

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.78

DOI: 10.17587/mau.21.639-650

В. А. Галузин¹, аспирант, vladimir.galuzin@gmail.com,

А. Ю. Кутоманов², канд. техн. наук, заместитель начальника ЦУП, kutomanov@mcc.rsa.ru,

М. М. Матюшин², д-р техн. наук, первый заместитель генерального директора, MatyushinMM@tsniiimash.ru,

П. О. Скобелев^{3,4}, д-р техн. наук, зав. лабораторией "Мультиагентные системы", petr.skobelev@gmail.com,

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара,

² АО "ЦНИИмаш", г. Королев, Московская обл.,

³ Самарский федеральный исследовательский центр РАН,

⁴ Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Обзор современных методов планирования работы перспективных космических систем*

Выполнен обзор работ по актуальной в настоящее время проблеме планирования работы космических систем наблюдения, позволяющий дать оценку текущего состояния исследований по данной тематике, возможности их практического применения полученных результатов и перспектив развития. Приводится перечень требований, которым должны удовлетворять методы и средства планирования для обеспечения возможности применения их на практике. Описывается общая постановка задачи планирования работы космических систем наблюдения, позволяющая дать оценку ее сложности и многокритериальности. Анализируются работы, посвященные как разработке методик решения описанной задачи в общем виде, так и исследованиям, направленным на решение частных проблем, таких как: планирование работы целевой аппаратуры космического аппарата с учетом максимального возможного отклонения линии визирования от вертикали, планирование съемки с учетом быстроменяющихся метеоусловий, оптимизация выполнения сеансов связи между спутником и наземными станциями, оптимизация наблюдения площадного района и т.д. По результатам проведенного анализа делаются выводы, что имеющиеся в настоящее время методики планирования в основном имеют централизованный характер и опираются на различного рода эвристики для сокращения перебора, реализуемые как модификации под конкретную задачу. Кроме того, ни одно из решений, предложенных в рассмотренных статьях, не соответствует требованиям по масштабируемости, адаптивности, учету индивидуальных особенностей заявок и ресурсов и гибкости решения. Для преодоления приведенных недостатков предлагается расширенное применение мультиагентных технологий. Однако это требует значительной работы для их развития с учетом специфики данной задачи. Развитие предлагаемых подходов в перспективе позволит создавать автономные интеллектуальные системы управления спутниками группировками по типу "самоорганизующихся роев", со встроенными способностями к прямому взаимодействию и принятию решений в каждом спутнике, канале и узле связи, что предполагает реализацию полного цикла распределенного многокритериального ситуационного управления ресурсами в реальном времени.

Ключевые слова: космические системы, спутники, наземные станции, объекты наблюдения, методы планирования, мультиагентные технологии

Введение

Актуальность проблемы планирования работы космических систем наблюдения (КСН) обусловлена в первую очередь ростом числа

потребителей космических услуг в сфере дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и, как следствие, многократным увеличением числа заявок на съемку объектов наблюдения (ОН), повышением требований к оперативности получения данных и их информационной эффективности. Полученная в ходе проведения анализа результатов ДЗЗ информация находит применение в самых различных областях: сельском хозяйстве, геологических и гидрологических исследованиях, военной сфере, при ликвидации последствий стихийных бедствий, при создании планов территорий и во многих других сферах деятельности [1].

* Работа подготовлена на основе материалов научных исследований в рамках Госбюджетной темы Самарского федерального исследовательского центра РАН, Института проблем управления сложными системами РАН № АААА-А19-119030190053-2 "Разработка и исследование методов и средств аналитического конструирования, компьютерного представления знаний, вычислительных алгоритмов и мультиагентных технологий в задачах оптимизации процессов управления сложными системами".

Для удовлетворения сложившихся потребностей в космической отрасли развивается процесс, направленный на создание, развертывание и эксплуатацию КСН, включающих разнородную группировку низкоорбитальных космических аппаратов (КА), состоящую как из традиционных КА большой массы, так и из малых космических аппаратов, массой до 500 кг, и распределенную сеть наземных станций приема информации (НСПИ). Примерами таких систем являются проект компании *Planet Labs*, спутниковая группировка которого насчитывает более 200 действующих спутников *Dove (Flock)* и 13 спутников субметрового разрешения *SkySat* [2], и проект компании *BlackSky Global*, предусматривающий формирование к 2020 г. орбитальной группировки из 60 спутников ДЗЗ и 17 станций приема и управления [3]. Применение подобных КСН приводит к резкому увеличению числа просмотров поверхности (группировка проекта *BlackSky Global* должна обеспечить максимальную частоту просмотра до 40...70 пролетов в сутки для районов с широтами между $\pm 55^\circ$ [3]) и размера исследуемых территорий (группировка компании *Planet Labs* позволяет ежедневно получать изображение всей поверхности Земли с разрешением не хуже 5 м [2]).

Существенное повышение разрешения снимков, получаемых с КА, с одновременным увеличением оперативности обработки заявок на съемку ОН и выдачи информации конечному потребителю приводит к необходимости значительного увеличения орбитальной группировки разнородных КА, что, в свою очередь, ведет к многократному росту числа потенциально возможных вариантов съемки ОН и передачи полученных данных на Землю. Применение традиционных методов управления КА, основанных только на использовании наземного контура управления и существующих методов планирования, применительно к многоспутниковым (более 100 КА) орбитальным группировкам приведет к возникновению конфликтных ситуаций, когда одновременно несколько КА претендуют на съемку одного и того же ОН, либо на передачу данных на одну и ту же НСПИ. Все это обуславливает сложность задачи формирования таких планов работы КСН, реализация которых обеспечивает максимальную ценность собранных данных в условиях имеющихся ограничений.

Кроме того, повышение требований к оперативности обслуживания заявок на съемку ОН обуславливает необходимость в динамической

адаптивной корректировке расписания работы КСН по мере поступления в систему новых заявок на съемку в реальном времени или в случае возникновения непрогнозируемых событий, связанных с отказом оборудования или с быстременяющейся метеорологической обстановкой. Помимо этого большую роль в вопросах повышения оперативности обслуживания заявок играет показатель доступности бортовой аппаратуры КА, зависящий от числа витков КА, проходящих в зоне радиовидимости НСПИ, а также от оптимизации баллистического построения орбитальной группировки.

