

УДК 629.78.086

МЕТОД АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕАНСОВ СВЯЗИ ЦУП С ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО КРИТЕРИЯМ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ СВЯЗИ*

**Д.А. Калашиников¹, В.А. Соловьев¹, П.О. Скобелев⁵, Е.В. Симонова²,
И.В. Майоров³, О.И. Лахин⁴, Д.И. Тихонов⁵, В.Н. Ворожейкин⁵**

¹ ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва»

Россия, 141070, Московская область, Мытищинский район, г. Королёв, ул. Ленина, 4а

² Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

³ Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук

Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

⁴ Научно-производственная компания «Разумные решения»

Россия, 443013, г. Самара, Московское ш., 17 (ТОЦ «Вертикаль»), оф. 1201

⁵ Самарский государственный технический университет

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: esib@samgtu.ru

Предложен метод адаптивного планирования сеансов связи центра управления полетами (ЦУП) с группировкой космических аппаратов (КА) по критериям надежности и экономичности связи. Данный метод, в отличие от экспертного подхода, позволяет при использовании мультиагентных технологий строить гибкое самоорганизующееся расписание группировки КА по приему/передаче данных. Метод позволяет разрешать ситуационные конфликты и осуществлять поиск компромиссов между участниками с учетом гибко изменяемых весов критериев. Разработана математическая модель, позволяющая реализовать метод сопряженных взаимодействий для сети отдельных командно-измерительных комплексов (ОКИК), предложена общая схема построения расписания сеансов связи сети технических средств ОКИК с группировкой КА. Предложена архитектура и определены основ-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Дмитрий Алексеевич Калашиников, начальник отдела анализа работы и обеспечения эксплуатации бортовых радиотехнических систем и технических средств наземного комплекса управления космических аппаратов и средств выведения ОАО «РКК «Энергия».

Владимир Алексеевич Соловьев (д.т.н., проф.), член-корреспондент Российской академии наук, первый заместитель генерального конструктора.

Петр Олегович Скобелев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность».

Елена Витальевна Симонова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные системы и технологии».

Игорь Владимирович Майоров, ведущий специалист научно-исследовательского отдела научно-исследовательской группы лаборатории интеллектуальных технологий.

Олег Иванович Лахин, руководитель направления.

Денис Игоревич Тихонов, аспирант.

Владимир Николаевич Ворожейкин (к.т.н., доц.), заместитель заведующего кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность».

ные компоненты прототипа мультиагентной системы для реализации и экспериментального исследования разработанного метода.

Ключевые слова: космический аппарат (КА), отдельный командно-измерительный комплекс (ОКИК), оптимизация, надежность моделирования, экономичность, сеансы связи, группировка КА, ЦУП, мультиагентные технологии.

Планирование сеансов связи ЦУП с группировкой КА неразрывно связано с задачей управления группировкой КА. Решение задачи управления как одного КА, так и группировки КА нашли отражение в работах [1-8]. Однако эти работы носят общий характер и рассматривают отдельные моменты, связанные с управлением группировки КА. В работах [9, 10] освещены методы планирования сеансов связи наземного комплекса управления (НКУ) с группировкой КА исходя из ситуационного анализа задействования наземных ОКИК, применения экспертных методов бесконфликтного управления КА в условиях ресурсных ограничений.

В основе вышеуказанных методов лежит один и тот же подход, а именно:

- разработка в Главной оперативной группе управления (ГОГУ) КА детального плана полета (ДПП) каждым КА на сутки полета, включающего его сеансы связи с ОКИК, задания на работу спецаппаратуры, параметры работы двигателя для корректировки орбиты КА и др.;
- создание на основе разработанных ДПП планов задействования средств НКУ (ПЗС), включающих привлекаемые технические средства на ОКИК, режимы их работы, зоны радиовидимости, виды передаваемой информации и представляющие собой циклограммы работы с каждым КА;
- наложение полученных циклограмм выполнения рабочих программ каждым КА друг на друга и определение узких мест при планировании сеансов связи с группировкой КА;
- решение вопроса устранения узких мест, т. е. разрешения конфликтов, экспертным путем, с привлечением специалистов.

В результате такого подхода формируются расписания сеансов связи, закладываемые на борт каждого КА из группировки.

Однако нарушение выполнения детального плана полета хотя бы одного КА по различным причинам может потребовать коррекции программ полета всех КА из группировки, что повлечет за собой изменение планов задействования средств НКУ, приведет к потере оперативности и повышению стоимости выполнения задач, решаемых группировкой КА.

Для решения задачи построения расписаний сеансов связи и передачи данных и обеспечения контролируемой надежности и экономичности сеансов связи в постановке, изложенной в работе [11], предлагается мультиагентный подход, на основе которого строится модель сети агентов потребностей и возможностей (ПВ-сети) мира [12] передачи данных между группировкой КА и сетью наземных станций, расположенных на ОКИК, а также развивается метод сопряженных взаимодействий.

