

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛЬФА-БЕТА И RLS ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФИЛЬТРОВ В УСЛОВИЯХ ДОПЛЕРОВСКИХ ИСКАЖЕНИЙ И ПОМЕХ

**Агейчик Никита Олегович**

аспирант кафедры радиотехники ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича».

**Глушанков Евгений Иванович**

доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича».

Адрес: 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1.

E-mail для связи: [onaik2000@gmail.com](mailto:onaik2000@gmail.com)

**Аннотация:** В статье проведено исследование влияния эффекта Доплера и динамических помех на отношение сигнал/шум+помеха (ОСПШ) в адаптивных антенных системах. Рассмотрены ключевые факторы, ухудшающие ОСПШ: скорость движения объектов, мощность помех и параметры адаптивных алгоритмов фильтрации. Проанализирована эффективность пространственных  $\alpha$ - $\beta$  фильтра и RLS-алгоритма (Recursive Least Squares) в условиях доплеровского сдвига частоты. Для  $\alpha$ - $\beta$  фильтра определены оптимальные параметры. Результаты включают исследование зависимости ОСПШ на выходе пространственного фильтра от скорости объекта, мощности помех и коэффициентов  $\alpha$ - $\beta$  фильтра. Полученные результаты могут быть полезны при разработке гибридных систем связи и радиолокации, работающих в условиях нестационарных помех и высоких скоростей объектов.

**Ключевые слова:** адаптивные фильтры,  $\alpha$ - $\beta$  фильтр, RLS-алгоритм, SNR (отношение сигнал/шум), эффект Доплера, динамические помехи, радиолокационные системы, телекоммуникационные системы, математическое моделирование.

## Введение

Беспилотные авиационные системы (БАС), самолёты, низколетящие космические аппараты требуют высокой помехоустойчивости антенных систем для обеспечения надёжной связи и навигации [1, 2]. Динамические условия эксплуатации, такие как движение этих объектов, приводят к возникновению эффекта Доплера и изменению угла направления сигнала, что ухудшает качество принимаемых сигналов. Цель статьи — исследование адаптивных фильтров для минимизации помех и оптимизации сигналов в антенных решётках подвижных объектов.

## 1. Структура пространственного фильтра и вычисление ОСПШ

Основная задача адаптивного алгоритма в адаптивных антенных решётках (ААР) — рассчитать комплексные весовые коэффициенты (ВБК)  $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ , которые при применении к сигналам элементов решётки  $x(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_N(n)]^T$  формируют выходной сигнал  $y(n) = w^H x(n)$ , где  $H$  — оператор эрмитова сопряжения (транспонирование с комплексным сопряжением) и определяют адаптивную диаграмму направленности ААР (рис. 1).

Цель такой обработки — настроить адаптивную диаграмму направленности так, чтобы максимум главного лепестка был направлен на полезный сигнал, а нули — на источники помех.

ОСПШ на выходе адаптивного процессора является ключевой метрикой качества его работы и напрямую вычисляется через ВБК:

$$\text{ОСПШ} = \frac{P_{\text{сигнала}}}{(P_{\text{шум}} + P_{\text{помеха}})} = \frac{(|w^H \cdot a(\theta_s)|^2 \cdot \sigma_s^2)}{(w^H \cdot R_{ni} \cdot w)}, \quad (1)$$

где  $a(\theta_s)$  — вектор направляющей АР в направле-

нии полезного сигнала;  $\sigma_s^2$  — мощность полезного сигнала;  $R_{ni} = E\{[n(n) + i(n)] \cdot [n(n) + i(n)]^H\}$  — корреляционная матрица помех (шума  $n$  и помех от других источников сигналов  $i$ );  $w$  — вектор весовых коэффициентов.

Максимизация ОСПШ является целью адаптивного алгоритма.

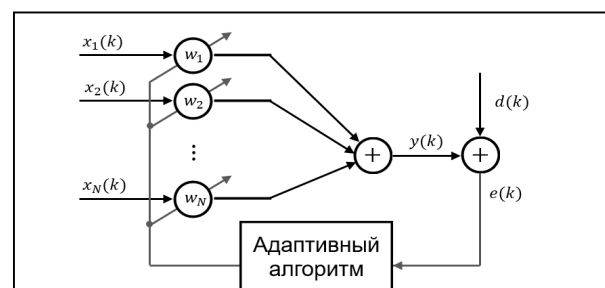
## 2. Описание алгоритмов пространственной фильтрации

2.1. Алгоритм RLS применяется для прямого итеративного расчёта оптимальных (по методу наименьших квадратов) ВБК, минимизирующих мощность помех на выходе ААР [3, 4].

Алгоритм состоит в вычислении ВБК за несколько итераций, при этом на каждой шаге  $n$ -й итерации вычисляются:

Выходной сигнал:  $y(n) = w^H x(n-1) \cdot x_n(n)$ .

Ошибка фильтрации:  $e(n) = d(n) - y(n)$  ( $d(n)$  —



**Рис. 1.** Структурная схема ААР, где  $x_N$  — входной сигнал от  $N$ -ого компонента антенной решётки;  $y(k)$  — выходной сигнал;  $e(k)$  — сигнал ошибки;  $d(k)$  — опорный сигнал;  $w_n$  — весовой коэффициент для  $N$  для элемента решётки.

опорный или желаемый сигнал).

Калмановский коэффициент усиления:

$$K(n) = [P(n-1) \cdot x(n)] / [\lambda + x^H(n) \cdot P(n-1) \cdot x(n)]. \quad (2)$$

Корреляционная матрица ошибок фильтрации:

$$P(n) = \lambda^{-1} [P(n-1) - K(n) \cdot x^H(n) \cdot P(n-1)]. \quad (3)$$

Весовые коэффициенты:

$$w(n) = w(n-1) + K(n) \cdot e \cdot (n). \quad (4)$$

Алгоритм RLS минимизирует взвешенную сумму квадратов ошибок с экспоненциальным забыванием старых данных [5].

