

Научная статья

УДК 621.31

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186883>

EDN: <https://www.elibrary.ru/FBXHDV>

МОДУЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ АВИАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

В.Б. Поляков¹, А.А. Сенцов¹✉, С.А. Иванов², С.А. Ненашев¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ toxx@list.ru

Цитирование: Поляков В.Б., Сенцов А.А., Иванов С.А., Ненашев С.А. Модульное построение авиационных измерительно вычислительных комплексов в условиях импортозамещения // Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186883>

Аннотация. В работе предложен вариант построения и производства авиационных измерительно-вычислительных комплексов, актуальность обоснована необходимостью импортозамещения в условиях складывающейся международной обстановки и необходимостью развития отечественных высокотехнологичных продуктов. Рассмотрен вариант модульного построения бортового оборудования с наращиваемыми характеристиками для создания масштабируемых автоматизированных средств измерения и управления, рассчитанных на многофункциональную работу в тяжелых климатических условиях применения с учетом повышенных требований к надежности и техническим характеристикам. Рассматривается устройство и принцип действия одноплатного модуля, созданного для создания масштабируемых авиационных измерительно-вычислительных комплексов, а также варианта их объединения путем встроенных средств комплексирования. Одним из основных преимуществ

предлагаемого подхода в производстве является применение отечественных вычислительных средств и операционных систем с расширенными интерфейсными базами, включающих не только традиционные электрические интерфейсы передачи данных – ARINC-429, магистрального канала информационного обмена и других, - но и современный оптический интерфейс FC-AE. На примерах каналов комплексирования выполнено сравнение уровней масштабирования в одноплатном модуле. Разработан протокол информационного обмена с принятием технических соглашений. На базе новой отечественной высокопроизводительной кластеризированной вычислительной платформы одноплатных модулей рассматривается возможность построения высокоскоростной объектовой локальной сети с применением оригинальной высоконадежной физической среды. При решении задач построения таких локальных сетей приоритет сосредоточен на обеспечении высокого уровня помехоустойчивости, надежности и отказоустойчивости широкополосной физической среды распространения, использующей волоконно-оптические кабели в качестве линий связи.

Ключевые слова: измерительно-вычислительный комплекс, канал передачи данных, операционная система, процессор, кластер.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение №FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

MODULAR CONSTRUCTION OF AVIATION MEASURING AND COMPUTING COMPLEXES IN THE CONTEXT OF IMPORT SUBSTITUTION

V.B. Polyakov¹, A.A. Sentsov¹✉, S.A. Ivanov², S.A. Nenashev¹

¹Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia

✉ toxx@list.ru

Citation: Polyakov V.B., Sentsov A.A., Ivanov S.A., Nenashev S.A. Modular construction of aviation measuring and computing complexes in the context of import substitution // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186883>

Abstract. A variant of the construction and production of aviation measurement and computing complexes is proposed, the relevance is justified by the need for import substitution in the current international situation and the need to develop domestic high-tech products. A variant of modular construction of on-board equipment with stackable characteristics is considered to create scalable automated measuring and control tools designed for multifunctional operation in harsh climatic conditions of use, taking into account increased requirements for reliability and technical characteristics. The article considers the device and operating principle of a single-board module designed to create scalable aviation measurement and computing complexes, as well as the option of combining them through integrated integration tools. One of the main advantages of the proposed approach in production is the use of domestic computing facilities and operating systems with extended interface databases, including not only traditional electrical data transmission interfaces – ARINC-429, the main information exchange channel, and others, but also the modern FC-AE optical interface. Using the examples of integration channels, a comparison of scaling levels in a single-board module is performed. An information exchange protocol has been developed with the adoption of technical agreements. Based on a new domestic high-performance clustered computing platform for single-board modules, the possibility of building a high-speed object LAN using an original highly reliable physical environment is being considered. When solving the problems of building such local area networks, priority is focused on ensuring a high level of noise immunity, reliability and fault tolerance of a broadband physical distribution environment using fiber-optic cables as communication lines.

Keywords: measuring and computing complex, data transmission channel, operating system, processor, cluster.

Funding: supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project Agreement No. FSRF-2023-0003: “Fundamental Foundations of

Введение

Основным драйвером внедрения импортозамещения в IT-сфере стал Указ Президента РФ от 30.03.2022 № 166, который предусматривает двухэтапное введение запрета на использование зарубежного ПО на значимых объектах критической информационной инфраструктуры (КИИ), под которой понимают совокупность информационных систем, сетей и ресурсов, которые имеют критически важное значение для безопасности страны, экономики и общества. Одним из направлений решения поставленных задач с одновременным обеспечением унификации и масштабируемости – это модульное построение авиационных измерительно-вычислительных комплексов (ИВК). В [1] модульность формулируется как одно из современных требований построения программно-аппаратных средств обработки бортовых радиоэлектронных комплексов.

