

УДК 654.739

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.58.7.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.58.7.004)

Оценка эффективности гибридного RLS-алгоритма с α - β предфильтрацией при подавлении разнородных помех в антенных решетках

Е.И. Глушанков✉, Н.О. Агейчик

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме. Актуальность исследования обусловлена широким применением антенных решёток в радиолокации, навигации и системах связи, где эффективность подавления помех критически зависит от адаптивных алгоритмов. Классический RLS-алгоритм теряет устойчивость при импульсных и нестационарных помехах, что создает проблему для работы в реальных условиях (движение объектов, эффект Доплера, преднамеренные помехи). Цель работы – сравнительный анализ классического RLS и гибридного алгоритма RLS с предварительной адаптивной α - β фильтрацией при воздействии 11 типов разнородных помех. Исследование базировалось на имитационном моделировании, реализованном в среде MATLAB. Для каждого из 11 типов помех варьировались следующие параметры: отношение мощности помехи к сигналу (ΔP принимало значения от 1 до 11), угловое рассогласование между направлениями прихода сигнала и помехи (диапазон от 0° до 9°) и наличие эффекта Доплера (сдвиг несущей частоты 0 % и 10 %). Всего было проведено 24 200 вычислительных экспериментов, в рамках которых обработано более 193 миллионов отсчетов данных. Классический алгоритм RLS демонстрирует приемлемую эффективность лишь в стационарных условиях. При воздействии импульсных, полупериодических и комбинированных помех его выходное отношение сигнал/шум+помеха снижается до отрицательных значений. В противоположность этому, гибридный алгоритм RLS+ $\alpha\beta$ обеспечивает устойчивый уровень отношения сигнал/шум+помеха выше 20 дБ во всех рассмотренных сценариях, а в наихудших условиях превосходит классический RLS на 20–25 дБ. Эффект Доплера практически не сказывается на работе гибридного алгоритма, тогда как для классического RLS он приводит к расходимости весовых коэффициентов и потере работоспособности. Предложенный гибридный алгоритм является универсальным и устойчивым решением для антенных решеток, работающих в сложной нестационарной помеховой обстановке. Результаты могут быть использованы при проектировании систем радиолокации, навигации беспилотных летательных аппаратов и средств радиоэлектронной борьбы.

Ключевые слова: адаптивные антенные решетки, гибридный RLS-алгоритм, α - β фильтр, пространственная фильтрация, помехоустойчивость, импульсные помехи, комбинированные помехи, отношение сигнал/шум+помеха, эффект Доплера, нестационарные помехи.

Для цитирования: Глушанков Е.И., Агейчик Н.О. Оценка эффективности гибридного RLS-алгоритма с α - β предфильтрацией при подавлении разнородных помех в антенных решетках. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(7). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2366> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.58.7.004

Evaluation of the effectiveness of the hybrid RLS algorithm with α - β pre-filtering in the suppression of diverse interference in antenna arrays

E.I. Glushankov✉, N.O. Ageychik

*The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
Saint-Petersburg, the Russian Federation*

Abstract. The relevance of this study stems from the widespread use of antenna arrays in radar, navigation, and communication systems, where interference suppression efficiency critically depends on adaptive algorithms. The classical RLS algorithm loses stability in the face of pulsed and non-stationary interference, which poses challenges for operation in real-world conditions (moving objects, the Doppler effect, and intentional jamming). The objective of this study is a comparative analysis of the classical RLS and a hybrid RLS algorithm with adaptive α - β pre-filtering under the influence of 11 types of heterogeneous interference. The study was based on simulation modeling implemented in the MATLAB environment. For each of the 11 types of interference, the following parameters were varied: the interference-to-signal power ratio (ΔP , which ranged from 1 to 11), the angular misalignment between the signal and interference arrival directions (range from 0° to 9°), and the presence of the Doppler effect (carrier frequency shift of 0 % and 10 %). A total of 24,200 computational experiments were conducted, processing over 193 million data samples. The classical RLS algorithm demonstrates acceptable performance only under stationary conditions. When exposed to pulsed, semi-periodic, and combined interference, its output signal-to-noise ratio decreases to negative values. In contrast, the hybrid RLS+ $\alpha\beta$ algorithm provides a stable output signal-to-noise ratio level above 20 dB in all considered scenarios, and in the worst-case scenarios, it outperforms classical RLS by 20–25 dB. The Doppler effect has virtually no effect on the performance of the hybrid algorithm, whereas for classical RLS, it leads to divergence of weighting coefficients and loss of performance. The proposed hybrid algorithm is a universal and robust solution for antenna arrays operating in complex, non-stationary interference environments. The results can be used in the design of radar systems, unmanned aerial vehicles navigation, and electronic warfare systems.

Keywords: adaptive antenna arrays, hybrid RLS algorithm, α - β filter, spatial filtering, noise immunity, impulse noise, combined noise, signal-to-noise-plus-interference ratio, Doppler effect, non-stationary noise.

For citation: Glushankov E.I., Ageychik N.O. Evaluation of the effectiveness of the hybrid RLS algorithm with α - β pre-filtering in the suppression of diverse interference in antenna arrays. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(7). (In Russ.). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/article?id=2366> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.58.7.004

Введение

В современных системах радиолокации, радионавигации и беспроводной связи все более широкое распространение получают фазированные антенные решетки [1, 2], позволяющие осуществлять пространственную селекцию сигналов и подавление помех. Наибольшую остроту эта проблема приобретает в условиях интенсивного использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и функционирования в плотной городской застройке, где уровень помех может на десятки децибел превышать полезный сигнал [3, 4]. Характер помех при этом отличается большим разнообразием: гармонические, импульсные, широкополосные, флуктуационные, а также их различные комбинации. Классические адаптивные алгоритмы, такие как RLS (Recursive Least Squares) и NLMS (Normalized Least Mean Squares), показывают высокую эффективность в стационарных условиях [5], однако теряют устойчивость при возникновении импульсных выбросов, быстрых перестроек параметров помехи и эффекта Доплера, обусловленного движением объекта [6, 7].

В настоящей работе предложен и исследован гибридный алгоритм, сочетающий предварительную адаптивную α - β фильтрацию (модель постоянной скорости) с классическим RLS. Адаптивные коэффициенты α_k, β_k автоматически увеличиваются при появлении выбросов, что позволяет сглаживать импульсные помехи без раскачки весов RLS. Проведено масштабное имитационное моделирование: 11 типов помех, варьирования мощности (ΔP от 1 до 11), углового рассогласования (0 – 9°) и эффекта Доплера (0 % и 10 %). Всего выполнено 24 200 вычислительных экспериментов с обработкой более 193 млн точек данных.