Исходя из вышесказанного можно выделить следующие требования, которым должны удовлетворять методы и средства планирования для обеспечения возможности практического применения для создания плана работы современной КСН:

- масштабируемость: возможность планирования выполнения большого числа заявок на съемку ОН на длительный интервал времени крупномасштабной разнородной орбитальной группировкой с учетом эволюции баллистического построения орбитальной группировки;
- адаптивность: изменение планов работ доступных ресурсов в соответствии с событиями в режиме реального времени или близком к нему, без останова и полного пересчета расписания работы группировки КА;
- учет индивидуальных особенностей заявок и ресурсов для построения наиболее оптимального решения при многокритериальной оптимизации;
- гибкость: необходимо предоставлять возможность легкой интерактивной настройки процесса планирования, а также доработки его результатов;
- оперативность: минимальное время от появления заявки до получения информации об ОН;
- производительность: высокая скорость обработки, квазилинейная с ростом числа заявок и ресурсов КА и НСПИ;
- надежность и живучесть: возможность выполнения задачи даже в случае выхода из строя любого из ресурсов.

Указанные требования на практике существенно затрудняют использование традиционных методов и средств комбинаторного перебора и математического программирования и вынуждают разрабатывать и применять различные эвристики.

В настоящей работе делается попытка провести обзор существующих подходов в целях выбора наиболее перспективных для дальнейшей разработки.

Постановка задачи

Общую постановку задачи планирования работы КСН можно представить следующим образом. Пусть имеется модель КСН, описываемая входящими в ее состав множеством КА, в котором каждый КА характеризуется набором элементов орбиты, полной математической моделью возмущающих воздействий (в зависимости от параметров орбиты функционирования), параметрами установленного на него бортового оборудования, и множеством НСПИ, в котором каждая станция характеризуется географическим местоположением и параметрами установленной антенны. Для НСПИ могут быть также указаны графики работы, интервалы недоступности, а также среднее время подготовки станции к приему информации.

Пусть также задано множество ОН, которые необходимо снять. ОН могут быть как точечные, так и площадные. Точечный объект имеет небольшие размеры, и его снимок может быть получен за один пролет. Для съемки площадного объекта наблюдения необходимо несколько пролетов КА. Для ОН может быть указан его приоритет, периодичность съемки и множество ограничений, таких как момент времени, до которого необходимо получить снимки, условия съемки, требования к характеристикам применяемой съемочной аппаратуры и пространственному разрешению.

В модели работы КА рассматриваются две операции: съемка ОН и проведение сеанса связи КА с НСПИ для передачи полученных данных на Землю, а в модели работы НСПИ — операция получения данных с КА.

Требуется составить план работы КСН по съемке заданных ОН. Результатом планирования является расписание выполнения соответствующих операций КА и НСПИ, составленное в соответствии с критерием минимизации времени доставки снимков потребителям, а также максимизации их качества. При этом должны выполняться следующие условия:

- наличие наблюдаемости ОН при съемке с КА;
- наличие видимости между КА и НСПИ при проведении сеанса связи;
- наличие свободного места в бортовом запоминающем устройстве КА;

- достаточный уровень заряда батареи КА для проведения операций;
- работа по съемке не должна нарушать ограничения доступности и график работы ресурсов, участвующих в ней;
- согласованность порядка проведения операций элементами КСН;
- КА и НСПИ могут одновременно выполнять не более одной операции.

Кроме того, должны быть удовлетворены описанные ранее требования для методов и средства планирования работы современной КСН, такие как масштабируемость, адаптивность, производительность и т.д.

Обзор работ

Актуальность поставленной задачи приводит к стремительному росту числа работ по данной тематике. Так, число работ в базе данных *Scopus*, посвященных описанию методик решения как проблемы планирования работы КСН в целом, так и отдельных ее задач, увеличилось за последнее десятилетие в 2,5 раза.

В связи с этим представляет особый интерес анализ основных направлений развития моделей, методов и средств планирования как одиночных КА, так и многоспутниковых группировок.

Далее представлен обзор наиболее интересных работ, посвященных постановкам задач планирования и применяемым на практике методам.

1. Планирование спутниковых сеансов связи на основе методов имитации отжига и поиска опций с запретами

В статье [4] рассматривается проблема планирования сеансов связи между канадским радиолокационным спутником Д33 *RADARSAT-2* и наземными станциями, вызванная высокой нагрузкой на нисходящие линии связи из-за большого объема целевой информации, получаемой в ходе проведения ДЗЗ.

В данной спутниковой миссии планирование проведения съемки ОН осуществляется непосредственно клиентами и управляется их приоритетами. Таким образом, предполагается, что расписание съемок известно заранее и не изменяется в процессе планирования. Запросы клиентов подразделяются на срочный и регулярные. Выполнение срочного запроса должно происходить как можно ближе к моменту их появления в системе. Размещение регулярных запросов является более гибким

и определяется в первую очередь приоритетом данных запросов.

Для решения поставленной задачи планирования авторы статьи предлагают применение алгоритма имитации отжига и алгоритма поиска с запретами (табу). Вместо учета срочности запросов отдельно в целевой функции процесс планирования разделяется на две стадии: на первой стадии проводится планирование всех срочных запросов, на второй стадии на оставшихся ресурсах размещаются все регулярные запросы. Таким образом, данный подход учитывает специфику приоритезации срочных запросов над обычными.

Проведенные исследования показали, что предлагаемый подход позволяет получить более близкое к оптимальному расписание сеансов связи, чем часто применяемые на практике жадные алгоритмы оптимизации.

В качестве ограничения данной методики можно выделить жесткую привязку вводимых моделей и эвристик к конкретному типу и модели КА.

2. Эвристическое планирование спутниковой съемки с разбиением площадного объекта на полосы

В статье [5] рассматривается проблема планирования съемки районов наблюдения одиночным разворачиваемым КА ДЗЗ. Благодаря своей маневренности КА данного типа позволяют провести съемку большей площади поверхности Земли. Однако при этом увеличивается сложность задачи за счет появления множества альтернативных вариантов съемки.

