

ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМНОЙ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

И.В. Солдатов

e-mail: soldatoviv@aeroprivor.ru

АО «Аэроприбор-Восход», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Выполнен обзор методов, позволяющих реализовать работу адаптивной антенной решетки применительно к навигационной аппаратуре потребителей. Для обзора использованы статьи, опубликованные в сборнике «Радионавигационные технологии» и журнале «Радиотехника» с 2012 по 2022 г., и литература по данной тематике. Описаны основные понятия, связанные с повышением помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителей, и выделены основные разновидности в реализации алгоритмов адаптации адаптивной антенной решетки на основе пространственной и пространственно-временной обработки сигнала. Показаны подходы к реализации алгоритмов адаптации на основе теории статистического анализа и синтеза радиотехнических систем и подходы, основанные на поиске оптимального решения для заданной структуры методами математической оптимизации, т. е. на получении согласованного решения (оптимального решения для данных условий). В рамках данных подходов отражены и сопоставлены результаты в области повышения помехоустойчивости и реализации алгоритмов адаптации адаптивных антенных решеток. Упомянуты некоторые особенности реализации адаптивных антенных решеток в изделиях.

Ключевые слова

Спутниковые радионавигационные системы, аппаратура потребителей, повышение помехоустойчивости, помехоустойчивая аппаратура потребителей, адаптивные антенные решетки, пространственно-временная обработка сигнала, пространственно-временная фильтрация, помехоподавление

Поступила в редакцию 19.04.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Навигационная аппаратура потребителей (НАП) спутниковой радионавигационной системы (СРНС) принимает и обрабатывает сигнал с мощностью порядка -160 дБВт вблизи поверхности Земли, что меньше уровня собственных шумов. Это объясняет уязвимость НАП СРНС к действию помех, которые на входе приемника НАП создают протяженный по частоте шумовой фон, нарушающий работу НАП. Помехоустойчивость (ПУ) в таком случае может быть оценена максимальным отношением мощностей помехи и сигнала (отношение помеха-сигнал J/S), при котором НАП продолжает проводить навигационно-временное определение (НВО). ПУ является одной из основных характеристик НАП [1].

Проблема повышения ПУ НАП является актуальной, особенно в области высокоточной аппаратуры. Это связано с растущими требованиями, предъявляемыми к НАП. Необходимо обеспечивать надежное НВО с заданными точностными характеристиками в условиях как преднамеренных, так и непреднамеренных помех.

Самым эффективным способом повышения ПУ является пространственная фильтрация помех с помощью адаптивной антенной решетки (ААР). Эта решетка способна менять свою пространственную избирательность в зависимости от сигнально-помеховой обстановки (СПО), формируя «нули» диаграммы направленности (ДН) в направлениях действия постановщиков помех и «максимумы» в направлениях действия источников сигнала. Это достигается в результате взвешенного сложения процессов (далее наблюдений), наблюдаемых на выходе каналов ААР. Весовые коэффициенты определяются выбранным алгоритмом обработки.

Для оценки эффективности работы алгоритмов ААР используют следующие показатели: коэффициент подавления, коэффициент эффективности (или выигрыш ПУ), доля неподавленного пространства, степень деградация точности фазовых и кодовых измерений [1, 2].

Коэффициент подавления характеризует степень подавления помех. Отличие коэффициента эффективности от коэффициента подавления в учете ослабления сигнала в результате подавления помехи.

Поскольку эффективность работы зависит от СПО, которая как правило является случайной, то для сравнения алгоритмов ААР следует приводить статистический показатель. Так целесообразно использовать функцию распределения отношения сигнал-шум на выходе ААР [3].

Однако часто при описании алгоритмов ААР указывают коэффициент подавления (поскольку приближенно его можно рассматривать как коэффициент эффективности) или выигрыш при применении ААР для наихудшей помехи, иногда диапазон изменения коэффициента эффективности. Наихудшей помехой является такая помеха, для которой наблюдаются самые худшие значения показателей эффективности работы ААР.

