

18. *Burenok V.M.* Sistemnoe proektirovanie razvitiya vooruzheniya i voennoy tekhniki [Design of the Development of Arms and Military Equipment], *Voenmaya mysl'* [Military Thought], 2004, No. 6.
19. *Burenok V.M.* Razvitie sistemy vooruzheniya i novyy oblik VS RF [Development of the Armament System and a New Face of the RF Armed Forces], *Zashchita i bezopasnost'* [Defense and Security], 2009, No. 2.
20. *Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Rudianov N.A., Ryabov A.V., Khrushchev V.S.* Boy v gorode. Boveye i obespechivayushchie roboty v usloviyakh urbanizirovannoy territorii [Fight in the city. Combat and providing robots in an urbanized area], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 3 (116), pp. 142-146.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.П. Куренков.

**Родионов Владимир Валентинович** – Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал»; e-mail: mail@vniisignal.ru; 601903, Владимирская область, г. Ковров, ул. Крупской, 57; тел: +74923290334; временный генеральный директор.

**Филиппов Сергей Иванович** – главный конструктор – заместитель генерального директора по научной работе; к.т.н.; доцент.

**Варабин Денис Александрович** – научно-производственного комплекса; к.т.н.

**Rodionov Vladimir Valentinovich** – Joint Stock Company “All-Russian Scientific Research Institute “Signal”; e-mail: mail@vniisignal.ru; 57 Krupskoi street, Kovrov, Vladimir region, Russian Federation, 601903; phone: +74923290334; interim CEO.

**Filippov Sergey Ivanovich** – Deputy Director General for Research; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Varabin Denis Aleksandrovich** – head of the Research and Production Complex; cand. of eng. sc.

УДК 004.003, 004.896:62-5: 007.52

DOI 10.23683/2311-3103-2018-1-140-154

**О.В. Карсаев**

### **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКОЙ МАЛЫХ СПУТНИКОВ\***

*Предметом исследований в статье является автономное управление группировкой малых космических аппаратов. Информационное взаимодействие между спутниками группировки и между спутниками и наземными станциями является неотъемлемым элементом автономного планирования и управления. Группировка спутников и множество наземных пунктов в целом образуют DTN (Delay-and-Disruption Tolerant Network)-сеть. Передача сообщений до конечного получателя в такой сети в общем случае происходит через цепочку промежуточных узлов в режиме «запомнил – передал». Как следствие этого, пересылка отдельных сообщений и информационное взаимодействие в целом происходит с определенными временными задержками. Эти временные задержки могут становиться существенными факторами, оказывающими негативное влияние на эффективность автономного управления группировками спутников. В статье приводится описание разрабатываемой агентно-ориентированной модели группировки спутников, которая на начальном этапе исследования главным образом предназначается для исследования данного фактора и получения количественных показателей таких временных оценок в зависимости от различных факторов. Данная модель включает программные компоненты двух уровней. Компоненты*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-01-00840) и проекта Программы Президиума РАН № 30.

нижнего уровня описывают подсистему имитационного моделирования поведения спутников и наземных пунктов как узлов DTN-сети. В соответствии с этим данная подсистема используется для моделирования состояния DTN-сети во времени, и в частности, для моделирования установления каналов связи и для моделирования передачи сообщений и данных между узлами сети. Компонентами второго уровня являются программные модули в узлах сети, которые в совокупности формируют подсистему автономного планирования и информационного взаимодействия. Компоненты двух уровней являются слабосвязанными элементами модели. Такой подход обеспечивает возможность разработки и исследования различных вычислительных модулей, реализующих соответствующие методы и сценарии автономного планирования и информационного взаимодействия на основе общей имитационной модели. В текущей версии модели рассматриваются две взаимосвязанные задачи планирования, планирования задач наблюдений и планирование доставки собираемых данных на Землю, и возможные подходы к их решению на основе соответствующих схем информационного взаимодействия. Данные подходы также являются объектами исследования с точки зрения исследования влияния временных задержек информационного взаимодействия в DTN-сети.

*Малые спутники; командное поведение; автономное планирование; имитационное моделирование; многоагентные системы.*

**O.V. Karsaev**

## **SIMULATION OF A SMALL SATELLITES GROUP AUTONOMOUS CONTROL**

*The subject of research in the paper is autonomous control of small satellites group. Information interaction between satellites of the group and between satellites and ground stations is an essential element of autonomous planning and control. The satellites group and ground stations as a whole form Delay-and-Disruption Tolerant Network (DTN). The message transfer to the final recipient in such a network generally occurs through a chain of nodes in the "store – send" mode. As a result, the transfer of messages and information interaction in general occurs with certain time delays. These time delays can be significant factor that have a negative impact on the efficiency of the autonomous control of satellite group. The paper describes the developed agent-oriented model of satellite group that at the initial stage of the study is mainly intended to investigate this factor and obtain quantitative estimates of such time delays on various other factors. This model includes software components of two levels. The lower-level components describe the subsystem for simulating the behavior of satellites and ground stations as DTN network nodes. Accordingly, this subsystem is used to model the state of the network in time, and in particular, to simulate the establishment of communication channels and the transfer of messages and data between nodes. Components of the second level are software modules in the network nodes, which together form a subsystem of autonomous planning and information exchange. The components of the two levels are loosely coupled elements of the model. This approach provides an opportunity to develop and study different computing modules that implement appropriate methods and scenarios of autonomous planning and information exchange based on a common simulation model. The current version of the model considers two interrelated tasks of planning: planning of observation tasks and planning of delivery of collected data to the Earth, and possible approaches to their solution on the basis of appropriate schemes of information exchange. These approaches are also objects of research from the point of view of information exchange time delays in DTN of a network.*

*Small satellites; team behavior; autonomous planning; Simulation; multi-agent systems.*

**1. Введение.** В ближайшем будущем ожидается взрывной рост запуска и использования малых космических аппаратов (МКА), группировки (кластеры, созвездия) которых станут реальной альтернативой тяжелым одиночным КА в выполнении космических миссий. В частности, консалтинговое агентство Euroconsult [1] прогнозирует в течение ближайших 10 лет запуск более 6 тысяч МКА. В настоящее время на орбитах Земли, согласно данным Управления ООН по вопросам космиче-

ского пространства (UNOOSA), находится порядка 4,5 тысяч искусственных спутников, две трети из которых уже не функционируют, являются «космическим мусором», а одна треть функционирует в оперативном режиме в соответствии со своим назначением [2]. В связи с данной перспективой исследования и разработки систем планирования и управления нового поколения, в которых объектами управления являются группировки МКА, представляются весьма актуальными.

