

Многоуровневая самоорганизация ресурсов киберфизической системы: контекстно-ориентированный подход и реализация¹

Аннотация. В статье представлен контекстно-ориентированный подход к многоуровневой самоорганизации ресурсов киберфизической системы, основанный на генерации политик поведения ресурсами верхнего уровня и обеспечении их учета при самоорганизации ресурсов нижнего уровня. Для обеспечения совместного доступа к информации ресурсами киберфизической системы предложено использовать технологию интеллектуальных пространств. Апробация предложенного подхода осуществлена на примере сценария транспортировки груза, в котором участвуют три типа физических устройств (роботов), контролируемые управляющими ресурсами, и два типа ресурсов планирования, отвечающие за генерацию политик поведения управляющих ресурсов. Для реализации технологии интеллектуальных пространств используется открытая платформа Smart-M3.

Ключевые слова: самоорганизация, интеллектуальные пространства, семантический Веб, контекст, онтологии, роботы.

Введение

Киберфизические системы представляют собой множество ресурсов, взаимодействующих между собой в интеллектуальном пространстве и управляющих устройствами в физическом пространстве в режиме реального времени (Рис.1). При этом они базируются на инфраструктурах, обеспечивающих связь, вычисления, управление и объединяющих сенсоры, вычислительные устройства, сервисы и средства коммуникаций.

Термин «киберфизические системы» весьма близок по смыслу к «Интернету вещей» [1]. Исследования в данной области ориентированы на разработку моделей и технологий, поддерживающих работу ресурсов киберфизических систем и сетевого принципа взаимодействия [2]. Такие системы открывают возможности предоставления новых типов ресурсов при тес-

ной интеграции с физическими системами. При анализе подходов и технологий, направленных на поддержку киберфизических систем, в [3] сделан вывод о том, что следующее поколение таких систем не будет являться результатом агрегирования большого количества нескоординированных идей и технологий, а потребует нового подхода к организации взаимодействия ресурсов, основанного на принципах самоорганизации.

Самоорганизующиеся киберфизические системы характеризуются возможностью реагировать на изменения в физическом пространстве путем децентрализованного принятия решений относительно необходимого поведения физических устройств при отсутствии внешнего управления. Такие системы являются особенно устойчивыми к внешним воздействиям в силу их способности к адаптации и обеспечению своей «выживаемости» [4].

¹ Представленные результаты исследований являются частью проектов № 13-07-00336, 13-07-12095, 14-07-00345, 14-07-00363, финансируемых Российским фондом фундаментальных исследований. Работа выполнена также при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и программы РАН П 40 «Актуальные проблемы робототехники».

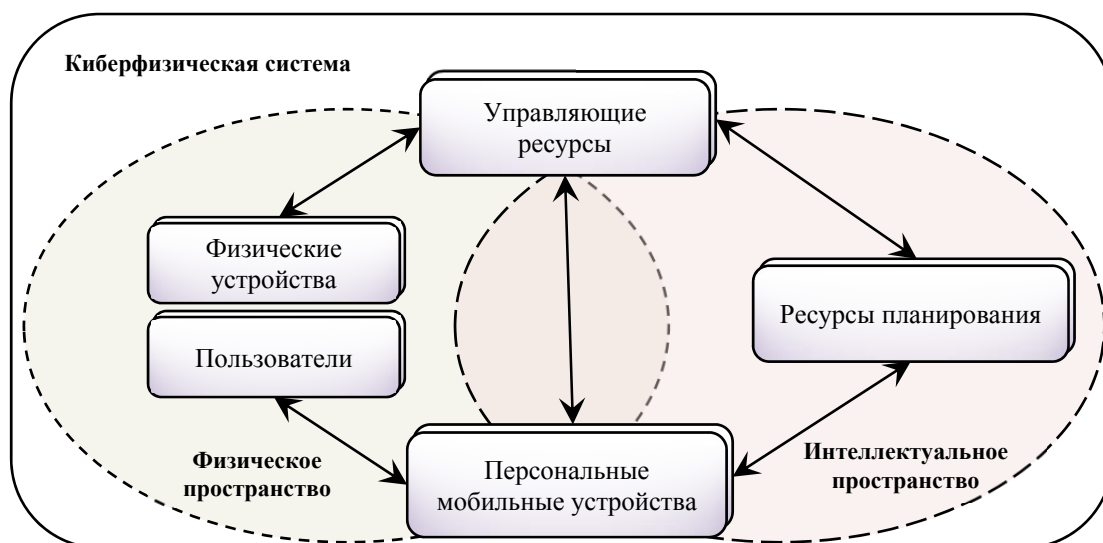


Рис.1. Киберфизическая система

В статье предложен подход к самоорганизации ресурсов киберфизической системы, подразумевающий как самоорганизацию внутри отдельных уровней системы, так и межуровневую самоорганизацию. Подходы и технологии для одноуровневой самоорганизации активно развиваются и даже реализованы в ограниченных областях, но пока не для массового использования.