В работе делается предположение о том, что поворачиваемые КА находятся на периодических солнечно-синхронных орбитах, что позволяет снизить накладные расходы при расчете моментов прохождения КА над районом наблюдения.

Алгоритм, предлагаемый авторами статьи, выполняет оптимизацию расписания по критериям оперативности проведения съемки и качества получаемых данных и может быть применен для планирования работы КА с различными техническими характеристиками. Данный алгоритм состоит из двух этапов, тесно связанных между собой. На первом этапе выполняется геометрический анализ путем проведения геометрической классификации ОН на точечные, протяженные и площадные и последующее их разделение на отдельные полосы в соответствии с направлением локсодро-

мических линий, вдоль направления которых должна проводится съемка. В конце геометрического анализа выполняется расчет временных окон возможных съемок полученных полос. На втором этапе планирование съемки ведется с учетом различных функций расчета расстояния для идеальной орбиты.

Проведенные исследования работы разработанного алгоритма показали его эффективность в оптимизации плана съемки ОН по критериям оперативности проведения съемки и качества получаемых данных.

В качестве недостатков предлагаемой методики можно выделить тот факт, что при планировании не учитываются ограничения, вызванные потреблением спутником памяти и энергии в процессе функционирования.

3. Применение муравьиного алгоритма для планирования использования ресурсов для управления спутниками

Авторами статьи [6] предлагается решение задачи планирования работы ресурсов управления низкоорбитальными спутниками с помощью простого муравьиного алгоритма.

Целью оптимизации в данной задаче является оптимизация загрузки ресурсов. В качестве ключевой особенности задачи выделяется разреженное пространство решений, затрудняющее ее решение с помощью традиционных алгоритмов оптимизации.

В роли модели для последующей оптимизации загрузки ресурсов управления вводится так называемый граф конфликтов, в котором выделяют два типа конфликтов: в первом случае конфликт возникает, потому что один спутник виден одновременно нескольким наземным станциям, во втором случае конфликт возникает из-за нахождения в зоне радиовидимости одной и той же наземной станции более одного спутника в одно время. Для соответствия требованиям сети управления и возможности практического применения полученного решения параметры алгоритма, определяющие пределы, обновление и инициализацию феромона, задаются как константы.

Результаты экспериментального исследования сравнения описанной методики планирования с другим новым вариантом реализации муравьиного алгоритма демонстрируют превосходство представленного решения. Однако в случае задач большой размерности производительность метода деградирует, т.е. начинает быстро расти время вычислений.

4. Планирование работы КА с помощью метода локального поиска в расширяемой окрестности

В статье [7] рассматривается проблема планирования съемки районов наблюдения одиночным поворачиваемым КА *AS-01*. В качестве ее отличительной особенности выделяется необходимость учета ограничения на требуемое время перехода КА от одного момента съемки к другому.

Для решения данной задачи авторы статьи предлагают применять адаптивный алгоритм поиска в расширяемой окрестности (англ. *Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)*). *ALNS* представляет собой структуру локального поиска, в которой ряд простых операторов конкурируют за изменение текущего решения. В описанной реализации *ALNS* задается шесть операторов удаления и три оператора вставки. Для возможности гибкой адаптации расписания для каждой запланированной задачи на съемку рассчитываются как предыдущие, так и последующие возможные варианты съемки. После этого на каждой итерации на основе анализа информации о требуемом времени перехода от съемки одного объекта к съемке другого выбирается пара операторов для уничтожения текущего решения и создания нового с большим набором измененных переменных.

Для анализа эффективности представленной методики было разработано множество сценариев, которые показали, что построенное расписание съемки объектов наблюдения позволяет практически в полной мере использовать доступные ресурсы спутника независимо от того, как распределены задачи.

В качестве ограничения предлагаемой методики можно выделить ее низкую универсальность ввиду привязки к конкретной модели спутника.

5. Применение генетического алгоритма для планирования съемки площадных объектов в спутниковой группировке ДЗЗ

Авторы статьи [8] предлагают решение проблемы планирования съемки спутниковой группировкой ДЗЗ площадных ОН путем применения многокритериального генетического алгоритма.

Сложность задачи заключается в необходимости планирования нескольких операций съемки ОН для полного его покрытия. Кроме того, многоспутниковое планирование съемки площадных ОН является многокритериальной задачей оптимизации, при этом одновремен-

ная оптимизация сразу по всем критериям невозможна, поскольку они могут противоречить друг другу. Так, например, невозможно одновременно получить снимок с высоким линейным разрешением и обширной зоной покрытия в самый короткий срок.

Представленную в статье методику планирования кратко можно описать следующим образом. Вначале осуществляется поиск соответствия (матчинг) между задачами на съемку районов наблюдения и КА ДЗЗ для определения соответствия характеристик съемочной аппаратуры КА требованиям, предъявляемым к результатам съемки. Затем выполняется декомпозиция площадного ОН на множество полос съемки. Далее задача планирования съемки полученных полос представляется в виде многокритериальной модели целочисленного программирования. После этого применяется многокритериальный генетический алгоритм *NSGA-II* для получения оптимального расписания съемки.

Сравнение разработанного алгоритма с генетическим и жадным алгоритмом оптимизации показало, что описанный алгоритм в случае многокритериальной оптимизации дает более близкое к оптимальному решение.

В качестве ограничений разработанной методики авторы статьи выделяют тот факт, что для выполнения съемки районов наблюдения предполагается привлечение спутниковых группировок сразу из нескольких космических агентств, что повышает оперативность и полноту охвата.

Однако на практике сбор спутниковых снимков, полученных несколькими агентствами, может быть весьма затруднен. В качестве еще одного недостатка предлагаемой модели авторы статьи выделяют отсутствие учета влияния на съемку облачного покрова и других факторов.

6. Метод планирования сеансов связи КА с наземными станциями с разбором конфликтов

В статье [9] описывается высокопроизводительная методика планирования сеансов связи между КА и НС. Ее авторы анализируют конфликты между различными сеансами связи и представляют метод их разрешения.

