

Решение задачи обнаружения ультразвуковых сигналов в области их высокой корреляции

Р. В. Симонов, В. А. Пахотин[✉], К. В. Власова

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

[✉]VPakhotin@kantiana.ru

Аннотация.

Цель работы: Исследование возможности обнаружения совокупности сигналов в области их высокой корреляции с учетом шумовых сингулярных максимумов.

Методы: Задача отдельного обнаружения сигналов решена на основе метода максимального правдоподобия с подстановкой Хелстрема и с учетом сингулярных шумовых максимумов. Изложены основы теории, представлены результаты модельных расчетов.

Результаты: Рассмотрен основной фактор, ограничивающий возможность решения задачи. Он связан с сингулярностью корреляционной матрицы, получаемой при решении уравнений правдоподобия. Приведена статистика оценок амплитуд сигналов и значений шумовых сингулярных максимумов в зависимости от отношения сигнал/шум. Приведены выражения, определяющие дисперсию амплитуд сигналов и дисперсию значений шумовых сингулярных максимумов. Показана структура шумовых сингулярных максимумов в области решений в зависимости от разности времен приема и уровня шума. Предложен метод ограничения области поиска максимума функционала отношений правдоподобия, который существенно улучшает возможности обнаружения сигналов. Представлены результаты модельных расчетов, иллюстрирующие эффективность использования предложенного метода.

Ключевые слова: теория оптимального приема, метод максимального правдоподобия, подстановка Хелстрема, область высокого разрешения сигналов, шумовые сингулярные максимумы

Для цитирования: Симонов Р. В., Пахотин В. А., Власова К. В. Решение задачи обнаружения ультразвуковых сигналов в области их высокой корреляции // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 1. С. 30–38. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-30-38.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Solving the Problem of Detecting Ultrasonic Signals in the Area of their High Correlation

R. V. Simonov, V. A. Pakhotin[✉], K. V. Vlasova

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

[✉]VPakhotin@kantiana.ru

Abstract.

Purpose of the work: To study the possibilities of solving the problem of detecting a set of signals in the area of their high correlation, taking noise singular maxima into account.

Methods: The problem of separate signal detection is solved on the basis of the maximum likelihood method with Helstrom substitution and taking noise singular maxima into account. The fundamentals of the theory are outlined, and the results of model calculations are presented.

Results: The main factor limiting the possibility of solving the problem is considered. It is related to the singularity of the correlation matrix obtained by solving the likelihood equations. The statistics of estimates of signal amplitudes and values of noise singular maxima depending on the signal-to-noise ratio are presented. Express-

sions defining the dispersion of signal amplitudes and the dispersion of the values of noise singular maxima are given. The structure of noise singular maxima in the solution domain is shown depending on the difference in reception time and noise level. A method for limiting the search area of the maximum functional of likelihood ratios is proposed, which significantly improves the signal detection capabilities. The results of model calculations illustrating the effectiveness of the proposed method are presented.

Keywords: optimal reception theory, maximum likelihood method, Helstrom substitution, high-resolution region of signals, noise singular maxima

For citation: Simonov R. V., Pakhotin V. A., Vlasova K. V. Solving the Problem of Detecting Ultrasonic Signals in the Area of their High Correlation // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 1. P. 30–38. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-30-38.

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

Введение. Обнаружение сигналов, содержащихся в принятой реализации – одна из основных статистических задач в радиотехнике. Наиболее полно она решена при известных параметрах сигнала, неизвестен лишь факт наличия сигнала в реализации [1]–[3]. Конечным результатом решения служат кривые обнаружения, позволяющие проводить оценку вероятности обнаружения сигналов и ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум при заданном значении ложной тревоги. При неизвестных параметрах сигналов видоизменяется структура оптимального приемника, и пороговый уровень определяется дисперсией шума в реализации [3]. Он устанавливается вне зависимости от наличия и количества в реализации сигналов. В этом случае шкала амплитуд на индикаторе может быть заменена шкалой вероятности приема сигнала [3]. На основании критерия разрешения Рэля выделим две области решений задачи обнаружения сигналов: область высокой корреляции сигналов, когда критерий Рэля не выполняется, и область низкой корреляции, когда он выполняется. В настоящее время в промышленности, в литературе, в ультразвуковой диагностике [1]–[3] задача обнаружения сигналов решается, как правило, в области низкой корреляции сигналов. Для двух и более сигналов решение характеризуется систематическими интерференционными погрешностями, связанными с наличием боковых лепестков аппаратных функций. Решение задачи обнаружения в области высокой корреляции сигналов остается областью интенсивных исследований [4]–[8]. Даже небольшие достижения в этой области приводят к существенным улучшениям характеристик радиотехнических, ультразвуковых комплексов аппаратуры. Известное направление исследований, основанное на использовании альтернативных гипотез и связанное с переходом от функционала