RLS-алгоритм, минимизируя выходную мощность помех ( $w^H \cdot R_{ni} \cdot w$ ), фактически максимизирует ОСПШ (1), так как ОСПШ имеет прямую связь с весовыми коэффициентами. При формировании диаграммы направленности главный лепесток направляется на источник сигнала, подавляя помехи [6].

2.2.  $\alpha$ - $\beta$  пространственный фильтр используется не для прямого расчёта ВВК, а для прогнозирования и сглаживания параметров сигнала (например, угла прихода (УП) или доплеровской частоты), которые затем используются для косвенного расчёта или коррекции ВВК [7].

Фильтр включает следующие операции:

Прогноз:

$$\begin{aligned} X(n|n-1) &= X(n-1) + T \cdot X(n-1), \\ V(n|n-1) &= V(n-1). \end{aligned} \quad (5)$$

Коррекция:

$$\begin{aligned} X(n) &= X(n|n-1) + \alpha \cdot (Z(n) - X(n|n-1)), \\ V(n) &= V(n-1) + (\beta / T) \cdot (Z(n) - X(n|n-1)), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $Z(n)$  — измеренное значение параметра в момент времени  $n$ ;  $T$  — интервал времени между измерениями;  $\alpha$  — коэффициент сглаживания положения (определяет степень доверия к новым измерениям);  $X(n|n-1)$  — прогнозируемое положение на шаге  $k$ ;  $V(n|n-1)$  — прогнозируемая скорость на шаге  $k$ ;  $X(n-1)$  — оценка положения на предыдущем шаге;  $V(n-1)$  — оценка скорости на предыдущем шаге;  $\beta$  — коэффициент сглаживания скорости (определяет степень адаптации к изменениям скорости);  $\alpha$  — коэффициент сглаживания положения (определяет степень доверия к новым измерениям).

Для реализации пространственного фильтра в ААР предложена гибридная схема, сочетающая достоинства обоих фильтров: прогнозирующую способность  $\alpha$ - $\beta$  и высокую скорость адаптации RLS к помехам.

Гибридный алгоритм предназначен для повышения эффективности адаптивной пространственной обработки сигналов в антенных решётках в условиях нестационарных помех. Основная цель — обеспечение высокой скорости адаптации и устойчивой работы системы при сохранении точности оценки весовых коэффициентов.

Алгоритм сочетает метод рекуррентных наименьших квадратов (RLS) для расчёта опти-

мальных весовых коэффициентов и  $\alpha$ - $\beta$  фильтр для предварительной обработки входных сигналов с элементов антенной решётки.

Гибридный алгоритм включает следующие операции (рис. 2):

**1 этап. Входные данные:** вектор сигналов с выходов элементов антенной решётки:  $X(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_m(k)]$ , опорный сигнал:  $d(k)$ .

**2 этап. Процедура  $\alpha$ - $\beta$  фильтрации входных сигналов:**

Для каждого элемента антенной решётки  $m = 1, 2, \dots, m$ :

Прогнозирование:

$$\begin{aligned} x_{p,m}(k) &= x_{e,m}(k-1) + T_s \cdot v_{e,m}(k-1), \\ v_{p,m}(k) &= v_{e,m}(k-1); \end{aligned} \quad (7)$$

Коррекция:

$$\begin{aligned} x_{e,m}(k) &= x_{p,m}(k) + \alpha(x_m(k) - x_{p,m}(k)), \\ v_{e,m}(k) &= v_{p,m}(k) + \frac{\beta}{T_s}(x_m(k) - x_{p,m}(k)); \end{aligned} \quad (8)$$

Формирование отфильтрованных сигналов:

$$X_f(k) = [x_{e,1}(k), x_{e,2}(k), \dots, x_{e,M}(k)]^T. \quad (9)$$

**3 этап. Процедура RLS-обработки:**

Ошибка оценки:

Коэффициент усиления Калмана [3, 8, 9]:

$$K(k) = \frac{P(k-1)X_f(k)}{\lambda + X_f^H(k)P(k-1)X_f(k)}. \quad (10)$$

Обновление матрицы  $P(k)$ :

$$P(k) = \lambda^{-1} [P(k-1) - K(k)X_f^H(k)P(k-1)]. \quad (11)$$

Обновление весового вектора:

$$W(k) = W(k-1) + K(k)\varepsilon^*(k). \quad (12)$$

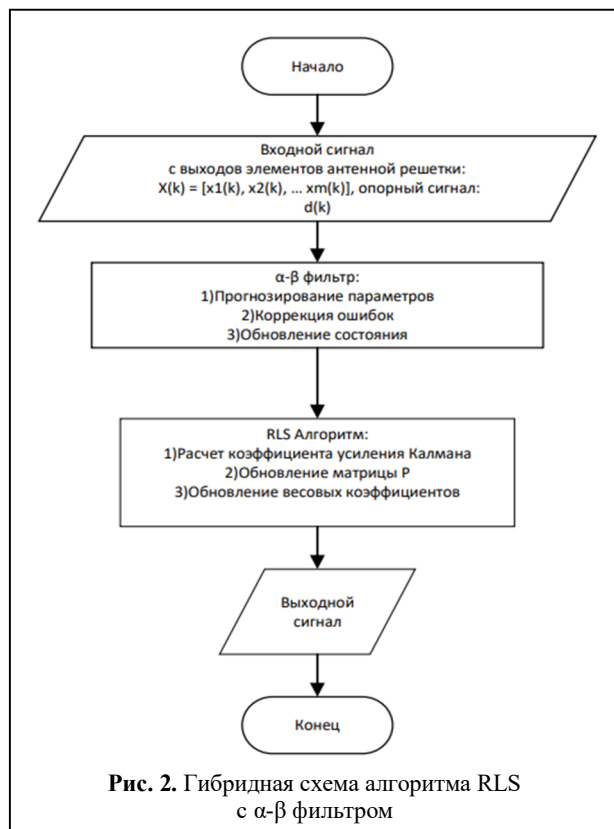


Рис. 2. Гибридная схема алгоритма RLS с  $\alpha$ - $\beta$  фильтром

**4 этап. Формирование выходного сигнала:**

$$y(k) = W^H(k) \cdot X_f(k). \quad (13)$$

Особенности реализации:

- $\alpha$ - $\beta$  фильтр применяется к каждому элементу антенной решётки независимо;
- отфильтрованные сигналы  $X_f(k)$  используются в RLS-алгоритме вместо исходных сигналов;
- RLS-алгоритм работает с предварительно обработанными сигналами, что улучшает его сходимость.

