



УДК 621.396.965

М. Е. Шевченко, В. Н. Малышев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
"ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Д. О. Задирако, Д. Н. Файзуллина, Н. С. Стенюков, М. С. Шмырин
АО «НИИ "Вектор"» (Санкт-Петербург)

Методы цензурирования аномальных оценок азимута в малоэлементных антенных решетках¹

При формировании оценок азимута источников радиоизлучений (ИРИ) комплексами радиомониторинга возникают аномальные оценки, обусловленные многолучевым распространением и перекрытием спектров сигналов, принадлежащим разным ИРИ. Предложены методы автоматического определения и цензурирования аномальных оценок обоих типов. Цензурирование аномальных оценок, обусловленных многолучевым распространением сигналов, заключается в определении области группировки оценок по гистограмме и отбрасыванию оценок, не попавших в эту область. Цензурирование аномальных оценок, обусловленных перекрытием спектров сигналов, основано на корреляционном подходе и сводится к определению диапазона, образованного соседними частотными отсчетами, для которых оценки азимута сильно коррелированы между собой.

Применение методов продемонстрировано результатами статистического имитационного моделирования и результатами обработки данных реальных комплексов радиомониторинга.

Аномальная оценка азимута, цензурирование, радиомониторинг, гистограмма, многолучевость, угловые координаты источника радиоизлучения

При первичном радиомониторинге для каждого частотного отсчета, в котором обнаружен сигнал источника радиоизлучения (ИРИ), формируются оценки угловых координат (УК) ИРИ в виде оценок 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, и его УК.

Кроме достоверных оценок УК ИРИ в базе данных присутствуют аномальные оценки азимута, обусловленные многолучевым распространением сигналов, вызванных ионосферными переизлучениями, и перекрытием спектров соседних сигналов при приеме и обработке данных от малоэлементных антенных решеток (АР), не позволяющих использовать алгоритмы разделения сигналов, перекрывающихся по спектру.

При многолучевом распространении фаза суммарного колебания, образованного сложением различных лучей в антенне, определяется значениями фаз и амплитуд колебаний каждого луча. Лучи падают на АР с произвольными углами места, но имеют близкие азимутальные направления. При сложении в антеннах хотя бы двух сильных примерно одинаковых по амплитуде лучей, у которых разность начальных фаз колебаний составляет $160...200^\circ$, происходит неконтролируемое изменение фазы результирующего радиосигнала, состоящего из многолучевых компонентов. В результате разности фаз колебаний между отдельными антеннами решетки не соответствуют направлениям прихода сигнала от ИРИ и появляется аномальная оценка азимута [1].

Ошибки, обусловленные перекрытием спектров сигналов, возникают при использовании АР, содержащей недостаточное число элементов. Кроме того, для разделения таких сигналов требуется использовать конфигурацию АР, инвариантную к сдвигу, по каждой координате.

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.578.21.0242 от 26 сентября 2017 г.).

