

Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения

В.В. Дарнопых

Рубеж XX-ого и XXI-ого столетий обозначил новый этап в развитии мировой космонавтики и практического применения космической техники – этап активного развертывания и эксплуатации низкоорбитальных многоспутниковых информационных систем, прежде всего, космических систем наблюдения (КСН) - систем дистанционного зондирования Земли, космических систем связи (КСС) – глобальных и региональных систем персональной спутниковой связи, а также Международной космической станции (МКС). Это обстоятельство придало особый импульс научному направлению, связанному с оперативным планированием целевого функционирования космических аппаратов (КА) и систем. Актуальность такой задачи для современных многоспутниковых систем и МКС обусловлена как техническими и экономическими факторами, возможностью совмещения нескольких самостоятельных функций на борту одного КА или в рамках одной системы, так и необходимостью совершенствования алгоритмического и программного обеспечения и доведения его до уровня инженерной практики. В статье дан обзор задач планирования целевого функционирования КА, орбитальных станций и космических систем различного назначения, а также методов (подходов) и алгоритмов решения таких задач.

1. Вопросы планирования в трудах К.Э. Циолковского

Заслуги К.Э. Циолковского в области космонавтики признаны во всем мире, его труды в значительной степени способствовали прогрессу отечественной и зарубежной ракетно-космической техники. Творческое наследие и идеи ученого находят воплощение и на современном этапе развития космонавтики, составляют основу новых научных направлений и исследований [46].

В 1903 г. К.Э. Циолковский в первой части статьи [74] обратил внимание на важность вопросов формирования и реализации программ работы бортовых приборов и устройств с целью эффективного управления движением ракеты. Он пишет: “Необходимы автоматические приборы, управляющие движением ракеты ... и силою взрывания по заранее намеченному плану”, “... ручное управление движением снаряда окажется не только затруднительным, но и прямо практически невозможным. В таком случае следует прибегнуть к автоматическому управлению”, “Еще не малое преимущество ракеты: ... возможность безопасного спуска на планету. Все дело в хорошем регуляторе взрывания” [74]. В этой же работе автор дает теоретические выкладки и проводит анализ зависимости скорости движения ракеты от запасов топлива, влияния силы тяжести на “вертикальное” и “наклонное” движение ракеты,

что с полным основанием следует считать важными факторами при планировании программы полета. Во второй части статьи [74] автор делает краткий обзор результатов первой части, продолжает исследования и приводит результаты для расчета космических скоростей, времени движения ракеты, сопротивления атмосферы, обсуждает вопрос о факторах жизнеобеспечения на борту ракеты – запасах кислорода и продуктов питания, влиянии перегрузок и состояния невесомости на человеческий организм и др. Позднее автор публикует ряд работ по промышленному освоению космоса и планеты Земля, межпланетным сообщениям, в которых талант исследователя и его фантазия проявляются с особой силой и продуктивностью. Так в своих трудах [75,76] К.Э. Циолковский предлагает последовательную программу космической индустриализации, которая должна способствовать росту уровня жизни людей. Предложенные им сценарии освоения космоса и Земли хотя и носили в эпоху автора фантастический характер, с позиции сегодняшнего дня представляются объективной реальностью: созданы и успешно функционируют различные классы ракет-носителей, пилотируемые орбитальные станции, автоматические КА, многоспутниковые космические системы различного назначения, значительно расширен объем знаний о Солнечной системе. С этой точки зрения идеи К.Э. Циолковского, оформленные им в конкретных трудах, являются аналогами перспективных (долгосрочных) национальных космических программ ведущих государств современного мира.

2. Планирование программ полетов космических аппаратов и орбитальных станций в 60-х – 90-х годах XX-ого столетия

После успешного запуска в космос первого искусственного спутника Земли (ИСЗ), а затем и успешного совершения первого пилотируемого полета человечество перешло к планомерному и последовательному освоению космического пространства, полеты приобрели практическую направленность. Программы полетов первых научно-исследовательских КА типа “Союз” и “Салют” потребовали решения задачи управления бортовыми экспериментами, и как следствие, задачи планирования этих экспериментов [6]. В этих целях была сформирована концепция планирования программы экспериментов на борту КА, включающая решение двух основных задач (определение состава экспериментов и их оптимальной последовательности во время выполнения полета КА) по трем возможным стратегиям оптимального планирования (максимизация объема полезной научной информации, обеспечение высокого качества научной информации, экономия энергоресурсов и технических ресурсов бортовых систем КА). Был разработан также комплекс формализованных математических моделей, учитывающих влияние факторов космического полета на проводимые исследования. Для поиска оптимальных решений задач планирования экспериментов был создан специальный методический аппарат, использующий, в частности, общую теорию оптимального управления,

теорию минимумов и максимумов, а также линейное программирование. Последний метод эффективно применялся для решения задачи планирования землеобзора автоматическим ИСЗ, что показано, например, в работе [51]. В работах [6,13,16,21,57,68,72,80, 84,85,89] рассмотрены конкретные примеры решения задач планирования целевых операций на КА и орбитальных станциях в различных постановках и с учетом как условий внешней среды (освещенность, облачность и др.), так и технических возможностей бортовой аппаратуры (восполняемый и невосполняемый ресурс, переориентация линии визирования съемочной аппаратуры, количество каналов приема-передачи информации, обновление, накопление и хранение информации и др.).

В 80-х годах начинается активная эксплуатация орбитальной станции "Мир", причем программы экспериментов на ее борту имеют не только оперативный, но и долгосрочный характер. Это привело к необходимости разработки усовершенствованной отечественной автоматизированной системы управления полетами [7,82,86], которая до настоящего времени успешно эксплуатируется при планировании программ научных экспедиций на орбитальную станцию "Мир" и ряда международных космических проектов, в том числе российско-американских серии "Shuttle-Мир".

3. Современные задачи планирования

Современный этап развития космонавтики характеризуется повышенной активностью в сфере создания, развертывания и эксплуатации низкоорбитальных космических информационных систем. Они отличаются от геостационарных и средневысотных систем малогабаритными и легкими КА, совершающими за сутки более десяти витков по орбитам, неоднократно обслуживающими значительные по площади территории земной поверхности и обеспечивающими своевременную и качественную доставку необходимой информации сотням тысяч потребителей, большой численностью КА в своих космических сегментах, техническими характеристиками бортовой аппаратуры КА, основными принципами организации процесса целевого функционирования. К низкоорбитальным информационным системам, прежде всего, относятся КСН - системы дистанционного зондирования, осуществляющие промышленный и экологический мониторинг земной поверхности и околоземного пространства, съемку земных объектов, метео- и астрофизические исследования, и космические системы связи КСС - глобальные и региональные системы персональной спутниковой связи, предоставляющие услуги радиотелефонии, передачи данных, персонального радиовызова, телевещания, обеспечивающие ретрансляцию сообщений с помощью межспутниковых линий связи. Среди проектов низкоорбитальных КСН следует отметить Argos, Amptе, ROSAT, Express, CBERS, Spot, LandSat, ERS, EOS, SSR, "Ресурс-Ф", "Курс", низкоорбитальных КСС - Iridium, Globalstar, ECCO, Skybridge, Celestri, Teledesic, Orbcomm, "Коскон", "Сигнал", "Постелесат".