отношений правдоподобия к корреляционному интегралу, оказалось неудовлетворительным [7]. В этом случае реализуется, по существу, корреляционная обработка сигналов с ее ограничениями на разрешение. Следует отметить [9], в которой снимаются ограничения, связанные с аппаратными функциями. В ней впервые представлены выражения, определяющие отдельные статистики амплитуд двух сигналов. Это позволяет для каждой статистики решить задачу отдельного обнаружения сигналов на основе двух альтернативных гипотез. Однако в ней не учитывается, что корреляционная матрица, определяющая решение уравнений правдоподобия, сингулярная. В результате сингулярности корреляционной матрицы на поверхности функциональных зависимостей (решений уравнений правдоподобия) возникают максимумы вдоль диагональной линии, определяемой условием равенства времен приема двух сигналов ($t_1 = t_2$). Модуль коэффициента корреляции на указанной диагональной линии равен единице. Будем в дальнейшем называть эти максимумы шумовыми сингулярными [10], [11]. Выражение для дисперсии амплитуд шумовых сингулярных максимумов Рао–Крамера определяет их структуру. Амплитуда указанных максимумов существенно превышает оценки амплитуд сигналов и ограничивает возможности их отдельного обнаружения. В связи с этим основную цель настоящей статьи представляет исследование возможности решения задачи обнаружения сигналов в области их высокой корреляции с учетом шумовых сингулярных максимумов.

Основы теории. Запишем функционал отношений правдоподобия для случая, когда в принятой реализации $\hat{y}(t)$ содержится N – ультразвуковых сигналов и аддитивный нормальный шум $\hat{U}_{ш}(t)$ со средним значением квадратурных ком-

понтент, равным нулю, дисперсией σ^2 и интервалом корреляции τ_k [4]:

$$\Delta(\hat{U}_1, \dots, \hat{U}_N, \lambda') = \int_0^T |\hat{y}(t)|^2 dt - \int_0^T \left| \hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{f}_n(\lambda', t) \right|^2 dt. \quad (1)$$

Здесь $\hat{y}(t) = \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{f}_n(\lambda, t) + \hat{U}_{\text{ш}}(t)$ – принятая реализация; символом « $\hat{}$ » отмечены оценочные параметры сигналов; $\hat{f}_n(\lambda, t)$ – аналитическая форма n -го ультразвука сигнала; t – текущее время; λ – вектор неэнергетических параметров совокупности сигналов;

$$\begin{aligned} \hat{f}_n(\lambda, t) &= \hat{U}_n (1 - e^{-a(t-t_n)}) e^{i\omega_0(t-t_n)}, \\ &\quad t = t_n \dots t_n + T; \\ \hat{f}_n(\lambda, t) &= \hat{U}_n (1 - e^{-a(T-t_n)}) e^{-a(t-T-t_n)} e^{i\omega_0(t-t_n)}, \\ &\quad t \geq t_n + T, \end{aligned}$$

где \hat{U}_n – комплексная амплитуда n -го сигнала; a – коэффициент затухания; ω_0 – круговая резонансная частота; t_n – время приема n -го ультразвукового сигнала; T – длительность возбуждающего пьезокерамическую пластину радиоимпульса.

Функционал отношений правдоподобия (1) является поверхностью в пространстве оценок параметров сигналов. Максимум поверхности определяет минимум функции риска и является критерием отбора оценок параметров сигналов. Однако непосредственное использование поверхности функционала отношений правдоподобия для оценок параметров сигналов затруднено фактором неоднозначности [10], [11]. В разрезе поверхности по координатам время приема сигнала отмечается периодичность, и поверхность функционала характеризуется большим количеством локальных максимумов. Для исключения неоднозначности преобразуем функционал отношений правдоподобия на основе подстановки Хелстрема [10], [11]. Дифференцируя (1) по амплитудам сигналов и приравнивая дифференциалы нулю, можно получить уравнения правдоподобия. Запишем их в векторном виде:

$$\mathbf{b}(\lambda') = \hat{R}(\lambda') \hat{U}(\lambda'), \quad (2)$$

где $b_n(\lambda') = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{y}(t) \hat{f}_n(\lambda', t) dt$ – составляющие

вектора \mathbf{b} ; $\hat{R}_{n,m}(\lambda') = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{f}_n(\lambda', t) \hat{f}_m^*(\lambda', t) dt$ –

элементы корреляционной матрицы ($n, m = 1, \dots, N$);

$\hat{U}(\lambda')$ – вектор комплексных оцениваемых амплитуд ультразвука сигналов.

