

Идеальный прецедент группового управления

Екатерина Михайлова

Создание автономных систем, особенно групп беспилотных летательных аппаратов, опирается в парадокс: чем сложнее поведение, тем труднее его полноценно испытать и зафиксировать. Дефицит данных о редких или плохо наблюдаемых сценариях ограничивает развитие интеллектуальных алгоритмов, а традиционные подходы к испытаниям не учитывают специфику коллективного взаимодействия. В этой работе предлагается новый подход к формированию базы прецедентов, сочетающий реальные испытания и моделирование «идеальных» ситуаций, что открывает возможности для более надёжного и адаптивного группового управления.

Введение

В вопросах управления активно развивающимся направлением является повышение уровня автономности. Уровень автономности группы объектов управления зависит от степени вовлечённости оператора в управление.

В рамках исследования теории прецедентов группового управления актуальной проблемой является фиксация прецедентов и набор необходимого их количества для формирования базы данных прецедентов.

«Под прецедентами понимается воспринимаемое разнородными и разнотипными техническими средствами явление, возникающее при выполнении (кто?) группой объектов управления заданной миссии (где?) в некоторой среде (когда?) в определённый момент времени (как?), заключающееся в формировании совокупности условий и обстоятельств, которые (почему?) в соответствии с логикой действий каждой из сторон провоцируют (что?) наступление последовательности событий, фиксируемых в виде совокупности фактов и, как следствие, формирующих ситуацию, описываемую текущим состоянием всей группы с возникновением коллизии между стратегиями поведения акторов и среды, потенциально влияющей на эффективность выполнения миссии и приводящей к необходимости принятия решений по дальнейшим действиям, направленным на обеспечение достижения целей миссии, с учётом того, что подобная ситуация уже имела место в прошлом, и по ней

были приняты решения, эффективность которых априори известна» [1].

Прецеденты возникают довольно часто, в частности, в технических задачах, таких как логистика, охрана объектов и другие. Анализ подобных прецедентов имеет критическое значение для совершенствования теоретических моделей и повышения надёжности и автоматизации перспективных образцов техники.

Основная проблема заключается в том, что в реальной практике подобные прецеденты, как правило, не фиксируются надлежащим образом. Процесс группового управления часто протекает в уникальных, невоспроизводимых условиях, что делает последующий анализ и извлечение необходимых данных крайне затруднительным. Отсутствие необходимого количества данных затрудняет анализ ситуаций, методов управления и набор базы прецедентов. Для решения указанной проблемы предлагается получать прецеденты в ходе проведения испытаний и последующего создания синтетических прецедентов. Данный подход предполагает организацию серии экспериментов, специально разработанных для проверки различных сценариев группового управления. Проведение испытаний с фиксацией определённых параметров и генерация синтетических прецедентов позволяют получать чётко документированное максимально возможное количество характеристик прецедентов группового управления, что позволит набрать необходимую базу прецедентов.

Обзор литературы

Анализ литературы показал, что в основном рассматривается проведение испытаний для отдельных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [2, 3, 4].

Статья [2] обобщает практический опыт проведения испытаний на устойчивость комплексов с беспилотными летательными аппаратами к целенаправленным кибернетическим и радиоэлектронным атакам, обозначаемым как информационно-технические воздействия.

Статья [3] носит обзорный и методический характер. Она систематизирует и подробно описывает полный цикл испытаний беспилотных авиационных комплексов – от заводских до эксплуатационных. Документ является практическим руководством, определяющим цели, этапы, методы и критерии оценки на каждом уровне тестирования.

В [5] предлагается подход для повышения эффективности прецедентного метода в системах поддержки принятия решений. Авторы предлагают извлекать необходимые прецеденты с помощью генетического алгоритма, что позволяет повысить скорость и точность их извлечения.

Наиболее близкой к тематике данной статьи является [6], в которой разрабатывается метод генерации синтетических данных с целью преодоления недостатка размеченных реальных данных. Предложенный метод позволяет быстро создавать большие объёмы автоматически размеченных данных, что особенно ценно для задач с ограниченной доступностью реальных размеченных данных.