Указ Президента РФ от 30.03.2022 № 166 напрямую связан с необходимостью импортозамещения и развития отечественных высокотехнологичных продуктов. В авиационной промышленности с учетом расширения сферы разработки беспилотных летательных аппаратов требует изменения подход к построению ИВК, которые должны в современных условиях удовлетворять следующим требованиям [2-6]:

- широкая унификация;
- обеспечение технологической независимости и информационной безопасности;
- работа в широком температурном диапазоне;
- повышенная надежность;
- адаптация к различным типам задач.

Особенности построения одноплатного модуля

Сложность разработки авиационных ИВК заключается в том, что для решения конкретных измерительных задач требуется разработка уникального состава, специализированной конфигурации и программ управления.

Для создания масштабируемых авиационных ИВК разработан одноплатный модуль (ОМ), содержащий высокопроизводительный многоядерный отечественный процессор из семейства «Эльбрус», блок оперативной памяти 4 Гбайта, Flash-диск 32 Гбайта, встроенную видеокарту для представления результатов измерений в установленной форме, и широкий набор типовых интерфейсов для обеспечения взаимодействия между входящими в ИВК устройствами, измерительными датчиками и потребителями результатов. На рисунке 1 представлены интерфейсы ОМ [7].

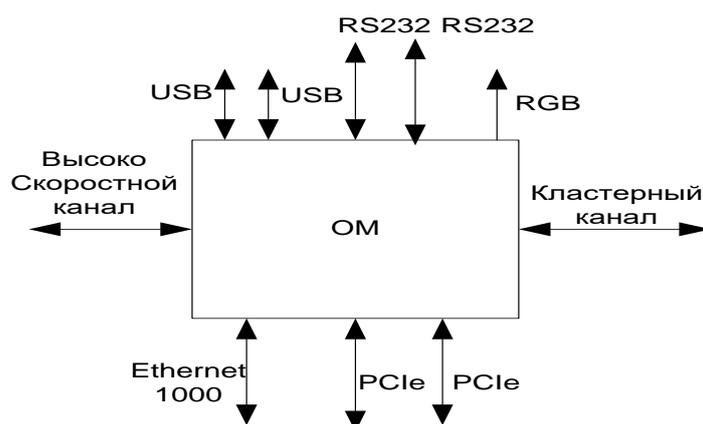


Рисунок 1 – Интерфейсы ОМ.

ОМ имеет повышенную надежность и обеспечивает работу в широком температурном диапазоне. Для подключения измерительных датчиков с цифровым выходом и высокой частотой дискретизации предусмотрен высокоскоростной канал передачи информации для последующей цифровой обработки [4, 8, 9].

На созданный ОМ портированы следующие отечественные операционные системы [7]:

1. ОС «ОСРВ-Эльбрус» - унифицированная ОС РВ для вычислительной техники целевого назначения с повышенными требованиями к информационной безопасности.
2. ОС «Эльбрус-Д» - унифицированная ОС РВ для вычислительной техники целевого назначения со встроенными средствами защиты информации (в ядро ОС встроен комплекс средств защиты информации (КСЗИ) от несанкционированного доступа (НСД)).
3. ОС «БагрОС-4000» «жесткого» РВ для вычислительной техники целевого назначения с механизмами защиты памяти в соответствии со стандартами ARINC 653 и POSIX.

Объединение модулей в кластер

Для масштабирования в ОМ предусмотрен канал комплексирования, позволяющий объединить два ОМ в кластер, в котором все ресурсы удваиваются, процессор становится 12-ти ядерным и развивает производительность более 50-ти миллиардов операций в секунду. Кластер работает под управлением единой ОС и программы. На рисунке 2 представлен кластер и его интерфейсы [7].

