

УДК 621.396.9

УСТРАНЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ОЦЕНОК НАПРАВЛЕНИЙ ПРИХОДА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В МНОГОСИГНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ ПЕЛЕНГОВАНИЯ

М.Е. Шевченко¹, В.Н. Малышев¹,
С.С. Соколов¹, А.В. Осетров¹, А.С. Черепанов²

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ»*

²*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**

При пеленговании перекрывающихся по спектру источников широкополосного сигнала в спектральной области при фиксированной конфигурации антенной решетки требуется устранение неоднозначности амплитудно-фазовых распределений и разностей фаз, соответствующих различным спектральным отсчетам. Составляющим спектра одного и того же сигнала соответствуют неодинаковые значения расстояния в длинах волн между элементами антенной решетки, приводящие к неоднозначности оценок в высокочастотной части спектра. В работе предложен метод устранения неоднозначности, совместимый с многосигнальным режимом пеленгования на основе методов подпространств: MUSIC и ESPRIT. Устранение неоднозначности проведено коррекцией разностей фаз между антеннами для каждого спектрального отсчета с учетом предварительного соотнесения неоднозначных амплитудно-фазовых распределений в многосигнальном режиме к однозначным, полученным для низкочастотной области спектра, по максимуму корреляции. Корректное амплитудно-фазовое распределение для каждого спектрального отсчета восстанавливается из скорректированных разностей фаз между антеннами и используется в корреляционных алгоритмах пеленгования. Представлены результаты имитационного моделирования по пеленгованию пяти источников звукового широкополосного сигнала с помощью квадратной шестнадцатиеlementной антенной решетки с внутренним заполнением, полученные на основе предложенного метода устранения неоднозначности в многосигнальном режиме по ESPRIT.

Ключевые слова: широкополосный сигнал, точечное пеленгование в спектральной области, устранение неоднозначности оценок азимута и угла места, антенная решетка, многосигнальный режим пеленгования, MUSIC, ESPRIT.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-64-73

Введение

При пеленговании широкополосных сигналов с помощью M -элементной антенной решетки (АР) при нарушении классического условия узкополосности,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме «Мультимодальный комплекс контроля воздушного пространства аэропорта» (Соглашение о предоставлении субсидии федерального бюджета на развитие кооперации государственного научного учреждения и организации реального сектора экономики в целях реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2023-007 от 10.02.2023) и в рамках Постановления Правительства РФ от 09 апреля 2010 г. № 218. Работа выполнена на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

из-за изменения $\Delta'(f) = \Delta/\lambda = \Delta f/c$ – расстояния в длинах волн между соседними антеннами, разнесенными на Δ , недопустимо формировать оценку направлений прихода сигнала целиком по всему спектру, поскольку проявляется неоднозначность амплитудно-фазовых распределений (АФР) разных спектральных составляющих.

Изменение расстояний в длинах волн для максимальной $f_{\max}$ и минимальной $f_{\min}$ частот $\Delta'(f_{\max})/\Delta'(f_{\min}) > 1$ может быть существенным. Для узкополосного радиосигнала $\Delta'(f_{\max})/\Delta'(f_{\min}) \approx 1$. Точечное пеленгование в каждом спектральном отсчете (СО) позволяет избежать влияния зависимости $\Delta'(f)$, $f \in [f_{\min}, f_{\max}]$ на формирование оценок азимута θ и угла места β . При $\Delta'(f) < 0,5$ АФР отсчетов – однозначное и формируются однозначные оценки в низкочастотной части спектра, но точность оценок при $\Delta'(f) < 0,3$ может быть низкой и недостаточной, а при $\Delta'(f) > 0,5$ появляется неоднозначность оценок, требующая устранения. Спектральные отсчеты, для которых $\Delta'(f) < 0,5$, называются далее однозначными СО, соответственно СО, у которых $\Delta'(f) > 0,5$, – неоднозначными.

