

**СИТУАЦИОННАЯ ОСВЕДОМЛЕННОСТЬ: ОТ ПАРАДИГМЫ
«ОБРАБОТКИ ДАННЫХ» К ПАРАДИГМЕ «УПРАВЛЕНИЯ ВОСПРИЯТИЕМ»****В. В. Астреин, С. И. Кондратьев, В. И. Филатов**

ФГБУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
г. Новороссийск, Российская Федерация

Темой исследования является разработка архитектуры системы ситуационной осведомленности для морского автономного судна четвертого уровня. Основная проблема, исследуемая в работе — неспособность классических алгоритмов слияния данных (фильтров Калмана, нейросетевых фузий) различать инструментальные отказы, деградацию точности и целенаправленные кибератаки, что критично для безопасной навигации автономного судна без экипажа на борту. Предложенная архитектура включает три ключевых компонента. Первый компонент — двухуровневая сенсорная организация — постоянно активное ядро, состоящее из основных навигационных и специализированных датчиков: лидары, оптические камеры и тепловизоры, подключаемые по сценарию. Для выполнения Правила 5 Международных правил по предупреждению столкновений судов (МППСС-72) о постоянном наблюдении предложена концепция «неотключаемого сенсорного ядра» — минимального набора датчиков, которые должны функционировать непрерывно вне зависимости от сценария. Адаптация к условиям плавания реализуется не отключением сенсоров, а динамическим взвешиванием их данных в модуле слияния. Второй компонент — менеджер доверия к сенсору — выполняет протокол управления соединением датчика, обеспечивающий изоляцию недостоверных источников до попадания данных в тракт слияния. Третий компонент — классификатор навигационных сценариев, который на основе детекторов освещенности, видимости, плотности движения и зоны плавания динамически назначает доверительные веса сенсорам в алгоритмах ковариационного слияния. Новизна предложенного подхода заключается во введении метаосведомленности, когда система ситуационной осведомленности оценивает не только внешнюю обстановку, но и собственное состояние («доверие к датчикам»). Впервые предложен переход от парадигмы «слияния данных» к парадигме «управления восприятием», что создает техническую основу при проектировании автономных судов.

Ключевые слова: автономное судно, ситуационная осведомленность, сборка сенсоров, слияние данных, доверие к сенсору, трехуровневая архитектура, инструментальная надежность, функциональная полнота восприятия, классификатор сценариев, неотключаемое сенсорное ядро.

Для цитирования:

Астреин В. В. Ситуационная осведомленность: от парадигмы «обработки данных» к парадигме «управления восприятием» / В. В. Астреин, С. И. Кондратьев, В. И. Филатов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 190–203. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-190-203. — EDN CQQKAW.

**SITUATIONAL AWARENESS: FROM A DATA PROCESSING PARADIGM
TO A PERCEPTION MANAGEMENT PARADIGM****V. V. Astrein, S. I. Kondratiev, V. I. Filatov**

Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

This article is devoted to the development of a situational awareness system architecture for a Level 4 autonomous marine vessel. The main problem addressed in this work is the inability of classical data fusion algorithms (Kalman filters, neural network-based fusion) to distinguish between sensor failures, accuracy degradation, and targeted cyberattacks, which is critical for ensuring safe unmanned navigation of an autonomous vessel. The proposed architecture includes three key components. The first component is a two-tier sensor organization: a continuously active core consisting of primary navigation and specialized sensors (LiDAR, optical cameras, and thermal imagers), activated according to the scenario. To comply with Rule 5 of the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs-72) concerning continuous lookout, the concept of a “non-switchable sensor core” is proposed — a minimum set of sensors

that must function continuously regardless of the scenario. Adaptation to navigation conditions is achieved not by disabling sensors, but by dynamically weighting their data in the data fusion module. The second component, the Sensor Trust Manager, implements a sensor connection management protocol that ensures the isolation of unreliable sources before the data enters the fusion process. The third component, the navigation scenario classifier, dynamically assigns confidence weights to sensors in covariance-based fusion algorithms based on illumination, visibility, traffic density, and navigation area. The novelty of the proposed approach lies in the introduction of meta-awareness: the situational awareness system evaluates not only the external environment but also its own state ("sensor trust"). For the first time, a transition from the "data fusion" paradigm to the "source trust management" paradigm is proposed, creating a technological foundation for the design of autonomous vessels.

Keywords: autonomous vessel, situational awareness, sensor suite, data fusion, sensor trust, three-layer architecture, instrumental reliability, functional completeness of perception, navigation scenario classifier, non-switchable sensor core.

For citation:

Astrein, Vadim V., S. I. Kondratiev and V. I. Filatov. "Situational awareness: from a data processing paradigm to a perception management paradigm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 190–203. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-190-203.

Введение (Introduction)

Переход к автономному судовождению четвертого уровня (полная автономия без экипажа на борту) ставит перед инженерной мыслью принципиально новый класс задач. Если традиционные системы автоматизации лишь ассистировали человеку, то теперь искусственный интеллект должен полностью принять на себя функции капитана, важнейшей из которых является *ситуационная осведомленность* (Situational Awareness) — способность воспринимать, понимать и прогнозировать состояние окружающей среды.

Ключевой вызов заключается в том, что инструментальная надежность датчиков не равна функциональной надежности восприятия. Можно установить три резервных радара и пять лидаров, но если система не умеет отличить отказ датчика от внешней атаки, если она не знает, какой сенсор заслуживает доверия в тумане, а какой — в узкости, то избыточность превращается в балласт.

