

Л.Н. Лысенко, В.В. Бетанов, Ф.В. Звягин

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ**

Под общей редакцией
заслуженного деятеля науки РФ,
доктора технических наук, профессора Л.Н. Лысенко



Москва 2014

УДК 629.783
ББК 39.66
Л88

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *М.И. Макаров* (НИИ космических систем имени А.А. Максимова);
заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор *Д.А. Ловцов* (ОАО «ИТМ и ВТ имени С.А. Лебедева РАН»)

Лысенко Л. Н.

Л88 Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов / Л. Н. Лысенко, В. В. Бетанов, Ф. В. Звягин ; под общ. ред. Л. Н. Лысенко. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 518, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-3891-4

Систематизированно изложены современные теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения (БНО) космических полетов пилотируемых и беспилотных аппаратов, выводимых на околоземные и межпланетные орбиты.

Основное внимание акцентировано на формулировке предметной области, перечня и содержания задач БНО этапов планирования, баллистического обоснования и оперативного управления полетом.

Существенное внимание уделено выявлению тенденций развития и разработке методов и алгоритмов решения практических задач БНО, позволяющих на основе расширения функциональной структуры подсистем математического моделирования движения космических аппаратов (КА), в том числе на основе теории гало-орбит и орбит F-класса, определения параметров состояния КА, расчета требуемых коррекций орбит и характеристик оптимального управления маневрированием, реализовать концепцию гарантированного повышения гибкости и универсализации построения оперативного БНО.

Монография рассчитана на научных работников и специалистов в области космической баллистики и управления космическими полетами. Она может быть полезна для студентов старших курсов и аспирантов, а также адъюнктов и курсантов учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по соответствующим специальностям и направлениям подготовки.

УДК 629.783
ББК 39.66

Издается в авторской редакции.

© Лысенко Л.Н., Бетанов В.В.,
Звягин Ф.В., 2014
© Оформление. Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2014

ISBN 978-5-7038-3891-4

Предисловие

Предлагаемая вниманию читателя монография ставит своей целью изложение совокупности основных положений относительно нового, выделившегося в последние десятилетия в самостоятельное направление раздела космической баллистики, получившего наименование «баллистико-навигационное обеспечение космических полетов».

Термин «баллистико-навигационное обеспечение» (БНО) появился далеко не с начала космической эры, отсчитываемой с 4 октября 1957 г. — даты запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ), как это можно было бы логично предположить с высокой степенью достоверности. Более того, понятие БНО, впервые введенное в обиход баллистиками Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш) и их коллегами из организаций МО и АН СССР, а также проектно-конструкторских предприятий космической отрасли в 80-х годах прошлого века в течение еще достаточно длительного времени отнюдь не относилось к числу общепринятых и однозначно определенных. Даже многие профессионалы высокого уровня вкладывали и продолжают вкладывать в него различное понимание и различным образом расставляют акценты в постановках и решении входящих в БНО задач.

Кстати, и сегодня многие военные баллистики отдают предпочтение термину «навигационно-баллистическое обеспечение» (НБО), рассматривая в качестве приоритетной навигационную компоненту как исходную (первичную) при решении задач определения и прогнозирования вектора состояния космического аппарата (КА) по результатам измерений, используемых в виде соответствующих начальных условий.

Строго говоря, понятие «обеспечение» является условным, и оно недостаточно полно отражает существо решаемых задач получения и использования совокупности баллистических данных, необходимых для планирования и осуществления подготовки к старту, пуска и управления полетом беспилотного или пилотируемого КА, либо группировки аппаратов.

Исторически термин «обеспечение» был введен ракетными баллистами НИИ-4 МО по аналогии с понятиями «математического или программного обеспечений», характеризующими совокупность методик, алгоритмов и прикладных программ ЭЦВМ, используемых для решения баллистических задач, связанных с определением в процессе управления

полетом орбиты КА по результатам измерений текущих навигационных параметров (ИТНП), а также расчета данных на проведение различных динамических операций (таких как коррекция орбиты, наведение при сближении аппаратов, спуск с орбиты и т. п.).

Учитывая, однако, что понятие БНО (так же как и эквивалентное НБО) «устоялось» и является наиболее употребительным, а альтернативное и более удачное отсутствует, авторы не сочли возможным отказаться от него как в ранее опубликованных, так и в данной работе.

При всем том, подчеркивая очевидную неадекватность понятий «баллистико-навигационное обеспечение» и «программное обеспечение решения баллистико-навигационных задач», отметим, что наличие взаимосвязи этих понятий, хотя и косвенное, все же прослеживается. Эта взаимосвязь обусловлена используемыми техническими средствами, применяемыми при решении обсуждаемых задач.

В середине 50-х годов прошлого века, к которым относится зарождение космической баллистики как теоретической основы БНО КП, еще не существовало высокоэффективной вычислительной техники, требовавшейся для получения практически значимых решений.

Как следствие, разрабатываемое БНО должно было ориентироваться на допускающие ручной счет (в крайнем случае, использование счетно-решающих автоматов механического типа) упрощенные методики. Понятно, что широкое применение в то время получили графоаналитические методы расчета, реализуемые с помощью специальных планшетов и номограмм. Создание их требовало таланта, истинно русской смекалки, а зачастую и исключительной интуиции, поскольку при этом было необходимо совместить, вообще говоря, несовместимые требования достижения простоты использования и приемлемой точности вычислений.

С созданием в СССР первых образцов электронно-вычислительной техники появились новые возможности технической поддержки, а следовательно и новые по содержанию разработки БНО пусков РН и полета ИСЗ. Первые вычислительные центры (ВЦ), способные обеспечить решение более или менее серьезных задач, были созданы на базе ЭЦВМ «Стрела-1» с быстродействием порядка 2...3 тыс. операций в секунду. В апреле 1960 г. был введен в строй ВЦ НИИ-4 МО, оснащенный наиболее эффективной по тем временам вычислительной техникой: двумя трехадресными ЭЦВМ М-20 с быстродействием 20 тыс. операций в секунду.

В результате впервые возникла возможность создания программных комплексов для автоматизации вычислений при отработке пусков РН и обеспечении КП пилотируемых и беспилотных аппаратов, выводимых на орбиты ИСЗ, а также для формализации функций согласования работ, возлагаемых на координационно-вычислительные центры (КВЦ).

Расширение вычислительных возможностей технических средств привело к дальнейшему стремлению усложнения используемых математических

моделей и повышения уровня их адекватности реальным физическим процессам. Это потребовало уточнения моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) и ее атмосферы, влияния активности Солнца на вариации плотности верхних слоев атмосферы, параметров магнитного поля Земли, радиационных полей («поясов») и др.

На современном уровне развития БНО, занимающее одно из центральных мест в структуре существующих видов обеспечения управления КП, продуцирует следующую основную информацию:

- баллистическую схему полета, разрабатываемую из условия надежного решения целевых задач с наименьшими затратами;
- параметры расчетной траектории выведения и орбиты КА, определяемые принятой баллистической схемой полета и текущими условиями;
- параметры фактической орбиты, эфемериды, трассу спутника («след» орбиты на поверхности Земли), данные на спуск КА с орбиты, рассчитываемые заранее, а также оперативно по результатам измерений текущих навигационных параметров и их прогнозируемые значения на текущий момент времени;
- параметры планируемых маневров и коррекций орбиты в виде физических величин и уставок (времена включения, продолжительность работы двигателя и направление его тяги), данные на сближение и сборку КС на орбите, желательную ориентацию КА для различных этапов его функционирования;
- планирование и результаты решения навигационных задач;
- баллистическую информацию, необходимую для оперативного планирования полета (периоды радиовидимости, условия освещенности интервалов орбиты и/или трассы, время существования КА на орбите, условия сближения, восполнения структуры группировки или облета других КА, условия наблюдения поверхности Земли и небесной сферы);
- баллистические данные, необходимые для проведения научных исследований и экспериментов;
- целеуказания для наведения антенн наземных станций и антенных радиосистем КА, КС или АМС на наземные станции и спутники-ретрансляторы;
- данные по выявлению влияния неучитываемых возмущающих факторов, наличия многочисленных ограничений, установочных параметров для бортовой аппаратуры, а также данные соответствия характеристик бортовых и наземных систем заданным тактико-техническим требованиям и др.

Перечень перечисленных элементов информационного обеспечения КП составляет в основном содержание специального раздела космической баллистики, условно называемого «исполнительной баллистикой». В отличие от содержания наиболее часто обсуждаемой в литературе «проектной баллистики», ориентированной на баллистическое обоснование и выработку летных проектных параметров космических средств и систем, исполнительная баллистика предназначена, прежде всего, для гарантированного достижения

полноценного функционирования уже выведенного в космическое пространство конкретного ИСЗ, а также ЦУПа и наземного комплекса управления в целом. Таким образом, содержание раздела исполнительной баллистики при единстве базовых положений теории отличается от теоретических построений раздела баллистического проектирования главным образом своим назначением, ориентированным на обеспечение КП во взаимодействии реального КА с наземными средствами, бортовыми системами и Центрами обработки информации. В связи с этим многие условности, а также сознательно вводимые упрощения («загрубления») используемых математических моделей, часто применяемые при разработке методов баллистического проектирования, в исполнительной баллистике не допустимы.

Здесь требуется достичь максимальной точности расчета и, по возможности, гарантировать наивысший уровень адекватности математических моделей реальным физическим процессам. Именно по этой причине изначально принималось, что в рамках специального математического обеспечения (СМО), составляющего «каркас» БНО, должны разрабатываться математические модели, алгоритмы решения краевых и оптимизационных задач, а также соответствующие комплексы программно-алгоритмического обеспечения (ПАО), являющиеся инструментарием БНО, достаточно тесно «привязанные» к конкретной конструкции КА и принятой схеме управления полетом.

В условиях применения в качестве вычислительных средств ЭЦВМ коллективного пользования с достаточно низкой производительностью, объемом оперативной памяти порядка 20 кБ и с гарантированным временем бесбойной работы не более 20...30 мин, стремление к универсализации либо хотя бы к унификации ПАО не только не могло приветствоваться, оно не могло найти понимания даже в принципе.

Ситуация, безусловно, несколько улучшилась с переходом на более высокий класс ЭЦВМ типа М-220 и БЭСМ-6, а затем и более современные для того времени «Эльбрусы». Здесь уже появилась возможность объединения родственных задач БНО, совершенствования логики их решения, унификации подготовки исходных данных и представления результатов счета. Но в целом она продолжала оставаться прежней. Это обстоятельство являлось определяющим применительно к разработке концепции создания общей теории БНО и методологии его развития в течение нескольких десятилетий.

Ничем другим невозможно объяснить то обстоятельство, что при абсолютном и однозначном понимании теснейшей связи баллистического и навигационного обеспечений всеми без исключения специалистами в области оперативного управления КП, в издаваемой практически вплоть до середины 80-х годов XX в. специальной литературе ее авторы ориентировались на реализацию:

- принципа декомпозиции задач баллистического и навигационного обеспечений, раздельно рассматривая эти вопросы и предпочитая ограничиваться независимым развитием разделов соответствующих теорий;

- подхода, связанного с описанием накопленного опыта решения конкретных задач БНО применительно к уже реализованным частным, хотя и очень важным, а зачастую и судьбоносным космическим программам, но имеющим отношение только к конкретным типам КА без попыток изложения обобщений даже на уровне их первых приближений.

Ситуация в корне изменилась с появлением ПЭВМ и отказа от централизованной схемы построения вычислительных комплексов ЦУПов. Переход к структуре кластеров специализированных серверов с периферийными рабочими местами практически снял технические ограничения на размерности решаемых задач и степень возможной детализации комплексов ПАО.

С этого момента начали появляться первые попытки изложения теоретических основ БНО. При этом, как это ни странно, в качестве инициаторов таких работ выступали не практикующие разработчики БНО, а авторы учебных изданий главным образом двух ведущих академий Министерства обороны, а именно ВА им. Ф.Э. Дзержинского (позднее ВА РВСН им. Петра Великого) и ВИКИ (ВКА) им. А.Ф. Можайского, а также ряда гражданских вузов, прежде всего МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественно, выносимые ими на обсуждение вопросы имели, по очевидным причинам, в большей степени методический характер.

Если ограничиться обсуждением абстрактно-научной стороны вопроса, рискнем предположить, что побудительная причина развития фундаментальной теории БНО неразрывно связана с формулировкой и введением в обиход практики космической деятельности понятия наблюдаемости как фундаментального свойства динамических систем общего назначения.

Это обстоятельство особенно наглядно прослеживается на примере решения задач планирования космического полета, включающих в себя взаимосвязанные проблемы комплексного анализа путей выбора моделей движения, состава измеряемых параметров, оптимального распределения измерений в пространстве и времени, метода обработки результатов измерений и их оперативного использования в процессе управления полетом.

При анализе и оценке такого типа задач возникает вопрос существования и единственности решения подзадачи определения вектора оцениваемых параметров движения по вектору измеряемых параметров. Причем этот вопрос имеет не столько математическую, сколько практическую значимость в силу того обстоятельства, что при раздельном рассмотрении проблем баллистического и навигационного обеспечений часто приходится сталкиваться с ситуацией оперирования несогласованными между собой моделями состояния и измерений.

Как известно, условие, при котором существует единственное решение задачи определения и анализа движения, называется условием наблюдаемости, а сам термин «наблюдаемость» в применении к динамическим системам был введен Р. Калманом.

Понимание перспективности использования теоретических основ общей теории систем и, в частности, свойства «наблюдаемости» как основы развития фундаментальной теории БНО, пожалуй, впервые возникло, по крайней мере у титульного редактора данной работы, около сорока лет назад в процессе обсуждения соответствующей проблемы с авторами рецензируемой им монографии «Основы экспериментальной космической баллистики» (В.Н. Брандин, А.А. Васильев, С.Т. Худяков / Под ред Д.А. Погорелова. — М. : Машиностроение, 1974 г.). Указанная работа являлась, по существу, одной из первых отечественных работ, в которых делалась попытка рассмотрения результатов решения задач экспериментальной космической баллистики (фактически, фрагментарного изложения основ исполнительской космической баллистики) с общесистемных позиций.