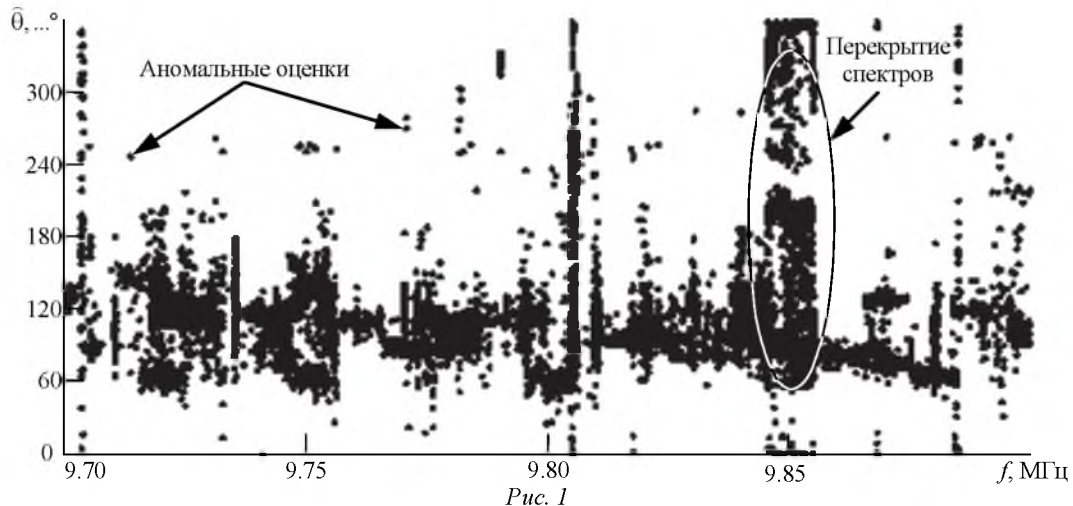


Рис. 1

В качестве примера на рис. 1 приведена частотно-азимутальная панорама обработки записей реальных сигналов при трехэлементной АР. В панораме присутствуют аномальные оценки, обусловленные многолучевым распространением и перекрытием спектров соседних сигналов.

Аномальные оценки азимута не соответствуют реальным ИРИ, засоряют базу данных и снижают точность оценки УК ИРИ при вторичной обработке. Для предотвращения указанных артефактов аномальные оценки необходимо устранять в процессе работы комплекса радиомониторинга, а для сокращения объема базы данных – оценивать полосу частот, занимаемую ИРИ, и постоянно уточнять его УК.

Алгоритм цензурирования аномальных оценок, обусловленных многолучевостью. Результаты обработки реальных записей сигнала и баз данных, полученных от эксплуатирующихся комплексов, и статистического имитационного модели-

рования алгоритмов обнаружения и фазового пеленгования в условиях многолучевого распространения, выполненные авторами настоящей статьи, 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 [1], [2].

Единственным способом борьбы с аномальными оценками при невозможности предотвращения их появления является цензурирование [3]. 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. 2), для предотвращения разрыва при переходе $360 \dots 0^\circ$ или от -180 к 180° .

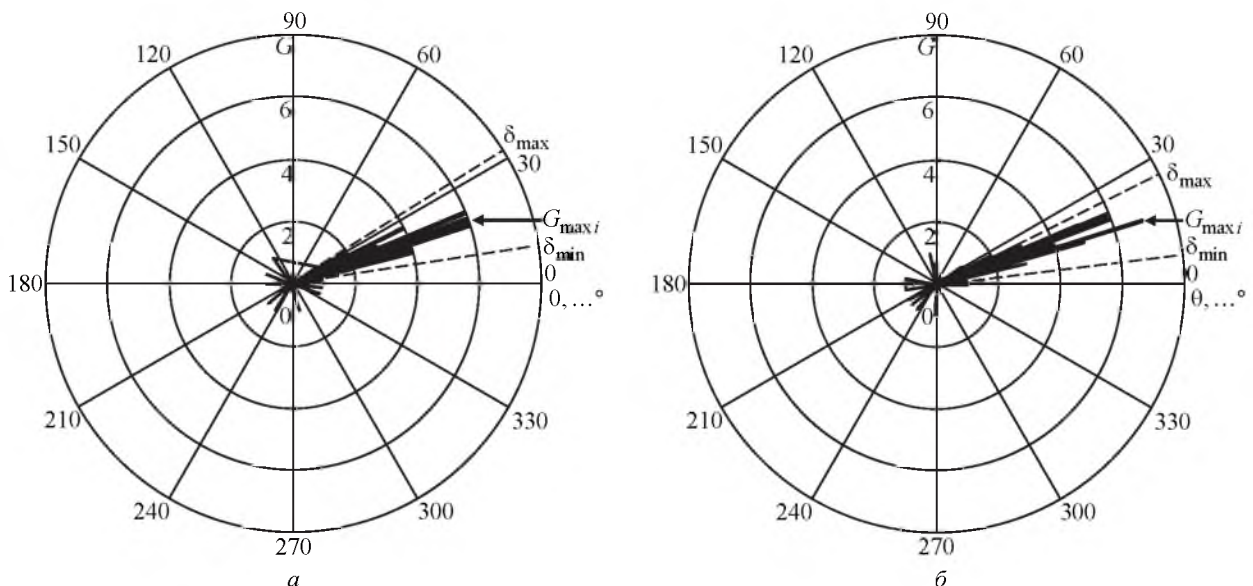


Рис. 2

Для автоматического определения области группировки предлагается следующая стратегия:

1. Для каждого i -го частотного отсчета, в котором обнаружен сигнал, по результатам K измерений $\hat{\theta}_i = [\hat{\theta}_{i1}, \dots, \hat{\theta}_{iK}]$ строится гистограмма оценок $G(\hat{\theta}_i)$ азимута в полярных координатах.