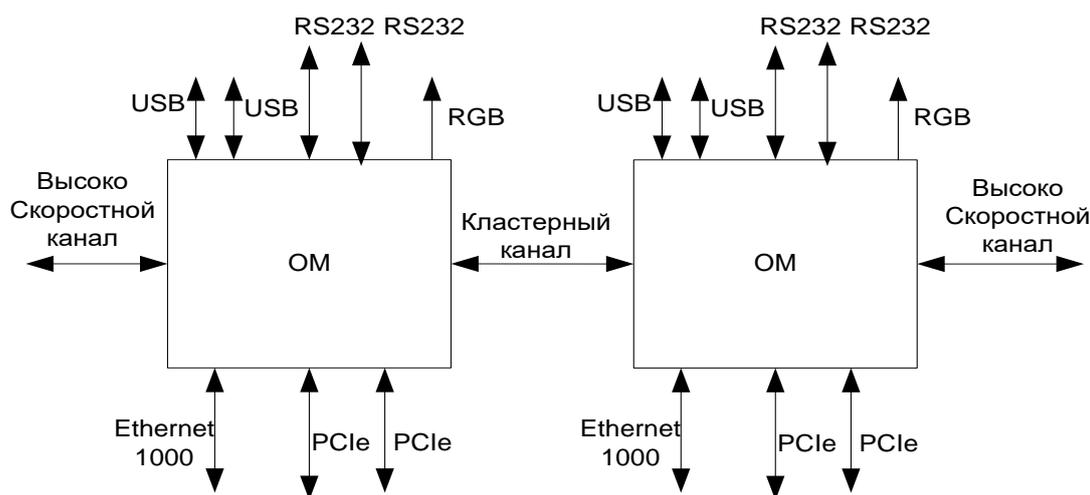


Рисунок 2 – Кластер и его интерфейсы.

Для второго уровня масштабирования предусмотрен специальный канал, размещенный на ОМ, позволяющий организовать информационный обмен как между отдельными ОМ, так и между кластерами на основе интерфейса PCIe.

Наличие в каждом ОМ такого специального канала позволяет создавать широкий набор конфигураций для обеспечения различных возможностей ИВК. Внешний вид ОМ представлен на рисунке 3 [7].



Рисунок 3 – Внешний вид ОМ.

Встроенные средства комплексирования обеспечивают следующие варианты объединения модулей для увеличения вычислительной мощности, объема встроенной и внешней памяти, числа интерфейсных устройств и количества каналов информационного обмена:

- масштабирование в «кластер» (12-ти ядерная архитектура);
- многокластерная архитектура;
- многомашинная архитектура;
- смешанная архитектура.
- сетевая структура на базе протоколов Ethernet-1000.

В составе набора модулей интерфейсных устройств имеется модуль высокоскоростного ввода/вывода (ИОСС), который обеспечивает режим полудуплексной передачи информации и состоит из приемной и передающей частей с пропускной способностью 1.3 Гбайт/с, а также имеется поддержка обмена в режиме RDMA.

Модуль для реализации информационного взаимодействия с использованием оптоволоконных линий реализован на базе 8-ми параллельно работающих однонаправленных оптоволоконных линий передачи (ВОЛП). Частота сигнала синхронизации ВОЛП составляет 1250 МГц. Прием информации по каждой линии ВОЛП осуществляется через оптоэлектронный приемный модуль типа ПРОМ-ЦФ01.

служебной информации всегда определяет номер пакета. Слова служебной информации со второго по восьмое передаются только в пакете с номером ноль и предназначены для трансляции их потребителю. Слова данных служебной информации передаются по одному байту в каждом из 8-ми каналов ВОЛП.

3. Информационный обмен по ВОЛП соответствует стандарту 1000BASE-LX, IEEE 802.3z только в отношении PCS, PMA и PMD подуровней физического уровня. Пауза между пакетами должна быть не менее 100нс.

4. Средняя скорость приема данных в каждой из 8-ми ВОЛП не превышает 200Мбит/с.

На базе новой отечественной высокопроизводительной кластеризированной вычислительной платформы ОМ обеспечена возможность построения высокоскоростной объектовой локальной сети с применением оригинальной надежной физической среды.

Как видно из рисунка 1, вычислительная платформа имеет расширенную интерфейсную базу, включающую не только традиционные электрические интерфейсы – ARINC-429, магистрального канала информационного обмена (МКИО) и других, но и современный оптический интерфейс FC-AE.

Кольцевая структура сетевого сегмента

При решении задач построения бортовых локальных сетей важнейшими факторами являются обеспечение высокой помехоустойчивости, надежности и отказоустойчивости широкополосной физической среды распространения, использующей волоконно-оптические кабели в качестве линий связи [10-13].

В состав кольцевой структуры сетевого сегмента входят:

- ЦКП – центральное устройство коммутации и маршрутизации пакетов информации;
- ППЦ – приемопередатчики оптические центрального узла;
- M1, M2 – мультиплексоры оптические центрального узла;
- MBV – пассивные оптические мультиплексоры ввода-вывода периферийных узлов;
- ППП – приемопередатчики оптические периферийных узлов;

- ПКП – периферийные устройства коммутации и маршрутизации пакетов информации;

- ОУ – оконечные устройства;

- УО – узловое оборудование периферийных узлов.

