

Пространственная фильтрация при определении положения источников радиоизлучения

А. В. Горовой^{1,2}, М. Е. Шевченко^{1✉}, В. Н. Малышев¹

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

²ООО «НПП "Новые Технологии Телекоммуникаций"», Санкт-Петербург, Россия

✉ m_e_shevchenko@mail.ru

Аннотация

Введение. Угломерный метод определения положения перекрывающихся по спектру источников радиоизлучения (ИРИ) дополнен пространственной фильтрацией (ПФ) их многолучевых сигналов и вычислением взаимных корреляционных функций (ВКФ) между оценками сигналов, принятых в одном и в разных пунктах приема (ПП). При таком подходе не формируются ложные точки и области определения положения.

Цель работы. Разработка и исследование метода сопоставления линий положения, базирующегося на оценках сигналов ИРИ, полученных ПФ в разных ПП.

Материалы и методы. Оценки направлений прихода перекрывающихся по спектру сигналов ИРИ в разных ПП формируются на основе метода MUSIC. Коэффициенты пространственного фильтра для выделения сигналов ИРИ рассчитываются по критерию наименьших квадратов с помощью полученных оценок. Вычисление ВКФ оценок сигналов в фиксированном ПП позволяет исключить из анализа переотраженные сигналы. Сопоставление оценок направлений прихода сигналов в разные ПП выполнено на основе вычисления их ВКФ. Режекция неподавленных мешающих сигналов из-за неточно заданного амплитудно-фазового распределения (АФР) антенной решетки (АР) улучшает результаты ПФ. Исследование разработанного метода проведено имитационным моделированием в MATLAB.

Результаты. При точном задании АФР АР определение положения обнаруженных ИРИ, излучающих сигнал любой интенсивности, происходит с вероятностью, достигающей 100 %. Наихудшими условиями является доминирование одного сильного сигнала ИРИ во всех ПП при неточном задании АФР АР. Применение дополнительной режекции повышает вероятность правильного определения положения ИРИ, излучающих слабый сигнал, с 40 до 90 %.

Заключение. В зависимости от условий распространения, уровней сигналов и точности калибровки АР вероятность правильного определения положения источников слабых сигналов превышает 90 %.

Ключевые слова: угломерный метод определения положения, пространственная фильтрация сигналов, оценки направлений прихода сигналов, азимут, угол места, перекрытие спектров сигналов, MUSIC, антенная решетка, амплитудно-фазовое распределение, режекция

Для цитирования: Горовой А. В., Шевченко М. Е., Малышев В. Н. Пространственная фильтрация при определении положения источников радиоизлучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 5. С. 28–42.

doi: [10.32603/1993-8985-2025-28-5-28-42](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-5-28-42)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта "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 № 075-11-2025-023 от 27.02.2025 г.) и в рамках Постановления Правительства РФ от 9 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").

Статья поступила в редакцию 31.05.2025; принята к публикации после рецензирования 19.09.2025; опубликована онлайн 28.11.2025

Spatial Filtering when Determining the Position of Radio Sources

Andrei V. Gorovoy^{1,2}, Maya E. Shevchenko^{1✉}, Victor N. Malyshev¹

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

²Limited Liability Company "New Telecommunications Technologies",
Saint Petersburg, Russia

✉ m_e_shevchenko@mail.ru

Abstract

Introduction. The angular method of locating overlapping spectrum radio sources (RS) is supplemented by spatial filtering (SPF) of their multipath signals. The cross-correlation function (CCF) between the estimates of signals at the reception point (RP) allows extraction of RS signals with a minimum delay corresponding to the true position of RS under a certain configuration of the multi-position receiving system. The CCF between the estimates of signals in different points allows matching the position lines defined by the estimates of azimuth and elevation angle corresponding to the same RS thus avoiding the formation of false points and areas of location.

Aim. Development and investigation of a method for matching position lines based on RS signal estimates obtained by spatial filtering in different receiving points.

Materials and methods. The MUSIC method was used to estimate the direction of arrival of overlapping spectrum signals in different RPs. Based on these estimates, the coefficients of the spatial filter for RS signal selection were calculated using the least squares criterion. Calculating the CCF estimates of signals at a fixed RP eliminates the reflected signals from further analysis. The quality of SPF is improved with an inaccurately specified amplitude–phase distribution (APD) of the antenna array (AA) by rejecting non-suppressed interfering signals. The study was carried out by statistical simulation in the MATLAB environment.

Results. Under an accurate APD definition of the AA the probability of locating RS with signals of any intensity reaches 100 %. The worst results are achieved when one strong RS signal dominates in all reception points under inaccurate definition of the APD of AA. In such a case, the application of additional rejection increases the probability of correct location of weak RS from 40 to 90 %.

Conclusion. Depending on different propagation conditions and signal levels, the accuracy of AA calibration and the probability of location of weak signal sources exceeds 90 %.

Keywords: angular location method, spatial filtering of signals, estimations of signal arrival directions, azimuth, elevation, overlap of signal spectra, MUSIC, antenna array, amplitude–phase distribution, rejection

For citation: Gorovoy A. V., Shevchenko M. E., Malyshev V. N. Spatial Filtering when Determining the Position of Radio Sources. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 5, pp. 28–42.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-28-42

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The work has been carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the implementation of the complex project "Multimodal complex of airport airspace control" (Agreement on granting a subsidy of the federal budget for the development of cooperation between a state scientific institution and an organization of the real sector of the economy for the implementation of a complex project to create high-tech production № 075-11-2025-023 from 27.02.2025) and within the framework of the Resolution of the Government of the Russian Federation. The work has been performed on the basis of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St Petersburg State Electrotechnical University "LETI" n. a. V. I. Ulyanov (Lenin)" (SPbGETU "LETI").

Submitted 31.05.2025; accepted 19.09.2025; published online 28.11.2025

Введение. Пространственная фильтрация (ПФ) перекрывающихся по спектру сигналов применяется в системах связи для выделения полезного сигнала, в системах специального назначения для защиты от преднамеренных и непреднамеренных помех, при радиомонито-

ринге и радиоконтроле с целью последующей идентификации источников радиоизлучения (ИРИ) и демодуляции их сигналов.

Описанное далее исследование, проведенное авторами настоящей статьи, показывает, что применение ПФ в многопозиционных си-

стемах определения положения ИРИ угломерным методом позволяет устранить ложные точки и области положения при наличии нескольких перекрывающихся по спектру ИРИ и многолучевом распространении их сигналов.

Методы ПФ с использованием фазированной антенной решетки (ФАР) и многолучевой (адаптивной) цифровой антенной решетки (ЦАР) базируются на разделении перекрывающихся по спектру сигналов ИРИ на основе пространственных параметров – направлений прихода их сигналов, которые оцениваются косвенно или непосредственно до ПФ [1, 2].

В ФАР [3, 4] формируется узкая диаграмма направленности (ДН), которая последовательно сканирует пространство в азимутальной и угломерной плоскостях. Принятый с определенного направления сигнал ассоциируется с ИРИ, а направление – с его угловыми координатами (УК).

В ЦАР [3, 4] одновременно формируются многолучевые или адаптивные виртуальные ДН для всех ИРИ. В многолучевых ЦАР УК ИРИ оцениваются так же, как в ФАР – обнаружением сигнала с заданного направления луча, а оценкой сигнала является принятый процесс. В адаптивных ЦАР весовые коэффициенты диаграммообразующего устройства формируются на основе всех оценок УК ИРИ для выделения полезного и зануления всех мешающих сигналов [3].

Любой метод ПФ совместим с угломерным

методом определения положения ИРИ, использующим оценки их УК в разнесенных пунктах приема (ПП) для построения линий положений и поиска областей их пересечений.

Угломерный метод определения положения ИРИ универсален. Его точность определяется параметрами антенной решетки (АР) в заданной полосе частот и взаимным расположением ПП и ИРИ [4–8], а не шириной спектра сигнала.

Угломерный метод подходит для определения положения перекрывающихся по спектру ИРИ, а применение ПФ позволяет устранить ложные точки их фиксации, возникающие из-за пересечения линий положения разных ИРИ. Метод нечувствителен к частотным и временным расстройкам между ПП, но требует высоко размещенной, качественно откалиброванной АР.

Классический угломерный метод основан на поиске точек или областей пересечения линий положения, задаваемых оценками УК ИРИ, сформированных в разных ПП. При наличии сигнала одного ИРИ его положение определяется однозначно. Однако при поступлении на ПП сигналов нескольких ИРИ, которые невозможно разделить частотной фильтрацией, в точках пересечения или близкого прохода линий положения различных ИРИ фиксируются ложные точки и области положения ИРИ (рис. 1, а).