Цель работы – сравнительный анализ эффективности классического RLS и гибридного RLS+ $\alpha\beta$ в условиях воздействия разнородных помех, а также определение наиболее опасных для каждого алгоритма типов помех. В отличие от известных исследований [5], в работе впервые проведено систематическое сравнение на столь широком наборе помеховых сценариев с учетом нестационарности (эффект Доплера) и углового рассогласования.

Результаты показывают, что гибридный алгоритм обеспечивает стабильное отношение сигнал/шум+помеха (ОСШП) выше 20 дБ для всех типов помех, тогда как классический RLS при импульсных и комбинированных помехах деградирует до отрицательных значений ОСШП. Выигрыш в наихудших условиях достигает 20–25 дБ. Практическая значимость работы заключается в обосновании выбора алгоритма фильтрации для антенных решеток БПЛА, систем РЭБ и морской навигации, работающих в сложной помеховой обстановке.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана линейная фазированная антенная решетка [1], содержащая $N_e = 8$ элементов. Сигнал на выходе n -го элемента решетки в дискретный момент времени k описывается следующим выражением:

$$x_n(k) = s_n(k) + \sum_{i=1}^M p_{n,i}(k) + \text{АБГШ}_n(k). \quad (1)$$

Обозначения: $s_n(k)$ – полезный сигнал, $p_{n,i}(k)$ – i -я помеха, $\text{АБГШ}_n(k)$ – аддитивный белый гауссовский шум.

В рамках работы проанализировано воздействие 11 разновидностей помех: комплексной гармонической, белого гауссовского шума, импульсной, сосредоточенной гармонической, аperiodической, полупериодической, помехи с частотной манипуляцией, флуктуационной, полигармонической, широкополосной и комбинированной (Рисунок 1).

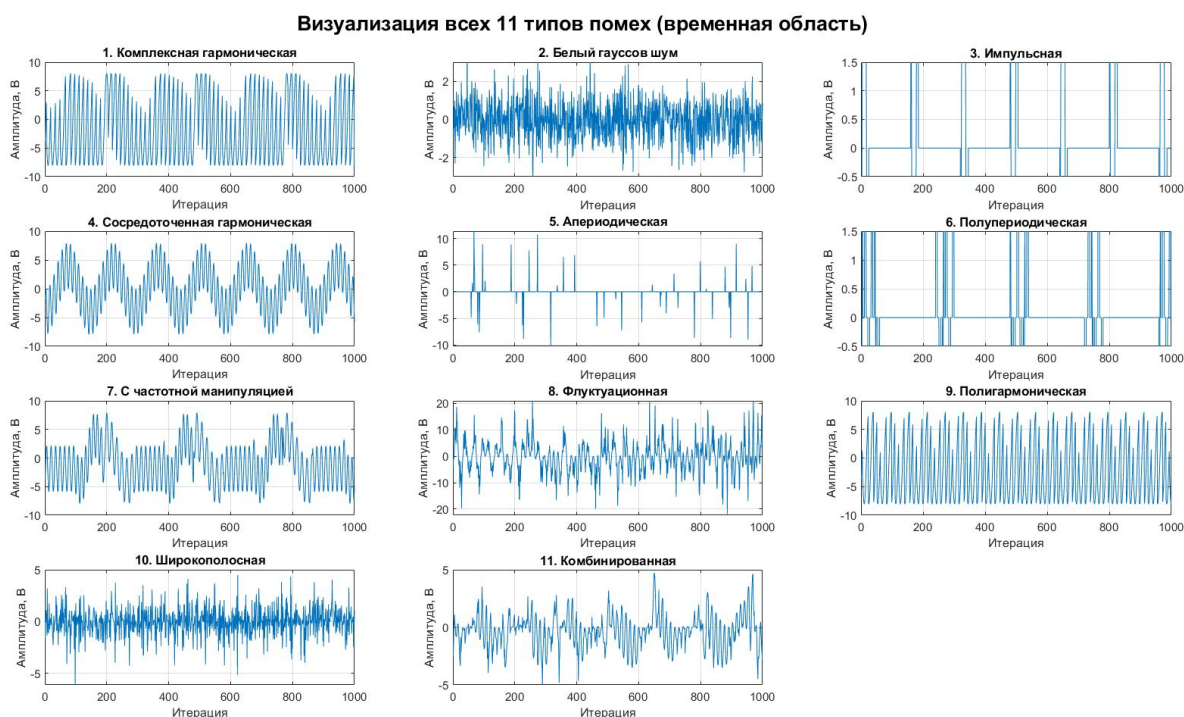


Рисунок 1 – Типы помех, рассматриваемые в исследовании
 Figure 1 – Types of interference considered in the study

Алгоритм RLS (Recursive Least Squares) основан на минимизации экспоненциально взвешенной суммы квадратов ошибок, что обеспечивает его более высокую скорость сходимости по сравнению с NLMS, однако сопровождается повышенными вычислительными затратами [5]. Процедура RLS включает следующие основные шаги.

Выходной сигнал фильтра вычисляется как скалярное произведение вектора весовых коэффициентов и вектора входных отсчетов [6]:

$$y(k) = W^T(k)x(k). \quad (2)$$

Коэффициент усиления Калмана определяется выражением:

$$K(k) = \frac{P(k-1)x(k)}{\lambda + x^T(k)P(k-1)x(k)}. \quad (3)$$

Обновление обратной корреляционной матрицы производится по формуле:

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} [P(k-1) - K(k)x^T(k)P(k-1)]. \quad (4)$$

Коррекция вектора весов осуществляется на основе ошибки фильтрации:

$$W(k) = W(k-1) + K(k)e(k), \quad (5)$$

где $y(k)$ – выходной сигнал адаптивного фильтра в момент времени k ; $W(k) = [w_1(k), w_2(k), \dots, w_{N_e}(k)]^T$ – вектор весовых коэффициентов фильтра (размер $N_e \times 1$); $x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_{N_e}(k)]^T$ – вектор входных сигналов с элементов антенной решетки (размер $N_e \times 1$); λ – коэффициент забывания ($0 < \lambda \leq 1$), определяющий скорость адаптации (в работе $\lambda = 0,90$); $e(k) = d(k) - y(k)$ – сигнал ошибки, где $d(k)$ – желаемый (опорный) сигнал; $K(k)$ – вектор коэффициентов усиления Калмана (размер $N_e \times 1$); $P(k)$ – обратная корреляционная матрица входного сигнала (размер $N_e \times N_e$).

Вычислительные затраты классического RLS-алгоритма составляют $O(N_e^2)$ операций комплексного умножения и сложения на одну итерацию (один временной отсчет). Для антенной решетки, содержащей $N_e = 8$ элементов, требуется около 558 операций с плавающей точкой на отсчет, что примерно на порядок превышает вычислительную сложность алгоритма NLMS.

