

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.67.012.12, 621.396.965

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-28-42>

## Интервальное и точечное пеленгование источников радиоизлучения при широкополосном радиомониторинге

М. Е. Шевченко<sup>1✉</sup>, В. Н. Малышев<sup>1</sup>, С. С. Соколов<sup>1</sup>,  
А. В. Горовой<sup>1</sup>, С. Н. Соловьев<sup>2</sup>, Н. С. Стенюков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ООО НПП "Новые технологии телекоммуникаций"

<sup>3</sup>АО «НИИ "Вектор"»

✉ [m\\_e\\_shevchenko@mail.ru](mailto:m_e_shevchenko@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** При широкополосном радиомониторинге в частотной области применяется точечное и интервальное пеленгование источников радиоизлучения, исходными данными для которых являются спектральные выборки, полученные при многоканальном приеме от *M*-элементной антенной решетки. Точечное пеленгование основано на группировке точечных оценок азимута и угла места, сформированных для каждого частотного отсчета, в котором обнаружены сигнальные составляющие. По сгруппированным точечным оценкам в интервале соседних частотных отсчетов выносятся единая оценка азимута и угла места. Интервальное пеленгование основано на формировании оценок азимута и угла места целиком по интервалу соседних частотных отсчетов, в котором обнаружены сигнальные составляющие, и последующем уточнении границ интервала частотных отсчетов для каждого источника радиоизлучения в многосигнальном режиме на основе методов пространственной селекции. В современных эксплуатирующихся широкополосных комплексах радиомониторинга реализовано преимущественно точечное пеленгование в односигнальном режиме, а многосигнальный режим на основе MUSIC или ESPRIT реализован во временной области в узкой полосе частот.

**Цель работы.** Разработка и исследование методов точечного и интервального пеленгования в многосигнальном режиме и выработка рекомендаций для их практического применения в многосигнальном и односигнальном режимах.

**Методы.** Многосигнальный режим при точечном и интервальном пеленговании реализован на MUSIC и ESPRIT. Экспериментальное исследование разработанных методов пеленгования при перекрытии спектров сигналов в односигнальном и многосигнальном по ESPRIT режимах выполнено по записям реальных сигналов, сделанным с помощью семиканального когерентного синхронного приемника, подключенного к семиэлементной 60°-уголковой антенной решетке.

**Результаты.** Результаты исследования представлены в виде частотно-азимутальных панорам, амплитудных спектров разделенных сигналов и показателей точности пеленгования.

**Заключение.** Экспериментально продемонстрировано, что в односигнальном режиме при отсутствии информации о числе сигналов в наблюдаемых данных целесообразно применять точечное пеленгование, а в многосигнальном режиме для повышения точности и реализуемости в реальном времени – интервальное.

**Ключевые слова:** широкополосный радиомониторинг, точечное и интервальное оценивание, пеленгование источников радиоизлучения, ESPRIT, MUSIC

**Для цитирования:** 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 // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 28–42. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-28-42

**Источник финансирования.** При подготовке публикации использовались результаты работ по проекту "Разработка многопозиционного комплекса полуактивной радиолокации и радиомониторинга излучающих и радиомолчащих объектов" (Согл. от 21 ноября 2018 г. № 075-11-2018-035) с использованием мер государственной поддержки, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.10.2020; принята к публикации после рецензирования 30.11.2020; опубликована онлайн 29.12.2020



## Interval and Point Direction Finding of Radio Emission Sources for Broadband Radio Monitoring

Maya E. Shevchenko<sup>1✉</sup>, Victor N. Malyshev<sup>1</sup>, Sergey S. Sokolov<sup>1</sup>, Andrey V. Gorovoy<sup>1</sup>,  
Sergey N. Soloviev<sup>2</sup>, Nikolay S. Stenukov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Research and Production enterprise "New Technologies of Telecommunications"

<sup>3</sup>Researcher JSC «NII "Vektor"»

✉m\_e\_shevchenko@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** The point and interval direction finding of radio sources is used for broadband radio monitoring in the frequency domain. The initial data for broadband radio monitoring are spectral samples obtained from an M-element antenna array by multichannel reception. Point direction finding is based on a grouping of point estimates of azimuth and elevation angle formed for each frequency sample, in which signal components are detected. A single estimate of azimuth and elevation angle is made based on the grouped point estimates in the range of neighbouring frequency samples. Interval direction finding is based on the azimuth and elevation estimates formed entirely from the interval of adjacent frequency samples, in which the signal components are found, and the subsequent refinement of frequency sample interval boundaries for each radio source in multi-signal mode by spatial selection methods. Point direction finding is mainly implemented in single-signal mode in modern operating broadband radio monitoring complexes, while the multi-signal mode based on MUSIC or ESPRIT is implemented in the time domain in a narrow frequency band.

**Aim.** Development and investigation of methods for point and interval direction finding in multi-signal mode, as well as development of recommendations for their practical application in multi-signal and single-signal modes.

**Methods.** Multi-signal mode for point and interval direction finding was implemented using MUSIC and ESPRIT. An experimental study of the developed direction finding methods in single-signal and multi-signal (on ESPRIT) modes with overlapping signal spectra was carried out by processing the recorded real signals. The records were made using a seven-channel coherent synchronous receiver connected to a seven-element 60° angle antenna array.

**Results.** The research results are presented by frequency-azimuth panoramas and estimates of the amplitude spectra of separated signals and direction finding accuracy indicators.

**Conclusion.** It was experimentally demonstrated that point direction finding should be used in single-signal mode provided the absence of information on the number of signals in the observed data. Interval direction finding is recommended in multi-signal mode for improving the accuracy and real-time feasibility of the process.

**Keywords:** broadband radio monitoring, point and interval estimation, direction finding of radio emission sources, ESPRIT, MUSIC

**For citation:** M. E. Shevchenko, V. N. Malyshev, S. S. Sokolov, A. V. Gorovoy, S. N. Soloviev, N. S. Stenukov. Interval and Point Direction Finding of Radio Emission Sources for Broadband Radio Monitoring. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 6, pp. 28–42. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-28-42

**Source of financing.** In preparing the publication, the results of work on the project "Development of a multi-position complex for semi-active radar and radio monitoring of emitting and radio silent objects" (Agreement dated November 21, 2018 No. 075-11-2018-035) were used with the use of state support measures provided for by the decree of the Government of the Russian Federation April 9, 2010 No. 218.

**Conflict of interest.** Authors declare no conflict of interest.

Submitted 29.10.2020; accepted 30.11.2020; published online 29.12.2020

**Введение.** При широкополосном радиомониторинге оценки угловых координат (УК) источников радиоизлучения (ИРИ) формируются на основе спектральных выборок  $N$ , полученных с помощью дискретного преобразования Фурье из процессов, принятых  $M$ -элементной антенной решеткой (АР), по отсчетам, содержащим сигнальные составляющие [1–4]. Спектральные отсчеты (СО), содержащие сигнальные составляющие, далее называются сигнальными СО.

Спектры сигналов ИРИ (рис. 1) сосредоточены в выборках в интервалах соседних отсчетов  $(v_{1q} : v_{2q})$  ( $q$  – номер интервала). Границы интервалов в зависимости от задачи задаются или априорно, исходя из имеющейся информации о несущей частоте интересующего ИРИ и занимаемой им полосе частот, или оцениваются при первичном обнаружении по выборкам из спектральных отсчетов.

В связи с этим УК ИРИ – азимут и угол места – можно оценивать в каждом интервале СО  $n \in v_{1q} : v_{2q}$  или на всем интервале  $v_{1q} : v_{2q}$ .

Точечное пеленгование предполагает формирование оценок, ассоциированных с конкретными ИРИ. Кроме того, дополнительными методами формируются единые усредненные оценки УК ИРИ и интервалы СО, которым они соответствуют. При интервальном пеленговании формируются точечные оценки УК всех ИРИ в интервале  $v_{1q} : v_{2q}$  и сам интервал СО, которым они соответствуют.

Односигнальный режим пеленгования предполагает, что в частотном отсчете или в интервале частотных отсчетов присутствуют составляющие спектра сигнала только одного ИРИ. Многосигнальный режим пеленгования допускает наличие

составляющих нескольких сигналов ИРИ в одном СО или в интервале СО.

Обе стратегии позволяют реализовать односигнальный и многосигнальный режимы пеленгования, но отличаются точностью, необходимым объемом наблюдаемых данных в многосигнальном режиме, требуемыми вычислительными ресурсами и быстродействием.

Для обоснованного выбора режима требуется оценить число сигналов ИРИ, присутствующих в входных данных. Однако при реализации алгоритмов в реальных устройствах сама проверка наличия нескольких сигналов включают в многосигнальный режим из-за необходимости анализа собственных чисел корреляционной матрицы наблюдаемых данных. Даже при обнаружении всего одного значимого собственного числа дальнейшее оценивание проводится на основе собственных векторов.

В настоящей статье представлено исследование особенностей точечного и интервального пеленгования в односигнальном и многосигнальном режимах по записям реальных сигналов, а также достигнутые показатели качества.