Некоторые из них предусматривают совмещение функций по предоставлению услуг связи и осуществлению космического мониторинга, а также обеспечение ретрансляции информационных сообщений не только от наземных абонентов и КА этой же системы, но и от иных объектов, находящихся в воздушном и околоземном пространстве.

Вопросы классификации, назначения, орбитального построения, организации целевого функционирования и возможности космических систем связи и наблюдения рассмотрены в работах [34,35,39,50,60,65,67,69,72,77,91]; вопросы, связанные с инженерной оценкой современного состояния и перспектив развития низкоорбитальных КСС обсуждаются в работах [19,20,59,70], низкоорбитальных КСН - в работах [15,39,50,60].

Задача управления низкоорбитальными КСС и КСН характеризуется важностью вопросов оперативного планирования их целевого функционирования, что обусловлено ограниченными техническими возможностями бортовой аппаратуры КА, необходимостью рациональной эксплуатации и реализации научно-технического потенциала КА, большой размерностью массивов обрабатываемой аппаратурой информации, высокими требованиями к эффективности систем и качеству предоставляемых ими информационных услуг, себестоимостью систем и их целевых операций.

Целевое функционирование низкоорбитальной глобальной системы персональной спутниковой связи [17,24-26,31,41,44,46,49,88] заключается в формировании мобильных каналов, устанавливающих соединения земных абонентов посредством оперативной коммутации радиоканалов в абонентских и межспутниковых линиях связи. Поскольку космический сегмент такой системы состоит из 40, 50 и более КА, то количество вариантов формирования мобильного канала велико. Вместе с тем, требования к экономической эффективности системы обуславливают необходимость и важность установления канала при минимально возможном количестве КА-ретрансляторов в условиях фиксированного количества образуемых одним КА абонентских и межспутниковых линий связи и количества радиоканалов в них. Для формализации задачи вводятся в рассмотрение модель временных интервалов радиовидимости КА и абонентских терминалов и модели коммутации радиоканалов в абонентских и межспутниковых линиях связи. На основе математической формализации осуществляется переход к оптимизационной задаче дискретного программирования (задаче маршрутизации), заключающейся в поиске такой стратегии управления бортовой коммутирующей аппаратурой КА, которая обеспечивает минимум критерию эффективности целевого функционирования системы - количеству КА-ретрансляторов в мобильном канале при ограниченных технических возможностях каждого из них.

Целевое функционирование низкоорбитальной космической системы дистанционного зондирования [12,24,25,27,30,41-43,46,48,49,90,92,94] заключается в формировании програм-

мы съемки земных объектов на заданном временном интервале. Поскольку КА низкоорбитальных КСН за сутки совершают более десяти витков по орбитам, то количество потенциальных съемок земных объектов может составить сотни, тысячи и десятки тысяч единиц, что приводит к многовариантности формирования съемочных планов системы. Вместе с тем, требования к экономической эффективности обуславливают необходимость формирования таких планов, реализация которых обеспечивает максимальную ценность информации о снятых земных объектах в условиях ограниченных возможностей бортового информационного комплекса КА по ее сбору, хранению и передаче. Для формализации задачи вводятся в рассмотрение модель временных параметров возможной съемки объектов и сеансов связи и модели целевого функционирования бортового информационного комплекса КА - динамики состояния бортового запоминающего устройства (БЗУ) и переориентации съемочной аппаратуры КА. На основе математической формализации осуществляется переход к оптимизационной задаче дискретного программирования (задаче маршрутизации), заключающейся в поиске такой стратегии управления бортовой съемочной аппаратурой КА, которая обеспечивает максимум критерию эффективности целевого функционирования системы - совокупной ценности снимков земных объектов при ограниченных технических возможностях каждого КА.

Наиболее часто упомянутые задачи планирования целевого функционирования низкоорбитальных многоспутниковых систем сводятся к оптимизационным задачам дискретного программирования или маршрутизации и заключаются в поиске стратегии управления бортовой аппаратурой КА, позволяющей при соблюдении ограничений на фазовый вектор и вектор управления системы достичь наилучшей ее эффективности на заданном интервале планирования. В зависимости от конкретной постановки такие оптимизационные задачи относятся либо к классу легкорешаемых (точное оптимальное решение может быть получено существующими алгоритмами полиномиальной временной сложности), либо к классу труднорешаемых - задач экспоненциальной сложности (алгоритмы полиномиальной временной сложности для решения которых в общем случае не существуют). И в том, и в другом случае задача планирования не может быть решена без привлечения современного специализированного программно-математического обеспечения. Отметим, что вопросы вычислительной сложности решения задач дискретного программирования, задач маршрутизации и сводимых к ним задач подробно рассмотрены в работе [23].

Другим важнейшим направлением исследований в области планирования целевых операций в космосе являются задачи планирования работы МКС [8,63,93], являющиеся логическим продолжением аналогичных исследований для орбитальной станции "Мир", представленных, в частности, в работах [7,86].

4. Методы и алгоритмы решения задач планирования

К настоящему времени предложен ряд методов (подходов) и численных алгоритмов, которые вместе с технологиями их применения к решению конкретных прикладных задач планирования рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов. Эти работы обобщают передовой опыт, дают характеристику основным применяющимся для решения задач планирования методам: графоаналитического и электронно-физического моделирования, эвристическим, экспертных оценок, методам на основе экспертных систем с применением средств искусственного интеллекта, аналитическим методам - перебора, линейного и динамического программирования, сетевым и волновым методам маршрутизации и др.

Метод графоаналитического моделирования [6,72] применяется до создания моделей функционирования КА и космических систем и основывается на воспроизведении их динамики на заданном временном интервале. При этом используются географические карты с обозначением на них наземной обстановки, границ зон радиовидимости бортовой аппаратуры КА и наземных станций, а также специальный набор транспарантов и шаблонов. Достоинствами метода являются его простота и наглядность, возможность применения в учебно-методических целях. Однако для решения современных задач оперативного планирования целевого функционирования КА и космических систем его применение затруднено ввиду сложности реализации. Такими же достоинствами и недостатками обладает метод электронно-физического моделирования [72]. Он основан на воспроизведении в ускоренном масштабе времени динамики КА или космической системы посредством информационно-логических, радиоэлектронных и механических устройств; по результатам этого воспроизведения формируется оптимальный план.