Тем не менее, несмотря на значительный срок, прошедший с момента выхода в свет указанной приоритетной работы, практически сколь-нибудь полных попыток изложения фундаментальных основ БНО в научно-технической литературе не предпринималось.

Вместе с тем, как показывает анализ накопленной за годы существования практической космонавтики информации, содержание и структура процесса управления КП обладают определенной общностью для реальных КА различного назначения, что дает основание считать задачу формулировки и системного изложения общих фундаментальных основ разработки БНО не безнадежной.

Отдавая себе отчет в сложности поставленной задачи, авторы настоящей работы тем не менее сочли возможным предпринять такую попытку.

По своему содержанию материалы, включенные в монографию, подразделены на четыре раздела.

Главы 1, 2, 3 первого раздела ставят своей целью формулировку предметной области БНО как одной из задач практической организации управления полетом конкретного типа КА, рассмотрение общесистемных аспектов информационного обеспечения функционирования автоматизированных систем управления (АСУ) КП и путей повышения эффективности реализуемых в них технологий управления, методов и средств организации управления технологическими циклами БНО как средством автоматизации управления при интегрированном использовании наземного и бортового комплексов.

Второй раздел (главы 4 и 5) посвящен изложению теоретических основ синтеза моделей динамических систем БНО.

В главах третьего раздела (главы 6 — 11) основное внимание уделяется обсуждению современных воззрений на содержание и структуризацию СМО околоземных космических полетов применительно к различным этапам и реализуемым схемам траекторного и орбитального движения РН и КА, а также нестандартных задач определения движения КА по измерениям текущих навигационных параметров, в том числе в условиях неопределенности и не-

корректности постановки задачи оперативного определения вектора состояния КА по результатам измерений.

Наконец, материалы четвертого раздела (главы 12 — 14) посвящены решению некоторых задач разработки и изложению теоретических основ БНО межпланетных космических полетов как в классической постановке, предполагающей использование кеплеровой схемы аппроксимации реальных орбит, так и модельных схем гало-орбит и орбит F-класса.

Работа над монографией распределялась между членами авторского коллектива следующим образом. Л.Н. Лысенко написаны предисловие, введение, главы 1, 4, 8, 9; В.В. Бетановым — главы 6, 10, 11; Ф.В. Звягиным — глава 14. Главы 2, 3, 5, 7 написаны В.В. Бетановым и Л.Н. Лысенко совместно.

Подготовка материала п. 7.7 главы 7 осуществлена В.В. Бетановым совместно с д-рами техн. наук Г.Г. Ступаком и А.А. Поваляевым, любезно разрешившими использовать его в данной монографии.

Главы 12 и 13 написаны Л.Н. Лысенко совместно с Ф.В. Звягиным.

Научное редактирование текста рукописи осуществлено Л.Н. Лысенко.

При написании книги авторы использовали частично переработанные опубликованные ими ранее материалы, полное содержание которых читатель найдет в первоисточниках, указанных в списке литературы.

Апробация отдельных теоретических результатов была осуществлена в процессе чтения авторами курсов лекций и выполнения научных исследований, проводимых на кафедрах «Теория полета и подготовка данных» ВА РВСН им. Петра Великого, а также «Баллистика и аэродинамика», получившей позднее наименование кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Последний, завершающий этап работы осуществлялся в рамках исследований, предусмотренных соответствующим грантом Министерства образования и науки РФ (НИР рег. № 7.4994.2011).

Таким образом, предлагаемая читателю работа представляет собой итог весьма существенного и длительного этапа деятельности авторов.

В процессе ее написания авторы имели возможность консультироваться и обсуждать содержание книги со многими ведущими специалистами, в том числе с теми, кто стоял у истоков создания отечественного БНО КП. Некоторые из них, к нашему огромному сожалению, не дождалась выхода в свет данной работы. Это делает их воспоминания, оценки и рекомендации тем более бесценными. Всем им авторы выражают свою искреннюю благодарность за поддержку и помощь.

Определенный вклад в совершенствование содержания рукописи внесли уважаемые рецензенты, которым авторы весьма признательны за внимание и доброжелательную критику.

Большой труд в подготовку компьютерного варианта макета рукописи и ее оформление внесли Н.А. Шевелкина и Н.И. Аникеева.

Понятно, что без поддержки (прежде всего финансовой) руководства Университета в лице его ректора — д-ра техн. наук, проф. А.А. Александрова и президента МГТУ — акад. РАН, проф. И.Б. Федорова шансы на издание рукописи могли оказаться не слишком высокими. Понимая это, авторы не считают возможным ограничиться лишь констатацией данного факта. Внимательное отношение и высокая оценка ими знаний и профессионализма авторов явились существенным стимулом в выполнении задуманного.

В заключение авторы хотели бы отметить, что написание книги, особенно на завершающем этапе ее отработки, потребовало детального совместного обсуждения всех включенных в монографию материалов. Поэтому, хотя каждый из авторов внес свой посильный вклад в написание работы (смотри выше), они сочли возможным возложить на себя солидарную ответственность за ее содержание.

Наконец, авторам небезразлична оценка предлагаемой книги не только коллегами, но и всеми читателями, посчитавшими уместным потратить время на ознакомление с ней.

Поэтому авторы будут благодарны всем, кто сочтет нужным сделать замечания и высказать пожелания по содержанию книги. Отклики просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Условные обозначения

Строчные, выделенные полужирным шрифтом буквы обозначают векторы: \mathbf{x} , \mathbf{u} . Строчечная и столбцевая формы записи вектора в общем случае не различаются. Если такое различие существенно, в тексте специально оговаривается, какая форма представления вектора употребляется. Выделенные полужирным шрифтом прописные буквы и частные производные суть матрицы: \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} и $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{u}$.

Скалярные или векторные функции скалярных или векторных переменных обозначаются заключением аргумента в скобки: $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$. В общем случае функция указывается совместно с промежутком, на котором она определена: $\mathbf{u}(t)$, $t_0 \leq t \leq t_K$.

Множества обозначаются прямой прописной буквой русского или латинского алфавита.

В работе приняты следующие обозначения:

- V — скорость полета (движения)
- m — масса притягивающего тела, масса КА
- \mathbf{m} — математическое ожидание вектора измеряемых переменных
- M — масса Земли, оператор математического ожидания
- M — средняя аномалия
- μ — гравитационный параметр
- g — ускорение свободного падения
- g_0 — ускорение свободного падения на поверхности сферической Земли
- R — радиус гравитирующего тела, радиус поверхности сферической Земли
- R_e — экваториальный радиус Земли
- $\mathbf{R}(t)$ — корреляционная матрица вектора ошибок измерений
- U — потенциал сил притяжения (потенциальная функция)
- r — расстояние от центра Земли до текущей точки
- r_{ij} — коэффициент корреляции
- h — текущая высота полета КА над поверхностью планеты
- \mathbf{h} — вектор ошибок измерений
- H — высота орбиты, функция Гамильтона (гамильтониан)
- ρ — плотность атмосферы на высоте h , модуль радиус-вектора, определяющего относительное расстояние

- ρ_0 — плотность атмосферы на уровне Мирового океана
 α — сжатие земного эллипсоида, прямое восхождение
 φ — широта текущей точки, угол асимптоты гиперболы
 λ — долгота текущей точки, модуль вектора неособенных переменных, коэффициент интерполяционного полинома, модуль вектора характеристик модели
 u — истинная аномалия
 δ — склонение
 θ — угол наклона траектории к местному горизонту (траекторный угол)
 Ψ — курсовой угол
 ω — аргумент перигея, угловая орбитальная скорость КА на круговой орбите
 u — аргумент широты
 i — наклонение плоскости орбиты
 Ω — восходящий узел
 p — фокальный параметр орбиты
 e — эксцентриситет орбиты
 a — большая полуось орбиты
 τ — время прохождения КА через перицентр (перигей)
 t — время, независимая переменная
 $T_{\text{сущ}}$ — время существования КА на орбите
 P — тяга двигателя
 $P_{\text{уд}}$ — удельная тяга
 $\mathbf{P}(t)$ — ковариационная матрица оценивания переменных состояния
 U_e — эффективная скорость истечения газов
 I, J — критерий качества, весовая функция, функция штрафа, момент инерции аппарата
 \mathbf{U}^m — m -мерная допустимая область изменения значений управляющих переменных
 $\mathbf{u}(t)$ — вектор управления (управление)
 \mathbf{X}^n — n -мерная допустимая область изменения значений переменных состояния
 $\mathbf{x}(t)$ — вектор состояния, компоненты которого (x_i) суть текущие (в частном случае фазовые) координаты
 $\mathbf{y}(t)$ — вектор наблюдаемых координат (переменных)
 $\boldsymbol{\eta}$ — вектор возмущений
 \mathbf{z} — вектор измерений

- σ — среднее квадратическое отклонение (СКО)
G — матрица Грама
 G — модуль силы тяжести (вес) КА
 $p(\mathbf{h})$ — плотность вероятности ошибок измерений
q — вектор неизвестных постоянных параметров модели
 \mathbf{K}_t — корреляционная матрица
K — матричный коэффициент усиления
 X_a — аэродинамическая сила лобового сопротивления
 C_b — баллистический коэффициент
 C_{xa} — коэффициент аэродинамической силы лобового сопротивления
 h_a — высота в апоцентре
 S — площадь миделевого сечения (индекс «М»), площадь зоны радиовидимости (индекс «ЗРВ»)
Φ — переходная, либо фундаментальная, матрица системы
 n — среднее движение
 E — эксцентрическая аномалия
E — единичная матрица
 $\mathcal{E}(v)$ — элемент орбиты (в функции истинной аномалии)
 ε — ошибка; бесконечно малая величина, окрестность области
 Δ — приращение, отклонение какой-либо величины

Верхние индексы

- (в) — верхнее значение
 (н) — нижнее значение
 t — индекс транспонирования вектора или матрицы
 -1 — знак обратной величины
 нав — навигационный

Нижние индексы

- z — земной
 доп — допустимый
 пр — продольный, программный
 к — конечный
 0 — обозначает начальные значения параметров движения
 эф — эффективный
 тек — текущий
 ном — номинальный
 opt — оптимальный
 min — минимальный

- max — максимальный
 Σ — суммарный
п. н — полезная нагрузка
а — апоцентр
 π — перицентр
г — географическая
гц — геоцентрическая (широта)

Остальные принятые в работе обозначения приводятся в тексте по мере их появления.

Список основных сокращений*

АББД	— автоматизированный банк баллистических данных
АМС	— автоматическая межпланетная станция
АОИ	— аппаратура обмена информацией
АС БНО	— автоматизированная система баллистико-навигационного обеспечения
АСИТО	— автоматизированная система информационно-телеметрического обеспечения
АСКПО	— автоматизированная система командно-программного обеспечения
АСОИ	— автоматизированная система обмена информацией
АСУ КП	— автоматизированная система управления космическим полетом
БА	— бортовая аппаратура
БВК	— бортовой вычислительный комплекс
БД	— база данных
БДЗ	— база данных и знаний
БИ	— буфер измерений
БИС	— бортовая информационная система
БКАУ	— бортовой комплекс автоматического управления
БКУ	— бортовой комплекс («контур» для схемных решений) управления
БНО	— баллистико-навигационное обеспечение
БО	— баллистическое обеспечение
БСП	— баллистическая схема полета
БЦ	— баллистический центр
БЦВМ	— бортовая цифровая вычислительная машина
БЭС	— баллистическая экспертная система
ВТИ	— внешнетраекторные измерения
ВТО	— вторичная обработка информации
ВЦ	— вычислительный центр
ГОГУ	— главная оперативная группа управления

* В список включены общепринятые и наиболее часто используемые в книге сокращения. Расшифровка вспомогательных сокращений приводится непосредственно в тексте.