Для апробации предложенного подхода в статье использован сценарий последовательного перемещения груза группой физических устройств (роботов), в котором участвуют роботы, управляемые соответствующими ресурсами - робот-конвейер, обычный робот-манипулятор, влагозащищенный робот-манипулятор, и два типа ресурсов планирования - пользовательский и погодный сервисы.

1. Многоуровневая самоорганизация ресурсов киберфизической системы

Многоуровневая самоорганизация на сегодняшний день является малоизученным направлением. Представленный в данной статье подход позволяет выполнять самоорганизацию сложной системы более эффективно за счет использования принципа конфигурирования «сверху вниз». Этот принцип подразумевает разделение ресурсов планирования киберфизической системы на уровни (например, уровень оперативного планирования и уровень стратегического планирования) и выработку политик поведения ресурсами

стратегического планирования для ресурсов оперативного планирования, а ресурсами оперативного планирования - для ресурсов управления физическими устройствами.

Анализ работ в области организационного поведения и управления командами показывает, что наиболее эффективными являются самоорганизующиеся команды, работающие в контексте группового поведения (Рис. 2). Например, социальная самоорганизация была объектом исследований Hofkirchner [7] и Fuchs [8]. Однако в этом случае существует значительный риск того, что такая группа может выбрать неверную стратегию, что не позволит ей достичь желаемых целей. Для этого в самоорганизующиеся группы и системы предлагается добавить политики поведения, определяемые на более высоком уровне. Это предложение послужило толчком к развитию идеи социопирированной самоорганизации.

Киберфизические системы подразумевают создание и поддержку интеллектуального пространства, которое используется ресурсами киберфизической системы в качестве масштабируемой инфраструктуры. Киберфизическая система считается самоорганизующейся, если ее ресурсы способны автономно отслеживать свой контекст, вовремя предоставлять необходимую информацию и другие требуемые сервисы по запросу и адаптироваться при изменении контекста.

Для обеспечения выбора правильной стратегии самоорганизующимися ресурсами в разработанном подходе предлагается обеспечить их

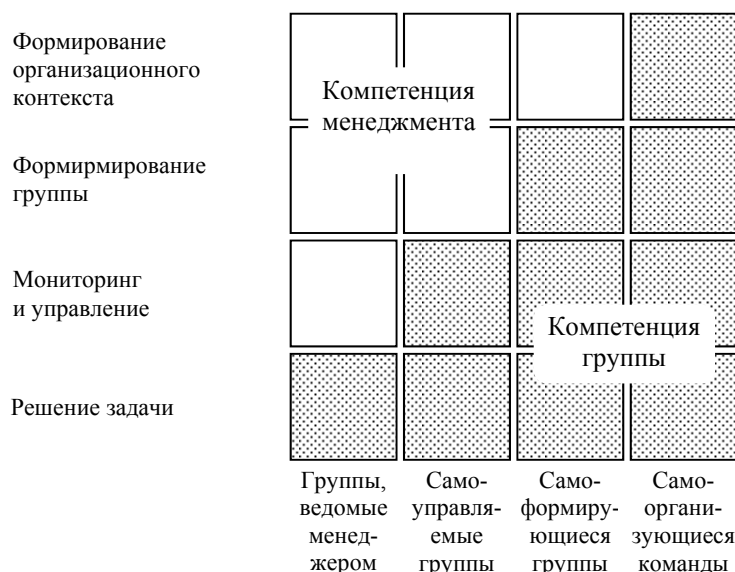


Рис. 2. Компетенции рабочих групп [5]

политиками поведения, передаваемыми с более высокого уровня на низкий. Такое опосредованное управление позволяет достичь большей эффективности самоорганизации на основе принципа принятия решения «сверху вниз».