С целью повышения эффективности подавления импульсных помех в состав обработки включен предварительный α - β фильтр с адаптивными коэффициентами:

$$\alpha_k = \alpha_0(1 + 0,10|r(k)|), \beta_k = \beta_0(1 + 0,05|r(k)|), \quad (6)$$

где базовые значения приняты равными $\alpha_0 = \beta_0 = 0,028$.

Для усиления подавления импульсных и полупериодических помех предлагается использовать указанный α - β фильтр, представляющий собой упрощенную реализацию фильтра Калмана, построенную на основе модели постоянной скорости [8, 9].

Модель динамики системы описывается уравнением:

$$\begin{bmatrix} p(k) \\ v(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(k-1) \\ v(k-1) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $p(k)$ – позиция (текущее значение сигнала), $v(k)$ – скорость его изменения, T_s – период дискретизации.

Прогноз:

$$\hat{p}(k|k-1) = \hat{p}(k-1) + \hat{v}(k-1)T_s. \quad (8)$$

Остаток:

$$r(k) = x(k) - \hat{p}(k|k-1), \quad (9)$$

где α_k, β_k – адаптивные коэффициенты сглаживания α - β фильтра на k -м шаге; α_0, β_0 – базовые (начальные) значения коэффициентов (в работе $\alpha_0 = \beta_0 = 0,028$); $r(k)$ – остаток (невязка) между измеренным значением сигнала $x(k)$ и предсказанным значением $\hat{p}(k|k-1)$; $p(k)$ – оценка позиции (значения сигнала) в момент k ; $v(k)$ – оценка скорости изменения сигнала в момент k ; T_s – период дискретизации; $\hat{p}(k|k-1)$ – прогноз позиции на шаг k по данным предыдущего шага $k-1$; $\hat{v}(k-1)$ – оценка скорости на предыдущем шаге; $x(k)$ – измеренное (входное) значение сигнала в момент k (после воздействия помех).

В случае резких всплесков входного сигнала (характерных для импульсных помех) адаптивные коэффициенты α_k и β_k автоматически возрастают, что ускоряет подстройку фильтра. При слабых флуктуациях фильтр функционирует в шадающем режиме, эффективно сглаживая шумовые компоненты [10].

Вычислительные затраты предварительного α - β фильтра растут линейно с числом элементов антенной решетки и составляют $O(N_e)$ операций комплексного умножения и сложения на каждый отсчет. Для решетки из 8 элементов требуется приблизительно 80 арифметических действий на один отсчет.

В рамках исследования выполнены четыре серии экспериментов, направленных на оценку влияния следующих факторов: угловое положение источника помехи (диапазон 30° – 40°), разность мощности полезного сигнала и помехи (значения от 1 до 11 дБ), а также сравнение эффективности алгоритмов для всех рассматриваемых типов помех. Для каждой уникальной комбинации параметров проводилось по 50 независимых вычислительных опытов.

Результаты

При фиксированных уровнях мощности сигнала и помехи наихудшие показатели ОСШП для классического RLS без α - β фильтра наблюдались в сценариях с импульсной и полупериодической помехами. Кроме того, минимальные значения ОСШП фиксировались при полном совпадении направлений прихода полезного сигнала и помехи относительно нормали антенны, поскольку в такой конфигурации помеха практически полностью подавляет полезный сигнал (Рисунок 2).

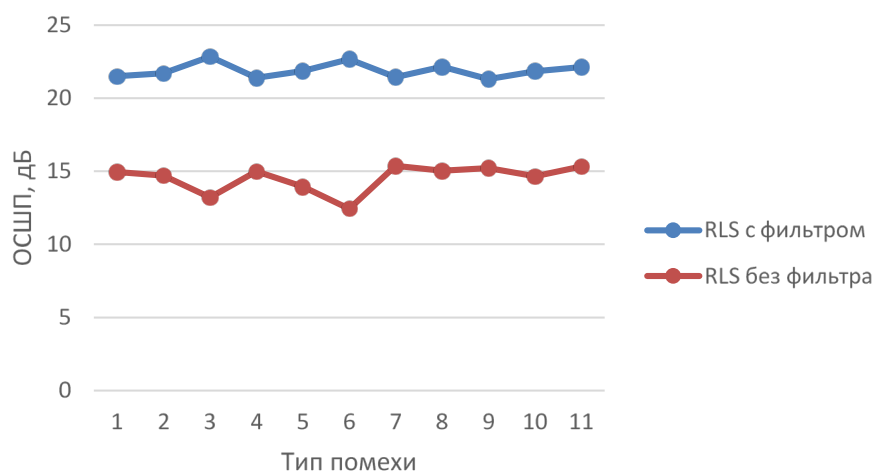


Рисунок 2 – Изменение ОСШП в зависимости от типа помехи при постоянных значениях мощности полезного сигнала и помехи

Figure 2 – Change in SINR depending on the type of interference at constant values of the useful signal and interference power

В условиях, когда мощности полезного сигнала и помехи различались, эффективность алгоритмов заметно ухудшалась. Особенно критичным это оказалось для импульсной и полупериодической помех при использовании RLS с α - β предфильтрацией (Рисунок 3).

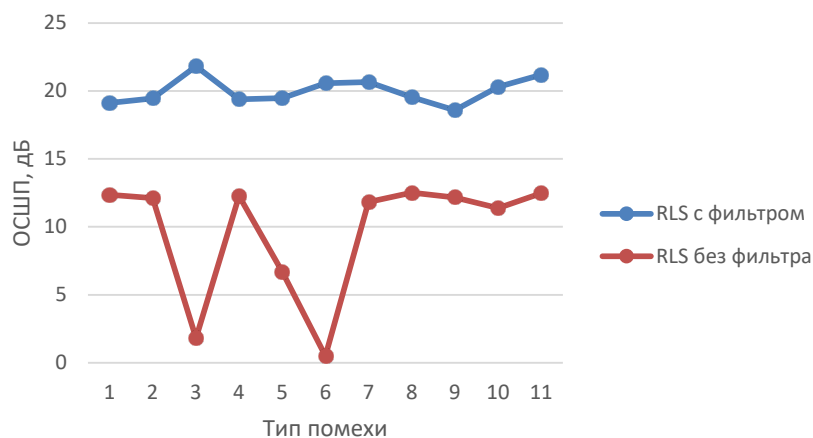


Рисунок 3 – Зависимость ОСШП от типа помехи в условиях нефиксированных мощностей сигнала и помехи

Figure 3 – Dependence of the SNIR on the type of interference, under conditions of non-fixed signal and interference powers

При уменьшении возможной разницы мощности между сигналом и помехой среднее значение ОСШП улучшается практически в два раза (Рисунок 4).

