

УДК 629.78

МОДЕЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ КЛАСТЕРА МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Соллогуб,

доктор техн. наук, профессор
ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

П. О. Скобелев,

доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник
Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Е. В. Симонова,

канд. техн. наук, доцент

А. В. Царев,

генеральный директор

М. Е. Степанов,

разработчик

ООО «Научно-производственная компания «Разумные решения», г. Самара

Предлагаются модели бортовой базы знаний для агентов — малоразмерных космических аппаратов по делу «условия видимости», используемые при решении большого количества задач планирования и управления групповыми операциями, выполняемых кластером малоразмерных космических аппаратов без привлечения наземных служб. Данные модели можно рассматривать как элементы «встроенной самоорганизации» систем управления кластером.

Ключевые слова — распределенная космическая система дистанционного зондирования Земли, кластер малоразмерных космических аппаратов, мультиагентная система, бортовая база знаний.

Введение

Космические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предназначены для наблюдения за объектами и процессами, происходящими на поверхности Земли и в околоземном пространстве. С развитием технологии ДЗЗ наметился переход от одиночных крупногабаритных космических аппаратов (КА) ДЗЗ к группировкам (кластерам) распределенных в космическом пространстве малоразмерных КА (МКА) [1–5].

Возможно создание группировок МКА двух типов: систем КА с равномерным распределением их в различных орбитальных плоскостях и в пределах каждой плоскости (диктуется необходимостью улучшения показателей по оперативности и производительности наблюдения заданных районов), а также группировок, которые форми-

руются в некоторой локальной области космического пространства с поддержкой требуемых межспутниковых расстояний и требуемой относительной ориентации друг относительно друга [4]. В последнем случае кластер можно рассматривать как единое целое, т. е. как «виртуальный спутник», эмерджентные свойства которого определяются в результате коллективных групповых действий всех входящих в него КА. При создании «виртуальных спутников» применяются технологии беспроводного обмена данными, космические навигационные системы, прецизионные датчики определения ориентации КА с использованием бортовых каталогов звезд.

Анализ развития технологий ДЗЗ показывает, что дальнейшее улучшение пространственного разрешения не может быть обеспечено одиночными КА. Необходимо формировать системы с син-

тезированной апертурой, что может быть достигнуто путем создания «виртуальных спутниковых систем ДЗЗ». Отметим, что если улучшение показателей по объему и скорости передачи данных ДЗЗ, пространственному разрешению получаемых снимков изменялось в течение последних десятилетий по закону, близкому к закону Мура, то следует ожидать, что с созданием «виртуальных спутниковых систем ДЗЗ» и стоимостные показатели будут снижаться в соответствии с этим законом. В любом случае, дальнейшее развитие систем ДЗЗ связано, с одной стороны, с развитием сетевых технологий, а с другой — с повышением автономности выполнения задач планирования и управления групповыми операциями. Последнее возможно при наличии на борту МКА достаточно развитой базы знаний, т. е. «встроенного интеллекта».

Гетерогенные мультиагентные системы МКА

Распределенную космическую систему ДЗЗ можно рассматривать как гетерогенную мультиагентную систему, в которой агентами являются одиночные КА ДЗЗ, «виртуальные» КА ДЗЗ, спутники-ретрансляторы, служащие для обеспечения оперативной связи между агентами в случае отсутствия прямой видимости, наземные пункты приема видовой информации, объекты наблюдения (ОН), а также небесные ориентиры — Земля, Солнце, звезды. Агентами системы могут быть также другие глобальные распределенные спутниковые системы, в частности системы связи, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). Что касается МКА ДЗЗ, то в группировку могут входить МКА оптико-электронного зондирования (обеспечение панхроматической, многоспектральной, гиперспектральной съемки), радиолокационные МКА с синтезированной апертурой (РСА сантиметрового и дециметрового диапазонов, многопозиционные РСА УКВ-диапазона [6]), МКА радиотехнического зондирования. Объекты наблюдения могут быть точечными, протяженными (реки, ущелья), площадными (зоны затопления, разлива нефти, пожаров, области последствий землетрясений, цунами, населенные пункты, лесные и сельскохозяйственные угодья и др.). Вышесказанное свидетельствует о гетерогенном характере мультиагентной системы.