Возможно появление ложных точек и областей фиксации положения ИРИ и при наличии

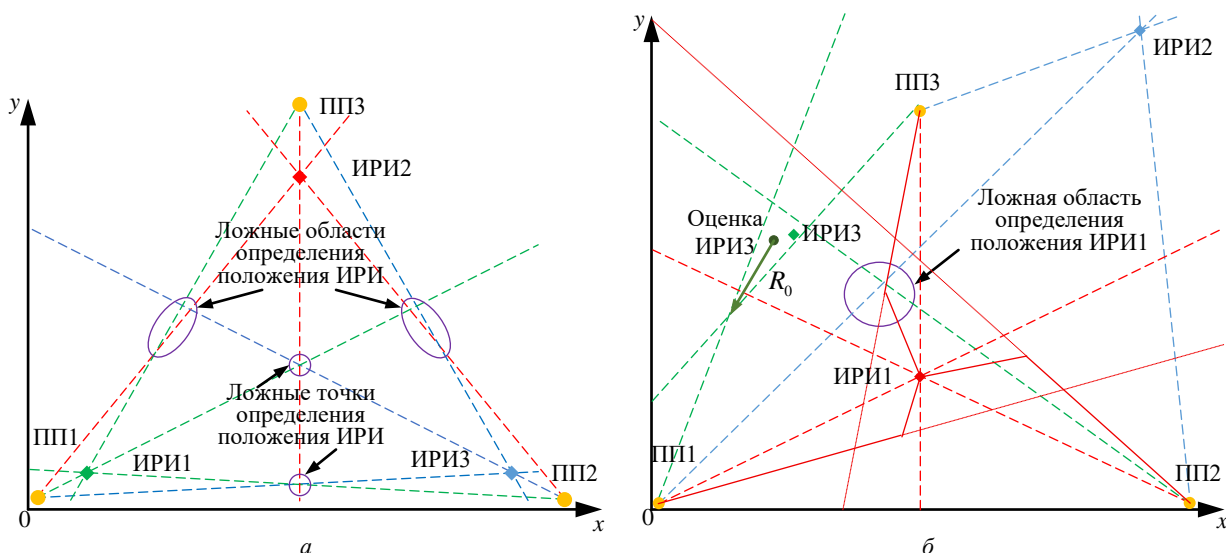


Рис. 1. Определение положения ИРИ угломерным методом: а – без переотражения сигналов; б – с переотражением сигналов. Штриховые линии – положения ИРИ без переотражения сигналов; пунктирные линии – положения ИРИ при переотражении сигналов

Fig. 1. Angular method of RS location: а – without signal reflection; б – with signal reflection. Dashed lines – RS position line without signal re-reflection; dotted lines – RS position line with signal re-reflection.

переотражений их сигналов на пути распространения от ИРИ к ПП (рис. 1, б), а также вследствие возникающего при этом многолучевого распространения сигналов ИРИ.

Области пересечения линий положения формируются из-за неточных оценок УК ИРИ в разных ПП. Чем сильнее отличаются оценки УК ИРИ от истинных значений, тем больше площадь образованного пересечениями многоугольника. Достоверность сформированной области местоположения оценивается максимальным расстоянием R_0 от центра тяжести многоугольника до его вершин (рис. 1, б) [6].

Для исключения ложных точек и областей требуется идентификация линий положения разных ИРИ. В [9] предложено решение рассматриваемой задачи на основе построения многомерной функции правдоподобия и поиска ее максимумов по всем эталонным координатам. Однако задание самой этой функции в условиях неопределенности и при перекрытии спектров ИРИ – сложная задача.

В настоящей статье представлен разработанный авторами метод определения положения ИРИ, обеспечивающий идентификацию линий положения, полученных в разнесенных ПП, на основе оценок сигналов ИРИ, найденных ПФ.

Постановка задачи. Система определения положения ИРИ состоит из K разнесенных ПП, оборудованных M -элементными АР, каждая из которых подключена к M -канальному приемнику с когерентными и синхронными каналами.

В k -м ПП наблюдаемыми данными являются выборки принятых процессов

$$\mathbf{x}_{km} = (x_{km1}, \dots, x_{kmN})$$

от M -элементной АР:

$$\mathbf{x}_{km} = \sum_{i=1}^{d_k} \sum_{l=1}^{L_{ik}} \mathbf{s}_{ilk} \tilde{a}_m(\theta_{ilk}, \beta_{ilk}) + \xi_{km}, \quad (1)$$

$$m = \overline{1, M}, \quad k = \overline{1, K},$$

где d_k – количество перекрывающихся по спектру сигналов ИРИ в k -м ПП; L_{ik} – количество лучей распространения сигнала i -го ИРИ, зафиксированных в k -м ПП; \mathbf{s}_{ilk} – выборка из отсчетов сигнала l -го луча i -го ИРИ в k -м ПП; $\theta_{ilk}, \beta_{ilk}$ – азимут и угол места соответственно сигнала i -го ИРИ по l -му лучу в k -м ПП;

$\tilde{a}_m(\theta_{ilk}, \beta_{ilk})$ – амплитудно-фазовый отклик m -й антенны на сигнал с направления $(\theta_{ilk}, \beta_{ilk})$; ξ_{km} – шумовая выборка.

Требуется на основе данных (1), полученных в K пунктах приема, определить положение перекрывающихся по спектру ИРИ.

Оценка УК и сигналов ИРИ в разнесенных пунктах приема. Оценка УК выполняется согласно мере MUSIC [10]:

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta, \beta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta, \beta) \mathbf{a}(\theta, \beta)}{\mathbf{a}^H(\theta, \beta) E_{\xi} E_{\xi}^H \mathbf{a}(\theta, \beta)},$$

где $\mathbf{a}(\theta, \beta) = [a_1(\theta, \beta), \dots, a_M(\theta, \beta)]^T$ – ожидаемое амплитудно-фазовое распределение (АФР) АР с направления (θ, β) , оцененное калибровкой АР; E_{ξ} – векторы шумового подпространства; H – символ преобразования Гильберта; T – символ транспонирования.

Векторы шумового подпространства E_{ξ} выделяются из собственных векторов E разложения корреляционной матрицы

$$X_k X_k^H = E \text{diag}(\Lambda) E^H,$$

где $X_k = [\mathbf{x}_{k1}, \dots, \mathbf{x}_{kM}]^T$, $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{\hat{Q}})$; $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{\hat{Q}} > \lambda_{\hat{Q}+1} > \dots > \lambda_M$ – собственные числа (СЧ) корреляционной матрицы в порядке убывания.

Собственные векторы

$$E = \left[\underbrace{\mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_{\hat{Q}}}_{E_s}, \underbrace{\mathbf{E}_{\hat{Q}+1}, \dots, \mathbf{E}_M}_{E_{\xi}} \right]$$

содержат векторы сигнального подпространства E_s и шумового подпространства E_{ξ} . Количество СЧ \hat{Q} , превысивших установленный порог C_{α} , определяемый уровнем вероятности ложной тревоги α ($\lambda_{\hat{Q}} > C_{\alpha}$), указывает количество принятых сигналов.

При произвольной конфигурации АР оценки УК \hat{Q}_k ИРИ в k -м ПП

$$(\hat{\theta}_{qk}, \hat{\beta}_{qk}) = (\hat{\theta}_{ilk}, \hat{\beta}_{ilk}); \quad q = \overline{1, \hat{Q}_k};$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^{d_k} L_{ik} < M$$

находятся численным поиском координат экстремумов на всей области значений искомых параметров:

$$\left(\hat{\theta}_{qk}, \hat{\beta}_{qk}\right)_{q=1, \overline{Q_k}} = \arg \max_{\substack{\theta \in 0..360^\circ, \\ \beta \in -90..90^\circ}} P_{\text{MUSIC}}(\theta, \beta).$$

Коэффициенты пространственного фильтра определяются по критерию наименьших квадратов [11, 12]:

$$W_k = \left[\mathbf{W}_{1k}, \dots, \mathbf{W}_{qk}, \dots, \mathbf{W}_{\hat{Q}_k k} \right] = A^H(\hat{\theta}_k, \hat{\beta}_k) \left[A^H(\hat{\theta}_k, \hat{\beta}_k) \times A(\hat{\theta}_k, \hat{\beta}_k) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\mathbf{W}_{qk} = (W_{qk1}, \dots, W_{qkM})^T$; W_{qkm} – коэффициент m -го элемента k -го ПП для выделения q -го сигнала;

$$A(\hat{\theta}_k, \hat{\beta}_k) = \left[a(\hat{\theta}_{1k}, \hat{\beta}_{1k}), \dots, a(\hat{\theta}_{\hat{Q}_k k}, \hat{\beta}_{\hat{Q}_k k}) \right]$$

– ожидаемое АФР для направлений прихода $\hat{\theta}_k, \hat{\beta}_k$, оцененных по мере MUSIC.

Оценки присутствующих в наблюдаемых данных сигналов \hat{s}_{qk} ($q=1, \overline{Q_k}$) с учетом многолучевости

$$\left(\hat{s}_{1k}, \dots, \hat{s}_{qk}, \dots, \hat{s}_{\hat{Q}_k k}\right)^T = W_k X_k. \quad (3)$$

Несоответствие фактического АФР A_P ожидаемому $\tilde{A}(\theta_k, \beta_k) \neq A(\hat{\theta}_k, \hat{\beta}_k)$ мало сказывается на точности оценивания УК ИРИ, но сильно влияет на качество ПФ сигналов, поскольку весовые коэффициенты пространственного фильтра (2) рассчитываются на основе ожидаемого АФР.