Существующие подходы к слиянию данных (фильтры Калмана, нейросетевые фузии) рассматривают датчик как всегда честный, но иногда шумный источник. Реальность сложнее: датчик может быть взломан, загрязнен или находится под воздействием внешней помехи, которая делает его показания не просто неточными, а целенаправленно ложными.

Несмотря на впечатляющий прогресс в области сенсорики и машинного обучения, существующие архитектуры систем ситуационной осведомленности (ССО) наследуют подходы, разработанные для судов с экипажем. Они ориентированы на представление данных человеку, а не на автономное принятие решений машиной. Это порождает фундаментальное противоречие: технически система может «видеть» мир, но юридически и функционально она не способна гарантировать исполнение, например, Правила 5 МППСС-72, согласно которому необходимо «*постоянное наблюдение с помощью всех имеющихся средств*».

Настоящее исследование исходит из презумпции недоверия к сенсору. В данной работе предлагается архитектура, в которой каждый источник данных проходит через протокол верификации, изоляции и восстановления, прежде чем его показания попадут в контур принятия решений. Такой подход позволяет не только повысить надежность ССО, но и впервые формально замкнуть требования МППСС-72 на техническую реализацию автономного судна. Таким образом, целью исследования является разработка архитектуры системы ситуационной осведомленности для морского автономного судна четвертого уровня, обеспечивающей функциональную полноту восприятия, инструментальную надежность и киберустойчивость, а также соответствие требованиям Правила 5 МППСС-72.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ требований Правила 5 МППСС-72 и их интерпретация для полностью автономных систем.

2. Обоснование сенсорной архитектуры.
3. Разработка протокола управления доверием к сенсору.
4. Построение адаптивного классификатора навигационных сценариев.
5. Интеграция предложенных компонентов в единую архитектуру системы ситуационной осведомленности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В литературе понятие «ситуационная осведомленность» тесно связано с авиационной отраслью [1–4] и соответствует специфике одной области — пилотированию самолетов. Однако сейчас ситуационная осведомленность изучается в различных областях: образовании, диспетчеризации аэропортов, техническом обслуживании, прогнозировании погоды, медицине и т. д. Несмотря на то, что ситуационная осведомленность была первоначально разработана для решения задач авиации (пилотирование и управление воздушным движением), ее концепция может использоваться в автономном мореплавании. В настоящее время осведомленность о морской ситуации является основой для разрабатываемых автономных судов и определяется уровнями их автономности.

Международная морская организация (ИМО) определила четыре уровня автономности для морских автономных надводных судов (МАНС): от судов с автоматизированными процессами и поддержкой принятия решений, судов с дистанционным управлением (с экипажем и без него) до полностью автономных судов. Утверждается, что по мере развития технологий в сфере морских операций системы ситуационной осведомленности будут собирать большие объемы данных, анализировать и использовать их для достижения высочайшего уровня безопасности, защищенности и эффективности автономных судов. Исследование [5] показывает, что внедрение МАНС даст много преимуществ, в то же время существует множество барьеров, которые могут препятствовать полной интеграции МАНС в современное мореплавание.

В конце XX в. был предложен ряд моделей, основанных на понятии ситуационной осведомленности. Однако наибольшее распространение получила *трехуровневая модель ситуационной осведомленности Миры Эндсли* [4], состоящая из трех иерархических уровней оценки ситуационной осведомленности. Эта модель представляет собой цикл обработки информации, ее восприятия, понимания и прогнозирования. Уровни ситуационной осведомленности, предложенные в [4], следующие:

Уровень 1 — восприятие элементов окружающей среды — самый низкий уровень ситуационной осведомленности, связанный с восприятием информации от бортовых датчиков (например, курс и скорость своего судна, судов-целей, условий плавания и т. д.).

Уровень 2 — понимание текущей ситуации, которое следует за восприятием элементов в случае, если данные можно интегрировать и синтезировать для понимания их значимости (например, существование опасности столкновения, расстояние и время кратчайшего сближения и т. д.).

Уровень 3 — прогнозирование будущего состояния судна — наивысший уровень ситуационной осведомленности, связанный со способностью прогнозировать развитие ситуации на основе текущих событий и динамики процесса, что позволяет своевременно принимать решения (например, прогнозировать маневры при расхождении судов).

Модель ситуационной осведомленности, приведенная на рис. 1, представляет собой три иерархических уровня оценки ситуационной осведомленности как один из этапов принятия решений. В этой модели ситуационная осведомленность четко обозначена как отдельный этап, а не как единый комбинированный процесс — от восприятия окружающей среды до принятия решения и оказания управляющего воздействия на механизмы, обеспечивающие навигационную безопасность плавания судна, предупреждение столкновений судов и безопасность внутренней структуры судна.

Трехуровневая модель ситуационной осведомленности [4] для дистанционно управляемых и автономных интеллектуальных судов крайне важна для восприятия окружающей среды посредством множества источников данных и обработки информации в режиме реального времени с помощью систем искусственного интеллекта (ИИ). Такая модель ситуационной осведомленности должна решать следующие задачи:

- во-первых, за счет избыточности навигационной информации должна отбирать лучшие параметры или реконфигурировать систему на сбор наиболее значимых данных для мониторинга, анализа ситуаций и угроз применительно к преобладающим обстоятельствам и условиям плавания;
- во-вторых, осуществлять синтез датчиков автономного судна, превращая их из простых сборщиков данных в интеллектуальные информационные системы с повышенной точностью и своевременностью данных;
- в-третьих, повышать надежность системы за счет слияния информации датчиков, уменьшая влияние некорректных данных или помогать находить решения, когда собранные данные непригодны для конкретной задачи.