Внутриуровневая самоорганизация рассматривается как тройственный процесс а) познания (создание субъективного контекстно-зависимого знания), б) коммуникации (объективизация и субъективизация знания) и в) синергическая кооперация (создания нового объективного знания). Эффективное использование индивидуально полученного контекстно-зависимого субъективного знания достигается посредством процесса социальной координации и кооперации. Объективное знание хранится в формализованном виде и позволяет добиться социальных отношений, независимых от пространственно-временного контекста.

Для достижения внутриуровневой самоорганизации системы, ее компоненты (ресурсы) должны быть инициативными, осведомленными, активными и социально-ориентированными. Ресурсы, являющиеся частью киберфизической системы, изменяют окружающую среду, что приводит к изменению поведения других ресурсов системы. Это также подтверждается тем, что индивидуальное поведение частично определяется социальным окружением, на которое воздействуют ресурсы (такое влияние называют нормами поведения). С этой целью был разработан протокол взаимодействия

ресурсов на основе подхода BarterCast [6], основанный на следующих идеях:

- каждый ресурс строит сеть, представляющую все возможные варианты взаимодействия с другими ресурсами, известные данному;
- репутация ресурса зависит от репутации других ресурсов, находящихся на пути между данным ресурсом и ресурсом, с которым осуществляется взаимодействие.

На Рис. 3 показана общая схема подхода. Поскольку структуры и модели самоорганизации на всех уровнях идентичны, представленная схема генерации политик осуществляется на каждом уровне. Технологическая интероперабельность ресурсов поддерживается использованием общих стандартов, а семантическая – обеспечивается использованием общей семантики и терминологии, описываемой общей онтологией.

2. Интеллектуальные пространства на базе платформы Smart-M3

Платформа Smart-M3 [10, 11] является одним из вариантов реализации технологии интеллектуальных пространств. Она позволяет создать инфраструктуру, на основе которой распределенные информационно-управляющие системы строят свои интеллектуальные пространства, где и осуществляется взаимодействие их ресурсов (Рис. 1). Таким образом, все

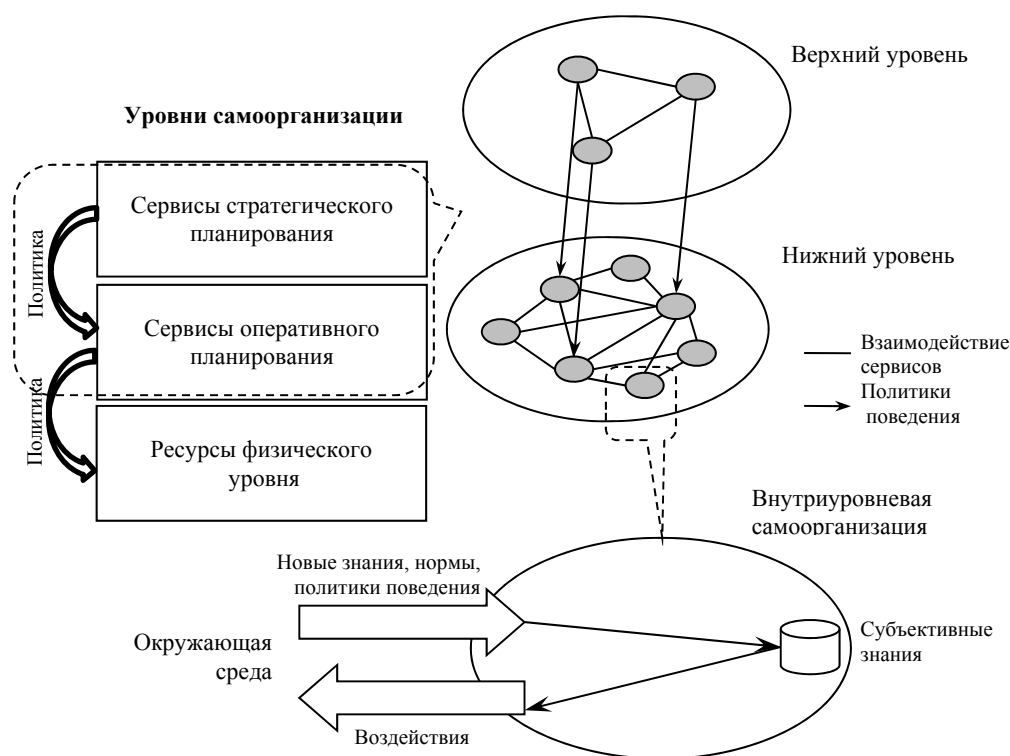


Рис. 3. Концепция подхода

взаимодействие пользовательских мобильных устройств и ресурсов киберфизической системы происходит в интеллектуальном пространстве, а управляющие воздействия передаются ресурсами в физическое пространство.