Как следует из анализа литературы, при проведении испытаний в контролируемые и фиксируемые параметры включаются в основном тактико-технические характеристики беспилотных летательных аппаратов. Вместе с тем для комплексного описания прецедентов структура существующих баз данных требует расширения за счёт проведения испытаний и последую-

щего создания синтетических прецедентов.

Подход к испытаниям группового управления

Проблемой испытаний групп объектов с высокой степенью автономности является отсутствие программ и методик испытаний для оценки интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов, наземных робототехнических комплексов, так как не оцениваются необходимые характеристики, такие как механизмы координации и расположение объектов на безопасном расстоянии друг от друга в группе, распределение функциональных ролей, принятие решений группой и другие.

Основная цель проведения испытаний заключается в получении объективных данных о функционировании группы как единой системы при решении конкретных задач.

Для фиксации прецедентов в ходе проведения испытаний группы осуществляется предварительная параметризация всех компонентов группы и среды, таких как:

- 1) объекты группы: каждый отдельный объект в группе характеризуется такими параметрами, как его функциональная роль (лидер, исполнитель, наблюдатель), тип (например, беспилотный летательный аппарат, наземный робот) и технические характеристики;
- 2) группа: задаётся набором статических и динамических параметров. К статическим относятся: тип группы, её миссия/задача группы, базовая стратегия взаимодействия (централизованная, децентрализованная, гибридная). Динамические параметры изменяются в ходе испытаний, к ним относится, например, геометрия взаимного расположения объектов в пространстве;
- 3) окружающая среда: описывается комплексом условий, включая географические характеристики района, время суток, метеорологические условия, а также характер и уровень противодействия условного противника.

В ходе испытаний должно фиксироваться максимально возможное количество характеристик, которые записываются в виде логико-лингвистической модели [7].

$$GP = [D, G, E, S, R, B],$$

где D – объекты (Drone); G – группа (Group); E – среда (Environment); S – ситуация (Situation); R – решение (Resolution); B – эффект (Benefit).

Во время проведения испытаний целесообразно выполнить эксперименты со сменой лидера в группе, реконфигурацией структуры и ролей с возможностью фиксации каждого шага.

При проведении эксперимента группе ставится задача и осуществляется регистрация процесса выполнения задачи до достижения результата или истечения отведённого времени.

Эффективность выполнения группой целевой задачи оценивается по дискретной шкале на основе следующих критериев.

1. «Задача выполнена» (количественная оценка = 1): присваивается, если группа в полном объёме достигла всех целевых показателей, сформулированных в условиях задачи.
2. «Задача выполнена не полностью» (количественная оценка = (0;1)): присваивается в случае частичного выполнения условий. К таким ситуациям относятся: неполное достижение целевого показателя (например, уничтожение 80% целей), потеря части функциональности группы (выход из строя незначительного количества объектов, не приводящий к срыву миссии), наличие некритических неисправностей (нестабильная связь, отказ второстепенных систем). Пример: потеря части груза при его в целом успешной доставке в пункт назначения.
3. «Задача не выполнена» (количественная оценка = 0): присваивается, если группа не выполнила основные условия задачи. Это включает: полный срыв миссии, физическую утрату или уничтожение группы, а также выявление критических неисправностей, которые привели к невыполнению задачи. К последним относятся: выход из строя более половины объектов группы, необратимая потеря управления или отказ ключевых систем, делающий продолжение выполнения задачи невозможным.

По результатам испытаний формируются прецеденты. Их структура включает набор зафиксированных характеристик группы, среды, задачи и результата. Записывается метаянформация в форме логико-лингвисти-

ческой модели, которая затем помещается в базу прецедентов.