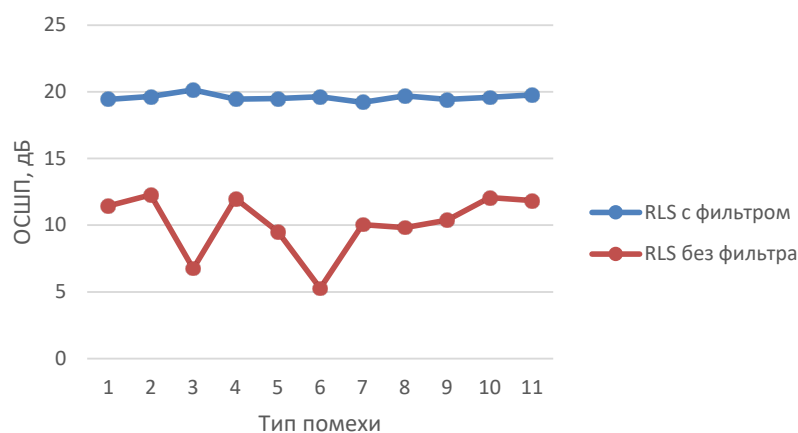


Рисунок 4 – Зависимость ОСШП от типа помехи в условиях ограниченных мощностей сигнала и помехи

Figure 4 – Dependence of the SNIR on the type of interference, under conditions of limited signal and interference powers

Для всех типов помех с ростом отношения мощности помехи к сигналу (ΔP) наблюдается снижение выходного ОСШП. Однако степень этого снижения существенно зависит от алгоритма фильтрации и структуры помехи (Рисунок 5).

Классический RLS демонстрирует высокую эффективность при стационарных и узкополосных помехах (комплексная гармоническая, сосредоточенная гармоническая, полигармоническая, белый гауссов шум). Даже при $\Delta P = 10$ ОСШП остается на уровне 24–29 дБ (без эффекта Доплера) и 14–15 дБ (при Доплере 10 %). Однако для импульсной, полупериодической и комбинированной помех RLS без предфильтрации

катастрофически теряет устойчивость: при $\Delta P = 10$ ОСШП падает до 3–5 дБ (без Доплера) и ниже 1 дБ (с Доплером). Это объясняется тем, что квадратичный критерий RLS чрезмерно реагирует на выбросы, вызывая раскачку весовых коэффициентов (Рисунок 6).

Гибридный алгоритм RLS+ $\alpha\beta$ сохраняет стабильность во всем диапазоне мощностей. Для импульсной помехи при $\Delta P = 10$ ОСШП составляет 24,1 дБ (без Доплера) и 24,1 дБ (с Доплером) – практически не меняется по сравнению с малыми мощностями. Адаптивные коэффициенты α_k, β_k эффективно сглаживают импульсные выбросы, не допуская их влияния на RLS. Для комбинированной помехи ОСШП гибридного алгоритма при $\Delta P = 10$ достигает 24,8 дБ (без эффекта Доплера) и 23,5 дБ (с эффектом Доплера), что на 20 дБ выше, чем у классического RLS.

Наихудшей помехой для классического RLS является комбинированная, затем импульсная и полупериодическая. Для гибридного алгоритма все типы помех подавляются практически одинаково эффективно (разброс ОСШП менее 2 дБ при фиксированном ΔP).

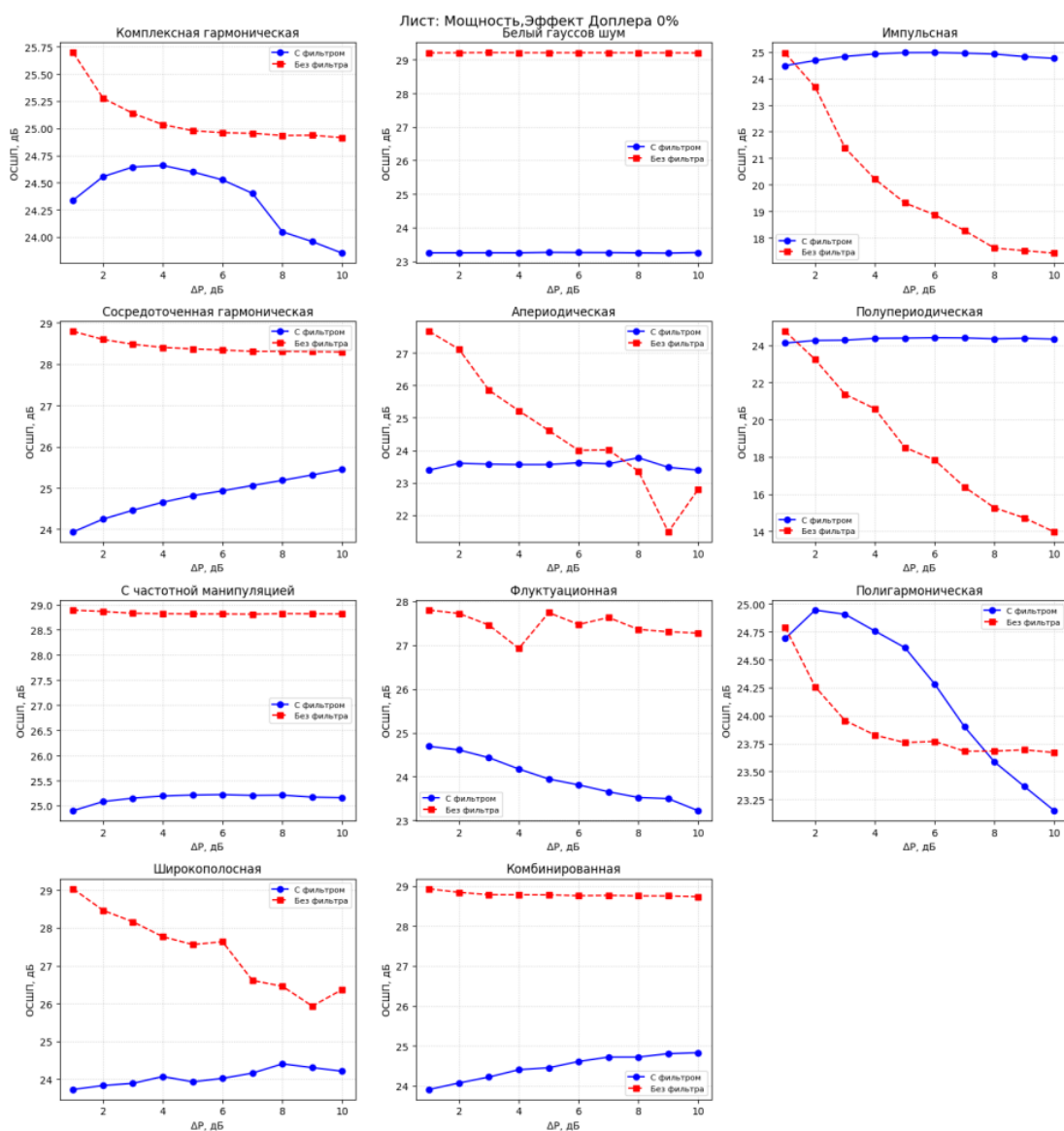


Рисунок 5 – Зависимость ОСШП от мощности помехи без эффекта Доплера
 Figure 5 – Dependence of the SNIR on the interference power without the Doppler effect