В данной статье выполнен обзор методов, позволяющих реализовать работу ААР применительно к НАП, и отражены особенности реализации ААР.

Проведенный анализ статей, опубликованных в сборнике «Радионавигационные технологии» и журнале «Радиотехника» с 2012 по 2022 г., и литература по данной тематике позволяет выделить две группы методов:

- 1) классические методы, основанные на теории статистического анализа и синтеза радиотехнических систем;
- 2) неклассические методы, основанные на поиске оптимального решения для заданной структуры методами математической оптимизации, т. е. получение согласованного решения (оптимального решения для данных условий).

Можно выделить следующие разновидности этих методов: пространственная обработка сигнала (ПОС) [1, 3–10] и пространственно-временная обработка сигнала (ПВОС) [11–14]. При ПОС используются свойства коррелированности наблюдения в каналах ААР, обусловленные незначительным разнесением приемных позиций, а в ПВОС используется также коррелированность наблюдения в разные моменты времени.

Классические методы позволяют получить оптимальную схему обработки с учетом модели наблюдения и ее информационных параметров. Однако такой подход является более трудоемким.

К алгоритмам ПОС, полученным классическим методом, относится антенный компенсатор помех (АКП, или nullformer в зарубежной литературе) и адаптивное формирование луча (АФЛ, или beamformer в зарубежной литературе), а к ПВОС – АКП с многоотводными линиями задержки (АКП с МЛЗ) и АФЛ с многоотводными линиями задержки (АФЛ с МЛЗ), который часто называют пространственно-временным фильтром (ПВФ).

Математическая запись, описывающая работу алгоритма АФЛ [1, 3], имеет вид

$$\eta(t) = \mathbf{H}^* \mathbf{N}^{-1} \xi(t),$$

где $\eta(t)$ — очищенное наблюдение, которое подается на временной фильтр (коррелятор); $\xi(t) = \mathbf{H}s(t) + \mathbf{n}(t)$ — M -мерное наблюдение; $s(t)$ — навигационный радиосигнал; $\mathbf{n}(t)$ — вектор смеси шумов и помех; \mathbf{H} — вектор, характеризующий амплитудно-фазовые распределения на элементах ААР; \mathbf{N} — корреляционная матрица наблюдения; $(\cdot)^*$ — операция эрмитова сопряжения. Для алгоритма АКП $\mathbf{H} = (1 \ 0 \ \dots \ 0)^T$.

Для ПОС алгоритм АФЛ является оптимальным алгоритмом приема сигнала, позволяющим осуществить как подавление помехи, так и прием сигнала с максимальной энергетикой без искажения фазы навигационного сигнала. АКП является оптимальным алгоритмом подавления и переходит в АФЛ при наличии сигнала в одном из каналов. На основе АКП можно организовать квазиоптимальные схемы приема, если стоит задача оптимального подавления помех с допустимым уровнем искажений сигнала. Для этого проводится подстройка вектора \mathbf{H} .

Математически работа ПВФ описывается выражением [11–14]

$$\eta(t) = \mathbf{H}^* \sum_{\tau}^T \mathbf{Q}(\tau) \xi(t - \tau),$$

где $\mathbf{Q}(\tau)$ — $M \times M$ матричная импульсная характеристика пространственно-временного многоканального компенсатора помех, являющаяся обратной функцией к матричной корреляционной функции векторного наблюдения $\xi(t)$.

Большой интерес среди алгоритмов ААР представляют алгоритмы ПВОС, поскольку на практике ААР, использующие алгоритмы ПОС, не позволяют достичь существенной ПУ. Алгоритмы ПВОС были получены из решения задачи оптимального приема сигнала в условиях многолучевого распространения помех. В алгоритме ПВФ используются корреляционные свойства наблюдений как между каналами, так и в разные моменты времени. Данный подход позволяет получать очищенное наблюдение с постоянным групповым временем запаздывания (ГВЗ) без искажения фазы, что подходит для высокоточных систем.