Smart-M3 основывается на концепции семантический Веб. Ее ключевыми идеями являются независимость от конкретных производителей, оборудования, области применения и возможность обмена информацией между различными программными модулями посредством простого и общедоступного информационного брокера. Благодаря использованию концепции семантический Веб, обмен информацией между участниками пространств может осуществляться на основе протокола HTTP с использованием унифицированных идентификаторов ресурсов (Uniform Resource Identifier – URI) [12].

Общая структура платформы представлена на Рис. 4. Ядро системы подразделяется на два элемента: семантический информационный брокер (Semantic Information Broker — SIB) и физическое хранилище информации. SIB предоставляет доступ информационным агентам к хранилищу информации, обеспечивая их такими функциями обработки информации как

вставка, извлечение, редактирование, удаление и подписки на изменение информации в хранилище. В хранилище вся информация сохраняется как семантическая сеть, удовлетворяющая требованиям стандарта RDF (Resource Description Framework) [13], в которой узлы и дуги имеют унифицированные идентификаторы ресурсов. Каждое RDF - утверждение описывается тройкой «субъект – предикат – объект», например, «робот – имеет – ультразвуковой датчик». Информационные агенты — это программные модули, с помощью которых осуществляется взаимодействие с SIB через Smart Space Access Protocol (SSAP — протокол доступа к интеллектуальному пространству) [11].

3. Апробация подхода на примере сценария транспортировки груза

Для апробации предложенного подхода был выбран сценарий перемещения груза роботами, сконструированными на основе набора Lego Mindstorms EV3 Educational Kit [3], состоящего из следующих компонентов:

- блок управления (brick) - процессор ARM v.9 с частотой 300 МГц, 64 мегабайта оперативной

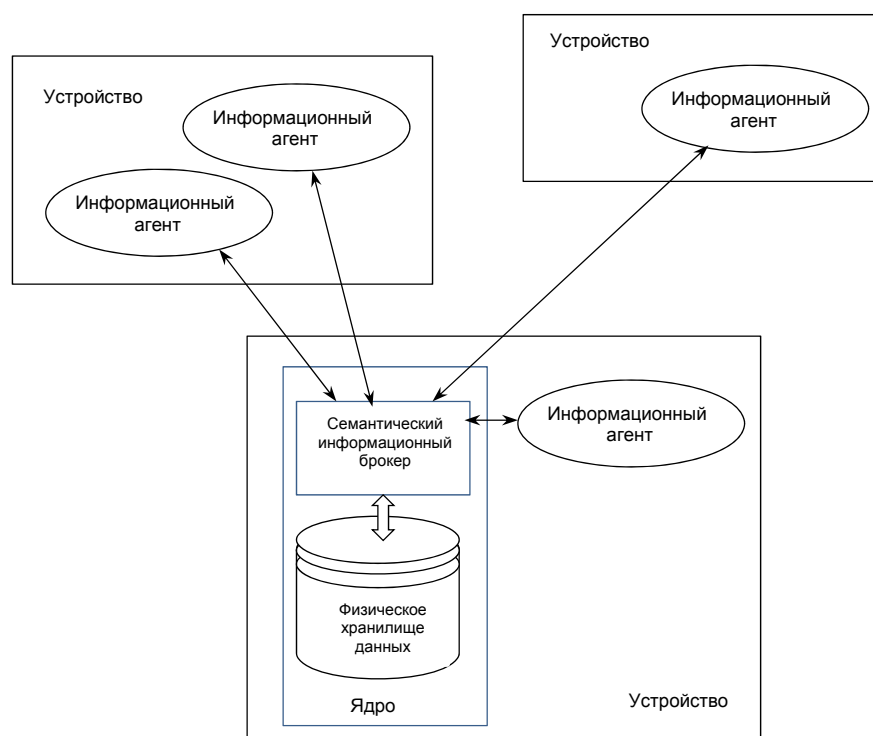


Рис. 4. Структура платформы Smart-M3

памяти, 16 flash памяти, microSDHC порт, USB-порт (с возможностью подключения WiFi-адаптера которого нет в стандартном комплекте), Bluetooth - модуль, LCD экран, Speaker - устройство для воспроизведения звука;