При неточном ожидаемом АФР рассчитанные коэффициенты пространственного фильтра (2) не формируют нулевого значения на его выходе в направлении мешающих сигналов. Поэтому сильные мешающие сигналы ИРИ и их многолучевые компоненты могут присутствовать в оценках сигналов.

В [13] применительно к задаче демодуляции показано, что задание АФР A_P с погрешностью 5° при ПФ равноуровневых сигналов ИРИ незначительно ухудшает показатели помехоустойчивости. Однако ПФ сигналов при доминировании одного

сильного мешающего сигнала не позволяет демодулировать оценки слабого сигнала.

Неточность задания ожидаемого АФР в рассматриваемой задаче приводит к проникновению сильных мешающих сигналов в оценку слабого полезного сигнала. В результате возможно появление ложного пика взаимной корреляционной функции (ВКФ) между оценками сигналов разных ИРИ, а пик ВКФ между оценками сигнала одного ИРИ существенно уменьшается.

Поскольку точно измерить, а следовательно, задать ожидаемое АФР A_P невозможно, а уровни фильтруемых сигналов неизвестны, ПФ необходимо дополнить режекцией проникающих мешающих сигналов. Режекция, выполненная по [13], продемонстрировала свою эффективность при демодуляции в широком диапазоне отношений сигнал/помеха и сигнал/шум.

Режекция мешающих сигналов из оценок полезных сигналов ИРИ, полученных ПФ в каждом пункте приема, выполняется следующим образом:

1. Оценки сигналов $\hat{s}_{1k}, \dots, \hat{s}_{qk}, \dots, \hat{s}_{\hat{Q}_k k}$ переупорядочиваются в порядке возрастания их норм $\|\hat{s}_{qk}\| < \|\hat{s}_{(q+1)k}\|$, $q=1, \overline{Q_k}$ так, что первым будет сигнал с минимальной нормой:

$$\|\hat{s}_{1k}\| = \min \left\{ \|\hat{s}_{qk}\| \right\}, \quad q=1, \overline{Q_k}.$$

2. Для каждого сигнала, начиная с самого слабого \hat{s}_{1k} , формируется исходный базис $g_q = (\hat{s}_{(q+1)k}, \dots, \hat{s}_{\hat{Q}_k k})$, из которого ортогонализацией Грамма–Шмидта получают ортонормированный базис: $e_{qv} = \frac{b_{qv}}{\|b_{qv}\|}$, $v=1, \overline{Q-q}$,

$$\text{где } b_{qv} = g_{qv} - \sum_{j=1}^{v-1} \frac{g_{qv} b_{qv}^H}{\|b_{qj}\|^2} b_{qj}, \quad b_{q1} = g_{q1}.$$

Оценка сигнала ИРИ после режекции

$$\tilde{\hat{s}}_{qk} = \hat{s}_{qk} - \sum_{v=1}^{\hat{Q}-q} \hat{s}_{qk} e_{qv}^H e_{qv}. \quad (4)$$

Определение положения ИРИ с перекрывающимися по спектру сигналами. Исходными данными для определения положения таких ИРИ являются совместные оценки их УК и сигналов, принятых в K пунктах приема:

$$\{(\hat{\theta}_{qk}, \hat{\beta}_{qk}, \hat{s}_{qk})\}, q = \overline{1, Q_k}, k = \overline{1, K}.$$

Для определения положения ИРИ на основе этих данных требуется сопоставить оценки УК, соответствующих одному ИРИ.

Среди \hat{Q}_k сформированных оценок сигналов могут присутствовать оценки многолучевых компонент сигналов одного и того же ИРИ. Для однозначности определения положения ИРИ их требуется выделить. Если ПП расположен выше ИРИ, то из всех многолучевых компонент именно сигнал с минимальной задержкой с наибольшей вероятностью соответствует УК реального ИРИ, даже если не является сигналом прямой видимости [14].

В каждом ПП среди сформированных оценок сигналов требуется выделить многолучевые компоненты, соответствующие одному и тому же ИРИ. Для этого необходимо вычислить ВКФ всех выделенных ПФ сигналов в каждом ПП и определить коррелированные между собой оценки сигналов, соответствующие одному ИРИ.

1. Алгоритм поиска коррелированных оценок сигналов в каждом ПП следующий:

1.1. Вычислить нормированные ВКФ:

$$R_{qp}^k(n) = \frac{r_{qp}^k(n)}{\sqrt{r_{qq}^k(0)r_{pp}^k(0)}},$$

где

$$r_{qp}^k(n) = \sum_{v=1}^N \hat{s}_{vqk} \hat{s}_{(v+n)pk},$$

$$r_{qp}^k(-n) = \sum_{v=1}^N \hat{s}_{(v+n)qk} \hat{s}_{vpk}, \quad 0 \leq n \leq N-1.$$

1.2. Найти пары (q, p) , $q \neq p$, для которых $\max R_{qp}^k = R_{qp}^k(N_{0qp})$ превышает заданный порог C_R^k , причем $N_{0qp} \in [-(N-1), N-1]$, $q = \overline{1, Q_k}$, $p = \overline{1, Q_k}$.

1.3. Сформировать новый набор совместных оценок УК и сигналов ИРИ $(\tilde{\Theta}^k, \tilde{S}^k)$ из оценок $\tilde{\Theta}^k = (\tilde{\Theta}_1, \dots, \tilde{\Theta}_{\tilde{Q}_k})$, $\tilde{\Theta}_{\tilde{q}k} = (\tilde{\theta}_{\tilde{q}k}^i, \tilde{\beta}_{\tilde{q}k}^i)$, $\tilde{Q}_k \leq \hat{Q}_k$, $\tilde{S}^k = [\tilde{S}_{1k}, \dots, \tilde{S}_{\tilde{Q}_k}]$. Из сформированного набора исключены оценки, соответствующие

щие запаздывающим многолучевым компонентам сигнала одного ИРИ, для которых $N_{0qp} > 0$.

2. Алгоритм поиска коррелированных оценок сигналов между разными ПП следующий:

2.1. Вычислить нормированные ВКФ между k -м и κ -м ПП:

$$\mathbf{R}_{qp}^{k\kappa} = (R_{qp_1}^{k\kappa}, \dots, R_{qp_N}^{k\kappa}),$$

где

$$R_{qp_n}^{k\kappa} = \frac{r_{qp}^{k\kappa}(n)}{\sqrt{r_{qq}^{k\kappa}(0)r_{pp}^{k\kappa}(0)}};$$

$$r_{qp}^{k\kappa}(n) = \sum_{v=1}^N \tilde{S}_{qv\kappa} \tilde{S}_{p(v+n)\kappa}, \quad q = \overline{1, \tilde{Q}_k}, \\ p = \overline{1, \tilde{Q}_\kappa}.$$

2.2. Сформировать ВКФ сигналов, выделенных в различных ПП (см. п. 1.3). Сигналы, ВКФ которых характеризуются явно выраженным максимумом, рассматриваются далее как принадлежащие одному и тому же ИРИ. К дальнейшей обработке принимаются линии положения ИРИ, максимум ВКФ сигналов которых превосходит порог $C_R^{k\kappa} = 0.4$:

$$p_\kappa, q_k, n_{p_\kappa q_k} = \arg \left[\max (\mathbf{R}_{pq}^{k\kappa}) > C_R^{k\kappa} \right], \\ q = \overline{1, \tilde{Q}_k}, p = \overline{1, \tilde{Q}_\kappa}.$$

2.3. Сопоставить найденным парам (p_κ, q_k) оценки $(\hat{\theta}_{p_\kappa}, \hat{\beta}_{p_\kappa})$ и $(\hat{\theta}_{q_k}, \hat{\beta}_{q_k})$, $k, \kappa = \overline{1, K}$ со всех ПП.

2.4. Построить линии положения, соответствующие каждому ИРИ. Найти точки пересечений линий положения и образованный ими многоугольник. Определить максимальное расстояние R_0 (см. рис. 1, б) от центра тяжести многоугольника до его вершин. Если $R_0 \leq R_{0пор}$, то центр тяжести многоугольника является оценкой местоположения ИРИ. Значение $R_{0пор}$ задается равным 5 % от максимального предполагаемого расстояния от ИРИ до точки приема [6].

Исследование. Исследование представленного алгоритма определения положения ИРИ с перекрывающимися по спектру сигналами проведено статистическим имитационным моделированием

ем. В модели имитируется прием в трех ПП с семиэлементными круговыми АР, расположенными в вершинах равностороннего треугольника с длиной стороны 10 км (см. рис. 1, б). Координаты ПП и ИРИ заданы в декартовой системе.

ИРИ1 находится в равноудаленной точке от всех ПП, ИРИ2 – вне треугольника вдали от ПП для имитации слабого сигнала. ИРИ3 размещен вне треугольника вблизи от двух ПП для имитации пересечения линий местоположения. Во втором ПП разница азимутов прихода сигналов ИРИ1 и ИРИ3 составляет примерно 5°.