Для моделирования ситуаций, физическая реализация которых в натуральных испытаниях затруднена или экономически нецелесообразна, применяются высокодетализированное трёхмерное моделирование и компьютерная симуляция. Это позволяет генерировать синтетические прецеденты, которые также предназначены для увеличения обучающей выборки, балансировки неравномерно представленных классов и улучшения обобщающей способности алгоритмов.

Проведение испытаний систем группового управления является необходимым инструментом для перевода исследований из теории в плоскость экспериментально проверяемого научного знания. Накопление обширной базы данных, состоящей из натуральных и синтетических прецедентов, создаёт фундамент для разработки автономных групп, способных к адаптивному поведению и принятию решений на основе прецедентов.

Проблемы фиксации прецедентов

При проведении испытаний необходимые параметры фиксируются в недостаточном объёме.

К актуальным проблемам фиксации прецедентов относятся:

- 1) **неполнота регистрируемых данных.** Существующие системы мониторинга часто не охватывают весь спектр значимых параметров. В основном фиксируются лётные характеристики, данные о работе системы управления и навигации, оценка надёжности оборудования, проверяется функционирование систем аварийного отключения и контроля расположения объектов на безопасном расстоянии друг от друга в группе [7];
- 2) **отсутствие стандартизированных онтологий.** Отсутствие унифицированных форматов представления данных и терминологии [8] приводит:
 - к невозможности корректного сравнения прецедентов из разных серий экспериментов;
 - трудностям агрегации информации в единую базу знаний;
 - ошибкам интерпретации при анализе логико-лингвистических моделей;