Решая уравнения правдоподобия (2), получим функциональные соотношения, определяющие комплексные амплитуды сигналов:

$$\hat{U}(\lambda') = \hat{R}(\lambda')^{-1} \mathbf{b}(\lambda'). \quad (3)$$

Подставим полученные функциональные соотношения в функционал (1). В результате получим преобразованный функционал отношений правдоподобия, зависящий лишь от неэнергетических параметров сигналов:

$$\begin{aligned} \Delta(\lambda') &= \int_0^T |\hat{y}(t)|^2 dt - \\ &- \int_0^T \left| \hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n(\lambda') \hat{f}_n(\lambda', t) \right|^2 dt. \quad (4) \end{aligned}$$

Данное выражение совместно с выражением (3) служит основой решения статистических задач в радиотехнике. Положение максимума поверхности (4) определяет отдельные оценки неэнергетических параметров сигналов. Их подстановка в (3) определяет отдельные оценки комплексных амплитуд сигналов, содержащихся в реализации. На рис. 1 показана поверхность преобразованного функционала отношений правдоподобия в пространстве оценок времен приема двух сигналов. По вертикали отложены значения этой поверхности в относительных единицах, по горизонтальным осям – оценки времен приема в миллисекундах. Отмечается наличие основного и зеркального максимумов поверхности. Положение каждого из этих максимумов определяет отдельные оценки времен приема двух сигналов. Значения максимумов определяют совокупную энергию двух сигналов. Значения оценок времен приема двух сигналов позволяет, в соответствии с (3), определить комплексные амплитуды двух сигналов и создать решающую статистику для задачи отдельного обнаружения двух сигналов.

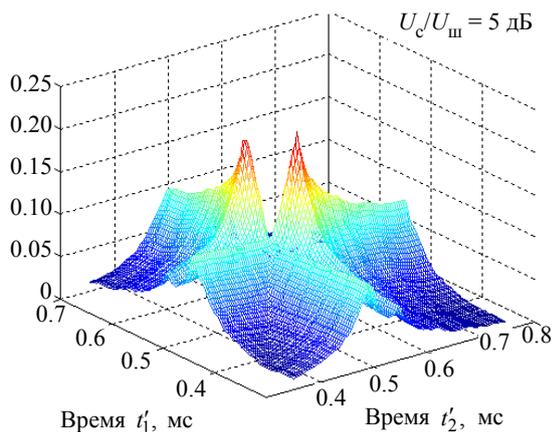


Рис. 1. Поверхность преобразованного функционала отношений правдоподобия в пространстве оценок времен приема двух сигналов. Отношение сигнал/шум – 5 дБ
 Fig. 1. Surface of the transformed functional of the likelihood ratio in the space of estimates of the reception times of two signals. The signal-to-noise ratio is 5 dB

На рис. 2 показана поверхность функциональной зависимости $\hat{U}_1(t'_1, t'_2)$ в пространстве оценок времен приема двух сигналов. По вертикали отложены значения поверхности в относительных единицах. Рис. 2 иллюстрирует наличие на поверхности $\hat{U}_1(t'_1, t'_2)$ сингулярных максимумов, возникающих в результате сингулярности корреляционной матрицы в выражении (2), вдоль диагональной линии. Диагональная линия определена условием $t'_1 = t'_2$. Наличие сингулярных максимумов – это фактор, препятствующий оценке амплитуд сигналов, а следовательно, и решению задачи обнаружения совокупности сигналов.

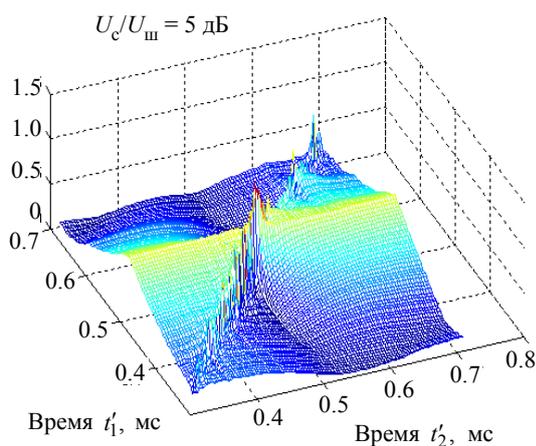


Рис. 2. Поверхность функциональной зависимости $\hat{U}_1(t'_1, t'_2)$ в пространстве оценок времен приема двух сигналов. Отношение сигнал/шум – 5 дБ
 Fig. 2. Functional dependence surface $\hat{U}_1(t'_1, t'_2)$ in the space of estimates of the reception times of two signals. The signal-to-noise ratio is 5 dB

Анализ выражения для дисперсии оценок амплитуд Рао–Крамера подтверждает вышеприведенное утверждение. В области высокой корреляции для случая двух сигналов в реализации дисперсия оценок амплитуд Рао–Крамера явно зависит от коэффициента корреляции. Определим эти дисперсии согласно [1], [2] на основе информационной матрицы Фишера:

$$D_u = \frac{\sigma^2 \tau_k}{T_{\text{ЭКВ}} (1 - |\hat{R}(\tau)|^2)} = \frac{\sigma^2}{N_{\text{ЭКВ}} (1 - |\hat{R}(\tau)|^2)}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ЭКВ}} = \int_0^{2T} |\hat{f}_1(t'_1, t'_2)|^2 dt$ – эквивалентная длительность сигнала; $N_{\text{ЭКВ}}$ – количество некоррелированных отсчетов шума на интервале $T_{\text{ЭКВ}}$; $\tau = t'_1 - t'_2$ – разность времен приема; $\hat{R}(t'_1, t'_2) = \frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_0^{2T} \hat{f}_2(t'_2, t) \hat{f}_2^*(t'_2, t) dt$ – коэффициент корреляции по времени приема двух ультразвуковых сигналов.