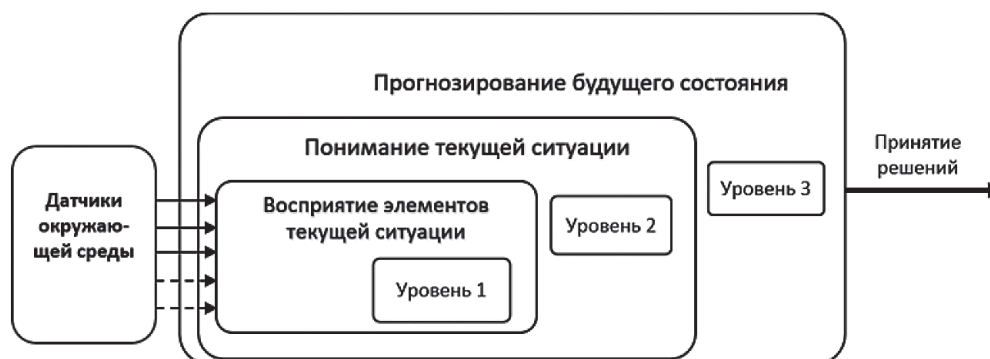


Рис. 1. Три иерархических уровня оценки ситуационной осведомленности
Fig. 1. Three hierarchical levels of situational awareness assessment

Выполнение этих задач связано с обработкой данных множества датчиков, интегрированных с системами ИИ для постоянного обновления знаний о состоянии окружающей среды. Следовательно, исследования на этапе разработки концепции МАНС должны быть направлены на проблемы, связанные с разработкой архитектуры и методов обработки данных с РЛС, ЛИДАР, ГНСС, АИС, оптических камер и других датчиков, информация которых должна обрабатываться в реальном времени для обнаружения судов и навигационных опасностей. Постоянно интегрируя сенсорные потоки, модели должны распознавать мелкие или удаленные объекты (человека в воде, плавающий мусор и т. д.), вести наблюдение в условиях ограниченной видимости, в условиях сильной качки, неблагоприятных гидро- и метеоусловиях. ССО МАНС с помощью ИИ должна будет обеспечивать более полное и точное понимание окружающей среды в режиме реального времени, что является крайне важным для автономных судов.

По мере развития сенсорных технологий и роста вычислительных возможностей ССО станет фундаментальной инфраструктурой в интеллектуальных системах автономных судов. Следовательно, задача будет заключаться в выборе подходящих методов, алгоритмов, архитектур и комбинаций датчиков с целью достижения безопасности, точности и эффективности по сравнению с использованием отдельных датчиков и разобщенных потоков данных.

Результаты (Results)

Архитектура МАНС на стадии разработки концепции прежде всего должна отвечать следующим основным требованиям:

- во-первых, инструментальной надежности (избыточность, отказоустойчивость, синхронизация);
- во-вторых, в функциональной полноте восприятия окружающей среды (сборка сенсоров должна быть осуществлена в зависимости от решения задачи).

Инструментальная надежность датчиков МАНС. Датчики являются неотъемлемой частью технических средств судовождения. Они делятся на пассивные и активные, которые могут быть использованы для решения различных задач навигации и предупреждения столкновений судов.

Пассивные системы навигации предполагают прием информации о положении и параметрах движения судна от внешних источников. Примером пассивной навигации являются системы определения координат с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС): GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и др., являющихся комплексом электронно-технических систем, в состав которых входит наземное и космическое оборудование, предназначенное для определения местоположения (позиционирования) в общепринятой системе координат, а также параметров движения (скорости, направления движения и др.).

Активные системы навигации направлены на получение информации о положении судна автономными способами вне зависимости от воздействий и контактов с окружающей средой. Одними из основных направлений в данном типе навигации являются локальные системы навигации, основанные на лазерных дальномерных и инерциальных системах навигации (ИНС).

В морской навигации используются как активные, так и пассивные сенсоры, каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны, комплексное использование которых позволяет нивелировать недостатки отдельных систем. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики основных типов датчиков, их преимущества и недостатки.

Таблица 1

Характеристики основных типов датчиков

Table 1

Characteristics of the main types of sensors

Тип датчика	Принцип действия	Преимущества	Проблемы, недостатки
ГНСС (GPS/ГЛОНАСС)	Прием сигналов со спутников для определения координат	Высокая точность абсолютного позиционирования	Требует прямой видимости спутников, возможны помехи
РЛС	Активное излучение радиоволн для обнаружения объектов	Независимость от освещения и погоды	Высокая стоимость, наличие слепых зон, помехи от морских волн
АИС (Автоматическая идентификационная система)	Передаёт и принимает данные о судне (позиция, курс, скорость) по радиочастоте	Большой набор статистической и динамической информации для безопасности мореплавания	Не работает при выключенном транспондере. Дискретность инфо зависит от скорости судна
ИНС (Инерциальная навигационная система)	Измерение ускорения и угловых скоростей для расчета позиции	Полная автономность, не зависит от внешних сигналов	Накопление ошибки (дрейф) с течением времени
Оптические камеры	Пассивное получение изображений окружающей обстановки	Высокая детализация, возможность анализа с помощью ИИ	Зависимость от погодных условий и освещенности

Сбор данных на МАНС во многих случаях может завершиться неудачей. Потеря данных с ключевых датчиков в системах МАНС может быть связана с аппаратными, программными или эксплуатационными причинами.