ГПЗ	— гравитационное поле Земли
ДОС	— долговременная орбитальная станция
ДПО	— двигатели причаливания и ориентации
ЗРВ	— зона радиовидимости
ИВК	— информационно-вычислительный комплекс
ИД	— исходные данные
ИП	— измерительный пункт
ИРС	— интегрированный Российский сегмент МКС
ИСЗ	— искусственный спутник Земли
ИТНП	— измерение текущих навигационных параметров
ИТО	— информационно-телеметрическое обеспечение
КА	— космический аппарат
КВМ	— координатно-временные методы
КВЦ	— координатно-вычислительный центр
КГС	— коэффициент глобальной связи
КДО	— контрольно-диагностическое обеспечение
КИК	— командно-измерительный комплекс
КИП	— командно-измерительный пункт
КИС	— командно-измерительные средства
КК	— космический корабль
КМ	— координатные методы
КП	— космический полет
КПИ	— командно-программная информация
КПО	— командно-программное обеспечение
КПУ	— командно-программное управление
КРЛ	— командная радиолиния
КС	— космическая станция
ЛКИ	— летно-конструкторские испытания
ЛПР	— лицо, принимающее решение
МКС	— Международная космическая станция
ММД	— математическая модель движения
МНК	— метод наименьших квадратов
МО	— математическое обеспечение, математическое ожидание, Министерство обороны
МЦИ	— массив цифровой информации
НАКУ	— наземный автоматизированный комплекс управления
НБЗ	— навигационно-баллистическая задача
НИП	— наземный измерительный пункт
НКУ	— наземный комплекс (контур) управления
НСС	— начало сеанса связи
НУ	— начальные условия
ОВС	— определение вектора состояния

ОК	— орбитальный комплекс
ОМО	— общее математическое обеспечение
ОнкЗ	— обобщенная некорректная задача ОПД КА
ОНП	— обобщенные наблюдаемые параметры
ОПД	— определение параметров движения
ОПП	— оперативный план полета
ОПС	— орбитальная пилотируемая станция
ОС	— орбитальная станция, операционная система, операционная среда
ОУ	— операция управления
ПАО	— программно-алгоритмическое обеспечение
ПБО	— подсистема баллистического обеспечения
ПВО	— первичная обработка информации
ПВМ	— программно-временные методы
ПВУ	— программно-временное управление
ПДЦМ	— параметры движения центра масс КА
ПЗС	— план задействования средств НКУ
ПК	— персональный компьютер
ПМО	— программно-математическое обеспечение
ПО	— программное обеспечение, полетная операция
ПРО	— предварительная обработка информации
ПС	— полиномиальная среда
ПЭВМ	— персональная ЭВМ
РКО	— радиоконтроль орбиты
РН	— ракета-носитель
СА	— спускаемый аппарат
САС	— система аварийного спасения
СБИ	— система бортовых измерений, стандартная баллистическая информация
СДУ	— система дифференциальных уравнений
СЕВ	— служба единого времени
СКДУ	— сближающе-корректирующая двигательная установка
СКО	— среднее квадратическое отклонение
СМО	— специальное математическое обеспечение
СМЦИ	— совокупность массивов цифровой информации
СНУ	— система нормальных уравнений
СП	— суточная программа
СП КПИ	— система передачи КПИ
СПО	— специальное программное обеспечение
СПП	— суточная программа полета
СР	— спутник-ретранслятор
СС	— сеанс связи

ССКУ	— спутниковая система контроля и управления
ССС	— система спутниковой связи
СУ	— система управления
СУБА	— система управления бортовой аппаратурой
СУБД	— система управления базой данных
СУБК	— система управления бортовым комплексом
СУД	— система управления движением
СУДН	— система управления движением и навигации
СУУ	— система условных уравнений
ТГУ	— технологический график управления
ТДУ	— тормозная двигательная установка
ТК	— транспортный корабль
ТМИ	— телеметрическая информация
ТМО	— телеметрическое обеспечение
ТНП	— текущие навигационные параметры
ТО	— технологическая операция
ТП	— технологический процесс
ТУ	— технология управления
ТУЗ	— таблица узловых значений
ТЦ	— технологический цикл
ТЦУ	— технологический цикл управления
УИВК	— управляющий информационно-вычислительный комплекс
ФМ	— функциональный модуль
ФПС	— функциональная подсистема
ФЯ	— функциональное ядро
ЦБД	— центральная база данных
ЦБЗ	— целевая баллистическая задача
ЦВМ	— цифровая вычислительная машина
ЦИ	— цифровая информация
ЦМ	— целевой модуль, центр масс
ЦУ	— целеуказание
ЦУП	— Центр управления полетами
ЭВМ (ЭЦВМ)	— электронная (цифровая) вычислительная машина
ЭС	— экспертная система
ЭТД	— эксплуатационно-техническая документация
ЯП	— язык программирования

Введение

Хотя понятие «баллистико-навигационное обеспечение» появилось, как уже отмечалось в предисловии, много позже осуществления первых полетов в космос и уж тем более первых пусков баллистических ракет дальнего действия (БРДД), понимание необходимости разработки отсутствующих сведений и теоретических положений, являющихся источником исходной баллистической информации для решения задач управления полетом конкретного типа БРДД или РН КА, возникло задолго до начала эры «практической космонавтики».

В 1946 г. советским правительством было принято Постановление № 1017-419 от 13 мая 1946 г. о создании ракетостроительной промышленности страны, сыгравшее определяющую роль в развитии ракетного вооружения дальнего радиуса действия, а впоследствии и отечественной космонавтики.

Этим постановлением в Подлипках (ныне г. Королев) предписывалось создать головной ракетный научно-исследовательский институт НИИ-88 Министерства вооружения, начальником которого вскоре был назначен генерал-майор артиллерии Л.Р. Гонор, а главным инженером Ю.А. Победоносцев. Кстати, Юрий Александрович Победоносцев, в прошлом ГИРДовец, с 1943 по 1946 г. работал профессором-совместителем кафедры «Проектирование боеприпасов» факультета «Н» МВТУ им. Н.Э. Баумана, затем исполнял обязанности заведующего кафедрой «Реактивное вооружение» (1946—1947), а с 13 июля 1948 г., уже будучи главным инженером НИИ-88, — зав. кафедрой (по совместительству) РТ-2 «Проектирование ракет с жидкостными ракетными двигателями». Заместителем главного инженера НИИ-88 стал одновременно возглавлявший отдел систем управления этого института и тесно сотрудничавший с МВТУ Борис Евсеевич Черток, впоследствии Герой Социалистического Труда, академик РАН. Сергей Павлович Королев руководил отделом № 3 СКБ института и был утвержден главным конструктором автоматически управляемых БРДД. Он же возглавил Совет Главных конструкторов.

Первый пуск БРДД (из числа собранных на опытном заводе НИИ-88 из агрегатов и деталей ФАУ-2, вывезенных группой советских специалистов из Восточной Германии в августе 1945 г.) состоялся 18 октября 1947 г. в 10 часов 47 минут с полигона Капустин Яр. Причем баллистика ФАУ-2 была воспроизведена еще в Германии отечественными специалистами С.С. Лавровым и Р.Ф. Аппазовым на основе реконструированных разрозненных материалов

ракетного наследия рейха, обнаруженных группой, руководимой В.П. Мишиным. Совместно с С.С. Лавровым и Р.Ф. Аппазовым в работе по восстановлению баллистики ФАУ-2 принимал участие и доктор В. Вольф — главный баллистик фирмы «Крупп», руководивший в Германии работами по созданию таблиц стрельбы ФАУ-2. После возвращения из Германии С.С. Лавров возглавил сектор баллистики третьего отдела НИИ-88. Р.Ф. Аппазов со своей группой входил в состав указанного сектора. Расчет уставок («установок») по восстановленным таблицам стрельбы при опытных пусках ракет ФАУ-2 проводился под контролем сотрудников отдела № 3 СКБ НИИ-88 немецкими специалистами, вывезенными из Германии.

Став главным конструктором БРДД, а затем и руководителем ОКБ-1, С.П. Королев вынужден был возложить на себя огромный груз организационно-хозяйственных, кадровых и других сопутствующих проблем, значительно затрудняющих проведение собственных научных разработок. Кроме того, как человек, обладающий государственным мышлением, он отлично понимал, что время гениальных ученых-одиночек, например, уровня К.Э. Циолковского, давно прошло. Необходимо было создавать научные коллективы, способные комплексно решать сложнейшие научные проблемы, формулировку которых Главный конструктор должен был оставить за собой, как лидер, обогнавший по объему знаний, пониманию целей и задач, а также степени научно-технического предвидения своих коллег и ближайших соратников.

Об уровне БО БРДД того времени можно судить, прежде всего, по опубликованному сначала в секретном варианте, а затем в открытом в издательстве «Наука», 1966 г., фундаментальному труду сотрудников ОКБ-1 С.С. Лаврова, Р.Ф. Аппазова и В.П. Мишина [3].

Если при создании БО пусков первых БР, как отмечалось, был широко использован опыт немецких баллистиков, то создание БО, а тем более БНО космических полетов практически осуществлялось отечественными специалистами «с нуля».

Инициатором проведения широкого спектра фундаментальных теоретических исследований по ракетодинамике и космической баллистике по праву принято считать М.В. Келдыша. По его инициативе и при непосредственном участии уже с 1948 г. сначала в руководимом им отделе прикладной механики (ОПМ) Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР (МИАН), а затем в Институте прикладной математики (ИПМ) АН СССР в отделе, возглавляемом Д.Е. Охоцимским, были выполнены работы, оказавшие значительное влияние на развитие отечественной ракетно-космической техники.

Первые, ставшие известными неограниченному числу лиц результаты, позволившие улучшить летные характеристики РН Р-7, были получены в области оптимального программного управления движением носителя; впоследствии они послужили теоретической основой многих дальнейших исследований и разработок.

После запуска первого ИСЗ фронт руководимых М.В. Келдышем работ в ОПМ МИАН существенно расширился и в последующие годы в теории космических полетов практически не осталось актуальных на тот период проблем, в той или иной степени не принятых к рассмотрению «командой Келдыша», как называли группу ближайших сподвижников «Главного теоретика космонавтики», среди которых ведущую роль играли Д.Е. Охоцимский, Т.М. Энеев, С.С. Камынин, В.А. Егоров, а несколько позднее — Э.Л. Аким, В.В. Белецкий, А.К. Платонов, М.Л. Лидов и другие.

Значительную роль в решении задач практической разработки БО орбитальных полетов на начальном этапе освоения космического пространства сыграл коллектив 4-го научно-исследовательского института Министерства обороны (НИИ-4 МО), организованного в 1946 г. Этот НИИ в определенной степени выполнил функции «инкубатора кадров» в области баллистического обеспечения космических полетов.

Первые шаги, связанные с зарождением космической баллистики в НИИ-4, были обусловлены деятельностью М.К. Тихонравова, возглавлявшего в то время научное направление баллистики жидкостных БР.

Именно под его патронажем начала функционировать группа энтузиастов освоения космоса. В начале 1950-х годов членами этой группы, по существу в инициативном порядке, был проведен ряд исследований, оформленных в виде отчетов по НИР, направленных в ОКБ-1 С.П. Королеву, в которых рассматривались проблемы баллистики РН, выполненных по пакетной («составной») схеме, способных вывести полезную нагрузку на орбиту ИСЗ. Ознакомление с этими материалами дало основание С.П. Королеву официально заказать начатую в 1954 г. в НИИ-4 НИР «Исследования по вопросу создания искусственного спутника Земли». В этой НИР впервые было дано обоснование возможности создания БО ракет с межконтинентальной полетной дальностью (порядка 8...10 тыс. км) при одновременном использовании его в качестве БО РН ИСЗ.

Потребовалось, однако, несколько лет, прежде чем полуобщественная деятельность энтузиастов военного НИИ была введена в рамки жесткой административной структуры. Действительно, только в мае 1956 г. в НИИ-4 была создана первая в стране специализированная лаборатория космической баллистики, начальником которой был назначен П.Е. Эльясберг. Последний оказал определяющее воздействие на развитие обсуждаемого научного направления, одним из лидеров которого он по праву считался в период зарождения и создания БО оперативного управления полетом первых ИСЗ.

Идеальным обобщением этого этапа создания БО явилась монография П.Е. Эльясберга [106], вышедшая в свет в издательстве «Наука» только в 1965 г. после детальной отработки материала лекционного курса, читавшегося им на заочном четырехгодичном инженерном потоке механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Наряду с именами М.К. Тихонравова, С.С. Лаврова, П.Е. Эльясберга, Д.Е. Охоцимского, Т.М. Энеева, в числе тех, кто стоял у истоков непосредственного создания БО пусков первых ИСЗ, должны быть названы имена И.М. Яцунского, В.Д. Ястребова, И.К. Бажинова, А.В. Брыкова, О.В. Гурко, Г.Ю. Максимова, К.П. Феоктистова, М.Д. Кислика, первых руководителей КВЦ на базе НИИ-4 МО Г.А. Тюлина, Ю.А. Мозжорина, Г.С. Нариманова, а также многих других, не получивших широкой известности, но от того не менее уважаемых за свой вклад в общее дело.

Подготовка к первому пилотируемому полету в космос Ю.А. Гагарина в апреле 1961 г. потребовала реализации ряда дополнительных мер по повышению надежности как самого БНО, так и осуществляемых на его основе баллистических расчетов. Технология БНО непрерывно совершенствовалась. Его отработка предварительно осуществлялась в процессе пяти беспилотных пусков первых КК модификации «Восток», причем четвертый и пятый — проводились по программе, принятой для полета пилотируемого корабля.

Выбор параметров орбиты был определен строго из тех соображений, что жизнеобеспечение на КК «Восток» было рассчитано на предельный срок в 10 суток. В связи с этим, следуя стремлению повышения вероятности возвращения космонавта на Землю, орбита выбиралась таким образом, чтобы время баллистического существования КА в самом наихудшем случае (наименее возможная реальная плотность атмосферы в процессе полета) не превышало 8 суток. Наряду с требованием по срокам баллистического существования КК, ставилась задача гарантированного его приземления за счет только аэродинамического торможения спускаемого аппарата в случае отказа ТДУ на безопасную для пребывания космонавта территорию.

Управление спуском в нештатной ситуации, обусловленной несрабатыванием ТДУ, предполагало ручную переориентацию аппарата для изменения эффективной площади его поперечного сечения, нормального к набегающему потоку разреженной атмосферы.

Программа разворотов должна была обеспечить вход КК в плотные слои атмосферы на витках, проходящих над территорией СССР.

Основные проблемы, с которыми столкнулись разработчики БНО первого пилотируемого полета, свелись главным образом к следующему:

- неопределенность в знании параметров плотности атмосферы в процессе реального полета;
- невозможность точной практической реализации орбиты по отношению к выбранной номинальной в силу весьма значительных ошибок выведения;
- неточность знания ГПЗ, в результате чего погрешности привязки РТС определялись для европейской части СССР десятками метров, а удаленных от европейской части НИПов — сотнями метров;
- наличие существенных погрешностей измерения параметров орбиты используемыми измерительными средствами;

- низкая производительность, малые объемы памяти и невысокая надежность вычислительной техники.

Естественно, были предприняты шаги для нивелирования возможных негативных последствий указанных факторов.

В ВЦ НИИ-4 МО для непосредственного БНО полета была создана оперативная баллистическая группа во главе с В.Д. Ястребовым. При головной роли ВЦ НИИ-4 МО в качестве дублирующих были задействованы все существовавшие на тот период крупные ВЦ, прежде всего АН и МО СССР.