Уровень сигналов в ПП задавался моделью Окамуры–Хата для частот до 1500 МГц и высоты размещения приемника не менее 30 м [15]. В ближайшем для каждого ИРИ ПП задавался "начальный" уровень сигнала ИРИ, рассчитывались разности хода прямых и отраженных сигналов ИРИ до всех ПП и по модели Окамуры–Хата рассчитывались потери и уровни сигналов ИРИ в ПП в смеси (1).

В аддитивной смеси (1) в каждом ПП присутствуют 3 прямых сигнала ИРИ и отраженные сигналы ИРИ.

В исследовании рассмотрена одна из наихудших ситуаций: равноудаленное расположение ИРИ1 относительно всех ПП (см. рис. 1, б), прямые и отраженные сигналы которого доминируют во всех ПП.

ВКФ между оценками отраженного сигнала одного и того же ИРИ, сформированными в разных ПП, имеет выраженный корреляционный пик, и поэтому пересечение линий положения приведет к появлению ложной точки. ВКФ

между оценками отраженных сигналов разных ИРИ такого пика не имеет, и поэтому пересечение линий положения не приведет к появлению ложной точки определения положения ИРИ. Задержка отраженных сигналов задавалась случайно в диапазоне от 3 до 10 отсчетов, амплитудный коэффициент затухания – в диапазоне от 0 до 0.5.

В реальных условиях линии положения от разных ПП не пересекаются в одной точке и образуют многоугольник. При трех ПП пересечения образуют треугольник, центр тяжести которого находится в точке пересечения медиан. Значение порогового расстояния $R_{0пор}$ определялось предварительным моделированием, при котором измерялось среднее значение и среднеквадратическое отклонение.

Исследование проведено при точно заданном АФР и при погрешности его задания в пределах 5° с формированием оценок сигналов без режекции (3) и с дополнительной режекцией (4). При точном задании АФР расстояние $R_{0пор} = 100$ м, при указанной погрешности задания АФР расстояние $R_{0пор} = 1000$ м выбрано с запасом.

Статистическое моделирование проводилось по 1000 испытаний. Оценивались вероятность правильного обнаружения ИРИ $P_{ИРИ}$, погрешность определения его положения в виде среднего $\bar{\delta}$ и среднеквадратического отклонения $(\delta - \bar{\delta})^2$. Размер выборки $N = 10\ 000$ отсчетов.

Результаты имитационного моделирования при точном задании АФР АР без переотражений с режекцией и без нее приведены в табл. 1,

Табл. 1. Характеристики определения положения ИРИ при распространении сигнала без переотражений и точном задании АФР АР

Tab. 1. Characteristics of RS location under signal propagation without re-reflections and correct amplitude–phase distribution of antenna array

Эксперимент	ИРИ	ОСШ, дБ	Без режекции			С режекцией		
			$P_{ИРИ}$, %	$\bar{\delta}$, м	$(\delta - \bar{\delta})^2$, м	$P_{ИРИ}$, %	$\bar{\delta}$, м	$(\delta - \bar{\delta})^2$, м
1	1	40	100	0.09	0.05	100	0.09	0.05
	2	40	100	6.18	1.21	100	6.22	1.29
	3	40	100	1.90	0.74	100	2.01	0.79
2	1	15	100	2.28	1.27	100	2.30	1.27
	2	15	100	21.75	10.22	100	21.62	10.59
	3	15	100	27.72	20.54	100	27.76	0.59
3	1	40	100	0.09	0.05	100	0.09	0.05
	2	15	100	22.39	10.19	100	22.51	10.67
	3	15	100	28.59	20.74	100	27.05	19.57

Табл. 2. Характеристики определения положения ИРИ при распространении сигнала с переотражениями при точном задании АФР АР

Tab. 2. Characteristics of RS location under signal propagation with re-reflections and correct amplitude–phase distribution of antenna array

Эксперимент	ИРИ	ОСШ, дБ	Без режекции			С режекцией		
			$P_{\text{ИРИ}}, \%$	$\bar{\delta}, \text{ м}$	$\overline{(\delta - \bar{\delta})^2}, \text{ м}^2$	$P_{\text{ИРИ}}, \%$	$\bar{\delta}, \text{ м}$	$\overline{(\delta - \bar{\delta})^2}, \text{ м}^2$
1	1	40	100	0.17	0.21	100	0.17	0.22
	2	40	100	13.92	14.26	100	12.86	13.51
	3	40	100	2.23	1.58	100	2.12	1.45
2	1	15	100	3.47	2.61	100	3.88	3.41
	2	15	99.7	56.12	41.39	99.7	56.63	43.78
	3	15	100	62.16	64.09	99.7	57.49	62.37
3	1	40	100	0.14	0.17	100	0.16	0.19
	2	15	100	49.07	39.01	99.6	53.84	45.34
	3	15	100	52.09	54.69	99.6	51.86	54.52

Табл. 3. Характеристики определения положения ИРИ при распространении сигнала без переотражений и погрешности задания АФР АР 5°

Tab. 3. Characteristics of RS location under signal propagation without re-reflections and 5° error in the assignment amplitude–phase distribution of antenna array

Эксперимент	ИРИ	ОСШ, дБ	Без режекции			С режекцией		
			$P_{\text{ИРИ}}, \%$	$\bar{\delta}, \text{ м}$	$\overline{(\delta - \bar{\delta})^2}, \text{ м}^2$	$P_{\text{ИРИ}}, \%$	$\bar{\delta}, \text{ м}$	$\overline{(\delta - \bar{\delta})^2}, \text{ м}^2$
1	1	40	100	14.35	7.08	100	14.05	7.44
	2	40	100	29.29	15.44	100	29.0	14.76
	3	40	100	29.92	18.72	100	29.47	17.94
2	1	15	100	14.38	7.13	100	14.08	7.09
	2	15	100	34.36	17.95	100	34.94	17.30
	3	15	100	39.39	28.27	100	40.55	28.87
3	1	40	100	14.03	7.21	99.9	0.16	0.21
	2	15	61.7	33.85	18.01	99.6	51.88	39.06
	3	15	63.0	41.88	26.99	99.5	55.51	59.22

Табл. 4. Характеристики определения положения ИРИ при распространении сигнала с переотражениями и погрешности задания АФР АР 5°

Tab. 4. Characteristics of RS location under signal propagation with re-reflections and 5° error in the assignment amplitude–phase distribution of antenna array

Эксперимент	ИРИ	ОСШ, дБ	Без режекции			С режекцией		
			$P_{\text{ИРИ}}, \%$	$\bar{\delta}, \text{ м}$	$\overline{(\delta - \bar{\delta})^2}, \text{ м}^2$	$P_{\text{ИРИ}}, \%$	$\bar{\delta}, \text{ м}$	$\overline{(\delta - \bar{\delta})^2}, \text{ м}^2$
1	1	40	99.4	22.84	17.82	99	24.32	37.68
	2	40	99.9	34.9	18.07	97.3	35.72	19.29
	3	40	99	48.85	55.01	99.6	48.61	56.47
2	1	15	99.8	20.2	21.58	99	23.35	47.49
	2	15	98.8	67.27	42.19	98.6	63.36	42.48
	3	15	98.5	67.93	64.72	97.2	73.19	69.98
3	1	40	99.9	23.03	42.02	99.8	19.39	13.36
	2	15	36.3	92.54	122.96	88.7	61.31	40.82
	3	15	40.7	63.71	58.21	91.1	64.58	63.76

с переотражениями – в табл. 2; при погрешности задания АФР, равной 5°, без переотражений – в табл. 3, с переотражениями – в табл. 4.

Из табл. 1 и 2 следует, что точное задание АФР АР обеспечивает правильное определение положения всех ИРИ в широком диапазоне вза-

имных изменений уровней полезного и мешающих сигналов (от 15 до 40 дБ) как при наличии, так и при отсутствии отражений. ПФ принятых сигналов в каждом ПП выполняется точно, и в сформированных оценках отсутствуют мешающие сигналы от других ИРИ. Сравнение табл. 1 и 2 показывает, что наличие отражений при точном АФР несущественно снижает точность определения положения ИРИ.

На рис. 2 в качестве примера представлены ВКФ между оценками сигналов ИРИ в первом ПП при сильном сигнале ИРИ1, превосходящем по уровню сигналы ИРИ2 и ИРИ3 на 25 дБ и распространяющемся по лучам прямой видимости и с одним отражением (см. рис. 1, б) при точном задании АФР с применением режекции (без режекции ВКФ выглядит аналогично). Здесь и далее номера 1, 2, 3 сигналов ИРИ соответствуют номеру ИРИ, сигналом 4 является отраженный сигнал 1 сильного ИРИ.