В данном методе расписание самоорганизуется агентами ПВ-сети в ходе их взаимодействий, агенты заключают «контракты» на обслуживание на виртуальном рынке примерно так же, как это делают диспетчеры в ходе переговоров. Аналогичным образом агенты оценивают ситуацию и договариваются о размещении заказов по ресурсам в расписании, делая взаимные уступки при возникновении конфликтов, а не следуют одному жесткому централизованному алгоритму, что делает расписание гибким для последующей перестройки при воз-

никновении непредвиденных событий.

Все агенты характеризуются своими функциями удовлетворенности, имеющими вид суммы по компонентам, каждая из которых описывает зависимость изменения уровня (степени) удовлетворенности агента при отклонении заданного критерия от предполагаемого идеального значения.

Кроме того, для каждого агента предлагается функция бонусов и штрафов, показывающая премию агента за относительное улучшение или достижение конечного идеального результата или, напротив, штраф за отклонение, выраженные в виртуальных деньгах, отражающих затраты на планирование (могут быть конвертированы в реальные деньги).

Различные версии метода сопряженных взаимодействий позволяют либо сразу строить «наилучшее» по противоречивым критериям расписание, либо начинать с «грубого» (но быстро получаемого) расписания, а потом «вытягивать» и улучшать его отдельные важные показатели.

Детализация и окончательный выбор рекомендуемых параметров возможного варианта метода будут выполнены по результатам моделирования и исследования качества и эффективности процессов решения различных рассматриваемых задач на реальных данных.

Мир агентов обеспечения надежности и экономичности сеансов связи ЦУП с группировкой КА

Агент задачи (агент потребностей) содержит описания задач (затопление КА, коррекция орбиты КА, информационная поддержка научных программ и т. д.) и требования на проведение передачи данных, включая требуемый или желаемый момент времени начала и длительность, объем передачи данных и т. д.

Агент задачи считывает описание технологического процесса выполнения задачи из базы знаний системы и создает агентов заказа на отдельные операции, а в дальнейшем координирует их взаимодействие.

В конечном счете агенты заказов на операции находят ОКИК с соответствующими техническими средствами, наиболее надежным и экономичным образом решающие поставленную задачу.

Агенты задач привносят с собой виртуальные деньги, которыми оплачиваются услуги ОКИК.

Агент задачи характеризуется оцениваемым объемом данных V_c , минимальной надежностью передачи данных R_c , предельным количеством сеансов N_c , предельным временем полного выполнения заказа d , стоимостью всего заказа C , приоритетом (срочностью) w .

Функция удовлетворенности в зависимости от отклонений перечисленных выше параметров от требуемых имеет вид

$$u_{task}(V, R, N, d) = w * (\alpha_1 f_v(v - V_c) + \alpha_2 f_r(r - R_c) + \alpha_3 f_n(n - N_c) + \alpha_4 f_t(t - d)),$$

где $f_v(v - V_c)$ – компонент функции удовлетворенности по объему данных;

$f_r(r - R_c)$ – компонент функции удовлетворенности по надежности передачи данных;

$f_n(n - N_c)$ – компонент функции удовлетворенности по количеству сеансов;

$f_i(t-d)$ – компонент функции удовлетворенности по времени выполнения заказа.

Весовые коэффициенты параметров α_i могут быть динамически изменены в процессе моделирования, они нормируются в сумме на 1:

$$\sum_i \alpha_i = 1.$$

Параметры V, N минимизируются.

Надежность передачи данных R максимизируется, но разные ОКИК дают разные значения.

Бонусно-штрафные функции имеют аналогичный вид, где могут уходить в отрицательную область (штрафы), а максимальное значение бонуса задается вручную или нормируется на максимальную стоимость услуги, в частном случае на первоначальную стоимость C всей решаемой задачи; чем ближе к идеалу – тем выше бонус, тем больше средств может быть использовано на удовлетворение уступок от других агентов.

Штраф-бонусные функции более отдельно не оговариваются, но далее будут вычисляться или аналогично функциям удовлетворенности, или по специальным законам, индивидуально задаваемым как потребностям, так и возможностям, или настраиваться вручную.

Значения бонусов и штрафов у каждого агента используются при подсчете выгоды и потерь, а также возможных компенсаций во взаиморасчетах агентов при поиске консенсуса.

Агент ОКИК (агент возможностей) соответствует имеющимся в системе типам наземных станций.

Характеризуется собственным расписанием работы, каждый интервал которого соответствует сеансу приема информации от одного агента КА.