В числе наиболее известных систем планирования, эксплуатируемых в настоящее время в реальной практике, можно упомянуть такие системы, как *APSI*, *ASPEN*, *CPAW*, *EUROPA*, и др. [3–5], которые используются как для гражданских, так и для военных приложений. В этих системах объектами управления являются одиночные КА, и планирование по понятным причинам использует прогноз состояния ресурсов КА во времени. При этом потребности в ресурсах для гарантии задаются с запасом, что в конечном итоге зачастую влечет простой и не эффективное использование целевой аппаратуры КА.

В связи с этим в системах планирования следующего поколения развивается подход, в котором планирование, по крайней мере частично, выполняется автономно на борту КА. Основной целью этого подхода является увеличение точности планирования и эффективности использования целевой аппаратуры за счет использования фактических текущих данных, описывающих реальное состояние ресурсов КА в текущий момент времени. Автономное планирование уже достаточно широко применяется на практике в ряде миссий, однако, чаще – в экспериментальном режиме [6–9]. Более подробный анализ причин и конкретных количественных оценок, которые приводятся различными авторами в качестве обоснования необходимости перехода к автономному планированию, можно найти в работах [10–12].

Реализация возможностей автономного планирования в системах нового поколения, в которых объектами управления являются группировки МКА, в силу тех же самых причин также представляется целесообразной. Однако автономное планирование в этом случае требует информационного взаимодействия МКА, происходящего поверх DTN (Delay-and-Disruption Tolerant Network) сети. То есть обмен сообщениями и данными между МКА может происходить через цепочки узлов сети (через другие МКА), в режиме «запомнил-передал», и как следствие с определенными временными задержками. Оценка этих временных задержек и их влияние на эффективность автономного планирования работы группы МКА и является целью исследований в данной работе.

В рамках исследований полагается, что имеется группировка МКА, выполняющая заявки ДЗЗ. Заявки могут посылаются из любых наземных пунктов управления любым МКА при условии установления сеансов связи с ними. Далее эти МКА инициируют процессы планирования и распределения задач наблюдения между МКА в группе, а после распределения задач наблюдения уже другие соответствующие МКА инициируют процессы планирования доставки результатов наблюдений на Землю.

Достижение цели исследований предполагает разработку программных компонент двух уровней. К первому уровню относятся компоненты имитационной модели. Эти компоненты в целом предназначаются для моделирования полета и функционирования МКА группировки, для моделирования состояния DTN-сети в зависимости от времени и для моделирования передачи сообщений между узлами сети. Компонентами второго уровня являются вычислительные модули, которые собственно и формируют систему планирования и управления. В соответствии с этим статья организована следующим образом. В разд. 2 приводится краткий об-

зор работ, имеющих непосредственное отношение к предмету исследований. Краткое описание имитационной модели приводится в разд. 3. В разд. 4 приводится описание возможных сценариев процессов планирования задач наблюдений и доставки полученных данных на Землю.

**2. Обзор релевантных работ.** Достижение поставленной цели исследований в целом предполагает комплексный анализ и разработку методов решения двух взаимосвязанных классов задач: маршрутизация передачи сообщений в DTN-сети, и распределенное автономное планирование и управление на основе информационного взаимодействия в группировке МКА в условиях DTN-сети. Соответственно с этим далее в этом пункте рассматриваются работы, связанные с исследованием данных двух классов задач.

**2.1. Маршрутизация передачи сообщений в DTN-сети.** Существующие и потенциальные физические возможности связи между МКА соответствующим образом определяют возможности информационного взаимодействия в группировках МКА. Под физическими возможностями связи в данном случае подразумеваются следующие специфические особенности. Связь между парами узлов сети во времени возможна в определенные интервалы времени, когда узлы (МКА и/или наземные пункты) находятся как минимум в условиях прямой видимости. При этом передача сообщений между узлами сети может выполняться через цепочку других промежуточных узлов сети в режиме «запомнил – передал».

Иными словами, группировка МКА и множество наземных пунктов в целом формируют DTN-сеть. Критической проблемой в DTN-сетях является решение задачи маршрутизации сообщений. При этом многообразие различных постановок задач маршрутизации и соответствующих подходов и методов их решения главным образом предопределяется конкретными особенностями DTN-сетей. В целом разрабатываемые схемы маршрутизации относятся к одному из двух классов: вероятностные или детерминированные схемы. DTN-сети космической связи относятся к детерминированному классу, и наиболее популярным и продвинутым алгоритмом маршрутизации в этом классе является CGR (Contact Routing Graph)-алгоритм [13, 14]. В числе других алгоритмов маршрутизации в этом классе DTN-сетей упоминаются такие, как MARVIN и схемы маршрутизации, разрабатываемые для MANET (Mobile Ad hoc Network) сетей.

Кратко суть CGR-алгоритма маршрутизации, который также используется в данной работе, можно представить следующим образом. Основными исходными данными в алгоритме является план контактов между узлами сети, МКА и наземными пунктами. Он определяется с помощью двухэтапной процедуры. На первом этапе на основе моделирования орбитального движения множества МКА рассчитываются интервалы времени, в течение которых выполняются необходимые условия для парных взаимодействий объектов системы, а именно выполняются условия прямой видимости. На втором этапе на основе рассчитанных интервалов времени и возможностей, и ограничений приемопередающих устройств узлов сети формируется план контактов. Основным ограничением является количество одновременных каналов связи, которые могут обеспечивать данные устройства узлов сети. Формирование плана контактов сводится к следующей задаче выбора. Пусть приемопередающие устройства узла могут обеспечивать  $k$  одновременных каналов связи. При этом есть пересечения интервалов времени, в течение которых узел сети находится в условиях прямой видимости с  $n$  узлами сети, и  $n > k$ . В этом случае надо выбрать, с какими из  $k$  узлов сети в данном интервале времени может или будет планироваться установление каналов связи.

