

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Е.В. Симонова^{1,2}, А.А. Жилиев^{1,2}, В.С. Травин²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
petr.skobelev@gmail.com

² НПК «Разумные решения»
443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201
travin@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: мультиагентные технологии, целевое применение, планирование, группировка космических аппаратов, дистанционное зондирование Земли.

Abstract

The problem of planning for target application of a group of Earth remote sensing satellites in combination with a network of ground-based data receiving points is considered. The multi-agent approach to planning is used, where the sought schedule is built as dynamic balancing interests of agents of observation requests, satellites and data receiving points. Dynamically occurring events are taken into account in the process of planning, including introduction of a new task or change of task options, failure of a satellite or means of communication. Formation of the sought schedule is divided into two stages. At the first stage, agents form the initial feasible schedule using "greedy" strategy, at the second stage they try to improve the current schedule by building chain permutations of operations. The developed planning system for target application of a group of satellites is described. The results of the system performance with a test data set are presented. Advantages of the multi-agent approach to management of a group of Earth remote sensing satellites are proved.

Введение

Одной из перспективных тенденций в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является создание космических систем (КС), включающих в свой состав группировку разнородных космических аппаратов (КА) большой размерности и широкую сеть территориально распределенных центров приема, обработки и доведения до потребителей конечной продукции ДЗЗ [1].

Увеличение размерности орбитальной группировки приводит к появлению альтернативных возможностей съемки одних и тех же районов наблюдения различными КА, которые могут быть использованы для повышения информационной эффективности результатов ДЗЗ. В то же время, с ростом размерности группировки, при ограниченном количестве пунктов приема информации (ППИ), становится неизбежной ситуация, когда несколько КА претендуют на передачу данных на один и тот же ППИ [2]. Из-за технических ограничений перед КА может дополнительно встать вопрос о выборе между съемкой очередного района или оперативной передачей уже отснятой информации на ППИ.

Процесс развития систем дистанционного зондирования сопровождается расширением рынка космических услуг, привлечением новых клиентов (организаций, ведомств, а в перспективе и частных лиц), и, как следствие, повышением требований к оперативности обслуживания заявок на съемку. В этих условиях появляется необходимость в динамической корректировке расписания целевого применения группировки КА по мере поступления новых заявок.

Возможность динамического изменения существующего плана становится полезной и для учета непрогнозируемых событий, связанных с метеорологической обстановкой и отказами оборудования.

В то же время большинство существующих разработок в области создания наземных и бортовых комплексов планирования целевого функционирования КА ДЗЗ ориентированы на одиночные КА и не могут быть спроецированы на группировки большой размерности [3]. При этом делается весьма спорное допущение о том, что КА функционирует в детерминированной среде: в качестве конечного результата рассматривается статичный план использования КА, дискретно корректируемый не более 2-3 раз в сутки.

В результате становится актуальной задача обеспечения согласованного динамического планирования действий группировки КА с возможностью адаптивной корректировки плана при наступлении различных событий в масштабе времени, близком к реальному.

Для решения этой задачи предлагаются различные эвристические алгоритмы. Вопрос использования эвристических методов планирования ДЗЗ рассмотрен в работе [4], авторы проводят сравнение нескольких реализаций генетического алгоритма в сочетании с алгоритмом восхождения к вершине и имитации отжига. Генетический алгоритм для решения задачи планирования сеансов связи между КА и наземными станциями представлен в работе [5]. Для планирования непрерывно и асинхронно поступающих задач ДЗЗ предложено использование муравьиного алгоритма [6,7], или его комбинации с нейронной сетью [8] и динамическим программированием [9]. Задача динамического планирования операций на космических аппаратах отдельно рассматривается в [10-13]. Из анализа представленных источников можно сделать вывод об эффективности принципа формирования расписания работы КА с использованием эвристических методов. В настоящей работе рассматривается возможность реализации этого принципа с помощью мультиагентных технологий, положительно зарекомендовавших себя при решении классических задач планирования и распределения ресурсов [14].

