

© Кукушкин С.С., Потюпкин А.Ю., Николаев Б.П.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВЫМИ ГРУППИРОВКАМИ

Одна из актуальных задач совершенствования космической отрасли России заключена в определении научно-обоснованных перспектив создания КА и в разработке новых технологий повышения эффективности их использования. Рассматриваются методологические основы проектирования КА, предполагающие выполнение условий гармоничности их развития с учетом передового зарубежного опыта. Показаны основные проблемы, требующие приложения наибольших усилий для их разрешения.

Из осмысленного опыта развития общетехнических наук следует, что без обобщения известных частных теоретических положений и разработки общетеоретических основ нельзя в полной мере воспользоваться достижениями современного научно-технического прогресса. Особую роль при этом приобретает методологическая подготовленность исследователя к решению поставленных научных проблем и его знание «законов природы», определяющих перспективу развития той или иной отрасли человеческой деятельности. Особенно это оказывается необходимым для такой сложной области знаний, как космическая.

«За чрезмерную унификацию всегда приходится расплачиваться потерей эффективности» – таков один из законов, определяющих перспективу космической деятельности человечества на ближайший период. Этот закон относится к числу «универсальных». Поэтому им необходимо руководствоваться и при определении перспектив развития любой космической техники, в том числе и космических аппаратов (КА).

В своем развитии КА прошли различные периоды своего совершенствования. Один из них заключался в ярко выраженной тенденции создания больших КА, проектирование которых осуществлялось в соответствии с концепцией «всё в одном». При этом никто не подумал о тех «граблях», на которые наступают. Потом, как показала практика, такой подход имел многочисленные недостатки. В частности, большие КА имеют чрезвычайно вы-

сокую стоимость и требуют так много времени для разработки, что к моменту запуска многие технологические решения успевают устареть. Единственно, что при этом утешает, так это то, что такие ошибки были совершены не только в СССР и РФ. Типичным примером космического «динозавра» является европейский спутник дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Envisat-1, массой 8,2 т (в том числе полезная нагрузка – 2,1 т), ставший наиболее дорогим (около 870 млн. долл.) и самым большим КА европейских стран. Вывод, который необходимо при этом можно было бы сделать, заключается в том, что стремление к унификации оказывается полезным только в определенных границах. По этой причине такую актуальность приобретает в настоящее время адаптивный подход к проектированию, созданию и применению КА. Поэтому вопрос о перспективах развития КА, тем более их группировки, требует, прежде всего, разработки системного методологического обоснования.

В качестве короткого исторического экскурса необходимо отметить, что игнорирование «законов природы» и отсутствие вследствие этого системных методологических подходов всегда приводило к торможению развития науки. Их отсутствие приводило к тому, что многие великие ученые допускали грубые системные методологические ошибки. Так, например, выдающийся математик XX века Д.Гильберт пытался создать «универсальную математику». Это продолжалось в течение многих лет, пока немецкий ученый К.Гедель не доказал знаменитую «Теорему о неполноте», показавшую, что подобные попытки заранее были обречены на провал. Нечто подобное произошло и с А. Эйнштейном, когда он задумал создать «теорию всего». Первое противоречие на этом пути было связано с «квантовой механикой», и А. Эйнштейн стал ее основным противником. При этом он своим большим

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ Минобороны России; Потюпкин Александр Юрьевич – доктор технических наук, доцент, начальник кафедры ВА РВСН имени Петра Великого; Николаев Борис Павлович – адъюнкт ВА РВСН имени Петра Великого.

авторитетом подавлял все, что не укладывалось «в прокрустово ложе» «теории всего». Мы же сегодня своими успехами в микроэлектронике должны благодарить тех, кто сумел выстоять в этой неравной борьбе.

Современный уровень развития космического спутникостроения характерен наличием целого ряда перспективных направлений, одним из которых являются малогабаритные космические аппараты (МГКА). Для сравнения – британская компания Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL), являющаяся одним из лидеров в области малых КА, выполняет заказы на разработку спутников ДЗЗ в течение 1,5–2 лет стоимостью 3–14 млн. долл. Популярности малых КА способствовали и глобальные изменения в мировой космонавтике. Наступающий век характеризуется вступлением в космический клуб все новых стран Азии и Латинской Америки (Корея, Сингапур, Малайзия, Таиланд, Аргентина, Чили и др.). Необходимость разработки собственных КА эти страны рассматривают, исходя, прежде всего, из прагматических интересов, а не из соображений престижа. Наступает эра прагматичного космоса, предполагающего создание таких средств и новых технологий их использования, которые должны приносить значительный экономический эффект в сжатые сроки.

