

УДК 519.687.1/4

В. И. ГОРОДЕЦКИЙ, М. Г. ПАНТЕЛЕЕВ  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

## СЕТИ АВТОНОМНЫХ АГЕНТОВ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В СРЕДЕ С ПРОТИВОДЕЙСТВИЕМ: ОСОБЕННОСТИ И КОМПОНЕНТЫ МОДЕЛИ

*Рассматривается модель группового поведения и управления в системе, состоящей из автономных объектов, существующих в реальном мире и в среде Интернет с противодействием. Актуальность проблемы обусловлена ростом роли Интернет-технологий в моделях конкуренции в экономике, политике, в компьютерной безопасности, и т. д. Модель проблемы анализируется в контексте цикла Бойда. Формулируются задачи фаз цикла, обосновывается многоагентная модель поведения автономных объектов и цифрового двойника внешней среды в контуре управления. Аргументируется необходимость использования модели единого семантического пространства знаний и данных.*

**Введение.** Область информационных технологий характеризуется значительной динамикой, в которой в последние годы наиболее заметен тренд в сторону распределённых систем сетевой структуры, компонентами которой являются автономные объекты различных типов (физические, виртуальные, социальные), каждый из которых обладает встроенными вычислительными и коммуникационными возможностями. Как правило, эти объекты являются относительно простыми по своей структуре и функциональным возможностям. Однако, благодаря большому числу объектов в системе и интенсивному взаимодействию, они оказываются в состоянии решать самые сложные задачи. Как правило, такие системы используют концепцию Интернета вещей, облачных и периферических вычислений (англ. *Edge Computing*), которые в настоящее время являются базовыми концепциями создания крупномасштабных распределённых систем. В таких системах распределённые объекты общаются между собой в среде Интернет, активно используют его информационные, вычислительные и коммуникационные ресурсы, образуя сложно структурированный сетевой объект, значительная часть компонент которого существует в виртуальной среде. Приложения такого класса занимают все больше места в современном цифровом мире и играют все большую роль в экономике, промышленности, социальной сфере и в обеспечении безопасности общества в широком смысле.

Среди них по сложности выделяются такие приложения, которые функционируют в реальном времени в конкурентной внешней физической и/или виртуальной среде, которая оказывает целенаправленное *противодействие* их нормальной работе. Примерами таких приложений являются модели конкурентной борьбы на международных рынках, которая часто выходит за пределы чисто экономических, рыночных отношений. Такое противостояние сложных динамических систем сетевой структуры в мирное время наиболее ярко наблюдается в киберпространстве. Уже более 20 лет можно наблюдать *операции в киберпространстве* в целях нарушения безопасности критически важных компьютерных систем, целостности и конфиденциальности информации, содержащейся в них [1, 2]. Аналогичные операции крупного масштаба можно наблюдать в сфере информационных войн и в форме психологических воздействий на ту или иную группу населения одной или нескольких стран сразу. Можно утверждать, что техническая, военная и другие виды разведки активно задействуют ресурсы виртуального пространства и работают в среде с противодействием со стороны средств защиты информации.

Внешняя среда с сознательным противодействием оказывает влияние на все аспекты сетевого объекта: на его архитектуру и модели взаимодействия, на модели поведения и принципы управления поведением автономных объектов сети и поведения системы в целом. Такая внешняя среда обычно задаёт жёсткие требования к структуре информационного пространства данных и знаний, к структурам их представления, хранения и к механизмам использования. По существу, сетевой объект в среде с противодействием – это новый класс объектов и задач управления, который пока слабо исследован даже на концептуальном уровне.

Актуальность задач в такой постановке постоянно возрастает. Она возрастает с ростом роли Интернет-технологий в различных аспектах жизни общества и отдельного человека, а также в связи с тем, что различные формы конкуренции и противостояния в экономике, политике, в

военной сфере, экологии, компьютерной и информационной безопасности, и в других критических областях общественной жизни все больше переносятся в виртуальное пространство и практически реализуются на цифровом уровне.

Целью данной работы является содержательный анализ особенностей моделей поведения объектов сетевой структуры в среде с противодействием и моделей управления ими. В основу рассматриваемой модели поведения и управления положена стратегия управления, предусмотренная циклом Бойда. В этом контексте далее сначала анализируются содержательно особенности объектов сетевой структуры с целенаправленным поведением в среде с противодействием. Затем обосновывается важность многоагентной архитектуры для спецификации модели поведения взаимодействующих автономных объектов системы и модели управления ими, а также для спецификации модели цифрового двойника противодействующей внешней среды в контуре управления. Далее анализируются особенности моделей, поддерживающих реализацию функций, выполняемых системой на разных фазах цикла Бойда, в частности, при оценке и прогнозировании ситуаций и при принятии решений в интересах реализации целенаправленного поведения с учётом противодействия. Приводится обоснование необходимости использования модели единого семантического пространства знаний и данных. В отдельном разделе обсуждаются основные особенности описанной проблемы и предложенных моделей. В заключении резюмируются основные результаты работы.