- моторы (два больших и один средний, предназначенный для более точной работы);
- сенсоры - ультразвуковой сенсор (позволяет измерять расстояние до объектов от 3 до 150 см), датчик касаний (позволяет определять касается ли кнопка на датчике чего-либо), гироскоп (позволяет измерять углы и скорость поворотов), сенсор определения цвета (для определения цветов объектов);

- более чем 550 различных деталей для конструирования, провода для соединения моторов и датчиков к блоку управления.

В сценарии участвуют три типа физических устройств: робот-конвейер (Рис. 5), обычный робот-манипулятор (Рис. 6, а), влагозащищенный робот-манипулятор (Рис. 6, б) и два типа ресурсов оперативного планирования: пользовательский и погодный сервисы. По аналогии в сценарий могут быть добавлены ресурсы стратегического планирования, самоорганизация которых будет генерировать политики поведения для ресурсов оперативного планирования.

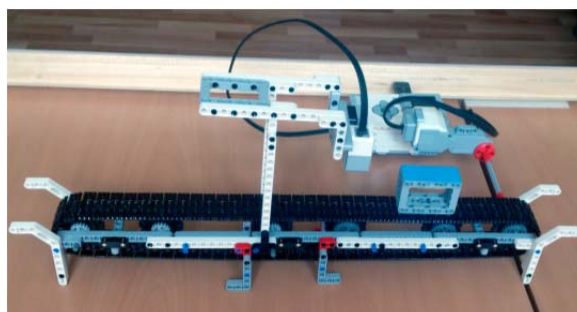
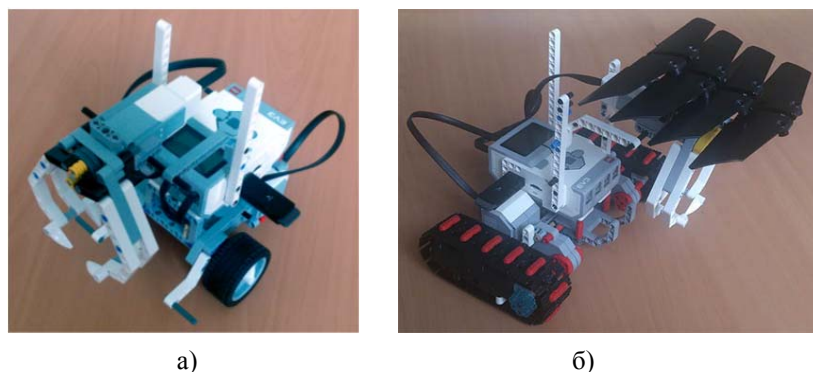


Рис. 5. Робот конвейер



а)

б)

Рис. 6. Роботы манипуляторы

Робот-конвейер неподвижен в пространстве и состоит из конвейерной ленты, с помощью которой перемещается груз. Он также оборудован датчиком для измерения параметров груза и определения его типа. Влагозащищенный робот-манипулятор имеет защиту груза от воды, высокую проходимость и малую скорость передвижения за счет использования гусениц. Обычный робот-манипулятор обладает более высокой скоростью, но не обеспечивает влагозащищенность груза. Пользовательский сервис представляет собой графический интерфейс, в котором задаются основные параметры сценария: пользователь задает требуемое время, за которое груз того или иного типа должен быть доставлен в пункт назначения, а также указывает пункт назначения для каждого груза. Погодный сервис реализует интерфейс к источнику информации о погоде в данный момент времени в месте расположения роботов.

В результате взаимодействия пользовательского и погодного сервисов происходит генерация политики поведения для роботов, в рамках которой они взаимодействуют между собой и принимают решение - кому необходимо транспортировать груз. Политика учитывает четыре характеристики процесса доставки груза: тип объекта, скорость доставки, требование влагозащищенности груза и пункт назначения. В зависимости от скорости доставки и требования влагозащищенности груза при транспортировке объект может доставляться разными типами роботов-манипуляторов.