Отметим, что алгоритм ПВФ имеет разновидности (оптимальный по Винеру, симметричный). На текущий момент стараются использовать оптимальный по Винеру ПВФ в силу более простой аппаратной реализации. Аналогично ПОС алгоритм АКП с МЛЗ является оптимальным с точки зрения подавления, и при фокусировке сигнала в одном из каналов осуществляет оптимальный прием сигнала.

Эффективность алгоритмов классического метода в реальной аппаратуре показана в таблице [14]. Эффективность зависит от числа элементов ААР, условий многолучевости и декоррелирующих факторов, наблюдаемых в реальной аппаратуре (динамический диапазон, нелинейность, частотное рассогласование амплитудно-частотных характеристик и др.), поэтому данное сравнение скорее имеет качественный характер.

Характеристики алгоритмов ААР

Характеристика	АКП	АФЛ	АКП с МЛЗ	ПВФ
Выигрыш в ПУ, дБ	10...20	20...25	40...60	40...60
Искажения фазы	Да	Нет	Да	Нет
Искажения сигнального времени	Нет	Нет	Да	Нет
Точность / предельная погрешность	Единицы дм / 1 м	Единицы мм / 0,1 м	Единицы м / 10 м	Единицы мм / 0,1 м
Сложность реализации	Простая	Средняя	Высокая	Очень высокая

Алгоритмы ПОС не рекомендуются к реализации ввиду ухудшения ПУ в условиях многолучевости. АКП с МЛЗ обеспечивает помехоустойчивость основной массы пользователей СРНС, которым достаточно метровой точности.

Наличие отводов в ПВФ благотворно влияет на рассогласование в частотных характеристиках, а в случае ПОС для устранения рассогласования требуется дополнительно использовать фильтры-эквалайзеры. Это позволяет достичь больших значений ПУ [4].

Стоит отметить, что существуют работы [12], в которых показано, что использование такого метода синтеза радиотехнической системы позволит создать схемы слежения с учетом пространственной информации, что улучшит точность оценки информационных параметров сигнала в НАП.

В [5, 6] были синтезированы и сравнены алгоритмы ПОС в комплексной и действительной формах. Применение таких алгоритмов поможет снизить вычислительную трудоемкость алгоритмов ААР.

Неклассические методы позволяют получить согласованное решение (оптимальное решение для данных условий). Для этого задается схема обработки и критерии оптимизации. Такой подход позволяет использовать свойства линейной алгебры, учитывать особенности эксплуатации и экономить вычислительные затраты.

Алгоритм Space-Time Adaptive Processing (STAP), название которого иногда переводят как «пространственно-временной адаптивный процессор» [2], описывает АКП с МЛЗ. Однако алгоритм был построен на основе других предположений.

В [7] был предложен метод устранения помех с использованием разнесенных антенн, основанный на спектральном разложении ковариационной матрицы. Также можно выделить метод главных компонент корреляционного анализа в задаче компенсации помех, в котором используется собственная система оценки пространственной корреляционной матрицы [4]. В [5] показан алгоритм повышения эффективности пространственно-временного фильтра с применением предварительной пространственной обработки. В статье показано, как решить проблему искажения ДН ААР при отсутствии помех. Для этого используется предварительная пространственная обработка с последующей пространственно-временной обработкой в блоке схожем с АКП с МЛЗ.

Отметим, что большинство статей, посвященных алгоритмам для ААР, реализуют ПОС, показывая работоспособность данных решений, и опускают ПВОС, что является практически обязательным решением при реализации перспективной НАП.

Отдельно выделим ряд статей, в которых исследуются и проверяются аспекты, связанные с реальной аппаратурой. Эти статьи можно подразделить на две группы.

1. Статьи, описывающие модель реального входного наблюдения, которую необходимо закладывать при реализации алгоритмов ААР, или статьи, посвященные оценке неучтенных факторов [17–22]. Так, в [17–18] были исследованы вопросы, связанные с неидентичностью приемных каналов. В [21] предложен метод задания требований к неидентичности приемных каналов для достижения потенциальных значений помехоподавления.

2. Статьи, посвященные экспериментальным исследованиям, которые связаны с реализацией алгоритма ААР [23, 24].