Элементами плана являются направленные контакты. Если в каком-то интервале времени устанавливается двунаправленный канал связи, то в плане контактов ему соответствуют два направленных контакта. Таким образом, описание каждого  $i$ -го контакта представляется четверкой:  $\langle x(i), y(i), s(i), f(i) \rangle$ , контакт между узлами  $x(i)$  и  $y(i)$  (от  $x$  к  $y$ ) в интервале времени  $[s(i), f(i)]$ .

На основании плана контактов формируется граф контактов. Вершинами графа являются контакты, а ребра графа соединяют пары контактов  $i$  и  $j$ , у которых выполняются два условия:  $y(j)=x(i)$  и  $f(i)<f(j)$ . План и граф контактов рассчитываются на Земле на определенные горизонты времени планирования, и пересылаются узлам сети. Далее на основании плана и графа контактов в каждом узле сети с помощью алгоритма Дейкстры автономно решается задача маршрутизации. При этом перерасчет маршрутов передачи сообщений происходит всякий раз при возникновении следующих событий в отношении очередного контакта: контакт завершен, не установлен или потерян раньше запланированного момента времени.

**2.2. Распределенное автономное планирование и управление на основе информационного взаимодействия.** В связи с задачей автономного распределенного планирования и управления в первую очередь следует упомянуть работы [15, 16], в которых рассматривается сценарий информационного взаимодействия внутри кластера из 8-ми спутников в рамках миссии EDSN (Edison Demonstration of Smallsat Networks). Эта работа заслуживает особого внимания в связи с тем, что на текущий момент времени эта была первая и пока единственная практическая попытка использования информационного взаимодействия в группировке МКА. Однако эта попытка не была реализована, так как при выводе на орбиту спутники были потеряны [17]. Целью миссии кластера спутников было измерение скорости движения заряженных частиц на низких околоземных орбитах.

Информационное взаимодействие в данном случае рассматривалось для организации передачи данных измерений в наземные пункты в соответствии со следующим сценарием. В каждый момент времени один из спутников играет роль капитана, остальные – роль лейтенантов. Капитан является центральным звеном сети. Он запрашивает у остальных спутников, лейтенантов, данные и передает их наземной станции. Роль капитана со временем передается от одного спутника другому.

Сценарии поведения спутников на этом этапе исследований в проекте являются относительно жесткими, не адаптивными, и реализует достаточно простую логику информационного взаимодействия. В рамках данной миссии кластер представлял собой множество близко расположенных спутников. Расстояние между каждой парой спутников в течение начального периода миссии (60 дней) не должно было превышать 100 км. В соответствии с этим в рамках этого периода времени полагалось, что между любой парой спутников всегда имелась возможность установления связи.

Агентно-ориентированный подход к разработке систем планирования группировки МКА рассматривается в работах [18, 19]. Однако в работе [18] рассматривается система наземного планирования. Поэтому далее более подробно приводится обзор только работы [19], в которой рассматривается система автономного распределенного планирования. В работе описываются результаты компьютерного моделирования информационного взаимодействия внутри кластера малых спутников в рамках динамической сети. В модели предметной области полагается, что на спутниках установлены камеры для съемки, а спутники, обеспечивающие связь с наземными станциями, имеют достаточно памяти для передачи данных в режиме «запомнил – передал». Основным ограничением является запас энергии. Потребление энергии на связь оказывает значительное влияние на производительность системы.

Задача наблюдения предполагает выполнение нескольких подзадач. Результат выполнения подзадачи (например, данные съемки) передается другому спутнику, где происходит следующий шаг выполнения задачи (например, другая съемка и/или объединение данных съемок).

Моделирование выполняется на основе многоагентного подхода. Каждому спутнику в системе соответствует свой агент. Подзадачи распределяются между спутниками на основе CNP (Contract Net Protocol)-протокола. Агент спутника, инициирующий протокол информационного взаимодействия, называется аукционером. Он анонсирует данные подзадач своим прямым соседям в сети, которые далее повторяют это сообщение своим соседям, и т.д. На этой фазе пересылка сообщений происходит по протоколу Gossip [20]. Все агенты, получившие запросы и имеющие необходимые ресурсы, рассчитывают оценку стоимости выполнения подзадачи и посылают ее аукционеру.

Оценка стоимости выполнения рассчитывается с помощью формулы, в которой в качестве параметров используются размер подзадачи, оставшийся объем энергии спутника, максимальный объем энергии, который он может потратить, и расстояние до агента аукционера, измеряемого количеством этапов передачи сообщения по сети. Оценки передаются аукционеру по маршруту получения данных подзадачи в обратном направлении. Если через агента спутника передается несколько оценок других спутников, то этот агент передает далее агенту аукционеру только одну наилучшую оценку стоимости. На основании полученных оценок аукционер выбирает агента спутника, предложившего минимальную оценку стоимости, и передает ему все необходимые данные для выполнения подзадачи. Таким образом, в соответствии с данными оценками подзадачи распределяются наиболее близким и наименее загруженным в текущий момент времени спутникам.

Динамическая сеть моделировалась с помощью расчета динамической матрицы смежности, элементы которой описывали возможность или невозможность радиосвязи между соответствующей парой спутников в зависимости от расстояний во времени. Расстояния между спутниками во времени рассчитывались с помощью Кеплеровской модели.