1 Постановка задачи

Пусть задано множество КА, пунктов приема информации, районов наблюдения. Проведено математическое моделирование функционирования КС, в результате которого сформированы следующие данные:

- расписание прохождения каждого КА над зонами взаимной видимости КА-ППИ, над районами наблюдения (с учетом условий, необходимых для работы оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ);
- потенциально достижимое линейное разрешение на местности для каждого района, попавшего в полосу обзора каждого КА при моделировании процесса функционирования КС.
- Сформированы модели, позволяющие рассчитывать:
- продолжительность включения аппаратуры ДЗЗ в районе наблюдения;
- объем информации, записываемой в бортовое запоминающее устройство при съемке;
- время воспроизведения при передаче информации на ППИ.

Заданы технические характеристики и ограничения по логике работы систем КА, необходимые для моделирования функционирования сквозного тракта получения и передачи информации ДЗЗ, начиная от съемки и заканчивая получением информации на ППИ.

Требуется сформировать план съемки районов наблюдения группировкой космических аппаратов, составленный в соответствии с критерием минимизации времени доставки информации потребителям, отдавая приоритет при съемке районам с наилучшим разрешением:

$$\text{ЦФ} = \frac{1}{m} \sum_j^m \left(a_1 \left(1 - \frac{\tau_j}{\tau_{max}} \right) + a_2 \left(1 - \frac{r_j}{r_{max}} \right) \right) \rightarrow \max,$$

где

m – количество районов наблюдения,

τ_j – оперативность получения снимка j -го района наблюдения на ППИ,

r_j – разрешение снимка j -го района наблюдения,

τ_{max} – предельное время хранения снимка,

r_{max} – предельно допустимое разрешение снимка,

$a_1 + a_2 = 1$, – весовые коэффициенты.

Полученное расписание должно удовлетворять следующим ограничениям:

- 1) наличие видимости между КА и районом наблюдения при съемке;
- 2) наличие видимости между КА и ППИ при передаче информации;
- 3) наличие свободного места в бортовом запоминающем устройстве КА;
- 4) согласованность времени съемки, передачи и приема информации;
- 5) заданным требованиям по недопустимости наложения режимов работы различных видов аппаратуры КА.

Важной особенностью задачи является необходимость учета динамически возникающих событий, к числу которых относятся поступление новой задачи или изменение ее параметров, выход из строя ресурса КА или средств связи, погрешность или сбой в получении результатов съемки и т.д.

2 Описание предлагаемого подхода

В предлагаемом подходе искомое расписание строится на основе конкуренции и кооперации программных агентов, обладающих определенными возможностями или потребностями [15]. В результате взаимодействия агентов достигается допустимое локально оптимальное решение, которое в дальнейшем адаптивно корректируется в «скользящем режиме» на рассматриваемом горизонте планирования. При этом появляется возможность адаптивного изменения ранее построенного плана (без его полной перестройки), когда план не строится всякий раз заново при возникновении новых событий, как это делается в классических методах оптимизации, а только корректируется по мере появления событий без останова и перезапуска системы [16, 17].

Применительно к рассматриваемой задаче искомое расписание строится путем взаимодействия агентов КА, ППИ и районов наблюдения. Процесс получения снимка района наблюдения декомпозируется на отдельные операции по съемке, хранению, передаче и приему информации. Агент района наблюдения стремится запланировать выполнение этих операций (удовлетворить потребности) в расписаниях агентов КА и ППИ (предоставляющих свои возможности). Дополнительно вводится штабной агент группировки, способный оценивать результаты работы других агентов, а также задавать им стратегии, наиболее подходящие в той или иной сложившейся ситуации. Все перечисленные в постановке задачи ограничения распределяются между соответствующими агентами. При планировании учитываются циклограммы взаимной видимости космических аппаратов, районов наблюдения и пунктов приема информации, а также их параметры. Так, каждый снимок района наблюдения обладает определенным объемом и заполняет бортовое запоминающее устройство КА, что впоследствии порождает потребность в сбросе накопленной информации на Землю, так как в противном случае космический аппарат перестает выполнять съемку других районов.