С использованием систем ДЗЗ могут решаться следующие задачи: планово-периодический мониторинг территорий и объектов, одновременная съемка одного и того же объекта разными КА под разными углами обзора (для построения трехмерных изображений), передача потребителю изо-

бражения в темпе его получения на борту КА, передача управления на продолжение наблюдения за объектом другому КА в случае ухода объекта из его зоны видимости и др.

Мультиагентная система представляет собой глобальную пространственно распределенную сеть, агенты (узлы) которой либо совершают вращение вокруг Земли (КА ДЗЗ, КА-ретрансляторы, созвездия навигационных КА), либо, находясь на поверхности Земли, вращаются вместе с ней (ОН, пункты приема информации (ППИ)), либо совершают свое движение в соответствии с законами небесной механики (Земля, Солнце, звезды). Таким образом, узлы и связи глобальной пространственно распределенной сети находятся в непрерывном движении и изменении. Это приводит к необходимости прогнозировать состояния сети, т. е. прогнозировать условия видимости агентами соответствующих ОН и других агентов на предстоящие интервалы планирования. В основе согласованного управления кластером лежит исключительно информационная парадигма, т. е. насколько агенты-МКА кластера осведомлены о состоянии сети, точнее, о своей роли в сети. Эта роль предполагает «знания» о тех ОН, которые могут наблюдаться конкретным МКА наиболее эффективно, «знания» о других МКА, которые также могут эффективно наблюдать рассматриваемый ОН и которым может быть передано управление.

Будем предполагать, что каждый агент-МКА может автономно определять свои линейные и угловые координаты в пространстве в любой момент времени (оснащен датчиками ГНСС и автономной системой ориентации), имеет в своем составе устройства двусторонней связи с агентами, что дает возможность проводить «диалог» с другими агентами. Важно подчеркнуть, что во избежание информационной перегрузки каждый агент-МКА должен в конкретный момент времени хранить и запрашивать информацию не обо всех агентах сети, а лишь о тех, которые могут выполнять с ним конкретную задачу.

Автономное определение и поддержание условий взаимной видимости агентов-МКА — основа бортовой базы знаний

Для согласованного управления орбитальной группировкой КА ДЗЗ, автономного динамического построения и принятия решений по планированию собственного поведения необходимо в бортовой базе знаний МКА иметь динамически изменяющийся раздел «условия видимости». Эти условия формируются для отношений типа «один МКА — множество ОН», «один ОН — множество МКА» или в общем случае «один агент —

множество агентов», «множество агентов — один агент», «множество агентов — множество агентов». В базе знаний необходимо иметь аппарат для формирования этих отношений, которые генерируются в зависимости от задач, решаемых в мультиагентной системе.

Кластер МКА может быть использован для решения множества задач, при этом каждый МКА кластера «должен знать», т. е. иметь в своей базе знаний, список и координаты других агентов, которые в данный момент находятся в его прямой видимости. Для планирования собственных операций и выработки управляющих воздействий для других МКА кластера в базе каждого КА эти условия видимости можно представить как множество циклограмм для соответствующих условий полета КА. Кроме этого, в базе знаний необходимо предусмотреть специальный аппарат для выполнения операций над циклограммами.

Рассмотрим задачу зондирования, в которой для наблюдения за конкретным ОН используются возможности группы МКА кластера. При этом каждый из агентов «должен уметь» решать следующие подзадачи.

1. Передача управления на зондирование ОН тому МКА из группировки, который обеспечит продолжение его зондирования с наилучшими характеристиками.

2. Передача управления нескольким МКА из группировки, которые могут одновременно вести зондирование ОН под разными углами обзора (стереоскопическая съемка в интересах получения 3D-изображения).

3. Передача управления на продолжение зондирования ОН тому МКА из группировки, который параллельно с зондированием может передавать получаемую информацию на ППИ.

