальных оценок при полной исправности радиоэлектронного оборудования и фазовой стабильности трактов приема является многолучевое распространение.

II. АНОМАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПРИ МНОГОЛУЧЕВОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ

При многолучевом распространении результирующее колебание k -го ИРИ в m -ой антенне, является суммой $L(k)$ задержанных копий сигнала $s_k(t)$, взвешенных амплитудными и фазовыми множителями лучей:

$$\tilde{s}_{km}(t) = \sum_{l=0}^{L(k)} [b_{kl}s_k(t - \tau_{kl}) \exp(j\phi_{kl}) \exp(j2\pi f_k t) \times \exp(j\gamma_m(\theta_{kl}, \beta_{kl}))], \quad m = 1 \dots M. \quad (1)$$

В (1) $L(k)$ – число лучей распространения для k -го ИРИ; b_{kl} – амплитуда сигнала l -го луча, $|s_k(t)| = 1$; τ_{kl} – задержка распространения сигнала k -го ИРИ по l -м луче; f_k – частота сигнала k -го ИРИ; ϕ_{kl} – случайная фаза в l -ом луче ($\phi_{k0} = 0$); $\gamma_m(\theta_{kl}, \beta_{kl})$ – фазовый сдвиг между колебаниями сигнала $s_k(t)$ k -го ИРИ, распространяющегося по l -му лучу, в m -ой и опорной антеннах, θ_{kl} , β_{kl} – направления прихода l -го луча k -го ИРИ, M – число антенн в антенной решетке (АР).

Для КВ-диапазона значения $\theta_{kl} \in [\theta_k - \Delta\theta_k, \theta_k + \Delta\theta_k]$, $l = 1 \dots L(k)$, принадлежат некоторому кластеру, в пределах которого происходит незначительное азимутальное отклонение направления радиосигналов k -го ИРИ. Лучи падают на АР с произвольными углами места β_{kl} , но имеют близкие азимутальные θ_{kl} направления. Значения угла места при многолучевом распространении в точке приема могут быть произвольными.

Фаза суммарного колебания $\tilde{s}_{km}(t)$ определяется значениями фаз $\varphi_{kl} + \gamma_m(\theta_{kl}, \beta_{kl})$, $l = 1 \dots L(k)$ и амплитуд b_{kl} , $l = 1 \dots L(k)$ колебаний каждого луча.

При статистическом имитационном моделировании многолучевого канала с близкими азимутальными направлениями θ_{kl} , установлено [1], что при сложении в антеннах хотя бы двух сильных примерно одинаковых по амплитуде лучей, у которых разность начальных фаз колебаний составляет $160 \dots 200^\circ$, происходит неконтролируемое изменение фазы суммарного колебания. В результате разности фаз принятых процессов между отдельными антеннами решетки не соответствуют направлениям прихода сигнала от ИРИ и появляется аномальная оценка азимута.

При других значениях разностей фаз и отсутствии равнозначных по мощности многолучевых компонент аномальные оценки при близких азимутальных направлениях лучей не появляются.

Учет многолучевого распространения сигналов при радиомониторинге в широкой полосе частот сложен, так как трасса прохождения сигнала каждого ИРИ индивидуальна, а зондировать канал и оценить амплитуды и фазы сигналов, приходящих по различным лучам в реальном времени для произвольных ИРИ, не представляется возможным.

Для предотвращения появления или устранения аномальных оценок предлагается две стратегии.

1. Цензурирование аномальных оценок азимута, вынесенных стандартными алгоритмами фазового пеленгования, в том числе на основе ESPRIT и MUSIC.
2. Разделение лучей и формирование оценки направления для одного или для всех лучей.

III. ЦЕНЗУРИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ОЦЕНОК

Результаты обработки реальных записей сигналов и баз данных (БД), полученных от эксплуатирующихся комплексов, и статистического имитационного моделирования алгоритмов обнаружения и фазового пеленгования в условиях многолучевого распространения, выполненные авторами, свидетельствуют о том, что аномальные оценки азимута составляют не более 10 % от числа всех оценок. Анализ гистограмм, построенных по базам данных эксплуатирующихся комплексов, показал, что оценки азимута группируются даже при наличии аномальных оценок [2].