Критерии эффективности формируемого расписания находят отражение в целевых функциях агентов [18]. Агент района наблюдения стремится быть снятым с наилучшим разрешением и скорейшим образом попасть на пункт приема информации, с минимальным временем нахождения в запоминающем устройстве КА. Целью агентов ресурсов КА и ППИ является увеличение своей производительности на рассматриваемом горизонте планирования. Целевая функция системы определяется суммой целевых функций отдельных агентов.

Процесс построения расписания разбивается на две стадии: бесконфликтную и проактивную.

2.1 Начальное бесконфликтное планирование

На первой стадии агенты районов наблюдения запрашивают у подходящих космических аппаратов возможность съемки и передачи на Землю в наилучший (в соответствии с целевой функцией) свободный интервал времени. Агенты КА имеют доступ к расписанию работы ресурсов только своего КА. Исходя из этих данных, они принимают решение о возможности или невозможности размещения очередного снимка района наблюдения. Если к моменту поступления обращения от района наблюдения все ресурсы КА уже заняты, его агент отказывает району в съемке.

Бесконфликтное планирование возможно при одновременном выполнении следующих условий:

- наличие видимости КА с районом наблюдения и ППИ;
- данный интервал времени не пересекается с запланированным ранее сеансом передачи данных или съемкой других районов наблюдения;
- агент ППИ подтвердил возможность приема данных снимка;
- запоминающее устройство КА содержит достаточный объем свободного места на интервале времени от начала съемки района наблюдения до окончания передачи снимка на ППИ.

Для проверки двух последних условий агент КА опрашивает всех известных ему агентов ППИ с предложением провести сеанс передачи данных, длительность которого зависит от продолжительности съемки и скорости, достижимой для канала связи между конкретным КА и ППИ. Среди всех предложенных агентами ППИ вариантов агент КА выбирает ближайший к моменту съемки, но в тоже время свободный от других съемок или сеансов связи с ППИ, интервал времени. Если какое-либо из условий не выполнено, съемка района наблюдения остается незапланированной. Запланировав сеанс связи с ППИ, агент КА сообщает агенту района наблюдения время сброса и вносит изменения в свое расписание. Важно отметить, что целью этого этапа является быстрое получение начального допустимого расписания, каким бы уровнем качества оно не обладало. Полученное на этом этапе решение покажет основные «узкие места» рассматриваемого расписания и станет опорной точкой для дальнейших улучшений.

2.2 Проактивное улучшение расписания

На этой стадии агенты районов наблюдения пытаются улучшить значение своей целевой функции, предлагая конфликтующим с ними районам найти другие интервалы для размещения путем сдвига по времени или перехода на другой ресурс (КА или ППИ). Построение цепочки изменений начинается от агентов, наиболее неудовлетворенных значением своей целевой функции. Для этого в системе организуется специальная «рабочая группа» агентов, которых затрагивают изменения (перестановки и сдвиги в расписании). Эффективность каждой перестановки может быть оценена с помощью изменения значений целевых функций участвующих в ней агентов. Полученный вариант изменения расписания может быть принят или отвергнут в зависимости от эффекта, оказываемого на целевую функцию системы: утверждают только те изменения, которые не уменьшают целевую функцию системы.

Агент района наблюдения опрашивает имеющиеся КА и ППИ о возможности размещения отдельных операций. При этом неизбежно выявляются конфликты: выгодные с точки зрения целевой функции слоты времени оказываются занятыми другими операциями. Рекурсивное перемещение затрагиваемых задач продолжается до тех пор, пока очередная сдвигаемая задача не сможет беспрепятственно переместиться на новую позицию, у вытесняющей задачи остаются средства на компенсацию всех издержек, или не станет равным нулю счетчик, ограничивающий глубину рекурсии.

На рисунке 1 отражен процесс взаимодействия агентов при перемещении задач в расписании: агент вытесняющей задачи заштрихован, стрелки соответствуют сообщениям с запросом перестановки, а пунктиром показаны ответные сообщения перемещаемых задач. При этом если одна операция вытесняет другую, то та, в свою очередь, способна рекурсивно найти себе новое место [19]. В итоге силами агентов строится цепочка перестановок, которая, в случае положительного влияния на целевую функцию системы, применяется к расписаниям агентов, затронутых изменениями.