4. Передача управления другому МКА с помощью одного из МКА-ретрансляторов, на прямой видимости которого находятся требуемый МКА или ППИ, при отсутствии у МКА прямой видимости с МКА-приемником или ППИ.

5. Разделение зондирования площадных ОН между несколькими МКА, которые наблюдают различные части ОН.

6. Одновременное зондирование различными МКА группы ОН, находящихся в различных регионах, но связанных между собой общими целями, т. е. выполняющих одну задачу.

7. Построение цепочки МКА, обеспечивающей либо непрерывное зондирование ОН в течение определенного временного интервала, либо максимально продолжительное покрытие интервала с точки зрения организации зондирования ОН.

Приведенный перечень задач относится как к неподвижным, так и к подвижным относительно Земли ОН.

Если кластер состоит только из МКА оптико-электронного наблюдения (МКА ОЭН), то задачи зондирования не могут решаться в ночное время и при наличии облачности. Для обеспечения всепогодного и ночного зондирования необходимо включить в состав кластера КА РСА и МКА РСА. В этом случае задача зондирования во времени разделяется между МКА ОЭН и МКА РСА, и спектр решаемых задач зондирования существенно расширяется.

Для моделирования, планирования и управления групповыми операциями кластера МКА в базе знаний каждого агента-МКА необходимо иметь аппарат для:

— построения циклограмм, позволяющих для любого момента времени периода планирования генерировать подсеть взаимной видимости участвующих в решении задачи наблюдения агентов (ОН, МКА, КА-ретрансляторов, ППИ и др.);

— выполнения операций над циклограммами для генерации более сложных условий видимости.

Модели определения условий видимости МКА — ОН

Рассмотрим некоторые из моделей для определения условий видимости между МКА и ОН.

Обращение к программе определения нахождения ОН в зоне обзора КА имеет вид

$$Zona_obz(ha, hp, \Omega, i, \omega, tp, t, B0, L0, \gamma, s),$$

где ha, hp — апогей и перигей орбиты; i — наклонение орбиты; Ω — долгота восходящего узла; ω — аргумент перигея; tp — время прохождения МКА через перигей; t — текущее время полета; $B0, L0$ — широта и долгота ОН; γ — максимально возможный угол отклонения МКА от вертикали (угол крена), определяющий зону обзора МКА; s — звездное время на Гринвичском меридиане (определяет угловое положение Гринвичского меридиана относительно точки весеннего равноденствия).

Результат работы программы — бинарная переменная, принимающая значения:

1 — ОН с координатами $(B0, L0)$ находится в зоне обзора МКА;

0 — ОН с координатами $(B0, L0)$ находится вне зоны обзора МКА.

В программе проверяется выполнение условия нахождения ОН в зоне обзора МКА [1]:

$$2\arccos(\lambda_0)|_{\Lambda_{KA_06}} < \rho,$$

где Λ_{KA_06} — кватернион положения ОН относительно положения МКА, определяемый из соотношения $\Lambda_{KA_06} = \tilde{\Lambda}_{ISK_KA} \circ \Lambda_{ISK_06}$, Λ_{ISK_06} —

кватернион перехода из инерциальной системы координат (*ISK*) к системе координат, связанной с ОН, $\tilde{\Lambda}_{ISK_KA}$ — кватернион, сопряженный кватерниону углового положения подвижной орбитальной системы координат относительно *ISK*, \circ — операция кватернионного умножения; ρ — центральный угол зоны обзора МКА из центра Земли.

Обращение к программе выполнения условий освещенности ОН имеет вид

$$Usl_osv_ob(dd, mm, jj, L0, B0, s, askr),$$

где *dd* — день; *mm* — месяц; *jj* — год; *askr* — минимально допустимое (критическое) значение угла между направлением на Солнце и плоскостью, касательной к земной поверхности в точке ОН.

Результат работы программы — бинарная переменная, принимающая значения:

1 — выполняются условия освещенности ОН Солнцем;

0 — не выполняются условия освещенности ОН Солнцем.