Для решения этой задачи предложено использовать виртуальные АР, образовывать подрешетки из имеющейся АР, для которых расстояние в определенном диапазоне частот позволяет сформировать однозначные оценки, преобразовывать данные произвольного СО на однозначный СО с помощью фокусирующих матриц [1–6]. Однако проблема состоит в поиске этих матриц в условиях априорной неопределенности.

В высокочастотных СО точность формируемых с устранением неоднозначности оценок возрастает по сравнению с точностью оценок для однозначных СО.

В односигнальном режиме неоднозначность устраняется просто, поскольку все выносимые оценки в разных СО соответствуют только одному ИРИ.

Для многосигнального режима, предполагающего наличие нескольких перекрывающихся по спектру сигналов, для всех неоднозначных СО требуется предварительное установление соответствия вынесенных оценок нескольких источников оценкам в однозначных СО. Решение этой задачи рассмотрено далее.

1. Точечное пеленгование

Термин *точечное пеленгование* [7] означает формирование оценок азимута θ и угла места β для каждого n -го СО наблюдаемых данных от M антенн. n -й отсчет соответствует частоте $f_n = f_{\min} + (n-1)(f_{\max} - f_{\min})/N$, $n = \overline{1, N}$, N – число СО.

Исходными данными для многосигнального режима при точечном пеленговании является матрица из n -х СО, сформированных по $K > M$ наблюдениям:

$$Z_n = \begin{bmatrix} \frac{(y_{1n})_1}{(\hat{\delta}_1)_1} & \dots & \frac{(y_{1n})_K}{(\hat{\delta}_1)_K} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{(y_{mn})_1}{(\hat{\delta}_m)_1} & \dots & \frac{(y_{mn})_K}{(\hat{\delta}_m)_K} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{(y_{Mn})_1}{(\hat{\delta}_M)_1} & \dots & \frac{(y_{Mn})_K}{(\hat{\delta}_M)_K} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\hat{\delta}_m$ – оценка уровня шума в m -канале приема, $m = \overline{1, M}$.

Каждый СО $y_{mn} = \sum_{i=1}^{d_n} b_i S_n^i a_{mn}(\theta_i, \beta_i) + \zeta_{mn}$, $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, где d_n – число сигнальных составляющих от разных ИРИ в n -м отсчете; b_i – энергетический параметр сигнала; S_n^i – отсчет спектра i -го сигнала; $a_{mn}(\theta_i, \beta_i)$ – отклик m -й антенны на направление прихода i -го сигнала θ_i, β_i для n -го отсчета. Много-сигнальный режим основан на разложении матрицы $R_Z = E \text{diag}(\Lambda) E^H$ по собственным векторам $E = [E_1 \dots E_M]$, $E_m = [E_{1m} \dots E_{Mm}]^T$, $m = \overline{1, M}$, и числам $\Lambda = [\lambda_1 \dots \lambda_M]$, $\lambda_1 > \dots > \lambda_M$.

Число собственных чисел (СЧ), превысивших установленный по шумовым СЧ порог, соответствует числу сигналов, присутствующих в СО $\hat{d}_n$.

Формирование оценок $\hat{\theta}_{ni}$, $i = \overline{1, \hat{d}_n}$, в зависимости от оцененного числа сигналов и конфигурации АР проводится на основе методов MUSIC или ESPRIT [8].

2. Устранение неоднозначности

В многосигнальном режиме при наличии нескольких сигналов требуется установить взаимное соответствие фактических АФР АР $\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i) = \hat{a}_{mn}(\theta_i, \beta_i) \times \hat{a}_{1n}^*(\theta_i, \beta_i)$, $m = \overline{2, M}$, $n = \overline{1, N}$, разных СО каждого сигнала.

При ESPRIT фактическое АФР $\hat{g}_{mn}$ определяется СЧ оператора поворота, при MUSIC как ожидаемое АФР, определяющее сигнальное подпространство, ортогональное шумовому подпространству, т. е. при котором достигаются максимумы пеленгационной характеристики меры MUSIC.