Преимущества:

- улучшенная сходимость алгоритма за счёт предварительной фильтрации входных сигналов;
- сглаживание кратковременных помех и выбросов в сигнале;
- повышенная устойчивость к нестационарным помехам.

**3. Описание модели в MATLAB**

В качестве программной среды для исследования выбран MATLAB [10]. Разработанный MATLAB код представляет собой комплексную систему моделирования и анализа эффективности адаптивных фильтров в условиях воздействия доплеровских искажений и помех. Код состоит из нескольких основных модулей (рис. 3):

- модуль генерации сигналов и помех;
- модуль доплеровских искажений;
- модули адаптивной фильтрации;
- альфа-бета фильтр;
- RLS фильтр;
- вычисление весовых коэффициентов для антенной решётки;
- модуль анализа и визуализации результатов;
- функции расчёта метрик.

Ключевые особенности реализации:

- модульная архитектура: код организован в виде набора взаимосвязанных функций, что обеспечивает гибкость и возможность повторного использования;
- параметризация исследований: все ключевые параметры (доплеровские смещения, мощности сигналов и помех, скорости движения) легко настраиваются, что позволяет проводить комплексные исследования;
- автоматическая оптимизация параметров: для альфа-бета фильтра реализован механизм автоматического подбора оптимальных параметров  $\alpha$  и  $\beta$  для каждого набора условий;
- комплексная обработка сигналов: учтена комплексная природа сигналов (I и Q компоненты), что важно для корректного моделирования радиосигналов;
- многовариантный анализ: код позволяет одновременно анализировать влияние множества факторов на эффективность фильтрации;
- визуализация результатов: реализованы

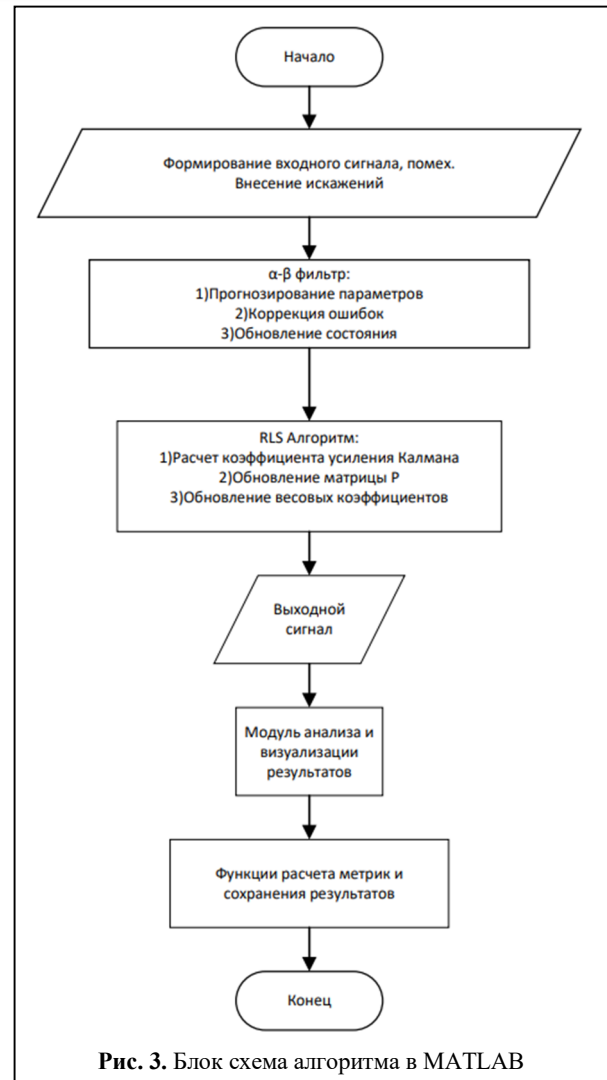


Рис. 3. Блок-схема алгоритма в MATLAB

функции для построения комплексных графиков, отображающих зависимости между различными параметрами и эффективностью фильтрации.

Код позволяет проводить следующие типы исследований:

- влияние движения источников: анализируется как скорость движения источников сигналов и помех влияет на эффективность фильтрации.
- зависимость от доплеровских искажений: исследуется как различные доплеровские смещения влияют на оптимальные параметры фильтров и их эффективность.
- влияние мощности сигналов и помех: анализируется как соотношение мощностей сигнала и помех влияет на эффективность фильтрации.
- сравнительный анализ фильтров: проводится прямое сравнение эффективности альфа-бета и RLS фильтров в идентичных условиях.
- корреляционный анализ: исследуется взаимосвязь между параметрами фильтров и характеристиками сигнальной среды.

**4. Результаты моделирования и выводы.**

В результате исследований получено несколько

семейств графиков:

— зависимость отношения сигнал/шум+помеха (ОСПШ) алгоритма RLS при раз-  
ной мощности сигнала;

— зависимость отношения сигнал/шум+помеха (ОСПШ) алгоритма RLS при раз-  
ной мощности помех;

— зависимость отношения сигнал/шум+помеха (ОСПШ) алгоритма RLS при раз-  
ных динамических параметрах системы (эффект  
Доплера);

— зависимость отношения сигнал/шум+помеха (ОСПШ) алгоритма RLS с  $\alpha$ - $\beta$ -  
фильтром при разных параметрах  $\alpha$ - $\beta$ ;

— зависимость отношения сигнал/шум+помеха (ОСПШ) алгоритма RLS с  $\alpha$ - $\beta$ -  
фильтром при различных динамических параметрах  
системы (эффект Доплера).

