

Данилова Светлана Кузьминична – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН; e-mail: lab45_1@ipu.ru; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: +79151387098; к.т.н.; в.н.с.

Кусков Антон Михайлович – e-mail: ravenkus2@gmail.com; тел.: +79067520757; старший инженер-программист.

Кусков Иван Михайлович – e-mail: butovokus@gmail.com; тел.: +79639627801; ведущий инженер-программист.

Тарасов Николай Николаевич – e-mail: tnn53@rambler.ru; тел.: +74996172900; к.т.н.; с.н.с.

Danilova Svetlana Kuzminichna – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: lab45_1@ipu.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +79151387098; cand. of eng. sc.; leading researcher.

Kuskov Anton Mikhailovich – e-mail: ravenkus2@gmail.com; phone: +79067520757; senior software engineer.

Kuskov Ivan Mikhailovich – e-mail: butovokus@gmail.com; phone: +79639627801; leading software engineer.

Tarasov Nikolai Nikolaevich – e-mail: tnn53@rambler.ru; phone: +74996172900; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 004.003, 004.896:62-5: 007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-234247

В.И. Городецкий, О.В. Карсаев

САМООРГАНИЗАЦИЯ ГРУППОВОГО ПОВЕДЕНИЯ КЛАСТЕРА МАЛЫХ СПУТНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Системы комического наблюдения являются важным источником информации, необходимой для оперативного решения широкого круга задач гражданского и военного назначения. Эффективность функционирования таких систем зависит от многих факторов. Наряду с множеством технических, информационных, технологических, инфраструктурных, экономических и других факторов, их эффективность в значительной степени зависит от качества планирования миссий космических аппаратов и управления в реальном времени процессом исполнения миссии. В работе сформулирована проблема построения самоорганизующейся системы группового управления поведением кластера малых спутников, реализующего автономное исполнение заявок на сервис по добычанию информации о наземных объектах средствами космического наблюдения. В ней предлагается новая концепция группового управления в системе космического наблюдения. В основу этой концепции положен принцип самоорганизации группового поведения кластера спутников. Такая система управления оказывается в состоянии реализовать автономное планирование и оперативное управление космической группировкой, в которой все базовые функции процесса управления реализуются ее бортовыми средствами. Теоретический фундамент этой концепции строится на моделях коллективной робототехники, которые в настоящее время активно развиваются в области многоагентных систем. В работе приведен краткий обзор современного состояния исследований в области систем управления кластерами малых спутников, дана достаточно общая постановка задачи, в которой кластер малых спутников рассматривается как полностью автономная система, предназначенная для выполнения заказов на сбор и доставку космической информации о наземных объектах. При этом полагается, что система управления самостоятельно в реальном времени распределяет задачи наблюдения на множестве спутников группировки, планирует и составляет расписание выполнения наблюдений в соответствии с пространственно-временными требованиями заказчика, выполняет оперативное управление распределенным исполнением построенного расписания и выполняет коррекцию распределения задач и

расписания их выполнения при возникновении нештатных ситуаций. В работе дано детальное описание разработанной концепции самоорганизующейся системы группового управления кластером малых спутников, и архитектуры ее программной реализации.

Малый спутник; ресурсы спутника; задача наблюдения; распределенная система наблюдения; автономная миссия; самоорганизация; коллективное поведение; парное взаимодействие спутников; динамическая коммуникационная сеть.

V.I. Gorodetsky, O.V. Karsaev

DISTRIBUTED SURVEILLANCE SYSTEM BASED ON SELF-ORGANIZED COLLECTIVE BEHAVIOR OF SMALL SATELLITE CLUSTER

Orbital surveillance systems constitute an important information source needed to solve the wide range of civilian and military applications. Efficiency of such system performance depends on many factors and issues. Among technical, informational, technological, economical and other factors and issues, an important role belongs to the computational efficiency and quality of planning orbital distributed surveillance system missions and operational (real-time) control of the mission implementation. The paper concerns with the basic problems and various issues associated with the autonomous planning and control of collective behavior of small satellite cluster destined to collect information about Earth-located objects. In it, the novel conception of operational model of distributed orbital surveillance system is proposed. The self-organized collective behavior model of small satellite cluster constitutes the basis of this conception. Such the conception intends for fully autonomous implementation of the satellite cluster mission planning and control with allocation of the corresponding tasks over the computing resources of the satellites themselves. The fundamentals of the proposed model is currently being actively developed in the area of multi-agent systems research. The paper provides for a brief survey on the current state-of-the-art with the researches and developments in the area of the control systems for small satellite clusters. It formulates general problem statement considering cluster of small satellites as a completely autonomous system destined for the fulfilment of the dynamic flow of orders on collection and delivery of the space information about ground objects. At that, it is assumed that corresponding control system operates in real time mode and concurrently performs the order execution planning and scheduling, according to the space and temporal relations predefined by the order customers. It also supervises the distributed order fulfilment and processing in cases of exceptional situations. The paper provides for detailed description of the proposed conception of self-organized group control system and architecture of its software implementation.

Small satellite; satellite resources; surveillance; distributed surveillance system; autonomous mission; self-organization; collective behavior; peer-to-peer satellite interaction; dynamic communication network.

1. Введение. Круг научных, коммерческих, государственных, военных и других организаций, заинтересованных в развитии новых интеллектуальных систем планирования и оперативного управления кластерами малых космических аппаратов (МКА), крайне широк. Естественно, что особую заинтересованность в этих разработках проявляют различные военные организации и ведомства. Например, в 2007 году конгресс США образовал новый офис для управления программой «Оперативно реагирующий космос» (*Operationally Responsive Space*). Основной целью этой программы является обеспечение и координация космических исследований в интересах Министерства обороны США. Информацию об этой программе можно найти в статье [1]. В ней приводится общее описание структуры исследований, а также ретроспективное описание выполненных миссий программы (ORS 1, 2, 3 и 4) и задачи новой миссии ORS-5. В рамках этой миссии в 2017 году планируется запуск группировки МКА, которая будет обеспечивать решение таких задач, как тактическая круглосуточная разведка, сбор информации и распознавание целей, радиолокационные наблюдения, обнаружение пуска ракет и обеспечение связи.