2. Определяются границы основного лепестка гистограммы δ_{\min} и δ_{\max} .

2.1. Находится максимальное значение гистограммы $G_{\max i} = \max[G(\hat{\theta}_i)]$.

2.2. Если максимальное значение $G_{\max i}$ соответствует нескольким элементам вектора $\hat{\theta}_i$ (рис. 2, а), то фиксируются крайние значения углов α_{\min} и α_{\max} , соответствующие этому значению. Определяются границы главного лепестка $\delta_{\min} = \alpha_{\min} - \Delta$ и $\delta_{\max} = \alpha_{\max} + \Delta$ (Δ – допустимое угловое отклонение) и его среднее положение $\alpha_0 = (\alpha_{\min} + \alpha_{\max})/2$.

2.3. Если максимальное значение $G_{\max i}$ соответствует единственному элементу вектора $\hat{\theta}_i$, равному α (рис. 2, б), то границы главного лепестка принимаются равными $\delta_{\min} = \alpha - \Delta$ и $\delta_{\max} = \alpha + \Delta$, а его направление $\alpha_0 = \alpha$.

3. Оценки азимута $\hat{\theta}_{ik}$, $k \in 1..K$, выходящие за определенные границы лепестка, отбрасываются. Если для i -го частотного отсчета отброшено менее 30 %, по оставшимся оценкам определяется среднее значение азимута

$$\hat{\Theta}_i = \arg \left[\sum_k \exp(j\hat{\theta}_{ik}) \right], \quad \hat{\theta}_{ik} \in [\delta_{\min}, \delta_{\max}].$$

Сформированная оценка $\hat{\Theta}_i$ называется оценкой урезанного среднего и относится к устойчивым оценкам [4].

Цензурирование аномальных оценок, обусловленных перекрытием спектров сигналов, и определение ширины занимаемой полосы частот ИРИ. Оценки азимута в частотных отсчетах спектра сигнала одного ИРИ в отсутствие многолучевости при высоком отношении "сигнал/шум" сильно взаимно коррелированы. Это свойство используется для определения полосы частот сигнала, принадлежащего одному ИРИ.

Исходными данными является диапазон частотных отсчетов $i \in [m, n]$, в котором обнаружен сигнал. Для указанного диапазона заранее определяются усеченные оценки среднего азимута

$\hat{\Theta}_m \dots \hat{\Theta}_n$, из которых формируется комплексный вектор $\mathbf{X} = [e^{j\hat{\Theta}_m}, \dots, e^{j\hat{\Theta}_n}]$.

Информация об угловой корреляции между отсчетами рассматриваемого диапазона заключена в матрице угловых отклонений $C = \arg(\mathbf{X}^H * \mathbf{X})$, где "H" – символ эрмитового сопряжения; "*" – символ скалярного произведения.

Определим эффективную полосу частот, которую достоверно занимает сигнал одного ИРИ, как диапазон отсчетов $\tilde{m} \dots \tilde{n}$, в котором угловое отклонение C_{kl} , $k, l = \tilde{m} \dots \tilde{n}$ между всеми отсчетами диапазона не превышает значения φ , установленного исходя из инструментальной точности пеленгования.

Для удобства обработки из матрицы C формируется бинарная матрица $T = [T_{kl}]$,

$$T_{kl} = \begin{cases} 1, & |C_{kl}| \leq \varphi; \\ 0, & |C_{kl}| > \varphi. \end{cases}$$

В зависимости от наличия или отсутствия перекрытия спектров сигналов матрица имеет вид, показанный на рис. 3. Отсутствию перекрытия спектров соответствует рис. 3, а, а наличию – рис. 3, б.