В предлагаемом методе первоначально с помощью стратегии предварительного планирования строится начальное допустимое расписание, а затем полученное расписание улучшается в соответствии со стратегией перепланирования в подпространстве возможных решений. Идея стратегии предварительного размещения заключается в отдаче приоритета при размещении

менее гибким запросам с более высокой прибылью, которые оказывают минимальное влияние на незапланированные запросы. Идея стратегии перепланирования заключается в разрешении конфликтов между незапланированными запросами и запланированными запросами в соответствии с правилами вставки и запрета и механизмом самоадаптации. В данной стратегии основная сложность состоит в том, как выявлять непримиримые конфликты и как находить оптимальные интервалы вставки для операций обмена. Новая идея предложенного метода заключается в необходимости различать совместимые и непримиримые конфликты, а также в запрете неэффективных обменов между незапланированными и запланированными запросами.

Анализ результатов разработанного алгоритма показал его значительное превосходство над классическими алгоритмами оптимизации.

7. Метод линейного целочисленного программирования для планирования съемки объектов наблюдения спутниковой группировкой с учетом возможной облачности

В статье [10] рассматривается проблема планирования съемки ОН группировкой КА ДЗЗ с учетом возможной облачности. Авторы моделируют условия облачности при съемке как стохастические события и расширяют определение назначения для модели программирования в случайных ограничениях.

Для решения поставленной проблемы предлагается метод выборочной аппроксимации, который преобразует модель программирования в случайных ограничениях в модель линейного целочисленного программирования. Полученная модель решается с помощью разработанного алгоритма ветвления и разреза, основанного на генерации "ленивых" вычислений.

Множественные имитационные эксперименты показывают эффективность и достоверность предлагаемой методики.

Однако в качестве ограничения предлагаемого подхода можно выделить отсутствие в описанной модели случая разворачиваемых спутников, часто используемых на практике.

8. Усовершенствованный метод поиска в расширяющейся окрестности для планирования работы нескольких спутников

Авторы статьи [11] расширяют методику планирования съемки районов наблюдения одиночным поворачиваемым спутником ДЗЗ с помо-

щью ALNS, описанную в работе [7], для случая с несколькими спутниками. Подчеркивается, что данная задача является значительно более сложной, чем в первом случае вследствие гораздо большего пространства возможных решений.

В структуру алгоритма *ALNS* вводится адаптивный механизм распределения задач путем определения пяти операторов назначения. На каждом шаге итерации эти операторы выбираются адаптивно, чтобы направлять алгоритм для эффективного поиска в пространстве решений расширяющейся окрестности.

Анализ результатов множества экспериментов показывает большую эффективность предлагаемой методики в сравнении с имеющимися в настоящее алгоритмами решения данной задачи.

9. Применение метода локального поиска для планирования моно- и стереосъемки с использованием поворачиваемого спутника ДЗЗ

В статье [12] представлено описание решения задачи, представленной на соревновании *ROADEF 2003*, в которой было необходимо выполнить планирование съемки ОН одиночным поворачиваемым спутником ДЗЗ для нескольких пользователей с помощью алгоритма многокритериального локального поиска на основе показателей.

Отличительной особенностью данной задачи была необходимость планирования заявок на съемку двух типов: моно и стерео. Для монозапросов съемка проводится однократно, тогда как для стереозапросов каждая область должна быть снята дважды в одном и том же направлении, но под разными углами. Задача оптимизации заключается в том, чтобы максимизировать общую прибыль от проведения съемки и одновременно обеспечить равномерность распределения ресурсов между задачами различных пользователей, которая определяется минимизацией максимальной разницы в прибыли между пользователями.

Оценку результатов работы алгоритма проводили на модифицированных экземплярах тестовых данных из соревнования *ROADEF 2003*, и она показала достаточно высокую эффективность данного подхода в сравнении с алгоритмами, предлагаемыми другими участниками соревнования.

В качестве недостатка описанного подхода можно выделить отсутствие направления поиска в ходе оптимизации, это сильно ограничивает его применение на реальных задачах большой размерности.

10. Генетическая оптимизация для планирования съемок Земли спутниковой группировкой с радиолокаторами

В статье [13] описывается алгоритм планирования работы группировки КА Д33, оснащенных радиолокаторами с синтезированной апертурой.

Отличительной особенностью спутников данного типа является независимость возможности съемки от погодных условий. Оптимизация выполнения операций космической группировки выполнена путем минимизации времени отклика системы, которое определяется как время, которое требуется от момента запроса пользователя на съемку до окончания получения данных. Для решения поставленной задачи предлагается применять алгоритм оптимизации, основанный на генетическом алгоритме.

Результаты исследования полученного решения показывают, что планирование миссии с применением разработанного планировщика приводит к сокращению времени отклика космической системы наблюдения.

11. Мультиагентный метод планирования работы спутниковой группировки Д33

В статье [14] описывается мультиагентная система планирования съемки ОН группировкой спутников Д33. В качестве предпосылок для применения мультиагентного подхода для решения данной задачи приводятся преимущества механизмов самоадаптации и самоорганизации относительно многокритериальных задач большой размерности, требующих выполнения динамической адаптации плана при возникновении внештатных событий.

Система разработана на основе инструментария для создания мультиагентных систем *ADELFE*. На основе описания проблемы и инструментов, представляемых *ADELFE*, выделяется девять типов сущностей:

- три типа взаимодействующих агентов: агент задачи, агент полосы съемки и агент КА;
- три типа активных сущностей: облачность, солнечная эфемериды и наземная станция. У данных сущностей отсутствует потребность в удовлетворении своих целей, однако они все же взаимодействуют с активными агентами и оказывают влияние на действия и решения агента;
- три типа пассивных сущностей: память и батарея спутника, а также модуль расчета баллистики. Эти объекты считаются пассив-

ными, потому что они не взаимодействуют с другими сущностями, а представляют собой ресурсы.

Процесс планирования заключается во взаимодействии агентов полосы съемки и агентов КА. При этом агент КА, получив запрос от агента полосы съемки, сообщает ему стоимость размещения, зависящую от необходимости "выталкивания" других запланированных съемок, загрузки памяти, и полученных запросов на съемку в это время. Агенты полосы съемки выбирают самый дешевый вариант. При этом агенты КА могут исключить из расписания другие запланированные операции съемки исходя из их важности, зависящей от приоритета и от числа имеющихся у агента участка вариантов для размещения (чем их меньше, тем более критичен этот участок для этого спутника) — здесь используются эвристики из программирования в ограничениях.