**Особенности управления в среде с противодействием и роль её цифрового двойника.** В системах, функционирующих в среде с противодействием, все процессы привязаны к реальному времени и временные аспекты работы системы имеют решающее значение. В соответствии с моделью конкурентного взаимодействия двух систем, предложенной Дж. Бойдом (J. Boyd) [3], конкурирующие системы имеют стандартный замкнутый цикл функционирования, состоящий из четырёх фаз, а именно *наблюдение, ориентация, решение, действие*. На рис. 1 эти фазы названы *восприятие, оценка и прогноз ситуации, принятие решения, реализация решения (действий)*, соответственно. Эта модель, предложенная первоначально для моделирования и управления военными операциями, оказалась работоспособной и в абстрактном классе конкурентного взаимодействия систем. Эта модель принята также в данной работе.

В модели Бойда каждая из конкурирующих сторон должна структурировать своё поведение в соответствии с таким циклом, и каждая сторона для успешной работы должна отслеживать смену фаз цикла конкурента. Взаимодействие конкурирующих сторон происходит в реальном времени, поэтому каждая сторона с позиций процессов управления должна быть системой реального времени. Многочисленные исследования и практические применения модели Бойда показали, что в этой модели конкуренции преимущество получает та сторона, которая, наряду с качественными моделями оценки ситуации и принятия решений, затрачивает меньше времени на реализацию цикла и раньше реализует действия в соответствии с принятым решением.



Рис. 1. Цикл Бойда в системе управления реального времени

Естественно, что для реализации стратегии Бойда каждая сторона должна иметь свою модель и средства отслеживания действий соперника, которая позволит ей прогнозировать фазы цикла Бойда соперника, выполнять прогноз его поведения, оценивать ситуацию с позиций достижимости собственных целей в контексте построенного прогноза (в рамках собственного цикла Бойда) и далее вырабатывать (корректировать) собственное решение и исполнять его.

Описанный цикл работы системы управления сетевого объекта задаёт схему (мета модель) управления в реальном времени, и он же определяет требования к составу информации о сопернике и к темпу её обновления.

В настоящее время модель соперничающей стороны принято называть её *цифровым двойником* (ЦД). Напомним, что в общем случае ЦД физического объекта, системы или процесса (англ. *digital twin – цифровой близнец*) – это некоторый набор его цифровых компьютерных моделей и реализующих их процессов и/или сервисов. ЦД некоторого объекта, системы или процесса является компьютерной программой, предназначенной для численного моделирования поведения этого объекта, системы или процесса для оценивания его текущего состояния и/или поведения и прогнозирования этих характеристик на некоторый горизонт будущего времени. Обычно информация от ЦД используется совместно с информацией, которую можно получить в те же или близкие моменты времени о реальном объекте, системе или процессе. Эта же информация обычно используется и для уточнения модели ЦД внешней среды по невязке его прогноза для некоторого момента времени и реального состояния объекта, системы или процесса, модель которого представлена ЦД. Коротко говоря, ЦД используется в контуре управления с настраиваемой моделью поведения внешней среды и соперника.

В рассматриваемом классе приложений ЦД прогнозирует поведение соперника и внешней среды в мета модели цикла Бойда, т.е. прогнозирует времена начала и окончания фаз цикла Бойда соперника и его поведение пределах фаз цикла. Далее эта информация в реальном времени используется сетевым объектом для оценки и прогнозирования ситуации и принятия им решения в собственном цикле Бойда. Таким образом, ЦД поведения соперника и внешней среды является неотъемлемой частью системы опережающего планирования и управления для систем реального времени в среде с противодействием [4, 5]. Рис. 2 иллюстрирует место ЦД внешней среды и поведения соперника при управлении в соответствии с циклом Бойда в конкурентной среде.

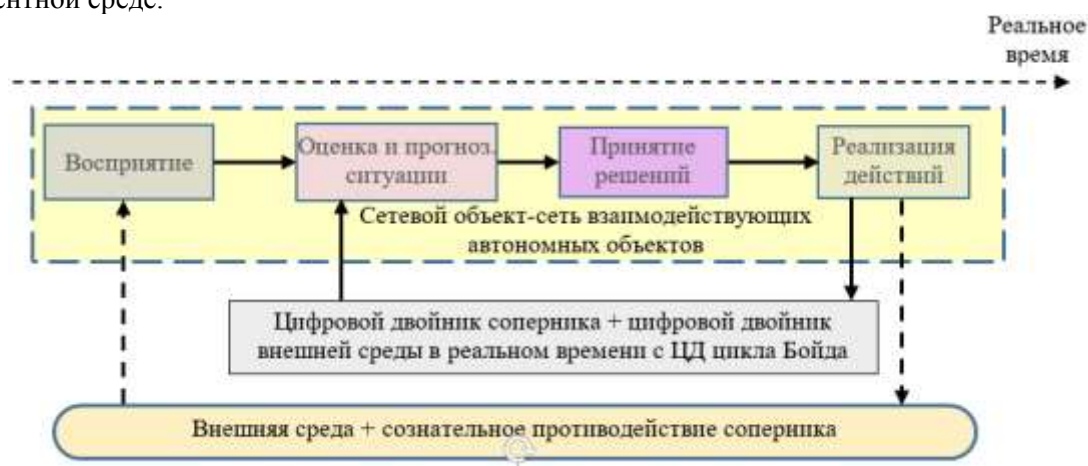


Рис. 2. Цикл Бойда в системе управления реального времени с цифровым двойником внешней среды и соперничающей стороны

В общем случае, математическая модель физического объекта, построенная для описанных выше целей, может быть расширена и другими моделями, например, моделями машинного обучения самого ЦД. Такой ЦД принято называть «умным цифровым двойником» (англ. *smart digital twin*).