Самоорганизация роботов в сценарии транспортировки груза происходит по следующим правилам:

- если пользователь выбрал высокую скорость доставки и не требуется защищать груз от

воды, то транспортировку осуществляет обычный робот-манипулятор;

- если скорость доставки груза для пользователя не важна и не требуется защищать груз от воды, то доставку осуществляет ближайший из имеющихся роботов;

- если скорость доставки груза для пользователя не важна и требуется защищать груз от воды, то доставку осуществляет влагозащищенный робот-манипулятор;

- если пользователь выбрал высокую скорость доставки и требуется защищать груз от воды, то задача не может быть выполнена и робот-конвейер возвращает груз обратно на исходную позицию.

В общем виде UML-диаграмма системной архитектуры проекта показана на Рис. 7. Информационный брокер (SIB) функционирует на компьютере под управлением операционной системы Linux. Информационными агентами выступают ресурсы управления физическими устройствами и ресурсы оперативного планирования. Генерация политик поведения происходит на уровне ресурсов оперативного планирования и публикуется ими в интеллектуальном пространстве. Ресурсы управления физическими устройствами получают уведомления о появлении этих политик и учитывают их при самоорганизации.

Последовательность выполнения сценария показана на Рис. 8 в виде UML-диаграммы последовательности. На диаграмме представлены четыре основных компонента системы:

- Пользовательский сервис - приложение для персонального компьютера, предоставляющее графический интерфейс пользователю для взаимодействия с другими компонентами системы.

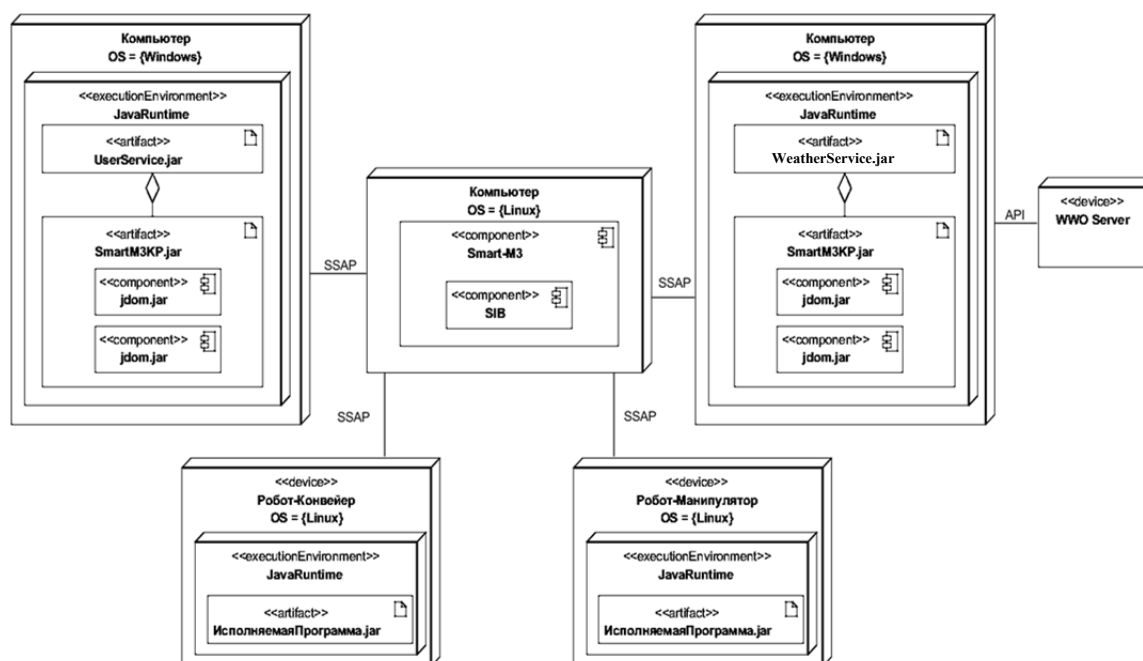


Рис. 7. Системная архитектура проекта

- Погодный сервис - приложение для персонального компьютера, обеспечивающее взаимодействие системы с сервисом World Weather Online (WFO).

- Семантический информационный брокер - приложение для персонального компьютера, представляющее собой интерфейс взаимодействия информационных агентов с интеллектуальным пространством.

- Сервис управления роботом - приложение для робота-манипулятора, управляющее физическим устройством – роботом.

Робот-конвейер публикует в интеллектуальном пространстве информацию о характеристиках грузов. Роботы-манипуляторы публикуют свои IP-адреса, используемые для определения региона расположения и поиска информации о погоде:

(“Robot_[robot number]”, “has_ip”, [robot ip]),
а также подписываются на информацию о текущей политике и о статусе груза:
(“Robot_[robot number]”, “Policy”, null).