Цензурирование аномальных оценок сводится к определению области группировки и отбрасыванию оценок, не попадающих в эту область.

Область группировки целесообразно определять по гистограмме оценок, построенной в полярных координатах (рис. 1), для предотвращения разрыва при переходе $360 \rightarrow 0^\circ$ или от -180 к 180° . Для автоматического определения области группировки при появлении аномальных оценок предлагается выполнить следующие действия [2]:

1. Для каждого i -го частотного отсчета ($i = 1 \dots N_{fft}$), в котором обнаружен сигнал, по результатам нескольких измерений $\hat{\theta}_i = [\hat{\theta}_{i1}, \dots, \hat{\theta}_{iK}]$, строится гистограмма оценок $G(\hat{\theta}_i)$ азимута в полярных координатах, K - общее число оценок азимута, сформированных для i -го отсчета, N_{fft} - число отсчетов анализируемого частотного диапазона, обычно совпадает с размером ДПФ. Если используется алгоритм, который формирует в одном частотном отсчете $d < M$ оценок, то в гистограмме присутствуют d областей группировки.

2. Определяются области группировки.

2.1. Находятся максимальные значения гистограммы $G_{\kappa \max i} = \max [G(\hat{\theta}_i)]$, $\kappa = 1 \dots d$ в областях группировки.

2.2. Определяются границы области группировки $\delta_{\kappa \min} = G_{\kappa \max i} - \Delta$ и $\delta_{\kappa \max} = G_{\kappa \max i} + \Delta$ (Δ - допустимое угловое отклонение).