Термин ЦД, вообще говоря, является метафорой, поскольку никакая цифровая программа не может описывать физический объект или протекающие в нём процессы исчерпывающим образом, и абсолютно точно копируя поведение объекта. По этой причине ЦД всегда лишь приближённо описывает реальный объект, и он никогда не описывает все его стороны, и потому не бывает «двойником» физического объекта в привычном понимании. В рассматриваемом классе приложений такая точность ЦД невозможная в принципе, поскольку внешняя среда является неопределённой, а информация о сопернике, доступная объекту, системе или процессу, всегда не полна, тем более для решения задач прогнозирования.

ЦД всегда строится для того, чтобы с его помощью можно было решать конкретный набор прикладных задач, который в идеале, при необходимости, может быть расширен пользователем. По этой причине обычно ЦД строится по модульному принципу, когда каждый виртуальный (цифровой) модуль решает одну или несколько прикладных задач из заданного множества, а множество этих модулей полностью покрывает заданное множество случаев использования ЦД. В такой цифровой модели каждая его отдельная компонента моделирует тот или иной аспект физического объекта, и при этом имеет понятную содержательную интерпретацию. Каждый такой прикладной модуль ЦД, отображающий тот или иной аспект физического объекта или процесса, принято называть цифровой тенью (англ. *digital shadow*) физического объекта или процесса, порождаемого им. Важно отметить, что в настоящее время существуют и другие, в некотором смысле альтернативные определения понятия цифровой тени.

**Многоагентная архитектура.** Системы реального времени описываемого класса решают задачи управления целенаправленным групповым *поведением* взаимодействующего множества автономных объектов разной природы. Управление поведением в таких системах называется *групповым управлением*.

В настоящее время среди поведенческих моделей распределённых объектов ведущее место занимают многоагентные модели, архитектуры и многоагентные технологии их программной реализации. Первой *поведенческой* моделью агента и многоагентной системы была модель Р. Брукса (англ. *R.A. Brooks*), предложенная в работе [6]. В ней описана иерархическая архитектура реактивного агента (англ. *subsumption architecture*), которая задаёт множество вариантов его поведения («*паттернов поведения*») в зависимости от состояния внешней среды, информация о которой доступна системе. Однако эта архитектура оказалась непригодной для формализации группового поведения и группового управления ввиду слабых выразительных возможностей. В современных *поведенческих* системах, в отличие от их чисто реактивных предшественников, во-первых, рассматривают более сложные модели паттернов поведения, например, модели частично упорядоченных последовательностей действий, называемых сценариями, и, во-вторых, они используют модель конечного автомата с *внутренним состоянием* для учёта предыстории или текущего контекста процесса управления каждого агента и модель сети таких автоматов для описания поведения сети агентов.

Напомним, что *агентом* принято называть автономную компьютерную программу (систему), способную к целенаправленному поведению в динамической непредсказуемо изменяющейся внешней среде. В качестве ключевых свойств агента выделяются его *автономность* и способность к *целенаправленному* и *проактивному поведению*. *Автономность* агента понимается как его способность работать для достижения поставленной цели *без вмешательства* человека или других систем и при этом выполнять самоконтроль над своими действиями и внутренним состоянием. Способность к *проактивному поведению* означает, что при выборе поведения агент принимает во внимание не только информацию, полученную им из внешнего мира, но и предысторию собственных действий и состояний внешней среды, которые нашли отражение в его текущем внутреннем состоянии. Например, агент может генерировать сообщения и посылать их другим агентам даже при отсутствии входных событий. Например, он может генерировать сообщения по нарушению таймаута. Заметим, что способность агента к проактивному поведению есть главное отличие компьютерной программы, которую называют агентом, от программы, которую называют объектом в объектно-ориентированном программировании [7].

*Многоагентная система* (МАС) определяется как *сеть слабо связанных решателей частных проблем* (агентов), которые существуют в общей среде и взаимодействуют друг с другом для достижения тех или иных общих целей системы и/или частных целей отдельных агентов. Взаимодействие может выполняться агентами либо напрямую – путём *обмена сообщениями*, либо *косвенно*, когда одни агенты воспринимают присутствие других агентов через изменения во внешней среде, с которой они взаимодействуют. Обмен сообщениями, представленными на некотором языке, выполняется либо в форме диалогов, либо в форме протоколов. Способность к обмену сообщениями определяет ещё одно важное отличительное свойство агентов, которое называют *интерактивностью*. Интерактивность определяется как способность агентов оказывать то или иное влияние друг на друга, и именно в этом смысле сеть агентов в МАС называют «слабо связанной». «Из интерактивности и автономности вытекает способность группы агентов

генерировать решение сложных задач с помощью побочных эффектов от совместных скоординированных действий» [8].