Крупнейшими производителями малогабаритных КА на сегодняшний день являются компании США, Великобритании, Франции, Германии и Израиля. Эти страны активно осваивают зарубежные рынки Азии и Латинской Америки, предлагая клиентам системы «под ключ» или совместную разработку. Количество малых, мини- и микроспутников, запущенных в интересах ДЗЗ, достигло нескольких десятков, и спрос на них постоянно растет. К сожалению, отечественная космическая индустрия в области разработки и применения МГКА значительно отстает. Это отставание связано, прежде всего, с резким сокращением финансирования космической отрасли и отсутствием полноценной государственной программы в этой области.

За рубежом сложилась устойчивая классификация КА по их весовым характеристикам: пико- (до 1 кг), нано- (1–10 кг), микро- (10–100 кг), мини- (100–500 кг), малые (500–1000 кг) и большие (более 1000 кг) аппараты. За каждой из приведенных групп спутников в области ДЗЗ закрепились вполне конкретные задачи. Например, малые КА – вполне адекватная замена большим аппаратам по решению задач детальной картографической съемки Земли с метровым разрешением и с высокими метрическими свойствами. Полезная нагрузка может также включать два-три дополнительных комплекта аппаратуры для

решения различных задач (научные исследования, связь, океанографическая съемка). Мини- и микроспутники могут вести съемку Земли с разрешением 6–10 м в детальном режиме (точность привязки координат от 100 м до 2 км), а также в широкой полосе с разрешением от сотен метров до 2 км. Такие спутники могут решать задачи обнаружения пожаров, вести съемку зон стихийных бедствий, проводить экологический мониторинг и метеонаблюдения. Нано- и пикоспутники предназначены для отработки новых технологий и проведения экспериментов в космосе. В частности, пикоспутники с миниатюрными камерами использовались в качестве спутников-инспекторов для съемки внешних конструктивных элементов пилотируемых станций и кораблей.

Однако при этом не следует забывать об ускоренном развитии новых космических технологий, позволяющих объединить малые КА в единую информационно-измерительную систему. Определяющее значение при этом приобретают новые измерительные, вычислительные и связные технологии. При этом в разрабатываемых перспективных направлениях создания новых космических средств и технологий менее всего проработаны вопросы создания высокоинформативных радиоканалов связи, обеспечивающих, в том числе, устойчивую связь между собой КА. Значительное отставание РФ в области новых технологий повышения энергетики бортовых систем передачи информации приводит к многим нереальным проектам, содержащим грубые ошибки с позиций системного методологического подхода. К ним, в частности, относятся предложения типа: «сильная Земля – слабый борт». Его суть заключается в том, что недостаток бортовой энергетики передачи данных должен быть восполнен за счет «Земли». При этом должен быть создан новый «динозавр с сильными задними ногами, но слабыми передними». Природа таких созданий не любит, поскольку в них нет даже малейших признаков гармоничности развития. Поэтому особо актуальными в сложившихся условиях становятся вопросы повышения энергетики передачи информации на основе новых технологий нетрадиционного представления сообщений образами-остатками, сжатия данных, их помехоустойчивого кодирования и защиты от несанкционированного доступа (НСД).

Тезис критиков о том, что по техническим характеристикам МГКА не могут конкурировать с большими, был разбит ещё в 1999 году американским КА Ikonos-2 массой 720 кг (по приведенной классификации – малый КА). Бортовая аппаратура спутника позволяет получать изображения поверхности Земли с разрешением около

1 м и точностью привязки координат $2-3/10^{-12}$ м (с использованием опорных точек и без них) - то, что обычно делали КА массой 6–8 т. Высокие «производственные» показатели при малых габаритах стали возможны благодаря использованию новых технологий. Основные среди них – твердотельные радиоэлектронные приборы и микросхемы, лазерные гиросистемы, приемники сигналов космической радионавигационной системы (КРНС) GPS, ПЗС – приборы и облегченная оптика, более эффективные солнечные панели с концентраторами, фотопреобразователи и электробатареи, малогабаритные и легкие твердотельные запоминающие устройства (ЗУ), бортовые процессоры и, наконец, новейшие микроэлектромеханические системы.