В процессе подготовки к запуску были отработаны и протестированы программы решения основных задач БНО полета. Было «отрепетировано» взаимодействие с измерительными пунктами (ИП). Определены принципы дублирования наиболее ответственных расчетов в ВЦ НИИ-4 и их сверки с результатами, полученными в дублирующих ВЦ. Была разработана и передана перед стартом Ю.А. Гагарину программа управления угловым движением аппарата на случай отказа ТДУ для номинальной орбиты на весь допустимый интервал полета. И хотя было понятно, что расчет конкретных уставок в такой ситуации должен был бы проводиться непосредственно по результатам измерений параметров орбиты, указанная методика воспринималась ее авторами, как способная оказать, прежде всего, позитивный психологический эффект на космонавта.

Действительность, однако, превзошла все планово закладываемые нештатные ситуации.

Ввиду погрешностей в работе системы управления РН при «наборе» функционалом требуемого конечного значения не произошло обнуления тяги двигателя второй ступени, в результате чего скорость КК в точке отделения оказалась на 23 м/с больше номинальной, а высота орбиты в апогее — более чем на 80 км выше расчетной. Измерения параметров орбиты были получены только с двух НИПов. С двух других измерения либо вообще не поступали, либо имели столь низкое качество, что не могли быть подвергнуты последующей обработке.

Тем не менее даже в этих экстремальных условиях цель полета была достигнута, а полет в целом завершился успешно.

Не меньшие сложности возникли и при практическом использовании БНО последующих полетов КК «Восток». В процессе полета Г.С. Титова имел место сбой при привязке измерений к единому времени. Не являлись беспроблемными и групповые полеты А.Г. Николаева и П.Р. Поповича, а затем полеты В.Ф. Быковского и В.В. Терешковой. Однако достаточно высокий для того периода уровень отработки БНО, самоотверженность оперативных групп, обеспечивавших эти полеты, позволили успешно решить поставленные перед ними задачи.

Полетами КК «Восток» завершился первый (начальный) этап создания и практической реализации БНО космических полетов. В результате проведен-

ных работ по баллистическому обеспечению пусков и полетов первых ИСЗ и КК «Восток», активное участие в которых, кроме баллистиков НИИ-4, принимали также баллистики Центрального конструкторского бюро экспериментального машиностроения (ЦКБЭМ), в которое было переименовано ОКБ-1 (сегодня эта организация известна как РКК «Энергия» им. С.П. Королева), был накоплен бесценный опыт их осуществления и получена информация, позволившая гарантировать дальнейший прогресс практической космонавтики в целом.

В период проектирования и создания образцов космической техники баллистические расчеты и разработку полетной документации осуществляли в основном баллистики КБ. В процессе проведения летных и/или летно-конструкторских испытаний они входили в состав оперативных групп, располагавшихся на НИПах.

При их участии на этапе проектирования КК «Восток» и «Восход» и начала подготовки к летным испытаниям КК «Союз» (1961—1966) уже были достаточно четко обозначены основные черты бортовых и наземных средств управления полетом.

Выбранный принцип комбинированного управления предполагал необходимость декомпозиции АСУ КА¹ на БКАУ и НКУ, функционально объединяемые решением взаимосвязанных задач.

Применительно к пилотируемым КА равноправным элементом АСУ КП являлся также и экипаж, образующий совместно с БКАУ бортовой контур управления (БКУ).

БКУ включал совокупность следующих средств: СУБС (СУБК) — системы управления комплексом бортовых систем; БРТК — бортовой радиотехнический комплекс (включающий системы командной реализации, сбора и передачи данных телеметрии, траекторных измерений, связи); СОИ и ОРУ — систем отображения информации и органов ручного управления для экипажа КА.

Перечисленные подсистемы БКУ совместно с системами жизнеобеспечения, энергоснабжения и управления движением представляли собой комплекс служебных систем пилотируемых КА.

БРТК состоял из ряда независимых радиолиний, каждая из которых служила для обмена информацией определенного вида с НКУ.

Наземные измерительные пункты (НИПы) командно-измерительного комплекса (КИК) были созданы в виде разнесенных по всей территории СССР (от западных его границ до Камчатки) станций слежения, оборудованных независимыми радиосредствами [1]. При этом стационарные наземные

¹ Термин АСУ КА является официальным (см. ГОСТ Р 53802—2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения). Однако с понятийной точки зрения более корректным представляется термин «АСУ космическими полетами» [51, 52, 100], который и будет использоваться нами в данной работе.

средства контроля и управления дополнялись подвижными (плавучими) ИП в виде кораблей слежения, размещенными в акватории Мирового океана.

На следующем этапе (1967—1971), характеризующемся ЛКИ КК «Союз» и подготовкой, а затем беспилотными полетами КА «Зонд» (предназначавшихся для пилотируемого облета Луны), основные положения и подходы к решению задач построения средств управления не изменились принципиально, но существенно увеличились объемы перерабатываемой информации. Это повлекло за собой необходимость автоматизации этих процессов и более полного обмена данными, получаемыми на различных НИПах.

Как следствие, было принято решение об организации на базе НИП-16 (впоследствии — Центр дальней космической связи), расположенного вблизи г. Евпатория (Крым), Центра управления космическими полетами — ЦУПа-Е, оснащенного достаточно высокопроизводительными для того времени ЭЦВМ типа М-220. Создание ЦУПа-Е обеспечивало оперативное получение с борта пилотируемого КА телеметрической информации на тех суточных витках, на которых, согласно плану полета, выполнялись основные динамические операции.

Управление пилотируемыми полетами до 1973 г. включительно осуществлялось главной оперативной группой управления (ГОГУ), руководители которой назначались Государственной комиссией.

При этом руководство формировалось по «представительской схеме»: представитель МО в лице одного из заместителей начальника КИКа (последовательно П.А. Агаджанов, Н.Г. Фадеев, М.С. Постернак) и один из заместителей главного конструктора ЦКБЭМ (Б.Е. Черток (1966—1968), Я.И. Трегуб (1969—1973)).

Соответствующий период характеризуется и существенными изменениями в структуре организации БНО и в целом в управлении КП.

Как следует из изложенного ранее, будучи многоплановым, охватывающим интересы большого количества организаций — участников космической деятельности, БНО должно было быть синхронизировано с этапами разработки космической техники, с процессом и временем проведения летных испытаний, с жесткими временными циклами и технологиями управления КП средств космической техники различных организаций.

Наличие соответствующей проблемы требовало создания организационных структур, способных обеспечить ее решение не только на отраслевом, но и межотраслевом уровнях.

К началу 1960-х годов существовавшие в структуре НИИ-4 единственные в стране КИК (в/ч 32103) и КВЦ, выполнявший, по существу, исключительно функции головного Баллистического Центра (БЦ-1) МО, сделать этого были не в состоянии. К этому времени не только руководству отрасли, но и руководящим работникам более высокого ранга стала понятна необходимость создания полноценного и полномасштабного КВЦ. Предпосылки организации

такого КВЦ на базе НИИ-88, способного в перспективе решать задачи управления космическими полетами, были заложены после назначения его директором Г.А. Тюлина в августе 1959 г., занимавшего до этого должность зам. начальника НИИ-4 по научной работе. Однако реализовать эти планы Георгию Александровичу не удалось. В 1961 г. он был выдвинут на должность заместителя председателя Госкомитета СССР по оборонной технике (ГКОТ) и 31 июля оставил институт, передав его своему преемнику по НИИ-4 Юрию Александровичу Мозжорину. Генерал-майор (позже генерал-лейтенант) Ю.А. Мозжорин к моменту его назначения на должность директора — научного руководителя НИИ-88 был известен, прежде всего, как технический руководитель работ по созданию в СССР автоматизированного КИК обеспечения полета первого ИСЗ и первого пилотируемого КП. За успешное проведение этих работ в составе авторского коллектива он был удостоен Ленинской премии (1958 г.), а после полета Ю.А. Гагарина ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда (1961 г.).

Более подготовленной, свободно ориентирующейся в задачах баллистического обеспечения космических полетов и проблемах управления ими, обладающей бесценным опытом создания уникальных систем соответствующего типа и более авторитетной кандидатуры, способной решить поставленные на тот период перед НИИ-88 задачи, трудно было себе представить.

Практически за два года под непосредственным руководством Ю.А. Мозжорина в помещениях ВЦ НИИ-88 был создан так называемый малый КВЦ, оборудованный аппаратурой приема данных ВТИ, средствами коллективного отображения информации, радио- и телевизионными линиями связи и т. д.

Специальное математическое и программное обеспечения КВЦ как Баллистического Центра (БЦ-2) создавалось сотрудниками баллистического отдела института под руководством перешедшего в НИИ-88 из НИИ-4 в 1960 г. И.К. Бажинова. Ввод в эксплуатацию «малого КВЦ» был осуществлен в 1964 г.

Решение о создании «большого КВЦ», ставшего впоследствии Центром управления космическими полетами ЦНИИмаш (НИИ-88 было переименовано в ЦНИИмаш в 1967 г.), было принято в 1965 г. после подписания 20.06.65 г. директором института приказа о создании Центра, подкрепленного приказом министра Министерства общего машиностроения (МОМ) и постановлением ЦК КПСС и СМ СССР от 25.10.65 г.

Практически разработанный силами и в значительной степени созданный руками специалистов КВЦ, он был введен в строй в декабре 1970 г. (хотя официально его родословную принято отсчитывать от 3 октября 1960 г. — даты подписания первого штатного расписания ВЦ НИИ-88).

Парк вычислительной техники нового КВЦ с начала его функционирования включал в себя четыре наиболее совершенные на тот период ЭВМ типа БЭСМ-6 и две периферийные машины ПМ-6, предназначенные для первич-

ной обработки траекторных измерений. Позднее дооборудованную путем добавления к ПМ-6 центрального процессора систему назвали АС-6.

Новый КВЦ в полной мере удовлетворял всем требованиям по управлению полетами космических пилотируемых кораблей, орбитальных станций и КА, запускаемых к планетам Солнечной системы. В рамках его структуры могли обеспечиваться в темпе реального времени обработка траекторных измерений, вычисления эфемерид КА и целеуказаний для измерительных наземных и бортовых средств, определение уставок для коррекций орбит и осуществления маневрирования аппаратов, а также решение всех иных, не упомянутых здесь задач БНО.

С 1973 г. КВЦ ЦНИИмаш стал «открытым объектом», привлеченным к выполнению международной программы совместного полета и стыковки на орбите пилотируемых кораблей «Союз» и «Аполлон», принятой во время визита в СССР Президента США 24 мая 1972 г. По согласованию с представителями NASA, координационный Центр получил наименование Советского Центра управления полетами в г. Москве (ЦУП-М).

С момента создания руководство КВЦ-ЦУП осуществлялось последовательно сменявшимися друг друга М.А. Казанским, А.В. Милициным, В.И. Лобачевым и В.М. Ивановым, назначенным начальником ЦУПа и заместителем генерального директора ЦНИИмаш по управлению полетами в апреле 2009 г. и завершившим свою деятельность в этом качестве в 2014 г.

Создание отраслевого ЦУПа при промышленном ЦНИИ явилось зримым и существенным вкладом в развитие отечественной космонавтики, серьезно повысившим авторитет и имидж ЦНИИмаш как головной научно-исследовательской организации отрасли.

Космонавтика в те годы была не только ультрамодной и престижной, но и пользующейся повышенным вниманием со стороны первых лиц государства. То, что НИИ-88 с созданным на его площадях КВЦ становился одним из центральных фигур космического действия, усиливающего к нему благосклонное внимание высшего руководства, не могло быть незамеченным и оставлено без последствий другими участниками процесса. Как следствие, пройдет еще немало времени, по истечении которого улягутся страсти, связанные с «борьбой суверенитетов», ставящих целью взять на себя либо хотя бы частично поучаствовать в работе по управлению КП, выполнение которой первоначально планировалось исключительно в расчете на КВЦ НИИ-88. Первым в этот процесс включилась АН СССР. Следует признать, что основания для этого, по крайней мере с точки зрения кадрового обеспечения (имея в виду упоминавшуюся уже «команду Келдыша»), были у Академии более чем достаточными. Однако даже для президента АН создание второго ЦУПа в центре Москвы оказалось задачей непосильной. Тем не менее по предложению М.В.Келдыша, поддержанному С.П. Королевым, в 1965 г. в Институте прикладной математики АН СССР на базе его ВЦ был создан Баллистиче-

ский Центр (БЦ-3), который должен был работать в тесном взаимодействии с разработчиками КА, принимая непосредственное участие на всех этапах работ и испытаний создаваемых в СССР космических средств.

Предполагалось, что в этих работах должны были принимать участие ведущие специалисты ИПМ в области механики, управления, программирования, прикладной математики и вычислительной техники.

Бессменным руководителем БЦ с момента его организации являлся Э.Л. Аким (1929–2010), состоявший в составе «команды Келдыша» с 1955 г. Центру удалось достаточно безболезненно найти свою нишу и быстро стать неотъемлемой частью замкнутого контура управления космическими полетами в стране.

Осуществляя функции «параллельного» по отношению к БЦ ЦНИИмаш, БЦ ИПМ им. М.В. Келдыша в тесном взаимодействии с организациями — разработчиками космической техники НПО «Энергия», НПО им. С.А. Лавочкина и другими принимал участие в создании БО управления полетом практически всех типов АМС, предназначенных для исследования Луны и планет Солнечной системы, аппаратов «Вега», использованных при проведении исследований кометы Галлея, пилотируемых КК «Союз», ОС «Салют» и «Мир», грузовых кораблей «Прогресс», многоразовой космической системы «Энергия-Буран», автоматических аппаратов научного назначения «Астрон», «Гранат», «Интербол» и др.