Как видно из описания свойств агента, его модель и модель МАС идеально подходят для формализации системы, состоящей их множества автономных объектов, координирующих своё групповое поведение. В концепции МАС каждому автономному объекту сети ставится в соответствие автономный программный агент. Этот агент, с одной стороны, управляет *внутренним поведением* программных и/или аппаратных компонент узла сети в различных случаях использования (при исполнении узлом сети агентов той или иной роли из числа возложенных на него). С другой стороны, этот агент является представителем своего узла во «внешнем мире», т.е. в сети программных агентов, где его главная функция – это взаимодействие с программными агентами других узлов сети путём обмена сообщениями с целью координация индивидуального поведения своего узла в различных задачах и подзадачах, которые решаются совместно некоторой группой узлов сети. Это поведение принято называть *внешним поведением* агента. Обычно внешнее поведение – это каким-то образом упорядоченная последовательность обмена сообщениями в форме диалогов пары агентов или протоколов.

Важно отметить, что в настоящее время в рассматриваемом классе приложений для модели и технологии МАС альтернатив просто нет, и это касается как моделей группового поведения и группового управления сети автономных агентов, так и модели цифрового двойника соперника и, возможно, остальной части внешней среды.

Если система распределённая, а это достаточно типичный случай, то обязательной компонентой такой сети является программно-коммуникационная среда, обычно называемая *цифровой платформой*, которая, прежде всего, играет роль инфраструктуры, которая преобразует множество отдельных узлов сети агентов в единую систему, в которой агенты могут взаимодействовать (обмениваться сообщениями) друг с другом. Инфраструктура может поддерживать и другие функции, и эти функции платформы (их обычно называют сервисами) доступные всем узлам (агентам) сети, могут быть разнообразными. В частности, в число сервисов инфраструктуры могут входить интерфейс доступа агентов сети к облачным ресурсам и сервисам, к информации внешних сенсорных сетей, т.е. сетей, которые не относятся непосредственно к сетевому объекту, например, к сетям гидрометеорологической службы и к её сервисам для получения текущих и прогнозных данных о погоде. Сервисы платформы могут включать в себя также функции создания, хранения и обеспечения доступа к распределённым данным и знаниям, представленным в сети, и выполнять другие функции. Один из вариантов построения такой инфраструктуры рассмотрен в [9].

**Ситуация и оценка ситуации в цикле Бойда.** В соответствии с *циклом Бойда* после сбора доступной информации о внешнем мире (такая информация всегда будет неточной, неполной и, возможно, противоречивой) задача системы состоит в том, чтобы оценить текущую ситуацию во внешней среде с противодействием, а также оценить ситуацию в собственной сети агентов и спрогнозировать ее развитие. В сложных поведенческих системах реального времени, оперирующих в среде с противодействием, понятие ситуации рассматривается как важнейшее понятие, которое является предметом специальных исследований. Эти исследования проводятся примерно с начала 1990-х годов применительно к области военных операций [10–13].

Существуют различные содержательные трактовки этого понятия, и они обычно даются в его сравнении с понятием состояния системы. В работах [10–13] ситуация определяется как некоторая динамическая характеристика сложной управляемой системы, находящейся во внешней среде, которая описывается с помощью модели того, что *происходило* ранее, *происходит* в текущий момент времени и того, что *может* происходить в ней в будущем. Ситуация является динамической сущностью, которая описывается не только множеством текущих состояний распределённых объектов системы и объектов внешней среды, но, прежде всего, *множеством отношений*, заданных на них. В этом принципиальное отличие модели ситуации от модели состояния сложной системы.

Понятие ситуации предложено для интегрального описания процессов в системе и во внешнем мире с различных точек зрения, и прежде всего, с позиций которые, в свою очередь, характеризуют эти процессы с позиций достижимости ею поставленных целей. Множество возможных ситуаций в системе и во внешнем мире, оцениваемое с некоторой конкретной точки зрения, обычно *факторизуется*, так что эксперт оперирует качественными оценками ситуации

с каждой точки зрения, т. е. с *классами ситуаций*. Например, для целенаправленной системы первостепенную важность имеет оценка ситуации в позиций достижимости поставленной цели с учётом текущего её состояния, имеющихся ресурсов и действий конкурирующей стороны и её намерений (её прогнозируемых действий, например). С этой точки зрения всё множество ситуаций может быть разделено на четыре класса, а именно (1) цель *достижима*, (2) цель *недостижима*, (3) цель *перестала быть актуальной* и (4) *цель достигнута*. Могут использоваться также оценки ситуаций с позиций вскрытия намерений соперничающей стороны, с позиций оценки собственной работоспособности по результатам технической диагностики и имеющихся ресурсов, и т. п., однако все они в итоге далее используются для оценки достижимости групповой цели системы и соответствующей оптимизации своей стратегии будущего поведения.