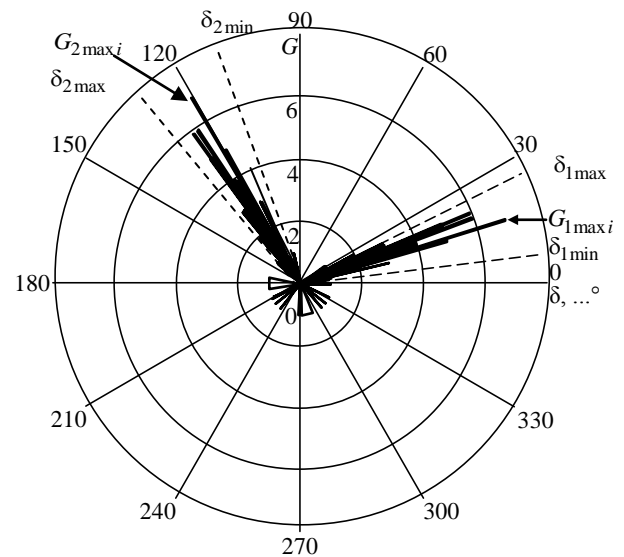


Рис. 1. Гистограмма оценок азимута для частотного отсчета

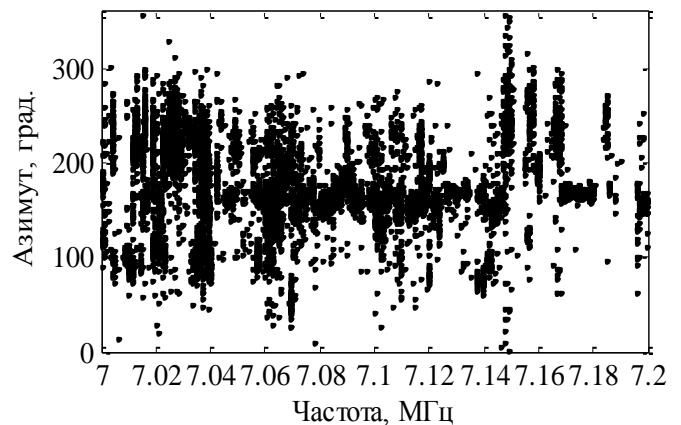


Рис. 2. Частотно-азимутальная панорама исходной БД оценок ИРИ

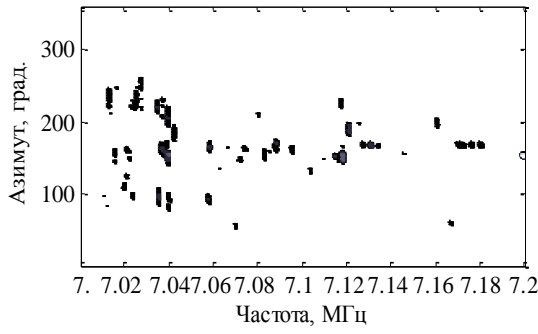


Рис. 3. Частотно-азимутальная панорама БД оценок ИРИ после цензурирования

3. Оценки азимута $\hat{\theta}_i$, выходящие за границы областей группировки, отбрасываются. Если для i -го частотного отсчета отброшено оценок менее установленного значения порога, то по оставшимся оценкам определяются средние значения азимута $\hat{\Theta}_{ik} = \arg \left[\sum \exp(j\hat{\theta}_{ik}) \right]$,

$$\hat{\theta}_{ik} \in [\delta_{k \min}, \delta_{k \max}], \quad \kappa = 1..d.$$

Сформированные оценки $\hat{\Theta}_{ik}$ называются оценками урезанного среднего и относятся к устойчивым оценкам. В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены частотно-азимутальные панорамы БД оценок азимута до и после цензурирования в соответствии с описанным алгоритмом.

Устранение аномальных оценок позволило повысить точность оценок азимута реальных ИРИ [2] и более наглядно представить их на панораме рис. 3.

IV. РАЗДЕЛЬНОЕ ПЕЛЕНГОВАНИЕ СИГНАЛОВ, РАПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ПО РАЗНЫМ ЛУЧАМ

Возможность разделения сигналов различных лучей основана на известном свойстве: сдвиг сигнала во времени τ приводит к изменению фазовой характеристики его спектра на величину $j\omega\tau$. Для разделения сигналов $L(k)$ лучей, требуется, чтобы размер АР $M > L(k)$ и в рассматриваемой частотной полосе присутствовал сигнал одного ИРИ.

В частотной области спектр сигнала k -го ИРИ (1) в m -ом канале приема на нулевой частоте записывается в виде:

$$x_{km}(\omega) = \sum_{l=1}^{L(k)} [b_{kl} s_k(\omega) \exp(-j\omega\tau_{kl}) \exp(j\varphi_{kl}) \times \exp(j\gamma_m(\theta_{kl}, \beta_{kl}))], \quad m=1, \dots, M$$

В матричной форме N отсчетов спектра k -го сигнала в M антеннах записываются в виде

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k^T(\omega_1) \\ \vdots \\ \mathbf{x}_k^T(\omega_N) \end{bmatrix} = SV(\tau)A \triangleq Q(\tau, \omega)A, \quad \text{в которой}$$

$$\mathbf{x}_k^T(\omega_i) = [x_{k1}(\omega_i) \quad \dots \quad x_{kM}(\omega_i)],$$

$S = \text{diag}(s_k(\omega_1), \dots, s_k(\omega_N))$ – диагональная матрица из отсчетов спектра сигнала, матрица $V(\tau) = [\mathbf{v}(\tau_1) \quad \dots \quad \mathbf{v}(\tau_{L(k)})]$ из векторов задержек $\mathbf{v}(\tau_l) = [\exp(-j\omega_1\tau_l) \quad \dots \quad \exp(-j\omega_N\tau_l)]^T$,

$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,M} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ a_{L(k),1} & \dots & a_{L(k),M} \end{bmatrix}$ – матрица отклика АР на направление прихода k -го сигнала. Столбцы матрицы $Q(\tau, \omega)$ образованы векторами $q(\tau_l) = Sv(\tau_l)$.

Матрица задержек $V(\tau)$ обладает свойством инвариантности к сдвигу. Если из первых $(N-\delta)$ строк $V(\tau)$ сформировать матрицу V_1 , а из последних строк $(N-\delta)$ матрицу V_2 , то для V_1 и V_2 справедливо равенство $V_2 = V_1\Phi$, в котором матрица $\Phi = \text{diag}(1, \exp(-j2\pi\delta\tau_2/N), \exp(-j2\pi\delta\tau_{L(k)})$, $1 \leq \delta < N$, δ – целое.