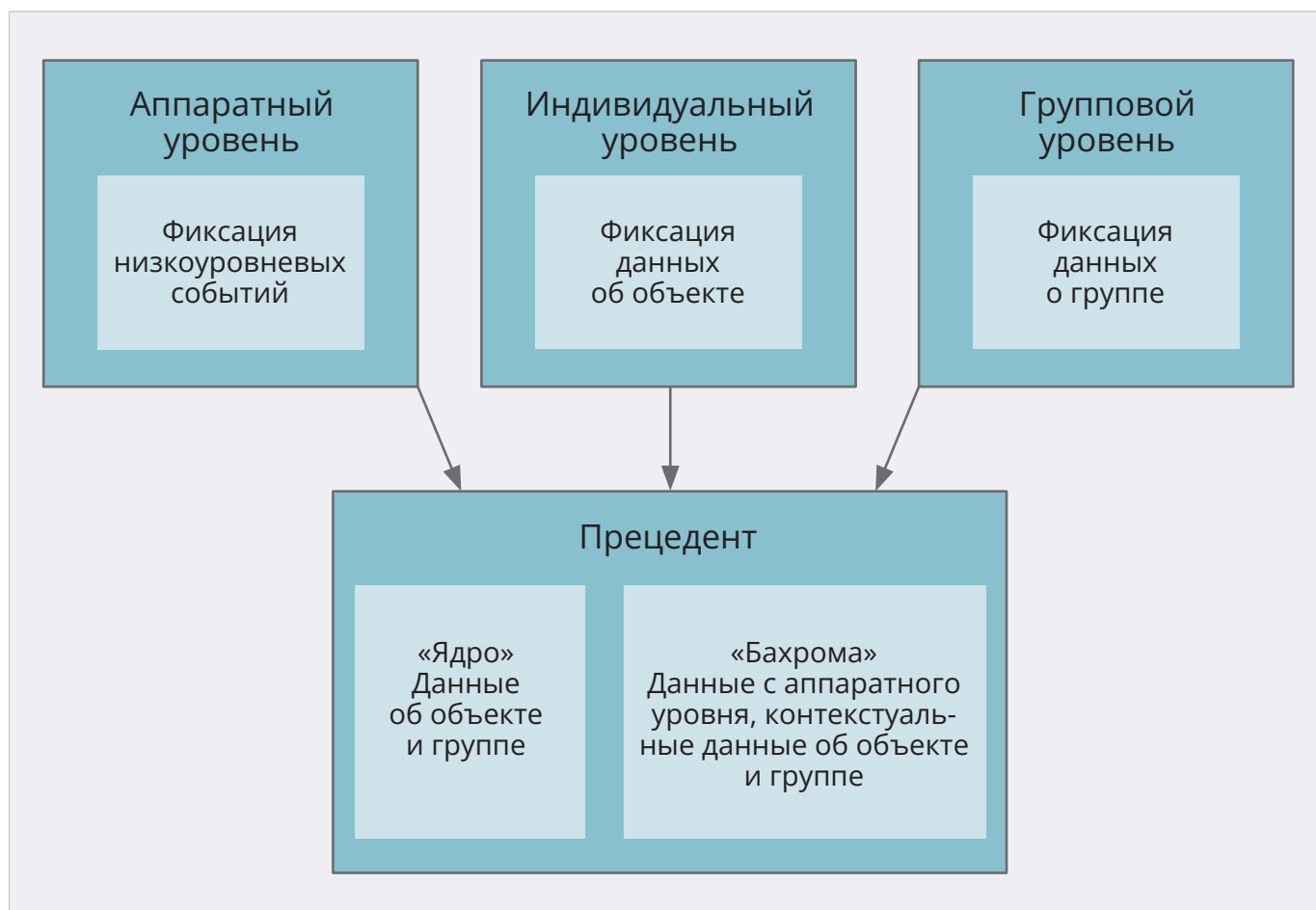


Рис. 1. Уровни фиксации прецедента

3) проблемы временной синхронизации. Разнородные системы регистрации данных имеют:

- различные временные разрешения и задержки;
- несинхронизированные временные метки;
- расхождения в частоте дискретизации измерений [9, 10];

4) ограничения аппаратных средств. Технические ограничения проявляются:

- в ограниченной пропускной способности каналов передачи данных;
- нехватке вычислительных ресурсов для обработки данных в реальном времени [11];

5) субъективизм при протоколировании. Возможно влияние человеческого фактора при проведении испытаний:

- избирательное внимание к отдельным аспектам эксперимента;
- неосознанная интерпретация событий вместо их объективной фиксации;
- расхождения в оценках разных наблюдателей;
- масштаб проводимых испытаний не позволяет учесть необходимые ха-

рактеристики или набрать необходимую статистическую базу;

6) сложности формализации контекста. Затруднена адекватная фиксация:

- динамически изменяющихся условий среды;
- неявных предпосылок и допущений;
- косвенных факторов влияния.

Таким образом, для решения указанных проблем требуется разработка комплексной методологии фиксации прецедентов, включающей создание стандартизированных протоколов, внедрение аппаратных средств нового поколения и развитие алгоритмов автоматизированного анализа многомерных данных.

Формирование прецедента

Зафиксировать все необходимые параметры затруднительно. Анализ показал, что стандартные системы протоколирования испытаний сфокусированы на индивидуальных показателях каждого БЛА (координаты, скорость, курс, заряд батареи, уровень сигнала). Для анализа группового прецедента этого недостаточно. Не фик-

сируются следующие ключевые параметры.

- 1) Межмашинное взаимодействие: задержки в передаче пакетов информации между объектами группы в момент, предшествующий прецеденту. Обычно фиксируется факт отправки/приёма, но не временные задержки в критически важные миллисекунды.
- 2) Контекст принятия решения объектом: записывается итоговое решение (например, «изменить вектор на 10°»), но не фиксируется полное состояние входных данных, на основе которых это решение было принято. А именно: какая именно информация от соседей была получена (и, что важно, какие данные не были получены вовремя).
- 3) Градиент неопределённости среды: групповой прецедент часто является следствием накопления мелких расхождений в индивидуальном восприятии среды (например, небольшие разночтения в данных лидеров из-за пыли или электромагнитных помех). Эти микрорасхождения не регистрируются как ошибки, так как находятся в пределах допусти-

мой погрешности для одиночного объекта. Но их совокупный эффект на групповое решение не отслеживается.