Эвристические методы, представленные, например, в работах [12,72,83], адаптированы к конкретным задачам планирования и позволяют быстро получить их решение, которое в общем случае не является оптимальным. Вместе с тем, разработка и применение таких методов позволяет существенно сократить вычислительные затраты, сопутствующие реализации аналитических методов. Методы экспертных оценок [38,60,72], получившие широкое применение в системном анализе, основаны на обработке мнений группы специалистов (экспертов) и на существующем опыте планирования. Для реализации этих методов необходимо наличие дополнительной информации, организация специальной процедуры опроса экспертов и обработки результатов этого опроса. Эти методы наиболее пригодны к составлению долгосрочных и среднесрочных космических программ и последовательности их реализации. При оперативном планировании целевого функционирования КА и космических систем методы экспертных оценок, как и эвристические, в общем случае к оптимальному решению не приводят.

Другой группой методов, применяющихся для решения задач планирования, являются методы на основе экспертных систем с применением средств искусственного интеллекта [38,72,84-87]. Необходимость создания автоматизированных экспертных систем, предназначенных для управления полетами КА или космических систем, возникла благодаря усложнению контролируемых подсистем и росту их количества. В целом, экспертные системы можно разделить на два больших класса: 1) автоматизированные системы управления полетами на основе сбора, предварительной обработки и интерпретации поступающей телеметрической информации, позволяющие оценить текущее состояние КА или космической системы, проанализировать процесс целевого функционирования бортовой аппаратуры КА, определить параметры восходящих и нисходящих каналов связи КА с земными абонентами и наземными станциями, и как следствие, внести коррективы в реализуемый план; 2) специализированные или универсальные прикладные программные комплексы и пакеты программ, предназначенные для автоматизированного решения задач анализа, оптимизации, управления, оценивания сложных технических систем, в том числе КА и космических систем, позволяющие моделировать процесс их целевого функционирования и проводить параметрический анализ как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации. В качестве примеров автоматизированных экспертных систем следует отметить: американские разработки - экспериментальную систему SHARP [84] анализа рабочего состояния КА, применявшуюся для обслуживания полета космического корабля Voyager, систему планирования и диспетчеризации SURPASS [85], позволяющую формировать оптимальные запросы оператора на включение/выключение бортовой аппаратуры КА, распределенную систему планирования и диспетчеризации PMS [85], разработанную для планирования космической программы проекта Freedom; немецкую систему планирования GSOC MPS [80,86], применявшуюся для реализации космических проектов ROSAT, MOMS-2P PRIRODA и др.; отечественную систему управления полетами [82], успешно эксплуатируемую для планирования программ научных экспедиций на орбитальную станцию "Мир" и ряда международных космических проектов, в том числе российско-американских "Shuttle-Мир". Среди прикладных программных комплексов, автоматизирующих процессы оптимизации планирования и управления КА и космическими системами, можно выделить: программы-планировщики Plan-IT, Plan-IT-2, SPIKE, OMP [85]; специализированную программу построения временных последовательностей выполнения операций [80], применявшуюся для планирования космической программы проекта ROSAT; универсальный пакет прикладных программ Satellite Toolkit, разработанный в США; пакет прикладных программ для решения задач в вероятностных постановках [28,29]; универсальный пакет прикладных программ Space System Toolbox [82,83], разработанный специалистами кафедры "Системный анализ и управление" МАИ (кафедры 604

МАИ) и предназначенный для решения широкого класса задач анализа, оптимизации и управления космическими системами. В состав последнего пакета входит комплекс MISPLAN [12,27,41,49,83,94], который специализирован для решения задач оперативного планирования съемки земных объектов системой низкоорбитальных КА и реализует численный алгоритм, разработанный автором работы.

Автоматизированные экспертные системы, прикладные программные комплексы и пакеты программ основаны на моделях функционирования КА и космических систем, методах и алгоритмах решения оптимизационных задач. Кроме упомянутых выше методов, для решения задач оперативного планирования целевого функционирования низкоорбитальных КСС и КСН применяется широкий класс аналитических методов, значимость которых трудно переоценить. Это объясняется тем, что наиболее распространенным подходом к оперативному планированию является сведение исходной задачи к задаче дискретного программирования или к задаче маршрутизации, точное оптимальное решение которых может быть получено, как правило, только аналитическими методами. В ряде случаев последние задачи принадлежат к классу труднорешаемых (как уже упоминалось выше), а необходимые для их решения алгоритмы полиномиальной временной сложности, у которых число арифметических и логических операций в ходе вычислений ограничено сверху некоторым полиномом от размерности задачи (например, количеством булевых переменных), в настоящее время отсутствуют, возможность их разработки в ближайшем будущем представляется весьма проблематичной.

Вместе с тем, приемлемое решение конкретных задач планирования может быть получено существующими методами и алгоритмами. Так, метод перебора [40,73] обеспечивает оптимальное решение задачи при строгой реализации его вычислительной схемы. Примеры реализации метода перебора в задачах оптимизации сложных технических систем, в том числе космических, представлены в работах [29,43]. Практическое применение метода перебора сдерживается экспоненциальным ростом вычислительных затрат при увеличении размерности задачи.

Наиболее развитыми для решения задач оперативного планирования являются методы линейного программирования, в частности, метод максимального элемента, симплекс метод, методы отсечений, методы типа ветвей и границ и др. Метод максимального элемента [40] позволяет эффективно находить оптимум линейных форм при небольшой размерности последовательности булевых переменных. В работах [16,68] продемонстрирована технология оперативного планирования съемки земной поверхности с учетом облачности в рамках эксперимента "Радуга", давшая положительные результаты применения этого метода.

Симплекс-метод [40,73] основан на формализации задачи в виде системы уравнений, в которую помимо основных оптимизируемых переменных введены так называемые базисные и искусственные переменные. Процесс поиска решения - итерационный, с последовательной проверкой вариантов допустимых решений при заданных значениях базисных переменных, обеспечивает нахождение оптимальных решений, но вычислительная эффективность метода резко падает с ростом размерности задачи. Технология решения задач оперативного планирования сведением их к задаче линейного программирования с применением симплекс-метода представлена в работе [6] и развита в работах: [51] - при решении задачи планирования наблюдения однородных участков земной поверхности с КА, оснащенного БЗУ ограниченной емкости; [58] - в аналогичной задаче, но с учетом невосполняемого на интервале планирования запаса энергоресурса; [58] - в задаче планирования оперативной съемки с КА, оснащенного многорежимной бортовой аппаратурой; [57] - в технической постановке задачи планирования операций космической системы сбора информации с ограниченными функциональными возможностями.