Дисперсия шумовых сингулярных максимумов определяется выражением, аналогичным выражению (5). Она имеет линейную зависимость от дисперсии шума на входе блока обработки и обратную зависимость от коэффициента корреляции $|\hat{R}_{\text{ш}}(\tau)|$. Однако значение коэффициента корреляции определяется не различием двух сигналов в реализации, а структурой сингулярного шумового максимума. Определим структуру дисперсии шума, определяемого сингулярными максимумами, следующим выражением:

$$D_{\text{ш}} = \frac{\sigma^2}{N_{\text{ЭКВ}} (1 - |\hat{R}_{\text{ш}}(\tau)|^2)}. \quad (6)$$

Представление о структуре $\hat{R}_{\text{ш}}(\tau)$ можно получить на основе статистики, представленной на рис. 5 и 6. Таким образом, возможность решения задачи обнаружения сигналов в областях как высокой, так и низкой корреляции связана с анализом статистик оценок амплитуд сигналов и статистик шумовых сингулярных максимумов.

Результаты модельных исследований. Представим результаты модельных исследований, касающихся возможностей обнаружения двух сиг-

налов, содержащихся в принятой реализации в области их высокой корреляции. Оценим рабочую область решений, исходя из точности оценки параметров сигналов.

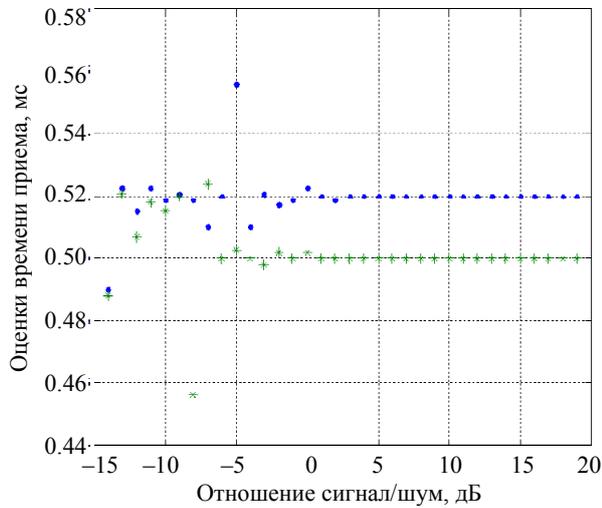


Рис. 3. Статистика оценок времен приема ультразвуковых сигналов в зависимости от отношения сигнал/шум. Модельные значения времен приема: 0.5 и 0.52 мс. Разрешение выше рэлеевского в 10 раз
Fig. 3. Statistics of estimates of ultrasonic signal reception times depending on the signal-to-noise ratio. Model values of reception times are 0.5 and 0.52 ms. The resolution is 10 times higher than Rayleigh's criterion

Рабочей областью отношений сигнал/шум при оценке времен приема, в соответствии с рис. 3, служит область от $U_c/U_{ш} = -5$ дБ и выше. В этой области погрешность оценок времен приема не превышает 5 %.

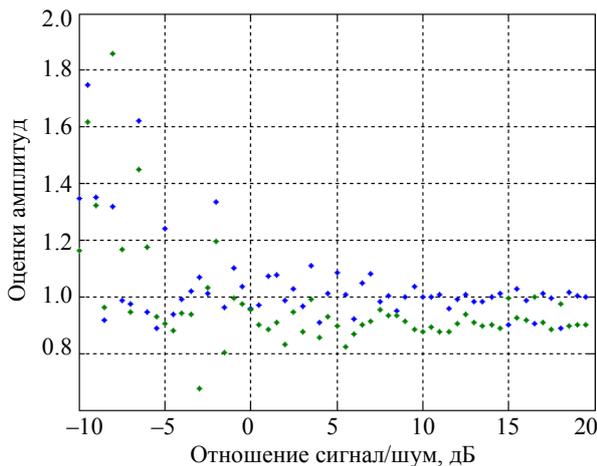


Рис. 4. Статистика оценок амплитуд сигналов в зависимости от отношения сигнал/шум
Fig. 4. Statistics of estimates of signal amplitudes depending on the signal-to-noise ratio

На рис. 4 показано аналогичное построение для оценок амплитуд сигналов в относительных

единицах. Оценки амплитуд имеют распределение Райса при фиксированном значении отношения сигнал/шум. Дисперсия оценок амплитуд сигналов изменяется согласно выражению (6). Рабочую область можно оценить значением отношений сигнал/шум от 0 дБ и выше. В ней погрешность амплитуд не превышает 10 %. Рабочую область при оценке времени приема больше, чем при оценке амплитуд сигналов, что связано с наличием шумовых сингулярных максимумов на поверхности функциональных зависимостей.