Разработка решений в области планирования и управления орбитальной группировкой МКА является одним из основных направлений исследований в этой программе.

Данная работа также посвящена проблеме планирования и оперативного управления группировкой МКА. В ней предлагается новая концепция организации и модель группового управления в системе космического наблюдения. В основу этой концепции положен принцип самоорганизации группового поведения кластера МКА. Такая система управления оказывается в состоянии реализовать автономное планирование и оперативное управление космической группировкой, в которой все базовые функции процесса управления реализуются ее бортовыми средствами. Теоретический фундамент этой концепции использует модели коллективной робототехники, которые в настоящее время активно развиваются в области много-агентных систем.

Дальнейший материал данной работы организован следующим образом. В разделе 2 дается краткий обзор состояния исследований по проблеме управления группировкой МКА. В разделе 3 описывается постановка задачи исследования и формулируются базовые концептуальные принципы построения и реализации *автономного* управления группировкой МКА. В разделе 4 дается описание компонент системы сбора и доставки космической информации и типового сценария обработки поступающих заявок на информацию. По существу, в этом сценарии описываются типовые случаи использования группировки МКА и задачи, которые при этом ей необходимо решать. Показывается, что такая концепция управления группировкой МКА соответствует современной концепции построения самоорганизующейся В2В-сети (от англ. *Business-to-Business*), для реализации которой уже имеется определенный алгоритмический задел. В заключении очерчивается круг теоретических и технических проблем, которые необходимо решать для практической реализации системы *автономного* управления группировкой МКА, в частности, для построения программного демонстратора самоорганизующегося кластера МКА.

2. Обзор состояния исследований. Эффективность систем космического наблюдения за земной поверхностью зависит от многих факторов. Наряду с множеством технических, информационных, технологических, инфраструктурных, экономических и других факторов, эффективность таких систем в значительной степени зависит от эффективности и качества планирования миссий космических аппаратов (КА). Достаточно подробный обзор современного состояния проблемы планирования и оперативного управления миссиями КА можно найти в работе [2]. В ней описаны как существующие системы планирования, так и основные тенденции и направления их развития.

Под традиционными системами планирования миссий КА наблюдения понимаются системы, в которых планирование выполняется полностью в наземных центрах управления. В них объектами планирования являются отдельные КА. Системы планирования и управления такого типа используются на практике уже более половины столетия. Примерами являются системы *APSI*, *ASPEN*, *EUROPA*, *flexplan* и другие, информацию о которых можно найти в работе [3]. Среди традиционных систем планирования миссий КА наблюдения следует особо выделить систему *CPAW* (от англ. *Collection Planning & Analysis Workstation*) [4]. Система разработана компанией *Orbit Logic* (США). Она решает задачи планирования наблюдений за объектами на земной поверхности и в космическом пространстве в интересах гражданских приложений и в интересах задач военных ведомств США.

Во всех системах этого поколения процесс планирования базируется на прогнозировании и моделировании состояния ресурсов КА в зависимости от времени, которые всегда носят приближенный характер. Поэтому, чтобы гарантировать вы-

полноту запланированных операций, их потребности в ресурсах задаются с запасом, что ведет к простоям ресурсов КА. По этой причине эксперты компании *SSTL Ltd* полагают, что эта модель планирования не имеет перспектив [5].

Альтернативным вариантом планирования являются системы, использующие, хотя бы частично, автономное планирование, реализуемое бортовыми компьютерами КА. В этом случае появляется возможность использовать более достоверные данные о координатах и состоянии ресурсов КА, например, информацию о реальном объеме свободной памяти, о запасе электроэнергии, состоянии доступности каналов связи для передачи информации потребителю и т.д. Имеются и другие преимущества автономного планирования. Например, на борту могут планироваться дополнительные съемки в проактивном режиме, если по результатам бортовой обработки полученных данных обнаружено низкое качество материала.

Автономное планирование в настоящее время применяется на практике в ряде миссий, однако, в основном, в экспериментальном режиме. Примеры таких систем можно найти в [6–9]. По существу, автономное планирование поддерживает адаптивное *индивидуальное* поведение спутников.

В настоящее время активно развиваются автономные системы космического наблюдения нового поколения, построенные из малых КА. В них планирование миссий использует координацию планов наблюдения различных спутников и перераспределение задач для более эффективного использования их возможностей. Такая модель планирования наблюдений в группировке МКА потенциально ведет также к повышению ее живучести за счет *адаптации группового* поведения спутников для компенсации негативных последствий непредвиденных событий.

Такие системы группового планирования относятся к системам третьего поколения. Их отличительной особенностью является перенос значительной части функций планирования миссий и управления группировкой МКА на бортовые средства и использование глобальных показателей качества планирования. Эта стратегия обеспечивает вычислительно эффективное автономное распределенное планирование задач и реакцию на непредвиденные события в реальном времени.