Наличие конкуренции, естественным образом сопутствующей деятельности коллективов двух БЦ (ЦНИИмаш и ИПМ им. М.В. Келдыша), решающих идентичные задачи, не только не мешало работе, но в значительной степени способствовало прогрессу в области создания автоматизированных высокопроизводительных интерактивных аппаратно-программных систем БНО реального времени, ориентированных на управление полетами пилотируемых и беспилотных КА научного и социально-экономического назначений.

Для координации работ в области создания и практического задействования БНО космических полетов в начале 70-х годов в СССР была образована Межведомственная Главная Баллистическая Группа (МГБГ). Время организации МГБГ практически совпало с вводом в действие Баллистического Центра МО в составе Центра управления космическими объектами оборонного назначения, создаваемого в районе подмосковного Голицыно, и выделения из состава НИИ-4 подразделений, занимающихся космической тематикой. В результате, на основе этих «выделенных» подразделений сначала (в 1968 г.) был организован филиал НИИ-4 (в/ч 73790), который впоследствии (в апреле 1972 г.) был реорганизован в 50 ЦНИИ КС МО, просуществовавший в качестве самостоятельной организации по 1997 г.

Руководство МГБГ с момента ее образования было возложено на начальника 50 ЦНИИ КС МО генерала Г.П. Мельникова, а в состав входили наиболее известные и квалифицированные баллистики ведущих предприятий космической отрасли. В разные годы эти организации в МГБГ представляли:

ЦНИИмаш — И.К. Бажинов, НПО «Энергия» — Г.Н. Дегтяренко, ЦСКБ «Прогресс» — Г.П. Аншаков, ЦКБМ — С.Б. Пузрин, ИПМ АН СССР — Э.Л. Аким, ВЦ НАКУ КА МО — Г.М. Тамкович и другие.

Положение о МГБГ было утверждено министром общего машиностроения, президентом АН СССР и главкомом РВСН. На нее были возложены задачи координации взаимодействия смежных организаций по проблемам БНО, определения головной и дублирующей роли Баллистических Центров по конкретным пускам, утверждение значений параметров используемых в БНО моделей ГПЗ, атмосферы Земли и многие другие. Постановлениями ЦК КПСС и СМ СССР 50 ЦНИИ КС МО был определен в качестве головного разработчика БНО космических средств военного назначения.

Очередной этап развития пилотируемых полетов (1971—1976), связанный с созданием и началом полетов орбитальных пилотируемых станций типа «Салют», подготовкой, а затем и ЛКИ модифицированного транспортного корабля (ТК) «Союз-Т», поставил перед баллистиками и управленцами новые, существенно более сложные задачи. Первая возможность демонстрации их решения специалистам по управлению полетами была предоставлена в 1971 г. в процессе эксплуатации ОС «Салют-1». Полет ОС продолжался менее месяца и выявил многие недостатки в подготовке и решении основных задач ее управления. Серьезное испытание готовил управленцам в 1973 г. полет следующей станции, разработанной в ЦКБЭМ. Станция после выведения на орбиту фактически была потеряна из-за ошибочных проектных решений, принятых в отношении двигательной установки и бортовой системы управления ориентацией и, частично, из-за ошибок при управлении полетом.

С 1973 г., учитывая результаты этого неудачного полета, с целью централизации руководства и повышения ответственности за подготовку, контроль и управление полетами пилотируемых КА и ОС была введена должность Руководителя полета, который на всех последующих пилотируемых запусках назначался из числа представителей ЦКБЭМ.

Безусловно, авария ОС «Салют-1» в мае 1973 г. явилась тяжелым ударом. Следует отметить однако, что обсуждаемый период развития как методологии, так и средств управления полетом оказался во многом определяющим для последующего прогресса пилотируемой космонавтики.

Во-первых, претерпевает изменение концепция развития бортового комплекса управления пилотируемых КА, что особенно четко прослеживается на примере КК «Союз-Т». Если раньше построение систем управления Союзом осуществлялось на базе аналоговой техники (релейных и аналоговых устройств), то в составе БКУ «Союз-Т» уже появляется БЦВМ, т. е. осуществляется переход к дискретным системам управления. При этом обеспечивалось и существенное расширение функций БКУ, на который помимо решения задач управления движением КК возлагались также задачи контроля и диагностики приборной системы управления движением (СУД).

Во-вторых, существенно расширяются возможности средств передачи, централизованного сбора и обработки телеметрической информации.

В-третьих, находит практическое воплощение использование для связи НИПов с ЦУПом спутниковых систем передачи информации на базе спутников связи типа «Молния». В этих условиях дальнейшее развитие комплекса управления полетами уже не требовало привязки ЦУПа к территории одной из станций слежения.

Полет ОС «Салют-4» осуществлялся одновременно с реализацией советско-американского проекта по программе ЭПАС (экспериментальный полет «Аполлон»—«Союз»). При подготовке к полету по программе ЭПАС, ГОГУ находилась в ЦУПе-М, под который к тому времени было построено новое 5-этажное здание.

Однако непосредственное управление полетом ОС «Салют-4» проводилось ГОГУ, осуществляющей свои функции при нахождении еще в ЦУПе-Е.

Начиная с полета КК «Союз-22» (15—23 сентября 1976 г.), ГОГУ при пусках всех КА, созданных в НПО «Энергия», работает в ЦУПе-М. ЦУП-Е использовался при необходимости как дублирующий Центр. Для оперативного управления полетом ОС, транспортных и грузовых кораблей в ЦУПе-М предусматривалась возможность одновременного функционирования до четырех залов управления. В качестве центральных ЭВМ информационно-вычислительного комплекса ЦУПа-М до 1975 г. использовались вычислительные комплексы «Урал-5-БЭСМ-6», а с 1975 по 1977 г. — «АС-БЭСМ-6». Во время выполнения полетов ОС «Салют» это обеспечивало возможность обработки в реальном масштабе времени одновременно до трех полных потоков телеметрической информации, поступающей по каналам связи с пунктов слежения.

Первым единоличным гражданским руководителем полета орбитальных станций «Салют-4» и «Салют-6» до 1982 г. был летчик-космонавт А.С. Елисейев; после него эту должность занимали: заместители генерального конструктора летчики-космонавты В.В. Рюмин — с 1982 по 1989 г. (ОК «Салют-7» — «Союз» — «Прогресс» и «Мир»), В.А. Соловьев — с 1989 г. по настоящее время (ОК «Мир» — «Союз ТМ» — «Прогресс М», МКС), а также В.Г. Кравец (ТК «Союз-Т» в 1974—1979 гг. и многоразовый орбитальный корабль «Буран» в 1988 г.).

В конце 1970-х годов возникла очевидная необходимость разработки автоматизированных комплексов программ БНО, ориентированных на современные ЭВМ того времени и учитывающих возможности, связанные с развитием и появлением новых математических методов обработки измерительных данных.

Достаточно быстрая смена поколений ЭВМ и соответствующего системного математического обеспечения привела к созданию так называемых мобильных автоматизированных комплексов программ БНО.

Организационное и творческое содружество 50 ЦНИИ КС и Главного испытательного центра НАКУ МО позволило достаточно успешно решить указанную проблему для космических средств, обслуживаемых ГЦИУ КС. Специалистами 50 ЦНИИ КС было разработано общесистемное программно-математическое обеспечение и доработан широко применявшийся для научно-технических расчетов алгоритмический язык высокого уровня ФОРТРАН, получивший название «Фортран-ядро», так как в модифицированном варианте он мог применяться на вычислительных средствах различного класса, а разработанные программы целевых задач на его основе легко переносились на другие ЭВМ (в том числе и новых поколений). Созданный в 50 ЦНИИ МО мобильный комплекс программ (АКП-ф) для инструментальной ЭВМ БЭСМ-6 был успешно перенесен на «Эльбрус 1К2» (позднее — на «Эльбрус 1КБ») и внедрен в ЦУП ГЛОНАСС для БНО управления полетом навигационных КА, а также в ЦУП разгонных блоков. Перенесенный на ЕС ЭВМ комплекс АКП-ф был также использован в ряде ЦУП КА специального назначения. Примерно в то время ведущий отдел Баллистического центра НАКУ приступил к созданию современного мобильного комплекса программ БНО, основная роль в концептуальной разработке которого принадлежала Г.М. Соловьеву, С.И. Ряполову и А.Г. Янчику.

Разработка автоматизированных комплексов программ сложной структуры с многими десятками целевых задач и сотнями отдельных модулей, включающих сотни тысяч операторов языков высокого уровня, как правило, занимала длительный срок (от 3 до 6—7 лет).

Поэтому передача специалистами 50-го института отработанных комплексов программ БНО на мощных отечественных вычислительных машинах серии БЭСМ-6/7 в Главный испытательный центр управления КС в начале 80-х годов (до создания нового СПМО) имела исключительное значение. Прием передаваемого СПМО осуществляли ведущие специалисты баллистических отделов Главного испытательного центра, в том числе В.В. Бетанов, В.И. Пономарев, В.Н. Батилов и другие, которые использовали позднее приобретенный опыт при разработке и внедрении в практику управления полетами беспилотных КА военного назначения мобильного комплекса программ АКП-Ф на вычислительной технике уровня ЕС.

С середины 80-х годов все большую роль в создании БНО КП начинает играть коллектив баллистиков ЦНИИмаш, со временем идеологически возглавивший (особенно после расформирования 50 ЦНИИ КС МО) постепенно складывающуюся в стране современную кооперацию космических баллистиков.

Среди тех, кто внес наибольший вклад в развитие БНО КП данного и последующего этапов, должны быть отмечены*, помимо уже названных,

* В скобках указаны организации, названия которых отвечают временному интервалу соответствующей деятельности перечисленных лиц.

Н.М. Иванов, В.Н. Почукаев, В.С. Поляков (ЦНИИмаш); А.В. Цепелев, М.П. Неволько, В.С. Чаплинский, Г.В. Степанов, Ю.А. Климов, А.В. Забкрицкий, С.Я. Нагибин (50 ЦНИИ КС МО); Б.С. Скребушевский, А.И. Назаренко (45 ЦНИИ МО); Ю.Г. Сихарулидзе, В.В. Ивашкин (ИПМ АН); Ю.П. Улыбышев (НПО «Энергия»); В.А. Бартенев (НПО ПМ); Г.Г. Ступак (ГЦИУ КС); Р.Р. Назиров, Б.Ц. Бахшиян (ИКИ АН); В.А. Ярошевский (ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского); К.Г. Суханов, В.П. Корягин, К.М. Пичхадзе (НПО им. С.А. Лавочкина); В.А. Модестов (НПО Машиностроения); В.Н. Брандин, Г.Н. Разоренов (ВА им Ф.Э. Дзержинского); П.А. Мамон, Н.Ф. Аверкиев (ВИКИ им. А.Ф. Можайского) и др.

Этап 1977—1985 гг. ознаменовался подготовкой и проведением полетов орбитальных комплексов (ОК) второго поколения «Салют-6» — «Союз» — «Прогресс» и «Салют-7» — «Союз-Т» — «Прогресс» с заменой пилотируемого транспортного корабля в структуре комплекса на «Союз-Т». Существенной содержательной особенностью этого этапа явилось перераспределение приоритетов в части разработки технических средств и математического обеспечения (МО) управления полетами в пользу МО. При этом особое внимание было уделено вопросам создания МО командно-программного управления и планирования полета, а также БНО научных и прикладных исследований, проводимых на борту комплексов. Устаревшая вычислительная техника ЦУПа на базе ЭЦВМ «БЭСМ-6» была постепенно заменена на более совершенные «Эльбрусы» с быстродействием порядка 100 млн операций в секунду.

В дальнейшем был совершен переход от централизованной схемы построения вычислительного комплекса ЦУП к структуре кластеров специализированных серверов с периферийными рабочими местами. Последний этап, с 1985 г. и по настоящее время, связан с подготовкой ЛКИ и осуществлением долговременного полета ОК «Мир», а позднее МКС, относящихся к ОК третьего поколения.

Соответственно в истории становления и развития математического обеспечения (МО) АСУ КП целесообразно выделить следующие основные этапы:

- **Первый этап** (60-е годы) характеризуется разработкой МО и программных средств для каждого конкретного типа АСУ строго индивидуально. Создать некую унифицированную библиотеку подпрограмм, не говоря уж о стандартных программах, практически не удавалось. Сколь-нибудь широкий обмен разработанным программным продуктом практически отсутствовал, более того, был исключен даже обмен информацией об имеющихся разработках.

- Накапливающиеся противоречия между потребностью в широком использовании АСУ и проблемами широкого внедрения их МО привели в середине 70-х годов к формированию **второго этапа** становления МО АСУ, в основу которого была положена концепция типизации методов, моделей

и программ МО АСУ. При этом практическая реализация такой концепции оказалась возможной главным образом для подсистем оценивания, идентификации и диагностики подсистем АСУ.

- Возникшие при этом сложности создания общесистемных типовых средств МО АСУ привели к формированию **третьего этапа** (80-е годы) становления и развития МО на основе пакетов прикладных программ (ППП) в качестве наборов программно-алгоритмических средств, совокупность которых обеспечивала решение одной или нескольких близких задач АСУ. ППП при этом разрабатывались для реализации на совместимых ЭВМ.

Таким образом, к 1981—1982 г. на основе сложившейся структуры были в основном решены проблемы автоматизации определяющих задач управления полетом в НКУ: планирования и командно-программного управления, баллистико-навигационного обеспечения, обработки и анализа ТМИ.

Применительно к разработке БКУ были принципиально решены (но, к сожалению, не реализованы) проблемы автономного БНО и бортовой диагностики работы систем и аппаратуры КА.

К тому времени становится все более очевидным, что выделяемых ресурсов уже недостаточно для удовлетворения всех независимо возникающих проблем раздельной автоматизации процессов управления в БКУ и НКУ.

Ускоренное развитие микроэлектроники и микроЭВМ, снижение их стоимости и увеличение производительности привели, как отмечалось выше, к отказу от широкого применения многопользовательских ЭВМ в пользу систем распределенной обработки данных на основе ПЭВМ.