**Модель данных.** Исходными данными для пеленгования являются комплексные спектральные выборки

$$(y_m)_k = (y_{m_1}, \dots, y_{m_N})_k, \quad m = \overline{1, M}; \quad k = \overline{1, K}$$

из  $N$  спектральных отсчетов, взятые в  $K$  последовательные моменты времени многоканальным радиоприемным устройством, подключенным к  $M$ -элементной АР. Выборки получены дискретным преобразованием Фурье временных выборок, образованных синфазной и квадратурной составляющими дискретизированных процессов. Предпола-

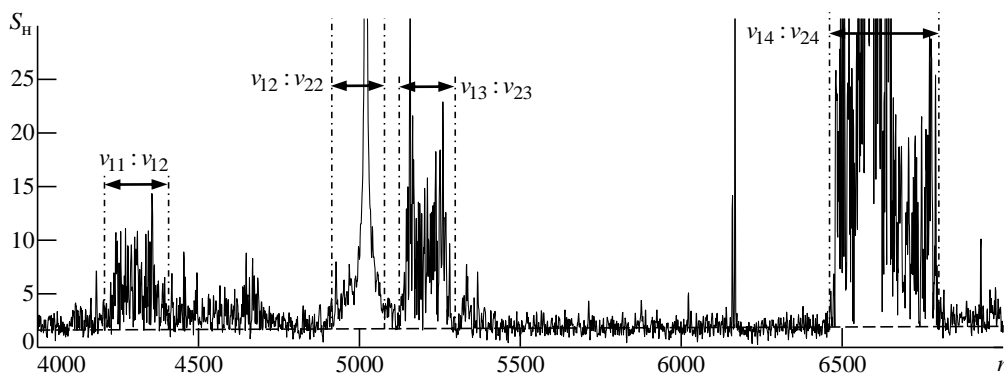


Рис. 1. Фрагмент нормированного к уровню шума суммарного амплитудного спектра процессов, принятых в широкой полосе

Fig. 1. Fragment of normalized to the noise level total amplitude spectrum of the processes received in a wide band

гается, что все каналы приема синхронные, когерентные и имеют одинаковые коэффициенты передачи.

В общем случае  $n$ -й отсчет спектра в  $m$ -м канале, содержащий  $d_n$  сигнальных составляющих от разных ИРИ, записывается в виде

$$y_{m_n} = \sum_{i=1}^{d_n} b_i S_{n_i} a_m(\theta_i, \beta_i) + \zeta_{m_n}, \quad (1)$$

$$n = \overline{1, N}; \quad m = \overline{1, M},$$

где  $b_i$  – энергетический параметр сигнала;  $S_{n_i}$  –  $n$ -й отсчет спектра сигнала  $i$ -го ИРИ;

$$a_m(\theta_i, \beta_i) = |a_m(\theta_i, \beta_i)| \exp[\gamma_m(\theta_i, \beta_i)]$$

– отклик  $m$ -й антенны на сигнал, поступивший с направления  $\theta_i, \beta_i$  ( $\theta_i$  – азимут;  $\beta_i$  – угол места);  $\zeta_{m_n}$  – шумовая составляющая. Амплитудно-фазовое распределение в зависимости от УК ИРИ  $\Theta = (\theta, \beta)$  задается вектором  $\mathbf{a}(\Theta) = [a_1(\Theta), \dots, a_m(\Theta), \dots, a_M(\Theta)]$ . Все параметры сигналов в (1) априорно неизвестны.

Если сигнальных составляющих в  $n$ -м отсчете нет, то  $y_{m_n} = \zeta_{m_n}, n = \overline{1, N}$ .

Уровень  $\delta_m$  аддитивного шума априорно неизвестен, но для обнаружения сигнальных составляющих в отсчете или в интервале отсчетов требуется оценка неизвестного уровня шума. Такие оценки получены для условий высокой заполненности частотного диапазона [5–7] и используются в реальных комплексах.

Обнаружение сигналов ИРИ в спектральных отсчетах состоит в сравнении с порогом  $C_\alpha$  накопленного по  $K$  реализациям суммарного амплитудного спектра, нормированного к оценке уровня шума  $\hat{\delta}_m$  в каждом канале:

$$B_n = \frac{1}{K} \frac{1}{M} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M |y_{m_n}|_k / \hat{\delta}_m,$$

где  $|y_{m_n}|_k$  – модуль спектра  $n$ -го отсчета  $k$ -й выборки.

Решение принимается в соответствии с гипотезами:

$$H_0: y_{m_n} = \zeta_{m_n}, \quad B_n < C_\alpha;$$

$$H_1: y_{m_n} = \sum_{i=1}^{d_n} b_i S_{n_i}^i a_m(\theta_i, \beta_i) + \zeta_{m_n}, \quad B_n \geq C_\alpha.$$

Порог  $C_\alpha$  выбирается исходя из заданного значения вероятности ложной тревоги.

В дальнейшем при описании алгоритмов будем рассматривать только один из интервалов  $v_{1q} : v_{2q}$ , обозначив его  $n_1 : n_2$ .

В интервал  $n_1 : n_2$  включаются соседние, близкие по частоте отсчеты, в которых были обнаружены сигнальные составляющие. Близкими можно считать отсчеты, удаленные друг от друга на расстояние  $\Delta n$ , которое рассчитывается для каждого частотного диапазона исходя из регламентов электромагнитной совместимости.

Вектор из спектральных отсчетов сигналов  $m$ -й антенны в интервале соседних отсчетов  $n_1 : n_2$ , содержащих  $d_{n_1:n_2}$  сигнальных составляющих

$\mathbf{S}_{n_1:n_2}^i = (S_{n_1}^i, \dots, S_{n_2}^i)$  от разных ИРИ, имеет вид

$$\mathbf{y}_{m_{n_1:n_2}} = (y_{m_{n_1}}, \dots, y_{m_{n_2}}) =$$

$$= \sum_{i=1}^{d_{n_1:n_2}} b_i \mathbf{S}_{n_1:n_2}^i a_m(\theta_i, \beta_i) + \zeta_{m_{n_1:n_2}}; \quad m = \overline{1, M},$$

где  $\zeta_{m_{n_1:n_2}}$  – шумовая выборка.

### Методы интервального и точечного пеленгования в односигнальном и в многосигнальном режимах.

**Односигнальный режим.** В односигнальном режиме, реализованном в большинстве эксплуатирующихся комплексов, предполагается, что в  $n$ -м спектральном отсчете из интервала  $n_1 : n_2$  присутствует составляющая сигнала только одного ИРИ. Поэтому для формирования оценки его УК при точечном пеленговании требуется вычислить  $M - 1$  значений накопленного взаимного спектра между опорной и остальными антеннами в одном СО [7, 8]:

$$\tilde{y}_{m_n} = \left[ \sum_{k=1}^K \frac{(y_{m_n} y_{1_n}^*)_k}{\hat{\delta}_m} \right], \quad n = \overline{n_1, n_2}, \quad m = \overline{2, M},$$

а при интервальном – в интервале спектральных отсчетов  $n_1 : n_2$ :

$$\tilde{y}_{m_1:n_2} = \left[ \sum_{k=1}^K \frac{\left( \mathbf{y}_{m_1:n_2} \mathbf{y}_{1:n_2}^H \right)_k}{\hat{\delta}_m} \right], \quad m = \overline{2, M}.$$

где "\*" – символ комплексного сопряжения;  
 "н" – символ эрмитова сопряжения.

Оценки УК ИРИ при точечном пеленговании

$$\hat{\theta}_n, \hat{\beta}_n = f(\tilde{y}_{m_1:n_2}), \quad n = \overline{n_1, n_2}$$

и при интервальном пеленговании

$$\hat{\theta}_{n_1:n_2} = f_\theta(\tilde{y}_{m_1:n_2}); \quad \hat{\beta}_{n_1:n_2} = f_\beta(\tilde{y}_{m_1:n_2})$$

вычисляются в зависимости от конфигурации АР, которая определяет функции  $f_\theta(\cdot)$  и  $f_\beta(\cdot)$ . Пример функций для угловой АР приведен далее при описании результатов исследования.

При точечном пеленговании получают  $n_2 - n_1 + 1$  оценок  $\hat{\theta}_n, \hat{\beta}_n, n = \overline{n_1, n_2}$ , а при интервальном – одну оценку  $\hat{\theta}_{n_1:n_2}, \hat{\beta}_{n_1:n_2}$ . При точечном пеленговании требуется в дальнейшем объединить оценки УК соседних отсчетов для записи в базу данных.

Для реализации односигнального режима пеленгования достаточно данных, полученных при однократном наблюдении ( $K = 1$ ), хотя использование  $K > 1$  выборок позволяет существенно повысить точность выносимых оценок УК ИРИ за счет накопления оценок взаимного спектра. Авторами статьи установлено, что для обеспечения заданной точности в реальных условиях целесообразно задавать  $30 \leq K < 100$ .

**Многосигнальный режим.** В зарубежной и отечественной научной литературе описаны методы реализации многосигнального режима пеленгования во временной области по данным, сосредоточенным в узкой полосе частот. Многосигнальный режим на основе MUSIC реализован или планируется к реализации в аппаратуре Rohde&Schwarz [2]. Сами алгоритмы обработки в многосигнальном режиме в [2] не представлены. Поэтому авторами настоящей статьи были разработаны и исследованы методы точечного и интервального пеленгования в многосигнальном режиме на основе методов ESPRIT и MUSIC, считающихся наиболее перспективными для применения в системах радиомониторинга и радиоконтроля [2, 8]. Известны также параметрические методы [9] и методы регуляризации

[10] при пеленговании множества ИРИ. Однако оценить их применимость в реальном времени при реализации в широкой полосе частот не представляется возможным.