Примером подобной системы является система планирования *EDSN* (англ. *Edison Demonstration of Smallsat Networks*) разрабатываемая NASA [10] как демонстратор для проверки концепции “роя малых спутников, который выполняет скоординированную деятельность” (в оригинале англ. “*proof of concept constellation or swarm of satellites performing coordinated activities*”). Этот проект планирует использовать группировку из восьми МКА, каждый весом около 2 кг. В запланированном сценарии миссии отдельные МКА должны поочередно выполнять роль лидера, в функции которого, дополнительно к задачам наблюдения, входит сбор данных с остальных семи спутников и передача всего массива собранных данных в наземный пункт. Предполагаемая продолжительность миссии *EDSN*, в процессе которой планируется исследование возможностей концепции информационного взаимодействия спутников – это первые 60 дней существования группировки, пока расстояния между спутниками будут сохраняться достаточно малыми (не более 120 км). После этого срока информационное взаимодействие становится невозможным из-за расстояний между спутниками сверх порога достижимости для коммуникационных каналов. К сожалению, первая попытка проверить систему на практике оказалась неудачной, так как спутники были потеряны при выводе на орбиту. Описание этого проекта и планы его развития можно найти в [10, 11].

Системы планирования подобного типа предполагают решения задач двух классов, а именно, (1) разработка целеуказаний и сценариев решения задач и (2) планирование использования ресурсов. Первая из этих задач имеет целью формализацию задания на сбор информации, которое содержит перечень целей, описание их географических координат, типов используемых средств наблюдения и т.д.

Вторая задача есть собственно задача планирования, которая определяет распределение заданий между спутниками с учетом ограничений, представленные в заданиях. Перенос этих двух задач на борт группировки МКА – это основная особенность систем планирования третьего поколения.

Полномасштабное решение этих задач под силу только развитым системам третьего поколения, способным к интеллектуальному групповому поведению кластера МКА, выполняющего некоторую автономную миссию. Возможно, что такие системы наблюдения лучше отнести уже к системам четвертого поколения, поскольку для их решения требуется использовать новые сценарии и автономные средства их формирования. А такие задачи на порядок сложнее тех задач, которые отнесены к компетенции систем планирования третьего поколения.

Предлагаемый далее подход рассчитан на решение именно таких и даже более сложных задач космического наблюдения.

3. Постановка задачи. В рассматриваемой далее постановке задачи система космического наблюдения состоит из двух компонент – из множества наземных пунктов системы, которые совместно формируют наземную группировку, и группировки МКА. Наземные пункты могут быть стационарными, и тогда они имеют фиксированные географические координаты, или мобильными. В последнем случае их координаты зависят от времени.

Предполагается, что заявки на информацию, которую должны собирать МКА, могут поступать в любой наземный пункт, а общий поток заявок складывается из дискретных потоков заявок, поступающих в различные наземные пункты. Полагается, что наземные пункты ответственны только за сбор заявок и их передачу на исполнение средствами группировки МКА, а также за сбор результатов исполнения заявок и их доставку заказчику. Кроме того, они имеют право назначать приоритетность заявок, например, на коммерческой основе, а также задавать желаемые сроки их исполнения. Такой взгляд на роль наземных пунктов отвечает фактически случаю, когда они рассматриваются как диспетчерские пункты некоторой коммерческой системы космического наблюдения. Естественно, что в реальности их роль всегда будет гораздо более значимая, и они могут принимать участие и в некоторых процессах обработки полученной информации. Однако в рассматриваемой постановке этот аспект деятельности наземных пунктов выносится за пределы работы.

Исполнителями заявок являются МКА космической группировки. Полагается, что задачи наблюдения, решаемые в рамках выполнения некоторой заявки, могут включать в себя несколько сеансов наблюдения, каждый из которых должен удовлетворять заданному комплексу требований по координатам наземных объектов наблюдения, временному интервалу, в течение которого наблюдение должно быть проведено, а также требованию по типу аппаратуры наблюдения, которая должна использоваться в сеансе наблюдения. Кроме того, множество сеансов наблюдения, реализующих конкретную заявку, может быть частично упорядочено по отношению следования во времени. Таким образом, выполнение каждой заявки может быть достаточно сложным бизнес-процессом, который представляется частично упорядоченным множеством простых сеансов наблюдения (элементарных процессов, операций, работ, если пользоваться терминологией, принятой в языках описания моделей бизнес-процессов).

Частично упорядоченное множество сеансов наблюдения совместно с наложенными на них ограничениями будем называть *сценарием* исполнения заявки. Этот сценарий может выполняться либо одним МКА, либо их подмножеством в распределенном варианте.

Автономное скоординированное поведение группы МКА, направленное на выполнение сценария заявки, будем называть *автономной миссией*, возложенной на группировку МКА. Целью этой миссии является сбор информации, заказ на которую представлен в заявке, в соответствии с ограничениями по срокам ее доставки и по качеству полученной информации. По существу, группировка МКА предоставляет сервис по заявке, а потому две последние характеристики в соответствии с общепринятой терминологией следует называть *качеством сервиса*.

Использование термина “автономная миссия” для характеристики процесса выполнения заявки на сервис предполагает, что группировка МКА, принимая на исполнение заявку на сбор информации, берет на себя полную ответственность за выполнение следующих функций:

- (1) формирование команды (подмножества спутников группировки МКА), которая будет исполнять миссию;
- (2) планирование, т.е. генерацию сценария выполнения миссии;
- (3) распределение сеансов наблюдений, предусмотренных сценарием, между членами сформированной команды;
- (4) оперативное управление исполнением миссии в реальном времени, т.е. обеспечение порядка действий МКА команды в соответствии со сценарием и поддержка необходимого информационного взаимодействия между ними;
- (5) принятие решений по управлению в непредвиденных ситуациях, которые могут потребовать изменения сценария миссии, состава команды и перераспределения задач миссии между спутниками группировки;
- (6) принятие решения об окончании работ по выполнению миссии в случаях, предусмотренных обязательствами и соглашениями, которые принимаются командой МКА. В соответствии с теорией коллективного поведения роботов, эти соглашения принимаются с помощью *протокола общих намерений* [12], согласно которому члены команды МКА освобождаются от обязательств по выполнению миссии при наступлении хотя бы одного из трех событий:
 - (а) цель миссии успешно достигнута (миссия выполнена),
 - (б) возникли условия, в которых цель миссии стала недостижимой, или
 - (в) цель стала нерелевантной, т.е. она потеряла смысл.