Пример кольцевой структуры сетевого сегмента приведен на рисунке 4 [7].

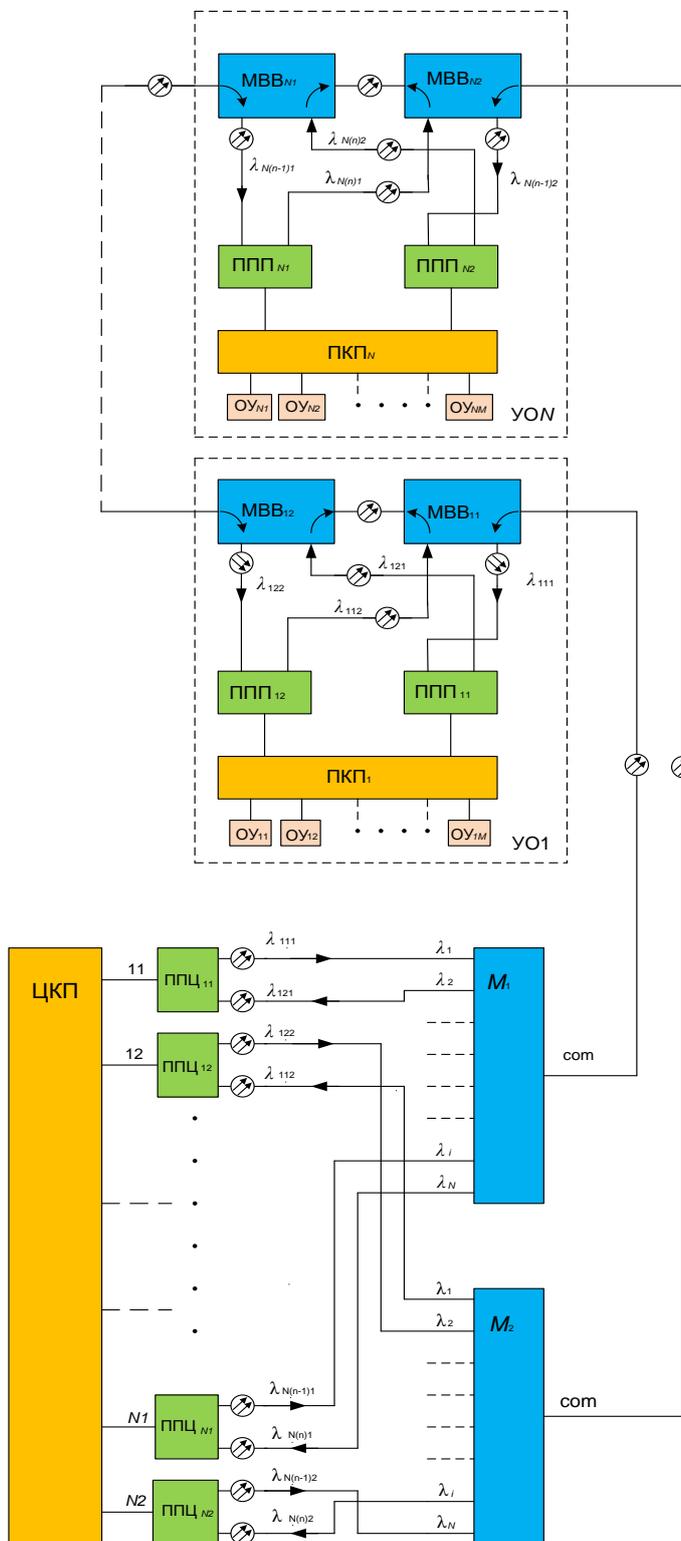


Рисунок 4 – Кольцевая структура сетевого сегмента.

Центральное устройство коммутации и маршрутизации пакетов информации (ЦКП) предназначено для осуществления коммутации пакетов информации, передаваемых в сети, обеспечения работы интерфейсов с оптическими приемопередатчиками, поддержания функционирования протоколов, обеспечивающих переход на тракты портов резервных направлений при отказах трактов портов основных направлений. Приемопередатчики оптические центрального узла (ППЦ) и периферийных узлов (ППП) предназначены для преобразования электрического линейного сигнала в оптический сигнал, ввода оптической мощности в оптоволоконные световоды оптических линий, преобразования оптического сигнала, приходящего из линий, в электрический линейный сигнал, диагностики аварийных состояний лазерных передатчиков и уровней оптических мощностей приема.