- Появление сетевых операционных систем, распределенных баз данных, средств поддержки и разработки распределенных программных комплексов, средств проектирования и поддержки принятия проектных решений для распределенных вычислительных средств способствовало переходу на новые информационные технологии, определившему начало **четвертого этапа**.

При этом следует признать, что наибольшие успехи в области создания и оценки возможностей применения новых технологий обработки информации на основе распределенных программных комплексов были достигнуты применительно к автоматическим КА, прежде всего военного назначения. Применительно к такого типа объектам постепенно начал формироваться принципиально новый подход к управлению полетом как реализации совокупности технологических циклов управления, под которыми понимались информационно и логически связанные, упорядоченные во времени совокупности макроопераций управления с указанием их продолжительности, определенные на интервале планирования в привязке к единой шкале времени, начинающиеся сеансной операцией управления (СОУ) и контроля, завершающиеся СОУ выдачи на борт командно-программной информации на следующий интервал планирования.

Такой подход позволял на основе априорной информации в процессе управления планируемым полетом и анализа исходных данных по объекту управления, а также требований, предъявляемых к процессу, «завязать» в единое целое содержание конкретных функциональных задач и характеризующих их информационных связей, т. е. осуществить формализацию процесса управления в форме блочно-иерархической структуры.

Впервые такая технология была создана в 1983—1987 гг. специалистами 50 ЦНИИ МО, отработана и внедрена применительно к ГЛОНАСС в 1991 г., что позволило обеспечить управление полной орбитальной группировкой системы в количестве 24 аппаратов и сдать систему в 1993 г. для целевого применения.

Заметим, кстати, что решение указанной исключительно сложной научно-технической задачи осуществлялось в условиях недостаточного уровня геодезического и геофизического обеспечений, связанных с отсутствием отечественных специализированных КА, подобных использовавшимся в США для повышения точности эфемеридного обеспечения навигационных КА типа GPS.

Разработанная в качестве альтернативы баллистиками 50 ЦНИИ МО совместно с баллистиками НПО ПМ теория построения согласующих моделей движения КА и комплекс методов высокоточного определения параметров орбит с уточнением фундаментальных постоянных позволили сотрудникам ЦУП ГЛОНАСС в значительной степени усовершенствовать специальное программно-математическое обеспечение (СПМО) высокоточного определения параметров движения спутников системы и решить задачи повышения точности координатно-временного и навигационного обеспечений.

С некоторым запаздыванием по времени наработки военных баллистиков получили распространение и при управлении автоматическими КА двойного и народнохозяйственного назначения, прежде всего, спутниками дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Наличие на борту пилотируемых КА экипажа делало решение соответствующей, определяющей для автоматических аппаратов проблемы менее актуальной.

Последующее усложнение целевых задач, решаемых пилотируемыми КА, увеличение сложности конструкций самих аппаратов и комплексов, возросшее количество обрабатываемой полетной информации также потребовало, особенно в условиях ограниченности выделяемых ресурсов в 90-х годах, смещения «центра тяжести» разработок по оптимизации процессов и средств управления космическими полетами в область совершенствования технологий и программно-математического обеспечения БКУ и НКУ, хотя и осуществляемого в рамках единой АСУ КП. Подчеркнем, что эта работа проводилась факти-

чески в пределах сложившейся структуры, поскольку необходимость минимизации затрат и сроков на ее модернизацию требовала учета и максимального использования существующих методов и средств управления полетом.

В этих условиях оптимизация распределения функций между БКУ и НКУ в рамках единой АСУ КП, а тем более обоснование ее рациональной структуры носили скорее эвристический характер, основывающийся на здравом смысле и накопленном практическом опыте.

Все это оказывало сдерживающее влияние на дальнейшее совершенствование теоретических основ отечественного БНО как специального раздела космической баллистики и разработку технологий его практического внедрения.

Тем не менее следует отметить, что усилиями ведущих ученых и специалистов к середине 90-х годов был осуществлен всесторонний системный анализ накопленного опыта различных видов обеспечений автоматизированного управления РН и КА ракетно-космической отрасли СССР и России.

Были проанализированы специфические черты и особенности БНО как сложной системы, выполнен структурно-функциональный анализ технологического процесса БНО объектов различного назначения. Подобный подход позволил в целом решить важнейшие вопросы повышения уровня автоматизации совокупности отдельных технологических операций (суть — решения конкретных баллистических задач) не только на этапе оперативного управления, но и на этапе баллистического проектирования при разработке конкретных космических аппаратов и систем.

Рассмотрение структуры и методов обеспечения функционирования наземного автоматизированного комплекса управления КП как большой системы потребовало разработки различных методик, как правило, реализованных в виде множеств алгоритмов адаптивного распределения решаемых задач, прежде всего баллистико-навигационного обеспечения, между различными подсистемами НАКУ. Внедрение комплекса алгоритмов адаптивного перераспределения работ между объектами общего предназначения НАКУ на различных этапах жизненного цикла КА базировалось на:

- оригинальных алгоритмах постановки задач адаптивного перераспределения работ;
- алгоритмах согласования ограничений на допустимость распределения задач и операций;
- алгоритмах вычисления точности получаемых приближений к глобальному минимуму показателя длительности выполнения множества работ.

В те годы значительное развитие в теоретическом и практическом плане получили задачи управления маневрами КА как проблемы условной оптимизации, были разработаны алгоритмы одно-, двух- и трехимпульсных маневров для различных полетных схем. Новые теоретические идеи нашли отраже-

ние в исследованиях многих специалистов, работавших и продолжающих работать в ведущих организациях ракетно-космической отрасли и МО РФ, защитивших кандидатские и докторские диссертации, в том числе и при непосредственном участии авторов данной монографии.

Предложенные методы, методики и алгоритмы были частично реализованы в автоматизированном программном комплексе БНО полетов КА ближнего космоса и доказали на практике свою надежность и эффективность.

Накопленный опыт разработки отдельных элементов специального математического обеспечения Баллистического центра НАКУ, ЦУП ЦНИИмаш, других организаций нашел частичное отражение в публикациях их авторов, использованных (при наличии соответствующих ссылок) в настоящей монографии.

Отдельного обсуждения в силу их специфики заслуживают вопросы разработки методов и средств БНО межпланетных полетов, особенно применительно к лунной программе и программам пуска АМС к планетам Земной группы.

Начало работ по созданию баллистического (а позднее и баллистико-навигационного) обеспечения и межпланетных полетов в равной степени принадлежало НИИ-4МО, организациям АН СССР и предприятиям космической отрасли, прежде всего ЦНИИмаш и НПО им. С.А. Лавочкина.

Первый космический посланец, изготовленный в СССР, достиг Луны 13 сентября 1959 г. Это была непилотируемая «Луна-2». В том же 1959 г. «Луна-3» во время облета спутника Земли сфотографировала его обратную сторону, невидимую с поверхности Земли.

12 февраля 1961 г. в сторону Венеры была отправлена первая советская АМС «Венера-1», которая открыла эпопею освоения этой планеты советскими автоматами. В 1967 г. была предпринята первая попытка посадить автоматический аппарат на поверхность Венеры. И хотя успешной оказалась лишь попытка, совершенная в августе 1970 г. («Венера-7»), эффективность реализации обсуждаемой программы не вызвала сомнений.

В марте 1986 г. произошло еще одно знаменательное событие: советские АМС «Вега-1» и «Вега-2» встретились с кометой Галлея, получив уникальную информацию об этом загадочном космическом теле.

Менее успешной оказалась программа посещения автоматическими аппаратами «красной планеты», начатая неудачным пуском АМС «Марс 1960А» 10 октября 1960 г. Тем не менее и на Марсе побывали наши АМС: «Марс-3», совершившая 2 декабря 1971 г. первую в истории мягкую посадку на поверхность планеты; «Марс-4» (февраль 1974 г.) и другие станции.

Управление полетами АМС с 1965 г. было возложено сначала на БЦ-2, вошедший в состав КВЦ, а с 1977 г. и по настоящее время на ЦУП ЦНИИмаш.

Наиболее существенные результаты начального периода (конец 50-х—середина 60-х годов), как принято считать, в области решения соответствующую

щих научных проблем принадлежат сотрудникам отдела, возглавляемого Д.Е. Охоцимским в ИПМ.

Всеобщее признание и широкую известность получили такие фундаментальные результаты, как пионерские исследования плоских траекторий прямого полета от Земли к Луне, выполненные в рамках решения задачи трех тел, их обобщение на пространственную задачу, осуществление гравитационного маневра в поле тяготения Луны, облет Луны с возвращением аппарата в атмосферу Земли, расчет не прямых траекторий полета к Луне и от Луны при решении задачи четырех тел, использование промежуточных орбит ИСЗ для осуществления межпланетных полетов, разработка численно-аналитических методов прогнозирования движения КА и АМС, результаты постановки и исследования задач о выборе состава измерений при неполном знании вероятностных характеристик ошибок измерений, уточнение астрономических постоянных и координат планет по наблюдениям за движением искусственных и естественных небесных тел, решение ряда навигационных задач полета к Луне, Венере и Марсу и многие другие.

Значительные успехи разработки БНО межпланетных полетов, достигнутые в НИИ-4 МО (позднее в ЦНИИ 50 КС), обычно связывают с именем А.В. Брыкова, назначенного в августе 1960 г. начальником лаборатории «дальнего космоса», отвечающей за подготовку пусков КА к Венере и Марсу, а также лунных аппаратов второго поколения.

В последующие годы при всей значимости работ, продолжавшихся в упомянутых выше организациях МО и АН СССР (РАН), центр тяжести в области баллистического обеспечения межпланетных полетов смещается в сторону деятельности службы БНО ЦУП-М, назначенной головной по обеспечению полетов АМС («Венера», «Марс»).

Такова краткая история обсуждаемого вопроса, изложению теоретических основ которого на современном уровне развития космонавтики посвящена данная работа.

Раздел 1

Общесистемные принципы информационного обеспечения функционирования АСУ КП и пути повышения эффективности технологий управления, методов и средств реализации технологических циклов БНО

Глава 1

Формулировка предметной области БНО как средства организации управления полетом конкретного типа КА

1.1. Информационное обеспечение управления КП

В ходе осуществления КП в системе управления полетом реализуется совокупность процессов, решающих задачу формирования информации, необходимой для управления полетом. Эти процессы представлены следующими основными видами информационного обеспечения:

- баллистико-навигационным обеспечением (БНО);
- командно-программным обеспечением (КПО);
- информационно-телеметрическим обеспечением (ИТО);
- контрольно-диагностическим обеспечением (КДО);
- информационным обеспечением деятельности экипажа (ИОДЭ);
- медицинским обеспечением пилотируемых КА и ОК;
- методическим обеспечением нестандартных полетных операций (МОП);
- информационным обеспечением выполнения целевой программы (ИОЦП).

Информационное обеспечение управления КП определяется многими факторами. Характеристики потоков информации, их структура и объем зависят, прежде всего, от принятого метода управления. Напомним [100], что метод управления полетом характеризуется, в числе прочего, конкретным распределением функций между бортовым и наземным комплексами управления (БКАУ, НКУ) и экипажем (для пилотируемых аппаратов). Кроме того, они зависят от перечня исходных данных, требуемых для автономного решения задач управления БКАУ, состава параметров, необходимых для реализации алгоритмов, регламентирующих функционирование и режимы работы бортовых систем и аппаратуры КА.

- координационно-вычислительные комплексы баллистических структур КИК;
 - траекторные измерительные и ретрансляционные средства НАКУ;
 - систему обмена баллистической информацией между элементами АС БНО и внешними абонентами.
- К числу абонентов АС БНО, прежде всего, относятся:
- система командных пунктов ВКС;
 - элементы средств управления полетом НАКУ;
 - структуры главных конструкторов КС, организаций МО РФ и предприятий промышленности.

Анализ состава и состояния технических и программных средств АС БНО, уровня автоматизации решения задач БНО, а также оптимизации их структуры относятся к числу приоритетных задач повышения эффективности существующих и перспективных систем управления КП.

Глава 2

Технологии управления КП и методы повышения их эффективности

2.1. Краткий обзор существующих типов технологий управления КП

Необходимо отдавать себе отчет в том, что практическое применение БНО этапа оперативного управления должно быть адаптировано под конкретную технологию управления КП. Данное обстоятельство требует хотя бы краткого обзора существующих типов технологий и анализа их достоинств и недостатков.

К настоящему времени получили известность [5] и достаточно широко обсуждаются в специальной литературе четыре основных типа технологий, отличающихся уровнем точности, надежности и экономичности (требуемыми затратами на осуществление процесса управления).

К их числу относятся:

- многопунктная территориальная с непосредственным управлением полетом;
- однопунктная с управлением КА через ИСЗ-ретранслятор;
- малопунктная (в пределе — однопунктная) с непосредственным управлением полетом КА;
- сетевая с динамически изменяемой топологией.

Подсистемы (2.14), с одной стороны, должны обеспечивать дальнейшую декомпозицию вплоть до неделимых элементов (модулей), и с другой — обладать гомоморфизмом: при их агрегировании в АСУ ТЦ обеспечивать адекватное отражение предметной области, т. е. свойства системы в главном.

Рассмотренная концептуальная модель АСУ ТЦ БНО позволяет создать ее математическое описание и, кроме того, определить требования к СУ ТЦ, ее составляющим, а также к принципам их разработки.

Глава 3

Прогнозный анализ применимости существующих АСУ КП для управления полетом перспективных КА

3.1. Оценка потенциальной точности информационного обеспечения управления полетом при использовании существующих измерительных средств НАКУ

Основное противоречие настоящего этапа развития космических средств заключается с одной стороны в необходимости повышения качественного уровня решаемых с их помощью задач и с другой — сокращение числа запусков КА, свертывание ряда планировавшихся ранее космических программ, а также переживаемые до сих пор последствия развала аэрокосмической отрасли РФ в 1990-е годы.