Матрица задержек $V(\tau)$ оценивается на основе сингулярного разложения прямоугольной матрицы $X = E\tilde{\Lambda}U^H$. Для нас представляют интерес левые сингулярные векторы E , соответствующие $L(k)$ ненулевым (значимым) сингулярным числам $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{L(k)}, \dots, \lambda_M)$, $\tilde{\Lambda} = \begin{bmatrix} \Lambda & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$. Так как $L(k) < M$, то существует матрица T размера $L(k) \times L(k)$, которая удовлетворяет равенству $E = SV(\tau)T$.

Матрицы $E_1 = S_1V_1T$ и $E_2 = S_2V_2T$, сформированные первыми $(N-\delta)$ и последними $(N-\delta)$ строками матрицы E , связаны между собой преобразованием $S_1E_2 = S_2E_1\Psi$, где $\Psi = T^{-1}\Phi T$ – оператор поворота, который отображает S_1E_2 в S_2E_1 . Диагональная матрица S_1 образована верхней левой подматрицей S , а диагональная матрица S_2 размера $(N-\delta) \times (N-\delta)$ нижней правой подматрицей S .

Из собственных чисел μ_l $l=1..L(k)$ оператора поворота Ψ вычисляются задержки $\tau_{lk} = -\frac{N \cdot \text{angle}(\mu_l)}{2\pi\delta}$.

В реальных условиях, при наличии шума Ξ в наблюдаемых данных $\tilde{X} = X + \Xi$, из сингулярного разложения доступны только оценки векторов \hat{E}_1 и \hat{E}_2 , которые формируются из $L(k)$ векторов \hat{E} , соответствующих $L(k)$ значимым сингулярным числам. Значимыми считаются сингулярные числа, превысившие заранее установленный порог.

Если спектр сигнала S полностью известен, то оценка $\hat{\Psi}$ вычисляется в виде $\hat{\Psi} = (S_2 \hat{E}_1)^\dagger S_1 \hat{E}_2$, † – символ псевдообратной матрицы.

При радиомониторинге спектр сигнала априорно неизвестен, но его можно считать гладким, так что $S_1 \approx S_2$. Тогда $E_2 \approx (S_1 V_1) T = E_1 T^{-1} \Phi T = E_1 \Psi$ и $\hat{\Psi} = \hat{E}_1^\dagger \hat{E}_2$ [3].

При многолучевом распространении КВ диапазона сигналы приходят с близких азимутальных направлений, но с различными углами места. Поэтому можно выделить из принятых данных сигнал первого луча, которому соответствует нулевая задержка, и оценить его направление прихода.

Оценка направления прихода сигналов, основанная на выделении одного луча заключается в следующем:

1. Сформировать матрицу X из N соседних отсчетов спектра, превысивших порог обнаружения. Число отсчетов спектра $N > M$ должно быть больше числа элементов АР.

2. Разложить матрицу \tilde{X} по сингулярным числам и векторам.

3. Выделить из левых сингулярных векторов \hat{E} разложения единственный вектор \hat{E}_0 , соответствующий первому сингулярному числу.

4. Вычислить оценку спектра сигнала $\hat{S} = \hat{E}_0^\diamond V(\tau = 0)$, соответствующего сингулярному числу с нулевой задержкой, $^\diamond$ – символ поэлементного произведения Шура–Адамара.

5. Вычислить максимально правдоподобную оценку $\hat{A} = V(\tau = 0)^H \hat{S}^H \hat{X}$ матрицы отклика АР $A = [A(1), \dots, A(m), \dots, A(M)]$, из которой с учетом известной конфигурации АР, сформировать оценки азимута и угла места.

На рис. 4 в логарифмическом масштабе изображен спектр фрагмента записи на частоте 11039 МГц. В записи присутствуют сигналы двух ИРИ. АР состояла из 7 антенн, расположенных в виде 60°-уголка.