Основные причины потери данных:

- аппаратные сбои датчиков и контроллеров: выход из строя самих датчиков, поломка или сбой в работе вычислителя или модулей ввода-вывода из-за скачков напряжения, перегрева или физического износа;
- проблемы со связью и передачей данных: обрыв кабелей, сбой сетевых протоколов, неисправность коммуникационных модулей или ошибки настройки сети, которые приводят к потере пакетов данных;
- электромагнитные помехи: помехи от силового электрооборудования или частотных преобразователей;

- программные ошибки и сбои конфигурации: сбой встроенного контроллера, неверные настройки;
- некорректное обслуживание: ошибки персонала при перезагрузке системы, изменении конфигурации, обновлении ПО;
- синхронизация времени: если GPS отметки времени датчиков отличаются даже незначительно, то их синтез будет сильно ухудшаться;
- дрейф датчиков: в течение месяцев и лет выходные данные датчиков изменяются из-за старения компонентов, теплового воздействия и агрессивной среды (танкера, газозовы, химозовы);
- шум и качество данных: реальные данные датчиков повреждены шумами, помехами окружающей средой;
- калибровка датчиков: датчики должны быть индивидуально калиброваны по известным эталонным стандартам, и при комбинировании нескольких датчиков перекрестная калибровка обеспечивает правильное совпадение измерений;
- вычислительные ограничения: вычислительные алгоритмы должны обеспечить баланс точности с имеющимися вычислительными возможностями;
- конфиденциальность и безопасность: по мере того как синтез датчиков позволяет более детально воспринимать процессы и окружающую среду, чаще возрастают риски киберугроз, а значит, данные датчиков требуют особых методов защиты.

Для МАНС архитектура ССО должна отвечать требованию восстановления работоспособности датчика на многоуровневом дублировании. Потеря данных даже с одного ключевого датчика должна компенсироваться в реальном времени. Ключевые датчики ССО и методы их восстановления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ключевые датчики и методы их восстановления

Table 2

Key sensors and methods for their recovery

Категория данных	Ключевые датчики	Причины потерь	Способы восстановления
Широта, долгота, курс, скорость	ГНСС, ИНС, Доплеровский лаг, Гирокомпас	Помехи, затенение, сбой антенны, отказ оборудования	1. Автоматическое переключение на резервный ГНСС-приемник или систему (например, с GPS на ГЛОНАСС). 2. Краткосрочная навигация по счислениям (Dead Reckoning) на основе данных ИНС (ускорения, угловые скорости) и данных лага. ИНС способна поддерживать точную позицию в течение нескольких минут после потери ГНСС. 3. Коррекция от визуальной / радарной навигации — привязка к известным береговым объектам или буям.
Информация о судах-целях (другие суда)	АИС, РЛС, ЛИДАР, Оптические / Тепловизионные камеры	Перегрузка данных АИС, аппаратный сбой АИС, погодные помехи для радара/камер	1. Дублирование РЛС. 2. Слияние данных (Fusion) от РЛС и АИС: если цель теряет АИС-сигнал, она продолжает отслеживаться РЛС по тому же вектору движения. 3. Визуальное подтверждение и классификация системами компьютерного зрения: камеры могут определить класс судна и параметры движения, даже если они не передаются АИС.
Окружающая среда	ЭКДИС	Нарушение физических соединений. Проблемы с данными или ПО	1. Переключиться на резервную систему. 2. Проверить целостность кабелей, подключений, переключить источник данных. 3. Перезагрузка системы или переустановка ПО.

Требование к инструментальной надежности датчиков МАНС диктует необходимость перехода к интеллектуальной стратегии — прогностическому (предиктивному) обслуживанию ключевых датчиков системы ситуационной осведомленности, суть которого заключается в предсказании момента отказа конкретного датчика на основе анализа его фактического состояния.

Ключевым технологическим элементом, который делает эту стратегию реализуемой, является *цифровой двойник* — динамическая виртуальная копия как отдельного датчика, так и ССО в целом, где непрерывный поток контролируемых параметров ССО в реальном времени обрабатывается интеллектуальной нейронной сетью рекуррентного типа (RNN), выявляя тенденции к переходу в предотказные состояния агрегатов и элементов ССО.

Другие классы нейронных сетей (многослойные перцептроны и сверточные нейронные сети) могут использоваться для классификации дефектов и предотказных состояний. Для автономных судов проблема надежной работы датчиков МАНС решается также созданием архитектуры эффективной избыточной и интеллектуальной сенсорной системы.

Задача функциональной полноты восприятия окружающей среды ССО. Архитектура ССО должна объединять доступную информацию из мультисенсорных систем восприятия МАНС, чтобы создать единое согласованное понимание окружающей среды. Например, обнаружение судов и небольших объектов должно обеспечиваться как на достаточно больших расстояниях, так и с покрытием мертвых и теневых секторов с помощью РЛС, лидаров, оптических и инфракрасных камер, а для измерения расстояния до целей может использоваться другая сборка сенсоров, например, РЛС и лазерный дальномер (LRF).

Несмотря на то, что существующие исследования достаточно хорошо описывают технические возможности отдельных датчиков, они не учитывают эффективность сборки сенсорных комплексов для различных конфигураций датчиков на основе решаемых задач судовождения. Выбор наборов датчиков часто преподносится как эвристический процесс, ориентированный на общие технические характеристики датчиков и их возможности по восприятию окружающей среды. На сегодняшний день нет четкой методологии, которая могла бы определить эффективность сборки датчиков и ответить на вопрос: достаточна ли минималистичная сборка или необходимая сложная конфигурация датчиков для решения задач автономного судовождения.

Исследования по разработке архитектур интеллектуальных ССО, которые в состоянии воспринимать информацию о состоянии внешнего мира и собственном состоянии ведутся как в России, например в [6–7], так и за рубежом [8–10]. В [7] предложен синтез моделей когнитивных систем мониторинга, который заключается в нахождении целесообразного способа построения вычислительной модели, при котором достигается экстремум основного показателя эффективности (объема эффективно потребляемых ресурсов) при ограничениях на вспомогательные показатели эффективности.