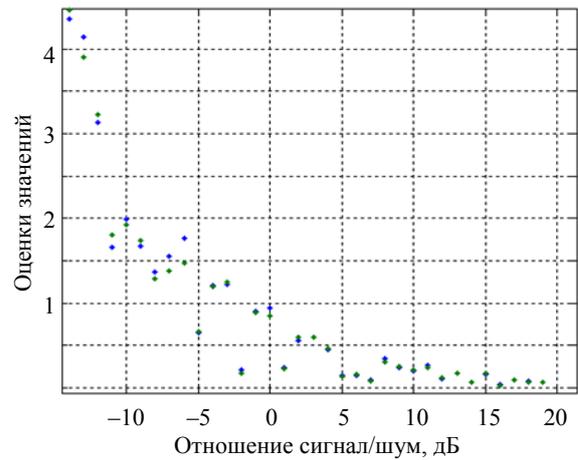


Рис. 5. Статистика значений шумовых сингулярных максимумов в зависимости от отношения сигнал/шум
Fig. 5. Statistics of the values of noise singular maxima depending on the signal-to-noise ratio

Статистика значений шумовых сингулярных максимумов в зависимости от уровня шума представлена на рис. 5 в относительных единицах. Дисперсия увеличивается при уменьшении отношения сигнал/шум. При отношении сигнал/шум, увеличивающемся от 0 дБ, и амплитуде сигнала, равной единице, можно ожидать вероятности обнаружения от 50 % и выше. Этой областью отношений сигнал/шум определяется возможность решения задачи раздельного обнаружения двух сигналов. Уровень сингулярных шумовых максимумов в этой области меньше амплитуды сигнала. Сравнивая статистики амплитуд сигналов и значений шумовых сингулярных максимумов на рис. 4 и 5, можно сделать вывод о существенном влиянии шумовых сингулярных максимумов на решение задачи обнаружения сигналов. Дисперсия квадратурных компонент значений шумовых сингулярных максимумов соответствует выражению (7).

На рис. 6 представлена информация о структуре коэффициента корреляции $|\hat{R}_{ш}(\tau)|$. Шумовые сингулярные максимумы имеют максимальные значения при малых разностях оценок времен

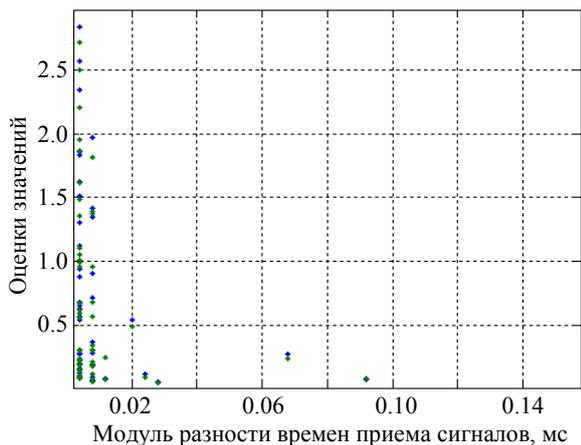


Рис. 6. Статистика значений шумовых сингулярных максимумов в зависимости от модуля разности времен приема сигналов $|\tau| = |t'_1 - t'_2|$. Основные сингулярные

максимумы находятся в области 0...0.01 мс
 Fig. 6. Statistics of the values of noise singular maxima depending on the modulus of the signal reception time difference $|\tau| = |t'_1 - t'_2|$. The main singular maxima range within 0...0.01 ms

приема шума. Следовательно, отсчеты шума, которые преобразуются программой в два сингулярных максимума, имеют коэффициенты корреляции $|\hat{R}_{ш}(\tau)|$, близкие к единице. Это позволяет ограничить область поиска решений при разрешении сигналов сверху. Например, если диапазон значений модуля разности оценок времен приема сигналов, равный 0...0.01 мс, исключить из области поиска решений, тогда основная часть сингулярных максимумов окажется вне области решений. Это позволяет существенно улучшить обнаружение сигналов в области высокой корреляции.