Первый и второй мультиплексоры оптические центрального узла (M1, M2) предназначены для объединения компонентных волновых сигналов, поступающих от оптических передатчиков через порты соответствующих длин волн в агрегатный многоволновый сигнал, а также для разделения агрегированных сигналов, поступающих из кольцевых линий, на компонентные сигналы соответствующих длин волн, подаваемые на входы соответствующих оптических приемников.

Пассивные оптические мультиплексоры ввода-вывода (МВВ) периферийных узлов предназначены для выделения из кольцевой оптической линии сигналов соответствующих длин волн основного и резервного направлений (трактов) передачи и пропускания сигналов других длин волн транзитом, а также для ввода в линию сигналов соответствующих длин волн [14-16]. Периферийные устройства коммутации и маршрутизации пакетов информации (ПКП) предназначены для осуществления коммутации пакетов информации на уровне групп абонентов, связи с центральным коммутатором, обеспечения работы интерфейсов с оптическими приемопередатчиками, поддержания функционирования протоколов, обеспечивающих переход на тракты портов резервных направлений при отказах трактов портов основных направлений [17].

Оконечные устройства (ОУ) предназначены для ввода-вывода информации пользователей (абонентов), а также для поддержания функционирования стека сетевых протоколов и сетевых интерфейсов пользователей: интерфейсов – ARINC-429, магистрального канала информационного обмена (МКИО) и других.

При этом в УО, построенных на базе ОМ, производится первичная обработка, запись на накопители поступающих данных и агрегирование информационных потоков. Кроме этого ОУ могут представлять собой высокопроизводительные унифицированные рабочие места операторов целевой ИВК.

Полная логическая прозрачность предлагаемой среды распространения с волновым разделением позволит использовать в составе ЦКП и ПКП, построенных на базе ОМ, различные сетевые интерфейсы и технологии (при наличии сменных унифицированных сетевых карт с оптическими приемопередатчиками, настроенными на различные длины волн), такие как FC-AE, AFDX и другие [18, 19].

Основные преимущества такой высоконадежной кольцевой оптической сети сводятся к следующему.

1. Возможность применения экономичной кольцевой одноволоконной топологии, требующей незначительных объемов линейных сооружений.

2. Обеспечение автоматического восстановления работоспособности при однократных обрывах линий, т.е. однократные обрывы не приводят к пропаданию связи абонентов сети.

3. Эффективное использование оптоволокна за счет применения принципа волнового уплотнения. Суммарная скорость передачи в кольцевой линии может достигать значений около 100 Гбит/с.

4. Реализована возможность монопольного использования абонентами всей пропускной способности выделенных им волновых каналов и симметрия пропускной способности направлений передачи, что является выгодным отличием предлагаемой сети от многих других сетей, реализующих временное разделение канального ресурса между абонентами (например, жезловое кольцо, кембриджское кольцо, пассивная сеть GPON и другие).

Спроектированные модули расширения интерфейсов для связи с удаленными измерительными датчиками и измерительными системами выполнены по стандарту ГОСТ Р 52070-2003 (интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей).

Обобщенная схема авиационного измерительно-вычислительного комплекса

Авиационный ИВК, построенный по модульному принципу, позволяет обеспечить адаптацию к решению широкого спектра задач, а возможность наращивания вычислительной мощности позволяет внедрять элементы искусственного интеллекта и когнитивные технологии, повышая автономность и обеспечивая решение комплекса задач [20, 21]: измерение, высокопроизводительная обработка, многоэкранная визуализация результатов, прогнозирование (в том числе и внештатных ситуаций) и управление. Обобщенная схема ИВК представлена на рисунке 5 [7].

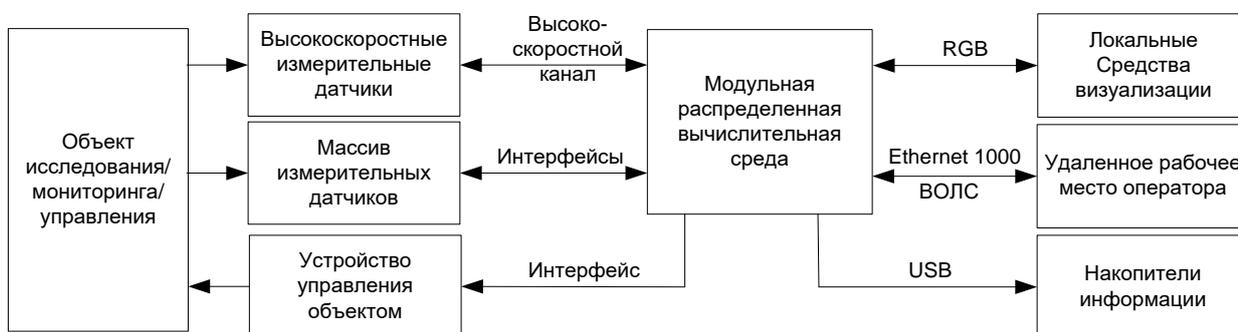


Рисунок 5 – Обобщенная схема ИВК.