В теле программы *Usl_osv_ob()* осуществляется обращение к программе *N(dd, mm, jj)*, определяющей количество дней, прошедших с 21.03 до текущей даты полета. Эта величина используется при определении угла (α_C) между направлением на точку весеннего равноденствия и линией Земля — Солнце в эклиптической системе координат (ЭСК) для рассматриваемой даты полета.

Например, для 15 августа 2011 года имеем $N(15, 08, 11) = 147$. Отсюда $\alpha_C = 2\pi N/365$. Полученное значение α_C используется для определения кватерниона перехода от инерциальной к эклиптической системе координат с направлением орта i_1^3 на Солнце (i_2^3 — находится в плоскости эклиптики, i_3^3 — дополняет систему до правой):

$$\Lambda_{ISK_ЭСК} = \left(\cos \frac{\delta_C}{2} + i_1 \sin \frac{\delta_C}{2} \right) \circ \left(\cos \frac{\alpha_C}{2} + i_3 \sin \frac{\alpha_C}{2} \right),$$

где $\delta_C = 2\pi \left(23 + \frac{27}{60} \right) / 360$ — угол между эклиптикой и экватором.

В этом случае при известной дате полета и известных географических координатах ОН можно определить кватернион ($\Delta\Lambda_{Об_ЭСК}$) углового положения ЭСК и системы координат, связанной с объектом [1]. Из $\Lambda_{ISK_ЭСК} = \Lambda_{ISK_Об} \circ \Delta\Lambda_{Об_ЭСК}$ получаем $\Delta\Lambda_{Об_ЭСК} = \tilde{\Lambda}_{ISK_Об} \circ \Lambda_{ISK_ЭСК}$. Отсюда условие освещенности объекта примет вид

$$2\arccos(\lambda_0) \Big|_{\Delta\Lambda_{Об_ЭСК}} \leq \frac{\pi}{2} - \alpha_{кр}.$$

Программа *Usl_nab_ob()* определения условия наблюдаемости ОН использует результаты

обращения к программам *Zona_obz()* и *Usl_osv_ob()*. Условия наблюдаемости выполняются, если одновременно выполняются условия попадания ОН в зону обзора МКА и условие освещенности ОН Солнцем.

Обращение к программе определения условия нахождения МКА в зоне радиовидимости ППИ имеет вид

$$KA_zrv_ppi(h\alpha, h\pi, \Omega, i, \omega\pi, t\pi, t, \varphi\pi, \lambda\pi, \delta\min, s),$$

где $\varphi\pi, \lambda\pi$ — широта и долгота положения ППИ; $\delta\min$ — минимальный угол места линии визирования КА антенными устройствами ППИ [1].

Результат работы программы — бинарная переменная, принимающая значения:

1 — МКА находится в зоне радиовидимости ППИ;

0 — МКА находится вне зоны радиовидимости ППИ.

Условие взаимной видимости КА и ППИ имеет вид

$$2\arccos(\lambda_0^{ППИ}) \Big|_{\Lambda_{КА_ППИ}} < \beta_{max},$$

где $\Lambda_{КА_ППИ} = [\lambda_0^{ППИ}, \lambda_1^{ППИ}, \lambda_2^{ППИ}, \lambda_3^{ППИ}]$, $\Lambda_{КА_ППИ} = \tilde{\Lambda}_{ISK_КА} \circ \Lambda_{ISK_ППИ}$, так как $\Lambda_{ISK_ППИ} = \Lambda_{ISK_КА} \circ \Lambda_{КА_ППИ}$ и $\Lambda_{ISK_ППИ} = \Lambda_{ISK_GSK} \circ \Lambda_{\lambda_ППИ} \circ \Lambda_{\varphi_ППИ}$ (GSK — гринвичская вращающаяся система координат); $\beta_{max} = \arccos\left(\frac{Rz \cos \delta_{min}}{Rz + H}\right) - \delta_{min}$, *Rz* — радиус Земли, *H* — высота полета КА.