Агент ОКИК имеет тип агента ресурса (агента возможности) и имеет ограничения:

- циклограмма взаимной видимости между группировкой КА и ОКИК;
- скорость передачи информации данного типа по выбранному каналу связи.

Агент стремится получить как можно больше прибыли p_m за продажу своих ресурсов и одновременно поддерживать достаточный уровень загруженности L_m , поэтому компоненты функции удовлетворенности имеют вид

$$u_{\text{ОКИК}} = \alpha_1 f_p(p - p_m) + \alpha_2 f_p(1 - L_m),$$

где $f_p(p - p_m)$ – компонент функции удовлетворенности по прибыли;

$f_p(1 - L_m)$ – компонент функции удовлетворенности по загруженности.

Наземные станции характеризуются наличием различной специальной аппаратуры (С1, С2, ... и др.) для сброса данных (голосовых, телеметрии и т. д.) на землю и другими параметрами.

Каждый блок аппаратуры будет иметь свое расписание передачи данных, представленное в виде списка интервалов времени, в котором размещены непересекающиеся периоды включения аппаратуры.

Услуги ОКИК по передаче данных имеют тарифы, учитывающие тип используемой аппаратуры.

Тарифы в общем случае зависят от типа аппаратуры i , от времени t (на разных витках может быть различная стоимость по тарифной сетке), от длительно-

сти сеанса T и постоянной стоимости включения аппаратуры C_{0i} :

$$C_i = CV_i(t) * T + C_{0i}(t),$$

где $CV_i(t)$ – стоимость единицы времени работы i -го типа аппаратуры. В простом случае CV_i и C_{0i} могут быть константами.

Стоимость по тарифу и реальная стоимость передачи данных могут различаться, поскольку тарифы назначаются по средней статистике, а на деле все зависит от ситуации. Например, передача минимального кванта информации, когда нет других заказов, никак не окупит работу ОКИК, что приводит к возможности для любого ресурса в подобной системе динамически устанавливать тарифы (т. е. с учетом нагрузки).

С другой стороны, в условиях жестких тарифов заказы могут работать по принципу «разделяемых расходов» (sharedcosts), когда заказы полностью берут на себя оплату за ресурс, т. е. делят между собой расходы. Это означает, что приход новой задачи на ресурс может уменьшать стоимость для ранее пришедших ресурсов, вызывая постоянные пересчеты в системе.

Эти возможности будут специальным образом исследованы в работе для выбора наиболее подходящей модели микроэкономики.

При отсутствии запланированных сеансов прибыль ОКИК от реализации тарифов равна нулю. Если же планирование происходило и агентам заказов хватало денег на оплату, то суммарная прибыль от продажи услуг будет определяться суммированием по всем типам аппаратуры i и всем запланированным задачам j :

$$P_{KA} = \sum_i \sum_j (CV_i(t) \cdot T_{ij} + C_{0i}(t)).$$

В первой версии системы предлагается в ходе планирования выполнять расчет себестоимости передачи по модели SharedCosts; например, если ОКИК рассмотрел только один сеанс передачи на задачу, вся стоимость ОКИК ложится на этот заказ, который, возможно, получится очень дорогим, по цене выше тарифа, т. е. убыточным для постановщика задачи.

Учет тарифов, выбор модели динамических или статических цен, а также методики расчета реальной себестоимости, учитывающей особенности ситуации, будет иметь большое значение для принятия решений.

Удовлетворенность агента КА может быть выражена через удовлетворенности агентов ресурсов передачи $u_{r,i}$:

$$U_{KA} = \sum_i u_{r,i}.$$

Агент ОКИК стремится максимально продать свои услуги и быть полностью использованным по всем типам размещенной на нем аппаратуры.

Агент заказа сеанса передачи (агент потребности). Как уже было отмечено выше, агент задачи на проведение передачи должен порождать агентов заказов на операции передачи данных, которые обеспечат передачу требуемых данных для поставленной задачи (голос, телеметрия и т. д.).

В простейшем случае требуется осуществить один сеанс передачи информации определенного типа, для чего может потребоваться привлечение одного или нескольких технических средств ОКИК, которые данный агент должен забронировать в соответствующий интервал работы. Агенты заказа сеанса передачи

стремятся найти лучшую, наиболее быструю и самую дешевую возможность провести сброс данных.

Функция удовлетворенности (и соответствующие штраф-бонусные функции) описывается через конкретные значения параметров передачи: предельное время выполнения d , предельный объем V_c , минимальная надежность передачи R_c :

$$u_c = (V, R, d, p) = \alpha_1 f_v(v - V_c) + \alpha_2 f_r(r - R_c) + \alpha_3 f_t(t - d) + \alpha_4 f_p(p - p_m),$$

где компоненты имеют тот же смысл, что и у агента задачи, но 4-й параметр явным образом описывает удовлетворенность через прибыль p (в смысле разницы стоимости заказа и оплаты ресурсов), $p_m = C/N$, C – стоимость всего заказа, N – число сеансов. Пример функции удовлетворенности прибылью приведен на рис. 1.