*Точечное пеленгование.* При наличии составляющих нескольких сигналов вектор-столбец  $n$ -го отсчета имеет вид

$$(\mathbf{y}_n)_k = \left[ \frac{(y_{1n})_k}{\hat{\delta}_1}, \dots, \frac{(y_{m_n})_k}{\hat{\delta}_m}, \dots, \frac{(y_{M_n})_k}{\hat{\delta}_M} \right]^T,$$

где "Т" – символ транспонирования.

Ранг этого вектора равен 1 не достаточен для обнаружения и оценивания УК  $d_n > 1$  разных ИРИ.

Поскольку сигналы от различных ИРИ приходят с разных направлений (имеют различные  $\theta_i, \beta_i; i = \overline{1, d_n}$ ), подвергаются различным замираниям при распространении (имеют различные  $b_i; i = \overline{1, d_n}$ ), переносят разную информацию (характеризуются  $S_n^i; i = \overline{1, d_n}$ ), имеют разную начальную фазу, то они не обладают существенной взаимной корреляцией. Поэтому спектральные составляющие сигналов разных ИРИ в одном СО также не будут существенно коррелированными между собой во времени.

Проверка гипотезы о наличии сигналов нескольких ИРИ в фиксированном частотном отсчете и возможности дальнейшего оценивания их УК в частотной области требует повышения ранга наблюдаемых данных, соответствующих отдельно взятому СО.

Для этого требуется  $K$  значений комплексного спектра сигналов всех  $M$  антенн в данном СО. Они могут быть получены из наблюдаемых данных (1) для каждого  $n$ -го СО, в котором обнаружен сигнал, в результате выполнения следующих действий [11]:

1. Формируется матрица

$$\mathbf{Z}_n = [\mathbf{y}_{n_1}, \dots, \mathbf{y}_{n_k}, \dots, \mathbf{y}_{n_K}], \quad K > M.$$

2. Вычисляется корреляционная матрица

$$\mathbf{R} = \mathbf{Z}_n \mathbf{Z}_n^H, \quad \text{выполняется ее разложение}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{E} \text{diag}(\boldsymbol{\Lambda}) \mathbf{E}^H \quad \text{по собственным векторам}$$

$$\mathbf{E} = [\mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_M], \quad \mathbf{E}_l = [E_{l1}, \dots, E_{lM}]^T, \quad l = \overline{1, M}$$

$$\text{и числам } \boldsymbol{\Lambda} = [\lambda_1, \dots, \lambda_M], \quad \lambda_1 > \dots > \lambda_M.$$

3. Из сравнения собственных чисел с заранее заданным порогом  $C_\lambda$  определяется число сигналов ИРИ  $\hat{d}_n$ :  $\lambda_{\hat{d}_n} \geq C_\lambda$ ;  $\lambda_{\hat{d}_n+1} < C_\lambda$ . Из собственных

векторов  $E = [E_s, E_\zeta]$  выделяются сигнальное

$E_s = [E_1, \dots, E_{\hat{d}_n}]$  и шумовое

$E_\zeta = [E_{\hat{d}_n+1}, \dots, E_M]$  подпространства.

4. При реализации многосигнального режима на основе ESPRIT формируются оценки  $\hat{\theta}_{n_i}, \hat{\beta}_{n_i} = f(E_s)$ ,  $i = \overline{1, \hat{d}_n}$ ,  $n \in \overline{n_1, n_2}$ , а при реализации режима на основе MUSIC – оценки

$$\hat{\theta}_{n_i}, \hat{\beta}_{n_i} = \arg \max_{\substack{\theta \in 0..359^\circ \\ \beta \in 0..89^\circ}} P(\Theta), \quad i = \overline{1, \hat{d}_n}, \quad n \in \overline{n_1, n_2},$$

где  $P(\Theta) = [a(\Theta) E_\zeta E_\zeta^H a^H(\Theta)]^{-1}$  [12–15].

В ESPRIT оценки формируются из собственных чисел оператора поворота, который преобразует элементы  $E_s$  одной подрешетки в другую. Для этого выполняются матричные преобразования с векторами сигнального подпространства с учетом конфигурации AP и ее инвариантности к сдвигу. В MUSIC требуется вычислительно затратный численный поиск функционала  $P(\Theta)$ .

Точность оценок  $\hat{\theta}_{n_i}, \hat{\beta}_{n_i}$ ,  $n \in \overline{n_1, n_2}$  различна и определяется отношением сигнал/шум (ОСШ) в спектральном отсчете. При наличии оценок ОСШ результирующей оценкой можно считать средневзвешенное от всей выборки  $\hat{\theta}_{n_i}, \hat{\beta}_{n_i}$ ,  $n \in \overline{n_1, n_2}$ .

Оценить ОСШ при наличии одного сигнала несложно, однако при наличии нескольких сигналов требуются специальные вычисления.

Единая оценка  $\hat{\theta}_{(n_1:n_2)i}$ ,  $i = \overline{1, \hat{d}_n}$  записывается в базу данных.

Интервальное пеленгование в диапазоне отсчетов  $(n_1 : n_2)$  в многосигнальном режиме можно реализовать по данным, полученным при однократном наблюдении на основе матрицы

$$Y_{n_1:n_2} = \begin{bmatrix} y_{1n_1}/\hat{\delta}_1 & \dots & y_{1n_2}/\hat{\delta}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{Mn_1}/\hat{\delta}_M & \dots & y_{Mn_2}/\hat{\delta}_M \end{bmatrix}_k, \quad k \in \overline{1, K}.$$

Для повышения точности оценок УК ИРИ целесообразно использовать накопление взаимных спектров принятых процессов между опорной и  $m$ -й антеннами,  $m = \overline{1, M}$ . Матрица отсчетов таких взаимных спектров имеет вид

$$\tilde{Y}_{n_1:n_2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\hat{\delta}_1} \sum_{k=1}^K (y_{1n_1} y_{1n_1}^*) & \dots & \frac{1}{\hat{\delta}_1} \sum_{k=1}^K (y_{1n_2} y_{1n_2}^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\hat{\delta}_M} \sum_{k=1}^K (y_{Mn_1} y_{1n_1}^*) & \dots & \frac{1}{\hat{\delta}_M} \sum_{k=1}^K (y_{Mn_2} y_{1n_2}^*) \end{bmatrix}.$$

Далее этапы формирования оценок совпадают с аналогичными при точечном пеленговании:

1. Вычисляется корреляционная матрица

$$R_Y = \tilde{Y}_{n_1:n_2} \tilde{Y}_{n_1:n_2}^H \quad \text{или} \quad R_Y = Y_{n_1:n_2} Y_{n_1:n_2}^H.$$

2. Матрица  $R_Y = E \text{diag}(\Lambda) E^H$  раскладывается по собственным векторам  $E = [E_1, \dots, E_M]$ ,

$$E_l = [E_{l1} \dots, E_{lM}]^T, \quad l = \overline{1, M} \quad \text{и числам}$$

$$\Lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_d, \lambda_{d+1}, \dots, \lambda_M], \quad \lambda_1 > \dots > \lambda_M.$$

3. Оценивается число сигналов ИРИ  $\hat{d}_{n_1:n_2} = d$  как число собственных чисел, превысивших порог  $C_\lambda$ :  $\lambda_d \geq C_\lambda$ ,  $\lambda_{d+1} < C_\lambda$ . Из собственных векторов  $E = [E_s, E_\zeta]$  выделяются сигнальное

$E_s = [E_1, \dots, E_{\hat{d}_n}]$  и шумовое

$E_\zeta = [E_{\hat{d}_n+1}, \dots, E_M]$  подпространства.

4. Вычисляются оценки на основе ESPRIT  $\hat{\theta}_{i(n_1:n_2)}, \hat{\beta}_{i(n_1:n_2)} = f(E_s)$  или MUSIC:

$$\hat{\theta}_{i(n_1:n_2)}, \hat{\beta}_{i(n_1:n_2)} = \arg \max_{\substack{\theta \in 0..359^\circ \\ \beta \in 0..89^\circ}} P(\Theta), \quad i = \overline{1, \hat{d}_n}.$$

5. Для каждого  $i = \overline{1, \hat{d}_n}$  уточняется диапазон отсчетов  $(n_{1i} : n_{2i})$  из интервала  $n_1 : n_2$ , в котором присутствует спектр сигнала  $i$ -го ИРИ. Для этого применяются методы пространственной фильтрации [15] в частотной области для разделения перекрывающихся спектров сигналов.