Авиационный ИВК рассчитан на выполнение следующих функций [10]:

1. фильтрации, коррекции сигналов;
2. внесения поправок;
3. учета влияния внешних факторов;
4. вычисления результатов измерений;
5. определения статистических характеристик измеряемых величин;
6. оценки достоверности результатов измерений;
7. накопления и хранения полученной информации;
8. реализации алгоритмов обработки больших объемов данных.

Выводы

Одним из основных преимуществ предлагаемого подхода в производстве является применение отечественных вычислительных средств и операционных систем с расширенными интерфейсными базами. Вариантами применения таких ИВК является измерение и комплексная обработка информации в сложных технических объектах в режиме реального времени, в частности авиационных комплексах нового поколения [9], особенности которых:

- расширение функциональных возможностей в отношении сбора, адаптации и управления сложными автоматическими комплексами и системами;
- повышение точности и достоверности измерений, за счет усреднения и статистической обработки измерительных данных с учетом влияния внешних факторов;
- многоступенчатая система сбора информации от исследуемого объекта или измерительных систем;
- функционирование в реальном времени системы автоматического контроля за работой различного рода машин, агрегатов или технологических процессов;
- объединение систем технической диагностики различных изделий;
- комплексирование данных многопозиционных систем сбора измерительной информации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Сенцов А.А. Принципы построения и функционирования перспективных радиолокационных средств // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: VII Междунар. форум: сб. ст. / под ред. академика РАН В. В. Окрепилова. – СПб.: ГУАП, 2025. – С. 365-368.
2. Иванов С.А., Сенцов А.А. Методика формирования тактико-технических требований к перспективным радиолокационным средствам // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: VI Междунар. форум: сб. ст. / под ред. академика РАН В. В. Окрепилова. – СПб.: ГУАП, 2024. – С. 109-112.
3. Азаров А.В., Латышев А.Е., Рожков С.С. и др. Сравнительный анализ вариантов построения антенной решетки бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии // Труды МАИ. 2023. №128. <https://trudymai.ru/published.php/10.13111/978-1-4673-6358-7/Download/10.1017/Download/10.1109/10.1115/10.2514/10.31799/published.php?ID=171381>
4. Помозова Т.Г., Поляков В.Б., Сенцов А.А. Высокоскоростной канал передачи радиолокационной информации // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Международный форум. 2020. - С. 148-149.
5. Копейка Е.А., Вербин А.В. Методический подход оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171411>. DOI: 10.34759/trd-2023-128-22
6. Дробышев С.В. Принципы функционирования, классификация, тенденции развития и отличительные особенности антенных решеток // Наука и образование сегодня. 2016. № 10 (11). С. 13-17.
7. Помозова Т.Г., Поляков В.Б., Сенцов А.А. Модульное построение измерительно-вычислительных комплексов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: III Междунар. форум: сб. ст. / под ред. академика РАН В. В. Окрепилова. – СПб.: ГУАП, 2021. – С. 162-163.

8. Марченко К.В. Построение скоростных волоконно-оптических систем связи на основе когерентной dwdm-системы «волга» в интересах спецпользователей // Техника средств связи. 2018. №1 (141). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-skorostnyh-volokonno-opticheskikh-sistem-svyazi-na-osnove-kogerentnoy-dwdm-sistemy-volga-v-interesah-spetspolzovateley> (дата обращения: 06.10.2025).

9. Петросян А.А., Сенцов А.А. Реализация матричного шифра для обеспечения безопасной передачи данных в беспроводном радиоканале // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. IV Международный форум: сборник статей. – СПб.: ГУАП, 2022. – С. 109-111.

10. Букирёв А.С., Савченко А.Ю., Яцечко М.И. Применение интеллектуальной диагностической системы информационно-преобразующих авиационных систем интегрированной авионики при внешних возмущающих воздействиях // Труды МАИ. 2023. № 128 https://mai.ru/upload/iblock/ce8/ex1kqrimtx8yiyuk8tls6q6ufvx3iw2a/20_Bukiryev_Savchenko_YAtsechko.pdf

11. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем / Ю. П. Пытьев. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. - 427 с.