Задача построения формальной модели ситуации, а также алгоритмов оценки текущей ситуации с разных точек зрения, которые совместно позволят системе оценить достижимость поставленной цели, а также построить конкретную стратегию её достижения – это одна из современных сложных задач группового управления поведением множества автономных объектов, объединённых в сеть. С другой стороны, она отвечает одной из фаз цикла Бойда, структурирующего поведение системы в контексте действий конкурирующей стороны. Модель ситуации и алгоритмы её оценки – это одна из актуальных задач сложных систем, которая в настоящее время является предметом активных исследований и разработок.

**Принятие решений в цикле Бойда.** Процесс принятия решений относится к третьей фазе цикла Бойда (рис. 1), и его суть – это поиск управления групповым поведением автономных объектов системы. Обычно *групповое поведение* понимается как структурированное множество индивидуальных поведений автономных объектов системы, скоординированных в интересах достижения групповой цели.

Формально модель целенаправленного группового поведения описывается с помощью двух компонент. Первая из них – это *сценарий действий* группы. Во многих случаях он задаётся в форме частично упорядоченного множества действий, которые группа автономных объектов должна выполнить, чтобы достигнуть своего целевого состояния. В этой компоненте не указываются конкретные исполнители действий, поскольку решение о назначении исполнителей может изменяться в процессе работы системы. Вторая компонента формальной модели группового поведения – это конкретное назначение *исполнителей действий* (объектов группы) сценария. Эта компонента является частью управляющего воздействия и может изменяться в процессе исполнения сценария действий. Сценарий действий с назначенными исполнителями называют *сценарием группового поведения*.

Сценарий действий обычно имеет иерархическую структуру, в которой на место действия может быть подставлен, в свою очередь, сценарий или паттерн поведения, или это действие может быть элементарным (неделимым). Другими словами, каждое действие сценария на любом уровне абстракции может быть, в свою очередь, представлено сценарием с иерархической структурой. Полагается, что элементарное действие должно выполняться одним объектом сети.

Формально модель сценария может быть описана следующим образом:

$$S = \{X, >\}, \quad (1)$$

где  $S$  – идентификатор сценария,  $X = \{X_i\}_{i=1}^N$  – множество действий  $X_i$  сценария  $S$ ,  $>$  – отношение порядка на множестве действий сценария, которое задаётся условием

$$X_i > X_j, \text{ если действие } X_j \text{ может выполняться только после завершения действия } X_i.$$

С учётом введённых определений и предположений, принятие решений в цикле Бойда для сетевого объекта рассматриваемого класса в начальный момент времени состоит из (1) формирования сценария достижения цели и (2) распределения задач сценария на множестве автономных объектов системы. Формально эти задачи хорошо известны из литературы как компоненты задачи планирования действий, и для её решения предложено достаточно много подходов, моделей и алгоритмов. Алгоритм опережающего планирования в реальном времени в контексте цикла Бойда предложен, например, в [4, 5].

В системе реальном времени, функционирующей в среде с противодействием, построенный план (сценарий группового поведения с конкретными исполнителями его действий) может

потребуется периодически корректировать в зависимости от поведения соперничающей стороны и динамики ситуации в самой системе и во внешнем мире. На практике в рассматриваемом классе приложений задача планирования действий должна решаться как задача управления с обратной связью, которую требуется решать периодически в зависимости от полученной оценки ситуации [4, 5]. В некоторых постановках данной задачи полагается, что сценарий действий задан жёстко, и тогда в зависимости от построенной оценки ситуации требуется пересчитывать только распределение автономных объектов сети на множестве действий сценария.

Таким образом, формальную постановку задачи принятия решений на третьей фазе цикла Бойда можно сформулировать следующим образом:

Дано:

1. Горизонт планирования  $[T_0, T_k]$ , где  $T_0$  и  $T_k$  – (календарное) время начала и окончания исполнения группового сценария поведения, причём значение  $T_k$  может задавать самое позднее допустимое время окончания выполнения сценария групповой работы или в постановке задачи оно может быть не задано.
2. Сценарий действий группы (1), т.е. частично-упорядоченное множество действий  $X$ , которое должно быть выполнено на заданном временном горизонте для достижения поставленной цели.
3. Множество автономных объектов, каждому из которых поставлен в соответствие список элементарных действий сценария, которые он способен выполнять и интервалы времени доступности объекта<sup>1</sup>.
4. Опционально, множество специфических предметно ориентированных ограничений на использование автономных объектов на множестве действий сценария (например, по техническому состоянию, по погодным условиям и т.п.).
5. Показатель качества решения задачи планирования  $F(P(X, D([T_0, T_k])))$ , где  $P(X, D([T_0, T_k]))$  – искомое распределение множества автономных объектов сети  $D([T_0, T_k]) = \{D_j([T_0, T_k])\}_{j=1}^M$  на горизонте планирования  $[T_0, T_k]$  по множеству действий  $X = \{X_i\}_{i=1}^N$  сценария.

Найти:

Распределение  $P(X, D([T_0, T_k]))$  автономных объектов на множестве действий сценария, с учётом всех наложенных ограничений, которое оптимизирует показатель качества управления  $F$ .