Вместе с тем проведенный анализ показал, что уровень реализации новых возможностей, предоставляемых МГКА, является неудовлетворительным. Прежде всего, это связано с недостаточным исследованием качественно новых свойств группировок МГКА, позволяющих формировать для потребителя информационные поля с высокими показателями глобальности, непрерывности и оперативности. Следующей причиной является отсутствие разработок по способам реализации нового качества группировки, например, методических рекомендаций по управлению многоспутниковыми группировками МГКА, обеспечивающих реализацию указанных свойств. В настоящей статье предложен ряд подходов, позволяющих решать задачи выбора структуры кластера при выполнении целевой задачи, построения алгоритма его функционирования и организации технологического цикла управления, что позволит реализовать новые свойства группировок МГКА.

Общие замечания. Малогабаритные КА открывают широкие возможности по синтезу космических систем, обладающих новыми качественными возможностями и позволяющими на практике реализовать ряд следующих прикладных эффектов [1, 2, 3, 4, 6]:

1. Многопозиционность, многодиапазонность и одновременность наблюдения объекта с нескольких МГКА, обеспечение эффекта стереосъемки.

2. Возможность комплексирования информации, получаемой от разнородных бортовых комплексов специальной аппаратуры МГКА, приводящая к повышению информативности наблюдения и обеспечению требуемой достоверности распознавания объектов.

3. Обеспечение непрерывности наблюдения за счет возможности «передачи эстафеты» наблюдения последовательно входящим в зону видимости цели другим МГКА орбитальной группировки.

Исследования, проведенные в ряде работ [6, 7], показали, что для реализации указанных эффектов МГКА должны функционировать в составе целевых подсистем орбитальной группировки, получивших в специальной литературе наименование кластеров МГКА. Под кластером в данном случае понимается совокупность КА различного целевого назначения, совместно выполняющих общую задачу и воспринимаемых потребителем как единое целое. Отличительными особенностями кластера являются реализация системного эффекта эмерджентности, приводящего к повышению эффективности группировки, и восприятие потребителем кластера как единого многофункционального «виртуального» аппарата. Интересно, что такой подход позволяет использовать существующие технологии управления КА для управления целыми кластерами, что особенно актуально ввиду ограниченной пропускной способности наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) [10]. Анализ показывает, что одной из главных проблем создания полномасштабных космических систем на базе МГКА является разработка систем управления. Ввиду усложнения перспективных космических систем задачи управления ими должны быть ориентированы главным образом на достижение общесистемного эффекта путем управления ресурсами системы в целом, а не отдельных КА. Отсутствие мощных информационных технологий по управлению многочисленной группировкой (при существующей технологии управления НАКУ в перспективе сможет обслуживать одновременно не более 140–150 КА различного назначения [10]) и по обработке сверхбольших объемов распределенной информации сведет на нет эффективность применения новейших технологий при построении новых МГКА. Вследствие этого целесообразно создавать распределенные системы управления с делегированием части полномочий отдельным элементам системы. При этом структура системы управления может быть как традиционной – иерархической, так и сетевой в зависимости от управляемого объекта и решаемых задач.

На рис.1 приведен пример возможного облика кластера разнородных МГКА, функционирующих как один многофункциональный пространственно распределенный КА, обладающий специальной аппаратурой различного назначения.

Рассмотрим структуру и особенности функционирования кластера МГКА. Предполагается, что в состав кластера входят следующие элементы:

1. МГКА – «датчики», оснащенные специальной аппаратурой для выполнения задач ДЗЗ в интересах потребителя.

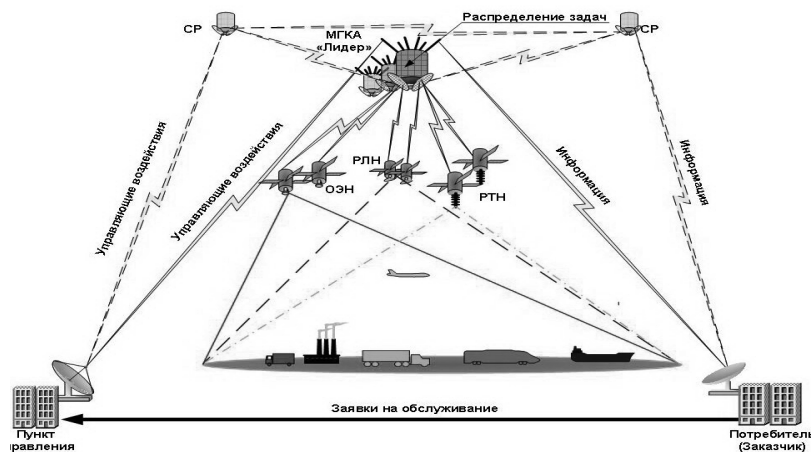


Рис.1. Облик кластерного построения разнородных МГКА

2. Управляющий МГКА – «лидер», обеспечивающий взаимодействие с наземным контуром управления и потребителем и осуществляющий распределение задач между МГКА – «датчиками», организацию их выполнения, контроль функционирования и технического состояния кластера в целом.