Методы отсечений [4,40,73] основаны на искусственном введении при поиске решения дополнительных ограничений, деформирующих многогранник всего множества альтернатив решений. Сходимость этих методов зависит от способа задания ограничений, который не регламентирован никакими рекомендациями и допускает произвол. Практические возможности методов отсечений по решению оптимизационных задач обсуждаются в работах [20,40], где отмечается, что эти методы не обеспечивают высокой вычислительной эффективности и для решения задач большой размерности непригодны.

Методы типа ветвей и границ [4,40,73] принадлежат к классу методов комбинаторного типа, базирующихся на идее перебора допустимых решений. В основе этих методов лежат вычислительные процедуры, позволяющие непосредственно рассматривать лишь относительно небольшую часть допустимых решений задачи, а остальные учитывать косвенно. Такой подход позволяет свести исходную задачу к двум или нескольким подзадачам меньшей размерности. Главный недостаток методов типа ветвей и границ состоит в необходимости решения задач линейного программирования, соответствующих каждому подмножеству допустимых решений исходной задачи, что требует существенных вычислительных затрат. Технология применения методов типа ветвей и границ в задачах планирования целевого функционирования отдельных КА рассмотрена в работе [6], космических систем - в работах [24,25,27,30,42,48].

Широкое практическое применение к решению задач планирования целевого функционирования КА и космических систем имеет метод динамического программирования [37,40], состоящий в поэтапной оптимизации критерия эффективности, хотя и он не может быть от-

несен к разряду эффективных методов для решения задач дискретного программирования ввиду влияния так называемого "проклятья размерности". В работе [2] этот метод применяется для решения задачи устранения конфликтов между режимами сбора и передачи информации при съемке земных объектов КА с ограниченными возможностями бортового информационного комплекса. В этой же работе предложена схема дискретного принципа максимума, применение которой при больших размерностях задачи и высоких требованиях к точности решения предпочтительнее. Интерес представляет применение метода динамического программирования в задачах планирования астронаблюдений. Так, в [13] рассмотрена задача планирования астронаблюдений с пространственным разворотом линии визирования телескопа, причем формируемый план фиксирует не только последовательность съемки объектов, но и моменты времени начала разворотов на каждый очередной объект; в [80] решена задача планирования астронаблюдений космическим аппаратом ROSAT, модель процесса целевого функционирования которого представлена в виде "окон" - временных интервалов, в течение которых возможна съемка объектов. В работе [14] предложен подход к решению сложной технической задачи - задачи информационного обслуживания потребителей системой с ограниченными ресурсами и пропускной способностью, в роли которой может выступить космическая система связи. В работе [33] на основе модифицированной схемы динамического программирования решена задача оптимизации построения КСС на геостационарной орбите в целях гарантированной однократной ретрансляции сигнала при установлении связи между абонентскими терминалами, находящимися на фиксированном расстоянии друг от друга. Особое место в практическом приложении метода динамического программирования занимает работа [52], в которой рассмотрена задача оптимизации планирования съемки земных объектов не отдельным КА, а космической системой с ограниченной размерностью ее вектора управления. Для решения такой задачи применяется схема метода обобщенного динамического программирования, основанная на искусственной декомпозиции исходной задачи на ряд задач планирования для каждого КА системы и позволяющая сократить вычислительные затраты по сравнению с применением классической схемы метода. Принцип пошаговой оптимизации применяется также в работе [11] при решении задачи уточнения параметров управления маневрами КА связи.

В ряде случаев задачу планирования целевого функционирования низкоорбитальных КСС и КСН удобно свести к задаче маршрутизации, в которой процесс формирования плана трансформируется в процесс поиска кратчайшего маршрута на графе операций космической системы. Частным случаем задачи маршрутизации является "задача коммивояжера", рассмотренная, в частности, в работе [6] при решении задачи планирования наблюдений с геостационарного КА, съемочная аппаратура которого изменяет ориентацию линии визиро-

вания. В работе [72] задача съемки локальных земных объектов с КА, оснащенного аппаратурой с отклоняющейся в боковом направлении от трассы линией визирования, сведена к задаче маршрутизации. Для ее решения предложен эвристический алгоритм "поиска перспективных объектов", близкий по своей сути к методам последовательного анализа вариантов. Однако, задача маршрутизации на графе операций космической системы может быть решена и аналитическими методами (или алгоритмами), в первую очередь, классическими сетевыми и волновыми методами.

Сетевые методы (алгоритмы) маршрутизации [9,36,53,73] Беллмана-Форда, Дейкстра, Флойда-Уоршелла позволяют находить оптимальные кратчайшие маршруты на графе от заданной вершины до других вершин. Алгоритм Беллмана-Форда основан на итерировании дуг в маршруте, его идея состоит в том, чтобы сначала найти оптимальные маршруты при условии, что они содержат не более одной дуги, затем оптимальные маршруты при условии, что они содержат не более двух дуг и т.д. Алгоритм Дейкстра основан на итерировании длины маршрута, его идея состоит в отыскании оптимальных маршрутов в порядке возрастания их длин. Алгоритм Флойда-Уоршелла основан на итерировании количества вершин, которое допускается иметь в качестве промежуточных в маршрутах, его идея состоит в отыскании оптимальных маршрутов при ограничении на количество промежуточных вершин. Вопросы практического применения этих алгоритмов к решению прикладных задач планирования обсуждены в работе [17]. В работах [17,20] приводится модифицированная схема алгоритма Дейкстра с применением технологии Монте-Карло для решения оптимизационных задач в технических системах, в том числе и КСС по оптимизации ретрансляции сигнала. В работах [24-26,31,44,49] рассматривается задача оптимизации информационного обмена в низкоорбитальной КСС на основе применения модификации алгоритма Беллмана-Форда, а в работе [43] этот же алгоритм применяется для решения задачи планирования съемки земных объектов системой КА из условия достижимости максимума количества снятых объектов. Вычислительная эффективность сетевых методов (алгоритмов) маршрутизации, также как и методов линейного и динамического программирования, снижается с увеличением размерности графа. Успешная реализация этих методов возможна лишь при соблюдении ряда ограничений при построении самих графов, а для поиска самого длинного пути на графе эти методы малоприменимы.