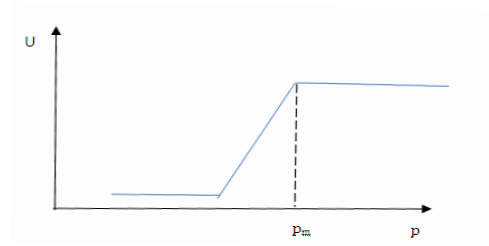


Рис. 1. Функция удовлетворенности прибылью

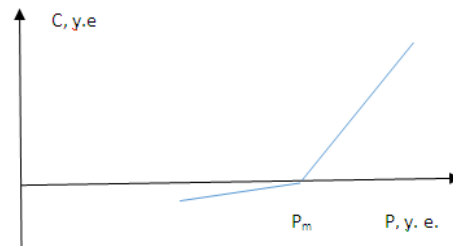


Рис. 2. Бонус-штрафная функция по прибыли

Соответствующая бонус-штрафная функция может иметь линейный вид, позволяющий агенту стремиться к максимизации прибыли (рис. 2).

Бонус начинает предоставляться с момента, когда прибыль становится больше некоторого заранее заданного порога p_m .

Агент ресурса аппаратуры ОКИК для передачи (агент возможности) должен выделить агенту потребности в передаче некоторый нужный ему интервал на требуемой аппаратуре.

Агент возможности передачи в начальный момент будет представлять весь доступный интервал для передачи на данной аппаратуре данного ОКИК, но далее будет постепенно выделять из него порции (кванты) времени по запросам на процесс.

Этого агента можно интерпретировать как агента аппаратуры, который следит за своим использованием, что в дальнейшем может потребовать динамического изменения цены на услуги ОКИК с учетом его востребованности на рынке космических услуг.

Агент ресурса передачи получает окна видимости от агента ОКИК.

Агент ресурса связи динамически оптимизирует надежность передачи и стоимость единицы затрат времени, увеличивая и уменьшая их значения в зависимости от уровня загрузки.

Параметр удовлетворенности уровнем загрузки имеет вид

$$u_{ress}(d, L_m) = \alpha_1 f_d(t - d) + \alpha_2 f_l(1 - L_m),$$

где L_m – уровень загрузки агента передачи, принятый за минимальный (например 0,5).

Вид функции удовлетворенности ресурса в зависимости от загрузки приведен на рис. 3.

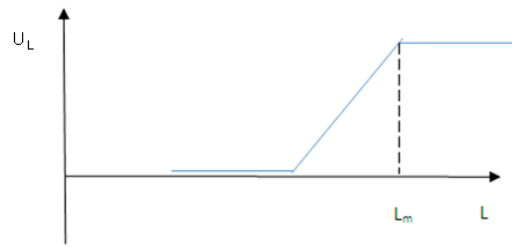


Рис. 3. Зависимость удовлетворенности ресурса от загрузки

Агент ресурса аппаратуры ОКИК для передачи стремится быть максимально использованным.

Штабной агент ищет «узкие места» в получаемом расписании работы системы агентов заказов на передачу, агентов ресурсов и агентов ОКИК и способствует их разрешению, обеспечивая обратную связь между всеми агентами системы и оценивая функцию удовлетворенности всей системы при разрешении конфликтов.

Развитие метода сопряженных взаимодействий для сети ОКИК

Гармонизация целей агентов ПВ-сети. Построение расписаний сеансов связи между группировкой КА и сетью ОКИК в рамках подхода, изложенного выше, предлагается выполнять путем самоорганизации агентов ПВ-сети, выявление и разрешение конфликтов между которыми обеспечит «гармонизацию» индивидуальных «эгоистических» целей отдельных агентов путем проведения переговоров между ними и взаимных уступок.

Такая гармонизация достигается за счет использования критерия удовлетворенности, показывающего отклонение текущего состояния от идеала по некоторым заданным для каждого агента критериям, причем как для отдельных агентов, так и для системы в целом.

Отметим, что удовлетворенность системы в целом может представляться суммой удовлетворенностей отдельных агентов системы или обеспечиваться с учетом специального агента системы, формирующего итоговую оценку удовлетворенности.

Таким образом, система работает в направлении максимизации удовлетворенности всего множества агентов, при этом общая удовлетворенность системы складывается как сумма удовлетворенности всех агентов ПВ-сети, т. е. суммирование производится по всем агентам возможностей (res) и потребностей (dem).