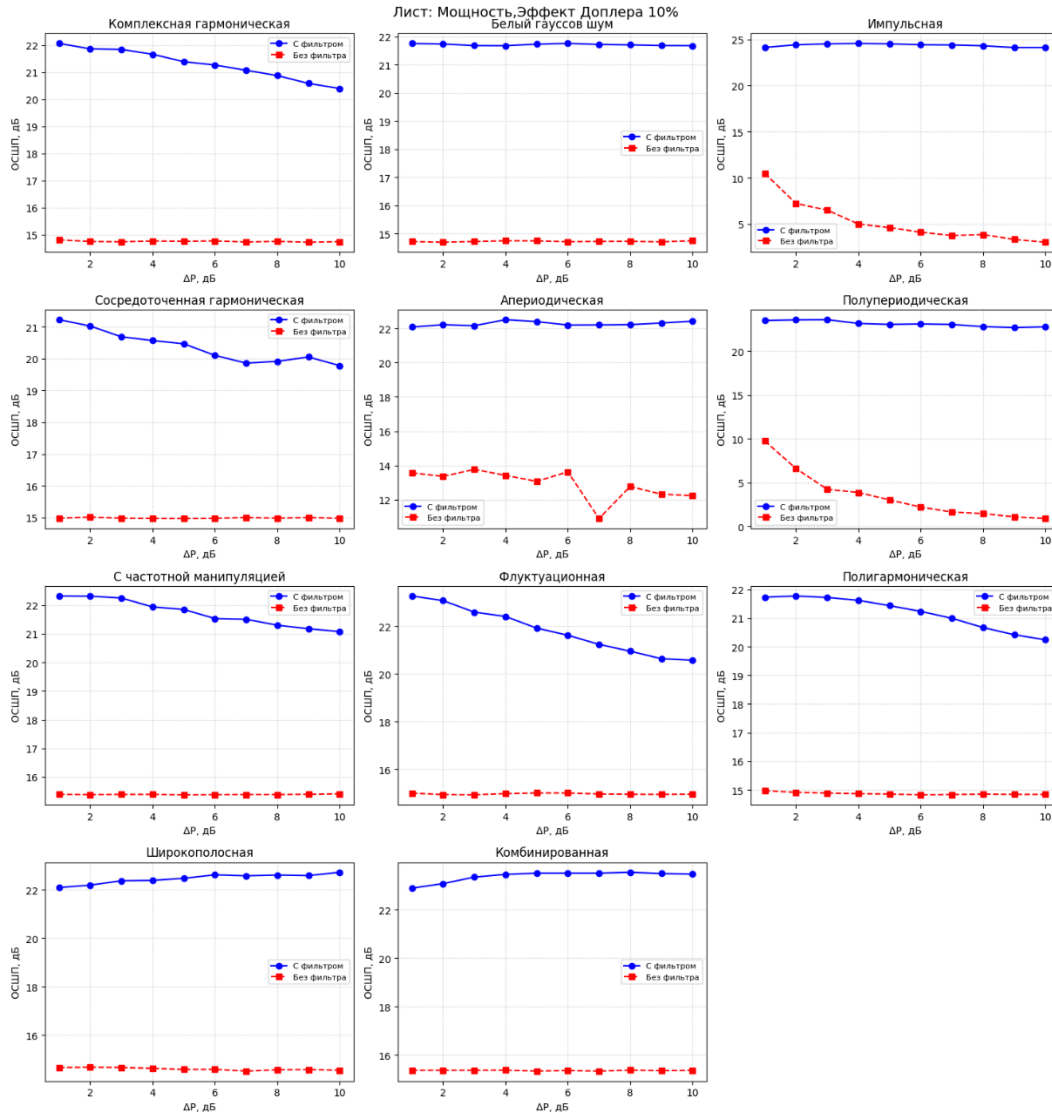


Рисунок 6 – Зависимость ОСШП от мощности помехи при эффекте Доплера 10 %
Figure 6 – Dependence of the SNIR on the interference power with a Doppler effect of 10 %

При совпадении направлений прихода полезного сигнала и помехи (дельта углов = 0) классический RLS без предфильтрации оказывается практически неработоспособен: ОСШП принимает отрицательные значения (от -4 до -1 дБ) для всех типов помех, кроме белого шума. Это соответствует полному подавлению сигнала помехой, так как адаптивные веса не могут сформировать ноль в направлении источника помехи, совпадающем с сигналом.

Гибридный алгоритм даже при совпадении углов сохраняет ОСШП на уровне 11–18 дБ в зависимости от типа помехи. Для импульсной помехи – 17,5 дБ, для комбинированной – 16,8 дБ. Это достигается за счет того, что α - β предфильтр уменьшает динамический диапазон входного сигнала, позволяя RLS корректно оценивать корреляционную матрицу.

С увеличением углового рассогласования (от 1° до 9°) ОСШП обоих алгоритмов растет, но классический RLS догоняет гибридный только при больших углах (дельта $\geq 5-6$) (Рисунок 7). При этом для нестационарных помех разрыв сохраняется: даже при дельте 9 ОСШП классического RLS для импульсной помехи составляет 11,5 дБ, а гибридного – 24,8 дБ.