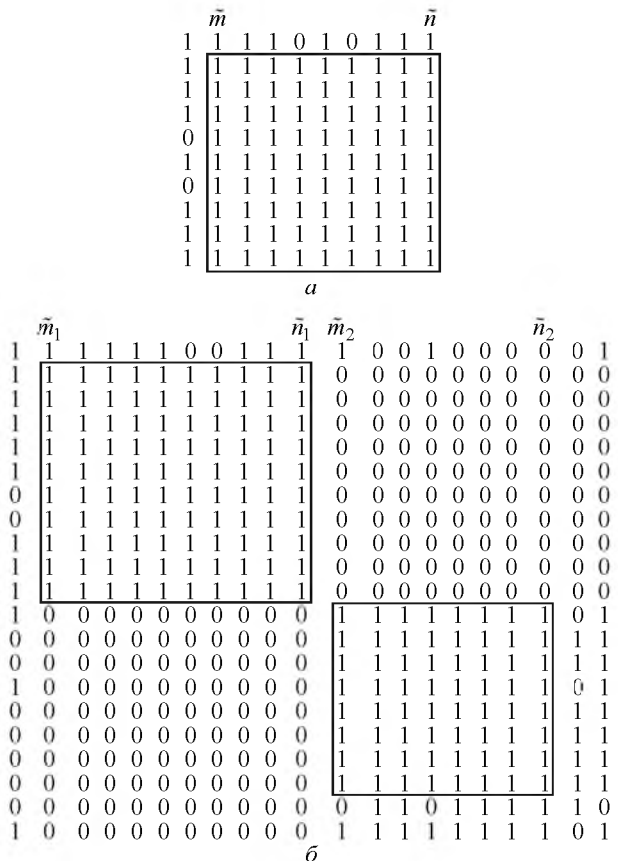


Рис. 3

Для определения полосы частот, занимаемой сигналом одного ИРИ, требуется найти в матрице T непересекающиеся друг с другом квадратные участки, состоящие из одних единиц. Первый отсчет \tilde{m} и последний отсчет \tilde{n} найденного квадратного участка определяют оценки границ полосы частот, занимаемой сигналом. Для указанной полосы частот записываются оценки азимута $\hat{\Theta}_i$, $i \in \tilde{m} \dots \tilde{n}$. Оценка УК ИРИ

$$\hat{\Theta}_{m..n} = \arg \left[\sum_{i=\tilde{m}}^{\tilde{n}} \exp(j\hat{\Theta}_i) \right]$$

вычисляется по всем оценкам азимута $\hat{\Theta}_i$, относящимся к оцененной полосе частот.

Эффективная оценка полосы частот получается заниженной по сравнению с фактической, так как:

- могут быть отброшены крайние отсчеты, для которых оценка усеченного среднего вследствие меньшего отношения "сигнал/шум" является смещенной;
- отбрасываются отсчеты в области перекрытия спектров.

Однако отбрасывание слабокоррелированных между собой отсчетов обеспечивает оценке УК ИРИ устойчивость.

Следует отметить, что при обнаружении и оценивании направлений прихода сигналов типа цифровой частотной модуляции или сигналов с сильно изрезанным спектром могут быть сформированы оценки нескольких полос с близкими направлениями прихода, соответствующих одному ИРИ. Совместный анализ амплитудного спектра и вынесенных оценок $\hat{\Theta}_{\tilde{m}.. \tilde{n}}$ позволяет отнести их к одному или к различным ИРИ.

Результаты исследования. На рис. 4, *a* приведена модель амплитудного спектра смеси сигналов ИРИ $S(f_s)$, где частота задана в условных единицах – номерах отсчетов ДПФ.

Сигнал ИРИ1 задан эталонным. Он не подвергается многолучевому распространению и не перекрывается по спектру с другими сигналами. Перекрывание по спектру имитировано попарно для сигналов ИРИ2 и ИРИ3, ИРИ4 и ИРИ5, ИРИ6 и