В статьях [19, 20] изучен вопрос нелинейности и связи ее с потенциальными значениями помехоподавления, а в [22] исследована ПОС с поляризационным компенсатором помех. В [23] рассмотрен вопрос, связанный с выравниванием неидентичности приемных каналов с помощью корректирующих фильтров для

достижения потенциальных значений помехоподавления АКП. В [24] разработан и исследован алгоритм формирования луча, что актуально для реализации АФЛ, поскольку для формирования луча необходимо учитывать неидентичность радиочастотной части приемника.

Обобщая результаты проведенного обзора, можно сделать выводы о росте интереса к алгоритмам адаптации ААР и их практической реализации. Среди всех алгоритмов наиболее эффективными являются алгоритмы ПВОС, в частности симметричный ПВФ [15]. Аппаратная реализация данного алгоритма крайне вычислительно затратна, что указывает на необходимость разработки более совершенного алгоритма ПВОС, который позволит обеспечить значительный прирост в ПУ и снизить требования к вычислительному ресурсу НАП. Для этого следует использовать особенности НАП (динамика движения, специфика геометрии ААР). Возможным путем получения такого алгоритма кажется неклассический метод, поскольку, как показывает практика, такие решения согласуются с классическими и обеспечивают высокую эффективность.

Литература

- [1] Бакитько Р.В., Болденков Е.Н., Булавский Н.Т. и др. *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования*. Москва, Радиотехника, 2010, 800 с.
- [2] Монзиго Р.А. *Адаптивные антенные решетки: введение в теорию*. Москва, Радио и связь, 1986, 448 с.
- [3] Харисов В.Н., Павлов В.С. Статистический подход к определению характеристик помехоустойчивости устройств ПВОС. *Радионавигационные технологии: сб. ст.* Москва, Радиотехника, 2020, 102 с.
- [4] Ефименко В.С., Пастухов А.В., Ворончихин Д.Н. Реализация алгоритмов пространственно-временной обработки. *Радионавигационные технологии: сб. ст.* Москва, Радиотехника, 2015, 144 с.
- [5] Ефименко В.С., Харисов В.Н., Давыденко И.Н., Папушой В.И. Модель компенсатора помех с коррекцией частотных характеристик каналов. *Радиотехника*, 2003, № 7.
- [6] Перов А.И., Ипполитов С.П. Исследование алгоритма оценивания параметров сигнала с пространственно-временной обработкой наблюдений с антенной решеткой в действительных числах. *Радиотехника*, 2018, № 9, с. 139–144. <http://doi.org/10.18127/j00338486-201809-24>
- [7] Перов А.И., Ипполитов С.П. Синтез и сравнительный анализ алгоритмов пространственной обработки сигналов и помех в комплексной и действительной формах в аппаратуре спутниковой навигации. *Радиотехника*, 2019, № 9 (14), с. 14–22. [http://doi.org/10.18127/j00338486-201909\(14\)-02](http://doi.org/10.18127/j00338486-201909(14)-02)
- [8] Соколов И.М., Кинкулькин И.Е., Калмыков П.В. Метод устранения помех с использованием разнесенных антенн. *Радионавигационные технологии: сб. ст.* Москва, Радиотехника, 2015, 144 с.
- [9] Немов А.В. Определение размерности сигнального подпространства при реализации метода главных компонент в задаче компенсации помех. *Радионавигационные технологии: сб. ст.* Москва, Радиотехника, 2020, 102 с.