Рис. 2 и 3 иллюстрируют, что ПФ при точном ожидаемом АФР выполняется идеально, просачивание сильного мешающего сигнала в оценки слабого не наблюдается, поэтому (а) оценка запаздывающего сильного сигнала ИРИ1 в ПП определяется однозначно, наблюдается только один значимый пик ВКФ между оценками сигналов внутри пункта приема (рис. 2); (б) сопоставление оценок сигналов

ИРИ между ПП также выполняется однозначно, для каждого ИРИ образованы пары оценок в разных пунктах и однозначно определены линии положения разных ИРИ по единственному максимуму ВКФ (рис. 3).

При задании АФР АР с погрешностью эффективность ПФ снижается из-за неточности вычисленных коэффициентов ПФ. Неточные коэффициенты ПФ не позволяют полностью выделить только полезный сигнал ИРИ вследствие неполного подавления мешающих сигналов. При равноценных по уровню сигналах ИРИ неточность ПФ слабо влияет на результаты определения их положения, но при наличии сильного сигнала ИРИ, доминирующего в принятой смеси во всех пунктах приема, вероятность правильного определения положения существенно падает (табл. 3 и 4).

Сильный сигнал и его переотражения частично присутствуют в сформированных оценках сигналов ИРИ и создают неоднозначность при удалении переотражений (рис. 5) и сопоставлении линий положения, при вычислении ВКФ между оценками сигналов внутри и между пунктами приема (рис. 6).

Все ВКФ оценок сигналов разных ИРИ на рис. 5 имеют выраженные пики, которые свидетельствуют о плохой ПФ вследствие проникновения сильных прямого и переотраженного сигналов

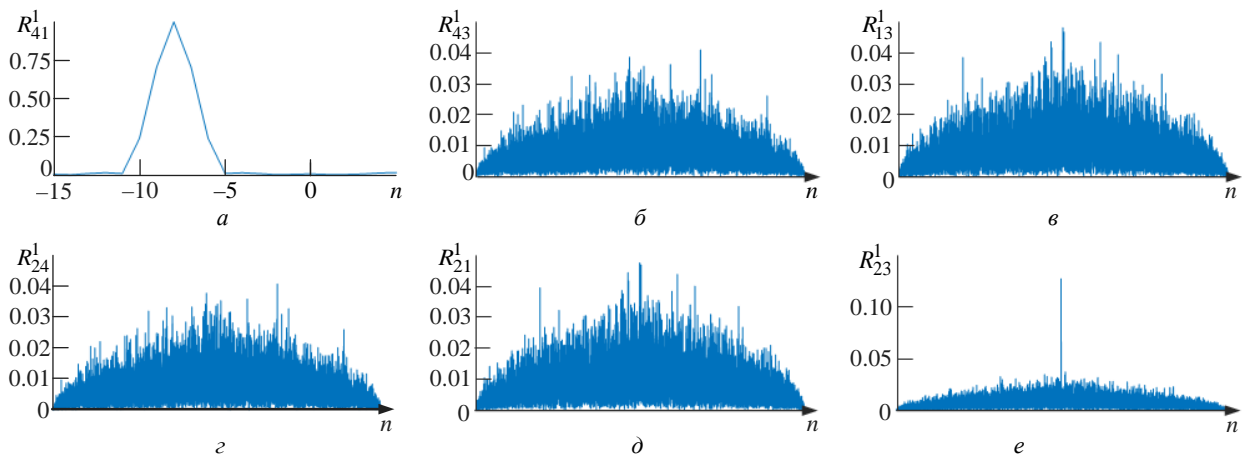


Рис. 2. ВКФ между разными оценками сигналов в ПП1 при точном АФР сигнала АР:

- a* – между отраженным и прямыми сигналами ИРИ1; *б* – между отраженным сигналом ИРИ1 и прямым сигналом ИРИ3;
- в* – между прямыми сигналами ИРИ1 и ИРИ3; *г* – между прямым сигналом ИРИ2 и отраженным сигналом ИРИ1;
- д* – между прямыми сигналами ИРИ2 и ИРИ1; *е* – между прямыми сигналами ИРИ2 и ИРИ3

Fig. 2. Cross-correlation function (CCF) between different signal estimates at reception point1 (RP1) with an exact amplitude-phase distribution (AFD) of the antenna array signal:

- a* – between the radio source number 1 (RS1) reflected and direct signals; *б* – between RS1 reflected signal and RS3 direct signal; *в* – between the direct signals from RS1 and RS3; *г* – between RS2 direct signal and RS1 reflected signal; *д* – between the direct signals from RS2 and RS1; *е* – between the direct signals from RS2 and RS3

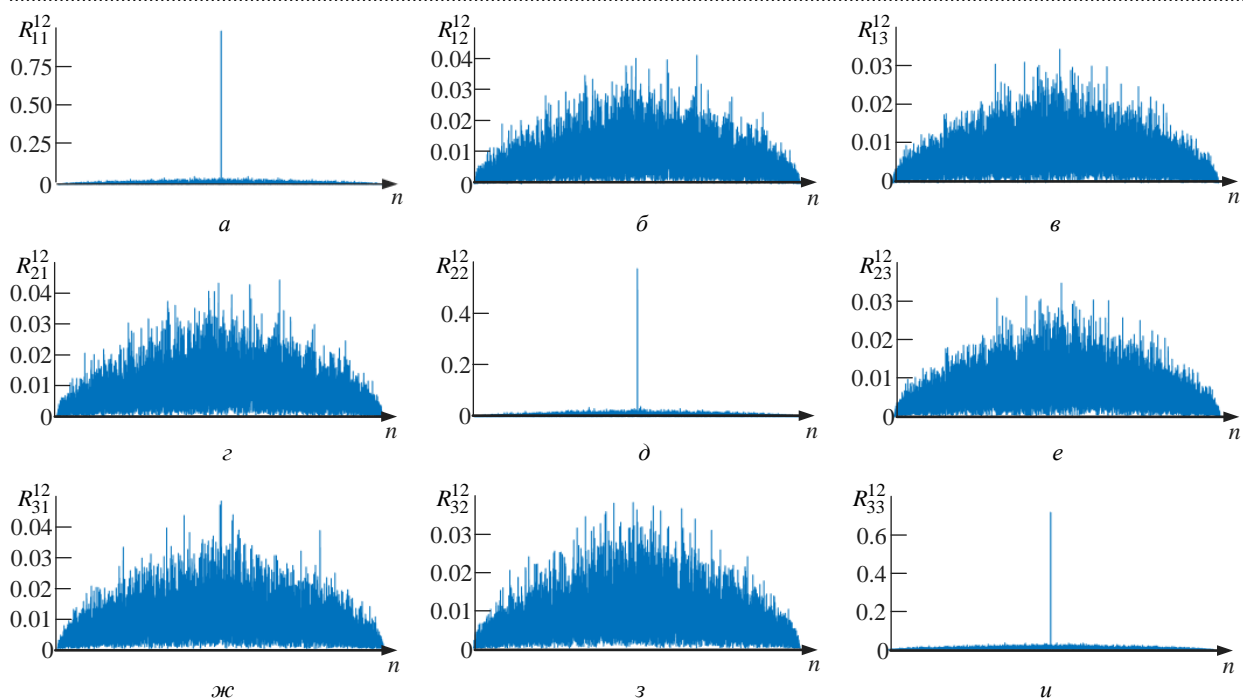


Рис. 3. ВКФ оценок сигналов, принятых в ПП1, с оценками сигналов, принятых в ПП2, при точном АФР антенны: а – между оценками сигнала ИРИ1; б – между оценками сигнала ИРИ1 в ПП1 и ИРИ2 в ПП2; в – между оценками сигнала ИРИ1 в ПП1 и ИРИ3 в ПП2; г – между оценками сигнала ИРИ2 в ПП1 и ИРИ1 в ПП2; д – между оценками сигнала ИРИ2; е – между оценками сигнала ИРИ2 в ПП1 и ИРИ3 в ПП2; ж – между оценками сигнала ИРИ3 в ПП1 и ИРИ1 в ПП2; з – между оценками сигнала ИРИ3 в ПП1 и ИРИ2 в ПП2; и – между оценками сигнала ИРИ3

Fig. 3. CCF between the estimates of signals received at RP1 with those received at RP2, with an exact AFD of the antenna array:

а – between the estimates of RS1 signal; б – between the estimates of RS1 signal in the RP1 and RS2 signal in RP2; в – between the estimates of the signals RS1 in RP1 and RS3 in RP2; г – between the estimates of the signals RS2 in RP1 and RS1 in RP2; д – between the estimates of RS2 signals; е – between the estimates of the signals RS2 in RP1 and RS3 in RP2; ж – between the estimates of the signals RS3 in RP1 and RS1 in RP2; з – between the estimates of the signals RS3 in RP1 and RS2 in RP2; и – between the estimates of RS3