Задание целей отдельных агентов. Каждый агент потребности j имеет несколько индивидуальных критериев x_i и предполагаемых идеальных значений x_{ij}^{id} . У каждого агента потребности j подсчитывается нормированная функция удовлетворенности по компоненте i , задаваемая, например, в виде кусочно-линейной функции $f_{ij}^{dem}(x_i - x_{ij}^{id})$. В большинстве случаев эта функция имеет колоколообразную форму с максимумом в точке предполагаемого идеального значения. В качестве суммарной ценности результата для каждого агента потребности оценивается сумма удовлетворенностей по каждому критерию i с заданными ве-

совыми коэффициентами $\alpha_{ij}^{\text{task}}$.

Надлежащим выбором знаков и вида функций можно свести задачу каждого агента потребности к задаче увеличения (максимизации) удовлетворенности u_j^{dem} агента потребности j (верхний индекс task означает, что величины относятся к агентам заказов):

$$u_j^{\text{dem}} = \sum_i \alpha_{ij}^{\text{dem}} \cdot f_{ij}^{\text{dem}}(x_i - x_{ij}^{\text{id}}),$$

где α_{ij}^{dem} – весовые коэффициенты нормируются: $\sum_i \alpha_{ij}^{\text{task}} = 1$.

Аналогично может быть сформулирована задача нахождения таких состояний агентов x_{ij} заказов j , чтобы максимизировать суммарную удовлетворенность всех агентов потребностей:

$$u^{\text{dem}} = \sum_j \beta_j^{\text{dem}} u_j^{\text{dem}} = \sum_j \beta_j^{\text{dem}} f_{ij}^{\text{dem}}(x_i - x_{ij}^{\text{id}});$$

$$u^{\text{dem}*} = \max_{xi} (u^{\text{dem}}),$$

где β_j^{task} – вес заказа, позволяющий устанавливать и динамически менять приоритеты.

Симметричным образом своя целевая функция может быть задана и со стороны ресурсов-исполнителей по критериям z_k с бонус-штрафными функциями $f_{kl}^{\text{res}}(z_k - z_{kl}^{\text{id}})$, весом α_{kl}^{res} критерия k для ресурса l и значимостью ресурса β_l^{res} для системы (что аналогично весу потребностей для функций агентов потребностей):

$$u^{\text{res}} = \sum_l \beta_l^{\text{res}} \cdot u_l^{\text{res}} = \sum_l \beta_l^{\text{res}} \sum_k \alpha_{kl}^{\text{res}} \cdot f_{kl}^{\text{res}}(z_k - x_{kl}^{\text{id}});$$

$$u^{\text{res}*} = \max_{z_k} (u^{\text{res}});$$

$$z_k \in D^K, x_i \in D^I \forall i, k, I = \text{Dim}(D^I), K = \text{Dim}(D^K).$$

Переменные x и z принадлежат некоторым областям пространства критериев для потребностей и возможностей (ресурсов), I, K – размерности соответствующих пространств критериев. Верхний индекс res означает, что величины относятся к агентам ресурсов.

Тогда общая удовлетворенность системы имеет вид

$$u = u^{\text{dem}} + u^{\text{res}} + u^{\text{res}}.$$

Построение расписания в ПВ-сети. В разрабатываемом подходе агенты ПВ-сети формируют динамическое расписание в итерационном процессе переговоров, непрерывно улучшая свои показатели через увеличение значений функций удовлетворенности. В результате происходит увеличение и суммарной удовлетворенности системы, что в дальнейшем позволяет локально перестраивать существующее расписание в случае появления непредвиденных событий, таких как появление новой задачи, задержка в выполнении задачи, поломка ресурса или любые другие.

Предлагаемая общая схема построения расписания на основе модели ПВ-сети и метода сопряженных взаимодействий имеет следующий вид.

1. Фиксируется множество сопряженных (в общем случае неоднородных) элементов (агентов) системы, каждый из которых обладает определенными воз-

возможностями и потребностями в ресурсах.

2. Описываются индивидуальные цели и критерии принятия решения агентами системы, а также их предпочтения и ограничения.

3. Определяются правила принятия решений и протоколы (регламенты) сопряженных взаимодействий между агентами, позволяющие выявлять конфликты и находить компромиссы между элементами.

4. С помощью мультиагентной платформы адаптивного планирования создаются конструкции агентов и протоколы сопряженных взаимодействий.

5. Создается мультиагентная система адаптивного планирования, формирующая исходную ПВ-сеть с начальным распределением заказов и ресурсов.

6. Функционирование ПВ-сети осуществляется следующим образом:

6.1. При приходе новой задачи создается агент задачи, который получает требования к решению задачи (сроки начала/окончания и т. д.).

6.2. Агент задачи считывает из базы знаний (онтологии) технологический процесс выполнения задачи и создает агентов заказов на каждую операцию.