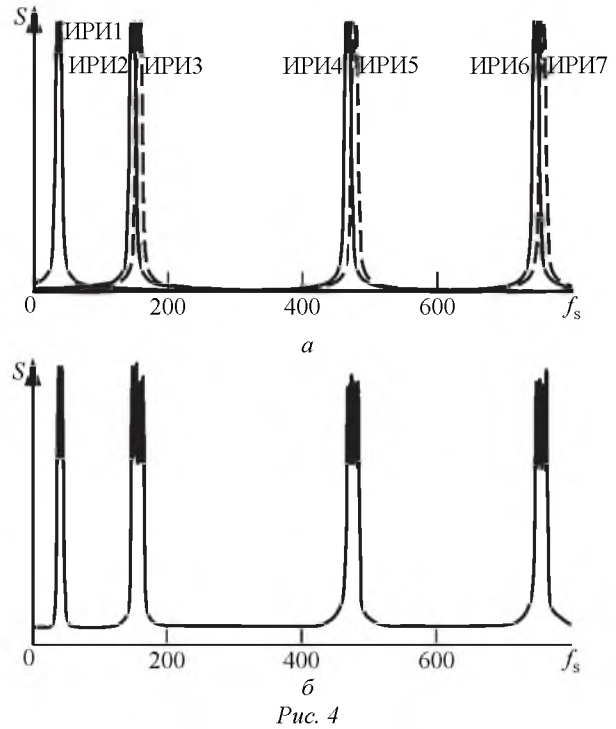


Рис. 4

ИРИ7. Сигналы ИРИ2–ИРИ7 также подвергаются многолучевому распространению. В таблице заданы азимуты ИРИ и занимаемая полоса частот в номерах отсчетов ДПФ $m..n$. Угол места для всех сигналов при многолучевом распространении принимал случайные значения от 0 до 60°.

На рис. 4, *б* приведен накопленный по $K = 30$ реализациям амплитудный спектр смеси сигналов с шумом, по которому проводится обнаружение сигналов ИРИ.

Частотно-азимутальная панорама рис. 5, *a* построена по оценкам азимута, сформированным алгоритмом совместного обнаружения и пеленгования [5] при трехэлементной АР. На ней присутствуют аномальные оценки, обусловленные многолучевым распространением и перекрытием спектров соседних сигналов. На рис. 5, *б* показана частотно-азимутальная панорама после цензурирования аномальных оценок, обусловленных многолучевым распространением. Загрязненность аномальными оценками панорамы рис. 5, *б* существенно меньше, чем на рис. 5, *a*, но присутствуют аномальные оценки, обусловленные перекрытием спектров

Параметр	Номер ИРИ						
	1	2	3	4	5	6	7
$m..n$	32...47	140...155	150...167	460...476	470...488	740...757	749...767
$\tilde{m}.. \tilde{n}$	37...47	147...155	158...167	466...476	478...488	744...757	757...767
θ, \dots°	0	15	130	50	70	100	108
$\hat{\Theta}_{m..n}, \dots^\circ$	0.8	15.3	130.5	51.0	69.4	100.7	107.5