4) Приоритеты в сетевом трафике: в момент высокой нагрузки или потери канала данные, критичные для поддержания групповой когерентности (например, пакеты синхронизации), могут быть отброшены в пользу данных навигации или целеуказания. Механизмы этой приоритизации и её результаты не фиксируются.

Целесообразно разделить параметры на обязательные и уточняющие, то есть в рамках формирования прецедентов группового управления, полученных в ходе испытаний, принципиальное значение имеет чёткое разделение параметров/характеристик на структурное «ядро» и контекстуальную «бахрому».

«Ядро» прецедента представляет собой набор обязательных, формализованных и объективно измеряемых атрибутов. Эти характеристики являются инвариантными и необходимыми для минимально достаточного описания случая, его идентификации, категоризации и сравнительного анализа с другими прецедентами. Отсутствие любой из них делает описание неполным и нефункциональным для исследования и применения [12].

Базовыми характеристиками «ядра» являются:

- тип объекта группы;
- роль объекта;
- тип группы;
- мощность группы;
- миссия группы;
- геометрия действий группы в пространстве;
- среда (географический район, метеорологические условия, противодействие противника);
- задача, поставленная перед группой;
- решение, принятое при решении задачи.

«Бахрома» прецедента – набор дополнительных, уточняющих данных, которые обеспечивают глубину контекста и полноту ситуации. Эти характеристики важны для качественного анализа, интерпретации результатов «ядра», но не являются строго обязательными для первичной фиксации и сравнения [12].

К элементам «бахромы» могут относиться:

- парадигма, которой обучен объект группы;
- автономность объектов;
- количество типов объектов в группе и т.д.

Для разделения «ядра» и «бахромы» был применён подход многоуровневой фиксации прецедентов (рис. 1).

- Уровень 1 (аппаратный): фиксация низкоуровневых событий с привязкой к единому времени – потери пакетов информации, неисправности объектов группы.
- Уровень 2 (индивидуальный): фиксация решений объекта на основе его модели мира («вижу цель», «получил план», «потерял соседа X»).
- Уровень 3 (групповой): запись общих состояний группы (формация, перестроение группы).

Важно зафиксировать основные характеристики, которые входят в «ядро» прецедента. Характеристики, которые входят в «бахрому», являются уточняющими. Прецедент, состоящий только из «ядра», представляет из себя так называемый упрощённый прецедент, который состоит из наиболее значимых характеристик, наиболее полно описывающих ситуацию.

Идеальный прецедент

При описании прецедентов группового управления часто возникает проблема преждевременной детализации и привязки к конкретной реализации. Чрезмерное описание характеристик «бахромы» ограничивает возможность поиска оптимальных решений и создаёт риски некорректной интерпретации требований.

Идеальный прецедент – это развёрнутый прецедент, выражающий общую сущность процесса без детализации его реализации [13].

К ключевым особенностям идеальных прецедентов относятся краткие и ёмкие описания объектов, группы, среды, противодействия и принятого решения, таким образом выражается общая сущность прецедента. Описания не содержат развёрнутых деталей, указаний на конкретные протоколы, интерфейсы, алгоритмы или технические средства.

Идеальный прецедент описывается следующим образом:

$GP = [TY, RL, F, N, M, FT, GE, C, PF, AF, TZ, RO, RG]$,

где TU – тип объекта; RL – роль объекта в группе; F – тип группы; M – миссия группы; FT – геометрия действий

группы в пространстве; C – сложность местности/пространства мониторинга; AF – активные факторы среды; TZ – ситуации как логическая связка событий (задача – решение – эффект); RO – решения для действий объектов, включённых в группу; RG – решения для действий группы.