6.3. Агенты заказов на операции начинают по сцене искать наиболее подходящие им ОКИК с требуемыми ресурсами (составом технических средств).

6.4. Если найденный ресурс уже занят (забронирован), начинаются переговоры с целью разрешения конфликта, в ходе которых уже размещенная операция (если, например, может подождать) делает попытку сдвинуться по времени или переместиться на другой ресурс (аппаратуру).

6.5. В ходе такого перемещения выясняется виртуальная цена, которую новой задаче требуется оплатить уже размещенным операциям, чтобы они сдвинулись или переместились на другие ресурсы.

6.6. Если необходимые финансовые ресурсы имеются у агента задачи (операции), сделка совершается и все операции получают новое размещение (предлагаемые изменения единовременно применяются к сцене), если же нет – задача запоминает результат и ищет себе другое размещение.

7. Даже при успешном размещении новой задачи выполняется фаза проактивности, когда и потребности, и возможности делают попытки улучшить свои состояния.

8. Если состояние ресурсов или потребности в них изменяются с приходом новых событий, то ПВ-сеть перестраивается путем переговоров между агентами с целью разрешения конфликтов в той части, которая непосредственно связана с изменениями.

9. При этом на фоне текущего состояния делается попытка изменить распределение ресурсов, и решение принимается только в том случае, если возрастает глобальный показатель системы в целом, при этом общий показатель пересчитывается только в изменяемой части (без полной перестройки).

10. Решение задачи распределения ресурсов считается найденным, когда ни один агент ПВ-сети не может улучшить свое собственное состояние и глобальное состояние сети.

В развитие базового метода предлагаются следующие доработки:

1. Каждый агент системы имеет индивидуальный набор критериев, причем, возможно, разных (например, заказ стремится увеличить надежность и экономичность, а ресурс – быть максимально занятым).

2. Общее решение системы рассчитывается агентом системы на основе решений отдельных агентов, агент системы знает, какой из агентов лучше или хуже по каждому своему критерию (может исходить из наиболее худших для поиска

направлений улучшения).

3. У агентов задач имеются как идеальные, так и текущие значения показателей своих критериев, по которым рассчитывается степень «удовлетворенности» агентов текущим состоянием (планом).

4. Имеются динамические величины весовых коэффициентов скаляризации целевой функции виртуального денежного эквивалента.

5. Каждый показатель (критерий) имеет свой коэффициент пересчета в виртуальные деньги, обеспечивая бонусы и штрафы агентам ПВ-сети.

6. Текущий виртуальный бюджет может использоваться агентами для улучшения локального места в расписании (чем больше виртуальных денег, тем большее число других агентов может «подвинуть» данный агент).

7. Агент системы может инвестировать в худшие фрагменты расписания (кредитовать) для инициации его перестройки.

8. Агенту целесообразно использовать бюджет на улучшение того критерия, который в данный момент имеет наихудшее значение.

9. Агенты работ итерационно «подтягивают» свои критерии к локально-оптимальным значениям, компенсируя убытки других агентов за счет своего бюджета (прибыли).

Входные и выходные данные для работы метода. Входными данными разрабатываемой системы являются следующие:

- начальная конфигурация сети станций ОКИК;
- параметры орбиты КА, зоны радиовидимости и другие параметры КА;
- конфигурация аппаратуры сеансов передачи данных для каждого ОКИК;
- список задач с привязками к моментам времени;
- список требований к каждой задаче и др.

В ходе работы метода формируются следующие результаты, которые могут быть использованы для оценки качества и эффективности:

- расписание сеансов связи работы бортовой аппаратуры КА и технических средств ОКИК;
- значения ключевых показателей надежности, экономичности и др.;
- текущее состояние и график изменения удовлетворенности всех участников ПВ-сети;
- текущее состояние и график изменения финансовых ресурсов участников ПВ-сети;
- журнал переговоров и принятия решений агентов, позволяющий восстановить историю взаимодействий и принятия решений;
- журнал передачи сообщений и др.

Указанные данные представляются в табличном и графическом виде.

Полученные данные могут использоваться для моделирования процесса построения планов сеансов передачи данных между КА и сетью наземных ОКИК или в дальнейшем для управления сеансами связи в реальном времени.

При этом обеспечивается возможность ввода событий различных классов для адаптивной перестройки расписания:

- поступление новой задачи;
- изменение порядка операций для выполнения задачи;
- отзыв уже запланированной (и далее – исполняемой) задачи;
- возникновение нештатной ситуации на технических средствах на ОКИК;
- выход из строя ОКИК целиком (отключение питания и т. д.);

– изменение цены услуги ОКИК.

Кроме того, предусматриваются настройки моделей, методов и алгоритмов для управления процессом поиска решения (расписания).