Результаты сравнения разработанной методологии с классическим хронологическим жадным алгоритмом оптимизации, применяемым в настоящее время, показывают преимущества представленной системы.

12. Планирование целевого применения спутниковой группировки Д33 в реальном времени на основе объединения заказов

В статье [15] описывается решение проблемы динамического планирования съемки точечных ОН группировкой из нескольких КА в режиме реального времени. Особенностью данной задачи является тот факт, что множество всех задач на съемку, выполнение которых необходимо запланировать, неизвестно заранее, а формируется в процессе планирования путем поступления новых заявок.

Для уменьшения размерности задачи планирования авторами статьи предлагается алгоритм слияния вновь поступающих в систему заявок с уже запланированными. Основная идея данного алгоритма основывается на том факте, что КА может одновременно наблюдать несколько расположенных близко друг к другу объектов наблюдения. Таким образом, перед вставкой новой задачи в расписание делается попытка объединения ее с уже запланированной задачей. Объединение нескольких задач в одну возможно при условии одновременной наблюдаемости ОН и непротиворечивости ограничений, накладываемых на каждую из задач. Если объединение задач не удалось, то проводится отдельная вставка новой задачи в расписание.

Результаты исследования разработанного алгоритма показали его эффективность по сравнению с предыдущей версией алгоритма планирования без слияния задач и возможность его использования для динамического планирования в реальном масштабе времени.

13. Иерархический метод решения задачи планирования спутниковой съемки в реальном времени с использованием муравьиной оптимизации

Авторы статьи [16] предлагают решение задачи планирования спутниковой съемки точечных и площадных ОН в режиме реального времени. В качестве основного фактора, влияющего на текущую целевую обстановку, приводится изменение облачности. Учитывая сложность прогнозирования данного фактора, можно констатировать, что традиционные алгоритмы планирования нуждаются в процессе повторного перестроения расписания, которое, в свою очередь, может требовать значительных временных и вычислительных ресурсов, что делает практически невозможным применение данных алгоритмов в режиме реального времени. Также в качестве еще одного недостатка традиционных алгоритмов отмечается отсутствие четкой иерархии между этапами планирования, усложняющее их понимание.

Для решения описанных проблем авторами статьи был разработан иерархический метод планирования. В данном методе процесс планирования предлагается разделить на три этапа: предварительное распределение, грубое планирование и точное планирование. В основу данной иерархической структуры был положен муравьиный алгоритм планирования.

Результаты исследований работы разработанной методики на 36 экспериментальных сценариях показали сокращение времени расчета и отсутствие необходимости полного повторного перестроения расписания при изменении условий планирования, что позволяет сократить затраты вычислительных ресурсов.

14. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников ДЗЗ с использованием мультиагентных технологий

В статье [17] описано решение проблемы построения самоорганизующейся системы управления поведением кластера малых КА, позволяющей проводить автономное планирование исполнения заявок на съемку ОН в соответствии

с пространственно-временными требованиями заказчика. Показано, что данная проблема является сложной и многообразной и в настоящее время находится пока в стадии теоретических исследований и первых попыток построения ее демонстрационных прототипов.

Авторами предлагается новая концепция группового управления КСН, основанная на принципе самоорганизации группового поведения КА. Основная ее идея состоит в том, что все базовые функции процесса управления реализуются непосредственно бортовыми средствами спутников группировки. В работе проводится аналогия между этой задачей и задачей построения самоорганизующихся *B2B*-сетей, являющейся предметом активных исследований и разработок в области многоагентных систем.

Авторы обращают внимание на тот факт, что в работе остались совсем не затронуты некоторые важные проблемы и задачи, которые необходимо решить для возможности практической реализации описанной концепции управления. Первая из них — это проблема построения устойчивой коммуникационной системы. Вторая задача обусловлена динамикой коммуникационной сети, заданной на множестве КА группировки, которая возникает вследствие отсутствия постоянной прямой видимости между КА и ограниченной дальности связи.

Выводы

Сводный перечень выделенных в рассмотренных работах основных задач планирования группировок спутников представлены в таблице.

Обзор приведенных работ показал, что имеющиеся в настоящее время методики планирования работы космических систем имеют централизованный, иерархический и монолитный характер, но в основном опираются не на традиционные математические методы оптимизации, применение которых ведет к лавинообразному росту объемов вычислений, а на различного рода эвристики для сокращения перебора (алгоритм имитации отжига, поиск с запретами, генетический алгоритм и т.д.), точнее, их модификации под конкретную задачу.

В качестве общих недостатков, присущих всем алгоритмам такого рода централизованного планирования, можно выделить следующие:

- отсутствие единой сквозной методологии, позволяющей последовательно наращивать сложность задачи, которая всегда является композицией множества противоречи-

Задача	№ работы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Планирование работы группировки КА			+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
Планирование работы поворачиваемых КА		+		+				+	+	+		+	+	
Планирование съемки точечных ОН		+		+			+	+	+	+	+	+	+	+
Планирование съемки площадных ОН		+			+									+
Учет приоритетов запросов	+			+		+	+	+	+					
Учет использования объемных ресурсов				+			+				+		+	
Учет возможной облачности							+				+		+	
Планирование сеансов связи с НСПИ	+		+	+		+		+		+	+	+		
Динамическое перестроение расписания по событиям											+	+	+	+

вых требований. Например, площадные ОН надо уметь оптимально разбить на фрагменты, но сами размеры этих фрагментов и порядок их съемки зависят от оптимального распределения задач по каждому КА, оптимальных станций сброса данных и т.д.;