Другой группой методов, позволяющих получить решение задачи по поиску кратчайшего маршрута на графе операций космической системы, являются волновые методы [36,53,61] - метод рельефов, матричный метод и собственно волновой метод. Метод рельефов является наиболее распространенным, особенно для решения задачи передачи сообщений в информационных сетях [61]. Он основан на составлении для каждой вершины графа матриц специ-

ального вида (матриц рельефов), содержащих целочисленные значения, определяемые количеством дуг графа между заданной вершиной и любой другой вершиной графа. Задача маршрутизации в этом случае сводится к отысканию на каждой промежуточной вершине графа дуги с наименьшим значением рельефа. Этот метод обладает хорошей наглядностью и простотой, однако при больших размерностях графа составить рельефы для каждой вершины по сложности равносильно решению задачи маршрутизации на этом графе. Матричный метод основан на составлении для каждой вершины графа матриц маршрутов, элементы которых указывают очередность (приоритетность) выбора той или иной дуги графа при установлении связи одной из вершин с остальными непосредственно связанными с ней вершинами. Задача маршрутизации затем решается по составленным матрицам с учетом приоритетности выбора исходящих направлений из каждой вершины. Недостаток этого метода то же, что и у метода рельефов - рост вычислительных затрат и потребных объемов оперативной памяти компьютера при составлении матриц маршрутов, причем для этого необходимо иметь информацию о состоянии всего графа. Собственно волновой метод основан на моделировании распространения псевдосигнала из исходной вершины графа. При этом все остальные вершины транслируют этот сигнал, а маршруты его прохождения своими конечными вершинами образуют "фронт волны", который расширяется по мере распространения сигнала на графе. Подобная "волна" транслируется до момента отыскания одним из маршрутов требуемой конечной вершины графа. Волновой метод требует больших объемов оперативной памяти ЭВМ для хранения информации о текущих маршрутах, хотя схема его реализации более проста по сравнению с методами рельефов и матричным. В работах [1,64] решается задача оптимизации эффективности функционирования информационно-вычислительной сети на основе применения волнового метода с привлечением технологии статистических испытаний, схема метода выбрана в качестве исходного алгоритма управления потоками информации в сети. Вопросы практического применения семейства волновых методов для решения задач оптимизации сложных технических систем обсуждаются в работах [17,20], где констатируется факт роста вычислительных затрат при увеличении размерности графа и отмечаются возможности методов по поиску самого длинного маршрута на графе. В работах [18,19] рассматривается задача выбора оптимальных стратегий передачи информационных сообщений в низкоорбитальной КСС посредством цифровых пакетов, что является логическим продолжением работ [24-26,31,44].

Автоматизация методов и алгоритмов решения задач планирования целевого функционирования низкоорбитальных многоспутниковых систем позволила выработать общий методический подход к оптимальному планированию [45,47]. Методика оптимального планирования состоит в реализации четырех основных этапов. На первом этапе проводится модели-

рование динамики функционирования системы, исследуются и анализируются условия, при которых физически и технически могут быть реализованы целевые операции, формируются массивы (базы) данных, необходимых для построения модели планирования и проведения самого процесса планирования, включающие, например, последовательности интервалов или моментов времени взаимной видимости КА, пребывания земных объектов в зонах видимости аппаратуры КА и др. На втором этапе осуществляется построение модели планирования с учетом специфики конкретной технической задачи. По существу, модель планирования представляет собой модель целевых операций системы, включающую количественные показатели эффективности выполнения этих операций, показатели переходных этапов от одной операции к другой. Модель планирования может быть представлена в виде графа операций и интерпретирована соответствующей матрицей (обычно для случая системы связи [31]), либо в виде одномерного массива данных, учитывающего все свойства системы за фиксированный интервал планирования (для случая системы наблюдения при планировании оперативной съемки земных объектов [30,79]). На третьем этапе на основе модели планирования осуществляется непосредственное решение оптимизационной задачи как задачи дискретного программирования (или задачи маршрутизации) и формирование оптимального плана целевого функционирования системы. Для организации вычислительного процесса могут применяться как классические методы и алгоритмы, так и специально разработанные и адаптированные к решению конкретных технических задач. Четвертый этап состоит в получении и обработке результатов многократного решения задачи планирования в целях проведения системных исследований. Представленная методика реализована в специализированных программных комплексах [12,26,27,30,31,41,79,83] и успешно применялась для решения прикладных задач планирования в реальных проектах низкоорбитальных КСС и КСН. Идея о применении комплексного подхода к решению задач планирования целевого функционирования мониторинга космическими аппаратами дистанционного зондирования высказана также в работе [58].

Заключение

Комплекс поставленных практикой задач по оптимальному планированию не ограничивается вопросами целевого функционирования низкоорбитальных КСС и КСН. Так, в работах [3,37] рассматривается задача оптимального планирования навигационных измерений и методы (алгоритмы) ее решения, в работе [11] обсуждаются аспекты определения параметров оптимального управления маневрами КА, ряд работ посвящен вопросам оптимального планирования функционирования наземных сегментов космических систем при управлении КА, в работах [28,29] рассматриваются задачи оптимизации планирования и управления движением аэрокосмических аппаратов по вероятностным критериям. Разработанный на кафед-

ре “Системный анализ и управление” МАИ программно-математический аппарат является основой для расширения спектра прикладных задач планирования мониторинга земной поверхности и обеспечения абонентов персональной спутниковой связью [18,19,30,31,41,45,49,59,78,79,88,90,92,94]. Среди таких задач можно отметить: планирование установления и удержания мобильных каналов спутниковой связи с ретрансляцией сигнала через наземные станции сопряжения; выбор оптимального маршрута переноса информации на борту спутника; моделирование потокового информационного обмена потенциальных потребителей; оптимизация планирования коммутации каналов связи не только по детерминированным (количество КА-ретрансляторов, количество необходимых перекоммутаций каналов и др.), но и по вероятностно-временным критериям (время сеанса связи, время ожидания соединения, время доставки информации от абонента-источника к абоненту-адресату и др.); планирование различных по своему целевому назначению видов мониторинга локальных и площадных объектов на земной поверхности с учетом ресурсных возможностей КА в различных комбинациях; планирование целевого функционирования космических систем и аппаратов с совмещенными функциональными возможностями по обеспечению связи, мониторинга и навигации. При этом моделирование и исследования проводятся в рамках представленной выше методики с применением разработанного программно-математического обеспечения, а особенности задач учитываются соответствующим образом в их постановках.