Преимуществами применения идеальных прецедентов является:

- 1) чёткость формулировки требований позволяет отделить, «что» должна делать система, от того, «как» она это делает. Пример для БЛА. «Что»: обеспечить непрерывный мониторинг периметра объекта в течение четырёх часов. «Как»: группа БЛА совершает циклический облёт по заданному маршруту;
 - 2) устойчивость к изменениям: изменение протокола связи или аппаратной платформы не требует переписывания самих прецедентов, так как они абстрактны. Пример для БЛА. Прецедент: передать целевую координату от БЛА-разведчика всем БЛА ударной группы. Изменение (Протокол связи): аппаратура меняется с Wi-Fi на LTE/5G. Логика прецедента («БЛА мониторинга нашёл цель → сообщил координаты → группа получила координаты для доставки груза») не меняется. Меняются только низкоуровневые модули кодирования и отправки данных;
 - 3) фокус на взаимодействие «пользователь–система»: позволяет выявить истинные потребности оператора и функциональные требования к системе без отвлечения на технические детали. Пример для БЛА. Без прецедентов: техническое задание может содержать разрозненные пункты, а с использованием прецедентов выявляется ключевой сценарий действий.
- Для применения идеальных прецедентов необходимо:
- 1) разработать библиотеку идеальных прецедентов для всех основных задач группового управления: разведка, ударные действия, логистика и т.д.;
 - 2) на этапе проектирования детализировать каждый параметр идеального прецедента в виде конкретных характеристик и протоколов действий;
 - 3) вести параллельно как библиотеку идеальных (сущностных) прецедентов, так и библиотеку реализационных прецедентов для поддержания

актуальности библиотеки прецедентов.

Идеальные прецеденты предлагают решение для высокоуровневого и целостного, но при этом не перегруженного описания функциональности сложных систем, которой является система группового управления беспилотными летательными аппаратами. Их внедрение позволит повысить качество требований, ускорить процесс проектирования и создать более автономные и адаптируемые системы управления.

Пример. Получение идеального прецедента в задаче контроля объекта группой

В рамках проектирования сложных систем, таких как система охраны объектов с использованием групп БЛА, важным этапом является моделирование угрозы. Ключевым моментом на данном этапе выступает разработка идеальных прецедентов, позволяющих не привязываться к уточняющим параметрам.

В качестве примера рассматриваются испытания по проверке выполнения стратегии действий при решении задачи контроля объекта группой БЛА. Основными акторами в данном контексте являются: группа БЛА, объект, за которым производится наблюдение.

Задача заключается в обнаружении отклонений в объекте наблюдения, например, обнаружение засохших посевов на поле.

Назначается группа, например, из N БЛА, предназначенных для ведения наблюдения и оповещения. Каждый БЛА наблюдения отвечает за выделенную ему территорию, перемещаясь по заранее определённой траектории и обмениваясь информацией с ближайшими соседями. Охрана объекта происходит на определённой территории в дневное время.

При обнаружении засохших посевов объекты группы получают оповещение о возможном отклонении от нормы, автоматически подтверждается достоверность сигнала тревоги и определяется следующая информация: текущее местоположение, предположительная площадь, тип посевов. Отклонениями являются участки с засохшими посевами размером $l \times m$ см и количеством p штук.

Объекты группы осуществляют оценку площади участка на основе

полученных данных. Группой принимается решение о дополнительном орошении и об оповещении персонала, при этом действие выполняют только ближайшие БЛА к обнаруженному участку, остальные продолжают наблюдение. В результате наблюдения были обнаружены только $p - 2$ участков. Следовательно, задача по наблюдению выполнена частично, и оценка эффективности, которая присваивается по результатам выполнения задачи, примет значение $(0;1)$, например, $0,8$ (оценка назначается экспертом).

По результатам выполнения задачи записывается прецедент. В параметры идеального прецедента будут занесены:

- тип объекта группы (БЛА);
- роли объектов группы (БЛА-наблюдения);
- тип группы (гомогенная);
- задача группы (наблюдение за объектом);
- геометрия в пространстве (группа имеет свободное распределение);
- сложность (поле);
- решения для группы (оповещение персонала и выполнение специальных действий для устранения отклонения (орошение));
- решения для одиночного объекта, включённого в группу (оповещение персонала и выполнение специальных действий для устранения отклонения (орошение) для ближайших к обнаруженному участку, наблюдение для остальных).