В статье приведены результаты эксперимента моделирования со следующими входными параметрами. Кластер состоит из 125 спутников и описывается эталонной орбитой. Орбита каждого спутника задавалась в виде случайных незначительных отклонений от эталонной орбиты. Связь между двумя спутниками полагалась возможной, если расстояние между ними не превышало 4 км. Таким образом, в эксперименте динамическая топология сети характеризуется следующим образом. В определенные моменты времени, при прохождении перигея орбиты, сеть является наиболее связанной. В промежуточные интервалы времени между ними связность сети становится ниже. Но при этом всегда существует возможность многоэтапной передачи сообщений между любыми двумя спутниками.

Основные результаты экспериментов и выводы состоят в следующем. Потребление энергии на информационное взаимодействие сопоставимо с потреблением энергии на выполнение задач наблюдения. Аукционы (распределение задач и подзадач) в большинстве случаев по времени успевают закончиться, прежде чем происходят изменения топологии сети. Время связи между двумя спутниками существенно больше, чем длительность аукциона. С точки зрения аукционера локальная сеть в течение аукциона является статической. Если изменение сети влечет срыв аукциона, аукционер может повторно начать аукцион с большей вероятностью его успешного выполнения. Стоимость (в единицах потребления энергии) проведения аукционов в условиях динамической сети меньше, чем стоимость отслеживания изменений сети и проведение аукционов в интервалах времени между ними, когда сеть остается неизменной.

**3. Имитационная модель.** В рамках данного проекта разрабатывается имитационная модель, в которой объекты сетевой модели, МКА и наземные станции описываются с помощью нескольких типов агентов и вычислительных модулей (рис. 1). При этом агенты решают следующие три задачи: имитируют поведение физических устройств, входящих в состав объекта, МКА или наземного пункта, обеспечивают управление работой вычислительных модулей и моделируют установление каналов связей и передачу сообщений и данных между узлами сети, между МКА и между МКА и наземными станциями.

Агент *Sat* сопоставляется МКА в целом и моделирует его текущее состояние. Полагается, что в процессе моделирования МКА может выходить из строя на определенный период времени. В зависимости от текущих состояний МКА моделируется установление, не установление или обрыв каналов связи, запланированных в плане контактов.

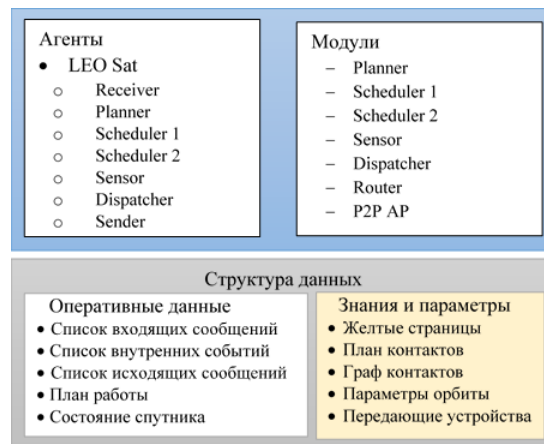


Рис. 1. Архитектура модели МКА

Агент *Receiver* разбирает заголовки входящих сообщений и пересылает их далее по назначению. В частности, если получены новые заявки с Земли, пересылает их модулю *Planner*. Если получены информационные запросы или ответы по планированию сеансов наблюдений или по планированию доставки данных на Землю, пересылает их соответственно модулю *Scheduler 1* или *Scheduler 2*. Если получено сообщение, которое надо транзитом пересылать другому узлу DTN-сети, пересылает его модулю *Dispatcher*.

Агент *Planner* и одноименный модуль преобразуют полученные заявки в сценарии и задачи наблюдения для планирования и передают их модулю *Scheduler 1*.

Модуль *Scheduler 1* с помощью одноименного агента и на основе информационного взаимодействия с одноименными модулями других МКА обеспечивает распределенное планирование сеансов наблюдения, а модуль *Scheduler 2* на основе информационного взаимодействия с одноименными модулями других МКА обеспечивает распределенное планирование доставки полученных данных на Землю. Более детальное описание модулей *Scheduler 1* и *2* и процессов планирования данных задач рассматривается в последующем подразделе.

Агент *Sensor* и одноименный модуль моделируют выполнение сеансов наблюдения и бортовой обработки полученных результатов наблюдения. В процессе моделирования полагается, что в зависимости от текущего состояния МКА запланированный сеанс наблюдения может оказаться не выполненным. В этом случае эта задача наблюдения планируется повторно и может быть передана другому МКА.

Агент и одноименный модуль *Dispatcher* обрабатывают и управляют очередью исходящих сообщений. Это могут быть сообщения, полученные от модулей *Receiver*, *Scheduler 1*, *Scheduler 2*, *Dispatcher*. Обработка сообщений включает расчет маршрутов передачи сообщений с помощью модуля *Router* и определение порядка передачи сообщений при наличии установленных контактов.

Агент *Sender* моделирует отправку сообщений другим МКА и наземным объектам. Время передачи сообщений определяется с учетом пропускных способностей каналов связи и объемов данных, передаваемых в сообщениях.

Модуль *Ballistics* обеспечивает сервис расчета интервалов времени, когда цель наблюдения находится в прямой видимости МКА.

Модуль *P2P Agent Platform* содержит необходимые знания данного МКА о других МКА для организации информационного взаимодействия с ними.

В нижней части рисунка перечислены основные типы оперативных данных, описывающих текущее состояние МКА, а также знания и параметры, которыми обладают агенты.

Имитационная модель включает вспомогательный программный модуль для редактирования исходных данных модели и проведения различных экспериментов. Основными исходными данными для построения модели являются:

- ◆ орбитальная группировка МКА: количественный состав и параметры орбит МКА,
- ◆ наземная инфраструктура: пункты управления и приема информации и их координаты,
- ◆ количество и параметры приемопередающих устройств на МКА и в наземных пунктах,
- ◆ план и граф контактов DTN-сети,
- ◆ данные для генерации заявок ДЗЗ.

Исходными данными для построения плана контактов являются окна времени, когда соответствующие пары сущностей МКА-МКА и МКА-наземный пункт находятся в зоне прямой видимости. Эти данные рассчитываются с помощью баллистической компоненты.