Ожидаемое АФР $a_{mn}(\theta, \beta)$, $m = \overline{1, M}$, $\theta \in [0 \dots 360^\circ]$, $\beta \in [0 \dots 90^\circ]$, определяется конфигурацией АР, зависит от частоты (номера СО) и направлений прихода сигнала θ, β и может быть задано аналитически, рассчитано с помощью электродинамического моделирования, оценено калибровкой.

Для однозначных СО ($\Delta'_n = \Delta'(f_n) < 0,5$) вычисляются оценки $\hat{\theta}_{ni}$, $\hat{\beta}_{ni}$, $i = \overline{1, \hat{d}_n}$, и вычисляются усредненные оценки $\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i$ по однозначным СО для повышения точности при расчете ожидаемого распределения для любого СО: $g_{mn}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i) = a_{mn}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i) a_{1n}^*(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i)$. Соответствие устанавливается максимумом корреляции $\max(\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i) g_{mn}^*(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i))$ между $\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i)$ и $g_{mn}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i)$.

Устранение неоднозначности для СО при $\Delta'(f) \geq 0,5$ проводится аналогично устранению неоднозначности в многобазисных линейных АР [9]:

$$\arg(\tilde{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i)) = \arg(\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i)) + 2\pi \left[\frac{\arg(g_{mn}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i)) \frac{\Delta'_n}{\Delta'_{n_0}} - \arg(\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i))}{2\pi} \right], \quad (2)$$

где $g_{mn_0}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i) = a_{mn_0}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i) a_{1n_0}^*(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i)$ – эталонное распределение для выбранного однозначного СО n_0 , $[\]$ – ближайшее целое. Скорректированное АФР $\tilde{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i) = \exp[j \arg(\tilde{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i))]$.

Однозначные оценки $\tilde{\theta}_{ni}$ вычисляются с учетом конфигурации АР подстановкой вычисленного по (2) $\arg(\tilde{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i))$ в соответствующее выражение, или поиском максимума корреляции скорректированного АФР с ожидаемым $\hat{\theta}_i, \hat{\beta}_i = \max_{\theta \in [0...360^\circ], \beta \in [0...90^\circ]} (\arg(\tilde{g}_n(\theta_i, \beta_i)) \mathbf{g}_n^H(\theta_i, \beta_i))$.

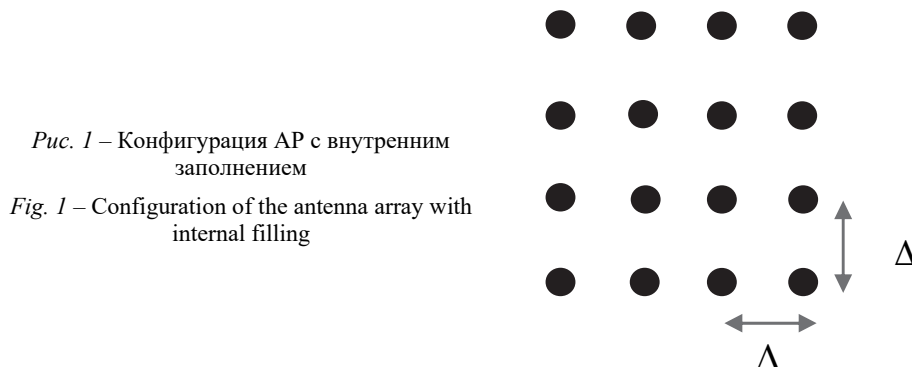
3. Иллюстрация точечного пеленгования широкополосного сигнала с устранением неоднозначности

Пример применения точечного пеленгования **звуковых** сигналов (скорость звука в воздухе 330 м/с) в диапазоне 500...2000 Гц квадратной 16-элементной АР (рис. 1) с внутренним заполнением, подходящей для реализации многосигнального режима на основе ESPRIT. Расстояние между соседними микрофонами АР $\Delta = 16,7$ см. Изменение расстояния между элементами АР в длинах волн в зависимости от частоты изображено на рис. 2, а. Были имитированы пять источников, излучающих случайный широкополосный сигнал с направлениями прихода $(10^\circ, 20^\circ)$, $(45^\circ, 15^\circ)$, $(79^\circ, 19^\circ)$, $(120^\circ, 17^\circ)$, $(260^\circ, 13^\circ)$. Амплитудный спектр одного сигнала приведен на рис. 2, б.