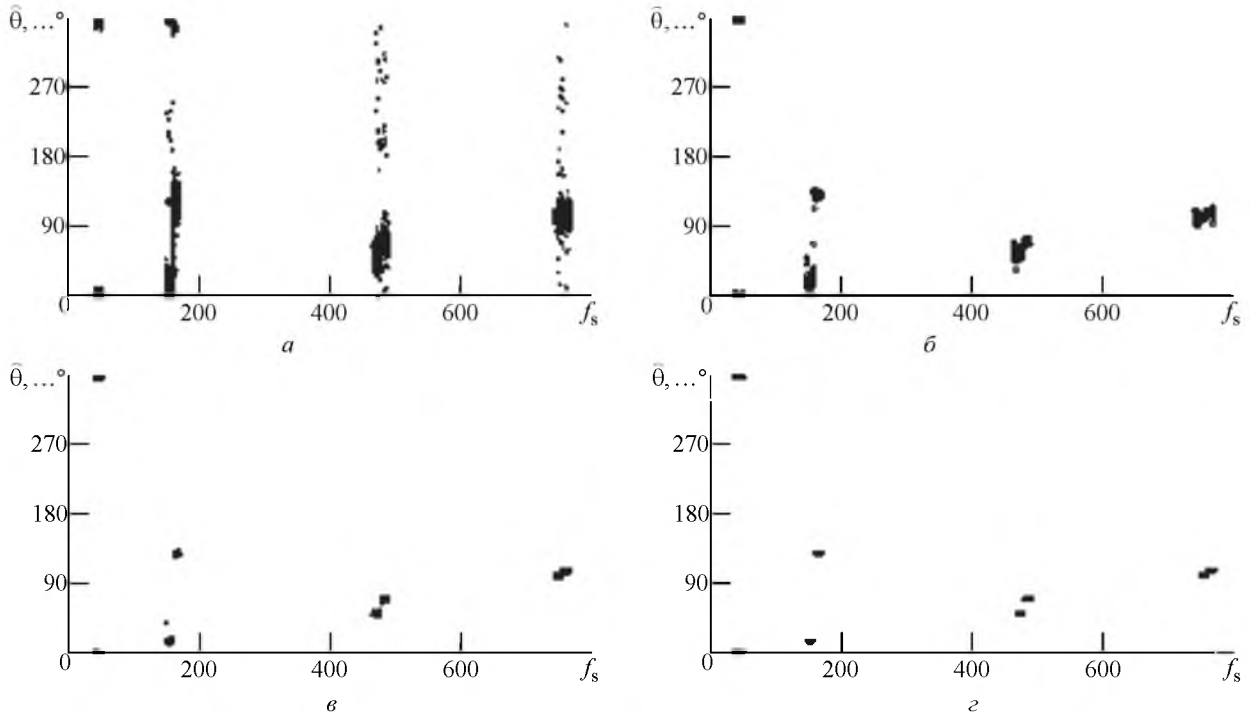


Рис. 5

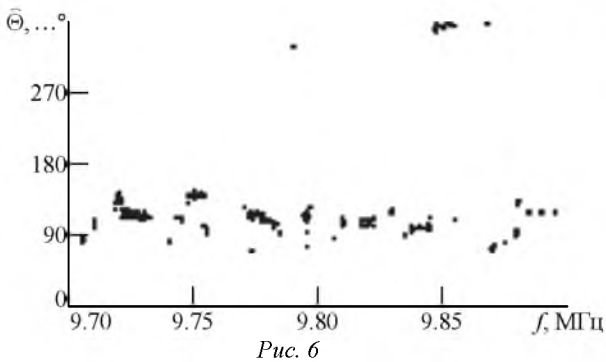


Рис. 6

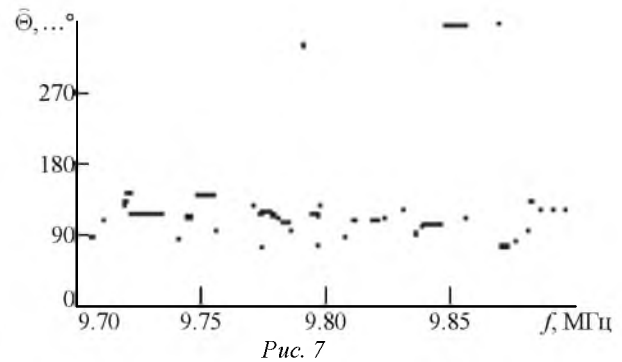


Рис. 7

соседних сигналов. Рис. 5, в представляет частотно-азимутальную панораму после цензурирования аномальных оценок из-за перекрытий спектров.

На рис. 5, г изображены оценки $\bar{\Theta}_{\tilde{m} \dots \tilde{n}}$ УК ИРИ в оцененной полосе частот. Значения оценок и границ полос $\tilde{m} \dots \tilde{n}$, занимаемых сигналами ИРИ, приведены в таблице.

Оценки азимута базы данных, отображенные на рис. 1, обрабатывались в соответствии с описанной методикой цензурирования аномальных оценок. Частотно-азимутальная панорама после цензурирования аномальных значений базы данных показана на рис. 6, а оценки азимута ИРИ в полосе оцененных частот приведены на рис. 7.

Предложенная методика вторичной обработки оценок азимута, формируемых при радиомониторинге, с исключением аномальных оценок, продемонстрировала свою эффективность при статистическом имитационном моделировании и обработке результатов реальных данных.