В соответствии с рис. 1 все множество программных компонент разбивается на два уровня:

- ◆ имитационная модель, моделирующая в частности DTN-сеть, установление или неустановление контактов, и передачу сообщений;
- ◆ набор вычислительных модулей, реализующих алгоритмы распределенного автономного планирования и соответствующие схемы и протоколы информационного взаимодействия.

При этом схемы и протоколы информационного взаимодействия МКА, а точнее модулей МКА, выполняются поверх уровня DTN-сети. Такой подход реализует слабую связь программных компонент двух уровней и обеспечивает принципиально важную возможность для дальнейших исследований. Имитационная модель может использоваться в качестве единой общей основы для моделирования и исследования различных схем и вариантов автономного планирования и информационного взаимодействия.

В последующем разделе приводится краткое описание задачи планирования выполнения заявок (сеансов наблюдения) и задачи планирования доставки полученных данных наблюдения на Землю и возможные подходы к решению этих задач.

**4. Процесс планирования.** Процесс планирования предполагает решение двух взаимосвязанных задач: планирование сеансов наблюдений и планирование доставки данных на Землю. Взаимосвязь задач состоит в том, что результат решения первой задачи и планируемое время сеанса наблюдения является элементом исходных данных для второй задачи.



Процесс планирования и взаимосвязь задач можно пояснить с помощью рис. 2. В момент времени  $t1$  МКА\* инициирует процесс планирования задачи наблюдения, который с учетом задержек обмена сообщениями заканчивается в момент времени  $t2$ . В этот момент времени какой-то МКА получает назначение на выполнение данной задачи наблюдения. При этом этот МКА уже знает запланированный срок выполнения сеанса наблюдения  $t3$  и заблаговременно, начиная с момента времени  $t2$ , инициирует процесс планирования доставки данных этого сеанса наблюдения на Землю. Результатом планирования являются моменты времени  $t4$  и  $t5$ , определяющие соответственно контакт и время отправки данных по запланированному маршруту в DTN-сети и время доставки данных на Землю.

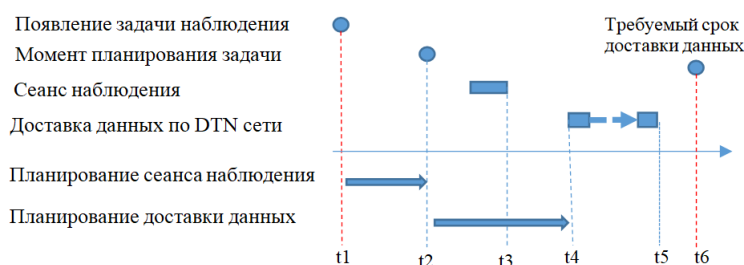


Рис. 2. Схема планирования задачи наблюдения и доставки данных на Землю

**4.1. Планирование сеансов наблюдения.** В основе распределения задач наблюдения между МКА-группировками в рамках данной статьи по аналогии с работами [18, 19] рассматривается подход, предполагающий выполнение последовательности итераций CNP-протокола (рис. 3). Одно из отличий предлагаемого подхода заключается в следующем. В работе [19] рассматривается «стандартное использование» CNP-протокола: последовательное распределение по одной задаче наблюдения на каждой отдельной итерации выполнения протокола. В этом случае длительность процесса планирования, которая определяется временными задержками обмена сообщениями в DTN-сети, может оказаться неприемлемой в принципе.



Рис. 3. Схема CNP-протокола

Поэтому с целью сокращения времени процесса планирования на каждой итерации рассматривается Multi CNP-протокол, предполагающий возможность распределение сразу нескольких задач наблюдения. Такой подход, с одной стороны, влечет усложнение логики локальных вычислений при обработке получаемых сообщений, но, с другой стороны, позволяет существенно сокращать количество итераций выполнения протокола, и как следствие – существенно сокращать время процесса планирования в целом.

Усложнение логики вычислений, в частности, возникает при получении агентом Sat множества задач планирования вместо одной (сообщение «Задача наблюдения») и расчета возможных предложений. Это усложнение заключается в следующем. В основе оценки возможности выполнения задачи наблюдения выполняется расчет наиболее раннего по времени сеанса наблюдения указанной цели. Последующие по времени сеансы наблюдения могут не рассматриваться, так как у низкоорбитальных МКА повторные возможности наблюдения одной и той же цели появляются через существенный период времени. Далее на основании рассчитанного времени проверяется возможность включения сеанса наблюдения в план работы МКА с точки зрения ранее запланированных сеансов наблюдения и удовлетворения существующих ограничений работы сенсора, заряда бортового аккумулятора и бортовой памяти. Если включение сеанса наблюдения в план оказывается возможным, то в случае CNP-протокола в ответном сообщении («Предложение») посылается предлагаемое время сеанса наблюдения, в противном случае – невозможность выполнения данной задачи наблюдения.

В случае же MCNP-протокола рассчитываются сеансы наблюдения сразу нескольких целей, и по аналогии с предшествующей логикой для дальнейшего формирования предложения в общем случае остается подмножество сеансов наблюдения, список LIST, которые можно включить в план. Однако включение в план всего подмножества выбранных сеансов наблюдения LIST может оказаться невозможным по той же самой причине нарушения имеющихся ограничений. В связи с этим на основе выбранного подмножества сеансов наблюдений формируется несколько альтернативных предложений, каждое из которых содержит сеансы наблюдения, подмножество списка LIST, которые можно включить в план с точки зрения соблюдения всех ограничений. Таким образом, в случае MCNP-протокола в ответном сообщении «Предложение» посылается список сформированных указанным образом альтернативных предложений.

После получения предложений от всех агентов Sat агент *Sat Leader* выбирает по определенной опционально настраиваемой политике наилучшие предлагаемые сеансы наблюдения и принимает решения о назначении исполнителей задач наблюдения. В основе сравнения и выбора предложений могут рассматриваться следующие параметры и критерии:

- ◆ приоритетность задач наблюдения: предпочтение отдается задачам с более высоким приоритетом;
- ◆ срок доставки данных на Землю: предпочтение отдается задачам с наиболее ранним сроком доставки;
- ◆ множество возможностей выполнения задач наблюдений: предпочтение отдается задачам наблюдения с наименьшим количеством предложенных сеансов наблюдений;
- ◆ условные предложения: предпочтение отдается предложениям, которые не предполагают перепланирования ранее запланированных задач наблюдения.