Далее запускается погодный сервис, формирующий HTTP-запрос к сервису World Weather Online на основе IP-адресов роботов. Получив ответ и обработав данные, погодный сервис публикует в интеллектуальном пространстве информацию об осадках:

(“Weather”, “hasParticipation”, “[True/False]”).

На основе полученных данных погодный сервис генерирует политику и публикует ее в ИП:

(“Policy”, “hasColor”, “Color”),
(“Policy”, “waterproof”, [True/False]),
(“Policy”, “hasWarehouseNumber”, “Warehouse”),
(“Policy”, “hasVelocity”, “null”).

После этого происходит запуск пользовательского приложения и выбор параметров выполнения сценария, необходимых пользователю. Следует отметить, что сценарий подразумевает взаимодействие сервисов и генерацию совместной политики, поэтому при возникновении спорной ситуации пользовательский сервис выводит уведомление для пользователя о невозможности выполнить сценарий с требуемыми параметрами. К примеру, если пользователь потребует высокую скорость доставки неводостойкого груза, а в текущей политике погода считается неблагоприятной – пользовательскому сервису (а далее и пользователю через графический интерфейс) поступает оповещение об этом и предложение изменить скорость доставки. При согласии пользователя новые характеристики политики публикуются в интеллектуальном пространстве и происходит доставка груза. В противном случае робот-конвейер возвращает груз обратно на исходную позицию, так как задача не может быть выполнена.