12. Ненашев В. А., Сенцов А. А., Сергеев А. М., Иванова М. С. Сигнально-кодовые конструкции. Анализ, обработка и моделирование. Санкт-Петербург, ГУАП: 2020. - 59 с.

13. Ненашев В.А., Сенцов А.А. и др. Способ сжатия изображений в пространственно-распределенной системе интенсивного обмена информацией // Третья Международная научная конференция «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах» (Санкт-Петербург, 10–17 апреля 2023): сборник докладов. – СПб.: ГУАП, 2023. - С. 151-155.

14. Авиационные системы радиуправления / В.С. Верба, В.И. Меркулов. Монография. М.: Радиотехника, 2014. - 376 с.

15. Проскурин В.И., Ягольников С.В., Шевчук В.И. Радиолокационное наблюдение. Методы, модели, алгоритмы— М.: Радиотехника, 2016. - 368 с.

16. Формализация и оптимизация жизненного цикла создания бортовых радиоэлектронных комплексов: [монография] / А.А. Турчак, А.Н. Шестун, А.А. Сенцов ; под ред. Ю.М. Смирнова. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 294 с.

17. Cerutti I., Corvera J.A., Dumlao S.M., Reyes R., Castoldi P., Andriolli N. Simulation and FPGA-based implementation of iterative parallel schedulers for optical interconnection networks // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 76 – 87.

18. Авакян А. А. Унифицированная интерфейсно-вычислительная платформа для систем интегральной модульной авионики // Труды МАИ. 2023. №128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35845>

19. Кириллов А.В., Ситников В.В., Тучин А.Л. Автоматизация процесса тестирования бортовых систем беспилотных летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsesta-testirovaniya-bortovyh-sistem-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 06.10.2025).

20. Поляков В.Б., Игнатова Н.А., Сенцов А.А., Иванов С.А. Многокритериальный выбор метода сжатия радиолокационных данных // Труды МАИ. 2025. № 140 URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184071>

21. Корнилов А.В., Корчагин К.С., Лосев В.В. Разработка алгоритмов комплексной измерительной навигационной системы авиационного применения на отечественной элементной базе // Труды МАИ. 2021. №117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156235>.

References

1. Sentsov A.A. Principles of Construction and Operation of Advanced Radar System // Metrologicheskoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy: VII International Forum: Collection of Articles / Edited by Academician of the Russian Academy of Sciences V. V. Okrepilov. St. Petersburg: GUAP, 2025, pp. 365-368.

2. Ivanov S.A., Sentsov A.A. Methodology for Forming Tactical and Technical Requirements for Advanced Radar Systems // Metrologicheskoye obespecheniye

innovatsionnykh tekhnologiy: VI International Forum: Collection of Articles / Edited by Academician of the Russian Academy of Sciences V. V. Okrepilov. St. Petersburg: GUAP, 2024, pp. 109-112.

3. Azarov A.V., Latyshev A.E., Rozhkov S.S., et al. Comparative analysis of antenna array construction options for onboard equipment of a high-speed radio link. Trudy MAI. 2023. №128. <https://trudymai.ru/published.php/10.13111/978-1-4673-6358-7/Download/10.1017/Download/10.1109/10.1115/10.2514/10.31799/published.php?ID=171381>

4. Pomozova T.G., Polyakov V.B., Sentsov A.A. High-Speed Radar Information Transmission Channel // Metrologicheskoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy. 2020, pp. 148-149.

5. Kopeika E.A., Verbin A.V. Methodological Approach to Estimating the Probability of Uninterrupted Operation of Complex Technical Systems, Taking into Account the Characteristics of the Control System Based on a Bayesian Trust Network // Trudy MAI. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171411>. DOI: 10.34759/trd-2023-128-22

6. Drobyshev S.V. Principles of Operation, Classification, Development Trends, and Distinguishing Features of Antenna Arrays // Nauka i obrazovaniye segodnya. 2016. № 10 (11). pp. 13-17.

7. Pomozova T.G., Polyakov V.B., Sentsov A.A. Modular Construction of Measuring and Computing Complexes // Metrologicheskoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy: III International Forum: Collection of Articles / Edited by Academician of the Russian Academy of Sciences V. V. Okrepilov. – St. Petersburg: GUAP, 2021. – pp. 162-163.

8. Marchenko K.B. Building high-speed fiber-optic communication systems based on the Volga coherent dwdm system for special users // Tekhnika sredstv svyazi. 2018. №1 (141). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-skorostnyh-volokonno-opticheskikh-sistem-svyazi-na-osnove-kogerentnoy-dwdm-sistemy-volga-v-interesah-spetspolzovateley> (date of appeal: 06.10.2025).