При реализации многосигнального режима по ESPRIT для разделения спектров не требуется

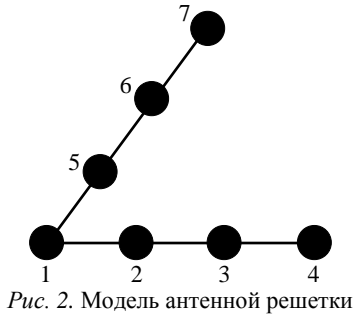


Рис. 2. Модель антенной решетки  
 Fig. 2. Antenna array model



Рис. 3. Антенная решетка, общий вид  
 Fig. 3. Antenna array, general view

дополнительного построения пространственного фильтра [16]. Для вычисления матрицы

$$\hat{S} = [\hat{S}_{n_1:n_2}^1, \dots, \hat{S}_{n_1:n_2}^d] = Y_{n_1:n_2}^T (E_S T)^H$$

из оценок спектров сигналов  $\hat{S}_{n_1:n_2}^i = (\hat{S}_{n_1}^i, \dots, \hat{S}_{n_2}^i)^T$  требуются собственные векторы  $T_\Theta$  оператора поворота, вычисляемого в ESPRIT при формировании оценок УК ИРИ, и векторы сигнального подпространства  $E_S$ .

При формировании оценок  $\hat{\theta}_{i(n_1:n_2)}$ ,  $\hat{\beta}_{i(n_1:n_2)}$  с помощью MUSIC требуется вычислить весовые коэффициенты пространственного фильтра [16–17] для обращения в нуль (зануления) сигналов с мешающих направлений и выделения сигнала с полезного направления:

$$\hat{S} = [\hat{S}_{n_1:n_2}^1, \dots, \hat{S}_{n_1:n_2}^d] = F(\hat{\theta}_{n_1:n_2}, Y_{n_1:n_2}).$$

**Результаты исследования интервального и точечного пеленгования по реальным записям сигналов.** Исследование особенностей интервального и точечного пеленгования проведено по записям реальных сигналов КВ-диапазона, сделанных с помощью семиэлементной уголковой АР с углом между линиями расположения антенн  $60^\circ$  (рис. 2) в односигнальном и многосигнальном ре-

жимах пеленгования в полосе 100 кГц. Общий вид АР приведен на рис. 3.

Расстояние между соседними антеннами составляло  $\Delta = 5$  м.

Реализовать накопление взаимных спектров в односигнальном и многосигнальном режимах не позволил объем данных в записи: было доступно только 11 выборок.

Можно показать, что в односигнальном режиме пеленгования оценки азимута и угла места при АР, соответствующей рис. 2, 3, вычисляются в виде:

$$\hat{\theta} = f_\theta(\psi_3, \psi_2) = \arctg\left(\frac{\psi_3 - 0.5\psi_2}{\sqrt{0.75}\psi_2}\right),$$

$$\hat{\beta} = f_\beta(\psi_2, \psi_3) = \arccos\left[\sqrt{\frac{(2\psi_3 - \psi_2)^2/3 + (\psi_2)^2}{(2\pi\Delta f/c)^2}}\right]$$

из оценок фазовых сдвигов:

$$\psi_2 = (1/3) \left[ \arg(\varphi_2) + \arg(\varphi_3\varphi_2^*) + \arg(\varphi_4\varphi_3^*) \right];$$

$$\psi_3 = (1/3) \left[ \arg(\varphi_5) + \arg(\varphi_6\varphi_5^*) + \arg(\varphi_7\varphi_6^*) \right],$$

где  $\varphi_m = \tilde{y}_{m_n}$  при точечном и  $\varphi_m = \tilde{y}_{m_{n_1:n_2}}$  при интервальном пеленговании;  $m = \overline{2, 7}$ .

Диаграммы направленности элементов АР с учетом их взаимного влияния были неизвестны, поэтому многосигнальный режим пеленгования реализован на основе ESPRIT [11–13], который применим для уголковой АР.

Для вычисления оператора поворота выполнялись матричные преобразования с векторами сигнального подпространства  $E_S$ :

1. Пространственное сглаживание

$$E_S^1 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S_1} & \mathbf{E}_{S_2} \\ \mathbf{E}_{S_2} & \mathbf{E}_{S_3} \\ \mathbf{E}_{S_3} & \mathbf{E}_{S_4} \end{bmatrix} \text{ и } E_S^2 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S_1} & \mathbf{E}_{S_5} \\ \mathbf{E}_{S_5} & \mathbf{E}_{S_6} \\ \mathbf{E}_{S_6} & \mathbf{E}_{S_7} \end{bmatrix},$$

где  $E_S = [\mathbf{E}_{S_{1,l}}, \dots, \mathbf{E}_{S_{1,d}}]$ ,  $l = \overline{1, 7}$ .

2. Вычисление корреляционных матриц

$$(E_S^1)^H E_S^1 = V_{10} \text{diag}(\mathbf{v}_1) V_{10}^H,$$

$$(E_S^2)^H E_S^2 = V_{20} \text{diag}(\mathbf{v}_2) V_{20}^H$$

и разложение их по собственным векторам

$$V_{1v} = \begin{bmatrix} V_{1v11} & V_{1v12} \\ V_{1v21} & V_{1v22} \end{bmatrix}; \quad V_{2v} = \begin{bmatrix} V_{2v11} & V_{2v12} \\ V_{2v21} & V_{2v22} \end{bmatrix}$$

и собственным числам  $v_1, v_2$ .

4. Вычисление операторов поворота

$$\Psi_{\Theta}^1 = V_{1v12}V_{1v22}^{-1}; \quad \Psi_{\Theta}^2 = V_{2v12}V_{2v22}^{-1};$$

$$\Psi_{\Theta}^1 = T_{\Theta 1}\hat{\Gamma}_1T_{\Theta 1}^{-1}; \quad \Psi_{\Theta}^2 = T_{\Theta 2}\hat{\Gamma}_2T_{\Theta 2}^{-1}$$

по собственным векторам  $T_{\Theta 1}, T_{\Theta 2}$  и числам  $\hat{\Gamma}_1, \hat{\Gamma}_2$ .

Матрицы из собственных векторов  $T_{\Theta 1}, T_{\Theta 2}$  отличаются только порядком следования в них собственных векторов. Поэтому следует сопоставить собственные векторы в  $T_{\Theta 2}$  собственным векторам в  $T_{\Theta 1}$ , изменив при этом порядок следования собственных чисел в  $\hat{\Gamma}_2$ :

$$\hat{\Gamma}'_2 = \text{diag}(\hat{\Gamma}'_{2_1}, \dots, \hat{\Gamma}'_{2_d}) \quad \text{так, чтобы}$$

$$\Psi_{\Theta}^2 \equiv T_{\Theta 1}\hat{\Gamma}'_2T_{\Theta 1}^{-1}.$$

5. Оценки УК ИРИ:

$$\hat{\theta}_i = \arctg \left[ \frac{\arg(\hat{\Gamma}'_{2_i}) - 0.5 \arg(\hat{\Gamma}_{1_i})}{\sqrt{0.75} \arg(\hat{\Gamma}_{1_i})} \right]; \quad \hat{\theta}_{a_i} = -\hat{\theta}_i;$$

$$\hat{\beta}_i =$$

$$= \arccos \left[ \sqrt{\frac{\frac{1}{3} [2 \arg(\hat{\Gamma}'_{2_i}) - \arg(\hat{\Gamma}_{1_i})]^2 + [\arg(\hat{\Gamma}_{1_i})]^2}{(2\pi\hat{f}_i/c)^2}} \right],$$

$$i = \overline{1, d},$$

где  $f_i$  – частота сигнала  $i$ -го ИРИ.

На рис. 4 изображен один из фрагментов накопленного амплитудного спектра записи двух

сигналов примерно одинаковой энергии. Центральная частота записи спектра  $f_0 = 5.874$  МГц,  $\Delta f = f - f_0$ . В рассматриваемой записи присутствует перекрытие спектров реальных сигналов ИРИ, которое непосредственно из анализа представленного амплитудного спектра зафиксировать невозможно.

При точечном пеленговании в односигнальном режиме (рис. 5, а) наблюдается группировка оценок пеленга в областях  $40...50^\circ$  и  $150^\circ$  и дорожка из оценок, распределенных от  $0$  до  $240^\circ$ , соединяющая эти две области. Группы указывают на наличие двух ИРИ, а дорожка косвенно свидетельствует о перекрытии их спектров потому, что из-за замираний обоих сигналов изменяются значения оценок разностей фаз между антеннами, по которым оценивается УК ИРИ. Частотно-азимутальная панорама при интервальном пеленговании (рис. 5, б) в односигнальном режиме представлена несколькими сильно отличающимися по своим значениям оценками азимута от  $40$  до  $120^\circ$ , что

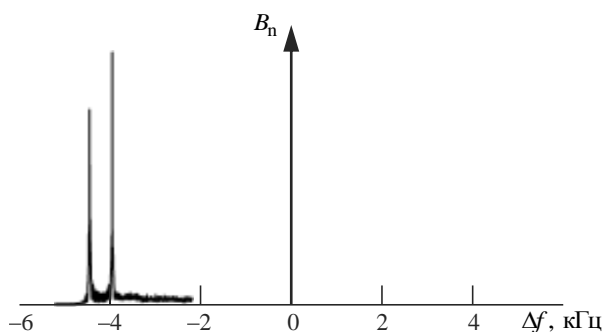


Рис. 4. Анализируемый фрагмент накопленного амплитудного спектра для двух сигналов примерно одинаковой энергии