Все задачи 1–6 выполняются спутниками группировки в распределенном варианте с использованием заранее определенных протоколов взаимодействия. Время существования команды задается интервалом от момента окончания ее формирования до момента роспуска при появлении хотя бы одного из трех событий, указанных выше.

В постановке задачи допускается, что любой МКА может быть одновременно участником одной или нескольких команд, т.е. он может участвовать параллельно в исполнении одной или нескольких заявок на перекрывающихся интервалах времени. При этом для каждого спутника должно выполняться условие бесконфликтности наблюдений, относящихся к разным заявкам. Задачу разрешения конфликтов МКА решает самостоятельно в соответствии с некоторой однозначно заданной политикой, реализуемой в распределенном режиме с помощью некоторого протокола, который имеет целью разнести во времени наблюдения, относящиеся к разным заявкам.

В процессе исполнения каждой автономной миссии спутники группировки взаимодействуют между собой и с наземными пунктами, используя существующие *коммуникационные каналы*. Множество этих каналов между спутниками образует динамическую коммуникационную сеть. Естественно, что для поддержки взаимодействия спутников группировки между собой и их взаимодействия с наземными пунктами необходима специальная программно-коммуникационная ин-

фраструктура, в задачи которой входит решение задачи маршрутизации сообщений, задачи поиска спутников, обладающих заданными способностями (“сервисами”) по сбору и передаче информации. Эта инфраструктура должна также поддерживать заданное множество протоколов взаимодействия спутников при распределенном решении ими содержательных задач автономной миссии. Эти задачи перечислены выше как задачи управления групповым поведением МКА в автономной миссии.

Сформулированная постановка задачи позволяет провести полную аналогию между предложенной сетевой моделью функционирования группировки МКА и другими типами приложений, для которых активно развивается концепция самоорганизующихся В2В-сетей [13]. Можно установить, что эта аналогия является достаточно тесной, а потому многие результаты, полученные в области архитектуры и алгоритмической поддержки процессов работы самоорганизующихся В2В-сетей могут быть использованы при реализации систем автономного планирования и оперативного управления кластером МКА при выполнении им автономных миссий. Другими словами, концепцию построения и программной реализации В2В-сети можно принять в качестве базовой концепции построения самоорганизующейся системы космического наблюдения.

Обоснованием работоспособности рассматриваемой далее концепции самоорганизации коллективного поведения группировки малых спутников космического наблюдения являются результаты теоретических и экспериментальных работ, выполненных ранее в области коллективного поведения агентов (роботов) зарубежными исследователями [12, 14-16], а также исследования и разработки по коллективному поведению агентов, выполненные под руководством одного из авторов данной работы, применительно к автономным миссиям команд подводных роботов, решающих задачу обеспечения безопасности судоходства в районе морского порта [17, 18]. Кроме того, теоретические идеи, которые лежат в основе разработанной концепции самоорганизации коллективного поведения роботов при выполнении ими автономных миссий были успешно применены к решению задачи построения открытой самоорганизующейся В2В-производственной сети. Эти результаты были опубликованы в работах [13, 19, 20]. Заметим, что выводы о свойствах моделей коллективного поведения роботов, сделанные в перечисленных работах, получены на основании компьютерного моделирования обоих упомянутых приложений.

Достоинства предложенной концепции построения системы планирования и управления в кластере МКА состоят в следующем:

1. Устраняется централизованный характер управления системой, которая в этой концепции рассматривается как открытая коммерческая система.
2. Достигается полная автономность группировки спутников при решении базовых задач, формирующих технологию добывания и доставки информации, в частности, при планировании выполнения заявки, при распределении заданий между спутниками и составлении расписаний их работы, при оперативном управлении процессом реализации автономно сгенерированного сценария, маршрутизации доставки информации в наземные пункты, и при обнаружении и обработке нештатных ситуаций. Все эти задачи в этой технологии решаются автономно, т.е. без внешнего вмешательства.
3. Реализуется децентрализованный стиль доведения результирующей информации до заказчика: информация, отвечающая заданию, может передаваться любому наземному пункту с учетом организационных ограничений.
4. Доводится до минимума интервал времени от события “*поступление заявки*” до события “*информация доставлена на наземный пункт*”. Этот интервал становится характеристикой качества сервиса, поставляемого группировкой МКА, а также атрибутом, который задает стоимость соответствующего сервиса.

5. Обеспечивается максимальное использование ресурсов космической группировки за счет того, что спутник может параллельно участвовать в исполнении нескольких заявок, опираясь на реальное состояние ресурсов.

4. Типовой сценарий выполнения заявок в кластере МКА. Рассмотрим, каким образом выполняются заявки в модели кластера МКА, отвечающего постановке задачи, описанной в предыдущем разделе. В соответствии с постановкой задачи, заявки на сбор информации в кластер МКА могут поступать от любого наземного пункта. Поскольку планирование выполнения заявки возлагается на бортовые средства кластера, то для наземного пункта ни один из спутников не имеет приоритета в качестве адресата, и потому эта заявка может пересылаться в систему космического наблюдения через любой спутник. Аналогично полагается, что результат выполнения заявки также может доставляться любому наземному пункту, который должен сам позаботиться о доставке этих результаты заказчику.