Список литературы

1. *Анисовец В.М., Скобелев А.Г.* Исследование эффективности функционирования информационно-вычислительной сети при различных вариантах структурной организации // Задачи оптимизации сложных технических систем: Тематический сборник научных трудов МАИ. - М.: МАИ, 1990. - с.71-75.
2. *Анишаков Г.П., Соллогуб А.В., Бундов Д.Г.* Методы устранения конфликтов между режимами функционирования КА ИПРЗ при составлении программ работы. // Исследование Земли из космоса. - 1988, № 3. - с.107-116.
3. *Бажинов И.К., Почукаев В.Н.* Оптимальное планирование навигационных измерений в космическом полете. - М.: Машиностроение, 1976. - 288 с.
4. *Баранов В.Н.* Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. - М.: МАИ, 1981. - 34 с.
5. *Беляев М.Ю.* Основные задачи и методы оперативного планирования экспериментов по исследованию Земли из космоса. // Исследование Земли из космоса. - 1981, № 3. - с.96-101.
6. *Беляев М.Ю.* Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. - М.: Машиностроение, 1984. - 264 с.

7. *Беляев М.Ю., Рулев Д.Н.* Оптимизация программы экспериментов при оперативном планировании исследований, выполняемых с КА. // *Космические исследования.* - 1987, т.25, вып.1. - с.30-36.
8. *Беляев М.Ю., Рулев Д.Н.* Алгоритм оптимизации планирования программы экспериментов, выполняемых на орбитальном КА. // *Тезисы докладов XXXIV научных чтений, посвященных разработке творческого наследия К.Э. Циолковского.* – Калуга, 1999. - с.39-40.
9. *Бертсекас Д., Галлагер Р.* Сети передачи данных. - М.: Мир, 1989. - 544 с.
10. *Бесслер Р., Дойч А.* Проектирование сетей связи. - М.: Радио и связь, 1988. - 267 с.
11. *Бетанов В.В., Яшин В.Г.* К вопросу уточнения параметров управления маневрами космических аппаратов связи методом пошаговой оптимизации. // *Радиотехника.* - 1996, № 6. - с.13-17.
12. *Бобронников В.Т., Дарных В.В., Малышев В.В., Шидловский А.В.* Оперативное планирование и анализ эффективности космических систем наблюдения. // *Бортовые интегрированные комплексы и современные проблемы управления. Международная конференция, Ярополец, 1998: Сборник трудов.* – М.: МАИ, 1998. - с.40.
13. *Бырков Б.П., Силов В.В.* К вопросу об оптимизации расписания функционирования перспективных космических станций / *Труды XVI чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, секция “Проблемы ракетной и космической техники”.* - М., 1982. - с.37-44.
14. *Виноградов В.А.* Декомпозиционный подход к задаче информационного обслуживания конкурирующих источников. // *Задачи оптимизации сложных технических систем: Тематический сборник научных трудов МАИ.* - М.: МАИ, 1990. - с.9-13.
15. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. - М.: А и Б, 1997. - 296 с.
16. *Горбушина Э.А., Котцов В.А.* Облачность в планировании космической съемки Земли по результатам полета КК “Союз-22”. // *Исследование Земли из космоса.* - 1981, № 1.- с.78-82.
17. *Гришин В.М.* Вопросы маршрутизации информации в низкоорбитальных спутниковых системах. // *Бортовые интегрированные комплексы и современные проблемы управления. Международная конференция, Ярополец, 1998: Сборник трудов.* – М.: МАИ, 1998. - с.42-43.
18. *Гришин В.М., Иванов Д.А.* Моделирование работы космического сегмента системы "Иридиум" при передаче цифровых пакетов. // *Системный анализ и управление косми-*

ческими комплексами. 4-я Международная конференция, Евпатория, 1999: Сборник трудов. – М.: МАИ, 1999. - с.6.

19. *Гришин В.М., Иванов Д.А.* Моделирование совместной работы космического сегмента и станций сопряжения НКСС "Иридиум". // Системный анализ и управление космическими комплексами. Исследование и освоение космоса в наступающем веке. 5-я Международная конференция, Евпатория, 2000: Сборник трудов. – М.: МАИ, 2000. - с.51-52.

20. *Гришин В.М., Таперов М.Ю.* Метод исследования сетевых структур информационных систем с использованием специального вычислительного устройства. // Исследование операций: Сб. работ Института математики СибАН. - Новосибирск: НГУ, 1991. - выпуск 12.

21. *Гришин С.Д.* и др. Выбор орбит ИСЗ для исследования природных ресурсов Земли / Из книги "Космические исследования земных ресурсов". - М.: Наука, 1975. - с. 316-328.

22. *Гунин В.И., Пчелкин В.Ф.* Радиосвязь с помощью ИСЗ. - М.: Радио и связь, 1970. - 288 с.

23. *Гэри М., Джонсон Д.* Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. - М.: Мир, 1982. - 416 с.

24. *Дарных В.В.* Численные методы решения прикладных задач планирования целевого функционирования низкоорбитальных космических систем связи и наблюдения // Бортовые интегрированные комплексы и современные проблемы управления. Международная конференция, Ярополец, 1998: Сборник трудов. – М.: МАИ, 1998. - с.8-9.

25. *Дарных В.В.* Оптимизация планирования целевого функционирования космических информационных систем. // XXV Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция, Москва, 1999: Тез. докл. - М.: Латмэс, 1999. - т.2, с.717-718.

26. *Дарных В.В.* Специализированный программный комплекс "Космическая коммуникационная система". // Системный анализ и управление космическими комплексами. 4-я Международная конференция, Евпатория, 1999: Сборник трудов. – М.: МАИ, 1999. - с.7.

27. *Дарных В.В.* Об одном алгоритме оптимального планирования космического мониторинга низкоорбитальными системами дистанционного зондирования Земли. // Системный анализ и управление космическими комплексами. Исследование и освоение космоса в наступающем веке. 5-я Международная конференция, Евпатория, 2000: Сборник трудов. – М.: МАИ, 2000. - с.15-17.

28. *Дарных В.В., Дебольская И.И., Карп К.А., Костенко Д.К., Малышев В.В., Смусев А.Ю., Федосов А.Ю., Харитонцева О.О.* Автоматизированная система решения вероятностных задач VERAN. // Алгоритмическое обеспечение процессов управления в механике

и машиностроении. Всероссийская научная конференция, Ярополец, 1994: Тез. докл. – М.: МАИ, 1994. - с.43-44.

29. *Дарных В.В., Карп К.А., Малышев В.В., Смушев А.Ю.* Параметрическая оптимизация квантили. // Известия Академии наук. Сер. Теория и системы управления. - 1996, № 1. - с.99-106.

30. *Дарных В.В., Малышев В.В.* Планирование управления съемочной аппаратурой системы космических аппаратов. // Известия Академии наук. Сер. Теория и системы управления. - 1998, № 6. - с.136-149.