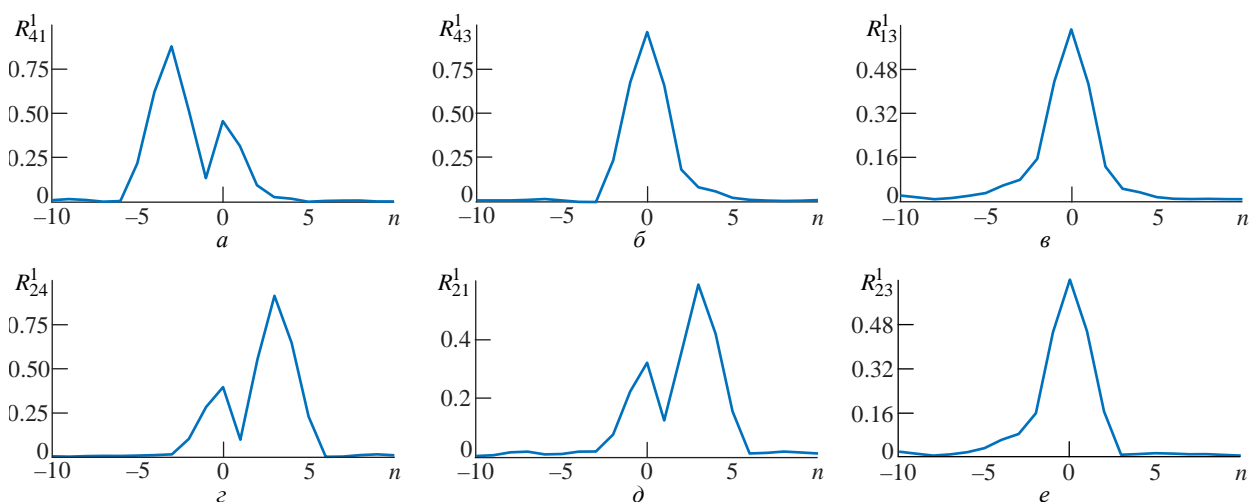


Рис. 4. ВКФ между оценками сигналов в ПП1 при погрешности задания АФР, равной 5°, без режекции: а – между отраженным и прямым сигналами ИРИ1; б – между отраженным сигналом ИРИ1 и прямым сигналом ИРИ3; в – между прямыми сигналами ИРИ1 и ИРИ3; г – между прямым сигналом ИРИ2 и отраженным сигналом ИРИ1; д – между прямыми сигналами ИРИ2 и ИРИ1; е – между прямыми сигналами ИРИ2 и ИРИ3

Fig. 4. CCF between signal estimates at RP1 with an AFD assignment error of 5° without rejection: а – between RS1 reflected and direct signals; б – between RS1 reflected signal and RS3 direct signal; в – between the direct signals RS1 and RS3; г – between RS2 direct signal and RS1 reflected signal; д – between RS2 and RS1 direct signals; е – between RS2 and RS3 direct signals

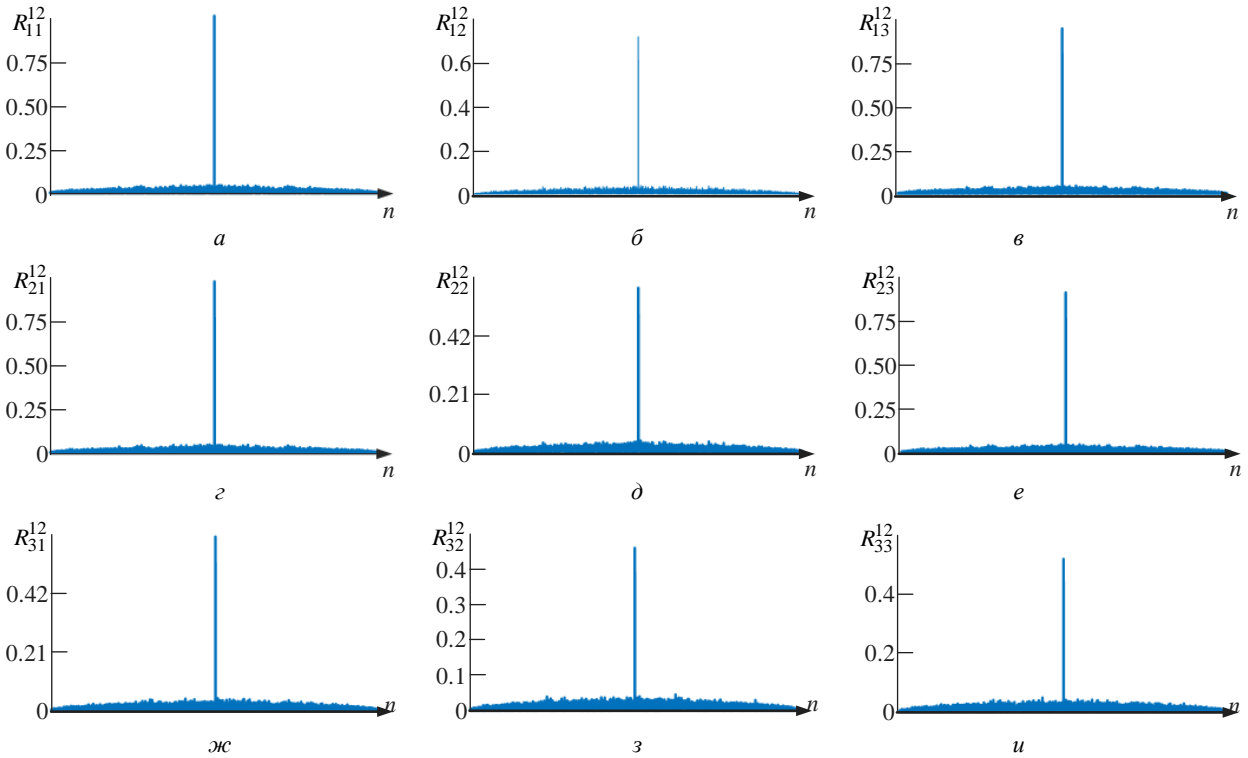


Рис. 5. ВКФ оценок сигналов, принятых в ПП1, с оценками сигналов, принятых в ПП2, при неточном задании АФР: *a* – между оценками сигнала ИРИ1; *б* – между оценками сигнала ИРИ1 в ПП1 и ИРИ2 в ПП2; *в* – между оценками сигнала ИРИ1 в ПП1 и ИРИ3 в ПП2; *г* – между оценками сигнала ИРИ2 в ПП1 и ИРИ1 в ПП2; *д* – между оценками сигнала ИРИ2; *е* – между оценками сигнала ИРИ2 в ПП1 и ИРИ3 в ПП2; *ж* – между оценками сигнала ИРИ3 в ПП1 и ИРИ1 в ПП2; *з* – между оценками сигнала ИРИ3 в ПП1 и ИРИ2 в ПП2; *и* – между оценками сигнала ИРИ3

Fig. 5. CCF of the estimates of signals received at PP1 with the estimates of signals received at PP2 with an inaccurate assignment of the AFD:

a – between the estimates of RS1 signal; *б* – between the estimates of RS1 signal in RP1 and RS2 signal in RP2; *в* – between the estimates of RS1 signal in RP1 and RS3 signal in RP2; *г* – between the estimates of RS2 signal in RP1 and RS1 in RP2; *д* – between the estimates of RS2 signal; *е* – between the estimates of RS2 signal in RP1 and RS3 signal in RP2; *ж* – between the estimates of RS3 signal in RP1 and RS1 signal in RP2; *з* – between the estimates of RS3 signal in RP1 and RS2 signal in RP2; *и* – between the estimates of RS3 signal

ИРИ1 в оценки сигналов ИРИ2 и ИРИ3.

Аналогичная картина возникает при сопоставлении сигналов ИРИ между ПП. Оценки сигналов всех ИРИ между ПП коррелированы между собой, однозначного соответствия по ВКФ не наблюдается (рис. 6).

Применение режекции позволяет частично подавить мешающие сигналы, проникшие в оценки слабых ИРИ из-за неточного ожидаемого АФР.

На рис. 7 изображены ВКФ четырех оценок сигналов ИРИ, показывающие, что оценки сигналов 4 и 1 строго коррелированы (коэффициент корреляции равен 1), причем максимум сдвинут относительно центра на 4 отсчета (сигнал 4 пришел позже и является сдвинутой копией сигнала 1). Также наблюдается корреляция в парах (4, 2) и (1, 3). В паре (1, 3) корреляционный пик, равный 0.5, расположен точно посередине (оценки сигналов 1 и 3 не сдвинуты

друг относительно друга), т. е. сильный прямой сигнал 1 ИРИ1 недостаточно подавлен в оценке слабого сигнала 3. В паре (4, 2) сигнал 4 сдвинут относительно сигнала 2.

Режекция в условиях априорной неопределенности не позволяет полностью удалить из оценки полезного сигнала ИРИ мешающие сигналы других ИРИ, поскольку базисные векторы из оценок сигналов содержат шум и линейную комбинацию мешающих сигналов. Поэтому ВКФ сигналов в некоторых парах разных ИРИ между пунктами приема имеет пики (рис. 7). Однако благодаря режекции растет максимум ВКФ, соответствующий истинной паре, а сами пики ВКФ возникают не во всех парах (сравн. с рис. 6). Поэтому ложные пики ВКФ не мешают разработанному алгоритму сопоставления оценок сигнала в разных пунктах.