На последней фазе цикла Бойда принятое решение исполняется. Эта компонента задачи группового поведения автономных объектов в значительной части является предметно зависимой и потому здесь не рассматривается. Основное требование к ней состоит в том, что исполнение действий на каждой фазе должно по возможности опережать действия противодействующей стороны в аналогичном цикле.

**Данные, знания, единое семантическое пространство.** Ядро системы оценки ситуации и принятия решений в описанном классе поведенческих систем формируют знания, причём в рассматриваемом классе приложений речь идёт о знаниях двух типов:

1. *Знания, которые используются в ЦД* (рис. 2). Это знания о сопернике и о внешней среде, которые позволяют оценивать текущую ситуацию во внешнем мире (во внешней среде с противодействовать) на основании полученных данных, оценивать цели и намерения соперника и прогнозировать его поведение на некотором горизонте будущего времени.

2. *Знания, которые используются сетью автономных агентов* для оценки ситуации в контексте достижимости своей собственной цели, а также для принятия решения по управлению собственным поведением (рис. 2). Напомним, что речь идёт о групповом управлении, которое включает в себя планирование сценария группового поведения и управление его исполнением.

Основные новые проблемы, касающиеся получения, представления и использования знаний в рассматриваемом классе приложений, обусловлены распределённым характером системы. Согласованная работа всех её распределённых автономных компонент – агентов сети возможна только в том случае, если все эти сущности оперируют в едином информационном пространстве, а для согласованной работы на уровне знаний необходимо чтобы это информационное пространство было организовано в соответствии с онтологией, общей для всех агентов.

Создание такого единого семантического пространства знаний и данных для объекта, состоящего из множества автономных распределённых сущностей, является актуальной задачей в области представления и интеграции знаний. Эта задача в настоящее время находится в процессе активного исследования и разработки. В соответствии с современными тенденциями наиболее перспективной представляется интегральная модель знаний, построенная с использо-

<sup>1</sup> В общем случае, объекты сети могут параллельно участвовать в исполнении нескольких сценариев и тогда интервалы доступности их для каждого сценария являются также аргументами задачи планирования.

ванием концепции LPG-структур (от англ. *Labelled Property Graph, LPG*), которые реализуются в графовых системах управления базами данных (графовых СУБД). В настоящее время большинство таких СУБД развивается в концепции программного обеспечения с открытым кодом,



Рис. 3. Формальная модель онтологии и её структура в графовых базах данных

и потому это развитие идёт достаточно быстро и даже ускоряется. Упрощённо структура графовой базы данных с онтологией на метауровне может быть представлена так, как это показано на рис. 3. В графовой СУБД схема онтологии (метаданные) представляется графом с богатыми выразительными возможностями. Множество примеров – экземпляров понятий обычно представляется в NoSQL-структурах. Поиск ответов на запросы выполняется с помощью процедур поиска на графе, и эти процедуры могут быть реализованы эффективно, что очень важно для систем реального времени со сложно структурированными базами знаний.

На рис. 4 базы знаний и данных, формирующие единое информационное пространство объекта сетевой структуры и цифрового двойника внешнего мира в среде с противодействием, представлены в контексте задач, решаемых на различных этапах цикла Бойда.

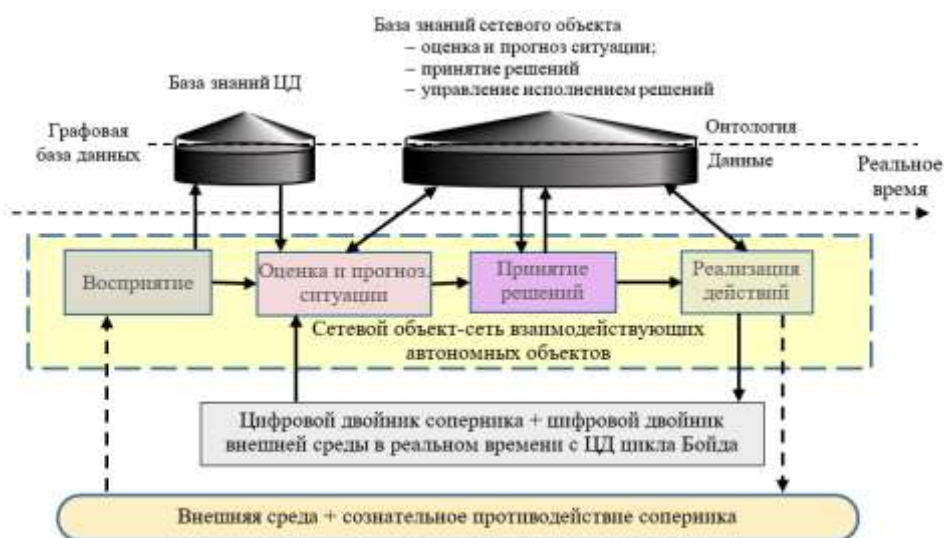


Рис. 4. Базы знаний и данных, формирующие единое информационное пространство объекта сетевой структуры и цифрового двойника внешнего мира в среде с противодействием