- [10] Грибов П.С., Шатилов А.Ю. Повышение эффективности пространственно-временной компенсации помех в радионавигационных приемниках за счет предварительной пространственной обработки сигналов от антенной решетки. *Радиотехника*, 2019, № 9 (14), с. 22–33. [http://doi.org/10.18127/j00338486-201909\(14\)-03](http://doi.org/10.18127/j00338486-201909(14)-03)
- [11] Шатилов А.Ю., Тюфтяков Д.Ю. Метод пространственной фильтрации имитационных помех глобальных навигационных спутниковых систем. *Радионавигационные технологии: сб. ст.* Москва, Радиотехника, 2016, 146 с.
- [12] Ефименко В.С., Харисов В.Н., Павлов В.С. Оптимальные алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов и их характеристики. *Радиотехника*, 2016, № 9.
- [13] Харисов В.Н., Пельтин А.В. Пространственно-временной алгоритм обработки сигнала в условиях многолучевого распространения для приемников с антенной решеткой. *Радиотехника*, 2017, № 11, с. 32–38.
- [14] Карутин С.Н., Харисов В.Н., Павлов В.С. Оптимальные алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов для высокоточных приложений. *Радиотехника*, 2018, № 9, с. 131–138. <http://doi.org/10.18127/j00338486-201809-23>
- [15] Карутин С.Н., Харисов В.Н., Павлов В.С. Синтез помехоустойчивого пространственно-временного фильтра для высокоточных измерений навигационных параметров по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. *Измерительная техника*, 2020, № 6., с. 52–60. <http://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-6-52-60>
- [16] Грибов П.С., Шатилов А.Ю., Ахламова А.М. Анализ составляющих неидентичности частотных характеристик приемных каналов помехозащищенной навигационной аппаратуры спутниковой радионавигационной системы. *Радионавигационные технологии: сб. ст.* Москва, Радиотехника, 2019, 108 с.
- [17] Грибов П.С. Оценка эффективности работы пространственно-временного алгоритма подавления помех при наличии неидентичности частотных трактов навигационной аппаратуры потребителей. *Радионавигационные технологии: сб. ст.* Москва, Радиотехника, 2016, 146 с.
- [18] Павлов В.С. Влияние неидентичности каналов адаптивных антенных решеток на характеристики приема сигналов ГНСС. *Радиотехника*, 2016, № 9, с. 128–134.
- [19] Павлов В.С., Столяров С.А. Влияние нелинейности приемных трактов на работу многоканального компенсатора помех. *Радиотехника*, 2012, № 10, с. 15–18.
- [20] Ефименко В.С., Сизов Р.Н., Папков Р.С. Параметры нелинейностей и их связь с потенциальными характеристиками подавления. *Радиотехника*, 2007, № 7, с. 109–112.
- [21] Харисов В.Н., Быстраков С.Г., Пастухов А.В., Сизов Р.Н. Метод задания требований к неидентичности каналов компенсаторов помех. *Радиотехника*, 2007, № 7, с. 113–120.
- [22] Ефименко В.С., Харисов В.Н., Быстраков С.Г., Конаныхин Е.С. Исследование характеристик поляризационного антенного компенсатора помех для приемников СРНС. *Радиотехника*, 2007, № 7, с. 102–108.
- [23] Ефименко В.С., Пастухов А.В., Харисов В.Н. Экспериментальные исследования цифровых корректирующих фильтров в каналах антенных компенсаторов помех. *Радиотехника*, 2008, № 7, с. 56–59.
- [24] Грибов П.С., Вьюнов И.П., Шатилов А.Ю. Разработка и экспериментальные исследования алгоритма формирования лучей на навигационные спутники. *Радионавигационные технологии: сб. ст.* Москва, Радиотехника, 2015, 144 с.

- [25] Перов А.И. Потенциальные характеристики приема навигационных сигналов при воздействии пространственно-распределенных помех. *Радиотехника*, 2020, № 9 (18), с. 48–60.

Солдатов Иван Васильевич — техник, АО «Аэроприбор-Восход», Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Солдатов И.В. Обзор методов повышения помехоустойчивости приемной аппаратуры спутниковых радионавигационных систем с помощью адаптивных антенных решеток. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 05 (82).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-5-896>

OVERVIEW OF METHODS FOR IMPROVING NOISE IMMUNITY OF THE SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS RECEIVING EQUIPMENT USING THE ADAPTIVE ANTENNA ARRAYS