Архитектура прототипа системы

Для реализации рассмотренной модели и метода предполагается разработка и исследование макета-прототипа системы. Упрощенная архитектура прототипа системы представлена на рис. 4.

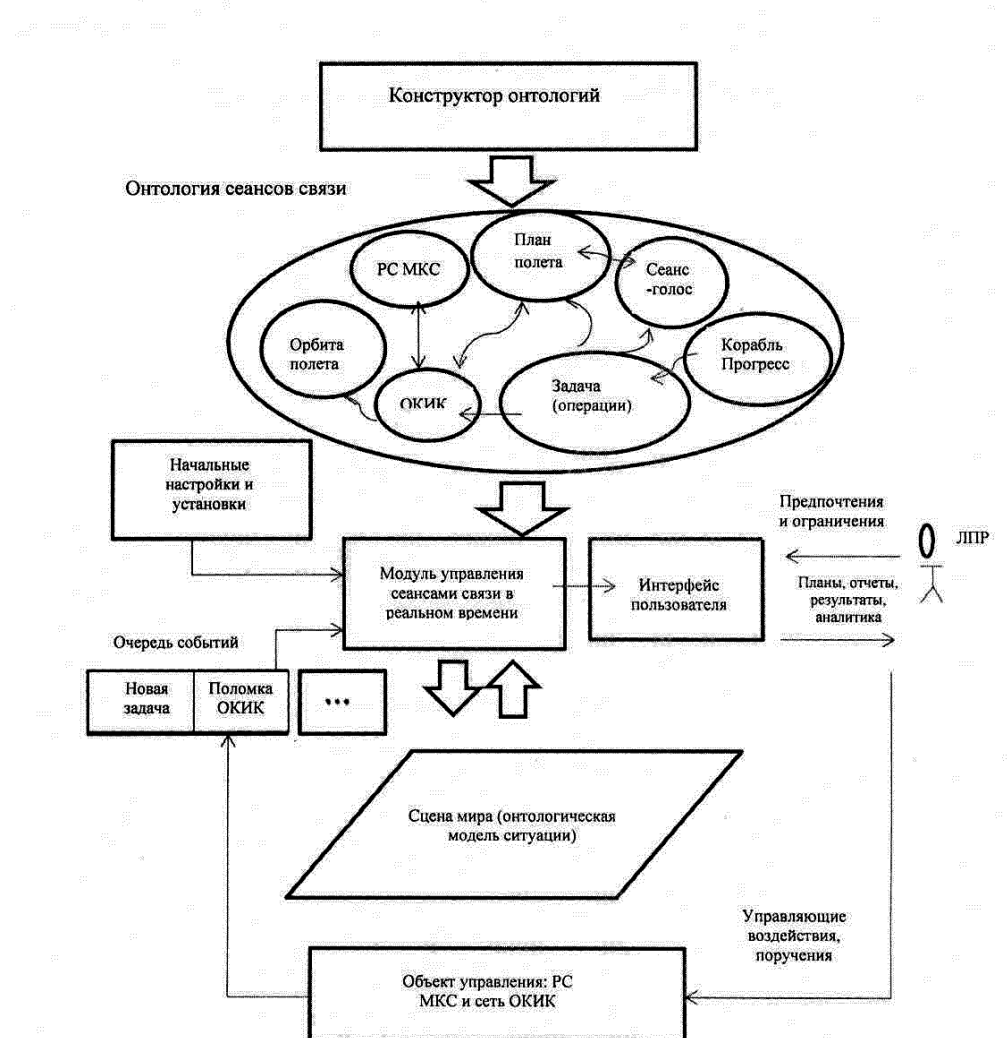


Рис. 4. Архитектура системы

В состав прототипа системы предполагается включить следующие модули:

- конструктор онтологий для создания онтологии сети сеансов связи;
- модуль управления сеансами в реальном времени;
- очередь событий, поступающих в систему;
- сцена мира для представления онтологической модели ситуации;
- модуль интерфейса пользователя.

Перечисленные модули могут использовать различные компоненты ранее разработанных мультиагентных систем [13-14], а также применять новые компо-

ненты, создаваемые совместно со СГАУ в проекте Минобрнауки РФ по реализации мультиагентной платформы адаптивного планирования.