На практике, однако, могут существовать ограничения технического и организационного характера, например, для разграничения информации военного и гражданского назначения. Они сужают свободу выбора наземного пункта при передаче заявки в орбитальную компоненту системы наблюдения, а также выбор спутником адресата для пересылки результатов. Однако возникающие при этом дополнительные ограничения не являются принципиальными, и на концептуальном уровне описания типового сценария обработки заявки могут не приниматься во внимание.

С точки зрения архитектуры программной реализации, описываемый далее типовой сценарий распределенного выполнения заявки орбитальной компонентой системы предполагает, что в “мире программ” каждый наземный пункт и каждый спутник группировки представлен *программным агентом*, который представляет соответствующий объект системы во всех процессах распределенного взаимодействия наземных пунктов и МКА орбитальной группировки. Для упрощения системы обозначений далее агент, поставленный в соответствие каждому названному объекту, обозначается тем же идентификатором, что и сам объект, с добавлением символа A в качестве его префикса. С учетом этого замечания типовой сценарий может быть описан нижеследующим образом.

1. В момент $T_0^{(j)}$ в наземном пункте C_k поступила заявка $X^{(j)}$ на информацию. Заявка представлена в некотором формализованном шаблоне (структуре данных), который содержит полное описание задания на сбор информации, включая пространственные характеристики объектов наблюдения и требуемые временные характеристики процесса наблюдения, а также требования по качеству заказываемого сервиса (типу аппаратуры наблюдения и требуемому разрешению - для видеоинформации). Полагается, что последние требования также представлены в некотором шаблоне, и вся заявка однозначно интерпретируема бортовыми средствами МКА.

2. Выбирается первый по времени спутник (обозначим его идентификатор символом S_i), который попадает в зону видимости наземного пункта C_k в момент времени $t_0^{(j)} > T_0^{(j)}$, и его агент AC_k передает информацию о заявке S_i агенту AS_i спутника S_i . Агент AS_i берет на себя роль менеджера (лидера), который ответственен за инициирование процесса дальнейшей обработки заявки бортовыми средствами группировки.

3. Агент AS_i инициирует исполнение протокола формирования команды потенциальных исполнителей заявки. Содержание этого протокола состоит в том, что агент-инициатор AS_i в широковещательном режиме сообщает спутникам группировки содержание заявки и запрашивает от них ответы об их заинтересо-

ванности (технической возможности) принять участие в выполнении тех или иных сеансов наблюдения, которые представлены в заявке с учетом временных ограничений и требований к качеству необходимого сервиса¹. Агенты-получатели сообщений сами оценивают свои потенциальные возможности по участию в исполнении заявки, анализируя свои траекторные характеристики в заданные периоды времени, наличие в эти периоды свободных ресурсов требуемого вида и оценивая свою способность обеспечить требуемое качество сервиса в тех сеансах наблюдений, которые он потенциально может реализовать. Агент AS_i собирает информацию, получаемую в ответ на запрос и формирует список возможных членов команды для выполнения новой миссии, имеющей целью выполнение заявки $X^{(j)}$. Заметим, что агент AS_i (инициатор протокола) решает сам, претендовать или нет на участие в исполнении заявки $X^{(j)}$.

4. Используя некоторую политику (ее несложно разработать), а также некоторый протокол выбора лидера, например, протокол *RAFT* [21], агент AS_i “назначает” руководителя команды (англ. *teammate*), который берет на себя всю дальнейшую работу по формированию сценария миссии. Эту роль агент AS_i может также взять и на себя. Обозначим лидера команды символом AS_L .

5. Агент AS_L , используя некоторый алгоритм, основанный на использовании сценарной базы знаний [17, 18] преобразует описание задания заявки в шаблоне, полученном от наземного пункта (см. п. 1. выше), в описание сценария на языке сценарных знаний (пока в форме темплейта, без указания конкретных исполнителей и конкретных временных характеристик сеансов наблюдений, но с указанием ограничений на временные интервалы наблюдений). Далее он решает задачу распределения задач сценария между потенциальными исполнителями заявки (см. п. 3 выше).

6. Агент AS_L инициирует исполнение протокола распределения заданий на множестве потенциальных исполнителей заявки, используя протокол аукциона, например, в его простейшей форме – в форме протокола контрактных сетей [22]². В этом протоколе агент AS_L инициирует последовательно (в соответствии с частичным порядком сеансов наблюдений в построенном темплейте сценария) торги за исполнение сеансов наблюдений. Выбор победителей торгов выполняется в соответствии с политикой, которая формируется экспертами. Ее атрибутами являются характеристики качества сервиса, предлагаемого каждым участником торгов. В результате последовательного исполнения этого протокола для каждого сеанса наблюдений, предусмотренного построенным темплейтом сценария исполнения заявки, выбирается исполнитель. Потенциальные участники команды, выбранные в соответствии с протоколом, указанным в п. 3 выше, которые не попали в число исполнителей сценария автономной миссии, далее не участвуют в протоколах и работах, описываемых ниже.

Описание протокола распределения заданий на множестве потенциальных исполнителей заявки можно найти в работе [16], а также в работе [19], в которой этот протокол описан для общего случая самоорганизующихся В2В-сетей.

¹ В работе [17] приведен пример такого протокола в задаче группового управления подводными роботами в автономной миссии по инспекции подводного пространства морского порта для обеспечения безопасности судоходства в его акватории. См. также более позднюю работу [18].

² Имеется стандартная реализация этого протокола [23].

7. Агент AS_L инициирует выполнение протокола общих намерений [12], цель которого состоит в том, чтобы раздать задания назначенным исполнителям и получить от них подтверждение взятия ими на себя обязательств по исполнению соответствующих компонент сценария выполнения заявки и их способности выполнить эти обязательства. Заметим, что протокол общих намерений составляет основу концепции командной работы агентов при выполнении автономных миссий. Он определяет не только распределение обязательств по выполнению сценария автономной миссии, но и соглашения между агентами-участниками протокола.