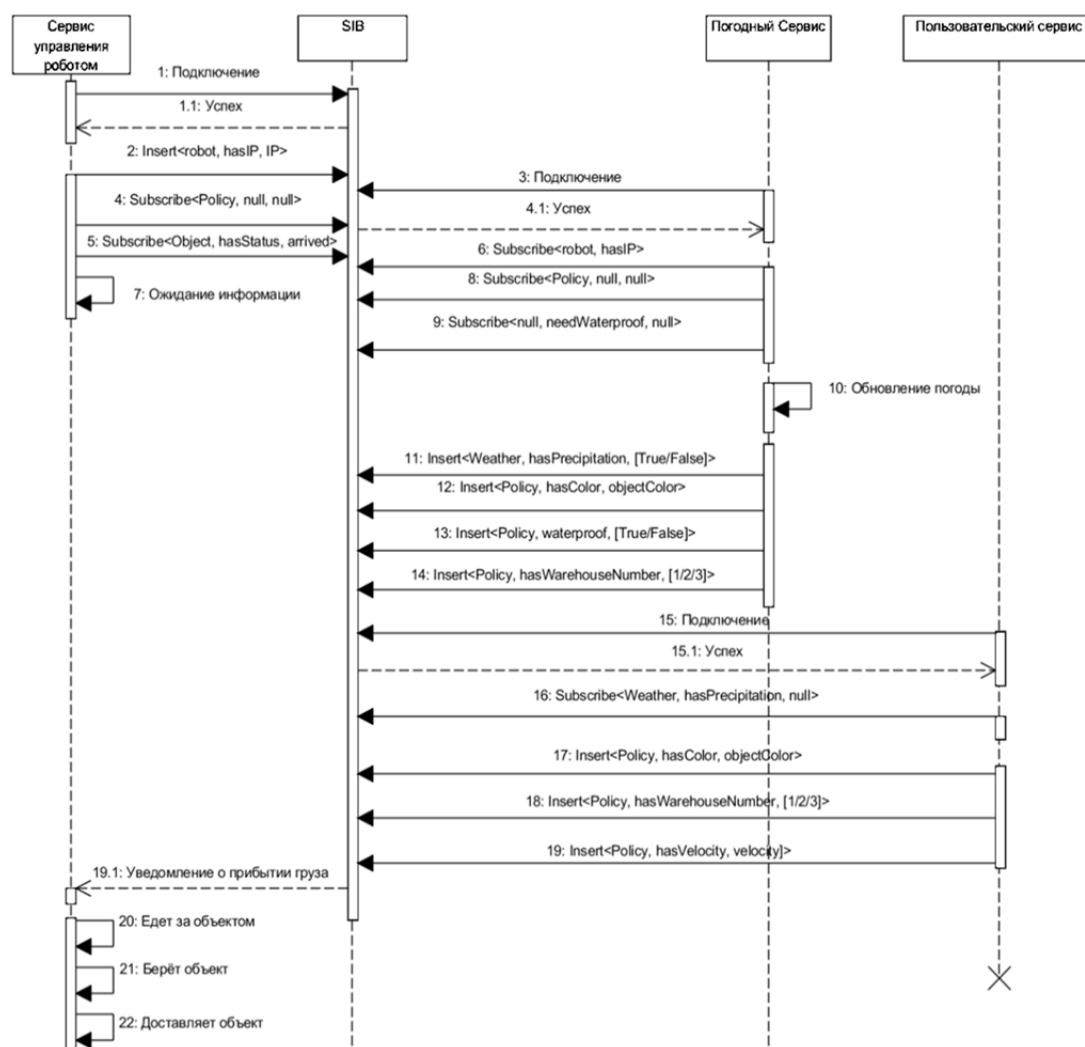


Рис. 8. Последовательность выполнения сценария

Литература

1. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of things: a survey // Computer Networks. 2010. Vol. 54, no. 15. P. 2787–2805.
2. Cohen E. Reconceptualizing information systems as a field of the transdiscipline informing science: From ugly duckling to swan // Journal of Computing and Information Technology. 1999. Vol. 7, no. 3. P. 213–219.
3. Horvath I., Gerritsen B.H.M. Cyber-Physical Systems: Concepts, technologies and implementation principles // Proceedings of TMCE 2012 / Eds. by I. Horvath, Z. Rusak, A. Albers, M. Behrendt. 2012. P. 19–36.
4. Serugendo G.D.M., Gleizes M.-P., Karageorgos A. Self-Organisation and Emergence in MAS: an overview // Informatica. 2006. Vol. 30. P. 45–54.
5. Hackman J.R. The design of work teams // Handbook of Organizational Behavior / Ed. by J.W. Lorch. NJ, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1987.
6. Meulpolder M., Pouwelse J.A., Epema D.H.J., Sips, H.J. BarterCast: A practical approach to prevent lazy freeriding in P2P networks, IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, 2009, P. 1–8.
7. Hofkirchner W. Emergence and the logic of explanation // An Argument for the Unity of Science. Acta Polytechnica Scandinavica. Mathematics, Computing and Management in Engineering Series. 1998. Vol. 91. P. 23–30.
8. Fuchs C. Globalization and self-organization in the knowledge-based society // TripleC. 2003. Vol. 1, no. 2. P. 105–169.
9. Jantsch E. Design for Evolution. New York: George Braziller. 1975.
10. Smart-M3. Wikipedia. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Smart-M3>.
11. Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkkö O. Smart-M3 Information Sharing Platform, 2010 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Italy 2010. P. 1041–1046.
12. Berners-Lee T., Fielding R., Masinter L. RFC 3986 – Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax, URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc3986>.
13. Resource Description Framework (RDF), URL: <http://www.w3.org/RDF>.

Смирнов Александр Викторович. Профессор, заведующий лабораторией интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН) и заведующий международной лабораторией интеллектуальных технологий для социо-киберфизических систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). Окончил Ленинградский государственный политехнический университет в 1979 г. Доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ. Автор более 300 печатных работ. Область научных интересов: управление знаниями, веб-сервисы, системы групповой поддержки принятия решений, виртуальные предприятия, управление цепями поставок. E-mail: smir@iias.spb.su

Кашевник Алексей Михайлович. Старший научный сотрудник Федерального бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН) и доцент кафедры информационных систем факультета информационных технологий и программирования Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). Окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет в 2005 году. Кандидат технических наук. Автор более 150 печатных работ. Область научных интересов: управление знаниями, профилирование, онтологии, интеллектуальные пространства, логистические системы. E-mail: alexey@iias.spb.su

Михайлов Сергей Андреевич. Магистрант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) и программист Федерального бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Окончил бакалавриат Университета ИТМО в 2015 году. Автор двух печатных работ. Область научных интересов: интеллектуальные пространства, робототехника. E-mail: mikhaylovsergeyandreevich@gmail.com

Миронов Михаил Дмитриевич. Магистрант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). Окончил бакалавриат Университета ИТМО в 2015 году. Область научных интересов: интеллектуальные пространства, робототехника. E-mail: mironoff.togo@gmail.com