На рис. 7 показана статистика амплитуд сигналов и статистика шумовых сингулярных максимумов при отношении сигнал/шум 0 дБ и высокой разрешающей способности. По вертикали отложены оценки амплитуд сигналов и оценки значений шумовых сингулярных максимумов в относительных единицах. Штриховая линия определяет пороговый уровень, ограничивающий значения шумовых сингулярных максимумов. Анализ статистик дает следующее. При вероятности ложной тревоги 5 % вероятность обнаружения первого и второго сигналов равна 0 %. Если исключить область малых значений модуля разности времен приема сигналов, при поиске максимума преобразованного функционала отношений правдоподобия, тогда возможность обнаружения сигналов увеличивается.

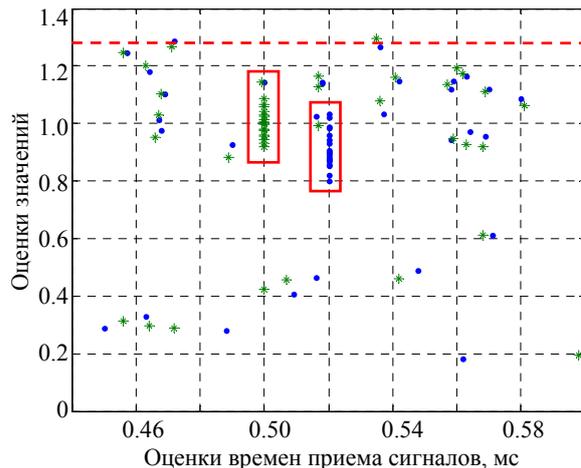


Рис. 7. Статистика амплитуд и времен приема двух сигналов (выделены прямоугольниками) и статистика значений шумовых сингулярных максимумов (точки вне прямоугольников). Разрешение выше рэлеевского в ≈ 10 раз. Модельное значение отношения сигнал/шум 0 дБ

Fig. 7. Statistics of the amplitudes and reception times of two signals (highlighted by rectangles) and statistics of the values of noise singular maxima (points outside the rectangles). The resolution is higher than the Rayleigh's criterion ≈ 10 times. The model value of the signal-to-noise ratio is 0 dB

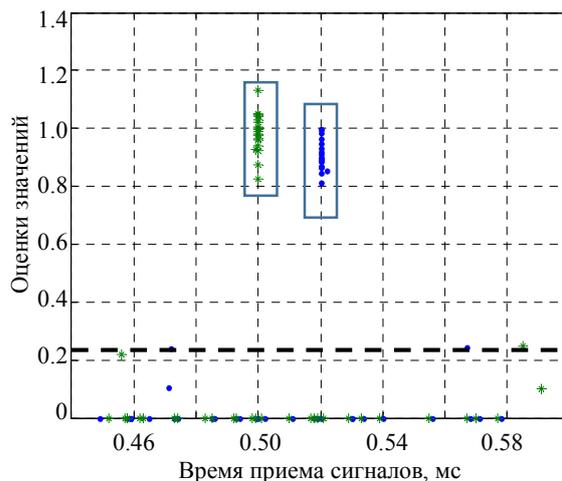


Рис. 8. Статистика амплитуд и времен приема двух сигналов (выделены прямоугольниками) и статистика значений шумовых сингулярных максимумов (точки вне прямоугольников) с ограничением области поиска решений

Fig. 8. Statistics of the amplitudes and reception times of two signals (highlighted by rectangles) and statistics of the values of noise singular maxima (points outside the rectangles) with a limitation of the search area of solutions

На рис. 8 показаны статистики амплитуд сигналов и шумовых сингулярных максимумов при ограничении области поиска решений условием $\tau \geq 0.01$ мс. Анализ статистик дает следующее. При вероятности ложной тревоги 5 % вероятности обнаружения первого и второго сигналов ≈ 100 %. Пороговый уровень, отмеченный штриховой линией при введенном ограничении существенно уменьшился. Даже при низкой корреляции

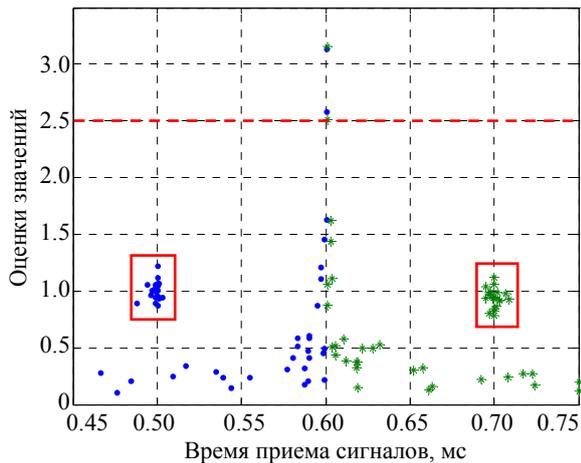


Рис. 9. Статистика амплитуд и времен приема двух сигналов (выделены прямоугольниками) и статистика значений шумовых сингулярных максимумов (точки вне прямоугольников). Разрешение равно рэлеевскому пределу. Модельное значение отношения сигнал/шум – 0 дБ