Обращение к программе определения возможности одновременной съемки ОН и передачи результатов съемки на ППИ:

$$Usl_nab_ob_и_ППИ(h\alpha, h\pi, \Omega, i, \omega\pi, t\pi, t, B0, L0, \gamma, s, dd, mm, jj, askr, \varphi\pi, \lambda\pi, \delta\min).$$

Результат работы программы — бинарная переменная, принимающая значения:

1 — возможна одновременная съемка ОН и передача результатов съемки на ППИ;

0 — одновременная съемка ОН и передача результатов съемки на ППИ не обеспечивается.

Модели взаимной видимости МКА кластера

Комплекс программ определения взаимной видимости МКА включает:

— программу определения взаимной видимости МКА в орбитальной группировке с размещением МКА в одной плоскости и с фазовым сдвигом по аргументу широты и одинаковыми орбитальными параметрами;

— программу определения взаимной видимости МКА в орбитальной группировке в случае, когда координаты МКА в *ISK* определяются вне программы и используются в качестве входного параметра;

— программу определения массива координат в *ISK* семейства из *N* МКА, находящихся в одной орбитальной плоскости, с равномерным фазированием по аргументу широты;

— программу определения массива координат в *ISK* семейства МКА, находящихся в *K* орбитальных плоскостях по *N* МКА в каждой плоскости, с равномерным фазированием по аргументу широты в каждой плоскости и равномерным фазированием по долготе восходящего узла;

— программу определения взаимной видимости МКА для случая, когда не накладываются ограничения на параметры орбит и на их взаимное расположение.

Примеры.

1. Определить возможность одновременной съемки ОН и передачи результатов съемки на ППИ при следующих параметрах МКА, орбиты МКА, даты полета и географических координатах ОН и ППИ:

$$h\alpha = 800, h\pi = 700, \Omega = 1,91, i = 65/180\pi, \omega\pi = 40/180\pi, t\pi = 665,492, t = 1074, B_0 = 0,8, L_0 = 1,05, \gamma = 45/180\pi, s = 27290, dd = 15, mm = 08, jj = 11, \alpha_{skr} = 10, \phi_{ppi} = 1,0, \lambda_{ppi} = 0,7, \delta_{min} = 10/180\pi.$$

Поскольку результат обращения к программе *Usl_nab_ob* и ППИ($h\alpha, h\pi, \Omega, i, \omega\pi, t\pi, t, B_0, L_0, \gamma, s, dd, mm, jj, \alpha_{skr}, \phi_{ppi}, \lambda_{ppi}, \delta_{min}$) = 1, такая возможность имеется.

2. Определить матрицу взаимной видимости группировки из 15 МКА, размещенных в 5 орбитальных плоскостях по 3 МКА в каждой с равномерным фазированием по аргументу широты и долготе восходящего узла. Имеем $K = 5, N = 3, \Omega_n = 1,91, un = 64,572/180\pi$.

Обращение к программе *Koord_KA_ISK_Usl_vid_ka2*() с помощью оператора $V2:=Koord_KA_ISK_Usl_vid_ka2(h\alpha, h\pi, \Omega_n, i, t\pi, \omega\pi, un, K, N)$ позволяет определить и присвоить переменной *V2* матрицу координат положения МКА:

V2 =

	0	1	2	3
0	$-5,155 \cdot 10^3$	$7,029 \cdot 10^3$	$-715,838$	$-875,822$
1	$-2,596 \cdot 10^3$	$-1,064 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	$-5,705 \cdot 10^3$
2	$1,228 \cdot 10^4$	$-6,619 \cdot 10^3$	$-6,972 \cdot 10^3$...

Матрица содержит 15 столбцов, соответствующих 15 МКА.

После обращения к программе *Usl_vid_ka2*() с помощью оператора $V3 := Usl_vid_ka2(\Delta H, N, K, V2)$, где $\Delta H = 100$, а переменная *V2* использует-

ся в качестве входного параметра, получим матрицу взаимной видимости МКА

V3 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
2	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
5	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1
7	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1
9	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1
10	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1
12	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
13	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
14	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0

Работа программы построения матрицы взаимной видимости проверена для различных сочетаний взаимного расположения групп МКА: по разные стороны от центра Земли, по одну сторону от центра Земли, на лучах, исходящих из центра Земли, и др.