**4.2. Планирование доставки данных на Землю.** Постановку задачи планирования доставки данных на Землю можно пояснить с помощью рис. 4, который в данном случае является развитием, показанным на рис. 2.

Каждый МКА в момент времени  $t_1$  назначения ему очередной задачи наблюдения сразу же инициирует процесс планирования доставки данных по этой задаче на Землю. В этот момент времени он обладает следующими данными: запланированный момент времени  $t_2$  окончания сеанса наблюдения, прогнозируемый объем данных и требуемый срок  $t^*$  доставки данных на Землю.

На основании плана и графа контактов он может определить сеансы связи с Землей, которые обеспечивают своевременную доставку данных по задаче на Землю. В данном примере это сеансы связи спутников *Sat 1* и *Sat 2* соответственно в моменты времени  $t_3^*$  и  $t_4^*$ . При этом на основании графа контактов также рассчи-

тываются соответствующие запланированные контакты, когда должна быть начата передача данных в адрес соответствующего МКА. В данном примере это соответственно запланированные контакты, которые начинаются соответственно в моменты времени  $t_3$  и  $t_4$ .

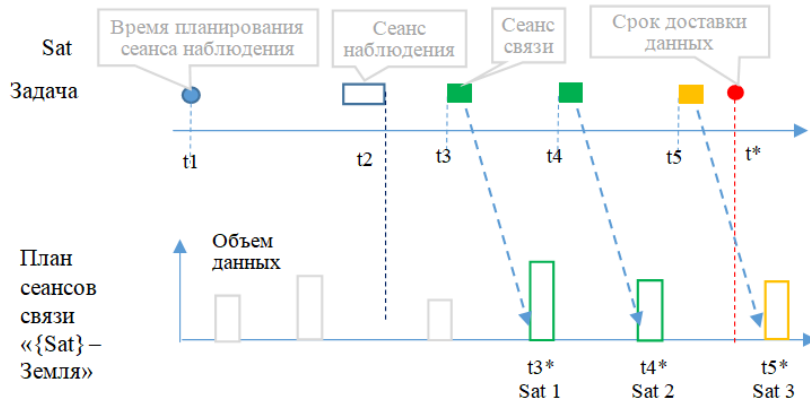


Рис. 4. Временная диаграмма планирования доставки данных на Землю

Каждый контакт и каждый сеанс связи с Землей в том числе обладает ограниченной пропускной способностью, и на него в общем случае может претендовать множества МКА для передачи своих данных. Следовательно, задача каждого МКА состоит в том, что он должен до определенного момента времени согласовать с соответствующим спутником решение о передаче данных через запланированный сеанс связи с Землей. В частности, если в приведенном примере это будет спутник *Sat 1*, то это момент времени  $t_3$ , если спутник *Sat 2* – то момент времени  $t_4$ .

Для решения данной задачи предлагаемая схема протокола взаимодействия представлена на рис. 5. В данном случае она рассматривается непосредственно для примера на рис. 4.

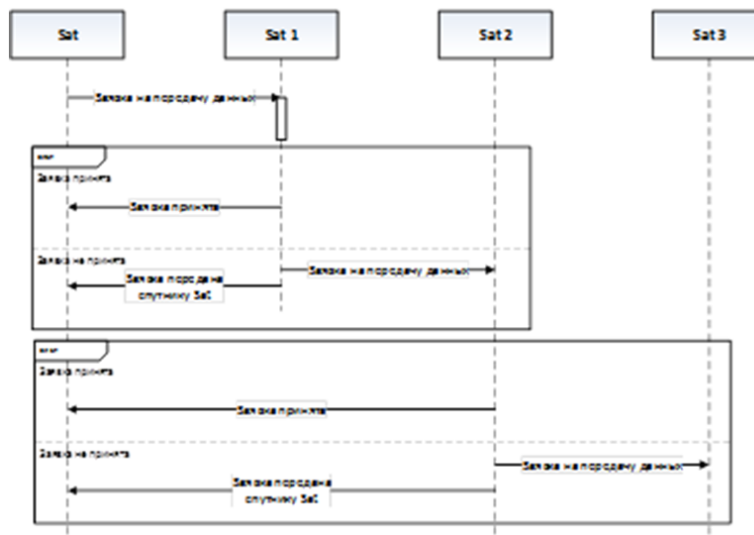


Рис. 5. Схема протокола планирования доставки данных на Землю

Поведение спутника, инициатора протокола, в соответствии с данным протоколом состоит в следующем. В момент времени  $t1$  он выбирает спутник с самым ранним запланированным сеансом связи, в данном примере это *Sat 1*. Посылает ему «Заявку на передачу данных», и далее до момента времени  $t3$  ожидает ответа от этого спутника. В качестве ответа может прийти одно из двух сообщений: заявка принята к выполнению, либо она передана спутнику со следующим запланированным сеансом связи с Землей. В последнем случае до момента времени  $t4$  он ожидает аналогичных вариантов ответа от спутника *Sat 2* и т.д.

Поведение спутника, у которого запланирован сеанс связи с Землей, заключается в следующем. При получении заявки на передачу данных от какого-то спутника *Sat* он на основе графа контактов определяет контакт, в рамках которого он должен отправить ответное сообщение данному спутнику *Sat*. Такой контакт определяется исходя из того, что спутник *Sat* должен получить ответное сообщение до указанного времени. В частности, в данном примере (рис. 4) спутник *Sat* должен получить ответное сообщение от спутника *Sat 1* до момента времени  $t3$ , от *Sat 2* – до момента времени  $t4$  и т.д.