Fig. 4. The analyzed fragment of the accumulated amplitude spectrum for two signals of approximately equal energy

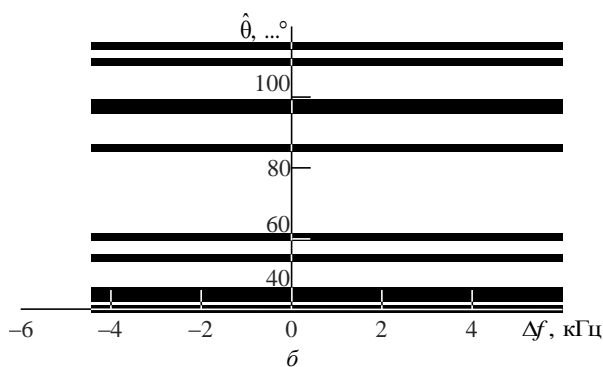
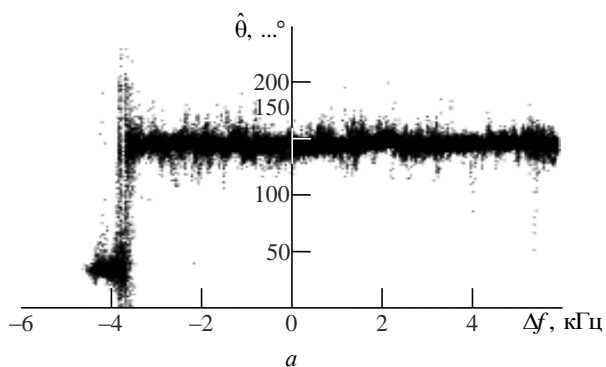


Рис. 5. Частотно-азимутальные диаграммы в односигнальном режиме для двух сигналов примерно одинаковой энергии: а – точечное пеленгование; б – интервальное пеленгование

Fig. 5. Frequency azimuth diagrams in single signal mode for two signals of approximately equal energy: а – point direction finding; б – interval direction finding



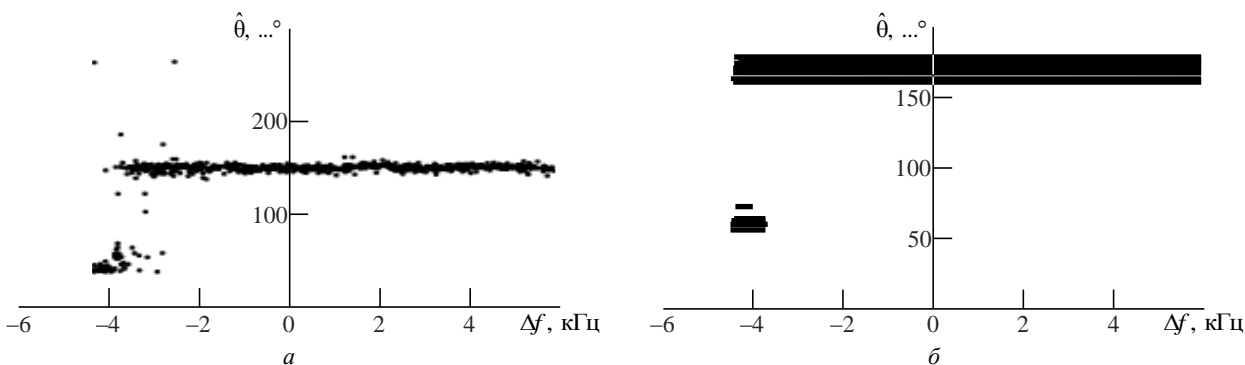


Рис. 6. Частотно-азимутальные диаграммы в многосигнальном режиме для двух сигналов примерно одинаковой энергии: а – точечное пеленгование; б – интервальное пеленгование

Fig. 6. Frequency azimuth diagrams in multi-signal mode for two signals of approximately equal energy а – point direction finding; б – interval direction finding

также объясняется флуктуациями уровня перекрывающихся по спектру сигналов обоих ИРИ.

В многосигнальном режиме при точечном (рис. 6, а) и при интервальном пеленговании (рис. 6, б) сформированы две перекрывающиеся между собой области группировки оценок  $45...50^\circ$  и  $150^\circ$ . Частотные границы группировок определены из оценок амплитудных спектров сигналов, разделенных пространственной фильтрацией по ESPRIT.

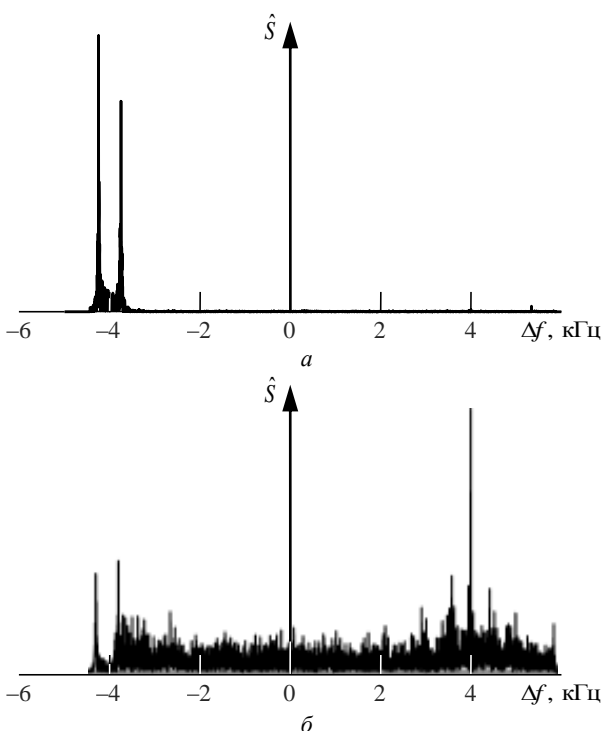


Рис. 7. Накопленные оценки спектров сигналов первого (а) и второго (б) источников радиоизлучения примерно одинаковой энергии

Fig. 7. Cumulative estimates of signal spectra of the first (а) and the second (б) sources of radio emission of approximately equal energy

Накопленные оценки спектров сигналов ИРИ показаны на рис. 7, а, б. Частотно-угломестные панорамы не приведены из-за малой информативности, поскольку плоские АР плохо оценивают малые углы места, а у обоих ИРИ они слабо различались.

На основании сформированных оценок при точечном и интервальном пеленговании вычислены средние выборочные значения и выборочные СКО оценок азимута ИРИ, которые приведены в табл. 1 в виде  $\bar{\hat{\theta}} \pm \Delta\hat{\theta}$ , где  $\bar{\hat{\theta}}$  – среднее выборочное значение;  $\Delta\hat{\theta}$  – выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки азимута ИРИ.

Из табл. 1 видно, что минимальное выборочное СКО оценок азимута ИРИ получилось при интервальном пеленговании в многосигнальном режиме. В односигнальном режиме сформирована единственная оценка азимута с большим СКО, которая не соответствует ни одному ИРИ. При точечном пеленговании в односигнальном режиме сформированы две оценки азимута ИРИ, хотя значение оценки первого ИРИ  $45^\circ$  отличается от аналогичного в многосигнальном режиме и точечном пеленговании на  $3^\circ$  и на  $7^\circ$  при интервальном. Смещение оценки в односигнальном обусловлено перекрытием спектров, но поскольку спектральные состав-

Табл. 1. Сформированные оценки азимута источников радиоизлучения примерно одинаковой энергии

Tabl. 1. Formed estimates of the azimuth of radio sources for two signals of approximately equal energy

Режим	Пеленгование	
	Точечное	Интервальное
	$\bar{\hat{\theta}} \pm \Delta\hat{\theta}, \dots^\circ$	
Односигнальный	$45 \pm 11;$ $144.6 \pm 7$	$79 \pm 29$
Многосигнальный	$48 \pm 9.5;$ $145 \pm 8.5$	$52 \pm 3.5;$ $145 \pm 4.5$

ляющие этого ИРИ превосходили по уровню спектральные составляющие второго ИРИ, то смещение получилось несущественным.

Различие в  $4^\circ$  между точечным и интервальным пеленгованием связано с тем, что число выборок  $K = 11$  в многосигнальном режиме было мало. По данным статистического моделирования сходимость к точным значениям достигается при  $K \geq 30$ .

На рис. 8–11 приведены аналогичные результаты пеленгования для случая, когда один из сигналов существенно мощнее другого. Центральная частота записи фрагмента амплитудного спектра  $f_0 = 18.537$  МГц. Сигнал с большей мощностью имитирован лабораторным ИРИ, состоящим из генератора сигналов и передающей антенны, расположенным на азимутальном направлении  $150 \dots 152^\circ$ . Генератор формировал немодулированное колебание на центральной частоте спектра реального ИРИ. Амплитудный спектр приведен на рис. 8.

При точечном пеленговании в односигнальном режиме (рис. 9, а) наблюдаются две группы оценок:

в частотных отсчетах, в которых присутствует сигнал лабораторного ИРИ, – в области  $148^\circ$ , в остальных СО, в которых его нет, – в области  $72 \dots 73^\circ$ .