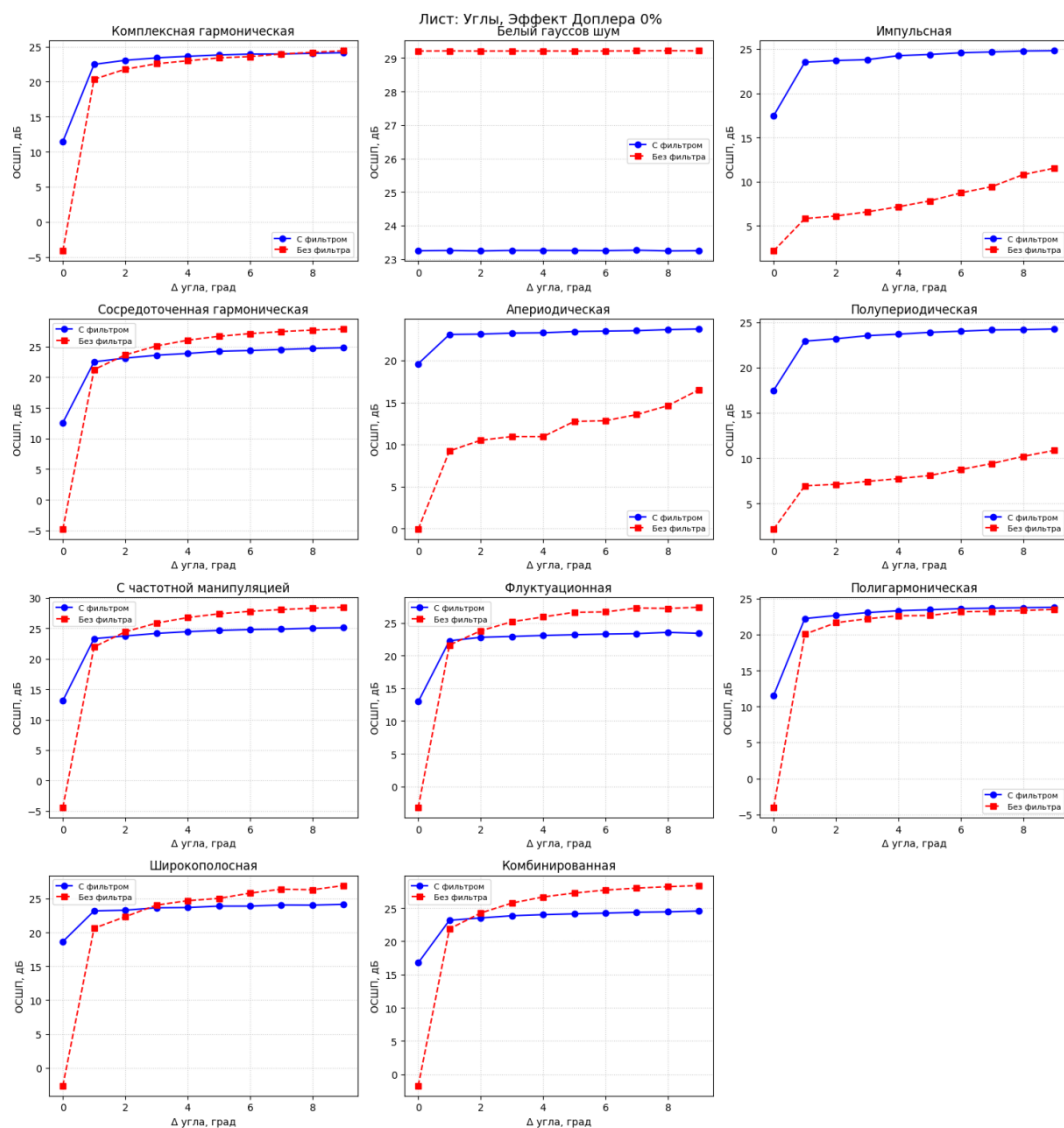


Рисунок 7 – Зависимость ОСШП от разницы углов прихода сигнала и помехи без эффекта Доплера

Figure 7 – Dependence of the SNIR on the difference in the angles of arrival of the signal and interference without the Doppler effect

Введение эффекта Доплера (относительный сдвиг несущей частоты на 10 %) практически не сказывается на работе гибридного алгоритма – падение ОСШП составляет не более 0,5–1 дБ. Для классического RLS эффект Доплера оказывается критическим: ОСШП снижается на 11–15 дБ даже для стационарных помех. Например, для комплексной гармонической помехи при $\Delta P = 1$ ОСШП падает с 25,7 до 14,8 дБ. Это объясняется тем, что RLS, использующий модель сигнала с фиксированной частотой, не может отследить доплеровское изменение фазы, и его веса расходятся. Гибридный алгоритм, благодаря α - β фильтру, частично компенсирует фазовые флуктуации.

Область применимости классического RLS ограничена стационарными режимами, в которых импульсные помехи, угловое совпадение сигнала и помехи не проявляются. В реальных сценариях с быстро меняющейся помеховой обстановкой, наличием импульсных всплесков и доплеровскими искажениями данный алгоритм оказывается неэффективным.

Гибридный алгоритм RLS с адаптивным α - β предфильтром является универсальным решением, обеспечивающим высокое и стабильное ОСШП (>20дБ) для всех 11 типов помех, во всем диапазоне мощностей и углов, а также при наличии эффекта Доплера. Выигрыш по сравнению с классическим RLS в наихудших условиях достигает 20–25 дБ.

Предложенный гибридный алгоритм RLS+ α β демонстрирует универсальность: он обеспечивает стабильное высокое ОСШП (>20 дБ) для всех 11 типов помех при любых значениях мощности, углов прихода и при наличии доплеровского сдвига частоты. Преимущество перед классическим RLS в наихудших сценариях составляет 20–25 дБ.

Угловое совпадение сигнала и помехи является критическим фактором для классического RLS (приводит к полной потере работоспособности), тогда как гибридный алгоритм сохраняет приемлемое качество фильтрации.

Под воздействием эффекта Доплера классический RLS утрачивает работоспособность уже при малых мощностях помехи, в то время как гибридный алгоритм остается эффективным (Рисунок 8).