Оценки азимута для СО, соответствующие частотам до 900 Гц, являются однозначными при $f > 900$ Гц, расстояние в длинах $\Delta'(f > 900 \text{ Гц}) > 0,5$ и появляется требующая устранения неоднозначность оценок (рис. 2, в).

После взаимного сопоставления оценок фазовых сдвигов между антеннами и устранения неоднозначности в многосигнальном режиме получены оценки, приведенные на рис. 2, г.

Как видно из рис. 2, в, точность оценок в высокочастотной области спектра $\Delta'(f > 900 \text{ Гц}) > 0,5$ выше, чем в низкочастотной области, в которой обеспечивается однозначность из-за выполнения условия $\Delta' < 0,5$.



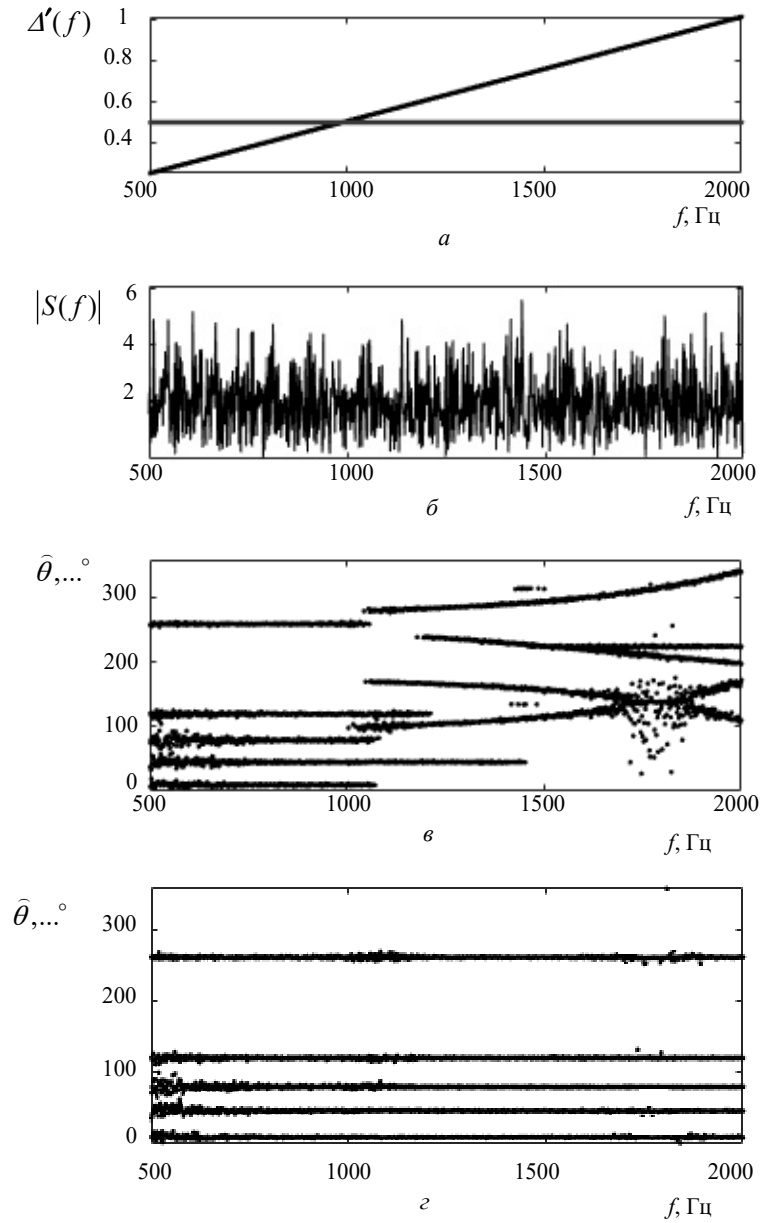


Рис. 2 – Точечное пеленгование широкополосных источников звука Δ' по ESPRIT:

a – изменение Δ' в полосе частот, занимаемых широкополосным источником звука; b – амплитудный спектр пеленгуемого сигнала; c – оценки азимута без устранения неоднозначности фаз; d – оценки азимута с устранением неоднозначности фаз