При интервальном пеленговании в этом же режиме сформированы несколько близких оценок азимута, группирующихся вблизи  $147^\circ$  (рис. 9, б). Доминирование сигнала лабораторного ИРИ было значительным, поэтому он внес основной вклад

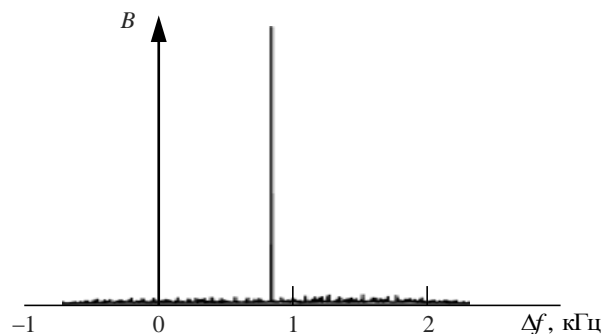


Рис. 8. Анализируемый фрагмент накопленного амплитудного спектра при доминировании одного сигнала  
 Fig. 8. The analyzed fragment of the accumulated amplitude spectrum with one signal dominated

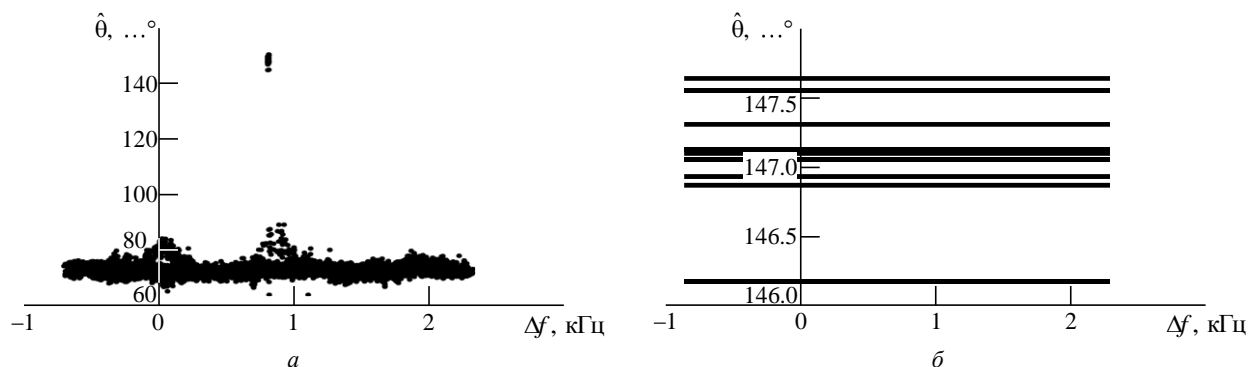


Рис. 9. Частотно-азимутальные диаграммы в односигнальном режиме при доминировании одного сигнала:  
 а – точечное пеленгование; б – интервальное пеленгование

Fig. 9. Frequency azimuth diagrams in single signal mode with one signal dominated:  
 а – point direction finding; б – interval direction finding

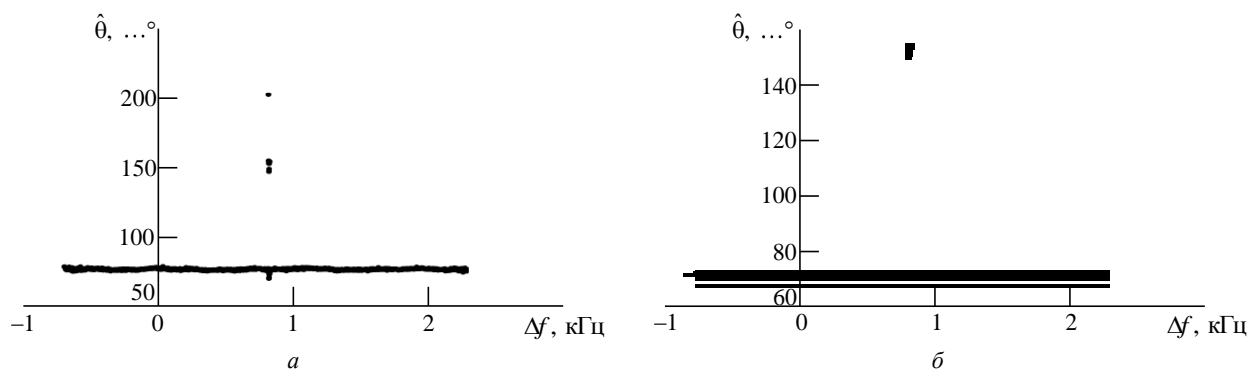


Рис. 10. Частотно-азимутальные диаграммы в многосигнальном режиме при доминировании одного сигнала:  
 а – точечное пеленгование; б – интервальное пеленгование

Fig. 10. Frequency azimuth diagrams in multi-signal mode with one signal dominated:  
 а – point direction finding; б – interval direction finding

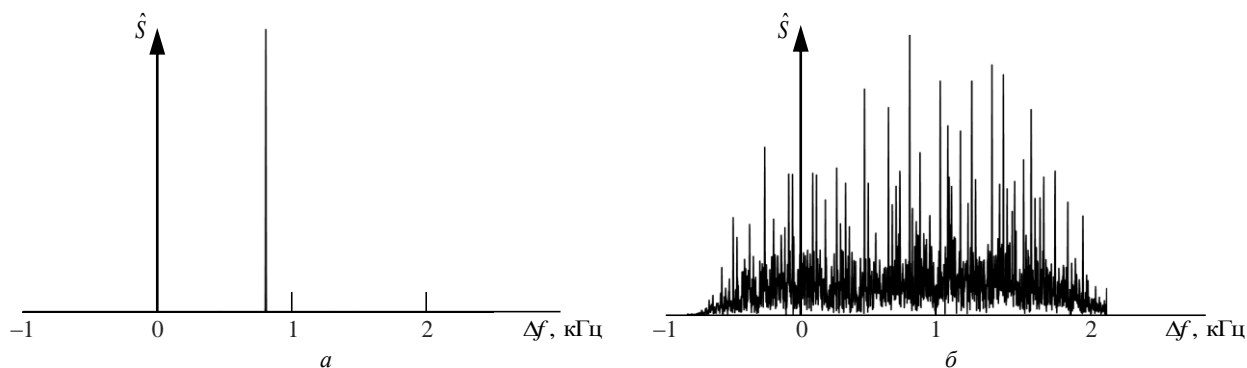


Рис. 11. Накопленные оценки спектров доминирующего источника: *a* – и второго источника; *б* – радиоизлучения  
 Fig. 11. Cumulative estimates of signal spectra of the dominated source: *a* – and the second source and *б* – of radio emission

в фазовые сдвиги сигналов отдельных антенн, которые используются при интервальном пеленговании в односигнальном режиме.

Частотно-азимутальная панорама при точечном пеленговании в многосигнальном режиме представлена на рис. 10, *a*. При интервальном пеленговании в многосигнальном режиме одновременно сформированы две оценки в областях 150...152° и 72...73° (рис. 10, *б*). Частотная протяженность областей определена по оценкам спектра доминирующего ИРИ (рис. 11, *a*) и второго ИРИ (рис. 11, *б*).

В табл. 2 приведены значения оценок азимута запеленгованных ИРИ. Так как сигнал лабораторного ИРИ был очень сильный и располагался в 100 м от АР, то его азимут был достаточно верно (с точностью до 3°) определен при всех режимах и методах пеленгования. При этом в односигнальном режиме и интервальном пеленговании лабораторный ИРИ полностью маскировал реальный ИРИ, хотя полученная оценка оказалась смещенной на 3° по сравнению с фактическим значением. Смещение обусловлено вкладом реального ИРИ в фазовые сдвиги между антеннами.

Табл. 2. Сформированные оценки азимута источников радиоизлучения при доминировании одного источника

Tabl. 2. Formed estimates of the azimuth of radio sources with one signal dominated

Режим	Пеленгование	
	Точечное	Интервальное
	$\bar{\theta} \pm \Delta\hat{\theta}, \dots^\circ$	
Односигнальный	148 ± 0.8; 72 ± 1.8	147 ± 0.4
Многосигнальный	150 ± 2.5; 72.5 ± 3	151.5 ± 1; 72 ± 1.5

Поскольку перекрытие спектров реального и лабораторного ИРИ было небольшим, то при

точечном пеленговании в односигнальном режиме были сформированы точные несмещенные оценки азимута реального ИРИ. В многосигнальном режиме точность оценок азимута всех ИРИ при интервальном пеленговании выше.

Время обработки записи в многосигнальном режиме в MatLab при интервальном пеленговании составило 0.039 с, а при точечном – 10.537 с. Выигрыш в быстродействии интервального пеленгования относительно точечного составил 270 раз.

Время обработки записи в многосигнальном режиме в MatLab при интервальном пеленговании составило 0.037 с, а при точечном – 4.487 с. Быстродействие интервального пеленгования в 121 раз выше точечного. Основное увеличение времени обработки при точечном пеленговании связано с тем, что одни и те же операции выполнялись при точечном пеленговании для 2400 отсчетов, а при интервальном пеленговании – для 10 выборок в одном интервале.