- жесткий детерминизм методов и алгоритмов, не позволяющий учитывать ситуационный баланс по разными критериям, предпочтениям и ограничениям, которые могут меняться в ходе ситуации в реальном времени;
- требование по решению конфликтов за счет сетевых взаимодействий: невозможность автоматически запланировать новый заказ в рамках имеющихся ресурсов еще не значит, что такой возможности нет, поскольку можно попытаться выйти на контакт, договориться с собственниками запланированных ранее заказов и попросить их согласиться изменить сроки их заказов, например, за небольшую скидку, которая будет оплачена владельцем нового срочного заказа;
- необходимость скользящей адаптивной локально-оптимальной перестройки плана лишь в той части расписания, которая затронута событием, для учета быстроменяющихся условий реального времени;
- необходимость как можно более поздней окончательной фиксации назначений ресурсов на заказы, чтобы в условиях высокой неопределенности до последнего момента допускать гибкое изменение расписания, с тем чтобы не потерять возможность выполнить пришедшие в последнюю минуту заказы;
- требование управляемых изменений расписания — контроль возможной глубины изменения расписания на основе анализа соотношения ценности возможного искомого

решения против предполагаемых вычислительных затрат с учетом времени, доступного для принятия решений;

- возможность преодоления заданных ограничений в случае, если событие не может быть обработано с учетом имеющихся требований с текущим набором ресурсов — система должна рассматривать возможности выполнения наименее приоритетных заказов с задержками;
- необходимость удобной интерактивной доработки планов, предполагающая, что пользователи всегда должны иметь возможность вручную или полуавтоматически внести изменения и дорабатывать расписания;
- возможность работы в условиях сбоев и поступления неполных или недостоверных данных, ошибок операторов и т.д.

Настоящий обзор показывает, что начали появляться методы и алгоритмы, связанные с учетом семантики предметной области, разбором конфликтов, недетерминированным поведением, самоорганизацией, адаптацией, работой в реальном времени.

На основе анализа основных тенденций рассмотренных разработок можно сделать вывод, что главным свойством интеллектуальных систем будущего для управления космическими системами становится адаптивность, позволяющая повышать эффективность применения целевой аппаратуры в условиях роста сложности, неопределенности и динамики решения поставленных задач, а также обеспечивать для указанных систем оперативность и гибкость, масштабируемость, производительность и надежность в работе, устойчивость развития и живучесть в самых разных ситуациях, с учетом всех ограничений на функционирование

как орбитальной группировки, так и наземного контура управления.

Можно утверждать, что в этом контексте ни одно из решений, предложенных в рассмотренных статьях, не соответствует определенным во введении требованиям по масштабируемости, адаптивности, учету индивидуальных особенностей заявок и ресурсов и гибкости решения. Наиболее близка к решению поставленной задачи методика, предложенная в работе [16], однако авторы выделяют ряд нерешенных проблем, препятствующих применению данной методики на практике.

Предложения по дальнейшим исследованиям

Представляется, что одним из возможных подходов к решению задачи может быть расширенное применение мультиагентных технологий [13,16], позволяющих преодолеть представленные выше недостатки, но требуется значительная работа для их развития с учетом специфики указанной задачи. Следует также отметить перспективы сочетания мультиагентных технологий с технологиями семантического Интернета для формализованного представления знаний, необходимых для учета семантики решаемых задач в ходе автоматического принятия решений, а также возможности их применения и развития для решения различного рода отдельных сложных задач управления ресурсами и их комбинирования [18].

В нашей стране разработка моделей, методов и средств по созданию интеллектуальных систем для управления перспективными группировками КА на основе онтологий и мультиагентных технологий последовательно ведется в работах Самарской школы [19]. Идея разработки "Роя спутников" на основе мультиагентных технологий, способных к автономному принятию решений и взаимодействию между собой для повышения оперативности, гибкости, производительности, надежности и живучести космических систем будущего, была впервые высказана в нашей стране учеником академика С. П. Королева, лауреатом Ленинской премии, проф., д.т.н. А. В. Соллогубом в 2003 г. Полученные теоретические выводы и положения, а также первые результаты экспериментальных разработок и исследований по этому направлению, выполнявшиеся в период с 2010 г., представлены в работах [20–25]. Оставляя пока за рамками обзора эти результаты, отметим, что в настоящее время ведется разработка и первых промышленных систем данного класса.

Развитие предлагаемого подхода с учетом преимуществ и ограничений рассмотренных в настоящей работе методов и средств позволит в перспективе создавать автономные интеллектуальные системы управления группировками КА принципиально нового поколения, построенными по типу "умных (самоорганизующихся) роев", с встроенными способностями к прямому взаимодействию и принятию решений в каждом КА, канале и узле связи. Это предполагает реализацию полного цикла многокритериального ситуационного управления ресурсами в реальном времени, когда интеллектуальная система, ориентируясь на заданные ей цели и критерии их достижения, предпочтения и ограничения, самостоятельно, с учетом особенностей каждой конкретной ситуации, адаптивно решает возникающие задачи распределения заказов, планирования ресурсов, оптимизации их использования, прогнозирования новых событий, мониторинга и контроля результатов, перестройки планов при возникновении расхождения планов и факта, а также извлечения знаний из опыта, т.е. самообучения.

Эта задача представляется чрезвычайно актуальной и значимой для долгосрочного развития всей космической отрасли и требует комплексного ее решения как со стороны планирования целевого применения КА, так и со стороны управления космическим комплексом в целом, с учетом развития спутникового контура управления и организации сетевого непрерывного взаимодействия всех участников, начиная от разработчиков и эксплуатирующей организации космической системы и заканчивая конечными потребителями.

Список литературы

1. Усовик И. В., Дарнопых В. В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем Д33 // Труды МАИ. 2013. № 65. 31 с.
2. Афанасьев И., Кучейко А. Один большой и 103 маленьких. Индия выполнила рекордный по числу полезных нагрузок запуск // Новости космонавтики. 2017. Т. 27, № 4. С. 30–36.
3. Кучейко А. Индийский пуск в интересах Д33 и не только // Новости космонавтики. 2016. Т. 26, № 11. С. 57–58.
4. Karapetyan D., Minic S., Malladi K. T., Punnen A. Satellite downlink scheduling problem: A case study // Omega. 2015. Vol. 53. P. 115–123. DOI: 10.1016/j.omega.2015.01.001.
5. Bunkheila F., Ortore E., Circi C. A new algorithm for agile satellite-based acquisition operations // Acta Astronautica. 2016. Vol. 123. P. 121–128. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.03.023.
6. Zhang Z., Hu F., Zhang N. Ant colony algorithm for satellite control resource scheduling problem // Applied Intelligence. 2018. Vol. 48, Iss. 10. P. 3295–3305. DOI: 10.1007/s10489-018-1144-z.
7. Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., He R. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time // Computers & Operations Research. 2017. Vol. 86. P. 41–53. DOI: 10.1016/j.cor.2017.04.006.