3. Обеспечивающие МГКА, например, КА связи, выполняющие функции обеспечения в зависимости от целевого предназначения кластера.

При этом все элементы кластера связаны между собой межспутниковыми линиями связи и находятся в отношении подчинения «лидеру» кластера. В этом случае особенностью структуры кластера является введение дополнительного управляющего элемента – МГКА-«лидера», которому делегируется часть полномочий наземного пункта управления. Реализация части технологического цикла управления (ТЦУ) таким объектом, как кластер МГКА, будет возложена на МГКА-«лидер».

Предполагается, что функционирование кластера будет происходить следующим образом. Потребитель через наземный контур управления формулирует задачу мониторинга интересующего объекта для «лидера» кластера. При этом используется координатно-временной, а в перспективе и ситуационный метод управления. При формулировке задачи используется правило «не вижу, так слышу, не слышу, так чувствую», то есть принцип извлечения максимального количества информации об объекте всеми видами специальной аппаратуры кластера. МГКА-«лидер», в свою очередь, проводит анализ исходных данных задачи, оценку условий её выполнения и анализ ресурсных возможностей кластера. Важно отметить, что при анализе исходных данных задачи лидер первоначально оценивает возможность реализации прикладных эффектов, после чего распределяет задачу по её составляющим для МГКА-«датчиков» с указанием конкретных исходных данных для каждого из них: целеуказаний, времени включения специальной аппаратуры, ре-

жимов работы и т.д. Например, в ночных условиях или на океанской поверхности нецелесообразно использовать традиционную оптику, работающую в видимом диапазоне. Здесь предпочтение отдаётся радиолокационным датчикам или ИК-диапазону. Информация ДЗЗ после выполнения задачи поступает на МГКА-«лидер», где происходит её предварительная обработка и формируется групповой носитель для передачи потребителю. Такой подход позволит сформировать надёжную систему из необходимого количества МГКА с возможностью изменения конфигурации кластера в зависимости от поставленных задач и учетом метеорологической обстановки над районом наблюдения.

Постановка задачи. Отметим, что кластер представляет собой новый объект, свойства которого не сводятся к простой сумме свойств составляющих его МГКА. Это требует исследования эффективности многоспутниковых орбитальных группировок разнородного состава и проведения испытаний не только отдельных МКА, но и вариантов кластерных построений. В свою очередь, варианты кластерных построений будут определять содержание ТЦУ, позволяющего в полной мере реализовать новые прикладные эффекты.

Предположим, что имеется некоторая система (кластер МГКА) ДЗЗ, состоящая из конечного числа разнотипных МГКА (рис.1), характеризующаяся некоторой базовой структурой со следующими параметрами: типы элементов, их количество, связи между ними, производительность элементов. Каждый тип элементов этой системы обладает определенными характеристиками: информационной способностью классифицировать объекты наблюдения, запасом ресурса, который расходует МГКА в процессе мониторинга, и определённым набором алгоритмов функционирования при выполнении целевой задачи, зависящим от воздействия внешних факторов окружающей среды функционирования системы. На некотором этапе функционирования на вход системы по-

стует запрос на проведение мониторинга заданного района земной поверхности с целью получения максимального количества информации о наблюдаемом районе. Для выполнения этой команды системе требуется распределить задачи между элементами системы и организовать их выполнение с учетом их возможностей по её решению, наличием исходного ресурса и способностью обеспечить устойчивое решение в условиях воздействия внешней среды. Для кластера МГКА ДЗЗ подобная задача рассматривается как задача выбора рабочей структуры для реализации прикладного эффекта, определение алгоритма функционирования кластера и обеспечение устойчивости его функционирования при выполнении целевой задачи, то есть разработки его ТЦУ.