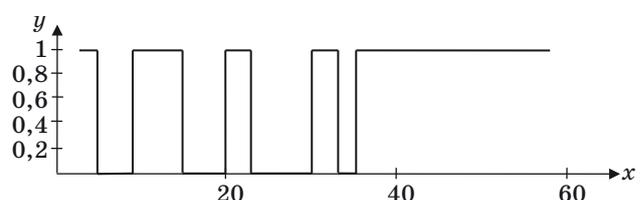
Формирование циклограмм наличия событий

Циклограммы, отражающие какое-либо свойство (событие) МКА в течение времени, задаются в виде массивов, содержащих два столбца и количество строк, равное числу событий. Элементы первого столбца определяют момент наступления события, элементы второго столбца определяют момент окончания события. Для определения наличия события в момент времени *x* используется программа *RT*(*T, n, x*), где *T* — имя массива; *n* — число на 1 меньшее числа событий; *x* — момент, в который нужно определить наличие события.

Пример.

$$Tr = \begin{bmatrix} 3 & 5 \\ 9 & 15 \\ 20 & 23 \\ 30 & 33 \\ 35 & 61 \end{bmatrix}, RT(Tr, 4, 4) = 1, RT(Tr, 4, 27) = 0.$$

Циклограмма может быть представлена в виде графика (рисунок).



■ Циклограмма для массива *Tr*

Разработаны программы для «сложения» и построения результирующих массивов и графиков для двух, трех и любого конечного числа исходных массивов.

Пример.

$$Tr = \begin{bmatrix} 3 & 5 \\ 9 & 15 \\ 20 & 23 \\ 30 & 33 \\ 35 & 61 \end{bmatrix}, Ts = \begin{bmatrix} 2 & 16 \\ 21 & 32 \\ 38 & 45 \end{bmatrix},$$

$$Tpp = \begin{bmatrix} 4 & 7 \\ 40 & 65 \end{bmatrix}.$$

Результат «сложения» трех массивов

$$Mat2(Tr, 4, Ts, 2, Tpp, 1) = \begin{bmatrix} 4 & 7 \\ 40 & 45 \end{bmatrix}.$$

Заключение

Приведенные модели являются неотъемлемой частью бортовой базы знаний агентов-МКА, что позволяет в реальном масштабе времени в автоматическом режиме строить и поддерживать глобальные сетевые структуры, распределенные в космическом пространстве, для эффективного планирования и управления орбитальными группировками МКА.

Литература

1. Скобелев П. О., Соллогуб А. В., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Решение задач дистанционного зондирования Земли с применением мультиагентных технологий // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. 2010. № 7 (28). С. 47–54.
2. Скобелев П. О., Соллогуб А. В., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Мультиагентные системы для исследования методов взаимодействия космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010): тр. Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи. — Самара: СГАУ, 2010. С. 226–230.
3. Скобелев П. О., Соллогуб А. В., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Мультиагентные технологии в задачах дистанционного зондирования Земли // Тр. XIII Междунар. конф. по проблемам управления и моделирования в сложных системах / СамНЦ РАН, ИПУСС РАН. — Самара, 2011. С. 426–434.
4. Сысоев В. К., Пичхадзе К. М., Арапов Е. А. Анализ возможных схем построения космических солнечных электростанций // Полет. 2010. № 6. С. 37–47.
5. Каляев И. А. Стратегии группового управления в распределенных системах // Управление в распределенных сетевых системах и мультиагентных системах (УРСИМС-2010): материалы науч.-техн. семинара; 3-я мультikonф. по проблемам управления / ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 2010. С. 8–9.
6. Горячкин О. В. Пути развития радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли // Вестник СГАУ. 2010. № 2 (22). С. 92–104.