**Обсуждение результатов.** Из предыдущего материала можно видеть, что модель группового поведения и модель группового управления распределённым объектом сетевой структуры, функционирующего в среде с противодействием, имеет ряд особенностей, которые сильно отличают их от аналогичных моделей сетевого объекта, функционирующего в среде без противодействия. Если говорить кратко, то эти отличия и особенности состоят в следующем:

1. Фактор *реального времени* и темп реализации фаз управления в цикле Бойда являются ключевыми особенностями модели такого объекта. К реальному времени могут быть привязаны временные рамки исполнения сценария группового поведения в целом, а также плановые временные интервалы исполнения работ конкретными исполнителями. Эта привязка делает систему моделирования и управления очень чувствительной к нарушениям указанных времён в процессе исполнения сценария. Очевидно, что задержка любой работы вызовет лавинообразный сдвиг по времени допустимых времён начала всех последующих работ сценария, связанных с задержанной работой отношением следования во времени и их транзитивного замыкания в частично упорядоченном множестве действий сценария. В этих условиях накопленная задержка времени может сделать текущий план неработоспособным, а распределение исполнителей действий сценария потребует пересчитывать.

Ещё более существенное влияние на поведение объекта может оказывать фактор противодействия. Этот фактор жёстко задаёт темп исполнения фаз восприятия и обработки информа-

ции для оценки ситуации, а также принятия решений и его исполнения в соответствии с циклом Бойда. Действительно, объект может надеяться достичь поставленной цели в условиях противодействия только в том случае, если он тратит на цикл меньшее время, чем его соперник. Это означает, что в цикле Бойда моделирование и управление должно выполняться с помощью алгоритмов, которые готовы выдать итоговое решение в любой момент времени (англ. *anytime-алгоритм*), диктуемый, по сути, соперничающей стороной.

2. В контуре управления обязательно присутствие *цифрового двойника* соперничающей стороны. Состав атрибутов цифрового двойника, скорость и точность оценивания и прогнозирования их значений играют решающую роль для успешного достижения цели управляемого объекта.

3. В процессе управления относительно новой является задача *векторной оценки ситуации* (т. е. её оценки с различных точек зрения) в реальном времени, причём с заданным темпом обновления этой оценки и в контексте достижимости распределённым объектом управления целевого состояния.

4. Сценарий группового поведения автономных сущностей является динамическим понятием, и его обновление (обновление сценария действий и обновление назначений исполнителей действий сценария) может потребоваться на каждом новом цикле Бойда. По этой причине система управления должна располагать множеством возможных сценариев действий, для которых назначение исполнителей может проводиться только в реальном времени в зависимости от текущей ситуации и информации о соперничающей стороне. Можно утверждать в связи с этим, что прогресс в задачах группового управления поведением множества автономных сущностей будет связан с успехами в создании моделей сценарных баз знаний и механизмов рассуждений о поведении в них в интересах автоматизации процессов синтеза сценариев. Существующие модели опираются пока только на механизмы выбора сценариев из заданного их множества для конечного набора ситуаций [14, 15].

5. Модель сетевого объекта, работающего в среде с противодействием, а также модель цифрового двойника соперника требуют использования специфических формализмов. Некоторые особенности таких формализмов сформулированы в работах [1, 2]. Главная из них обусловлена тем, что заранее планировать сам сценарий действий и исполнителей его работ от начала и до конца в таких приложениях невозможно. При работе в среде противодействием постоянными могут быть только *намерения* управляемого объекта, т.е. как он собирается достичь желаемого конечного состояния. Но этого нельзя сказать о намерениях соперника, модель которого в контуре управления представляется его ЦД. Фактически сценарий группового поведения сетевого объекта управления должен формироваться динамически, с определением сценария групповых действий объектов на один или несколько шагов вперёд. В качестве возможной формальной модели динамического порождения сценария целенаправленного поведения в работах [1, 2] рассматривается модель атрибутивной формальной грамматики. Однако модель, предложенная в этих работах, решает задачу динамического планирования для одиночного объекта и многошагового сценария, выполняемого им. В рассматриваемом случае эту задачу требуется решать в классе распределённых объектов, а потому такая модель нуждается в существенной переработке. В работе [16] для формализации таких моделей применён алгоритм, в основе которого лежит поиск на графах типа «и – или».

6. Специальная задача в рассматриваемой проблеме – это задача создания единого семантического пространства знаний и данных в условиях, когда все агенты могут работать со своими источниками данных. Для поддержания их «взаимопонимания» при исполнении сценария группового поведения все агенты команды должны использовать общий однозначно интерпретируемый понятийный базис, а также однозначную интерпретацию отношений, заданных на множестве этих понятий, то предъявляет особые требования к (распределённой) онтологии. Технологии создания такого единого семантического пространства пока далеки от совершенства.

Существуют и другие особенности моделей и потребной алгоритмической поддержки в системах рассмотренного класса. Например, динамика автономных объектов в условиях беспроводных коммуникаций может приводить к динамике и потере связности коммуникационной сети, поддерживающей обмен сообщениями между агентами, причём такие ситуации могут целенаправленно создаваться противодействующей стороной. Эти особенности подлежат изучению.