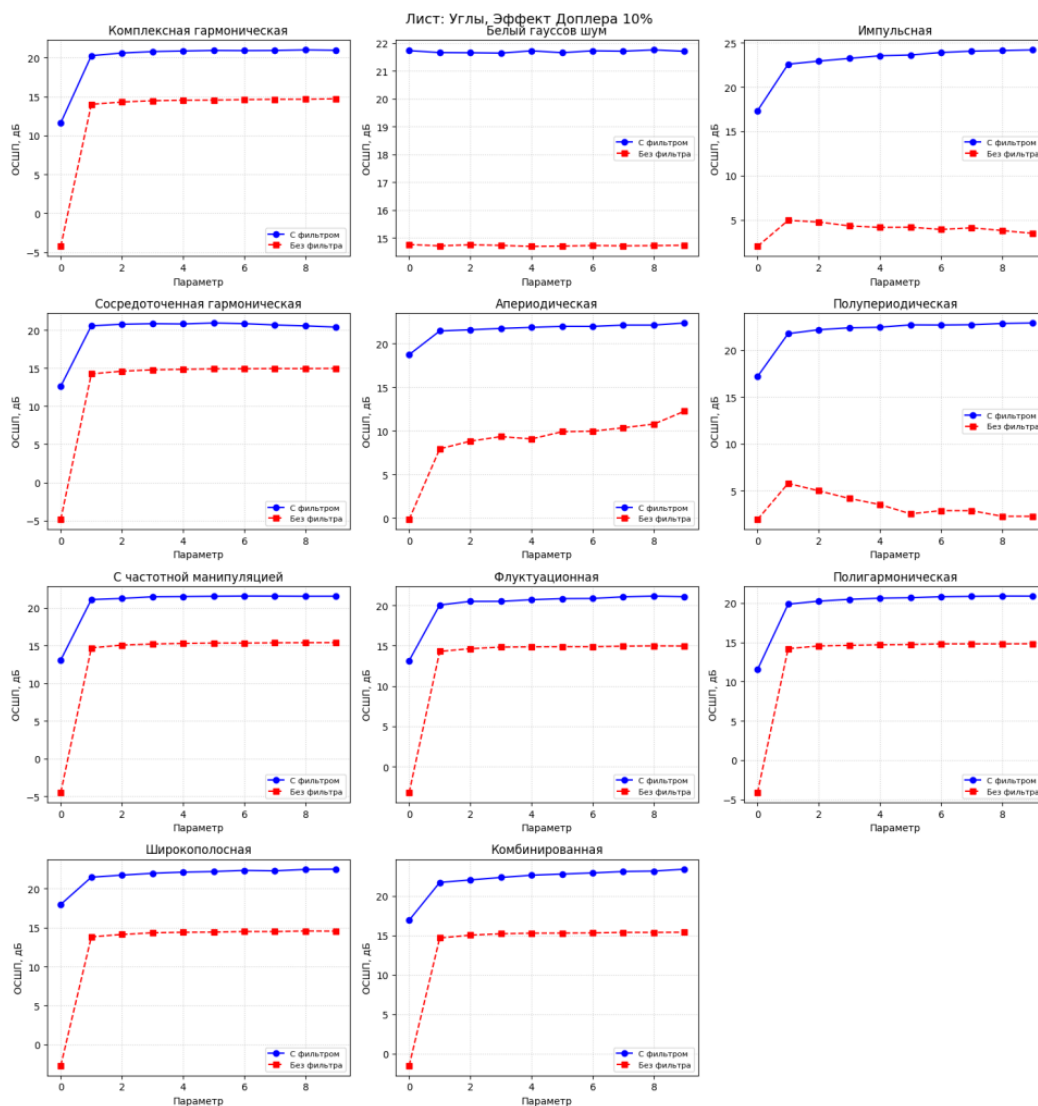


Рисунок 8 – Зависимость отношения ОСШП от разности углов прихода полезного сигнала и помехи при эффекте Доплера 10 %
 Figure 8 – Dependence of the SNIR on the difference between the angles of arrival of the useful signal and the interference signal at a Doppler effect of 10 %

Детальный анализ значений ОСШП для случая импульсной помехи (Рисунки 9 и 10) позволяет сделать следующие выводы:

- В нестационарных условиях, характеризующихся наличием эффекта Доплера, классический RLS уступает по эффективности гибридному алгоритму RLS с α - β предфильтром.

- Уменьшение углового рассогласования между направлениями прихода сигнала и помехи приводит к значительному падению ОСШП при использовании классического RLS (без α - β фильтрации), причем в нестационарных режимах это снижение выражено особенно сильно.

- Повышение мощности импульсной помехи существенно ухудшает эффективность работы классического RLS, не оснащенного предварительной α - β фильтрацией.

- Алгоритм RLS с α - β фильтром демонстрирует устойчивые показатели ОСШП во всех рассмотренных сценариях, независимо от уровня мощности помехи, углового рассогласования и наличия эффекта Доплера.

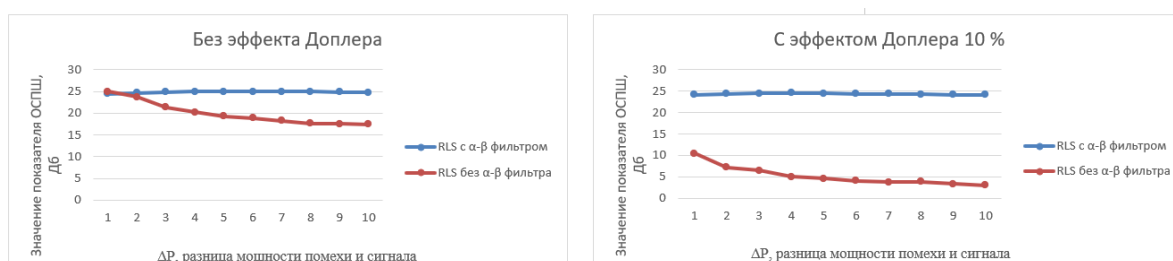


Рисунок 9 – График зависимости ОСШП от мощности импульсного помехового сигнала
Figure 9 – Graph of the dependence of the SNIR on the power of the pulsed interference signal

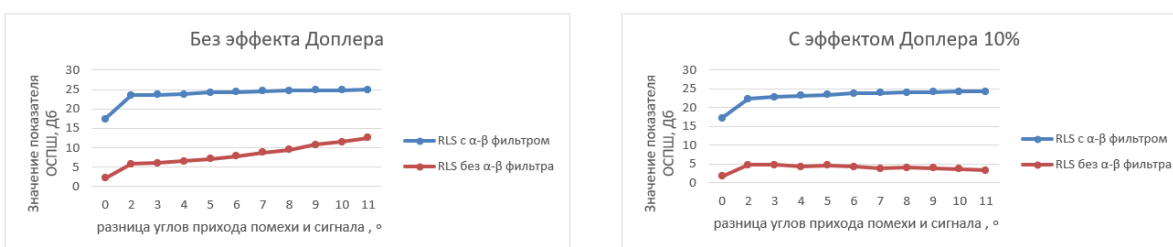


Рисунок 10 – График изменения ОСШП при изменении разницы углов прихода сигнала и импульсной помехи

Figure 10 – Graph of the change in the SNIR when changing the difference in the angles of arrival of the signal and impulse noise

Обсуждение

Разработанный гибридный алгоритм RLS с адаптивным α - β предфильтром (RLS+ α β) продемонстрировал значительное преимущество перед классическим RLS во всех нестационарных и импульсных режимах работы. В сценарии с импульсной помехой при отношении мощностей помехи и сигнала $\Delta P = 10$ выходное значение ОСШП для гибридного алгоритма составило 24,1 дБ как без эффекта Доплера, так и при его наличии (сдвиг 10%). В то же время классический RLS в аналогичных условиях обеспечил лишь 3,0–5,0 дБ без Доплера и менее 1 дБ при его наличии. В наиболее неблагоприятной обстановке (комбинированная помеха, совпадение углов прихода сигнала и помехи, наличие эффекта Доплера) выигрыш гибридного алгоритма достигает 20–25 дБ.