Fig. 9. Statistics of the amplitudes and reception times of two signals (highlighted by rectangles) and statistics of values of noise singular maxima (points outside the rectangles). The resolution is equal to the Rayleigh limit. The model value of the signal-to-noise ratio is 0 dB

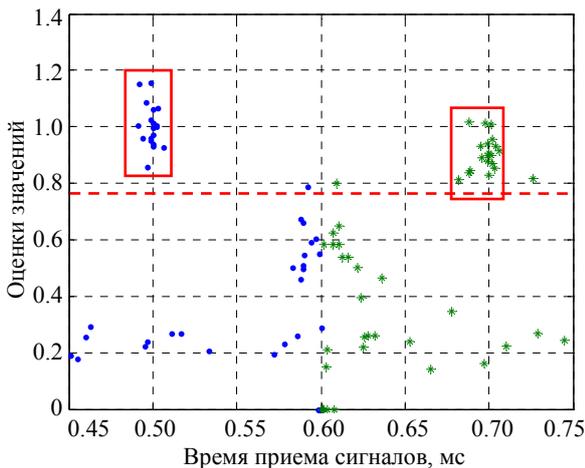


Рис. 10. Статистика амплитуд и времен приема двух сигналов (выделены прямоугольниками) и статистика значений шумовых сингулярных максимумов (вне области прямоугольников) с ограничением области поиска решений $|t'_1 - t'_2| \geq 0.01$ мс

Fig. 10. Statistics of the amplitudes and reception times of two signals (highlighted by rectangles) and statistics of the values of noise singular maxima outside the rectangles) with a limitation of the search area of $|t'_1 - t'_2| \geq 0.01$ ms

сигналов сингулярные максимумы ограничивают решение задачи обнаружения. Так, например, на

рис. 9 показана статистика амплитуд в относительных единицах при разности времен приема 0.2 мс, что соответствует рэлеевскому пределу, и статистика значений шумовых сингулярных максимумов в относительных единицах. При пороговом уровне, определяемом вероятностью ложной тревоги 5 %, вероятность обнаружения первого и второго сигналов равна 0 %. Мешают сингулярные шумовые максимумы, которые концентрируются вблизи линии сингулярности, определяемой временем приема 0.6 мс.

При ограничении области поиска решений условием $|t'_1 - t'_2| \geq 0.01$ мс основное количество шумовых сингулярных максимумов будет исключено. В этом случае пороговый уровень уменьшается в 5 раз и вероятности обнаружения сигналов оказались близки к 100 % (рис. 10).

Основные результаты. В настоящей статье представлены основные особенности решения задачи раздельного обнаружения сигналов в области их высокой корреляции. Они связаны с сингулярностью корреляционной матрицы, определяющей решение системы уравнений правдоподобия, которая ограничивает возможности решения задачи раздельного обнаружения сигналов. Получены следующие результаты.

1. Показано наличие шумовых сингулярных максимумов на поверхности функциональных зависимостей, получаемых при решении уравнений правдоподобия.

2. Приведены выражения, определяющие дисперсии амплитуд сигналов и значений шумовых сингулярных максимумов.

3. Показан специфический вид структуры сингулярных максимумов в зависимости от модуля оценок разности времен приема шума.

4. Предложено для повышения эффективности решения задачи раздельного обнаружения сигналов ограничить область поиска максимума функционала отношений правдоподобия условием $|t'_1 - t'_2| \geq c$, где c – область возможного ограничения. Она меньше, чем разность времен приема сигналов.

5. Показано, что при использовании метода ограничения области поиска решений, пороговый уровень, характеризующий шумовую составляющую, может быть уменьшен в 2...5 раз.

Список литературы

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
2. Ван Трис Г. Л. Теория обнаружения, оценок и модуляции / пер. с англ. под ред. проф. В. И. Тихонова. Т. 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. М.: Сов. радио, 1972. 744 с.

3. Оптимальный приемник для обнаружения совокупности сигналов с неизвестными параметрами / В. А. Пахотин, Р. В. Симонов, К. В. Власова, С. В. Петров // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 4. С. 36–42.
4. Чижов А. А. Метод разрешения групповых сосредоточенных целей // Радиотехника. 2009. № 10. С. 4–12.

5. Разрешение и распознавание радиолокационных объектов / В. В. Абраменко, С. А. Климов, Л. А. Бондарев, В. А. Юдин, В. А. Гульшин. Ульяновск: Ул ГТУ, 2012. 195 с.

6. Слюсар В. И. Сверхрелеевское разрешение узкополосных импульсов по времени задержки // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1999. № 3. С. 55–61.

7. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 360 с.

8. Вопросы статистической теории радиолокации: в 2 т. Т. 1 / П. А. Бакут, И. А. Большаков, Б. М. Герасимов, А. А. Курикша, В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский, В. В. Широков. М.: Сов. радио, 1963. 424 с.

9. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов / пер. с англ. Г. Ю. Кобзарева. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 431 с.

10. Симонов Р. В., Пахотин В. А., Либберман И. В. Потенциальные возможности разрешения ультразвуковых сигналов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 12–20. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-12-20.

11. Симонов Р. В., Пахотин В. А., Молостова С. В. Технология оптимальной обработки сигналов в области ультразвука с высоким разрешением // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 15–23. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-15-23.

Информация об авторах

Симонов Роман Валерьевич – аспирант Образовательно-научного кластера Института высоких технологий Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта, ул. А. Невского, 14, Калининград, 236040, Россия.

E-mail: RVSimonov@stud.kantiana.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3374-2524>

Пахотин Валерий Анатольевич – д-р физ.-мат. наук, профессор ОНК Института высоких технологий Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта, ул. А. Невского, 14, Калининград, 236040, Россия.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

<https://orcid.org/0009-0001-9939-418X>

Власова Ксения Валерьевна – канд. физ.-мат. наук, доцент ОНК Института высоких технологий Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта, ул. А. Невского, 14, Калининград, 236040, Россия.

E-mail: p_ksenia@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2180-4775>

References

1. Tihonov V. I. Optimal'nyj priem signalov. M.: Radio i svjaz', 1983. 320 s. (In Russ.).

2. Van Tris G. L. Teorija obnaruzhenija, ocenok i moduljacji / per. s angl. pod red. prof. V. I. Tihonova. T. 1. Teorija obnaruzhenija, ocenok i linejnoj moduljacji. M.: Sov. radio, 1972. 744 s. (In Russ.).

3. Optimal'nyj priemnik dlja obnaruzhenija sovokupnosti signalov s neizvestnymi parametrami / V. A. Pahotin, R. V. Simonov, K. V. Vlasova, S. V. Petrov // Cifrovaia obrabotka signalov. 2020. № 4. С. 36–42. (In Russ.).

4. Chizhov A. A. Metod razreshenija gruppovyh sosredoto-chennyh celej // Radiotekhnika. 2009. № 10. С. 4–12. (In Russ.).

5. Razreshenie i raspoznvanie radiolokacionnyh ob'ektov / V. V. Abramenko, S. A. Klimov, L. A. Bondarev, V. A. Judin, V. A. Gul'shin. Ul'janovsk: Ul GTU, 2012. 195 s. (In Russ.).

6. Sljusar V. I. Sverhrleeevskoe razreshenie uzkopolosnyh impul'sov po vremeni zaderzhki // Izv. vuzov. Radioelektronika. 1999. № 3. С. 55–61. (In Russ.).

7. Shirman Ja. D. Razreshenie i szhatie signalov. M.: Sov. radio, 1974. 360 s. (In Russ.).

8. Voprosy statisticheskoi teorii radiolokacii: v 2 t. Т. 1 / P. A. Bakut, I. A. Bol'shakov, B. M. Gerasimov, A. A. Kuriksha, V. G. Repin, G. P. Tartakovskij, V. V. Shirokov. M.: Sov. radio, 1963. 424 s. (In Russ.).

9. Helstrom K. Statisticheskaja teorija obnaruzhenija signalov / per. s angl. G. Ju. Kobzareva. M.: Izd-vo inostr. lit., 1963. 431 s. (In Russ.).

10. Simonov R. V., Pahotin V. A., Liberman I. V. Potencial'nye vozmozhnosti razreshenija ul'trazvukovyh signalov // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2024. Т. 17, № 3. С. 12–20. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-12-20. (In Russ.).

11. Simonov R. V., Pahotin V. A., Molostova S. V. Tehnologija optimal'noj obrabotki signalov v oblasti ul'trazvuka s vysokim razresheniem // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2024. Т. 17, № 2. С. 15–23. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-15-23. (In Russ.).

Information about the authors

Roman V. Simonov – postgraduate student at the ONC Institute of High Technologies of the I. Kant Baltic Federal University, A. Nevsky St., 14, Kaliningrad, 236040, Russia.
E-mail: RVSimonov@stud.kantiana.ru

Valery A. Pakhotin – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor of the ONC Institute of High Technologies of the I. Kant Baltic Federal University, A. Nevsky St., 14, Kaliningrad, 236040, Russia.
E-mail: VPakhotin@kantiana.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9939-418X>

Kseniya V. Vlasova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the ONC Institute of High Technologies of the I. Kant Baltic Federal University, A. Nevsky St., 14, Kaliningrad, 236040, Russia.
E-mail: p_ksenia@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2180-4775>

Статья поступила в редакцию 14.07.2024; принята к публикации после рецензирования 17.11.2024; опубликована онлайн 27.01.2025.

Submitted 14.07.2024; accepted 17.11.2024; published online 27.01.2025.