8. Далее в соответствии с временной диаграммой исполнения наблюдений и частичным порядком на их множестве в построенном экземпляре сценария автономной миссии начинается ее исполнение. Задача оперативного управления исполнением этого сценария является одной из наиболее сложных задач коллективного поведения агентов в автономной миссии. Существуют различные варианты стратегии оперативного управления коллективным поведением агентов (МКА группировки, в рассматриваемом случае), но все они базируются на двух базовых принципах:

а) Обеспечение ситуационной и информационной осведомленности всех агентов, участвующих в исполнении сценария, в течение всего периода исполнения автономной миссии. Это означает, что каждый агент должен знать весь сценарий и распределение исполнителей по работам сценария, и осведомлен, какие именно действия и какими МКА выполняются в текущий момент. Заметим, что агентам не нужно знать, как именно выполняется текущее действие тем или иным агентом. Для определения моментов времени, когда тот или иной агент должен начинать исполнение своей части задания достаточно знать, исполнение каких действий заканчивается в тот или иной момент времени.

б) Задание механизма, который сигнализирует агентам о том, что закончено исполнение некоторого действия сценария миссии, которое непосредственно предшествует очередному действию. В качестве такого механизма обычно используется генерация событий. Эта информация обычно передается тому агенту, который должен исполнять это очередное действие. Возможен также вариант передачи сообщения соответствующего содержания в широковещательном режиме. Однако, в случае управления коллективным поведением МКА реализация широковещательного режима обычно затруднена из-за слабой связности и динамики топологии коммуникационной сети. Это приводит к задержкам в доставке сообщений спутникам, причем эта задержка может быть значительной, если группировка МКА содержит недостаточное количество спутников.

Другой вариант поддержки информационной и ситуационной осведомленности агентов в коллективном поведении предложен в работе [20, 24]. Этот вариант проверен экспериментально в задаче управления выполнением заказов в В2В-производственной сети.

В задаче группового управления МКА в автономной миссии эта задача несколько проще. В ней главным атрибутом синхронизации поведения агентов является время, поэтому оба сформулированных принципа в рассматриваемом приложении реализуются относительно просто.

9. По окончании исполнения каждого сеанса наблюдения полученная информация может сразу передаваться наземному пункту, который попадает первым в зону видимости соответствующего спутника, или с использованием другой стратегии, предусмотренной коммуникационной политикой кластера МКА и системы космического наблюдения в целом.

Заключение. В работе сформулирована проблема построения самоорганизующейся системы группового управления поведением кластера МКА, реализующего полностью автономное исполнение заявок на сервис по добытию информации о

наземных объектах средствами космического наблюдения МКА. Предложена концепция построения, базовые принципы и компоненты программной архитектуры ее реализации. Эта проблема сложна и многообразна и в настоящее время находится пока в стадии теоретических исследований и слабых попыток построения ее демонстрационных прототипов. Реализация описанной концепции приведет к созданию систем космического наблюдения четвертого поколения, которые будут способны автономно решать все задачи планирования группового поведения спутников кластера МКА и оперативного управления исполнением спланированной миссии с помощью бортовых вычислительных средств. В работе проводится аналогия этой задачи с задачей построения самоорганизующихся В2В-сетей, которая в настоящее время является предметом активных исследований и разработок в рамках различных международных программ, в частности, в программе Европейской комиссии Horizon 2020. Достижения теоретического и экспериментального характера, полученные в рамках проектов этих программ, с одной стороны, могут быть использованы при создании системы космического наблюдения, построенной на основе концепции кластеров малых спутников. С другой стороны, эти результаты следует рассматривать как свидетельство практической реализуемости самой идеи самоорганизации коллективного поведения кластера малых спутников при автономном решении задач космического наблюдения.

В работе остались совсем не затронуты некоторые важные проблемы и задачи, которые нужно решать при разработке систем описанного класса. Первой среди них и самой ответственной является проблема построения устойчивой коммуникационной системы. Создание такой системы для средств космического наблюдения требует решения двух основных типов задач. Первая из них носит технический характер. Это задача создания устойчивых широкополосных систем космической связи большой дальности. В настоящее время можно рассчитывать только на дальности порядка 120–150 км при весьма ограниченной пропускной способности каналов. Вторая задача обусловлена динамикой коммуникационной сети, заданной на множестве спутников группировки, которая возникает вследствие отсутствия постоянной прямой видимости между спутниками и ограниченной дальностью связи.

Реализация описанной концепции построения системы космического наблюдения при таких свойствах коммуникационной сети в реальности является “проблемой номер один”. Для того, чтобы ее решить, необходимо справиться с двумя другими задачами. Одна из них – это создание распределенной программно-коммуникационной инфраструктуры для поддержки взаимодействия спутников МКА между собой и их взаимодействия с наземными пунктами, которая должна поддерживать такие сервисы, как сервис распределенных желтых и белых страниц (для поиска агентов и сервисов в динамической сети) и коммуникационный р2р-сервиса (от англ. *peer-to-peer*, сервис парных взаимодействий). Вариант такой инфраструктуры был ранее описан в работе [24]. Вторая задача обусловлена, возможно, длительными разрывами коммуникационных каналов, что может приводить к существенным задержкам в процессах обмена сообщениями (передаче информации) между спутниками группировки и каналов между ними и наземным пунктами. Одно из решений этой проблемы – это использование протоколов коммуникаций с задержками типа протокола DTN [25]. При их использовании технически проблема устойчивых коммуникаций решается, но задержки будут сильно зависеть от численного состава группировки МКА и ее конфигурации. Эта проблема исключительной важности, и она нуждается в поддержке специальными программами исследований и разработок.