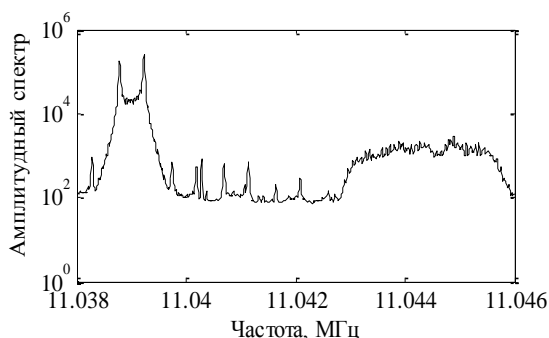


Рис. 4. Амплитудный спектр фрагмента реальной записи

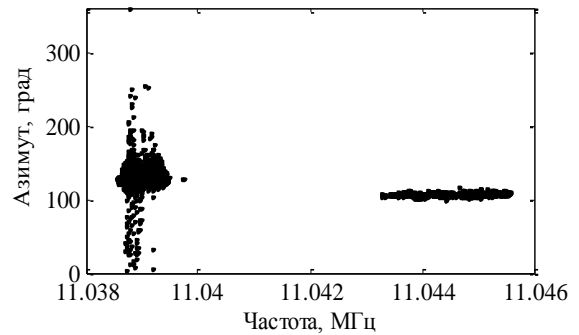


Рис. 5. Частотно-азимутальная панорама фазового алгоритма пеленгования

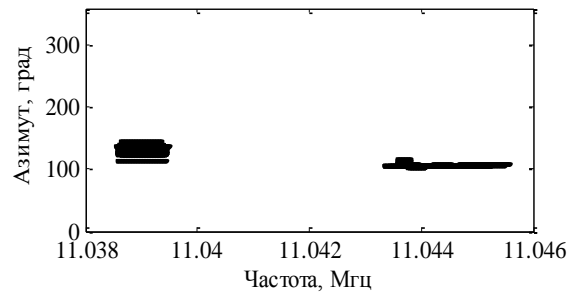


Рис. 6. Частотно-азимутальная панорама при пеленговании одного луча

На рис. 5 показаны оценки азимута, сформированные алгоритмом, основанным на вычислении разности фаз между антеннами. Среди оценок азимута ИРИ на частоте 11039 МГц присутствуют anomальные оценки, тогда как anomальные оценки ИРИ на частоте 11.044 МГц не наблюдались.

На рис. 6 представлены оценки азимута обоих ИРИ, сформированные по первому выделенному лучу. Видно, что anomальные оценки азимута, не наблюдаются ни для одного ИРИ.

Анализ сингулярных чисел спектра в диапазоне 11.043-11.045 МГц показал наличие в принятых данных трех лучей, которые не привели к образованию anomальных ошибок азимута при обработке стандартным алгоритмом фазового пеленгования (рис. 5).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оба рассмотренных метода обеспечивают устойчивость оценок азимута ИРИ в условиях многолучевого распространения сигналов.

При цензурировании anomальных оценок не накладываются ограничения на число сигналов ИРИ, одновременно присутствующих в одних и тех же частотных отсчетах. Этот метод представляет собой вторичную обработку оценок радиомониторинга и не требует реализации в реальном времени.

Разделение лучей при обработке интересующего участка спектра возможно только при наличии в нем сигнала одного ИРИ. Это подход целесообразно применять для участков радиочастотного спектра, в которых

наблюдается значительное число аномальных оценок направления и установлено наличие одного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гутин В.С., Шевченко М.Е. Возникновение аномальных оценок направлений источников радиоизлучения в условиях многолучевого распространения // 3-я Всеросс. конф. "Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации

информации" (РСПОВИ-2013). Смоленск, 26–28 июня 2013 г, Сб. докл. М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2013. С 166–169.

- [2] Методы цензурирования аномальных оценок азимута в малоэлементных антенных решетках / М.Е. Шевченко, Д.О. Задирако, Д.Н. Файзуллина, В.Н. Малышев, Н.С. Стенюков, М.С. Шмырин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 5–11.
- [3] Swindlehurst L.A., Gunthe J.H. Methods for blind equalization and resolution of overlapping echoes of unknown shape // IEEE Trans. sig. proc. 1999. Vol. SP-47, № 5. P. 1245–1254.