Необходимо найти целесообразный способ B_0 построения вычислительной модели C_0 , при котором достигается W_{opt} — экстремум основного показателя эффективности (объема эффективно потребляемых ресурсов) при ограничениях на вспомогательные показатели эффективности $M(B_V)$ — параметры моделей когнитивного мониторинга:

$$W_{\text{opt}}(B_0) = \text{extr}_{V \in \Lambda} \{W_V(M(B_V))\},$$

где Λ — множество вариантов построения вычислительных моделей;

$$M(B_V) = F(R(B_V), E(B_V), T(B_V)),$$

где $M(B_V) \in DM$ — область допустимых значений мониторинга; $R(B_V) \in DR$, DR — область допустимых изменений требований к мониторингу; $E(B_V) \in ER$, ER — ограничения, определяемые параметрами среды мониторинга; $T(B_V) \in ET$, ET — множество допустимых технологий.

Как модель, так и способ ее построения определяются на каждый момент времени t_k . Таким образом, на интервале времени $[t_{k-1}, t_{k+i}]$ определяются $2t + 1$ моделей: $\{B_0(t_{k-i+i}), C_0(t_{k-i+i})\}_0^{2t}$.

Рассмотренный подход к построению вычислительных моделей расширяет возможности синтеза развивающихся (перестраивающихся) когнитивных систем мониторинга и позволяет считать его элементом методологической базы теории когнитивных систем мониторинга. Значимость исследования [7] заключается в предоставлении систематической основы, которая меняет парадигму проектирования от подхода «чем больше, тем лучше» к интеллектуальной контекстно-ориентированной композиции, что позволяет разрабатывать действительно надежные и эффективные сенсорные архитектуры с возможностью применения на МАНС.

В работе [9] предложена двухступенчатая процедура систематического сравнения различных комбинаций датчиков от минималистичных до максимально спроектированных архитектур на основе сценариев. Для оценки и систематического сравнения различных конфигураций датчиков в [9] предложены шесть параметров эффективности (1 — точность измерения дистанций; 2 — точность измерения пеленгов; 3 — дальность обнаружения, 4 — поле зрения; 5 — дискретность информации и 6 — энергопотребление), которые отражают как эксплуатационные требования МАНС, так и обеспечивают сравнение различных типов датчиков по некоторому фактору базовой значимости каждого датчика (α_i) как основа для агрегирования индивидуальных параметров датчиков $S_{core}(i)$ в единый репрезентативный профиль эффективности наборов датчиков $\sum_k S_{core}(k)$ для каждого сценария:

$$\alpha_i = \frac{S_{core}(i)}{\sum_k S_{core}(k)}.$$

где α_i — оценка для каждого датчика i количественно оценивает, насколько хорошо он работает самостоятельно в соответствующем сценарии.

Чтобы определить значимость сенсоров, связанных со сценариями, нормализуются оценки всех датчиков для сценария s :

$$\alpha_i^s = \frac{S_{core\ s}(i)}{\sum_k S_{core\ s}(k)},$$

где $S_{core\ s}(i)$ — индивидуальный балл сенсора i в сценарии s .

Таким образом, каждый датчик i в каждом сценарии s получает взвешенную долю α_i^s , что отражает его значимость для соответствующего сценария; α_i^s -профиль служит основой для последующего слияния нескольких датчиков.

В результате слияния датчиков создается матрица принятия решений для каждого сценария s , включающая опции различных наборов датчиков, с помощью которых можно определить, какой набор датчиков ближе всего подходит к оптимальной конфигурации. Этот подход детализируется в [10] и обеспечивает более стабильные ранжирование датчиков, а также снижает восприимчивость к эффектам доминирования параметров, позволяя распределять приоритеты конфигураций сенсоров в различных операционных контекстах. Необходимо отметить, что рассматриваемый подход, предложенный в 2025 г., является перспективным при разработке ССО.

Учитывая [8–10], вначале авторами исследования была предложена *двухуровневая архитектура восприятия* окружающей среды («как ведет наблюдение судоводитель») для решения конкретной задачи судовождения с целью достижения «максимальной эффективности». Главные правила сборки датчиков в такой архитектуре основаны на базовой конфигурации и включении / выключении дополнительных датчиков для восприятия окружающей среды:

1-й уровень. Базовым ядром такой архитектуры являются три семейства датчиков, которые работают всегда независимо от обстоятельств и условий плавания:

- РЛС — всепогодный сенсор, хорошо работающий на больших расстояниях в любую погоду, но имеющий низкую частоту обновления информации (~0.5 Гц) и сильные погрешности на волнении;

- АИС (автоматическая идентификационная система) — информационная система для непрерывного обмена статической, динамической информацией между судами, а также береговыми станциями с помощью радиоволн УКВ диапазона;

– ГНСС и ИНС (инерциальная система навигации) — ГНСС обеспечивает точные координаты, но подвержена влиянию ионосферных факторов, солнечной активности, атакам злоумышленников, в то время как ИНС обеспечивает в течение непродолжительного времени независимую работу и высокую частоту обновления информации.

2-й уровень — дополнительный — включается для решения задачи в той или иной ситуации. Лидар, оптическая и инфракрасные камеры позволяют вести наблюдение в теневых секторах РЛС с высокой частотой обновления информации. Лидар позволяет получать точную геометрию объектов, а камера — классифицировать объекты на воде (судно / буй / катер), но подвержена влиянию качки, заливаемости и забрызгиванию морской водой, освещенности.