Результаты моделирования, представленные на  
рисунках 4–10, визуализированы в виде диаграмм  
«ящик с усами» (box plot) [11]. Данный формат вы-  
бран для наглядного отображения ключевых стати-  
стических характеристик полученных данных по  
отношению сигнал/шум+помеха (ОСПШ) в различ-  
ных условиях.

Как интерпретировать «ящик с усами» на гра-  
фиках:

центральная линия внутри ящика — это медиана  
(50-й процентиль), показывающая центральное зна-  
чение ОСПШ для данного набора параметров;

границы ящика (25-й и 75-й процентиля) — по-  
казывают интерквартильный размах (IQR), в преде-  
лах которого сосредоточено 50% всех данных. Чем  
уже ящик, тем стабильнее и предсказуемее работа  
алгоритма;

«усы» — линии, выходящие из ящика, демон-  
стрируют диапазон типичных значений данных за

пределами IQR (обычно до 1.5·IQR). Длинные  
«усы» указывают на большой разброс показаний  
ОСПШ;

выбросы — точки за пределами «усов» являют-  
ся аномальными значениями, которые сильно от-  
клоняются от большинства результатов. Они часто  
возникают в условиях резких помех или нештатных  
ситуаций.

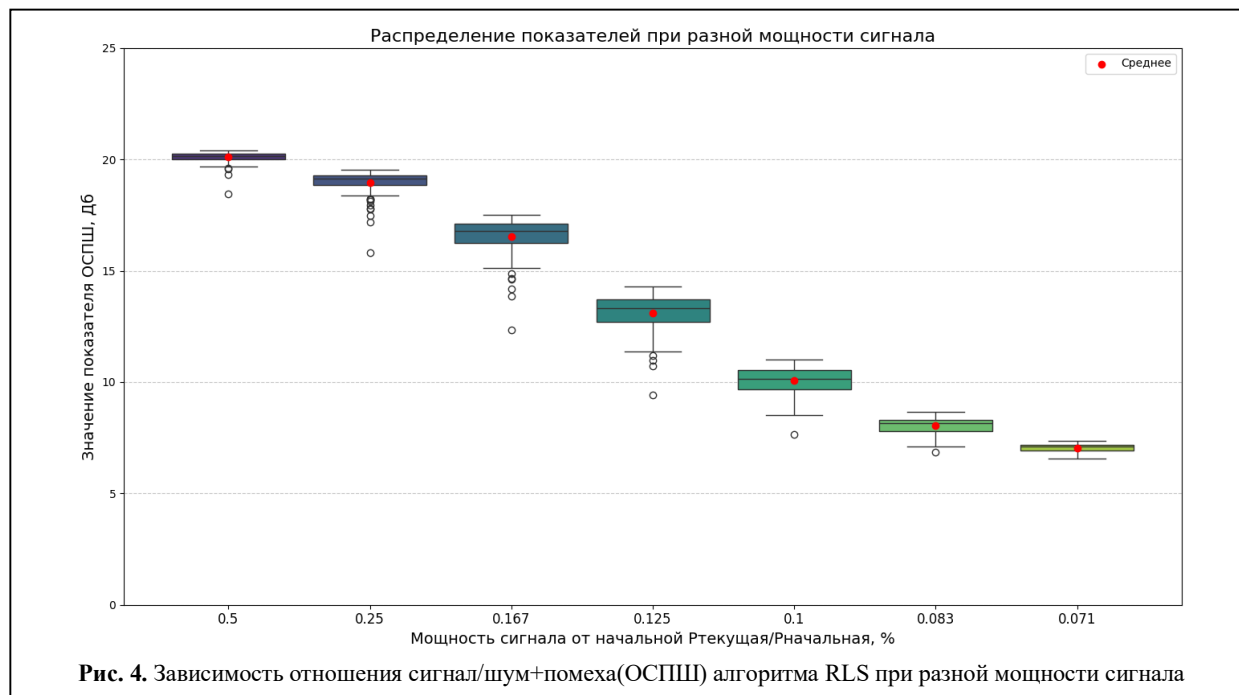
Использование данной формы графиков позво-  
ляет не просто сравнить средние значения, но и  
оценить устойчивость и стабильность работы филь-  
тров: алгоритм с более высоким и компактным  
«ящиком» является предпочтительным, так как он  
обеспечивает стабильно высокое и предсказуемое  
качество сигнала.

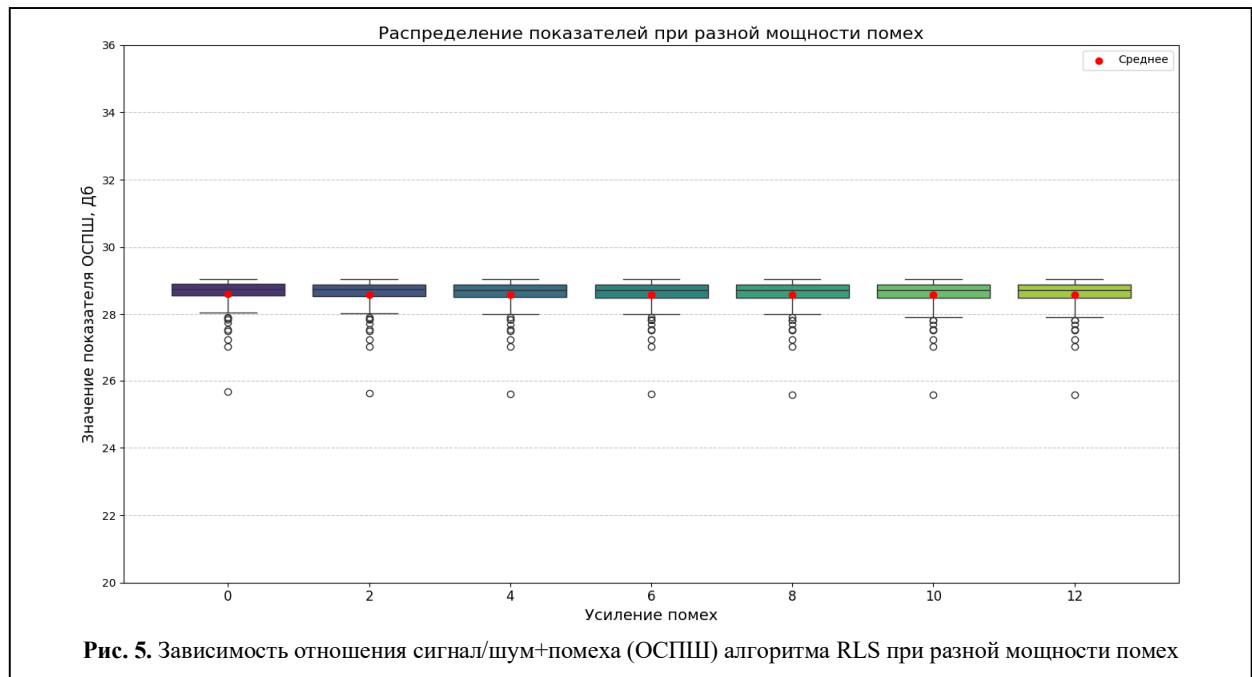
Каждый ящик составлен из 100 случайных из-  
мерений, в которых случайны начальные фазы, уг-  
лы относительно нормали антенной решётки помех  
и сигнала.