I.V. Soldatov

soldatoviv@aeropribor.ru

JSC Aeropribor-Voskhod, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper reviews methods that make it possible to introduce the adaptive antenna array in relation to the consumer navigation equipment. The overview used the articles published in the Radio Navigation Technologies collection and in the Radio Engineering Journal from 2012 to 2022, and other literature on this topic. Basic concepts associated with increasing noise immunity of the consumer navigation equipment are described, and main variations in implementing the adaptive antenna array adaptation algorithms based on spatial and space-time signal processing are identified. Approaches to introducing the adaptation algorithms based on the theory of statistical analysis and the synthesis of radio engineering systems are demonstrated, as well as approaches based on finding the optimal solution for a given structure by the mathematical optimization methods, i. e. on obtaining a consistent solution (optimal solution for the given conditions). Within the framework of these approaches, results in improving noise immunity and implementing adaptation algorithms in the adaptive antenna arrays are reflected and compared. Certain features of the adaptive antenna arrays introduction in the products are provided.

Keywords

Satellite radio navigation systems, consumer equipment, increase in noise immunity, noise-immune consumer equipment, adaptive antenna arrays, space-time signal processing, space-time filtering, noise suppression

Received 19.04.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Bakit'ko R.V., Boldenkov E.N., Bulavskiy N.T. et al. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russ.).
- [2] Monzigo R.A. *Adaptivnye anteny reshетки: vvedenie v teoriyu* [Adaptive Antenna Arrays: An Introduction to Theory]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986, 448 p. (In Russ.).
- [3] Kharisov V.N., Pavlov V.S. Statistical Approach to Determining the Noise Immunity Characteristics of PVOS Devices. *Radionavigatsionnye tekhnologii: sb. st.* [Radio navigation technologies: a collection of articles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2020, 102 p. (In Russ.).
- [4] Efimenko V.S., Pastukhov A.V., Voronchikhin D.N. Implementation of space-time processing algorithms. *Radionavigatsionnye tekhnologii: sb. st.* [Radio navigation technologies: a collection of articles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015, 144 p. (In Russ.).

-
- [5] Efimenko V.S., Kharisov V.N., Davydenko I.N., Papushoy V.I. Interference canceller model with channel frequency response correction. *Radioengineering*, 2003, no. 7. (In Russ.).
- [6] Perov A.I., Ippolitov S.P. Synthesis and modeling of algorithm of estimating parameters with space-time processing in real numbers from observations by antenna array. *Radioengineering*, 2018, no. 9, pp. 139–144. (In Russ.).
<http://doi.org/10.18127/j00338486-201809-24>
- [7] Perov A.I., Ippolitov S.P. Comparative analysis of space-time signal processing algorithms in complex and real forms. *Radioengineering*, 2019, no. 9 (14), pp. 14–22. (In Russ.).
[http://doi.org/10.18127/j00338486-201909\(14\)-02](http://doi.org/10.18127/j00338486-201909(14)-02)
- [8] Sokolov I.M., Kinkul'kin I.E., Kalmykov P.V. Antenna diversity elimination method. *Radionavigatsionnye tekhnologii: sb. st.* [Radio navigation technologies: a collection of articles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015, 144 p. (In Russ.).
- [9] Nemov A.V. Determining the dimension of the signal subspace in the implementation of the principal component method in the noise compensation problem. *Radionavigatsionnye tekhnologii: sb. st.* [Radio navigation technologies: a collection of articles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2020, 102 p. (In Russ.).
- [10] Gribov P.S., Shatilov A.Yu. Increase in effectiveness of space-time compensation of interferences in radio navigational receivers due to signals preprocessing in antenna array. *Radioengineering*, 2019, no. 9 (14), pp. 22–33. (In Russ.).
[http://doi.org/10.18127/j00338486-201909\(14\)-03](http://doi.org/10.18127/j00338486-201909(14)-03)
- [11] Shatilov A.Yu., Tyufiyakov D.Yu. Spatial filtering method for imitation interference of global navigation satellite systems. *Radionavigatsionnye tekhnologii: sb. st.* [Radio navigation technologies: a collection of articles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016, 146 p. (In Russ.).
- [12] Efimenko V.S., Kharisov V.N., Pavlov V.S. Optimal space-time processing algorithms and their properties. *Radioengineering*, 2016, no. 9, pp. 113–120. (In Russ.).
- [13] Kharisov V.N., Pel'tin A.V. The spatial-temporal algorithm for processing of multipath signal for receivers with an antenna array. *Radioengineering*, 2017, no. 11, pp. 32–38. (In Russ.).
- [14] Karutin S.N., Kharisov V.N., Pavlov V.S. Optimal'nye algoritmy prostranstvenno-vremennoy obrabotki signalov dlya vysokotochnykh prilozheniy. *Radioengineering*, 2018, no. 9, pp. 131–138. (In Russ.). <http://doi.org/10.18127/j00338486-201809-23>
- [15] Karutin S.N., Kharisov V.N., Pavlov V.S. Synthesis of an interference-resistant space-time filter for high-precision measurements of navigation parameters according to the signals of global navigation satellite systems. *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 476–486. <http://doi.org/10.1007/s11018-020-01812-1>
- [16] Gribov P.S., Shatilov A.Yu., Akhlamova A.M. Analysis of the non-identity components of the frequency characteristics of the receiving channels of noise-protected navigation equipment of a satellite radio navigation system. *Radionavigatsionnye tekhnologii: sb. st.* [Radio navigation technologies: a collection of articles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2019, 108 p. (In Russ.).
- [17] Gribov P.S. Evaluation of the efficiency of the space-time algorithm for interference suppression in the presence of non-identity of frequency paths of consumer navigation