Таким образом, в каждый текущий момент времени спутник с запланированным сеансом связи с Землей может иметь несколько поступивших заявок на передачу данных и соответственно несколько моментов времени принятия решений. При этом все множество заявок разбито на две группы: принятые и не принятые заявки. При наступлении очередного момента времени принятия решения принимается решение в отношении соответствующих заявок. Если совокупный объем данных по всем имеющимся заявкам не превышает пропускной способности сеанса связи, то данные заявки относятся к группе принятых заявок и посылаются соответствующие ответные сообщения о принятии заявок. В противном случае, если превышена пропускная способность сеанса связи, решается задача выбора. На основании ряда параметров и критериев все множество пока непринятых заявок упорядочивается по убыванию рейтинга, и выбирается подмножество наименее приоритетных заявок, которые в связи с ограничением пропускной способности не могут быть переданы в рамках сеанса связи. Эти заявки пересылаются спутнику с запланированным последующим сеансом связи с Землей. При этом спутникам, приславшим эти заявки, отправляются сообщения и дальнейшие пересылки их заявок. В ходе этого выбора принимается соответствующее решение в отношении той заявки, по которой наступил момент времени принятия решения.

**Заключение.** В данной работе приведено описание концептуальной модели упрощенной пилотной версии системы имитационного моделирования поведения группировок МКА. Основной целью пилотной версии и начального этапа исследования в целом является оценка временных задержек, возникающих при информационном взаимодействии в группировках МКА в условиях DTN-сети, и их влияние на эффективность автономного планирования. Получение таких оценок на данном этапе рассматривается основой для разработки обоснованных решений в отношении развития предлагаемого подхода в части автономного планирования и самоорганизации группировок МКА. Такие оценки необходимы для разработки обоснованных решений в отношении следующего списка задач.

*Распределение функциональных задач планирования и управления между орбитальной группировкой и наземными пунктами.* В пилотной версии рассматривается условие, в соответствии с которыми все задачи решаются орбитальной группировкой. При этом перенос решения некоторых задач в наземные пункты или выполнение каких-либо вычислений в наземных пунктах может являться условием более эффективного управления группировками МКА. В частности, расчет времен

видимости спутниками целей и районов, указываемых в заявках на наблюдения, может выполняться в наземных пунктах, а результаты этих вычислений передаваться группировке МКА вместе с заявками. При условии наличия такой информации в основе информационного взаимодействия группировки может рассматриваться схема, менее затратная по времени и трафику передаваемых сообщений по сравнению с CNP/MCNP-протоколом.

*Планирование сложных типов заявок на наблюдения.* В пилотной версии рассматривается только один тип простейших заявок – наблюдение точечных целей. В последующих версиях предполагается рассмотрение прочих более сложных типов заявок: наблюдение района, площадь которого покрывается несколькими полосами обзора целевой аппаратуры, «круглосуточный мониторинг» объекта и/или района наблюдения с заданным интервалом времени, и т.д. В перечисленных случаях усложнение заключается в том, что выполнение заявок может предполагать выполнение нескольких взаимосвязанных задач наблюдения.

*Сценарная база знаний.* Простейший тип заявок сводится к выполнению отдельных независимых сеансов наблюдения. Заявки более сложных типов могут предполагать выполнение нескольких сеансов наблюдений, взаимосвязанных как минимум временными отношениями. В этом случае планирование должно выполняться уже с учетом дополнительных требований и ограничений, задаваемых соответствующими сценариями выполнения заявок.

*Асинхронное параллельное планирование множества заявок.* В пилотной версии рассматривается случай одного процесса планирования заявок. В общем случае полагается, что поток заявок по мере их возникновения может передаваться разным МКА-группировкам и поэтому может одновременно и асинхронно происходить несколько схем взаимодействия по распределению и планированию выполнения различных наборов заявок, инициированных различными МКА.

*Адаптивное перепланирование задач наблюдения.* В пилотной версии перепланирование задач наблюдения не рассматривается: исполнитель задачи наблюдения и время ее выполнения определяются при первоначальном планировании и в последующем эти решения не пересматриваются. Однако в случае появления заявок с более высоким приоритетом по отношению к запланированным, перепланирование является необходимым.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://spacenews.com/smallsat-market-forecast-to-exceed-30-billion-in-coming-decade/>.
2. <http://www.unoosa.org/>.
3. Chien S., Johnston M., Frank J., Giuliano M., Kavelaars A., Lenzen C., and Policella N.A. generalized timeline representation, services, and interface for automating space mission operations // Proc. of the 12th Int. Conf. on Space Operations, SpaceOps. – 2012. – Vol. 2. – P. 1160-1176.
4. Herz E. EO and SAR Constellation Imagery Collection Planning // Proceedings of 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps, 2014, AIAA 2014 – 1728.
5. Iacopino C., Harrison S., 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., Pralet C., Jaubert J., Sebbag I., Fontanari F., and Hermitte J. 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., Woerle M., Gottfert T., Mrowka F., Wickler M. Onboard Planning and Scheduling Autonomy within in Fire Bird Mission // Proc. of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps, 2014, AIAA 2014 – 1759.