**Заключение и выводы.** Из результатов исследования по реальным записям следует:

1. В *односигнальном режиме* без предварительной проверки наличия одного сигнала целесообразно применять только точечное пеленгование. При отсутствии перекрытия спектров нескольких ИРИ в частотном отсчете формируются несмещенные оценки УК ИРИ. Перекрытие спектральных составляющих нескольких сигналов проявляется на частотно-азимутальной панораме точечного пеленгования: разрывами, дорожками из флуктуирующих оценок, по которым можно заподозрить присутствие сигналов нескольких ИРИ. При интервальном пеленговании флуктуаций оценок азимута может не наблюдаться, если доминирует сильный сигнал одного ИРИ, хотя сами оценки в области перекрытия являются смещенными.

2. *Интервальное пеленгование* в частотной области целесообразно применять только в многосигнальном режиме, так как при этом формируются практически несмещенные оценки всех присутствующих ИРИ в занимаемых ими частотных интервалах.

3. В *многосигнальном режиме* точечное пеленгование проигрывает интервальному по вычислительным затратам, быстродействию и точности оценок, необходимому объему исходных наблюдаемых данных для обработки.

Таким образом, в односигнальном режиме в условиях априорной неопределенности относительно количества присутствующих сигналов ИРИ следует применять только точечное пеленгование: оценивать УК ИРИ в каждом частотном отсчете, в котором обнаружены сигнальные составляющие, и применять вторичную обработку точечных оценок.

В многосигнальном режиме пеленгования предпочтительнее реализовывать интервальное пеленгование в диапазоне частотных отсчетов, в котором обнаружены сигнальные составляющие. При этом повышается точность оценивания УК нескольких ИРИ, требуется меньший объем наблюдаемых данных и сокращаются вычислительные затраты по сравнению с точечным пеленгованием. Многосигнальный режим с точечным пеленгованием является единственно возможным решением в условиях частичного перекрытия спектров сигналов ИРИ в рассматриваемом интервале, при том, что число сигналов ИРИ в заданном интервале оказывается больше допустимого, которое может быть разрешено AP, а в частотных отсчетах перекрытие спектров соседних сигналов меньше допустимого.

### Авторский вклад

**Шевченко Майя Евгеньевна** – теоретическая разработка методов интервального и точечного пеленгования в многосигнальном режиме.

**Малышев Виктор Николаевич** – руководство и проведение эксперимента по записи реальных сигналов.

**Соколов Сергей Сергеевич** – разработка методики сравнения интервального и точечного пеленгования в односигнальном и многосигнальном режимах.

**Горовой Андрей Вадимович** – разработка программного обеспечения, ввод и обработка записей реальных сигналов в MatLab.

**Соловьев Сергей Николаевич** – разработка программного обеспечения, ввод и обработка записей реальных сигналов в MatLab.

**Стенюков Николай Сергеевич** – техническое обеспечение записи реальных сигналов.

В подготовке статьи принимали участие все авторы.

### Author's contribution

**Maya E. Shevchenko**, theoretical development of methods for interval and point shading in multisignal mode.

**Viktor N. Malyshev**, management and conduct of an experiment on recording real signals.

**Sergey S. Sokolov**, software development of a method for comparing interval and point bearing in single- and multi-signal modes.

**Andrey V. Gorovoy**, software development, input and processing of real signal records in MathLab.

**Sergey N. Soloviev**, software development, input and processing of real signal records in MathLab.

**Nikolay S. Stenukov**, technical support for recording real signals.

All authors participated in the preparation of the article.

### Список литературы

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / под ред. А. М. Рембовского. 4-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 319 с.

2. Radiomonitoring & Radiolocation Catalog. Rohde & Schwarz. 2016. 239 p. URL: [https://cdn.rohde-schwarz.com/ru/downloads\\_45/common\\_library\\_45/brochures\\_and\\_datasheets\\_45/Radiomonitoring\\_and\\_Radiolocation\\_Catalog.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/ru/downloads_45/common_library_45/brochures_and_datasheets_45/Radiomonitoring_and_Radiolocation_Catalog.pdf) (дата обращения 21.12.2020)

3. New Direction Finders Cope with Next Generation Signals: Rohde & Schwarz Reference Card. Ver. 1.00. 2019. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/New-direction-finders\\_fly\\_en\\_3609-3842-32\\_v0100\\_web.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/New-direction-finders_fly_en_3609-3842-32_v0100_web.pdf) (дата обращения 21.12.2020)

4. Tuncer T. E., Friedlander B. Classical And Modern Direction-Of-Arrival Estimation. NewYork: Elsevier Inc.,

2009. 456 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/293668701\\_Classical\\_and\\_Modern\\_Direction-of-Arrival\\_Estimation](https://www.researchgate.net/publication/293668701_Classical_and_Modern_Direction-of-Arrival_Estimation) (дата обращения 21.12.2020)

5. Чемаров А. О. Квантильная оценка уровня шума периодограммы Бартлетта для частотного радиомониторинга // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2009. Вып. 1. С. 61–66.

6. Чемаров А. О. Квантильная оценка уровня шума периодограммы Бартлетта для частотного радиомониторинга // Информация и космос. 2009, № 3. С. 30–35.

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

8. Анализ перспективных направлений развития методов оценки угловых координат источников радиоизлучения / А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин, В. В. Негрбов, Ю. Г. Пастернак, Ю. А. Рембовский // Вестн. Воронежского гос. техн. ун-та. 2009. Т. 5, № 9. С. 47–55.

9. Грешилов А. А., Плохута П. А. Многосигнальная пеленгация на одной частоте как задача разложения сигнала на сумму экспонент // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Естественные науки". 2008. № 2. С. 67–77.

10. Грешилов А. А., Назаренко Б. П., Плохута П. А. О пеленгации источников излучений // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Естественные науки", 2007. № 3. С. 3–27.

11. Шевченко М. Е., Малышев В. Н., Файзуллина Д. Н. Пеленгование источников радиоизлучения в широкой полосе частот с использованием круговой антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 30–40. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-30-40

12. Roy R., Kailath T. ESPRIT-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques // IEEE Trans.

Acoustics, Speech and Signal Processing. 1989. Vol. ASSP-37, № 7. P. 984–995. doi: 10.1109/29.3227

13. Lemma A. N., Van der Veen A. J. Analysis of Joint Angle-Frequency Estimation Using ESPRIT // IEEE Trans. Sig. Proc. 2003. Vol. SP-51, № 5. P. 1264–1283. doi: 10.1109/TSP.2003.810306

14. Strobach P. Total Least Squares Phased Averaging and 3-D ESPRIT for Joint Azimuth-Elevation-Carrier-Estimation // IEEE Trans. Sig. Proc. 2001. Vol. 49, № 1. P. 54–62.

15. Goussetis Wireless Channel Parameter Estimation Algorithms: Recent Advances and Future Challenges / J. Huang, J. Sun, C. Wang, G. // China Communications. 2018. Vol. 15, no. 5. P. 211–228. doi: 10.1109/CC.2018.8387999

16. Шевченко М. Е., Горовой А. В., Соловьев С. Н. Пространственная фильтрация перекрывающихся по спектру сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 12. С. 27–33. doi: 10.21778/2218-5453-2019-12-27-33

17. Stevanovic I., Skrivervik A., Mosig J. R. Smart Antenna Systems for Mobile Communications: FINAL REPORT // Laboratoire d'Electromagnetisme et d'Acoustique Ecole Polytechnique Federale de Lausanne CH-1015 Lausanne Suisse. 2003. January. [https://www.academia.edu/24560455/Smart\\_Antenna\\_Systems\\_for\\_Mobile\\_Communications\\_FINAL\\_REPORT\\_ECOLE\\_POLYTECHNIQUE\\_FEDERALE\\_D\\_E\\_LAUSANNE](https://www.academia.edu/24560455/Smart_Antenna_Systems_for_Mobile_Communications_FINAL_REPORT_ECOLE_POLYTECHNIQUE_FEDERALE_D_E_LAUSANNE) (дата обращения 21.12.2020)

## Информация об авторах

**Шевченко Майя Евгеньевна** – кандидат технических наук (1997), доцент (2002) кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 60 научных работ. Сфера научных интересов – прием и обработка радиосигналов; обнаружение, оценивание и пеленгование сигналов, радиомониторинг; цифровая обработка сигналов. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия  
E-mail: [M\\_E\\_Shevchenko@mail.ru](mailto:M_E_Shevchenko@mail.ru), [meshevchenko@etu.ru](mailto:meshevchenko@etu.ru)  
<http://orcid.org/0000-0001-6873-6354>

**Малышев 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 120 научных работ. Сфера научных интересов – численные методы, СВЧ-техника, антенны, информационные сети, информационная безопасность. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия  
E-mail: [vnmalyshev@etu.ru](mailto:vnmalyshev@etu.ru)

**Соколов Сергей Сергеевич** – доктор технических наук (1996), профессор (1998), профессор кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 85 научных публикаций. Сфера научных интересов – регистрация процессов с двойной стохастичностью, адаптивные методы оценивания параметров сигналов; системная инженерия. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия  
E-mail: [ssokolov@etu.ru](mailto:ssokolov@etu.ru)

**Горовой Андрей Вадимович** – аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер научно-производственного предприятия "Новые технологии телекоммуникаций" (ООО НПП "НТТ"). Сфера научных интересов – обнаружение, оценивание, пространственная фильтрация и пеленгование сигналов, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Научно-производственное предприятие "Новые технологии телекоммуникаций" (ООО НПП "НТТ"), ул. Софьи Ковалевской, д. 20, корп. 1, лит. А, Санкт-Петербург, 195256, Россия  
E-mail: andrew1295-09@mail.ru

**Соловьев Сергей Николаевич** – инженер научно-производственного предприятия "Новые технологии телекоммуникаций" (ООО НПП "НТТ"). Сфера научных интересов – обнаружение, оценивание, пространственная фильтрация и пеленгование сигналов, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Научно-производственное предприятие "Новые технологии телекоммуникаций" (ООО НПП "НТТ"), ул. Софьи Ковалевской, д. 20, корп. 1, лит. А, Санкт-Петербург, 195256, Россия  
E-mail: lilhorde@gmail.com

**Стенюков Николай Сергеевич** – кандидат технических наук (1974), ведущий научный сотрудник АО «НИИ "Вектор"». Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов в радиомониторинге.