Математическая постановка задачи в общем виде может быть представлена соответствующим образом:

Дано:

1. Множество прикладных эффектов $\Theta = \{C, K, H, O\}$, где C – стереосъёмка; K – комплексность; H – непрерывность наблюдения; O – одиночное наблюдение каким-либо МГКА, обладающих различной информационной производительностью I_F .

2. $F_{\Theta} = \{S(T, K, H, I) \subset \Sigma; A; t\}$ – система МГКА, где Σ – базовая структура системы; $S(T, K, H)$ – рабочая структура системы для реализации выбранного прикладного эффекта Θ ; T – типы элементов кластера; K – количество элементов, входящих в систему при выполнении целевой задачи; H – связи между элементами системы; I – информационная производительность элемента; $\{A\}$ – множество алгоритмов функционирования кластера в процессе выполнения целевой задачи; t – текущее время.

3. $\{R\}$ – множество ресурсных ограничений кластера МГКА, $r \leq r_{кр}$, $r \in \{R\}$. Здесь $r_{кр}$ – критический уровень запаса ресурса, при достижении которого система не выполняет своего предназначения.

4. $\{W\}$ – множество внешних факторов $w \in \{W\}$ воздействия окружающей среды на функционирование системы (кластера).

5. Заданы показатель и критерий эффективности решения задачи ДЗЗ в следующем виде:

$$I_F = I_F(S^*(T, K, H, I) \subset \Sigma; A; t) \geq I_{F_{треб}}$$

где I_F – информационная производительность кластера.

Требуется:

Определить структуру системы S^* и выбрать алгоритм ее функционирования A^* таким образом, чтобы $F_{\Theta} = \{S^*, A^*\}; I_F(S^*(T, K, H, I) \subset \Sigma; A; t) \geq I_{F_{треб}} | r \leq r_{кр}, w \in \{W\}$.

Решение задачи. Решение поставленной задачи в общем виде предполагает разработку модели функционирования кластера. Воспользуемся известным вариантом представления функционирования как модели смены состояний. При этом будем считать, что состояние системы определяется структурой и алгоритмом её функционирования. Тогда функционирование кластера МГКА в целом есть процесс последовательной смены состояний системы $F_{\Theta} = \{S(T, K, H, I) \subset \Sigma; A; t\}$, обладающих различной информационной производительностью. При этом по каждому из наблюдаемых объектов кластер МГКА может отработать с различной эффективностью I_F (рис.2), определяемой видом прикладного эффекта $\Theta = \{C, K, H, O\}$.

Каждый из переходов состояний характеризуется своей возможностью по достижимости, зависящей от имеющихся ресурсов $\{R\}$ и влиянием внешних факторов $\{W\}$.

Исходя из приведенной модели функционирования, поставленную задачу целесообразно решать в три этапа: во-первых, осуществить выбор рабочей структуры системы, которая позволила бы достичь поставленных целей, во-вторых, разработать алгоритм её функционирования, в-третьих, обеспечить выполнение запланированной программы работ путём реализации соответствующего ТЦУ. При этом задача ТЦУ – обеспечить

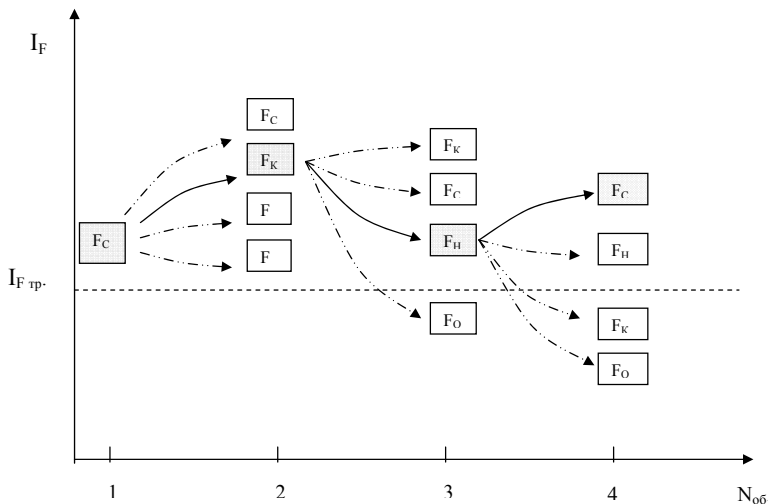


Рис. 2. Функционирование кластера МГКА

устойчивый переход в заданное состояние.