Fig. 2 – Direction finding of wideband sound sources in spectral counts with ESPRIT

a – Δ' variation in a wideband sound source band; b – amplitude spectrum of a single signal; c – azimuth estimates without correction of phase ambiguity; d – azimuth estimates with correction of phase ambiguity

Приведенный пример показывает, что устранение неоднозначности пеленгования высокочастотных составляющих спектра на основе использования однозначных оценок направлений прихода низкочастотных составляющими обеспечивает более высокую точность пеленгования источников широкополосного сигнала.

4. Интервальное пеленгование

Недостатком точечного пеленгования являются большие вычислительные затраты. Для их снижения диапазон СО можно разбить на интервалы для которых сохраняется примерно одинаковое расстояние в длинах волн $\frac{\Delta'_{n_2}}{\Delta'_{n_1}} \approx 1$. Если $n_2 - n_1 + 1 > M$, то можно применить интервальное пеленгование [7], для которого формируется матрица из всех СО интервала $[n_1 \dots n_2]$:

$$(Z_{n_1 \dots n_2})_k = \begin{bmatrix} \frac{y_{1n_1}}{(\bar{\delta}_1)_k} & \dots & \frac{y_{1n_2}}{(\bar{\delta}_1)_k} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{y_{Mn_1}}{(\bar{\delta}_M)_k} & \dots & \frac{y_{Mn_2}}{(\bar{\delta}_M)_k} \end{bmatrix}, \quad k = 1 \dots K.$$

Интервальное пеленгование можно реализовать без накопления $(R_Z)_k = (Z_{n_1 \dots n_2})_k (Z_{n_1 \dots n_2})_k^H$, т. е. по данным, полученным при однократном наблюдении, и с накоплением $R_Z = \sum_{k=1}^K (R_Z)_k$ для повышения точности оценивания УК ИРИ. Далее выполняются такие же действия с матрицей R_Z , как при точечном пеленговании.

Заключение

Разработанный метод пеленгования широкополосных сигналов, не удовлетворяющих классическому условию узкополосности, за счет устранения неоднозначности АФР, создаваемых разными спектральными составляющими в АР, и соотношением оценок неоднозначных амплитудно-фазовых распределений с однозначными в низкочастотной области спектра, позволяет сформировать оценки направлений прихода, перекрывающиеся по спектру сигналов разных источников без существенных преобразований с наблюдаемыми данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Doron M.A., Nevet A.** Robust wavefield interpolation for adaptive wideband beamforming // Signal Processing. – 2008. – Vol. 88 (6). – P. 1579–1594.
2. **Friedlander B., Weiss A.J.** Direction finding for wide-band signals using an interpolated array // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1993. – Vol. 41 (4). – P. 1618–1634.
3. **Ottersten B., Kailath T.** Direction-of-arrival estimation for wide-band signals using the ESPRIT algorithm // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1990. – Vol. 38 (2). – P. 317–327. – DOI: 10.1109/29.103067.
4. **Mathai G., Jakobsson A., Gustafsson F.** Direction of arrival estimation of unknown number of wideband signals in unattended ground sensor networks // Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion. – Istanbul, Turkey, 2013. – P. 685–690.