Идея двухуровневой архитектуры заключается в том, чтобы мощные, но «тяжелые» нейросети на камерах и лидарах подключались только тогда, когда нужно детально рассмотреть конкретный объект (например, подозрительный катер). Максимальная эффективность двухуровневой архитектуры достигается, когда датчики взаимно дополняют друг друга, подключаясь для выполнения конкретной задачи (например, плавание в узкостях, швартовка, сопровождение, охрана судна и т. д.).

Недостаток предложенной двухуровневой архитектуры восприятия окружающей среды заключается в том, что она не рассматривает случаи и природу отказа: сбой датчика, внешняя атака, деградация точности, потеря калибровки, загрязнение датчика — все это требует разных протоколов и мер реакции на инцидент. Например, пока неисправный датчик подключен к шине, его ошибочные данные могут «загрязнять» фильтр Калмана или процедура восстановления после отказа датчика (валидация) требует специальной проверки для подтверждения пригодности и безопасности включения этого датчика для дальнейшего применения.

Для обеспечения работоспособности ССО в целом текущая архитектура в случае выхода из строя какого-либо датчика должна предусмотреть протокол резервирования, переключая поврежденный датчик на резервный. Резервирование здесь не просто «протокол отключения неисправного датчика» или переход на дублирующий датчик, но и протокол управления доверием к источнику данных (Sensor Trust Management Protocol).

Предложенная двухуровневая архитектура восприятия среды действительно упускает слой между физическим датчиком и модулем слияния; следовательно, она должна быть дополнена соответствующим блоком (*менеджером доверия к сенсору*) между физическим уровнем датчика и модулем слияния данных (рис. 2). Этот блок реализует протокол управления доверием и выполняет следующие функции: детекцию аномалий, изоляцию, компенсацию, восстановление.



Рис. 2. Трехуровневая архитектура ССО с учетом протокола управления соединением датчиков
Fig. 2. Three-layer architecture of the situational awareness system with consideration of the sensor connection management protocol

Предложенный протокол управления (третий слой) — см. рис. 2 — соединением датчиков добавляет в архитектуру ССО дополнительно:

- доверие как управляемый ресурс: датчик должен «заработать» право передавать данные на слияние;
- различение отказов и атак: разные стратегии реакции на инцидент;
- изоляцию «грязных» данных на периферии до «загрязнения фильтров»;
- автоматическое восстановление и реинтеграцию;
- полную прослеживаемость протокола управлением соединения датчиков: каждый акт отключения / включения фиксируется / логируется (отказ → изоляция → компенсация → восстановление).

Оценивая правовую сторону предложенной трехуровневой архитектуры ССО, становится ясно, что она не учитывают еще один существующий нормативный базис: Международные правила по предупреждению столкновений судов (МППСС-72). Правилом 5 МППСС-72 установлено следующее требование: *«Каждое судно должно постоянно вести надлежащее визуальное и слуховое наблюдение, так же, как и наблюдение с помощью всех имеющихся средств, применительно к преобладающим обстоятельствам и условиям»*. Это требование к надлежащему наблюдению может выполняться на дистанционно управляемых судах без существенных изменений данного правила. Для полностью автономных судов четвертого уровня автономности предложенная архитектура не может рассматриваться как соответствующая МППСС-72.

Чтобы компенсировать этот недостаток для МАНС четвертого уровня автономности, были предложены *формальная архитектурная спецификация и концептуальная модель наблюдения* с использованием принципа «неотключаемого базового ядра» и адаптивного взвешивания.

Правовая позиция термина «визуальное наблюдение» для автономной навигации может быть реализована совокупностью оптических, инфракрасных и тепловизионных сенсоров (Electronic Eye), термин «слуховое наблюдение» реализуется системой акустического мониторинга (Electronic Ear), термин «все имеющиеся средства» означает тотальную и непрерывную активацию всех сенсорных систем, установленных на судне вне зависимости от ситуации, условий и обстоятельств плавания.

Ключевое отличие рассматриваемого подхода от классического судовождения, когда вахтенный помощник, исходя из «опыта обычной и хорошей морской практики», выбирает, какие датчики использовать в создавшейся ситуации, заключается в том, что в автономной системе все приборы используются постоянно. Адаптация в автономном судовождении к обстоятельствам условиям плавания осуществляется не на уровне включения / выключения, а на уровне алгоритмического доверия к данным датчиков.

Архитектура системы наблюдения строится на принципах двухуровневой сенсорной архитектуры, описанной со следующими наборами датчиков:

Уровень 1 — базовое сенсорное ядро: РЛС (X/S), АИС класса А, ГНСС/ИНС, гироскоп, оптические камеры видимого спектра (круговой обзор), тепловизионные / ИК-камеры, микрофонные массивы (акустические камеры), ECDIS. Режим функционирования непрерывный. Отключение любого датчика в штатном режиме плавания квалифицируется как потеря соответствия, т. е. отключать датчики нельзя, что, согласно Правилу 2, автоматически инициирует переход судна в «ограниченно функциональное» состояние с уведомлением берегового центра управления.

Уровень 2 — специализированные сенсорные модули: ЛИДАР, доплеровские лаги, гидролокаторы, многолучевые эхолоты, стереокамеры высокого разрешения. Режим функционирования: постоянная аппаратная готовность (непрерывное электропитание, рабочее состояние сенсоров), программно-управляемая активация передачи данных в тракт слияния. Физическое отключение допускается только в режиме стоянки или по команде берегового оператора при подтвержденной неисправности.