Результаты статистического имитацион-

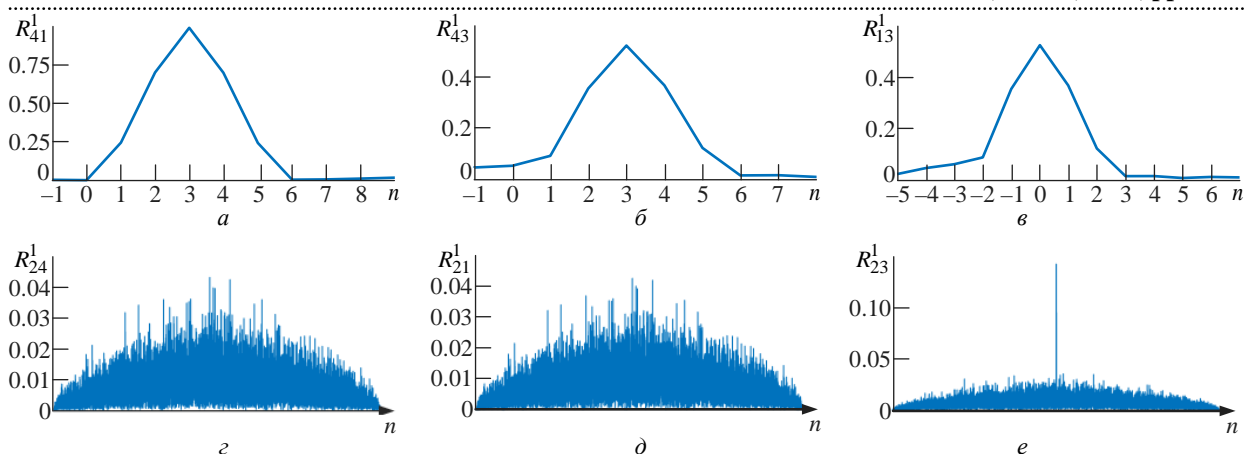


Рис. 6. ВКФ между оценками сигналов в ПП1 при погрешности задания АФР, составляющей 5° , с режекцией неподавленных мешающих сигналов: *а* – между переотраженным и прямым сигналами ИРИ1; *б* – между переотраженным сигналом ИРИ1 и прямым сигналом ИРИ3; *в* – между прямыми сигналами ИРИ1 и ИРИ3; *г* – между прямым сигналом ИРИ2 и переотраженным сигналом ИРИ1; *д* – между прямыми сигналами ИРИ1 и ИРИ2; *е* – между прямыми сигналами ИРИ2 и ИРИ3

Fig. 6. CCF between the estimates of signal at RP1 with an assignment of AFD error of 5° and rejection of unsuppressed interfering signals:

a – between RS1 reflected and direct signals; *б* – between RS1 reflected signal and RS3 direct signal; *в* – between RS1 and RS3 direct signals; *г* – between RS2 direct signal and RS1 reflected signal; *д* – between RS1 and RS2 direct signals; *е* – between RS2 and RS3 direct signals

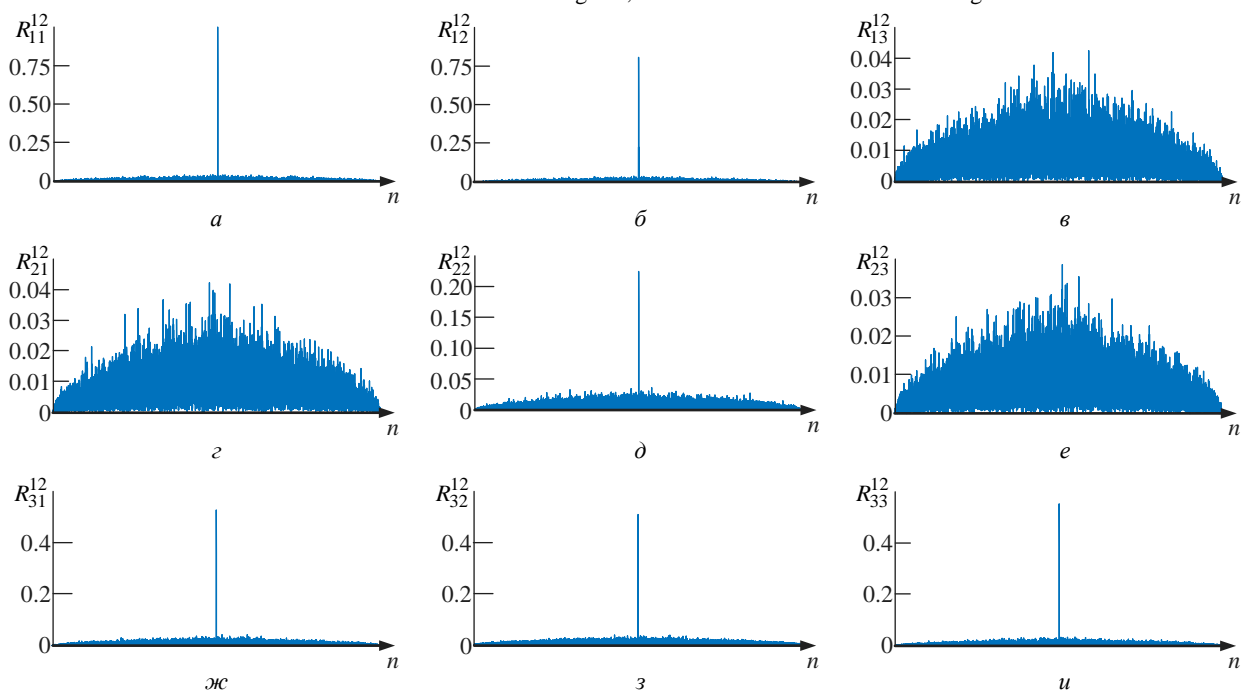


Рис. 7. ВКФ оценок сигналов ИРИ, принятых в ПП1, с оценками сигналов, принятых в ПП2, с применением режекции неподавленных мешающих сигналов:

а – между оценками сигнала ИРИ1; *б* – между оценками сигнала ИРИ1 в ПП1 и ИРИ2 в ПП2; *в* – между оценками сигнала ИРИ1 в ПП1 и ИРИ3 в ПП2; *г* – между оценками сигнала ИРИ2 в ПП1 и ИРИ1 в ПП2; *д* – между оценками сигнала ИРИ2; *е* – между оценками сигнала ИРИ2 в ПП1 и ИРИ3 в ПП2; *ж* – между оценками сигнала ИРИ3 в ПП1 и ИРИ1 в ПП2; *з* – между оценками сигнала ИРИ3 в ПП1 и ИРИ2 в ПП2; *и* – между оценками сигнала ИРИ3

Fig. 7. The CCF of RS signals estimates received in RP1 with the estimates of the signals received in RP2, using rejection of unsuppressed interfering signals:

a – between the estimates of RS1 signals; *б* – between the estimates of RS1 signal in RP1 and RS2 signal in RP2; *в* – between the estimates of RS1 signal in RP1 and RS3 signal in RP2; *г* – between the estimates of RS2 signal in RP1 and RS1 signal in RP2; *д* – between the estimates of RS2 signals; *е* – between the estimates of RS2 signal in RP1 and RS3 signal in RP2; *ж* – between the estimates of RS3 signal in RP1 and RS1 signal in RP2; *з* – between the estimates of RS3 signal in RP1 and RS2 signal in RP2; *и* – between the estimates of RS3 signals

ного моделирования, приведенные в табл. 4, показывают, что применение режекции после ПФ при неточном задании ожидаемого АФР АР в условиях доминирования в принятых данных во всех пунктах приема прямого и переломленного сильных сигналов одного и того же ИРИ повышает вероятность правильного определения положения с 40 до 90 %.

Эффективность разработанного метода определения положения ИРИ была подтверждена экспериментально в реальных условиях при двух ПП с круговой АР и имитацией двух разных ИРИ.

Заключение. Пространственная фильтрация сигналов в многопозиционных системах

угломерного определения положения ИРИ позволяет устранить ложные точки и области определения при многолучевом распространении сигналов и при перекрытии спектров разных ИРИ. Для ПФ требуется максимально точное задание АФР АР. Даже при небольших погрешностях задания АФР и разноуровневых сигналах ИРИ ПФ следует дополнять режекцией мешающих сигналов ИРИ. В условиях априорной неопределенности это позволяет повысить вероятность правильного определения положения источников слабых сигналов до приемлемого уровня обнаружения 0.9.