5. Direction of arrival estimation of wideband sources using sparse linear arrays / F. Wang, Z. Tian, G. Leus, J. Fang // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2021. – Vol. 69. – P. 4444–4457.
6. **Nawab S., Dowla F., Lacoss R.** Direction determination of wideband signals // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 1985. – Vol. 33 (5). – P. 1114–1122. – DOI: 10.1109/TASSP.1985.1164705.
7. Интервальное и точечное пеленгование источников радиоизлучения при широкополосном радиомониторинге / М.Е. Шевченко, В.Н. Малышев, С.С. Соколов, А.В. Горовой, С.Н. Соловьев, Н.С. Стенюков // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. – 2020. – Т. 23 (6). – С. 28–42. – DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-28-42.
8. **Roy R., Kailath T.** ESPRIT-Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 1989. – Vol. 37 (7). – P. 984–995. – DOI: 10.1109/29.32276.
9. **Денисов В.П., Дубинин Д.В.** Фазовые радиопеленгаторы. – Томск: Изд-во Том. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 251 с.

ELIMINATION OF AMBIGUITY IN ESTIMATES OF THE ARRIVAL DIRECTIONS OF BROADBAND SIGNALS IN MULTISIGNAL BEARING MODE

**Shevchenko M.E.¹, Malyshev V.N.¹, Sokolov S.S.¹,
Osetrov A.V.¹, Cherepanov A.S.²**

¹*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint Petersburg, Russia*

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia*

Direction finding of wideband signals overlapping in the spectral domain by a fixed antenna array requires the correction of steering vector ambiguity and phase differences corresponding to different spectral components. The spectral components of the same signal correspond to unequal values of the distance in wavelengths between the antennas in the array. A method of steering vector ambiguity correction suitable for subspace methods such as MUSIC and ESPRIT is proposed. The ambiguity in the presence of multiple signals is resolved by correcting phase differences between antennas for each spectral component, with preliminary correlation of the ambiguous steering vector with unambiguous ones obtained for the low-frequency range of the spectrum using maximum correlation. The corrected steering vector for each spectral component is obtained from the adjusted phase differences between the antennas and is used in the direction finding correlation algorithm to obtain unambiguous estimates of the directions of arrival of the wideband signals. Simulation results for direction finding of five sound wideband signals using a square internally filled antenna array consisting of 16 antennas, based on ESPRIT with the proposed method of ambiguity correction, are presented. The proposed method for correcting the steering vector ambiguity caused by different spectral components of wideband signals in the antenna array allows estimation of their directions of arrival, as is done for narrowband radio signals.

Keywords: wideband signal, direction finding in the spectral domain, steering vector ambiguity, correction of azimuth and elevation estimate ambiguity, antenna array, MUSIC, ESPRIT.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-64-73

REFERENCES

1. Doron M.A., Nevet A. Robust wavefield interpolation for adaptive wideband beamforming. *Signal Processing*, 2008, vol. 88 (6), pp. 1579–1594.

2. Friedlander B., Weiss A.J. Direction finding for wide-band signals using an interpolated array. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, vol. 41 (4), pp. 1618–1634.
3. Ottersten B., Kailath T. Direction-of-arrival estimation for wide-band signals using the ESPRIT algorithm. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, vol. 38 (2), pp. 317–327. DOI: 10.1109/29.103067.
4. Mathai G., Jakobsson A., Gustafsson F. Direction of arrival estimation of unknown number of wideband signals in unattended ground sensor networks. *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*, Istanbul, Turkey, 2013, pp. 685–690.
5. Wang F., Tian Z., Leus G., Fang J. Direction of arrival estimation of wideband sources using sparse linear arrays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, vol. 69, pp. 4444–4457.
6. Nawab S., Dowla F., Lacoss R. Direction determination of wideband signals. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1985, vol. 33 (5), pp. 1114–1122. DOI: 10.1109/TASSP.1985.1164705.
7. Shevchenko M.E., Malyshev V.N., Sokolov S.S., Gorovoy A.V., Soloviev S.N., Stenukov N.S. Interval'noe i tochechnoe pelengovanie istochnikov radioizlucheniya pri shirokopolosnom radiomonitoringe [Interval and point direction finding of radio emission sources for broadband radio monitoring]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2020, vol. 23 (6), pp. 28–42. DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-28-42.
8. Roy R., Kailath T. ESPRIT-Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, vol. 37 (7), pp. 984–995. DOI: 10.1109/29.32276.
9. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatory* [Phase direction finders]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2002. 251 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Шевченко Майя Евгеньевна – родилась в 1968 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных средств, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ». Область научных интересов: прием и обработка радиосигналов; обнаружение, различение и пеленгование сигналов, радиомониторинг; цифровая обработка сигналов. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, 5. E-mail: meshevchenko@etu.ru)