Повышение уровня надежности решения целевых задач невозможно, как следует из вышеизложенного, без качественного совершенствования технологий управления космическим полетом.

Изменение и совершенствование технологий управления БНО определяет, в свою очередь, новые требования к НКУ АСУ КП, БКУ, математическому и программному обеспечением решения баллистических задач на всех этапах баллистического обеспечения полета. Для обоснования новых технологий БНО и типовых требований к НКУ АСУ КП недостаточно знания только теоретических принципов и фундаментальных положений, которым должны удовлетворять такого типа системы. Необходимо иметь четкие представления о потенциальных возможностях измерительных средств, достигнутых на настоящем уровне развития технологий, а также представлять, какую цену придется «платить» за тот или иной уровень их совершенства [65].

В качестве основных показателей эффективности применения той или иной технологии обычно выступают точность измерения текущих навигационных параметров (ГНП), надежность решения задач навигационных определений КА и затраты на их проведение (экономичность).

Раздел 2

Теоретические основы синтеза моделей динамических систем БНО

Глава 4

Учет наблюдаемости как фундаментального свойства динамических систем при разработке алгоритмов БНО

4.1. Условия и критерии наблюдаемости в задачах навигационных определений

Прежде чем перейти к рассмотрению проблем синтеза алгоритмического оснащения БНО, кратко остановимся на одном из важнейших условий, необходимость соблюдения которого диктуется требованием достаточности информации, снимаемой с измерителей для определения совокупности параметров движения, составляющих конечный результат решения задач БНО.

Выполнение этого условия сводится к вопросу существования и единственности решения задачи определения вектора оцениваемых переменных по вектору измеряемых параметров при совместном рассмотрении модели состояния КА и измеряемых функций.

Условие, при котором гарантируется единственность решения задачи определения и анализа движения, носит, как известно, название условия наблюдаемости (по Р. Калману).

Из изложенного следует, что «наблюдаемость» характеризует совокупное свойство модели состояния и измеряемых функций.

Пусть состояние динамической системы описывается векторным нелинейным дифференциальным уравнением вида

$$\mathbf{X}: \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}); \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \text{ — задано,} \quad (4.1)$$

где $\mathbf{x}(t)$ — вектор состояния системы, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^l$ — вектор управления, заданный в функции времени $t \in [t_0, t_k]$.

Уравнение наблюдений (уравнение измеряемых функций) в общем виде представим в форме

$$\mathbf{Y}: \mathbf{y} = \phi(t, \mathbf{x}); \mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^m. \quad (4.2)$$

- гибкость, позволяющая легко организовать моделирование движения путем программной реализации только особенностей (если таковые имеются), присущих моделям конкретных аппаратов. Гибкость модели должна способствовать удобству и малой трудоемкости выбора состава учитываемых сил на заданном множестве и изменению его в процессе моделирования движения, а также расширению возможностей ММД без каких-либо изменений разработанных ранее целевых программ комплекса БНО;
- интегрирование СДУ, описывающей движение КА, выбранным пользователем методом на рассматриваемом множестве, обеспечивающем решение всех возлагаемых на комплекс задач, с заданным или автоматически выбираемым шагом;
- возможность выбора произвольного подмножества подлежащих учету факторов из заданного множества посредством организации вычислений значений правых частей СДУ;
- доступность интерполирования вычислений по задаваемым пользователем исходным данным решения задач целевой программы;
- удобство формирования задания на расчет путем представления списков признаков дифференцируемых величин и аргументов, по которым вычисляют производные; использование различных методов вычислений частных производных (методы конечных разностей, аналитические, специальные и комбинированные); способность установления набора включаемых пользователем в списки дифференцируемых величин и аргументов, обеспечивающих решение всех задач, возлагаемых на комплекс (набор должен быть легко дополняемым путем введения новых признаков параметров и включения в библиотеку комплекса соответствующих блоков частных производных) посредством организации вычислений соответствующих матриц.

Глава 5

Обобщенная постановка задач определения параметров движения КА по результатам измерений

5.1. Определение параметров движения КА по результатам измерений в технологическом цикле БНО

Определение движения КА по ИТНП эквивалентно столь же широко используемому понятию определения вектора состояния КА по результатам ВТИ.

Место указанной задачи в технологическом цикле БНО представлено на рис. 5.1.

Раздел 3

Содержание и структуризация математических моделей БНО околоземных космических полетов

Глава 6 Синтез функциональных структур корректных моделей движения КА

6.1. Общий подход к выбору математической модели движения и ее алгоритмическому представлению

Из ранее изложенного несложно сделать вывод, что ММД КА в контексте рассматриваемых в работе проблем представляет собой совокупность позволяющих производить необходимые расчеты математических и программно-алгоритмических средств, объединенных в подсистему автоматизированной системы БНО с элементами: системы обыкновенных дифференциальных уравнений движения в нормальной форме; системы действующих на КА в полете сил и методов их учета; методов решения СДУ КА в виде специализированного пакета программ (СПП) в автоматизированном комплексе программ (АКП) с соответствующими видами обеспечения.

Из указанного следует, что:

1) ММД КА, являясь частью МД КА, рассматривается не в узком (например, только СДУ движения КА), а в широком смысле, позволяющем учесть весь математический инструментарий решения;

2) ММД КА (в широком смысле) рассматривается в «обрамлении» других видов обеспечения инструментария (АС БНО), позволяющем, по возможности, учесть все (в частности, нематематические) деформации решения задачи, например, учесть модель специалиста-баллистика, заложенную в базу баллистических знаний АС БНО, использующего модель движения КА для получения необходимого результата и т. д.

В дальнейшем будем рассматривать только детерминированные СДУ движения КА, в которых, согласно принятой классификации, существует однозначная детерминированная связь между вектором состояния $[q_j, j = \overline{1,6}]$ и независимой переменной ξ на рассматриваемом отрезке $[0, \xi]$. Система уравнений движения КА в случае использования детерминированной модели может быть представлена в виде

Ограничимся несколькими характерными примерами и укажем одно, выведенное из практики правило, заключающееся в том, что *различные навигационные задачи должны использовать различные модели движения*. Действительно, предположим, что во всех случаях используется одинаковая модель движения. Ошибочность такого подхода очевидна. Во-первых, сложность модели движения определяется целевым назначением данного КА. Ее использование для решения большого числа сопутствующих задач, где не требуется высокая точность, приведет к снижению оперативности СМО и резкому увеличению машинного времени, требуемого для решения всех задач БНО управления полетом. Во-вторых, даже частичное использование разработанного СМО невозможно для нового КА, где требуется более высокая точность решения навигационных задач. В этом случае необходимо создание нового СМО, что потребует огромных трудозатрат. Это условие исключает возможность разработки общего СМО, пригодного для практического использования при управлении КА различных классов, ибо в этом случае даже самые простые КА, где требования по точности решения навигационных задач низки, будут использовать самые совершенные и соответственно самые сложные и громоздкие модели движения с большими затратами времени работы на ЭВМ.

В результате единственно правильным является другой подход, предполагающий, что наиболее точная модель движения используется только в задачах первого направления: определение орбиты по результатам измерений, точное прогнозирование движения, определяющее целевое использование КА (эталонный прогноз для данного КА или класса КА); задачи расчета данных для маневра КА и для спуска на поверхность Земли или планеты назначения. Число подобных задач, как правило, невелико и создание нового СМО для новых КА существенно облегчается, так как переработки программ для большого числа задач, например ряда задач СБИ, не требуется. Одним словом, с каждым новым КА происходит наращивание СМО, его совершенствование, а не его переработка.

Глава 7

Технология построения математических моделей состояния и навигационных определений различной структуры

7.1. Системы координат, их преобразования и временные привязки

Баллистико-навигационное обеспечение космических полетов предполагает возможным использование достаточно широкого типа систем координат (СК), выбираемых в каждом конкретном случае из условия наиболее простого и удобного математического описания решения поставленной за-

Глава 8

Баллистическое обеспечение задач проектной баллистики

8.1. Линеаризованные уравнения возмущенного движения КА этапа баллистического проектирования

Баллистическое обеспечение задач проектного этапа, как правило, не ориентировано на достижение требования высокой точности расчетов. Его применение должно обеспечивать возможность получения результатов для предварительного анализа и поиска на его основе наиболее приемлемого варианта решения. Вместе с тем при рассмотрении проектно-баллистических задач возникает необходимость в учете многочисленных ограничений со стороны наземного и бортового комплексов управления полетом.

При такой постановке оказывается обоснованным использование относительно простых моделей (в пределе аналитических) для описания орбитального движения КА.

Для получения соответствующих приближенных соотношений обычно принимаются упрощающие допущения, сводящиеся к следующему.

1. Движение КА может быть декомпозировано на опорное или номинальное невозмущенное и возмущенное, происходящие в малой окрестности опорного движения.

2. Опорное движение низкоорбитальных КА осуществляется в центральном гравитационном поле по круговой орбите заданного радиуса.

3. Возмущающее ускорение представляет собой суммарное ускорение, возникающее в результате комплексного действия на КА всех сил, за исключением силы, создаваемой центральным гравитационным полем.

4. Возмущения, действующие на КА, являются малыми, такими, что формируемая возмущенная орбита может рассматриваться как эллиптическая (околокруговая) орбита малого эксцентриситета.

Для описания движения воспользуемся цилиндрической системой координат r, u, z (рис. 8.1), начало O которой расположено в центре притяжения. В этой системе r — расстояние от центра притяжения до проекции КА на плоскость не-

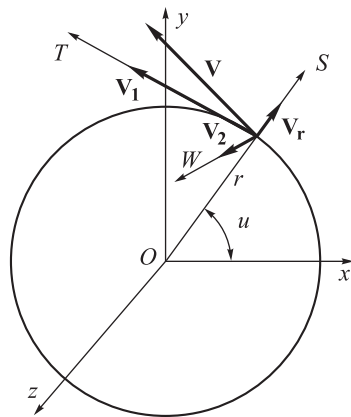


Рис. 8.1. Цилиндрическая система координат, связанная с положением КА на орбите

Формулы для учета возмущений вследствие нецентральности гравитационного поля Земли и торможения спутника атмосферой приведены в предыдущем параграфе

Третий фактор, существенно влияющий на сходимость итерационной процедуры, — это величина эксцентриситетов начальной, конечной и переходных орбит.

Линеаризованные уравнения дают высокую точность при эксцентриситетах, не превышающих 0,05, однако итерационная процедура может сходиться и при значительно больших эксцентриситетах.

Это также зависит от конкретной постановки задачи. Если соответствующая постановка позволяет, то лучше использовать более простые схемы вычислений.

Установить границы сходимости при простой модели движения и тем самым понять необходимость учета возмущений конкретного типа можно, только анализируя процесс решения конкретной задачи. Однозначный ответ возможен лишь в очевидных случаях. Например, при перелетах короткой продолжительности между близкими орбитами используется простейшая модель движения. При перелетах продолжительностью сотни витков на высотах менее 1500 км в процессе решения оптимизационной задачи необходимо учитывать первую гармонику гравитационного поля Земли, а если полет проходит на высотах менее 600 км, то и простейшую модель влияния атмосферы.

Глава 9

Баллистическое обеспечение предполетной подготовки выведения КА на орбиту и расчет СБИ

9.1. Учет возможных астробаллистических условий функционирования КА

Важным вопросом, существенно влияющим на планирование полетных операций, является определение продолжительности пребывания КА на затененных и освещенных участках орбиты.

Используемая на практике методика определения астробаллистических условий функционирования КА подробно описана в значительном количестве опубликованных ранее работ. Здесь, ориентируясь на известные результаты [12, 96], ограничимся кратким, конспективным ее изложением.

В общем случае тень планеты включает в себя две области (рис. 9.1): полной тени и полутени. Область полной тени представляет собой конусообразную область, противоположную положению Солнца. К полутени обычно относят область, лежащую в пространстве областей полной тени и полной

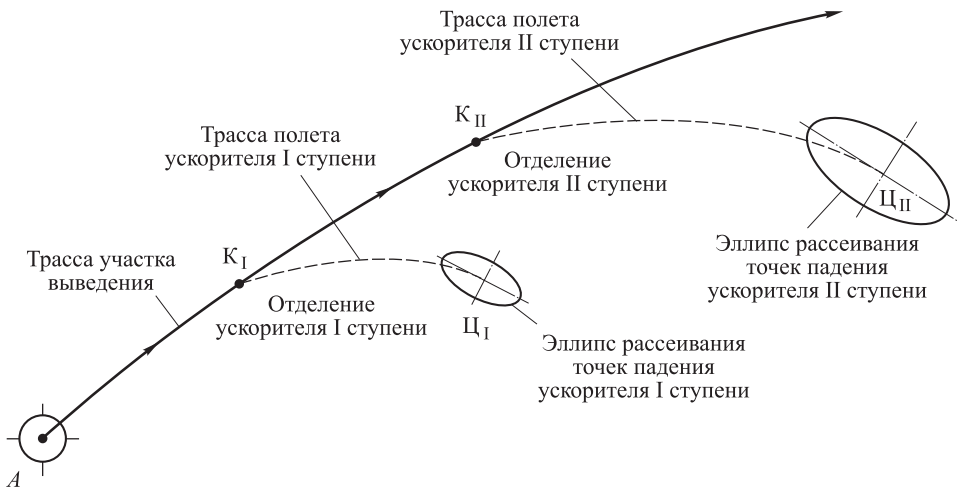


Рис. 9.7. Трассы полета и эллипсы рассеивания отработавших ускорителей и ступеней РН

Затем с помощью метода статистических испытаний находят корреляционные матрицы координат точек падения ступеней, т. е. оцениваются дисперсии геодезической широты и долготы точек падения и их взаимно корреляционный момент, определяющий ориентацию осей эллипсов рассеивания относительно азимута пуска.