- equipment. *Radionavigatsionnye tekhnologii: sb. st.* [Radio navigation technologies: a collection of articles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016, 146 p. (In Russ.).
- [18] Pavlov V.S. Influence of nonidentity reception channels in adaptive antenna ARRAYS on GNSS signals reception characteristics. *Radioengineering*, 2016, no. 9, pp. 128–134. (In Russ.).
- [19] Pavlov V.S., Stolyarov S.A. The influence of nonlinear receiver channels on the performance of multichannel jammer canceller. *Radioengineering*, 2012, no. 10, pp. 15–18. (In Russ.).
- [20] Efimenko V.S., Sizov R.N., Papkov R.S. Non-linearity parameters and their relation with jammer suppression potential characteristics. *Radioengineering*, 2007, no. 7, pp. 109–112. (In Russ.).
- [21] Kharisov V.N., Bystrakov S.G., Pastukhov A.V., Sizov R.N. The method of the channel non-identity requirements definition for jammer cancellers. *Radioengineering*, 2007, no. 7, pp. 113–120. (In Russ.).
- [22] Efimenko V.S., Kharisov V.N., Bystrakov S.G., Konanykhin E.S. The investigation of antenna polarization jammer canceller characteristics for GNSS receivers. *Radioengineering*, 2007, no. 7, pp. 102–108. (In Russ.).
- [23] Efimenko V.S., Pastukhov A.V., Kharisov V.N. Experimental researches of digital correcting filters in channels of antenna noise cancellers. *Radioengineering*, 2008, no. 7, pp. 56–59. (In Russ.).
- [24] Gribov P.S., V'yunov I.P., Shatilov A.Yu. Development and experimental studies of the algorithm for forming rays on navigation satellites. *Radionavigatsionnye tekhnologii: sb. st.* [Radio navigation technologies: a collection of articles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015, 144 p. (In Russ.).
- [25] Perov A.I. Noise immunity analysis of navigation receiver operated with pulse signal with inside phase shift keying. *Radioengineering*, 2020, no. 9 (18), pp. 48–60. (In Russ.). [http://doi.org/10.18127/j00338486-202009\(18\)-04](http://doi.org/10.18127/j00338486-202009(18)-04)

Soldatov I.V. — Technician, JSC Aeropribor-Voskhod, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Soldatov I.V. Overview of methods for improving noise immunity of the satellite radio navigation systems receiving equipment using the adaptive antenna arrays. *Politeknicheskii molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 05 (82). (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-5-896>