8. **Niu X., Tang H., Wu L.** Satellite Scheduling of Large Areal Tasks for Rapid Response to Natural Disaster Using a Multi-Objective Genetic Algorithm // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2018. Vol. 28. P. 813–825. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2018.02.013.
9. **Luo K., Wang H., Li Y., Li Q.** High-performance technique for satellite range scheduling // Computers & Operations Research. 2017. Vol. 85. P. 12–21. DOI: 10.1016/j.cor.2017.03.012.
10. **Wang J., Demeulemeester E., Qiu D.** A pure proactive scheduling algorithm for multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds // Computers & Operations Research. 2016. Vol. 74. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.cor.2016.04.014.
11. **He L., Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., Chen Y.** An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling // Computers & Operations Research. 2018. Vol. 100. P. 12–25. DOI: 10.1016/j.cor.2018.06.020.
12. **Tangpattanakul P., Jozefowicz N., Lopez P.** A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite // European Journal of Operational Research. 2015. Vol. 245. P. 542–554. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.011.
13. **Kim H., Chang Y.** Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time // Aerospace Science and Technology. 2015. Vol. 40. P. 17–32. DOI: 10.1016/j.ast.2014.10.006.
14. **Bonnet J., Gleizes M., Kaddoum E., Rainjonneau S., Flandin G.** Multi-satellite Mission Planning Using a Self-Adaptive Multi-agent System // In Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO '15). IEEE Computer Society, USA. P. 11–20, DOI: 10.1109/SASO.2015.9.
15. **Wang J., Jianjiang Z., Xiaomin Y., Laurence Z., Jianghan M.** Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites // Journal of Computer and System Sciences. 2015. Vol. 81, Iss. 1. P. 110–124. DOI: 10.1016/j.jcss.2014.06.016.
16. **He L., Liu X., Xing L., Liu K.** Hierarchical scheduling for real-time agile satellite task scheduling in a dynamic environment // Advances in Space Research. 2019. Vol. 63, Iss. 2. P. 897–912. DOI: 10.1016/j.asr.2018.10.007.
17. **Городецкий В. И., Карсаев О. В.** Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2017. № 2 (187). С. 234–247.
18. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing complexity. London-Boston: WIT Press, 2014. 202 p.
19. **Скобелев П. О.** Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 33–46.
20. **Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В.** Решение задач дистанционного зондирования Земли с применением мультиагентных технологий // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Технические науки". 2010. № 7 (28). С. 47–54.
21. **Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е.** Модели сетевентрических задач планирования и управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1(56). С. 34–38.
22. **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.
23. **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. № 104. P. 118–130. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.103.
24. **Skobelev P., Simonova E., Zhilyaev A., Travin V.** Multi-Agent Planning of Spacecraft Group for Earth Remote Sensing // In: Borangiu T., Trentesaux D., Thomas A., McFarlane D. (eds) Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence. 2016. Vol. 640. P. 309–317. DOI: 10.1007/978-3-319-30337-6_28.
25. **Skobelev P. O., Lakhin O. I.** Towards the digital platform and smart services for managing space traffic // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. 2018. Vol. 13, № 2. P. 187–198. DOI: 10.2495/DNE-V13-N2-187-198.

A Review of Modern Methods for Planning and Scheduling of the Operations in Advanced Space Systems

V. A. Galuzin¹, vladimir.galuzin@gmail.com, **A. Yu. Kutomanov²**, kutomanov@mcc.rsa.ru,
M. M. Matyushin², MatyushinMM@tsniiimash.ru, **P. O. Skobelev^{3,4}**, petr.skobelev@gmail.com,
¹Samara State Technical University, Samara, 443001, Russian Federation,
²JSC "TsNIIIMash", Korolev, Moscow Region, 141070, Russian Federation,
³Samara Federal Research Scientific Centre RAS, Samara, 443001, Russian Federation,
⁴Institute for the Control of Complex Sistems RAS, Samara, 443020, Russian Federation

Corresponding author: Skobelev Petr O., Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory "Multi-agent systems", Samara Federal Research Scientific Centre RAS, Institute for the Control of Complex Sistems RAS Samara, 443001, Russian Federation, e-mail: petr.skobelev@gmail.com

Accepted on May 27, 2020

Abstract

The paper gives overview of modern research on planning and scheduling of new generation of large groups of satellites, analyzes current methods and algorithms of planning and scheduling, considers their practical applications and main future trends. The list of requirements for developing new methods and algorithms for planning and scheduling is identified. The problem statement is formulated which shows multi-objective complexity of planning and scheduling for groups of satellites. A number of conflicting requirements are identified generated by demands and resources, including fast changing meteorological parameters, ballistic constraints, video cameras restrictions, satellite battery constraints, ground stations and communication lines requirements, etc. It is shown that the main part of developed methods and tools is still oriented on centralized control of resources and based on different heuristics for reducing exhausted combinatorial search of globally optimal options. These methods and tools do not consider networking nature of new generation of satellites groups which requires negotiations and conflict solving among orders and satellites in future. These new generation of satellites groups also requires high adaptability and flexibility, individuality, scalability, performance and reliability of future groups of satellites. One of new trends in adaptive planning and scheduling is multi-agent technology where agents of demands and

resource can make matching on virtual market. But it requires new efforts not only on new generation software developments for designing open self-organized systems ("swarms of satellites") but also on direct communication between satellites and ground stations. Developing such smart swarms of satellites will provide new features, benefits and values for customers.