Shevchenko Majja Evgen'evna (b. 1968) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor department, organization. Her research interests are currently focused on radio signal reception and processing; signal detection, discrimination and direction finding, radio monitoring; digital signal processing. She is author of more than 80 scientific papers. (Address: 5, Professor Popov St., St. Petersburg 197376, Russia. E-mail: meshevchenko@etu.ru).



Малышев Виктор Николаевич – родился в 1956 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: численные методы, СВЧ-техника, антенны, информационные сети, информационная безопасность. Опубликовано более 120 научных работ. (Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, д. 5. E-mail: vnmalyshv@etu.ru).

Malyshev Victor Nikolaevich (b. 1956) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Chief of the Department of Radio Electronics Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". His research interests are currently focused on numerical methods; microwave engineering; antennas; information networks; information security. He is author of more than 120 scientific papers. (Address: 5, Professor Popov St., St. Petersburg, 197376, Russia. E-mail: vnmalyshhev@etu.ru).



Соколов Сергей Сергеевич – родился в 1941 году, д-р техн. наук, профессор, профессор, кафедра микрорадиоэлектроники и технологии производства радиоаппаратуры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ». Область научных интересов: регистрация случайных процессов с двойной стохастичностью, адаптивные методы оценивания параметров сигналов, методы системной инженерии. Опубликовано 92 научные работы. (Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, 5. E-mail: sssokolov@etu.ru).

Sokolov Sergey Sergeevich – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Professor of the Department of Microradioelectronics and radio equipment technology V. I. Ulyanov (Lenin) Saint Petersburg state electrotechnical University "LETI". The author of 92 scientific publications. Area of expertise: registration of processes with double stochasticity, adaptive methods for estimating signal parameters, system engineering. (Address: 5, Professor Popov St., St. Petersburg, 197376, Russia, E-mail: sssokolov@etu.ru).



Осетров Александр Владимирович – родился в 1962 году, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Алгоритмическая математика», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: акустическая томография, акустоэлектроника, акустические поля, обработка сигналов и изображений. Опубликовано 118 научных работ. (Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, дом 5. E-mail: info@etu.ru).

Osetrov Alexander Vladimirovich (b. 1962) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor, Department of Algorithmic Mathematics, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". His research interests are currently focused on acoustic tomography, acoustoelectronics, acoustical fields, signal and image processing. He is the author of 118 scientific papers. (Address: 5, Professor Popov St., St. Petersburg, 197022, Russia. E-mail: info@etu.ru).



Черепанов Андрей Сергеевич – родился в 1952 году, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Область научных интересов: волноведущие структуры с ферритовым управлением, СВЧ-техника, фазированные антенные решетки. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, E-mail: ascherspb@mail.ru).

Cherepanov Andrey Sergeevich (b. 1952) – Doctor of Sciences (Phys.&Math.), appointment, Professor of the Graduate School of Applied Physics and Space Technology Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. His research interests are currently focused on ferrite-driven waveguide structures, microwave engineering, phased antenna arrays. He is author of 100 scientific papers. (Address: 29, Polytechnicheskaja St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: ascherspb@mail.ru).

*Статья поступила 16 декабря 2024 г.
Received December 16, 2024*

To Reference:

Shevchenko M.E., Malyshev V.N., Sokolov S.S., Osetrov A.V., Cherepanov A.S. Ustranenie neodnoznachnosti otsenok napravlenii prikhoda shirokopolosnykh signalov v mnogosignal'nom rezhime pelengovaniya [Elimination of ambiguity in estimates of the arrival directions of broadband signals in multisignal bearing mode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2024, no. 4 (65), pp. 64–73. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-64-73.