Из рис. 4 можно сделать вывод, что эффектив-  
ность RLS-фильтра напрямую зависит от мощности  
полезного сигнала. Так, с увеличением мощности  
сигнала отношение сигнал/шум+помеха (ОСПШ)  
значительно улучшается, что демонстрирует спо-  
собность RLS-алгоритма эффективно использовать  
усиление сигнала для подавления шумов и помех.

Из рис. 5 видно, что RLS-фильтр демонстрирует  
высокую устойчивость к помехам. Несмотря на  
ожидаемое снижение ОСПШ, рост мощности помех  
не приводит к уменьшению ОСПШ.

Из рис. 6 видно, что эффект Доплера (скорость  
движения объекта) является критическим факто-  
ром, ухудшающим качество фильтрации. С увели-  
чением скорости (динамических параметров систе-  
мы) наблюдается значительное падение ОСПШ.  
Однако RLS-алгоритм, особенно с правильно подо-  
бранным коэффициентом забывания ( $\lambda$ ), способен





частично компенсировать эти искажения и расфазировку сигнала, сохраняя работоспособность системы на высоких скоростях (свыше 50 м/с).

На рис. 7 представлены шесть различных циклов измерений при различных параметрах  $\alpha$ - $\beta$  фильтра.

Параметры фильтра, соответствующие каждому случаю: 1:  $\alpha = 0,1$ ,  $\beta = 0,01$ ; 2:  $\alpha = 0,2$ ,  $\beta = 0,02$ ; 3:  $\alpha = 0,3$ ,  $\beta = 0,03$ ; 4:  $\alpha = 0,4$ ,  $\beta = 0,04$ ; 5:  $\alpha = 0,6$ ,  $\beta = 0,06$ ; 6:  $\alpha = 0,7$ ,  $\beta = 0,07$ ; 7:  $\alpha = 0,9$ ,  $\beta = 0,09$ .

На рис. 8 представлены шесть различных циклов измерений при различных параметрах  $\alpha$ - $\beta$  фильтра.

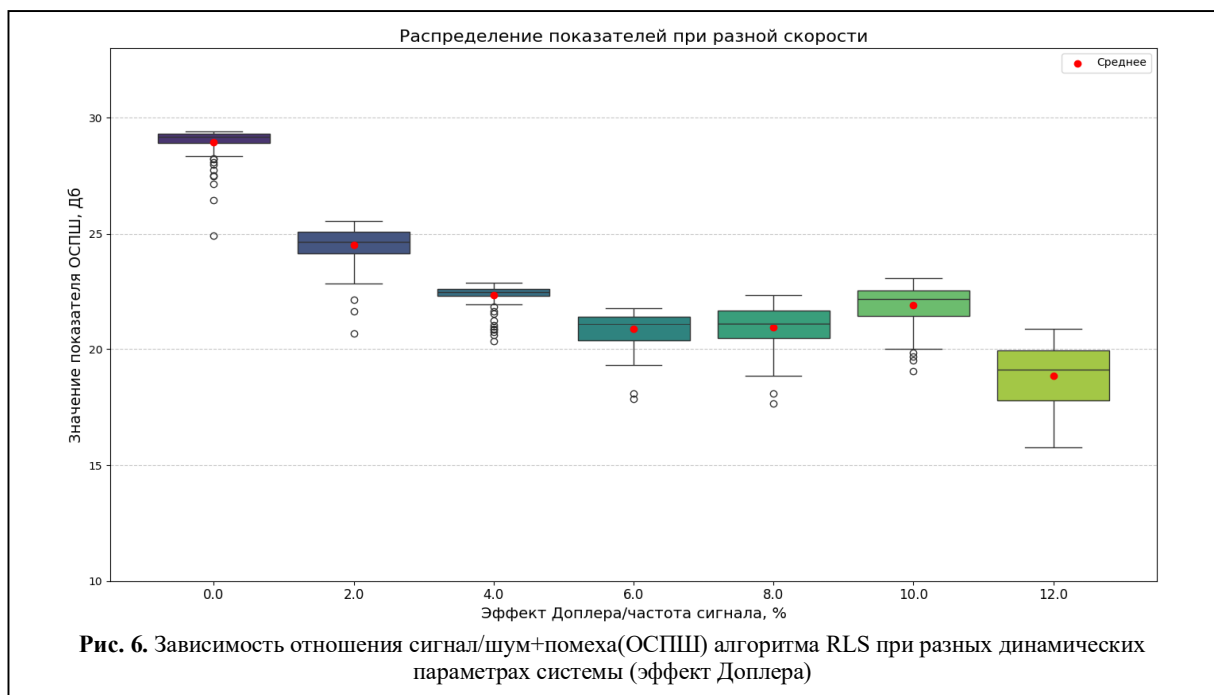
Параметры фильтра, соответствующие каждому случаю: 1:  $\alpha = 0,11$ ,  $\beta = 0,011$ ; 2:  $\alpha = 0,12$ ,  $\beta = 0,012$ ; 3:  $\alpha = 0,13$ ,  $\beta = 0,013$ ; 4:  $\alpha = 0,14$ ,  $\beta = 0,014$ ; 5:  $\alpha = 0,16$ ,

$\beta = 0,016$ ; 6:  $\alpha = 0,17$ ,  $\beta = 0,017$ ; 7:  $\alpha = 0,18$ ,  $\beta = 0,018$ .