К уточняющим параметрам относятся:

- мощность группы (n единиц);
- пассивные факторы среды (день).

Данные параметры записываются в виде логико-лингвистической модели. При проведении испытаний возможна фиксация всех необходимых параметров для составления идеального прецедента.

$GP = [TY, RL, F, M, FT, GE, C, AF, T3, RO, RG]$,

$GP = [TY (БЛА), RL (БЛА - наблюдение), F (гомогенная), M (наблюдение_за_объектом), FT (свободное_распределение), C (поле), RG (оповещение, орошение_участка), RO (оповещение, орошение_участка, наблюдение).$

В формуле учитываются основные параметры прецедента, и в таком виде метаинформация заносится в базу данных для дальнейшего использования при выполнении

задач и для создания синтетических прецедентов.

Таким образом, записывается идеальный прецедент, состоящий из основных параметров. Подобная запись выполняемых задач позволит набрать базу данных для дальнейшего использования при принятии решений.

Заключение

Повышение уровня автономности групп объектов управления является ключевым направлением развития современных систем. Как показано в этой работе, этот процесс сопровождается закономерным снижением роли оператора и переходом к прецедентно-ориентированной парадигме принятия решений, где основой функционирования системы становится накопленная база прецедентов.

Проведённое исследование демонстрирует методологическую ценность предложенного подхода, интегрирующего проведение контролируемых испытаний и разработку идеальных прецедентов для формирования базы знаний группового управления автономными объектами.

Основным научным результатом работы является решение актуальной проблемы недостаточной и несистемной фиксации прецедентов. В работе предлагается использовать многоуровневую фиксацию данных и чёткое разделение на структурное «ядро» и контекстуальную «бахрому», что позволит избежать недостатков традиционного протоколирования и создаст условия для накопления базы данных, необходимой для принятия решений в группе.

Ключевым элементом, обеспечивающим устойчивость разрабатываемых систем к быстро меняющимся условиям, является концепция идеального прецедента. Её применение позволяет абстрагироваться от преждевременной технической детализации и сфокусироваться на сущностных целях системы и взаимодействии, что повышает автоматизацию и адаптивность создаваемых моделей группового управления.

Таким образом, представленный подход формирует теоретический и методологический фундамент для создания надёжных, адаптивных и интеллектуальных систем группо-

вого управления, способных принимать решение на основе прецедентов в сложных и динамически изменяющихся условиях.

Литература

1. *Абросимов В.К., Михайлова Е.С.* Классификация прецедентов группового управления // Информационно-управляющие системы. 2025. № 2. С. 27–36.
2. *Тихонов Р.И., Бубенищikov Ю.Н.* Практический опыт испытаний комплексов с беспилотными летательными аппаратами в условиях информационно-технических воздействий // Военная мысль. 2019. № 6. С. 118–124.
3. *Василенко О.М., Иванов А.Г., Максимова М.В.* Испытания беспилотных авиационных комплексов // Инженер-механик. 2012. № 1. С. 15–22.
4. Испытания беспилотных летательных аппаратов. Shenzhen SCIEO Electronics Co., Ltd. URL: <https://www.scieo.by/> (дата обращения: 03.10.2025).
5. *Сердюков К.Е., Авдеенко Т.В., Макарова Е.С.* Исследование возможностей генетического алгоритма для извлечения релевантных прецедентов в системах поддержки принятия решений // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). Самара. 2017. С. 1864–1870.
6. *Пчелинцев С., Юляшкова М.А., Ковалева О.А.* Метод создания синтетических наборов данных для обучения нейросетевых моделей распознаванию объектов // Информационно-управляющие системы. 2022. № 3 (118). С. 9–19.
7. *Михайлова Е.С.* Логико-лингвистическая модель группового прецедента. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2024). М., 2025. С. 1124–1131.
8. *Поспелов Д.Ю.* Онтологии в эпоху цифровизации. Ч. 1. Мост между мыслью и цифрой (путь к пониманию онтологии) // Информационное моделирование. 2024(3). № 1. С. 105–107.
9. *Ковязина Д.Р.* Синхронизация времени в распределённых информационно-управляющих системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 45. С. 71–78.
10. *Прошин Ф.А., Сторожук М.Н., Сторожук Н.Л.* Методы синхронизации в сетях связи // Измерения и синхронизация. Первая миля. 2024. № 2. С. 62–69.
11. *Стаффорд Д.* Преимущества ультранизкой задержки при трансляции видео // Современные технологии автоматизации. 2020. № 4. С. 76–81.
12. *Куссуль Э.М.* Ассоциативные нейроподобные структуры. Киев: Наукова думка, 1991. 144 с.
13. *Constatine L.L., Lockwood L.A.D.* Software for Use: A Practical Guide to the Models and Methods of Usage-Centered Design, Addison-Wesley Professional, 1999, 600 p.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Учёные создали оптический «синапс», имитирующий работу человеческого зрения