Анализ возможных методов решения задачи выбора рабочей структуры в условиях ограниченного числа элементов показал, что рабочая структура определяется в первую очередь видом решаемой задачи мониторинга и типом прикладного эффекта, используемого для её решения. Так, для реализации стереоэффекта выбираются именно те МГКА, орбитальное положение которых обеспечивает требуемое угловое положение между ними. Реализация эффекта непрерывности наблюдения требует выбора именно тех МГКА, которые обеспечивают передачу эстафеты наблюдения.

Кроме того, решение данной задачи определяется состоянием кластера, что зависит от качества – полноты, достоверности, оперативности – информации о состоянии его ресурсов. Для штатного функционирования кластера приемлемым является использование методов выбора структуры в условиях определенности. В этом случае имеются количественные оценки запаса ресурсов как для отдельных МГКА, так и для кластера в целом. Тогда исходная задача может быть сведена к традиционным задачам о назначении, соответствующим классу дискретных задач, для которых успешно применяются методы линейного, нелинейного и динамического программи-

рования. Для дискретных задач необходимо задать целевую функцию и ряд ограничений, в рамках которых решается задача. В рамках решаемой задачи в качестве целевой функции целесообразно рассматривать информативность кластера МГКА в целом, а в качестве ограничений ряд общесистемных требований, например, по надёжности и производительности системы. Следует отметить, что при отработанной схеме функционирования объектов кластера данная задача может быть решена методом простого перебора. В случае нештатного функционирования оценки ресурсов недостоверны и не позволяют строго формализовать задачу. Тогда задача должна решаться одним из методов выбора в условиях неопределённости, например, минимаксными методами. В этом случае набор рабочих структур выступает в качестве стратегий выбора, а ресурсы рассматриваются как неопределённые факторы, заданные на множестве возможных значений.

Приведенные выше методы выбора как в условиях определенности, так и в условиях неопределённости достаточно хорошо исследованы и эффективность их применения для выбора рабочей структуры кластера МГКА ДЗЗ определяется возможностью получения исходных данных, и, в первую очередь, данных по оценкам ресурсов.

Литература

1. Егошин Ю.И., Николаев Б.П., Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. К вопросу кластерного построения многоспутниковых орбитальных группировок малогабаритных космических аппаратов. Статья. Материалы научно-технической конференции, посвященные 60-летию предприятия ФГУП «РНИИ КР». – М.: 2007.
2. Ермак С. Н. Комплексный подход к развитию высоких технологий в России. Доклад. Материалы конференции Четвертого Международного Форума «Высокие технологии XXI века». – М.: 2003.
3. Ермак С. Н., Стреж С. В., Трошин Е. В. Интеграция космических систем на основе создания единого информационного пространства. Доклад. Международная космическая конференция-2001 «Космос без оружия – арена мирного сотрудничества в XXI веке» 11-14 апреля 2001 г., Москва. Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2001.
4. Квасников А. Ю., Ермак С. Н., Стреж С. В., Трошин Е. В. Инновационный подход к созданию космических систем на основе нанотехнологий. // Радиотехника и управление. № 7-9, 2002.
5. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. Системный анализ космических аппаратов. – М.: ВА РВСН, 2007.
6. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. Прикладные эффекты кластерного построения группировки маломассогабаритных космических аппаратов. Тезисы доклада. Труды VIII международного форума «Высокие технологии XXI века». – М.: 2007.
7. Николаев Б.П. Вариант содержания ТЦУ кластера МГКА ДЗЗ. Статья. «Научно-практические аспекты совершенствования управления КА и информационного обеспечения запусков КА» 21 ноября 2007 г., ГИЦИУ КС. Материалы научно-технической конференции. – М.: 2008.
8. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – 2-е изд. исправ. – М.: ИПРЖР, 1999.
9. Полет космических аппаратов: Примеры и задачи: Справочник/Ю.Ф. Авдеев, А.И. Беляков, А.В. Брыков и др./ Под общ. ред. Г.С. Титова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990.
10. Управление космическими аппаратами зондирования Земли. Компьютерные технологии/ Под ред. Д.И.Козлова. – М.: Машиностроение, 1998.
11. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика Т.1., М: Минобороны России, 2003. – 278с.
12. Кукушкин С.С., Гладков И.А., Чаплинский В.С. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем М: Минобороны России, 2003. – 278с.

Материал поступил в редакцию 08.03. 2008г.