Адрес: АО «НИИ "Вектор"», ул. Кантемировская, д. 10, Санкт-Петербург, 197342, Россия  
E-mail: nsten@mail.ru.

## References

1. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A. Radiomonitoring: problems, methods, means. Under the ed. of A. M. Tambovskogo. 4<sup>th</sup> ed. M.: *Gorajthaj linija*. 2015, 319 p. (In Russ.)
2. Radiomonitoring & Radiolocation Catalog. Rohde & Schwarz. 2016, 239 p. Available at: [https://cdn.rohde-schwarz.com/ru/downloads\\_45/common\\_library\\_45/brochures\\_and\\_datasheets\\_45/Radiomonitoring\\_and\\_Radiolocation\\_Catalog.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/ru/downloads_45/common_library_45/brochures_and_datasheets_45/Radiomonitoring_and_Radiolocation_Catalog.pdf) (accessed 21.12.2020)
3. New Direction Finders Cope with Next Generation Signals: Rohde & Schwarz Reference Card. Ver. 1.00. 2019. Available at: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/New-direction-finders\\_fly\\_en\\_3609-3842-32\\_v0100\\_web.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/New-direction-finders_fly_en_3609-3842-32_v0100_web.pdf) (accessed 21.12.2020)
4. Tuncer T. E., Friedlander B. Classical And Modern Direction-Of-Arrival Estimation. NewYork: Elsevier Inc., 2009. 456 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/293668701\\_Classical\\_and\\_Modern\\_Direction-of-Arrival\\_Estimation](https://www.researchgate.net/publication/293668701_Classical_and_Modern_Direction-of-Arrival_Estimation) (accessed 21.12.2020)
5. Chemarov A. O. Quantile estimation of the noise level of the Bartlett periodogram for frequency radio monitoring. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2009, iss. 1, pp. 61–66. (In Russ.)
6. Chemarov A. O. Quantile estimation of the noise level of the Bartlett periodogram for frequency radio monitoring. Information and space. 2009, no. 3, pp. 30–35. (In Russ.)
7. Shevchenko M. E., Chemarov A. O. Detection and estimation of parameters of radio emission sources in a wide field of view. SPb: Publishing house of *SPbGETU "LETI"*, 2011. (In Russ.)
8. Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Negrobov V. V., Pasternak Yu. G., Rembovsky Yu. A. Analysis of perspective directions of development of methods for estimating angular coordinates of radio emission sources. *Vestn. Voronezhskogo gos. tehn. un-ta*, 2009, vol. 5, no. 9, pp. 47–55. (In Russ.)
9. Greshilov A. A., Plokhuta P. A. Multi-Signal direction finding at one frequency as a problem of signal decomposition by the sum of exponents. *Vestn. MGTU im. N. E. Baumana*. Ser. "Natural Sciences". 2008, no. 2, pp. 67–77. (In Russ.)
10. Greshilov A. A., Nazarenko B. P., Plahuta P. A. On the direction finding of radiation sources, *Vestn. MGTU im. N. E. Baumana*, Ser. "Natural Sciences", 2007, no. 3, pp. 3–27. (In Russ.)
11. Shevchenko M. E., Malyshev V. N., Fayzullina D. N. Radio Source Direction Finding in Wide Frequency Band Using Circular Antenna Array. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 6, pp. 30–40. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-30-40 (In Russ.)
12. Roy R., Kailath T. ESPRIT-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques. *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*. 1989. Vol. ASSP-37, no. 7, pp. 984–995. doi: 10.1109/29.3227.
13. Lemma A. N., Van der Veen A. J. Analysis of Joint Angle-Frequency Estimation Using ESPRIT // *IEEE Trans. Sig. Proc.* 2003. Vol. SP-51, № 5. P. 1264–1283. doi: 10.1109/TSP.2003.810306
14. Strobach P. Total Least Squares Phased Averaging and 3-D ESPRIT for Joint Azimuth-Elevation-Carrier-Estimation. // *IEEE Trans. Sig. Proc.* 2001, vol. 49, no. 1, pp. 54–62.
15. Huang J., Sun J., Wang C., Goussetis G. Wireless Channel Parameter Estimation Algorithms: Recent Advances and Future Challenges. *China Communications*. 2018. Vol. 15, no. 5, pp. 211–228. doi: 10.1109/CC.2018.8387999
16. Shevchenko M. E., Gorovoy A. V., Solov'ev S. N. Spatial filtering of signals overlapping in the spectrum. *Voprosy radioelektroniki*. 2019, no. 12, pp. 27–33. doi: 10.21778/2218-5453-2019-12-27-33. (In Russ.)

17. Stevanovic I., Skrivervik A., Mosig J. R. Smart Antenna Systems for Mobile Communications: FINAL REPORT. Laboratoire d'Electromagnetisme et d'Acoustique Ecole Polytechnique Federale de Lausanne CH-1015 Lausanne Suisse. 2003.

January Available at: [https://www.academia.edu/24560455/Smart\\_Antenna\\_Systems\\_for\\_Mobile\\_Communications\\_FINAL\\_REPORT\\_ECOLE\\_POLYTECHNIQUE\\_FEDERALE\\_DE\\_LAUSANNE](https://www.academia.edu/24560455/Smart_Antenna_Systems_for_Mobile_Communications_FINAL_REPORT_ECOLE_POLYTECHNIQUE_FEDERALE_DE_LAUSANNE) (accessed 21.12.2020)

#### Information about the authors

**Maya E. Shevchenko**, Cand. Sci. (Eng.) (1997), Associate Professor (2002) of the Department of Radio Electronics Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 60 scientific publications. Area of expertise: radio signals reserving and processing; frequency radio monitoring; digital signal processing. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: [m\\_e\\_shevchenko@mail.ru](mailto:m_e_shevchenko@mail.ru), [meshevchenko@etu.ru](mailto:meshevchenko@etu.ru)  
<http://orcid.org/0000-0001-6873-6354>

**Victor N. Malyshev**, Dr. Sci. (Eng.) (2000), Professor (2004), the Dean of faculty of Radio Equipment and Telecommunications of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: numerical methods; microwave engineering; antennas; information networks; information security. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: [vnmalyshev@etu.ru](mailto:vnmalyshev@etu.ru)

**Sergey S. Sokolov**, Dr. Sci. (Eng.) (1996), Professor (1998), Professor of the Department of microradioelectronics and radio equipment technology of the V. I. Ulyanov (Lenin) Saint Petersburg state electrotechnical University "LETI". Author of 85 scientific publications. Area of expertise: registration of processes with double stochasticity, adaptive methods for estimating signal parameters, system engineering. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: [sssokolov@etu.ru](mailto:sssokolov@etu.ru)

**Andrey V. Gorovoy**, Post-graduate student Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin) (SPbGETU), engineer research and Production enterprise "New technologies of Telecommunications" (LLC NPP "NTT"). Area of expertise: detection, estimation, spatial filtering and bearing of signals, digital signal processing. Address: Research and Production enterprise "New technologies of Telecommunications" (LLC NPP "NTT"), 20 Sofya Kovalevskaya St., buil. 1, lit. A, St Petersburg 195256, Russia  
E-mail: [andrew1295-09@mail.ru](mailto:andrew1295-09@mail.ru)

**Sergey N. Soloviev**, Engineer, research and Production enterprise "New technologies of Telecommunications" (LLC NPP "NTT"). Area of expertise: detection, estimation, spatial filtering and direction finding of signals, digital signal processing. Address: Research and Production enterprise "New technologies of Telecommunications" (LLC NPP "NTT"), 20 Sofya Kovalevskaya St., buil. 1, lit. A, St Petersburg 195256, Russia  
E-mail: [lilhorde@gmail.com](mailto:lilhorde@gmail.com)

**Nikolay S. Stenukov**, Cand. Sci. (Eng.) (1974), Leading Researcher Joint-Stock Company "NII "Vektor"". Area of expertise: digital signal processing in radiomonitoring. Address: JSC Company "Vector", 10 Kantemirovskaya St., St Petersburg 197342, Russia  
E-mail: [nsten@mail.ru](mailto:nsten@mail.ru)

---