Исследователи из King Abdullah University of Science and Technology разработали гибкое оптическое устройство, способное одновременно воспринимать и обрабатывать визуальную информацию по принципу, напоминающему работу человеческого мозга. Технология может стать основой для нового поколения систем машинного зрения, нейроморфных вычислений и носимой электроники.

Разработка представляет собой тонкоплёночный «оптический синапс», полностью управляемый светом. В отличие от большинства существующих светочувствительных синаптических устройств, которым одновременно требуются электрические и оптические сигналы, новая система работает исключительно за счёт воздействия света. Это позволяет снизить энергопотребление и упростить архитектуру устройства.

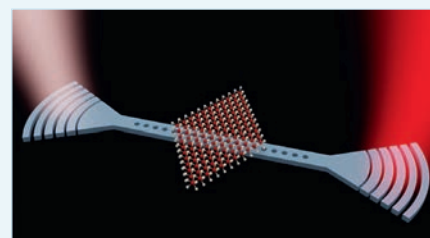
Авторы проекта отмечают, что современные камеры и вычислительные системы по-прежнему разделяют функции сенсора, памяти и обработки данных между разными компонентами. Из-за этого информация постоянно передаётся между блоками, что увеличивает задержки и энергозатраты. Но-

вый подход приближает архитектуру к биологической зрительной системе, где восприятие и обработка сигналов тесно интегрированы.

Устройство способно изменять своё состояние под воздействием света разных длин волн. Одни сигналы усиливают отклик, другие – ослабляют его, что напоминает механизм обучения и забывания в биологических синапсах. Исследователи продемонстрировали работу системы на примере эксперимента с «собакой Павлова»: разные длины волн света использовались как аналоги звука и пищи, после чего устройство научилось ассоциировать один сигнал с другим.

По словам разработчиков, подобный механизм особенно важен для будущих систем искусственного зрения и аппаратного ИИ, поскольку позволяет выполнять распознавание и обработку информации непосредственно на уровне сенсора, без передачи данных в отдельный вычислительный модуль.

Конструкция устройства также была существенно упрощена. В её основе используется ультратонкий слой оксида марганца на гибкой кремниевой подложке. Материал отличается сравнительно низкой стоимостью, доступностью и экологичностью по сравнению с рядом альтернатив, включая



перовскиты и чёрный фосфор. Наличие нескольких степеней окисления помогает формировать дефектные состояния и кислородные вакансии, необходимые для хранения и модуляции информации.

Разработчики подчёркивают, что устройство сохраняет работоспособность даже при изгибе подложки, что делает технологию перспективной для гибкой электроники и носимых систем. Помимо обработки изображений в реальном времени, оптический синапс способен выполнять логические операции, совместимые с существующими полупроводниковыми вычислительными платформами.

Авторы считают, что технология может найти применение в робототехнике, системах искусственного зрения, энергоэффективном ИИ-оборудовании и интеллектуальных сенсорных устройствах следующего поколения.