Список литературы

1. Robust Adaptive Beamforming / ed. by J. Li, P. Stoica. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 445 p.
2. Fernández-Prades C., Arribas J., Closas P. Robust GNSS receivers by array signal processing: Theory and implementation // Proc. of the IEEE. 2016. Vol. 104, iss. 6. P. 1207–1220.
doi: 10.1109/JPROC.2016.2532963
3. Balanis C. A., Ioannides P. I. Introduction to smart antennas // Synthesis Lectures on Antennas. Vol. 5. Berlin: Springer, 2007. 175 p.
doi: 10.1007/978-3-031-01533-5
4. Stevanović I., Skrivervik A., Mosig J. R. Smart Antenna Systems for Mobile Communications. Final Report. URL: https://www.academia.edu/24560455/Smart_Antenna_Systems_for_Mobile_Communications_FINAL_REPORT_ECOLE_POLYTECHNIQUE_FEDERALE_DE_LAUSANNE (дата обращения 22.06.2025).
5. Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances / ed. by S. A. R. Zakavat, R. M. Buehrer. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. 1281 p.
doi: 10.1002/9781118104750
6. Липатников В. А., Царик О. В. Методы радиоконтроля: теория и практика. СПб.: Нацразвитие, 2018, 607 p.
7. Comparison of time-difference-of-arrival and angle-of-arrival methods of signal geolocation. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2211-2-2018-PDF-E.pdf (дата обращения 22.06.2025).
8. Еремеев И. Ю., Печурин В. В., Саниев Р. Р. Сравнение точностей угломерной и разностно-дальномерной систем определения местоположения с минимальным числом приемных станций // Электромагнитные волны и электронные системы. 2022. Т. 27, № 4. С. 19–26.
doi: 10.18127/j15604128-202204-03
9. Устинов К. В. Алгоритм оценки координат источников радиоизлучений, тождественных по частоте // IV Всерос. конф. "Радиолокация и радиосвязь" – ИРЭ РАН, Москва, 29 нояб.–3 дек. 2010. С. 30–32. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/library/4conf/docs/pdffiles/r3.pdf> (дата обращения 22.06.2025).
10. Roy R., Kailath T. ESPRIT-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques // IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing. 1989. Vol. 37, iss. 7. P. 984–995.
doi: 10.1109/29.32276
11. Особенности применения методов MUSIC и ESPRIT в адаптивных смарт-антеннах / М. Е. Шевченко, В. Н. Мальшев, А. В. Горовой, С. Н. Соловьев, А. Х. Кельян // Антенны и распространение радиоволн: Всерос. науч.-техн. конф., СПб., 24–26 нояб. 2021. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2021. С. 99–102.
12. Шевченко М. Е., Горовой А. В., Соловьев С. Н. Пространственная фильтрация перекрывающихся по спектру сигналов // Вопр. радиоэлектроники. 2019. Т. 48, № 12. С. 27–33.
doi: 10.21778/2218-5453-2019-12-27-33
13. Пространственная фильтрация сигналов при неточной калибровке антенной решетки / М. Е. Шевченко, В. Н. Мальшев, А. В. Горовой, А. С. Черепанов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 27–40.
doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-27-40
14. Гавриленко В. Г., Яшнов В. А. Передача информации по беспроводным сетям в условиях пересеченной местности: учеб.-метод. пособие. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2007. 112 с.
15. Мамченко М. В., Зорин В. А., Романова М. А. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2022. Т. 105, вып. 1. С. 59–73.
doi: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-59-73

Информация об авторах

Горовой Андрей Вадимович – инженер научно-производственного предприятия "Новые Технологии Телекоммуникаций" (ООО НПП "НТТ"), аспирант кафедры радиоэлектронных средств Санкт-

Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 14 научных работ. Сфера научных интересов – обнаружение; оценивание; пространственная фильтрация и пеленгование сигналов; цифровая обработка сигналов.

Адрес: Научно-производственное предприятие "Новые Технологии Телекоммуникаций", ул. Софьи Ковалевской, д. 20, корп. 1, лит. А, Санкт-Петербург, 195256, Россия

E-mail: andrew1295-09@mail.ru

Шевченко Майя Евгеньевна – кандидат технических наук (1997), доцент (2002) кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 82 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 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: M_E_Shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6873-6354>

Малышев Виктор Николаевич – доктор технических наук (2000), профессор (2004), заведующий кафедрой радиоэлектронных средств 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 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vnmalyshv@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5011-0337>

References

1. Robust Adaptive Beamforming. Ed. by J. Li, P. Stoica. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2006, 445 p.
2. Fernández-Prades C., Arribas J., Closas P. Robust GNSS Receivers by Array Signal Processing: Theory and Implementation. Proc. of the IEEE. 2016, vol. 104, iss. 6, pp. 1207–1220.
doi: 10.1109/JPROC.2016.2532963
3. Balanis C. A., Ioannides P. I. Introduction to smart Antennas. In Synthesis Lectures on Antennas. Vol. 5. Berlin, Springer, 2007, 175 p.
doi: 10.1007/978-3-031-01533-5
4. Stevanović I., Skrivervik A., Mosig J. R. Smart Antenna Systems for Mobile Communications. Final Report. Available at: https://www.academia.edu/24560455/Smart_Antenna_Systems_for_Mobile_Communications_FINAL_REPORT_ECOLE_POLYTECHNIQUE_FEDERALE_DE_LAUSANNE (accessed 22.06.2025).
5. Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances. Ed. by S. A. R. Zakavat, R. M. Buehrer. New Jersey, John Wiley & Sons, 2012, 1281 p.
doi: 10.1002/9781118104750
6. Lipatnikov V. A., Tsarik O. V. Radio Control Methods: Theory and Practice. St Petersburg, *Natsrazvitie*, 2018, 607 c. (In Russ.)
7. Comparison of Time-Difference-of-Arrival and Angle-of-Arrival Methods of Signal Geolocation. Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2211-2-2018-PDF-E.pdf (accessed 22.06.2025).
8. Eremeyev I. Yu., Pechurin V. V., Saniev R. R. Accuracy Comparison of Angle of Arrival and Time Difference of Arrival Positioning Systems with the Minimum Number of Receiving Stations. *J. Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2022, vol. 27, no. 4, pp. 19–26. (In Russ.)
9. Ustinov K. V. *Algoritm ocenki koordinat istochnikov radioizluchenij, tozhdestvennyh po chastote* [Algorithm for Estimating Coordinates of Radio Emission Sources Identical in Frequency]. IV All-Russ. Conf. "Radar and Radio Communication" IRE RAS, Moscow, 29 Nov.–3 Dec. 2010, pp. 30–32. (In Russ.) Available at: <http://jre.cplire.ru/alt/library/4conf/docs/pdffiles/r3.pdf> (accessed 22.06.2025).
10. Roy R., Kailath T. ESPRIT-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques. *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*. 1989, vol. 37, iss. 7, pp. 984–995.
doi: 10.1109/29.32276
11. Shevchenko M. E., Malyshev V. N., Gorovoi A. V., Solov'ev S. N., Kel'yan A. Kh. Features of the Application of MUSIC and ESPRIT Methods in Adaptive Smart Antennas. *Antennas and Radio Wave Propagation: All-Russ. scientific and technical conf.*, St Petersburg, 24–26 Nov. 2021. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2021, pp. 99–102. (In Russ.)
12. Shevchenko M. E., Gorovoy A. V., Solovyov S. N. Spatial Filtering of Signals with Spectrum Overlapping. *Questions of Radio Electronics*. 2019, vol. 48, no. 12, pp. 27–33. (In Russ.)
doi: 10.21778/2218-5453-2019-12-27-33
13. Shevchenko M. E., Malyshev V. N., Gorovoy A. V., Cherepanov A. S. Spatial Filtering of Signals under Imprecise Calibration of Antenna Arrays. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023, vol. 26, no. 6, pp. 27–40. (In Russ.)
doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-27-40
14. Gavrilenko V. G., Yashnov V. A. *Peredacha informatsii po besprovodnym setyam v usloviyakh peresechennoi mestnosti* [Transmitting Information

Over Wireless Networks in Rugged Terrain]. Educational and methodological manual. Nizhny Novgorod, *Izd-vo NNGU*, 2007, 112 p. (In Russ.)

15. Mamchenko M. V., Zorin V. A., Romanova M. A. Empirical Model for Propagation Loss Using Floor

Space Index for Unmanned Vehicles. News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS. 2022, vol. 105, no. 1, pp. 59–73. (In Russ.)

doi: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-59-73

Information about the authors

Andrei V. Gorovoy, Engineer of the Scientific and Production Enterprise "New Telecommunication Technologies", Postgraduate student of the Department of Radio Electronics Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 14 scientific publications. Area of expertise: signal detection; estimation; spatial filtering and direction finding; digital signal processing.

Address: Limited Liability Company "New Technologies of Telecommunications", 20, Sofya Kovalevskaya St., build. 1, lit. A, Saint Petersburg 195256, Russia

E-mail: andrew1295-09@mail.ru

Maya E. Shevchenko, Cand. Sci (Eng.) (1997), Associate Professor (2002) of the Department of Radio Electronic Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 82 scientific publications. Area of expertise: radio signals receiving and processing; signals detection; evaluation and direction finding; radio monitoring; digital signal processing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: M_E_Shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6873-6354>

Victor N. Malyshev, Dr Sci. (Eng.) (2000), Professor (2004), Chief of the Department of Radio Electronic Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: numerical methods; microwave technology; antennas; information networks; information security.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vnmalyshev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5011-0337>