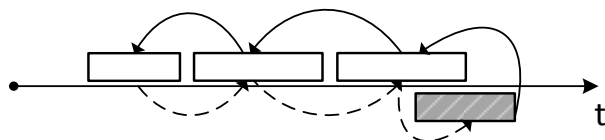


Рисунок 1 – Рекурсивная перестановка операций

Задача, оставшаяся незапланированной, помещается в очередь ожидающих планирования задач. Очередная попытка планирования этих задач будет предпринята в случае возникновения событий добавления новых или изменения расписания уже существующих ресурсов.

Аналогичным образом агенты ресурсов КА и ППИ пытаются увеличить значение целевой функции системы путем перераспределения съемок и сеансов передачи данных. Итеративное улучшение плана всеми типами агентов продолжается до тех пор, пока не возникнет состояние «динамического останова» (агенты пытаются улучшить свое состояние, однако улучшение значения целевой функции не происходит), что будет означать достижение консенсуса в переговорах и возможность выдачи готового решения. Это состояние может быть нарушено при поступлении событий, связанных с добавлением, удалением или изменением параметров КА, ППИ или районов наблюдения. В этом случае расписание приводится к допустимому виду, после чего улучшается посредством описанного выше механизма.

3 Описание прототипа системы планирования

Описанный выше метод был реализован в прототипе мультиагентной системы планирования целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Интерфейс пользователя системы представлен экранами и терминалами: управление работой системы осуществляется с помощью терминалов, экраны служат для отображения происходящих в системе процессов и результатов планирования. Ввод или корректировка исходных данных оформляются в виде событий, в ответ на которые происходит адаптивное перепланирование сложившегося расписания. На рисунке 2 показаны отношения, устанавливающиеся между агентами системы в процессе построения расписания. Все агенты показаны кружками, цвет которых изменяется от красного к зеленому пропорционально их удовлетворенности. Под удовлетворенностью понимается степень достижения целей агентов. Связи могут динамически изменяться по мере перестройки расписания и возникновения событий.

На рисунке 3 приведен экран «Показатели эффективности». На нем можно проследить изменение значения целевой функции системы в процессе построения расписания. Так, произошедшее на 790-ой итерации событие по исключению одного из ППИ привело к уменьшению значения целевой функции системы на 0,2. Однако, в течение последующих 180 итераций система планирования смогла парировать произошедшее событие и перестроить расписание, повысив значение целевой функции системы на 0,19.

На рисунке 4 представлен экран «План группировки», который отображает план действий выбранного космического аппарата. Здесь показаны видимости космических аппаратов со всеми районами и пунктами приема информации, а также план выполнения операций по съемке и сбросу информации, построенный на десять суток вперед. Кроме того, в целях демон-

страции ограничения по памяти, здесь показан график наполнения запоминающего устройства.