В заключение важно отметить, что рассматриваемая прикладная задача в предложенной концепции ее реализации является частным случаем большой и актуальной проблемы, которая в настоящее время формулируется как “Интернет вещей” (англ. *Internet of Things, IoT*). Интернет вещей есть концепция сетевого представления объектов из пространств виртуальных, социальных и физических сущностей (“вещей”),

снабженных встроенными технологиями вычислений и взаимодействия друг с другом и/или с внешней средой. Эта концепция позволяет представить взаимодействие разнородных сущностей в единой программной архитектуре и в едином семантическом информационном пространстве, которое может дополняться богатым набором облачных веб-сервисов семантического Web 2.0 и работать без участия человека. Описание приложений IoT в терминах парадигмы многоагентных систем (МАС) и их программная реализация средствами МАС-технологии в настоящее время рассматривается специалистами как новый долговременный тренд, а соответствующая концепция реализации приложений IoT получило название “Интернет Агентов” (англ. *Internet of Agents, IoA*). Описанная в работе концепция построения самоорганизующегося кластера малых спутников автономной системы космического наблюдения является примером приложения, представленного в терминах новой парадигмы интеллектуальной информационной технологии, а именно, парадигмы *Интернета агентов*, которой предсказывается большое будущее.

Благодарности. Работа выполнена в соответствии с проектом № 0073-2015-0003, выполняемым по бюджетной тематике, а также поддерживается проектом № 214 подпрограммы «Интеллектуальные информационные технологии и системы» Программы Президиума РАН I.5П.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Davis T.M.* Operationally Responsive Space – The Way Forward. // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC15-7-49. – <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2015/all2015/49> (дата обращения 29 января 2017 г.).
2. *Карсаев О.В.* Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий КА // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 5 (48). – С. 151-181.
3. *Chien S. et al.* A generalized timeline representation, services, and interface for automating space mission operations // Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2012.
4. *Herz E.* EO and SAR Constellation Imagery Collection Planning // Proceedings of 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014.
5. *Iacopino C., Harrison S. and Brewer A.* Mission Planning Systems for Commercial Small-Sat Earth Observation Constellations // Proceedings of the 9th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWSS), 2015. – P. 45-52.
6. *Maillard A. et al.* Ground and board decision-making on data downloads // Proceedings of 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling. – 2015. – P. 273-281.
7. *Lenzen C. et al.* Onboard Planning and Scheduling Autonomy within the Scope of the Fire Bird Mission // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014.
8. *Kennedy A. et al.* Automated Resource-Constrained Science Planning for the MiRaTA Mission // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC15-6-37. – <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2015/all2015/37/> (дата обращения 29 января 2017 г.).
9. *Herz E. et al.* Onboard Autonomous Planning System // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014.
10. *Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K.* The EDSN Intersatellite Communications Architecture // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC14-WS-1. – <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2014/Workshop/1/> (дата обращения 29 января 2017 г.).
11. *Chartres J., Sanchez H., Hanson J.* EDSN Development Lessons Learned // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. SSC14-VI-7. <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2014/NextPad/7> (дата обращения 29 января 2017 г.).
12. *Jennings N.R. et al.* Transforming standalone expert systems into a community of cooperating agents // International Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 1993. – No. 6 (4). – P. 317-331.
13. *Городецкий В.И.* Многоагентная самоорганизация в В2В-сетях // Труды Всероссийского совещания по проблемам управления ИПУ. – М., 2014. – С. 8954-8965. – <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/vspu2014.zip> (дата обращения 29 января 2017 г.).

14. *Cohen P.R. and Levesque H.J.* Teamwork. *Nous*, 35, 1991.
15. *Tambe M.* Towards Flexible Teamwork. // *Journal of Artificial Intelligence Research*. – 1997. – No. 7. – P. 83-124.
16. *Sycara, K., Paolucci, M., Giampapa, J., van Velsen, M.* The RETSINA Multi-agent Infrastructure // *Autonomous Agents and Multi-agent Systems*. – 2003. – Vol. 7 (1).
17. *Городецкий В.И., Серебряков С.В., Троцкий Д.В.* Средства спецификации и инструментальной поддержки командного поведения автономных агентов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 3 (116). – С. 116-133.
18. *Городецкий В.И.* Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2016. – № 1 (10). – С. 40-54.
19. *Городецкий В.И., Бухвалов О.Л.* Самоорганизующиеся В2В-сети: Концепция, архитектура и алгоритмическая поддержка // *Принята к публикации в журнале “Мехатроника, Автоматизация, Управление”*, 2017.
20. *Бухвалов О.Л. и др.* Распределенная координация в В2В производственных сетях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 3 (140). – С. 193-203.
21. *Ongaro D. and Ousterhout J.* In Search of an Understandable Consensus Algorithm (Extended Version) // *Proceedings of USENIX Annual Technical Conference, Stanford University, Philadelphia, PA, 2014*. – P. 305-319. Available at: <https://raft.github.io/raft.pdf> (дата обращения 29 января 2017 г.).
22. *Smith R., and Davis R.* Framework for Cooperation in Distributed Problem Solving // *International Journal IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 1981. – Vol. 11. – P. 61-70.
23. *Contract Net Protocol*. – <http://www.fipa.org/specs/fipa00030/SC00030H.html> (дата обращения 29 января 2017 г.).
24. *Городецкий В.И., Бухвалов О.Л.* Концептуальная модель и архитектура инфраструктурной компоненты системы группового управления роботами // *Принята к публикации в журнале «Робототехника и техническая кибернетика»*. – 2017.
25. *Delay-Tolerant Networking Architecture*. <https://tools.ietf.org/html/rfc4838>_(дата обращения 29 января 2017 г.).