Рассмотренная методика цензурирования аномальных оценок применима и при использовании M -элементных АР и разработанных под них алгоритмов обнаружения и оценивания УК ИРИ, позволяющих разделить сигналы, перекрывающиеся по спектру. В гистограммах будут присутствовать несколько зон группировки оценок. Число областей группировки определяется числом выносимых оценок для данного частотного отсчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гутин В. С., Шевченко М. Е. Возникновение аномальных оценок направлений источников радиоизлу-

чения в условиях многолучевого распространения // 3-я Всерос. конф. "Радиоэлектронные средства полу-

чения, обработки и визуализации информации" (РСПОВИ–2013): сб. докл. Смоленск, 26–28 июня 2013 г. М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2013. С. 166–169.

2. Шевченко М. Е. Оценивание направлений прихода сигналов в условиях многолучевого распространения // 4-я Всерос. конф. "Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации" (РСПОВИ–2014): сб. докл. Нижний Новгород, 24–26 сент. 2014 г. М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2014. С. 165–169.

3. Устойчивые статистические методы оценки данных / под ред. Р. Л. Лонера, Г. Н. Уилкинсона; пер. с англ. М: Машиностроение, 1984. 232 с.

4. Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 304 с.

5. Шевченко М. Е., Чемаров А. О. Обнаружение и оценивание параметров источников радиоизлучения в широкой полосе обзора. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 136 с.

Статья поступила в редакцию 17 октября 2017 г.

Для цитирования: Методы цензурирования аномальных оценок азимута в малоэлементных антенных решетках / М. Е. Шевченко, В. Н. Мальшев, Д. О. Задирако, Д. Н. Файзуллина, Н. С. Стенюков, М. С. Шмырин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 5–11.

Шевченко Майя Евгеньевна – кандидат технических наук (1997), доцент (2002) кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 45 научных работ. Сфера научных интересов – прием и обработка радиосигналов; обнаружение, оценивание и пеленгование сигналов; частотный радиомониторинг; цифровая обработка сигналов. E-mail: m_e_shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru

Мальшев Виктор Николаевич – доктор технических наук (2000), профессор (2004), декан факультета радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – численные методы; СВЧ-техника; антенны; информационные сети; информационная безопасность. E-mail: vm@etu.ru

Задирако Дмитрий Олегович – инженер (2010) по специальности "Радиоэлектронные системы", инженер АО «НИИ "Вектор"» (Санкт-Петербург). Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – прием и обработка радиосигналов; цифровая обработка сигналов; обнаружение и пеленгование сигналов. E-mail: dozadirako@gmail.com

Файзуллина Дилара Наиловна – магистр (2013) по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", инженер АО «НИИ "Вектор"» (Санкт-Петербург). Автор семи научных публикаций. Сфера научных интересов – прием и обработка радиосигналов, цифровая обработка сигналов; обнаружение и пеленгование сигналов. E-mail: dilara89@yandex.ru

Стенюков Николай Сергеевич – кандидат технических наук (1974), ведущий научный сотрудник АО «НИИ "Вектор"» (Санкт-Петербург). Автор 35 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов в радиомониторинге. E-mail: nsten@mail.ru

Шмырин Михаил Сергеевич – радиоинженер (2005, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), начальник отдела АО «НИИ "Вектор"» (Санкт-Петербург). Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – аппаратно-программные средства в радиомониторинге. E-mail: kotovski@list.ru

M. E. Shevchenko, V. N. Malyshev
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

D. O. Zadirako, D. N. Faizullina, N. S. Stenyukov, M. S. Shmyrin
JSC «SRI "Vector"» (Saint Petersburg)

Methods for Anomalous Azimuth Estimate Censoring in Small Element Antenna Arrays

Abstract. There are abnormal azimuth estimates caused by multipath propagation and adjacent signal spectra overlapping in azimuth estimates of radio source created by radio monitoring complexes in broad band. In case of multipath propagation, the radio signal phase formed by addition of multipath components in antenna depends on their amplitudes and phases. If amplitudes of multipath components are approximately identical, and the initial phase difference is from 160 to 200° then the radio signal phase in each antenna may have abnormal value which does not correspond to the direction of multipath component arrival and results in abnormal azimuth estimates. When adjacent signal spectra are overlapping there appear the abnormal estimates depending on the amplitude and azimuth of spectral component signals from different radio sources. Determination and censoring methods are offered for the both types of abnormal estimates. Censoring of the abnormal estimates caused by a multipath propagation involves determination of estimation histogram are-

as where estimates are grouped or deleted in case they do not belong to this area. Censoring of abnormal estimates caused by adjacent signals spectra overlapping is based on correlative approach, and consists in determination of the range formed by adjacent frequency samples, for which azimuth estimates are strongly correlated between themselves. Application of proposed methods is shown by statistical simulation modeling results and radio monitoring complex data processing results.