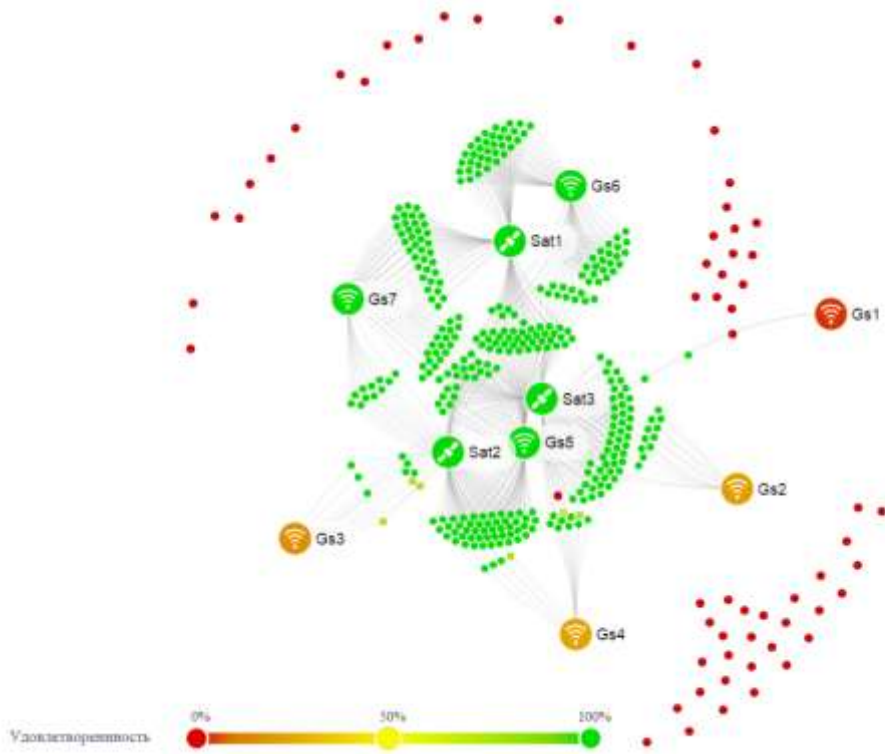


Рисунок 2 – Отношения между агентами системы в виде сети



Рисунок 3 – Экран «Показатели эффективности»

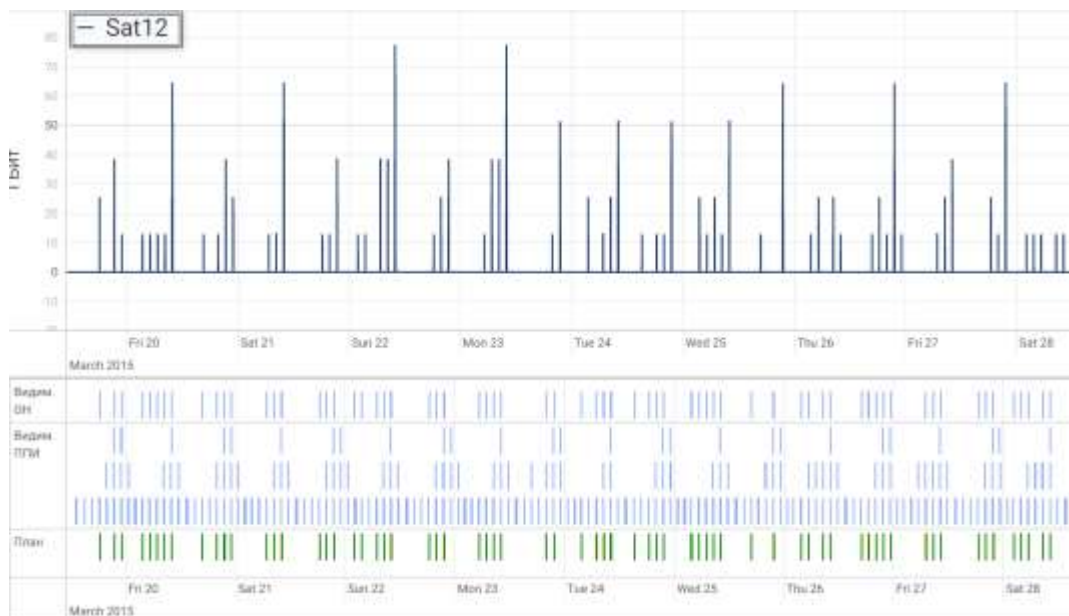


Рисунок 4 – Экран «План группировки»

Заключение

В предлагаемом подходе задача управления группировкой КА ДЗЗ решается путем создания самоорганизующейся команды взаимодействующих интеллектуальных агентов, ведущих переговоры, способных планировать свое поведение в реальном времени, обеспечивая согласованность принимаемых решений.

Разработанный программный прототип системы планирования целевого применения группировки КА ДЗЗ подтвердил перспективность предложенного подхода благодаря следующим свойствам:

- масштабируемость и открытость, новые компоненты (КА, ППИ и другие) подключаются к системе динамически без останова и перезапуска всей системы;
- автономность программных модулей, в перспективе позволяющая разместить компоненты планирования на бортовых вычислительных устройствах КА, исключив необходимость в централизованной диспетчеризации, что повышает оперативность принятия решений. [20];
- гибкость и возможность адаптивного изменения построенного плана функционирования космической системы позволяет повысить ее целевую эффективность в условиях динамического поступления заявок на съемку, а также возникновения непрогнозируемых событий, связанных с метеорологической обстановкой и отказами оборудования.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики. Приборы и сферы использования космиче-