Рис. 8 показывает, что эффективность совместного использования фильтров сильно зависит от правильного выбора параметров  $\alpha$  и  $\beta$ .

На рис. 9 приведён график СКО при различных параметрах  $\alpha$ - $\beta$  фильтра в статичном состоянии. Благодаря ему был сужена область поиска оптимальных параметров  $\alpha$ - $\beta$  фильтра для компенсации эффекта Доплера.

Наилучшие результаты (наивысшее и наиболее стабильное ОСПШ) достигаются при определенной комбинации параметров. Наилучшие показатели ОСПШ были достигнуты при оптимальных параметрах для  $\alpha$ - $\beta$  фильтра. В исследуемых условиях таковыми являются  $\alpha = 0,028$ ,  $\beta = 0,028$  (или значе-



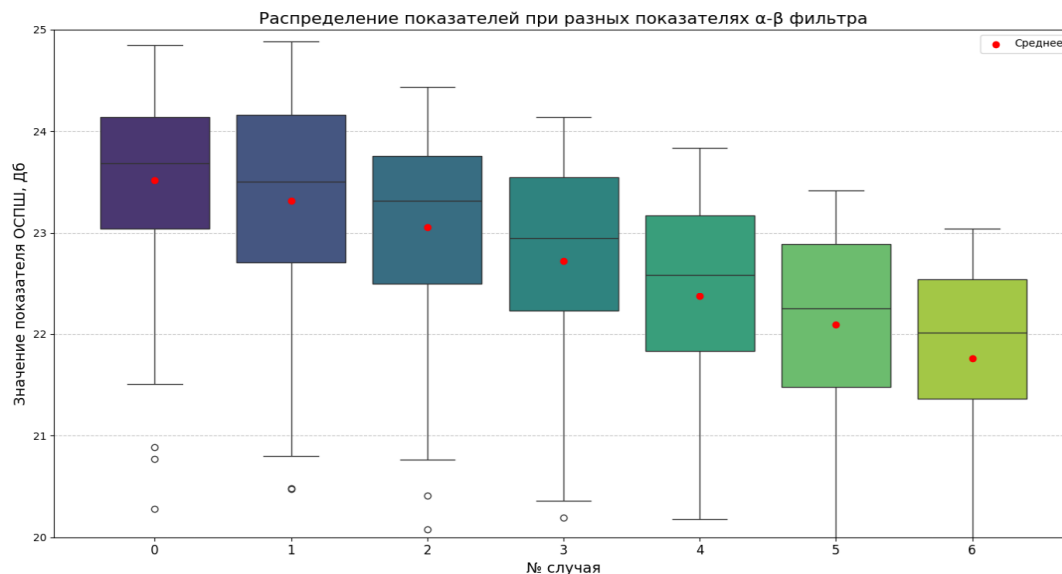


Рис. 7. Зависимость отношения сигнал/шум+помеха(ОСПШ) алгоритма RLS с  $\alpha$ - $\beta$  фильтром при разных параметрах  $\alpha$ - $\beta$

ния, близкие к ним, в зависимости от конкретного теста), обеспечивающие минимальную ошибку оценки. Данные параметры фильтра уменьшают влияние эффекта Доплера на ОСПШ.

Комбинация RLS с оптимизированным  $\alpha$ - $\beta$  фильтром (рис. 10) позволяет значительно повысить устойчивость системы к динамическим помехам и доплеровским искажениям по сравнению с использованием только алгоритма RLS.

Рис. 11 демонстрирует, что среднее увеличение значения ОСПШ — 4,4 дБ. Максимальное увеличение значение ОСПШ — 9,2 дБ при эффекте Доплера в 20% от частоты сигнала, что говорит высокой устойчивости к большим скоростям гибридного фильтра.

При правильном подборе параметров гибри-

дный алгоритм демонстрирует намного более плавное и менее значительное падение ОСПШ с ростом скорости, что критически важно для высокодинамичных систем (дроны, автономный транспорт).

## 5. Заключение

Проведённое исследование позволило оценить эффективность комбинации RLS алгоритма с оптимизированным  $\alpha$ - $\beta$  фильтром в условиях воздействия доплеровских искажений и динамических помех, характерных для современных радиолокационных и телекоммуникационных систем, таких как беспилотные летательные аппараты и системы автономного транспорта [12, 13].

На основе комплексного математического моделирования, реализованного в среде MATLAB, уста-