Адаптация к преобладающим обстоятельствам и условиям плавания. Основой адаптации к обстоятельствам и условиям плавания предложен оригинальный классификатор, спроектированный специально под двухуровневую архитектуру восприятия с адаптивным взвешиванием и требованиями

Правила 5 МППСС-72. Классификатор сценариев, являясь компонентом модуля слияния данных (Fusion Node), выполняет функцию метаосведомленности: он определяет, в каких «преобладающих обстоятельствах и условиях» (формулировка Правила 5) находится судно в данный момент. Классификатор не отключает сенсоры, он лишь назначает доверительные коэффициенты для блока слияния, сохраняя полное соответствие императиву «постоянного использования всех имеющихся средств».

Ядром алгоритма классификатора является композитная классификация, работающая как для однозначной классификации с использованием продукционных правил, так и для вероятностного Байесовского корректора, предназначенного для нештатных или неоднозначных комбинаций данных, обученного на исторических данных. На выходе классификатор формирует матрицу доверительных коэффициентов для каждого активного сенсора (табл. 3).

Таблица 3

Матрица доверительных коэффициентов (пример реализации)

Table 3

Trust Coefficient Matrix (Implementation Example)

Сценарий / Обстоятельства	РЛС	Оптика	Тепловизор	ЛИДАР	АИС	Микрофоны
Открытое море, день $V > 15$ уз	0,7	0,6	0,3	0,2	0,8	0,1
Открытое море, ночь	0,8	0,1	0,8	0,3	0,8	0,2
Туман / осадки, видимость < 1 мили	0,9	0,0	0,4	0,1	0,7	0,5
Стесненные воды, порт	0,4	0,7	0,6	0,8	0,6	0,3
Обнаружение сигнала бедствия	0,7	0,8	0,8	0,5	0,9	0,9

Коэффициенты не являются порогами включения / выключения. Все сенсоры непрерывно подают данные в систему. Коэффициент 0,0 означает, что данные датчика не влияют на формирование управляющего решения, но продолжают архивироваться и могут быть использованы для постанализа или диагностики. Изменение весов осуществляется автоматически на основе классификации текущей навигационной ситуации.

Предложенный алгоритм классификатора сценариев, полностью соответствует Правилу 5 МППСС-72 (все сенсоры работают непрерывно, веса меняются, а не включаются / выключаются, интегрируются в разработанную ранее трехуровневую архитектуру восприятия среды, используют детекторы на основе данных, присутствующих в системе (РЛС, АИС, ЭКДИС и т. д.), является расширяемым — база правил может пополняться по результатам эксплуатации. Таким образом, предложенная архитектурная спецификация и концептуальная модель наблюдения обеспечивают:

- полноту охвата (на судне установлены и постоянно функционируют средства, перекрывающие все виды наблюдения, согласно требованиям Правила 5 МППСС-72: визуальное, слуховое, радиолокационное, идентификационное;
- непрерывность наблюдения (архитектура исключает возможность преднамеренного или случайного отключения любого датчика в штатных режимах плавания);
- адаптивность в рамках МППСС-72 (изменение весов слияния данных не является «отказом от использования средства наблюдения», а служит методом интерпретации данных в соответствии с преобладающими условиями, что допускается формулировкой «применительно к условиям и обстоятельствам»);
- документирование: все акты адаптации взвешивания логируются, архивируются и доступны для постинцидентного анализа, что обеспечивает прозрачность и доказуемость надлежащего исполнения обязанности наблюдения на автономном судне.

Обсуждение (Discussion)

Предложенная архитектура не является окончательным решением проблемы ситуационной осведомленности. К этим ограничениям относятся:

- зависимость от качества классификатора сценариев — ошибочная классификация навигационной ситуации (например, неверное определение зоны плавания) может привести к неоптимальному назначению весов;

— вычислительная сложность — одновременная работа протокола доверия к датчику на каждом сенсоре и централизованного адаптивного классификатора сценариев требует резервирования вычислительных мощностей;

— неопределенность трактовки МППСС-72 — окончательное признание «электронного глаза» и «электронного уха» эквивалентом человеческого наблюдения остается предметом международного обсуждения.

Тем не менее полученные результаты определяют направление развития нормативной базы: предлагаемая архитектура может служить технической основой для интерпретации Правила 5 при сертификации автономных судов.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование направлено на разрешение фундаментального противоречия между классическими методами слияния сенсорных данных и требованиями полностью автономной навигации: традиционные подходы рассматривают датчик как источник с известной статистической ошибкой, но не учитывают возможность целенаправленной деградации, кибератак и контекстной недостоверности информации.

Впервые предложена архитектура ситуационной осведомленности, в которой требования Правила 5 МППСС-72 («постоянное наблюдение с помощью всех имеющихся средств») формализованы как императив неотключаемости базового сенсорного ядра. Показано, что адаптация к условиям плавания должна реализовываться не коммутацией датчиков, а динамическим взвешиванием их данных при сохранении физической непрерывности измерений. Разработан формальный аппарат, впервые вводящий различие отказов, деградации и внешних воздействий на уровне протокола соединения датчиков.

Предложена гибридная модель классификатора навигационных сценариев, которая на основе детекторов освещенности, видимости, плотности движения и условий плавания назначает доверительные веса сенсорам в реальном времени.