- ских аппаратов дистанционного зондирования Земли. Итоги и перспективы развития. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2005. – С. 12-27.
- [2] Гончаров А.К., Чернов А.А. Планирование сеансов приёма информации с космических аппаратов орбитальной группировки при ограниченном количестве приёмных комплексов. // «Космонавтика и ракетостроение». –2014. – №3 (74). – С. 180-189.
- [3] Соллогуб А.В., Аншаков Г.П., Данилов В.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
- [4] Globus A., Crawford J., Lohn J., Pryor A. Application of Techniques for Scheduling Earth-Observing Satellites // Proceedings of the 16th conference on Innovative applications of artificial intelligence. – 2004. – P. 836-843.
- [5] Xhafa F., Sun J, Barolli A., Biberaj A., Barolli L. Genetic algorithms for satellite scheduling problems // Mobile Information Systems. – 2014. – No. 8. – P. 351-377.
- [6] Iacopino C., Palmer P., Policella N., Donati A., Brewer A. How ants can manage your satellites // Acta Futura. – 2014. – No. 9. – P. 57-70.
- [7] Kebin G., Guohua W., Jianghan Z. Multi-Satellite Observation Scheduling Based on a Hybrid Ant Colony Optimization // Advanced Materials Research Vols. – 2013. – P. 532-536.
- [8] Yuqing Li, Rixin Wang, Minqiang Xu. Rescheduling of Observing Spacecraft Using Fuzzy Neural Network and Ant Colony Algorithm // Chinese Journal of Aeronautics. – 2014. – No 27. – P. 678-687.
- [9] Liu Xiaolua, Bai Baocunb, Chen Yingwua, Yao Fenga. Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism // Applied Mathematics and Computation. – 2014. – No. 230. – P. 687-700.
- [10] He Chuan, Liu Jin, Ma Manhao. A Dynamic Scheduling Method of Earth-Observing Satellites by Employing Rolling Horizon Strategy // The Scientific World Journal. – 2013.
- [11] Jianjiang Wanga, Xiaomin Zhua, Laurence Yangb, Jianghan Zhua, Manhao Maa. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites // Journal of Computer and System Sciences. – 2015. – No. 81. – P. 110-124.
- [12] Karapetyana D., Minic S., Malladi K., Punnen A. Satellite downlink scheduling problem: A case study // Omega. – 2015. – No. 53. – P. 115-123.
- [13] Chong Wang, Jun Li, Ning Jing, Jun Wang, Hao Chen. A Distributed Cooperative Dynamic Task Planning Algorithm for Multiple Satellites Based on Multi-agent Hybrid Learning // Chinese Journal of Aeronautics. – 2011. No. 24. – P. 493-505.
- [14] Rzevski G., Skobelev P. Managing complexity. – WIT Press: London-Boston, 2014. – 216 p.
- [15] Виттих В.А., Скобелев П.О. Метод сопряженных взаимодействий для распределения ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. –2009. – № 2. – С. 78-87.
- [16] Wooldridge M. An Introduction to Multiagent Systems. – 2nd edition. – John Wiley&Sons: London. – 2009. – 486 p.
- [17] Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application // 10-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems. – 2013. – P. 1-14.
- [18] Belokonov I., Skobelev P., Simonova E., Travin V., Zhilyaev A. Multiagent planning of the network traffic between nanosatellites and ground stations // Procedia Engineering: Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites. – 2015. – No. 104. – P. 118-130.
- [19] Skobelev P., Simonova E., Ivanov A., Mayrov I., Travin V., Zhilyaev A. Real time scheduling of data transmission sessions in the microsatellites swarm and ground stations network based on multi-agent technology // Proceedings of the 6th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA 2014). – 2014. – P. 153-159.
- [20] Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жиляев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. – 2013.– №1(62). – С. 16-26.
- Published: Е.В. Симонова, А.А. Жиляев, В.С. Травин. Мультиагентная система планирования целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды XVIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 20-25 сентября 2016 г. – Самара: ОФОРТ, 2016. – С. 163-170.