Заключение

Таким образом, в данной работе предложен метод оптимального решения задачи планирования сеансов связи ЦУП с группировкой КА по критериям надежности и экономичности связи. Данный метод, в отличие от экспертного подхода, позволяет строить гибкое самоорганизующееся расписание группировки КА по приему передачи данных с использованием мультиагентных технологий. Метод позволяет разрешать ситуационные конфликты и осуществлять поиск компромиссов между участниками. Разработана математическая модель для реализации метода сопряженных взаимодействий для сети ОКИК. Предложена общая схема построения расписания сеансов связи сети ОКИК с группировкой КА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев В.А. Управление космическими полетами: Учеб. пособие. В 2 ч. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 476 с.
2. Бетанов В.В., Демидов А.С., Ступак Г.Г., Янчик А.Г. Теоретические основы построения автоматизированной системы организационно-технического управления космическими средствами. – М: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2002. – 154 с.
3. Макаров М.И., Медведев А.А. Наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М.: Наука и технологии в промышленности, № 1, 2012. – 9 с
4. Галантерник Ю.М., Горюхи А.В., Калинин А.Ф. Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами: Монография. – М.: МГУП, 2003.
5. Кащеев Н.А., Чаплинский В.С., Панферов В.В. Наземно-космические информационные сети управления низкоорбитальными космическими аппаратами и обмена сообщениями между различными абонентами: принципы создания и применения, методы оценки эффективности // Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия. Под общ. ред. К.С. Касаева. – М.: НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2006.
6. Молотов Е.П. Наземные радиотехнические системы управления аппаратами. – М: Физматлит, 2004. – 256 с.
7. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Сологуб А.В., Макаров В.П. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.
8. Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Иванов Н.М., Соловьев В.А. Математическое моделирование реализации технологического цикла баллистико-навигационного обеспечения при управлении космическим полетом // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. – 2000. – № 1. – С. 37-44.
9. Дудко А.Н., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Использование метода актуального анализа при планировании задействования технических средств наземного автоматизированного комплекса управления с целью обеспечения управления орбитальной группировкой космических аппаратов научного и социально-экономического назначения // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – № 4 (69). – С. 44-51.
10. Артюшенко В.М., Кучеров Б.А. Повышение оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 59-66.
11. Калашников Д.А., Соловьев В.А., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Майоров И.В., Грачев С.П., Тихонов Д.И., Ворожейкин В.Н. Особенности постановки задачи оптимизации показателей надежности и экономичности сеансов для передачи разнородных данных группировки КА и ЦУП через сеть наземных станций // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2014. – № 4(44). – С. 52-61.
12. Скобелев П.О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. – 2002. – № 6. – С. 45-61.
13. Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 12. – С. 33-46.
14. Скобелев П.О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: прин-

Статья поступила в редакцию 8 октября 2014 г.

METHOD FOR COMMUNICATION SESSIONS BETWEEN CONTROL TOWER AND SWARM OF SPACECRAFTS ADAPTIVE SCHEDULING BY COMMUNICATION RELIABILITY AND EFFICIENCY CRITERIA

**D. Kalashnikov¹, V. Solovyov¹, P. Skobelev⁵, E. Simonova², I. Mayorov³,
O. Lakhin⁴, D. Tichonov⁵, V. Vorosheykin⁵**

¹JSC “S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”
4A, Lenin Street, Korolev, Moscow Region, 141070, Russia

²Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University)
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia

³Institute for the Control of Complex Systems, Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya street, Samara, 443020, Russia

⁴Software Engineering Company “Smart Solutions” Ltd.
17, Moskovskoye shosse, office center “Vertikal”, office 1201, Samara, 443013, Russia

⁵Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia

Method for communication sessions between control tower and swarm of spacecrafts adaptive scheduling by communication reliability and efficiency criteria is considered in this paper. Unlike the expert approach, this method allows to build a flexible self-organized schedule of a swarm of transceiving spacecrafts based on the multi-agent technologies. This method allows to solve situational conflicts and search for compromise between the participants, considering flexibly changing criteria weights. A mathematical model that allows to implement the compensation method for separate command-measuring complex (SKMC) network is developed. Also, a general scheme of communication sessions schedule in the network of SKMC technical devices with swarm of spacecrafts is suggested. Multi-agent experimental system architecture is suggested and its basic components for the implementation and experimental research of the developed method are defined.

Keywords: spacecraft, separate command-measuring complex (SKMC), optimization, simulation reliability, efficiency, communication sessions, swarm of spacecrafts, control tower, multi-agent technologies.

Dmitry A. Kalashnikov, Head of “Operation Analysis and Support of the On-Board Radio Engineering Systems and Technical Means of Ground Control of Spacecraft and Launch Vehicles” Department at RSC “Energia”.

Vladimir A. Solovyov, First Deputy General Designer, Deputy Director of Prime Design Bureau in charge of flight operational use, testing rocket-space complexes and systems of RSC “Energia” named after S.P. Korolev”.

Petr O. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Elena V. Simonova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Igor V. Mayorov, Senior Specialist.

Oleg I Lakhin, Head of Department.

Denis I. Tichonov, Postgraduate Student.

Vladimir N. Vorosheykin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.