31. *Дарных В.В., Малышев В.В.* Планирование оперативной коммутации каналов в низкоорбитальных системах спутниковой связи. // Известия Академии наук. Сер. Теория и системы управления. - 2000, № 6. – с.95-117.

32. *Дементьева Г.И., Куликова Л.И., Андронов Е.К., Андропова А.Д.* Основы систем и сетей связи. - М.: Радио и связь, 1988. - 222 с.

33. *Зинцов А.Е., Можяев Г.В.* Об одной задаче оптимизации движения системы спутников связи. // Задачи оптимизации сложных технических систем: Тематический сборник научных трудов МАИ. - М.: МАИ, 1990. - с.20-27.

34. *Калашиников Н.И.* Системы связи через искусственные спутники Земли. - М.: Связь, 1969. - 384 с.

35. *Кантор Л.Я., Минашин В.П., Тимофеев В.В.* Спутниковое вещание. - М.: Радио и связь, 1981. - 232 с.

36. *Кристофидес Н.* Теория графов: алгоритмический подход. - М.: Мир, 1978. - 432 с.

37. *Лебедев А.А., Бобронников В.Т., Красильщиков М.Н., Малышев В.В.* Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1985. - 280 с.

38. *Лебедев А.А., Малышев В.В., Карп К.А.* Системный анализ и управление в аэрокосмической технике. - М.: МАИ, 1995. - 52 с.

39. *Лебедев А.А., Нестеренко О.П.* Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. - М.: Машиностроение, 1991. - 224 с.

40. *Малышев В.В.* Методы оптимизации сложных систем. - М.: МАИ, 1981. - 84 с.

41. *Малышев В.В.* Системное проектирование и управление космическими комплексами. // Системный анализ и управление космическими комплексами. 4-я Международная конференция, Евпатория, 1999: Сборник трудов. – М.: МАИ, 1999. - с.3.

42. *Мальшев В.В., Дарных В.В.* Оптимизация программы функционирования бортовой аппаратуры спутников для съемки земных объектов. // II Международный аэрокосмический конгресс, Москва, 1997: Тез. докл. - М.: ЦНИИМаш, 1997.
43. *Мальшев В.В., Дарных В.В.* Оптимизация планирования процесса съемки земных объектов космической системой наблюдения. // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. VI Международный научно-технический семинар, Алушта, 1997: Труды. – М.: МАИ, 1997. - с.77-79.
44. *Мальшев В.В., Дарных В.В.* Применение маршрутизации для планирования оперативной коммутации каналов в космической системе связи. // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. VII Международный научно-технический семинар, Алушта, 1998: Труды. – М.: МАИ, 1998. - с.86-88.
45. *Мальшев В.В., Дарных В.В.* Об общем методическом подходе к планированию целевых операций в низкоорбитальных космических системах связи и наблюдения. // Системный анализ и управление космическими комплексами. 4-я Международная конференция, Евпатория, 1999: Сборник трудов. – М.: МАИ, 1999. - с.23-24.
46. *Мальшев В.В., Дарных В.В.* Планирование космических миссий: эпоха К.Э. Циолковского и современный этап. / Труды XXXIV научных чтений, посвященных разработке творческого наследия К.Э. Циолковского, секция “Проблемы ракетной и космической техники”. – Казань: Новое знание, 2001. - с.114-123.
47. *Мальшев В.В., Дарных В.В.* Комплексная методика оптимального планирования космических миссий. // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. VIII Международный научно-технический семинар, Алушта, 1999: Труды. – М.: МАИ, 1999. - с.339-341.
48. *Мальшев В.В., Карп К.А., Дарных В.В.* Алгоритм формирования оптимальных съемочных планов системы космических аппаратов. // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. VII Международный научно-технический семинар, Алушта, 1998: Труды. – М.: МАИ, 1998. - с.85-86.
49. *Мальшев В.В., Карп К.А., Дарных В.В.* Перспективные исследования низкоорбитальных систем спутниковой связи с применением специализированного программно-математического аппарата. // Системный анализ и управление космическими комплексами. Исследование и освоение космоса в наступающем веке. 5-я Международная конференция, Евпатория, 2000: Сборник трудов. – М.: МАИ, 2000. - с.61-62.
50. *Мальшев В.В., Красильщиков М.Н., Бобронников В.Т., Нестеренко О.П., Федоров А.В.* Спутниковые системы мониторинга. – М.: МАИ, 2000. – 568 с.

51. *Мальшев В.В., Моисеев Д.В.* Оперативное планирование процесса съемки земной поверхности с помощью автоматического ИСЗ. // Исследование Земли из космоса. - 1982, № 5. - с. 104-109.
52. *Мальшев В.В., Чернов Д.Э.* Планирование съемки наземных объектов системой автоматических искусственных спутников Земли. // Известия Академии наук. Сер. Теория и системы управления. - 1997, № 6. - с. 76-82.
53. *Майника Э.* Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. - М.: Мир, 1981. - 323 с.
54. *Машбиц Л.М.* Зоны обслуживания систем спутниковой связи. - М.: Радио и связь, 1981. - 169 с.
55. *Месарович М., Такахара Я.* Общая теория систем: математические основы. - М.: Мир, 1978. - 312 с.
56. *Механика космического полета* / Под редакцией В.П. Мишина. - М.: Машиностроение, 1989. - 408 с.
57. *Моисеев Д.В.* Планирование операций системы сбора информации с учетом ограничений на ее возможности. // Задачи оптимизации сложных технических систем: Тематический сборник научных трудов МАИ. - М.: МАИ, 1990. - с.4-8.
58. *Моисеев Д.В.* Целочисленное линейное планирование целевого функционирования ИСЗ наблюдения. // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. VIII Международный научно-технический семинар, Алушта, 1999: Труды. – М.: МАИ, 1999. - с.356-357.
59. *Невдяев Л.М., Смирнов А.А.* Персональная спутниковая связь. - М.: ЭкоТрендз, 1998. - 216 с.
60. *Основы синтеза систем летательных аппаратов* / Под редакцией А.А. Лебедева. - М.: Машиностроение, 1996. - 440 с.
61. *Проектирование и техническая эксплуатация сетей передачи дискретных сообщений. Учебник для высших учебных заведений* / Под редакцией Г.П.Захарова. - М.: Радио и связь, 1988. - 360 с.
62. *Радиосистемы межпланетных космических аппаратов* / Под редакцией А.С. Виницкого. - М.: Радио и связь, 1993. - 328 с.
63. *Рулев Д.Н., Шмаков С.В.* Описание и методика использования ресурсов при планировании полета орбитальной станции // Тезисы докладов XXXIV научных чтений, посвященных разработке творческого наследия К.Э. Циолковского. – Калуга, 1999. - с.34-35.
64. *Скобелев А.Г.* Определение порога протекания в конечных системах / ЦСКБ. – Деп. в ЦНТИ "Поиск". - Куйбышев, 1984, № 035-3405.