**Заключение.** В работе рассмотрены особенности и концептуальные основы моделирования группового поведения и управления в сложных системах, состоящих из большого числа автономных объектов разной природы, когда значительная часть этих объектов и компонент управления системы существует в виртуальной среде Интернет, которая в той или иной форме противодействует нормальному её функционированию. Системы и задачи подобного типа изучались ещё на начальной фазе развития сети Интернет и Интернет-технологий. Однако действительно актуальными они стали в настоящее время, когда Интернет-технологии обрели зрелость и стали технологиями массового использования.

Основное внимание в работе уделено описанию ключевых компонент и особенностей таких систем. По существу, множество приложений такого класса, а их число постоянно возрастает, формирует новый класс приложений, который пока слабо изучен. В работе, одна из целей которой состоит в том, чтобы привлечь к ней внимание исследователей, акцентировано внимание на тех проблемах, которые нужно решать в первую очередь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Городецкий В.И., Котенко И.В.** Командная работа агентов-хакеров: применение многоагентной технологии для моделирования распределённых атак на компьютерные сети // КИИ-2002. VIII Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. Труды конференции. М.: Физматлит, 2002.
2. **Городецкий В.И., Котенко И.В.** Концептуальные основы стохастического моделирования в среде Интернет. Труды института системного анализа РАН. Т. 9: Фундаментальные основы информационных технологий и систем. Под ред. С.В.Емельянова. М.: URSS, 2005.
3. OODA loop/ [https://en.wikipedia.org/wiki/OODA\\_loop](https://en.wikipedia.org/wiki/OODA_loop) (доступ 15.08.2020)
4. **Пантелеев М.Г.** Формальная модель опережающего интерактивного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени //XIV национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 октября 2014 г., Казань, Россия): Труды конференции. В 3-т., Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014, Т.1, с. 323–333 (pdf).
5. **Panteleev M.G.** Advanced Iterative Action Planning for Intelligent Real-Time Agents. *Procedia Computer Science*, Volume 150, 2019, P. 244–252.
6. **Brooks R.A.** Intelligence without Reasoning // *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'91)*, 1991, vol. 1, P. 569–595.
7. **Odell J.** Objects and Agents Compared. *Journal of Object Technology*, vol. 1, no. 1, May-June 2002, pp. 41-53. [http://www.jot.fm/issues/issue\\_2002\\_05/column4/](http://www.jot.fm/issues/issue_2002_05/column4/) (доступ 15.08.2020)
8. **Ferber J.** Foreword. In Cossentino, M., Hilaire, V., Molesini, A., Seidita, V. (Eds.). *Handbook on Agent-Oriented Design Processes*. Springer. 2014. P. V–VI.
9. **Gorodetsky V., Larukhin V., Skobelev P.** Conceptual Model of Digital Platform for Enterprises of Industry 5.0. In I. Kotenko et al. (Eds.): *Proceedings of the International Conference on Intelligent Distributed Computing (IDC 2019)*, *Studies in Computational Intelligence*, vol. 868, pp. 35–40, 2019.
10. **Lambert G.A.** Grand Challenges of Information Fusion // *Proceedings of International Conference on Information Fusion*, Cairns, Australia, 2003. P. 213–220.
11. **Steinberg A.N., Bowman C.L., White F.E.** Revisions to the JDL Data Fusion Model // *A1AA Missile Sciences Conference of Naval Postgraduate School*, CA, 1998.
12. **Fischer Y.** On Situation Modeling and Recognition. // *Proceedings of the 2009 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory*. Ed.: J. Beyerer, 2009. P. 203–215.
13. **Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В.** Базовая онтология коллективного поведения и её расширения. *Известия РАН «Теория и системы управления»*, *Известия РАН: Теория и системы управления*. 2015, № 5, с. 102–121.
14. **Федунов Б.Е.** Интеллектуальные агенты в базах знаний бортовых оперативно-советующих экспертных системах типовых ситуаций функционирования антропоцентрического объекта. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2019, № 6, С. 90–102.
15. **Федунов Б.Е.** Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов. М.: Де'Либри, 2018. 246 с.
16. **Городецкий В.И., Серебряков С.В., Троцкий Д.В.** Средства спецификации и инструментальной поддержки командного поведения автономных агентов. *Известия Южного федерального университета*, № 3, 2011, С. 116–133.

V.I. Gorodetsky, M.G. Panteleev (St. Petersburg Electro technical University “LETI”, St. Petersburg)  
**Networks of Autonomous Agents Operating in an Adversary Environment: Basic Features of the Conceptual Model**

The paper analyzes conceptual model of a complex real-time system comprising the set of autonomous objects of diverse natures operating within an adversary Internet-environment. This is an important class of applications exemplified in economy, politics, computer network assurance and like. The model is analyzed in the context of J. Boyd's control loop proposed specifically for adversary interacting system modeling and control. The paper formulates the tasks of the loop phases, justifies the use of multi-agent architecture for modeling the main system and a digital twin of adversary. It is also justifies the shared semantic space of data and knowledge as the core of the model in question.