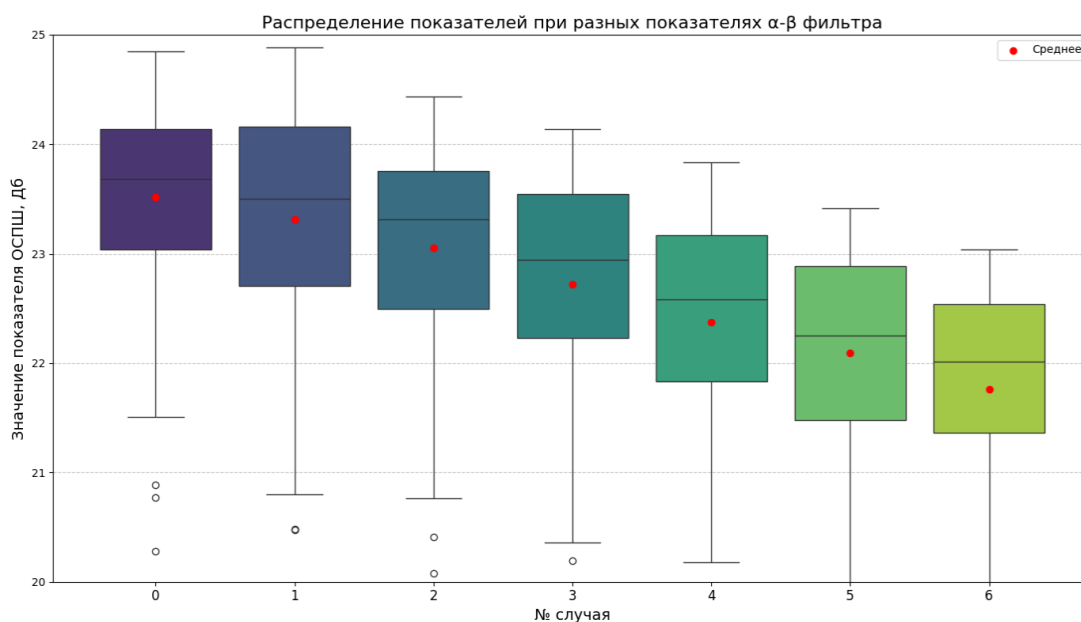


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал/шум+помеха(ОСПШ) алгоритма RLS с  $\alpha$ - $\beta$  фильтром при разных параметрах  $\alpha$ - $\beta$



новлено следующее:

1. Для  $\alpha$ - $\beta$  фильтра методом многовариантного моделирования определены оптимальные параметры ( $\alpha=0,028$ ,  $\beta=0,028$ ), обеспечивающие минимальную ошибку оценки траектории и максимально возможное для данного алгоритма отношение ОСПШ в условиях умеренных помех и скоростей. Низкая вычислительная сложность ( $O(1)$ ) делает его практичным решением для ресурсоограниченных устройств Интернета вещей (IoT) и систем, где допустимы незначительные задержки в обмене на энергоэффективность.

2. Наибольшую эффективность в условиях комплексного воздействия (высокая скорость, мощные помехи, доплеровский сдвиг) показал гибридный подход, сочетающий RLS-алгоритм с предварительной обработкой данных оптимизированным  $\alpha$ - $\beta$  фильтром. Такая комбинация позволяет увеличить качество фильтрации.

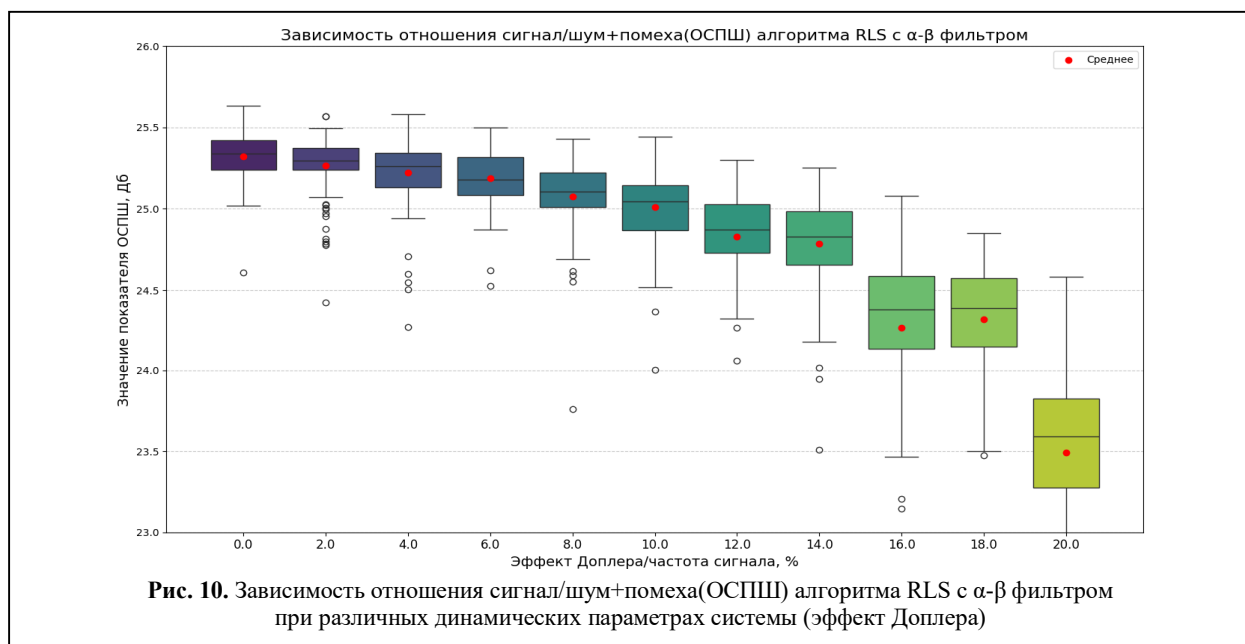
3. Результаты наглядно подтвердили не только средние значения показателей эффективности фильтрации, но и стабильность работы исследуемых алгоритмов. RLS-алгоритм показал более ком-

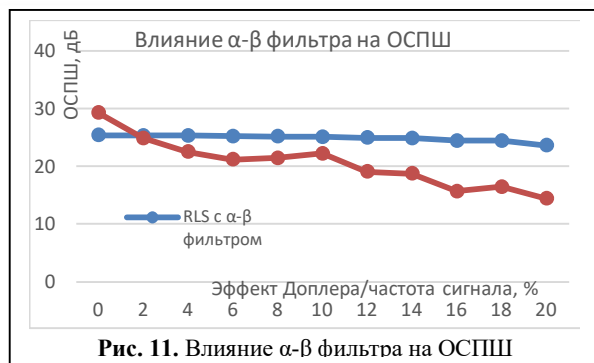
пактный разброс значений ОСПШ, что указывает на его надёжность и предсказуемость работы в изменяющихся условиях.

Таким образом, исследование предоставляет разработчикам систем связи и радиолокации основу для выбора алгоритмов фильтрации, позволяющую оптимизировать производительность системы в соответствии с конкретными требованиями по точности, вычислительной сложности и устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов.