65. *Скребушевский Б.С.* Формирование орбит космических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1990. - 256 с.
66. *Соллогуб А.В.* Алгоритм оптимального планирования работы космических аппаратов. // Космические исследования. - 1983, № 1. - с.34-40.
67. *Соллогуб А.В., Аншаков Г.П., Данилов В.В.* Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: Математические модели повышения эффективности КА. - М.: Машиностроение, 1993. - 368 с.
68. "Союз-22" исследует Землю / Под редакцией Р.З.Сагдеева. - М.: Наука, 1980. - 231 с.
69. *Спутниковая связь и вещание.* Справочник / Под редакцией Л.Я. Кантора. - М.: Радио и связь, 1988. - 308 с.
70. *Спутниковая система индивидуальной связи "Иридиум"* / Межотраслевая информация в серии "Судовождение, связь и безопасность мореплавания". - М.: Мортехинформреклама, 1997, № 11. - с.10-14.
71. *Теория сетей связи* / Под редакцией В.Н.Рогинского. - М.: Радио и связь, 1981. - 284 с.
72. *Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В.* Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. - М.: Машиностроение, 1989. - 264 с.
73. *Ху Т.* Целочисленное программирование и потоки в сетях. - М.: Мир, 1974. - 520 с.
74. *Циолковский К.Э.* Исследование мировых пространств реактивными приборами (1903 г., 1911-1912 гг.) / Из книги "Ракета в космическое пространство". - М.: АН СССР, 1963. - с.11-97.
75. *Циолковский К.Э.* Космические путешествия / Из книги "Промышленное освоение космоса". - М.: Машиностроение, 1989. - с.155-165.
76. *Циолковский К.Э.* Будущее Земли и человечества / Из книги "Промышленное освоение космоса". - М.: Машиностроение, 1989. - с.207-225.
77. *Чернявский Г.М., Бартенев В.А.* Орбиты спутников связи. - М.: Связь, 1978. - 240 с.
78. *Darnopykh V., Malyshev V.* Perspectives of GLONASS\GPS Satellite System for Aerospace Navigation / Proceedings of The 9th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation.- Kansas City, USA, 1996. - pp. 1431-1440.
79. *Darnopykh V., Malyshev V.* Planning the Control of Survey Devices for a System of Satellites / Journal of Computer and Systems Sciences International (A Journal of Optimization and Control). - МАИК НАУКА / Interperiodica Publishing, 1998, Vol. 37, Num. 6. - pp. 957 – 969.

80. *Garton D., Frank H.* ROSAT mission planning and its perspectives for planning future scientific missions. - AIAA Pap., 1990, № 5092. - 6 pp.
81. *Malyshev V., Bobronnikov V.* Mission Planning for Remote Sensing Satellite Constellation. International Workshop on Mission Design and Implementation of Satellite Constellations, IAF. - Toulouse, France, 1997.
82. *Malyshev V., Bobronnikov V., Darnopykh V., Karp K., Krasilshikov M., Nesterenko O.* Ground Operations Methodology for LEO Satellite Constellation Deployment, Control/Maintenance and Replacement. Preliminary Report. - Moscow, 1996. - 172 pp.
83. *Malyshev V., Bobronnikov V., Darnopykh V., Shidlovsky A.* Space System Toolbox. Volume 7. Mission Planning. - Moscow, 1998. - 91 pp.
84. *Atkinson D., James M.* Applications of AI for automated monitoring: The SHARP system. - AIAA Pap., 1990, № 5054. - 9 pp.
85. *Hull L., Hansen E., Sparn T.* Distributed planning and scheduling for instrument and platform operations. - AIAA Pap., 1990, № 5090. - 10 pp.
86. *Wickler M., Zoehinger G.* Mission planning concept and system for MOMS-2P (and PRIRODA) / Mission Planning System Documentation. - DLR/GSOC, 1995, № M2P-GSO-G70-SP-001.
87. *Yoshioka T., Kato T., Wakakai T.* Mission scheduling expert system and its space station applications. - AIAA Pap., 1987, № 2221. - pp. 1-9.
88. *Darnopykh V., Malyshev V.* Planning of Operative Channel Commutation in Low-Orbit Satellite Communication Systems / Journal of Computer and Systems Sciences International (A Journal of Optimization and Control). - МАИК НАУКА / Interperiodica Publishing, 2000, Vol. 39, Num. 6. - pp. 929 – 950.
89. *Мальшев В.В., Дарных В.В.* Планирование экологического мониторинга земной поверхности системой дистанционного зондирования типа СВЕРС. // Труды XXXV научных чтений, посвященных разработке творческого наследия К.Э. Циолковского. – М.: ИИЕТ РАН, 2000. -с.63-64.
90. *Мальшев В.В., Дарных В.В.* Методика планирования целевого функционирования систем спутниковой связи и мониторинга. // Космос без оружия – арена мирного сотрудничества в XXI веке. Международная космическая конференция, Москва, 2001: Тез. докл. – М.: МАИ, 2001. - с.54.
91. *Дарных В.В.* Перспективы создания спутниковых систем с совмещенными функциональными возможностями. // Системный анализ и управление космическими комплексами. Международная конференция, Евпатория, 2002: Тез. докл.. – М.: МАИ, 2002.

92. *Мальшев В.В., Бобронников В.Т., Дарнопых В.В., Шидловский А.В.* Планирование целевого функционирования спутниковых систем мониторинга. Учебное пособие. – М.: МАИ, 2002. – 80 с.

93. *Станиловская В.И.* Принцип распределенного планирования при управлении полетом МКС. // Труды XXXVIII научных чтений, посвященных разработке творческого наследия К.Э. Циолковского. – Калуга: Эйдос, 2003. - с.54-55.

94. *Бобронников В.Т., Дарнопых В.В., Мальшев В.В., Шидловский А.В.* Автоматизация оперативного планирования и анализа эффективности целевого функционирования спутниковых систем мониторинга. // Космонавтика и ракетостроение. – 2003, № 4. – с.47-62.

Сведения об авторе

Дарных Валерий Витальевич, доцент кафедры системного анализа и управления Московского авиационного института (государственного технического университета)

к.т.н., с.н.с.

телефон: 158-41-97, 158-43-55, e-mail: darnorykh@mail.ru