Keywords: space system, satellite, ground station, observation objects, communication sessions, planning methods, adaptive planning, multi-agent technology

Acknowledgements: The paper has been prepared based on the materials of scientific research within the subsidized state theme of the Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute for the Control of Complex Systems RAS for research and development on the topic: № АААА-А19-119030190053-2 «Research and development of methods and means of analytical design, computer-based knowledge representation, computational algorithms and multi-agent technology in problems of optimizing management processes in complex systems».

For citation:

Galuzin V. A., Kutomanov A. Yu., Matyushin M. M., Skobelev P. O. A Review of Modern Methods for Planning and Scheduling of the Operation in Advanced Space Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 639–650.

DOI: 10.17587/mau.21.639-650

References

1. **Usovik I. V., Darnopykh V. V.** Automated software package for parametric analysis and optimization of planning the target functioning of remote sensing space systems, *Trudy MAI*, 2013, no. 65, p. 31 (in Russian).
2. **Afanasyev I., Kucheyko A.** One large and 103 small. India completed a record-breaking launch of payloads, *Novosti Kosmonavtiki*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 30–36 (in Russian).
3. **Kucheyko A.** Indian launch in the interests of remote sensing and not only, *Novosti Kosmonavtiki*, 2017, vol. 26, no. 11, pp. 57–58 (in Russian).
4. **Karapetyan D., Minic S., Malladi K. T., Punnen A.** Satellite downlink scheduling problem: A case study, *Omega*, 2015, vol. 53, pp. 115–123, DOI: 10.1016/j.omega.2015.01.001.
5. **Bunkheila F., Ortore E., Circi C.** A new algorithm for agile satellite-based acquisition operations, *Acta Astronautica*, 2016, vol. 123, pp. 121–128, DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.03.023.
6. **Zhang Z., Hu F., Zhang N.** Ant colony algorithm for satellite control resource scheduling problem, *Applied Intelligence*, 2018, vol. 48, iss. 10, pp. 3295–3305, DOI: 10.1007/s10489-018-1144-z.
7. **Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., He R.** An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time, *Computers & Operations Research*, 2017, vol. 86, pp. 41–53, DOI: 10.1016/j.cor.2017.04.006.
8. **Niu X., Tang H., Wu L.** Satellite Scheduling of Large Areal Tasks for Rapid Response to Natural Disaster Using a Multi-Objective Genetic Algorithm, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, vol. 28, pp. 813–825, DOI: 10.1016/j.ijdrr.2018.02.013.
9. **Luo K., Wang H., Li Y., Li Q.** High-performance technique for satellite range scheduling, *Computers & Operations Research*, 2017, vol. 85, pp. 12–21, DOI: 10.1016/j.cor.2017.03.012.
10. **Wang J., Demeulemeester E., Qiu D.** A pure proactive scheduling algorithm for multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds, *Computers & Operations Research*, 2016, vol. 74, pp. 1–13, DOI: 10.1016/j.cor.2016.04.014.
11. **He L., Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., Chen Y.** An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling, *Computers & Operations Research*, 2018, vol. 100, pp. 12–25, DOI: 10.1016/j.cor.2018.06.020.
12. **Tangpattanakul P., Jozefowicz N., Lopez P.** A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite, *European Journal of Operational Research*, 2015, vol. 245, pp. 542–554, DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.011.
13. **Kim H., Chang Y.** Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time, *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 40, pp. 17–32, DOI: 10.1016/j.ast.2014.10.006.
14. **Bonnet J., Gleizes M., Kaddoum E., Rainonneau S., Flandin G.** Multi-satellite Mission Planning Using a Self-Adaptive Multi-agent System, *In Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO '15)*. IEEE Computer Society, USA, pp. 11–20, DOI: 10.1109/SASO.2015.9.
15. **Wang J., Jianjiang Z., Xiaomin Y., Laurence Z., Jianghan M.** Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites, *Journal of Computer and System Sciences*, 2015, vol. 81, iss. 1, pp. 110–124, DOI: 10.1016/j.jcss.2014.06.016.
16. **He L., Liu X., Xing L., Liu K.** Hierarchical scheduling for real-time agile satellite task scheduling in a dynamic environment, *Advances in Space Research*, 2019, vol. 63, iss. 2, pp. 897–912, DOI: 10.1016/j.asr.2018.10.007.
17. **Gorodetsky V. I., Karsaev O. V.** Self-organization of group behavior of a cluster of small satellites of a distributed observation system, *Izvestiya Yuzhnogo Federalnogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*, 2017, no. 2, pp. 234–247 (in Russian).
18. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing complexity, London-Boston, WIT Press, 2014, 202 p.
19. **Skobelev P. O.** Multi-agent technology in industrial applications: Towards 20-th anniversary of multi-agent technology research team in Samara, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 12, pp. 33–46 (in Russian).
20. **Sollogub A. V., Skobelev P. O., Ivashchenko A. V., Simonova E. V., Stepanov M. E., Tsarev A. V.** Solving Earth Remote Sensing Problems Using Multi-Agent Technologies, *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2010, no. 7 (28), pp. 47–54 (in Russian).
21. **Sollogub A. V., Skobelev P. O., Simonova E. V., Tsarev A. V., Stepanov M. E.** Simulation models for network-centric problems of scheduling and group operational control of a cluster of small space ships and mini-satellites in the Earth remote sensing problems, *Informacionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2012, no. 1(56), pp. 34–38 (in Russian).
22. **Sollogub A. V., Skobelev P. O., Simonova E. V., Tsarev A. V., Stepanov M. E., Zhilyaev A. A.** Intelligent system for distributed control of group operations of a cluster of small space crafts in Earth remote sensing problems, *Informacionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, no. 1(62), pp. 16–26 (in Russian).
23. **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, pp. 118–130, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.103.
24. **Skobelev P., Simonova E., Zhilyaev A., Travin V.** Multi-Agent Planning of Spacecraft Group for Earth Remote Sensing, *In: Borangiu T., Trentesaux D., Thomas A., McFarlane D. (eds) Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence*, 2016, vol. 640, pp. 309–317, DOI: 10.1007/978-3-319-30337-6_28.
25. **Skobelev P. O., Lakhin O. I.** Towards the digital platform and smart services for managing space traffic, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 187–198, DOI: 10.2495/DNE-V13-N2-187-198.