8. Herz E., George D., Esposito T., Center K. Onboard Autonomous Planning System // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps, 2014, AIAA 2014 – 1783.
9. Kennedy A., Marinan A., Cahoy K., Byrne J., Cordeiro T., Decker Z., Marlow W., Shea S., Blackwell W., DiLiberto M., Leslie R.V., Osaretin I., Thompson E., Dishop R. Automated Resource-Constrained Science Planning for the MiRaTA Mission // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2015, SSC15-6-37.
10. Карцаев О.В. Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий космических аппаратов // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 5 (48). – С. 151-182.
11. Wörle M.T., Lenzen C., Göttfert T., Spörl A., Grisechkin B., Mrowka F., Wickler M. The Incremental Planning System – GSOC’s Next Generation Mission Planning Framework // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014, AIAA 2014-1785.
12. Gottfert T., Lenzen C., Wörle M.T., Mrowka F., Wickler M. Robust Commanding // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014, AIAA 2014-1808.
13. Araniti G., Bezirgiannidis N., Birrane E., Bisio I., Burleigh S., Caini C., Feldmann M., Marchese M., Segui J., and Suzuki. Contact Graph Routing in DTN Space Networks: Overview, Enhancements and Performance // IEEE Communication Magazine, March 2015. – P. 38-46.
14. Fraire J.A., Madoery P., Burleigh S., Feldmann M., Finochietto J., Charif A., Zergainoh N., and Velazco I. R. Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations // Journal of Computer Networks and Communications, Volume 2017, Article ID 2830542. – P. 1-18.
15. Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K. The EDSN Intersatellite Communications Architecture // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014, SSC14-WS1.
16. Chartres J., Sanchez H., Hanson J. EDSN Development Lessons Learned // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014, SSC14-VI-7.
17. [https://en.wikipedia.org/wiki/Edison\\_Demonstration\\_of\\_Smallsat\\_Networks](https://en.wikipedia.org/wiki/Edison_Demonstration_of_Smallsat_Networks).
18. 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. – С. 16-26.
19. van der Horst J., Noble J. Task allocation in networks of satellites with Keplerian dynamics // Acta Futura 5, 2012. – P. 143-151.
20. [https://en.wikipedia.org/wiki/Gossip\\_protocol](https://en.wikipedia.org/wiki/Gossip_protocol).

#### REFERENCES

1. Available at: <http://spacenews.com/smallsat-market-forecast-to-exceed-30-billion-in-coming-decade/>.
2. Available at: <http://www.unoosa.org/>.
3. Chien S., Johnston M., Frank J., Giuliano M., Kavelaars A., Lenzen C., and Policella, N.A. A generalized timeline representation, services, and interface for automating space mission operations, *Proc. of the 12th Int. Conf. on Space Operations, SpaceOps*, 2012, Vol. 2, pp. 1160-1176.
4. Herz E. EO and SAR Constellation Imagery Collection Planning, *Proceedings of 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps*, 2014, AIAA 2014 – 1728.
5. Iacopino C., Harrison S., Brewer A. Mission Planning Systems for Commercial Small-Sat Earth Observation Constellations, *Proceedings of the 9th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IW PSS)*, 2015, pp. 45-52.
6. Maillard A., Pralet C., Jaubert J., Sebbag I., Fontanari F., and Hermitte J. 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., Woerle M., Gottfert T., Mrowka F., Wickler M. Onboard Planning and Scheduling Autonomy within in Fire Bird Mission, *Proc. of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps*, 2014, AIAA 2014 – 1759.
8. Herz E., George D., Esposito T., Center K. Onboard Autonomous Planning System, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps*, 2014, AIAA 2014 – 1783.
9. Kennedy A., Marinan A., Cahoy K., Byrne J., Cordeiro T., Decker Z., Marlow W., Shea S., Blackwell W., DiLiberto M., Leslie R.V., Osaretin I., Thompson E., Dishop R. Automated Resource-Constrained Science Planning for the MiRaTA Mission, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2015, SSC15-6-37.

10. *Karsaev O.V.* Obzor traditsionnykh i innovatsionnykh sistem planirovaniya missiy kosmicheskikh apparatov [A review of traditional and innovative planning systems of spacecraft missions], *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2016, No. 5 (48), pp. 151-182.
11. *Wörle M.T., Lenzen C., Göttfert T., Spörl A., Grishechkin B., Mrowka F., Wickler M.* The Incremental Planning System – GSOC’s Next Generation Mission Planning Framework, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014, AIAA 2014-1785.*
12. *Göttfert T., Lenzen C., Wörle M.T., Mrowka F., Wickler M.* Robust Commanding, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA, 2014, AIAA 2014-1808.*
13. *Araniti G., Bezirgiannidis N., Birrane E., Bisio I., Burleigh S., Caini C., Feldmann M., Marchese M., Segui J., and Suzuki.* Contact Graph Routing in DTN Space Networks: Overview, Enhancements and Performance, *IEEE Communication Magazine, March 2015*, pp. 38-46.
14. *Fraire J.A., Madoery P., Burleigh S., Feldmann M., Finochietto J., Charif A., Zergainoh N., and Velazcol R.* Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations, *Journal of Computer Networks and Communications, Volume 2017, Article ID 2830542*, pp. 1-18.
15. *Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K.* The EDSN Intersatellite Communications Architecture, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014, SSC14-WS1.*
16. *Chartres J., Sanchez H., Hanson J.* EDSN Development Lessons Learned, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014, SSC14-VI-7.*
17. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Edison\\_Demonstration\\_of\\_Smallsat\\_Networks](https://en.wikipedia.org/wiki/Edison_Demonstration_of_Smallsat_Networks).
18. *Sollogub A.V., Skobelev P.O., Simonova E.V., Tsarev A.V., Stepanov M.E., Zhilyaev A.A.* Intellektual'naya sistema raspredelenного upravleniya gruppovymi operatsiyami klastera malorazmernykh kosmicheskikh apparatov v zadachakh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Intelligent system of distributed management of group operations of the small sat cluster in the tasks of remote sensing of the Earth], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control System], 2013, No. 1, pp. 16-26.
19. *van der Horst J., Noble J.* Task allocation in networks of satellites with Keplerian dynamics, *Acta Futura 5*, 2012, pp. 143-151.
20. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gossip\\_protocol](https://en.wikipedia.org/wiki/Gossip_protocol).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Зеленцов.

**Карсаев Олег Владиславович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН); e-mail: [karsaev@ips-logistic.com](mailto:karsaev@ips-logistic.com); 199178, г. Санкт-Петербург, 14 линия 39; тел.: 88123233311; к.т.н.; старший научный сотрудник.

**Karsaev Oleg Vladislavovich** - The Federal State Institution of Science St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS); e-mail: [karsaev@ips-logistic.com](mailto:karsaev@ips-logistic.com); 199178, St. Peterburg, 14 Liniya 39; phone: +78123233311; cand. of eng. sc.; senior researcher.