Новизна подхода заключается в использовании метаосведомленности (осведомленности системы о собственных состояниях) для параметрической настройки фильтров Калмана. Для соблюдения Правила 5 МППСС-72 для судна четвертого уровня автономности предложены формальная архитектурная спецификация и концептуальная модель наблюдения с использованием принципа «неотключаемого базового ядра» и адаптивного взвешивания. Таким образом, в работе предложена также обоснованная архитектура ССО, в которой доверие к сенсору становится управляемым ресурсом, а не априорным допущением. Это позволяет перейти от парадигмы «обработки данных» к парадигме «управления восприятием», что является необходимым условием для безопасной эксплуатации полностью автономных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dominguez, C.* Can SA be defined? / C. Dominguez, M. Vidulich, E. Vogel, & G. McMillan (Eds.) // *Situation awareness: Papers and annotated bibliography* (Wright-Patterson AFB AL/CF-TR 1994–0085) — OH: Armstrong Laboratory. — 1994. — Pp. 5–15.
2. *Fracker M. L.* A Theory of Situation Assessment: Implications for Measuring Situation Awareness / M. L. Fracker // *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*. — 1988. — Vol. 32. — Is. 2. — Pp. 102–106. DOI: 10.1177/154193128803200222.
3. *Endsley M. R.* Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement / M. R. Endsley // *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*. — 1988. — Vol. 32. — Is. 2. — Pp. 97–101. DOI: 10.1177/154193128803200221.
4. *Endsley M. R.* Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. / M. R. Endsley // *Human Factors*. — undefined. — T. 37. — № 1. — С. 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543.
5. *Alamouh A. S.* Drivers, opportunities, and barriers, for adoption of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) / A. S. Alamouh, A. I. Ölçer, F. Ballini // *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*. — 2024. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 2411183. DOI: 10.1080/25725084.2024.2411183.

6. Астреин В. В. Навигационные системы и методы повышения их надежности и точности для решения задач предупреждения столкновений автономного судна на этапе разработки концепции / В. В. Астреин, В. И. Филатов // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3–1(61). — С. 131–144. — EDN KKPXLN. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.013.

7. Водяхо А. И. Вычислительные модели когнитивных систем мониторинга / А. И. Водяхо, Н. А. Жукова, Н. В. Климов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–3(42). — С. 147–153. — EDN YXUNOH.

8. Sanfilippo F. A multi-sensor fusion framework for improving situational awareness in demanding maritime training / F. Sanfilippo // Reliability Engineering & System Safety. — 2017. — Vol. 161. — Pp. 12–24. DOI: 10.1016/j.ress.2016.12.015.

9. Hoehner F. Scenario-Based Sensor Selection for Autonomous Maritime Systems: A Multi-Criteria Analysis of Sensor Configurations for Situational Awareness / F. Hoehner, V. Langenohl, O. el Moctar, T. E. Schellin // Journal of Marine Science and Engineering. — 2025. — Vol. 13. — Is. 10. DOI: 10.3390/jmse13102008.

10. Li X. Multi-source Data Fusion for Real-time Cybersecurity Situational Awareness and Visualization / X. Li, J. Zhang // Journal of Cyber Security and Mobility. — 2025. — Vol. 14. — Is. 04. — Pp. 955–980. DOI: 10.13052/jcsm2245–1439.1448.

REFERENCES

1. Dominguez, C., M. Vidulich, E. Vogel and G. McMillan (Eds.). “Can SA be defined?” *Situation awareness: Papers and annotated bibliography (Wright-Patterson AFB AL/CF-TR 1994–0085)*. OH: Armstrong Laboratory, 1994: 5–15.

2. Fracker, M. L. “A Theory of Situation Assessment: Implications for Measuring Situation Awareness.” *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting 32.2* (1988): 102–106. DOI: 10.1177/154193128803200222.

3. Endsley, M. R. “Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement.” *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting 32.2* (1988): 97–101. DOI: 10.1177/154193128803200221.

4. Endsley, M. R. “Toward a theory of situation awareness in dynamic systems.” *Human Factors* 37.1 (undefined): 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543.

5. Alamoush, A. S., A. I. Ölçer and F. Ballini. “Drivers, opportunities, and barriers, for adoption of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS).” *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 8.4 (2024): 2411183. DOI: 10.1080/25725084.2024.2411183.

6. Astrein, V. V. and V. I. Filatov. “Navigation systems and methods for improving their reliability and accuracy to solve problems of collision avoidance of an autonomous ship at the stage of concept development.” *Marine Intelligent Technologies* 3–1(61) (2023): 131–144. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.013.

7. Vodyakho, A. I., N. A. Zhukova, N. V. Klimov et al. “Computational models of cognitive monitoring systems.” *Marine Intelligent Technologies* 4–3(42) (2018): 147–153.

8. Sanfilippo, F. “A multi-sensor fusion framework for improving situational awareness in demanding maritime training.” *Reliability Engineering & System Safety* 161 (2017): 12–24. DOI: 10.1016/j.ress.2016.12.015.

9. Hoehner, F., V. Langenohl, O. el Moctar and T. E. Schellin. “Scenario-Based Sensor Selection for Autonomous Maritime Systems: A Multi-Criteria Analysis of Sensor Configurations for Situational Awareness.” *Journal of Marine Science and Engineering* 13.10 (2025). DOI: 10.3390/jmse13102008.

10. Li, X. and J. Zhang. “Multi-source Data Fusion for Real-time Cybersecurity Situational Awareness and Visualization.” *Journal of Cyber Security and Mobility* 14.04 (2025): 955–980. DOI: 10.13052/jcsm2245–1439.1448.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Астреин Вадим Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской университет
имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: astrein-vadim@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Astrein, Vadim V. —
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral F. F. Ushakov State
Maritime University
93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
e-mail: astrein-vadim@rambler.ru

Кондратьев Сергей Иванович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской университет
имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: mail@nsma.ru

Филатов Виктор Иванович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ Государственный морской университет
имени адмирала Ф. Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93.
E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru

Kondratiev, Sergey I. —

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral F. F. Ushakov State
Maritime University
93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
e-mail: mail@nsma.ru

Filatov, Victor I. —

PhD in Technical Sciences, assistant Professor
Admiral F. F. Ushakov State Maritime University
93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 12 февраля 2026 г.

Received: Feb 12, 2026