REFERENCES

1. *Davis T.M.* Operationally Responsive Space – The Way Forward, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC15-7-49*. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2015/all2015/49> (accessed 29 January 2017).
2. *Karsaev O.V.* Obzor traditsionnykh i innovatsionnykh sistem planirovaniya missiy KA [Review of conventional and innovative satellite mission planning systems], *Trudy SPIIRAN [Transactions of SPIIRAS]*, 2016, No. 5 (48), pp. 151-181. (in Russian)
3. *Chien S. et al.* A generalized timeline representation, services, and interface for automating space mission operations, *Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2012*.
4. *Herz E.* SAR Constellation Imagery Collection Planning, *Proceedings of 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014*.
5. *Iacopino C., Harrison S. and Brewer A.* Mission Planning Systems for Commercial Small-Sat Earth Observation Constellations, *Proceedings of the 9th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWSPSS), 2015*, pp. 45-52.
6. *Maillard A. et al.* Ground and board decision-making on data downloads, *Proceedings of 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2015*, pp. 273-281.
7. *Lenzen C. et al.* Onboard Planning and Scheduling Autonomy within the Scope of the Fire Bird Mission, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014*.
8. *Kennedy A. et al.* Automated Resource-Constrained Science Planning for the MiRaTA Mission, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC15-6-37*. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2015/all2015/37/> (accessed 29 January 2017).
9. *Herz E. et al.* Onboard Autonomous Planning System, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014*.
10. *Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K.* The EDSN Intersatellite Communications Architecture, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC14-WS-1*. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2014/Workshop/1/> (accessed 29 January 2017).
11. *Chartres J., Sanchez H., Hanson J.* EDSN Development Lessons Learned, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC14-VI-7*. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2014/NextPad/7/> (accessed 29 January 2017).

12. *Jennings N.R. et al.* Transforming standalone expert systems into a community of cooperating agents, *International Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1993, No. 6 (4), pp. 317-331.
13. *Gorodetskiy V.I.* Mnogoagentnaya samoorganizatsiya v B2B-setyakh [Multi-agent self-organization in B2B networks], *Trudy Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya IPU* [Proceedings of Russian Conference on Control Problems, Institute for Control Problems]. Moscow, 2014, pp. 8954-8965. Available at: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/vspu2014.zip> (in Russian, accessed 29 January 2017).
14. *Cohen P.R. and Levesque H.J.* Teamwork. *Nous*, 35, 1991.
15. *Tambe M.* Towards Flexible Teamwork // *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1997, No. 7, pp. 83-124.
16. *Sycara, K., Paolucci, M., Giampapa, J., van Velsen, M.* The RETSINA Multi-agent Infrastructure, *Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, 2003, Vol. 7 (1).
17. *Gorodetskiy V.I., Serebryakov S.V., Trotskiy D.V.* Sredstva spetsifikatsii i instrumental'noy podderzhki komandnogo povedeniya avtonomnykh agentov [Specification means and Software Tool for Modeling and Implementation of Team Work of Autonomous Agents], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 3 (116), pp. 116-133.
18. *Gorodetskiy V.I.* Upravlenie kolektivnym povedeniem robotov v avtonomnoy missii [Planning and Control of Collective Robot Behavior in Autonomous Mission], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Journal on Robotics and Technical Cybernetics], 2016, No. 1 (10), pp. 40-54.
19. *Gorodetskiy V.I., Bukhvalov O.L.* Samoorganizatsiya v B2B-seti: Kontseptsiya, arkhitektura i algoritmicheskaya podderzhka [Self-organized B2B Networks: Concept, Architecture and Algorithmic Support], (Submitted to *Journal on Mechatronics, Automation and Control*. Accepted for publication in 2017, in Russian).
20. *Bukhvalov O.L., Gorodetskiy V.I., et al.* Raspredeleonnaya koordinatsia v B2Bseti. [Distributed Coordination in B2B Production Networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 193-203.
21. *Ongaro D. and Ousterhout J.* In Search of an Understandable Consensus Algorithm (Extended Version), *Proceedings of USENIX Annual Technical Conference, Stanford University, Philadelphia, PA*, 2014, pp. 305-319. Available at: <https://raft.github.io/raft.pdf> (accessed 29 January 2017).
22. *Smith R., and Davis R.* Framework for Cooperation in Distributed Problem Solving, *International Journal IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1981, Vol. 11, pp. 61-70.
23. *Contract Net Protocol.* – <http://www.fipa.org/specs/fipa00030/SC00030H.html> (accessed 29 January 2017).
24. *Gorodetskiy V.I., Bukhvalov O.L.* Kontseptual'naya model' i arkhitektura infrastrukturnoy komponenty sistemy gruppovogo upravleniya robotami [Conceptual Model and Architecture of Infrastructural Component for Robot Group Control System], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 15 str. *Prinyata k publikatsii* [Journal on Robotics and Technical Cybernetics. Accepted for publications in 2017].
25. Delay-Tolerant Networking Architecture. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc4838>. (accessed 29 January 2017).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.К. Гранкин.

Городецкий Владимир Иванович – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; e-mail: gor@iias.spb.su; 199178, Санкт-Петербург, 199178, 14 линия, 39; тел.: +78123233570, факс +78123280685; лаборатории интеллектуальных систем; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Карсаев Олег Владиславович – e-mail: karsaev@ips-logistic.com; лаборатория интеллектуальных систем; к.т.н.; с.н.с.

Gorodetsky Vladimir Ivanovich – St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences; e-mail: gor@iias.spb.su; 39, 14-th Liniya, St. Petersburg, 199178, Russia; phone: +78123233570, fax: +78123280685; intelligent system laboratory; dr. of eng. sc; professor; chief researcher.

Karsaev Oleg Vladislavovich – e-mail: karsaev@ips-logistic.com; intelligent system laboratory; cand. of eng. sc.; senior researcher.