Введение сдвига несущей частоты на 10 % практически не влияет на работу гибридного алгоритма – падение ОСШП не превышает 0,5–1,0 дБ для всех типов помех. Классический RLS при этом теряет устойчивость даже для стационарных помех: ОСШП снижается на 10–15 дБ, а для импульсных и комбинированных помех падает до отрицательных значений. Это объясняется неспособностью RLS отслеживать фазовые флуктуации при фиксированной модели сигнала.

При полном совпадении направлений прихода полезного сигнала и помехи (угловое рассогласование равно нулю) классический RLS оказывается практически недееспособным: выходное ОСШП для всех типов помех, за исключением белого шума [11, 12], опускается до значений от –4 до –1 дБ. В этом же наихудшем случае гибридный алгоритм сохраняет ОСШП на уровне 11–18 дБ в зависимости от типа помехи (например, 17,5 дБ для импульсной помехи и 16,8 дБ для комбинированной). По мере увеличения углового рассогласования до 9° показатели ОСШП обоих алгоритмов повышаются, однако для нестационарных помех разрыв в эффективности сохраняется: классический RLS достигает лишь 11,5 дБ, тогда как гибридный – 24,8 дБ.

Для классического RLS наиболее опасной является комбинированная помеха (сочетание импульсной, апериодической и частотно-манипулированной составляющих), затем импульсная и полупериодическая. Для гибридного алгоритма все 11 типов помех подавляются практически одинаково эффективно – разброс ОСШП при фиксированной мощности составляет менее 2 дБ. Это свидетельствует об универсальности предложенного подхода.

Предложенный гибридный алгоритм RLS с адаптивным α - β предфильтром является эффективным и устойчивым решением для фильтрации сигналов в условиях широкого спектра дестабилизирующих факторов.

Главным недостатком предложенного подхода является повышение вычислительной сложности примерно на 50 % относительно классического RLS. Тем не менее для антенных решеток с числом элементов 8–16 это увеличение не является существенным, так как требует лишь около 80 дополнительных арифметических операций на один отсчет. Перспективы дальнейших исследований включают: подбор оптимальных параметров α - β фильтра применительно к конкретным типам помех; адаптацию алгоритма для более крупных решеток (32, 64 элемента) с применением методов понижения размерности; аппаратную реализацию на ПЛИС для обеспечения работы в реальном масштабе времени; экспериментальную проверку на натуральных образцах антенных решеток.

Заключение

Результаты моделирования показывают, что гибридный алгоритм RLS+ $\alpha\beta$ можно рекомендовать к применению в системах с антенными решетками, работающих в условиях сложной, нестационарной помеховой обстановки: на подвижных объектах (БПЛА, корабли, автомобили) [13, 14], в системах радиолокации и радионавигации при наличии преднамеренных и взаимных помех, а также в устройствах радиоэлектронной борьбы. Алгоритм сохраняет высокое и стабильное ОСШП (>20 дБ) во всем исследованном диапазоне мощностей, углов и при эффекте Доплера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Агейчик Н.О., Глушанков Е.И. Сравнительный анализ адаптивных алгоритмов фильтрации в антенных решетках при воздействии разнородных помех. В сборнике: *66-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2026), 17–20 февраля 2026 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: СПбГУТ; 2026. С. 390–395.

- Ageichik N.O., Glushankov E.I. Comparative analysis of adaptive filtering algorithms in antenna arrays under the influence of heterogeneous interferences. In: *66th Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers and Postgraduates (NTC Faculty 2026), 17–20 February 2026, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg: SPbGUT; 2026. P. 390–395. (In Russ.).
2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. *Адаптивные антенные решетки: введение в теорию*. Москва: Радио и связь; 1986. 448 с.
Monzingo R.A., Miller Th.W. *Introduction to adaptive arrays*. Moscow: Radio i svyaz; 1986. 448 p. (In Russ.).
 3. Джиган В.И. *Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы*. Москва: Техносфера; 2013. 528 с.
 4. Ратынский М.В. *Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках*. Москва: Радио и связь; 2003. 199 с.
 5. Naykin S.S. *Adaptive Filter Theory*. Boston: Pearson; 2014. 912 p.
 6. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive Signal Processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1985. 474 p.
 7. Солонина А.И. *Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2018. 560 с.
 8. Кловский Д.Д., Конторович В.Я., Широков С.М. *Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений*. Москва: Радио и связь; 1984. 248 с.
 9. Никитина А.А., Грицык П.А. Сопровождение маневрирующей цели. *Антенны*. 2013;(1):25–29.
Nikitina A.A., Gritsyk P.A. Tracking of the maneuvering target. *Antennas*. 2013;(1):25–29. (In Russ.).
 10. Primak S., Kontorovich V., Lyandres V. *Stochastic Methods and Their Applications to Communications: Stochastic Differential Equations Approach*. Chichester: John Wiley & Sons; 2005. 496 p. <https://doi.org/10.1002/0470021187>
 11. Van Trees H.L. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. New York: John Wiley & Sons; 2002. 1472 p.
 12. Ярлыков М.С. *Статистическая теория радионавигации*. Москва: Радио и связь; 1985. 344 с.
 13. Бакитько Р.В., Дворкин В.В., Карутин С.Н. и др. *ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития*. Москва: Радиотехника; 2020. 1072 с.
 14. Глушанков Е.И., Рылов Е.А., Хренов А.А. Потенциальная эффективность систем морской радиосвязи с пространственной обработкой сигналов. В сборнике: *Электронные средства и системы управления: Материалы XVII международной научно-практической конференции, 17–19 ноября 2021 года, Томск, Россия*. Томск: ТУСУР; 2021. С. 269–270.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Глушанков Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: glushankov57@gmail.com

ORCID: [0000-0003-4148-3208](https://orcid.org/0000-0003-4148-3208)

Evgeny I. Glushankov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Radio Engineering, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, the Russian Federation.

Агейчик Никита Олегович, аспирант кафедры радиотехники, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: onaik2000@gmail.com

Nikita O. Ageychik, Postgraduate at the Department of Radio Engineering, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 19.04.2026; одобрена после рецензирования 25.06.2026; принята к публикации 06.07.2026.

The article was submitted 19.04.2026; approved after reviewing 25.06.2026; accepted for publication 06.07.2026.