Key words: Anomalous Azimuth Estimation, Censoring, Radio Monitoring, Histogram, Multipath, Radio Source Corner Coordinates

REFERENCES

1. Gutin V. S., Shevchenko M. E. Anomalous Estimation of Radio Emission Source Directions under Multipath Conditions. *3d Vseross. konf "Radioelektronnyye sredstva polucheniya, obrabotki i vizualizatsii informatsii, 26–28 iyunya 2013 g., Smolensk* [3d All-Russian Conference "Radioelectronic Means of Information Obtaining, Processing and Visualization"]. June 26–28, 2013, Smolensk, pp. 166–169.
2. Shevchenko M. E. Estimation of Signal Arrival Directions under Multipath Conditions. *4th Vseross. konf. "Radioelektronnyye sredstva polucheniya, obrabotki i vizualizatsii informatsii, 24–26 sent. 2014 g., Nizhnii Novgorod* [4th All-Russian Conference "Radioelectronic Means of
- Information Obtaining, Processing and Visualization"]. Sept. 24–26, 2014, Nizhny Novgorod, pp. 165–169.
3. Launer R. L., Wilkinson G. N. Robustness in Statistics. New York, Academic press, 1979, 312 p.
4. Huber P. J. Robustness Statistics. New York, John Wiley and Sons, 1981, 320 p.
5. Shevchenko M. E., Chemarov A. O. *Obnaruzhenie i otsenivanie parametrov istochnikov radioizlucheniya v shirokoi polose obzora* [Detection and Estimation of Radio Emission Source Parameters in a Wide Swath]. SPb, Izd-vo SPbGETU "LETI", 2011, 136 p.

Received October, 17, 2017

For citation: Shevchenko M. E., Malyshev V. N., Zadirako D. O., Faizullina D. N., Stenyukov N. S., Shmyrin M. S. Methods for the Censoring of Anomalous Azimuth Estimates in Small Element Antenna Arrays. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 5, pp. 5–11. (In Russian)

Maya E. Shevchenko – Ph.D. in engineering (1997), Associate Professor (2002) of the Department of Radio Electronics Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 45 scientific publications. Area of expertise: radio signals reserving and processing; frequency radio monitoring; digital signal processing. E-mail: m_e_shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru

Victor N. Malyshev – D.Sc. in engineering (2000), Professor (2004), the Dean of faculty of Radio Equipment and Telecommunications of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: numerical methods; microwave engineering; antennas; information networks; information security. E-mail: vm@etu.ru

Dmitry O. Zadirako – Dipl.-engineer in Radio Electronic Systems (2010, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"), the engineer of JSC «SRI "Vector"» (Saint Petersburg). The author of six scientific publications. Area of expertise: radio signals reserving and processing; digital signal processing; signal detection and finding. E-mail: dozadirako@gmail.com

Dilara N. Fayzullina – Master of Science in Information Technologies and Communication Systems (2013), the engineer of JSC «SRI "Vector"» (Saint Petersburg). The author of seven scientific publications. Area of expertise: radio signals reserving and processing; digital signal processing; signal detection and finding. E-mail: dilara89@yandex.ru

Nicolay S. Stenyukov – Ph.D. in Engineering (1974), the leader scientist of JSC «SRI "Vector"» (Saint Petersburg). The author of 35 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing in radio monitoring. E-mail: nsten@mail.ru

Mikhail S. Shmyrin – Dipl.-engineer in Radio Engineering (2005, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"), the chief of the Department of JSC «SRI "Vector"» (Saint Petersburg). The author of four scientific publications. Area of expertise: hardware and software in the radio monitoring. E-mail: kotovski@list.ru