9. Petrosyan A.A., Sentsov A.A. Implementation of a Matrix Cipher for Secure Data Transmission in a Wireless Radio Channel // Metrologicheskoye obespecheniye

innovatsionnykh tekhnologiy. IV International Forum: Collection of Articles. – St. Petersburg: GUAP, 2022. – pp. 109-111

10. Bukirev A.S., Savchenko A.Yu., Yatsechko M.I. Application of an Intelligent Diagnostic System for Information-Transforming Aviation Systems of Integrated Avionics under External Disturbing Effects. Trudy MAI. 2023. № 128 https://mai.ru/upload/iblock/ce8/ex1kqrimtx8yiyk8tls6q6ufvx3iw2a/20_Bukiryev_Savchenko_YAtsechko.pdf

11. Methods of mathematical modeling of measuring and computing systems / Yu. P. Pytyev. - 3rd ed., revised. and add. Moscow : FIZMATLIT, 2012. 427 p.

12. Nenashev V. A.. Sentsov A. A.. Sergeyev A. M.. Ivanova M. S. Signalno-kodovyye konstruktsii. Analiz. obrabotka i modelirovaniye. Saint-Petersburg. GUAP: 2020. - 59 s

13. Nenashev V.A., Sentsov A.A., et al. Image Compression Method in a Spatially Distributed System of Intensive Information Exchange // Third International Scientific Conference " Obrabotka. peredacha i zashchita informatsii v kompyuternykh sistemakh" (Saint Petersburg, April 10-17, 2023): Collection of Papers. Saint Petersburg: GUAP, 2023, pp. 151-155.

14. Aviation Radio Control Systems / B.S. Verba, V.I. Merkulov. Monograph. Moscow: Radiotekhnika, 2014. - 376 p.

15. Proskurin V.I., Yagolnikov S.V., Shevchuk V.I. Radar Surveillance. Methods, Models, Algorithms. Moscow: Radiotekhnika, 2016. 368 p.

16. Formalization and Optimization of the Lifecycle of the Creation of Onboard Radio-Electronic Systems: [Monograph] / A.A. Turchak, A.N. Shestun, A.A. Sentsov; edited by Yu.M. Smirnov. - St. Petersburg: POLITEH-PRESS, 2021. - 294 p.

17. Cerutti I., Corvera J.A., Dumlaio S.M., Reyes R., Castoldi P., Andriolli N. Simulation and FPGA-based implementation of iterative parallel schedulers for optical interconnection networks // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 76 – 87

18. Avakyan A. A. Unified interface computing platform for integrated modular avionics systems // Trudy MAI. 2023, №. 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35845>

19. Kirillov A.V., Sitnikov V.V., Tuchin A.L. Automation of the Process of Testing Onboard Systems of Unmanned Aerial Vehicles // Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika. tekhnologii i mashinostroyeniye. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsesta-testirovaniya-bortovyh-sistem-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (date of appeal: 06.10.2025)

20. Polyakov V.B., Ignatova N.A., Sentsov A.A., Ivanov S.A. Multicriteria Selection of a Radar Data Compression Method // Trudy MAI. 2025. № 140 URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184071>

21. Kornilov A.V., Korchagin K.S., and Losev V.V. Development of Algorithms for a Complex Measurement and Navigation System for Aviation Applications Based on Domestic Components // Trudy MAI. 2021. №117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156235>

Информация об авторах

Поляков Вадим Борисович, доктор технических наук, доцент, доцент базовой кафедры инновационного проектирования, развития предпринимательства и информатики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vadim7702@yandex.ru

Сенцов Антон Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: toxx@list.ru

Сергей Александрович Иванов, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kabalustuk@mail.ru

Ненашев Сергей Александрович, заведующий лабораторией промышленной электроники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nenashev-sergey178@mail.ru

Information about the authors

Vadim B. Polyakov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Basic Department of Innovative Design, Entrepreneurship and Informatics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia; e-mail: vadim7702@yandex.ru

Anton A. Sentsov, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Computing Systems and Networks, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia; e-mail: toxx@list.ru

Sergey A. Ivanov, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Information Systems and Technologies, Saint Petersburg State Economic University, Saint Petersburg, Russia; e-mail: kabalustuk@mail.ru

Sergey A. Nenashev, Head of the Laboratory of Industrial Electronics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia; e-mail: nenashev_sergey178@mail.ru

Получено 10 ноября 2025 ● Принято к публикации 15 декабря 2025 ● Опубликовано 30 декабря 2025
Received 10 November 2025 ● Accepted 15 December 2025 ● Published 30 December 2025