#### Литература

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Пер. с англ. под ред. В.А. Лексащенко. М.: Радио и связь, 1986. 446 с.
2. Журавлев А.К., Родимов А.П., Глушанков Е.И. и др. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991. 544 с.
3. Афанасьев Н.А., Глушанков Е.И., Кирик Д.И., Рылов Е.А. Сравнение винеровского и калмановского решения в задачах адаптации антенных решеток // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. №3. С. 33–39.
4. Адаптивные антенные решетки. Часть 2 / Под ред. В.А. Григорьева. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 118 с.
5. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 521 с.
6. Вечтомов В.А., Джиган В.И. Исследование характеристик алгоритмов пространственной фильтрации активных помех на основе адаптивных антенных решеток. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 88 с.
7. Kaba A. Unscented Kalman Filter Based Attitude Estimation of a Quadrotor // Journal of Aeronautics and Space Technologies. 2021. Vol. 14, No. 1. Pp. 79–88.
8. Boyko I.A., Glushankov E.I., Ryabov A.V., et al. Algorithms for Multiple Signals Adaptive Processing in Radio Engineering Systems Antenna Arrays // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). IEEE, 2021. Pp. 1–6.
9. Бойко И.А., Глушанков Е.И., Рылов Е.А. Моделирование градиентного алгоритма адаптации антенной решетки в среде MATLAB // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 1. С. 55–61.





10. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 560 с.

11. Сальникова К.В. Анализ массива данных с помощью инструмента визуализации «ящик с усами» // Universum: экономика и юриспруденция. 2021. № 12(87). С. 1–7.

12. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014. 912 p.

13. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive Signal Processing. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985. 474 p. .

Поступила 12 ноября 2025 г.

English

## STUDY OF THE EFFICIENCY OF ALPHA-BETA AND RLS SPATIAL FILTERS UNDER DOPPLER DISTORTIONS AND INTERFERENCE

**Nikita Olegovich Ageychik** — Postgraduate Student, Department of Radio Engineering, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

**Evgeny Ivanovich Glushankov** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Radio Engineering, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

Address: 193232, Russian Federation, Saint Petersburg, Bolshhevikov ave., 22/1.

E-mail: [onaik2000@gmail.com](mailto:onaik2000@gmail.com)

**Abstract:** The article studies the influence of the Doppler effect and dynamic interference on the signal-to-noise+interference ratio (SNR) in adaptive antenna systems. The key factors that worsen the SNR are considered: the speed of objects, the power of interference and the parameters of adaptive filtering algorithms. The efficiency of the spatial  $\alpha$ - $\beta$  filter and the RLS (Recursive Least Squares) algorithm under Doppler frequency shift conditions is analyzed. The optimal parameters for the  $\alpha$ - $\beta$  filter are determined. The results include a study of the dependence of the spatial filter output SINR on the object speed, interference power, and  $\alpha$ - $\beta$  filter coefficients. The results obtained can be useful in developing hybrid communication and radar systems operating in conditions of non-stationary interference and high object speeds. Adaptive filters,  $\alpha$ - $\beta$  filter, RLS algorithm, SNR (signal-to-noise ratio), Doppler effect, dynamic interference, radar systems, telecommunication systems, mathematical modeling, forgetting coefficient  $\lambda$ , noise immunity, filtering algorithms, Doppler frequency shift, signal skew, IoT (Internet of Things), unmanned technologies, communication systems, autonomous transport Unmanned aircraft systems (UAS), aircraft, low-flying spacecraft require high noise immunity of antenna systems to ensure reliable communication and navigation [1,2]. Dynamic operating conditions, such as the movement of these objects, lead to the Doppler effect and a change in the signal direction angle, which degrades the quality of received signals. The purpose of this paper is to study adaptive filters to minimize interference and optimize signals in antenna arrays of moving objects.

**Keywords:** contour, image shape, classification, matched filter, neural networks, image recognition.

### References

1. Monzingo R.A., Miller T.U. Adaptive Antenna Arrays: An Introduction. Transl. from Engl. ed. by V.A. Leksachenko. Moscow: Radio i svyaz', 1986. 446 p.
2. Zhuravlev A.K., Rodimov A.P., Glushankov E.I. et al. Adaptive Radio Engineering Systems with Antenna Arrays. Leningrad: Leningrad State University Press; 1991. 544 p.
3. Afanasyev N.A., Glushankov E.I., Kirik D.I., Rylov E.A. Comparison of Wiener and Kalman Solutions in Antenna Array Adaptation Problems. Radio Engineering and Telecommunication Systems. 2021. No. 3. Pp. 33–39.
4. Adaptive Antenna Arrays. Part 2. Ed. by V.A. Grigoriev. St. Petersburg: ITMO University; 2016. 118 p.
5. Dzhigan V.I. Adaptive Signal Filtering: Theory and Algorithms. Moscow: Tekhnosfera; 2013. 521 p.
6. Vechtomov V.A., Dzhigan V.I. Investigation of Characteristics of Spatial Filtering Algorithms for Active Interference Based on Adaptive Antenna Arrays. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2022. 88 p.
7. Kaba A. Unscented Kalman Filter Based Attitude Estimation of a Quadrotor. Journal of Aeronautics and Space Technologies. 2021. Vol. 14, No. 1. Pp. 79–88.
8. Boyko I.A., Glushankov E.I., Ryabov A.V., et al. Algorithms for Multiple Signals Adaptive Processing in Radio Engineering Systems Antenna Arrays. 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). IEEE; 2021. Pp. 1–6.
9. Boyko I.A., Glushankov E.I., Rylov E.A. Simulation of Gradient Adaptation Algorithm for Antenna Array in MATLAB Environment. Radio Engineering and Telecommunication Systems. 2022. No. 1. Pp. 55–61.
10. Solonina A.I. Digital Signal Processing in the Mirror of MATLAB: Textbook. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2018. 560 p.
11. Salnikova K.V. Data Array Analysis Using Box-and-Whisker Visualization Tool. Universum: Economics and Law. 2021. No. 12(87). Pp. 1–7.
12. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2014. 912 p.
13. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive Signal Processing. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1985. 474 p.