Зная средние квадратические отклонения (СКО), нетрудно установить предельные размеры эллипсов.

Указанные предельные теоретически рассчитанные области рассеивания служат основой для выбора границ зон отчуждения, которые обычно назначают с удвоенным запасом по отношению к полученным предельным размерам эллипсов рассеивания.

Глава 10

Методы оптимизации и расчета орбитальных маневров в полете

10.1. Оперативное определение параметров управления маневрами как задача условной оптимизации

Оперативные задачи управления КА требуют разработки эффективных математических методов и вычислительных алгоритмов, позволяющих с помощью современных ЭВМ находить в реальном масштабе времени численное решение задач оптимизации стандартных полетных операций [18].

Глава 11

Программно-математическое обеспечение БНО управления космическим полетом

11.1. Принципы построения комплекса программно-математических средств

Процесс жизненного цикла программно-математических средств (ПМС) подразделяют на фазы (этапы) разработки, производства и эксплуатации. На этапе разработки, который для ПМС занимает 40...45 % относительных затрат всех этапов жизненного цикла, выделяют стадии проектирования, программирования, испытаний и фондирования. Этап производства (5...10 % относительных затрат) включает тиражирование, поставку и ввод в эксплуатацию. При эксплуатации ПМС БНО (около 50 % относительных затрат) принято отдельно рассматривать стадии научно-технического сопровождения и снятия с эксплуатации.

На стадии проектирования ПМС БНО проводится системный анализ и выработка общих требований к программно-математическому обеспечению, а также осуществляется разработка отдельных алгоритмов БНО, включающая:

- уточнение постановки и математической формулировки задачи;
- выбор (разработку) метода решения задачи;
- разработку математического алгоритма и его экспериментальную проверку.

Исключительное значение в процессе эксплуатации ПМС БНО играет его научно-техническое сопровождение (НТС), заключающееся в оценке выполнения ПМС его целевого назначения, а также в развитии и совершенствовании математических методов, моделей и алгоритмов, во внесении изменений в программы с целью улучшения эксплуатационных характеристик и устранения ошибок.

Научно-техническое сопровождение ПМС БНО включает:

- оценку выполнения целевого назначения специальным программно-математическим обеспечением (СПМО) в процессе его эксплуатации;
- устранение ошибок, выявленных в процессе эксплуатации СПМО;
- проведение доработок, направленных на повышение эффективности СПМО;
- внесение в программы изменений, связанных с изменениями числовых значений констант или реализации требований новых нормативных документов;

***Расчетно-теоретические основы БНО
экспедиций освоения дальнего космоса***

Глава 12

**Прикладные аспекты баллистического обеспечения
межпланетных полетов**

**12.1. Формулировка задач и анализ полетных схем
экспедиций к планетам и телам Солнечной системы**

Учитывая исключительно высокую стоимость подготовки и осуществления межпланетных экспедиций, прежде всего возникает вопрос об их задачах.

Очевидно, что по мере освоения космического пространства эти задачи видоизменяются, и речь может идти лишь о задачах «обозримой перспективы». Результаты выполненных исследований, итоги которых, датируемые концом двадцатого столетия, были подведены на основе проектно-баллистического анализа проблемы создания на базе ракеты-носителя «Протон» оптимальной структуры межпланетных автоматических комплексов, дают основание¹ для формулировки следующих основных задач, сведенных для удобства в табл. 12.1.

Из рассмотрения сформулированных задач и соответствующих им требований, предъявляемых к схемам полета, вытекают следующие выводы.

1. Наиболее сложными и конкретными являются задачи исследования Марса и Венеры. Это объясняется обилием результатов, полученных в ходе их изучения, и возможностью сформулировать стратегию исследования на ближайшие десятилетия, включая анализ перспектив пилотируемого полета на Марс.

Основное требование к схемам полета космических аппаратов – обеспечение их выведения на низкие орбиты ИСП и доставки в выбранные районы поверхности планет необходимой научной аппаратуры для проведения контактных исследований (зондов, подвижных лабораторий и т. д.) и, в перспективе, экипажей экспедиций посещения.

¹ См., например, «Вариант построения системы космических комплексов для повышения эффективности исследования солнечной системы» / Н.М. Иванов [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. 1997. № 9. С. 84 — 95.

состоит из двух основных частей: орбитального отсека (ОО), предназначенного для обеспечения функционирования АМС на межпланетной трассе, связи с Землей, проведения исследований в космосе и др., и спускаемого аппарата (СА), с помощью которого проводятся исследования в атмосфере и непосредственно на поверхности Венеры. За 8—10 дней до подлета к планете АМС корректируется таким образом, чтобы траектория полета проходила через плотные слои атмосферы Венеры. За 1—2 дня до выхода в атмосферу СА и ОО разделяются и проводится коррекция «увода» ОО на пролетную траекторию, чтобы в дальнейшем полете обеспечивалась связь ОО с СА и ретрансляция полученных с СА результатов на Землю. В дальнейшем ОО или переводится на орбиту ИСВ, или пролетает мимо Венеры и оказывается спутником Солнца. А нельзя ли орбитальный отсек направить на встречу с кометой? Проведенные исследования показали: если траектория АМС будет проходить на определенном расстоянии от центра Венеры, то гравитационное поле планеты «развернет» траекторию полета нужным образом по направлению к комете. Для обеспечения достаточной точности и необходимых условий встречи с кометой дополнительно к гравитационному используется и активный маневр (рис. 12.7) при весьма умеренных дополнительных энергетических затратах. Эти особенности были учтены при разработке АМС «Вега», а реализованные полеты блестяще подтвердили правильность заложенных идей.

Глава 13

Особенности постановки задач коррекции орбит при выполнении межпланетных полетов

13.1. Принципы классификации коррекций траекторного движения КА при построении универсальных методик анализа БНО экспедиций освоения дальнего космоса

Из изложенного ранее со всей очевидностью вытекает, что коррекция траекторий (орбит) представляет собой один из наиболее распространенных видов управления движением центра масс КА в космическом пространстве. Очевидна и цель проведения коррекций. В любом случае она сводится к исправлению (изменению) отдельных характеристик движения, полученных на основе их определения в реальном полете, если соответствующие отличия от расчетных значений превосходят допустимый уровень.

Особенностью корректирующего управления является то, что отклонения корректируемых параметров, вызванные ошибками расчета и определения траектории, неточностью используемых астрофизических констант и положения небесных тел, техническими вариациями характеристик различных

ские измерения. Их осуществляли американскими наземными станциями слежения за объектами дальнего космоса DSN, расположенными близ Мадрида, Канберры и в Голдстоуне. Большие расстояния между этими пунктами позволяли с высокой точностью определять соответствующие угловые координаты АМС. Обработка угломерных и дальномерных навигационных измерений, выполненных советскими наземными станциями слежения, позволила уменьшить ошибки навигации АМС «Вега» до 40 км (среднеквадратическая ошибка оценки координат). Специально для проекта «Лоцман» была разработана и реализована методика высокоточного определения траектории движения кометы Галлея по данным совместной обработки наземных и автономных астроизмерений. Она предусматривала одновременное согласование движения кометы и двух АМС. В результате решений этой задачи были получены новые эфемериды кометы Галлея, которые характеризовались среднеквадратическими значениями возможных ошибок их расчета не более 80 км. При проведении последней коррекции траектории движения «Джотто» прицеливание осуществляли таким образом, чтобы номинальное значение минимального расстояния от ядра равнялось примерно 560 км. Полученные с борта станции данные показали, что фактическое значение минимального расстояния от ядра составило около 610 км. Таким образом, реализация проекта «Лоцман» обеспечила высокую точность наведения АМС «Джотто» и позволила при близком пролете кометы Галлея провести исследования, которые дополняли результаты, полученные советскими АМС «Вега».

Глава 14

Баллистическое обеспечение полетов по периодическим орбитам, проходящим в окрестностях точек либрации

14.1. Введение в формирование баллистических схем межпланетных полетов с использованием точек либрации

Баллистические схемы межпланетных полетов с использованием орбит, проходящих в окрестности точек либрации и определяющих положение относительного равновесия системы «Земля—планета», принято считать весьма перспективными с позиций решения многих задач использования и освоения дальнего космоса. Первой экспедицией, при осуществлении которой КА был выведен на орбиту в окрестность точки либрации L_1 системы «Солнце—Земля», стал проект ISEE (International Sun-Earth Explorer), реализованный в 1978 г. Проект базировался на применении двух КА (ISEE-1 и ISEE-2), выве-

Литература

1. *Агаджанов П.А.* Командно-измерительный комплекс. М.: Знание, 1979.
2. Особенности баллистико-навигационного обеспечения управления орбитальным комплексом «Мир» на этапе завершения его полета / Н.А. Анфимов и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2001. Т. 25. С. 11—32.
3. *Аппазов Р.Ф., Лавров С.С., Мишин В.П.* Баллистика управляемых ракет дальнего действия. М.: Наука, 1966.
4. *Аппазов Р.Ф., Сытин О.Г.* Методы проектирования траекторий носителей спутников Земли. М.: Наука, 1987.
5. *Бабишин В.Д.* Методические основы синтеза технологий автоматизированного управления космическими аппаратами в условиях ограниченных ресурсов. М.: МГУЛ, 2002.
6. Космическая навигация / И.К. Бажинов и др. М.: Машиностроение, 1975.
7. *Бажинов И.К., Почукаев В.Н.* Оптимальное планирование навигационных измерений в космическом полете. М.: Машиностроение, 1976.
8. *Бажинов И.К., Ястребов В.Д.* Навигация в совместном полете космических кораблей «Союз» и «Аполлон». М.: Наука, 1979.
9. Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса «Салют-6» — «Союз» — «Прогресс» / И.К. Бажинов и др. М.: Наука, 1985.
10. Управление космическими объектами. Методы, модели и алгоритмы решения некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения / К.Р. Байрамов и др. М.: Радиотехника, 2012.
11. Баллистическое обеспечение космической баллистико-навигационной службы ВКС. СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1998.
12. *Бегенин Г.Г., Скребушевский Б.С., Соколов Г.А.* Системы управления полетом космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1978.
13. Безопасность космических полетов / Г.Т. Береговой и др. М.: Машиностроение, 1977.
14. *Белецкий В.В., Егоров В.А., Ершов В.Г.* Анализ траекторий межпланетных полетов с двигателями постоянной мощности // Космические исследования. 1965. Т. 3. С. 18—37.

15. Бетанов В.В., Янчик А.Г. Навигационно-баллистическое обеспечение испытаний и применения космических аппаратов / Под ред. Б.И. Глазова. М.: ВА РВСН, 1993.

16. Бетанов В.В., Яшин В.Г. Об одном методе уточнения параметров управления маневрами космических аппаратов // Космические исследования. 1995. Т. 33. № 3. С. 292—297.

17. Бетанов В.В. Автоматизация решения обобщенных некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения управления космическими аппаратами. М.: ВА РВСН, 1996.

18. Бетанов В.В., Яшин В.Г. Математическое обеспечение маневров космических аппаратов. М.: ВА РВСН, 1996.

19. Бетанов В.В. К вопросу решения обобщенных некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения управления КА // Космические исследования. 1996. Т. 34. № 5. С. 524—530.

20. Бетанов В.В., Яшин В.Г. Методы решения задачи одно- двухимпульсного перехода КА на квазикруговую орбиту, заданную средним радиусом // ОНТЖ «Полет». 1999. № 7. С. 26—30.

21. Бетанов В.В., Кудряшов М.И. Практические подходы к решению некорректных задач с приложениями к навигационно-баллистическому обеспечению управления космическими аппаратами: науч.-метод. материалы. М.: ВА РВСН, 1997.

22. Бетанов В.В. Введение в теорию решения обобщенных некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения управления космическими аппаратами. М.: ВА РВСН, 1997.

23. Применение теории ультраоператоров при исследовании фундаментальных свойств системы управления баллистико-навигационным обеспечением космических полетов / В.В. Бетанов и др. // НТЖ «Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики». 2000. № 2. С. 2—7.

24. Теоретические основы построения автоматизированной системы организационно-технического управления космическими средствами / В.В. Бетанов и др.; Под ред. А.Г. Янчика. М.: ВА РВСН, 2002.

25. Брандин В.Н., Васильев А.А., Худяков С.Т. Основы экспериментальной космической баллистики / Под ред. Д.А. Погорелова. М.: Машиностроение, 1974.

26. Брандин В.Н., Разоренов Г.Г. Определение траекторий космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1987.

27. Власов С.А., Мамон П.А. Теория полета космических аппаратов. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007.

28. Глазов Б.И. Автоматизированное управление в больших кибернетических системах. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: МО СССР, 1981.

29. *Говоров Л.В., Шакин В.А.* Баллистическое обеспечение систем спутниковой связи. М.: Воениздат, 1984.
30. *Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н.* Прикладные задачи теории оптимального управления движением беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1978.
31. Баллистика и навигация ракет / А.А. Дмитриевский и др.; Под ред. А.А. Дмитриевского. М.: Машиностроение, 1985.
32. *Ермилов Ю.А., Иванова Е.Е., Пантюшин С.В.* Управление сближением космических аппаратов. М.: Наука, 1977.
33. Технологии навигационно-баллистического обеспечения полетов космических средств // «Баллистика вчера, сегодня и завтра» / А.В. Забкрицкий и др. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. С. 82—97.
34. *Звягин Ф.В.* Об одном классе орбит в задачах трех и четырех тел // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2010. № 4. С. 105—113.
35. *Звягин Ф.В.* Об оптимизации орбит перелета в окрестность точки либрации L_1 системы Солнце—Земля // ОНТЖ «Полет». 2010. № 4. С. 19—24.
36. *Звягин Ф.В.* Двухимпульсные перелеты на гало-орбиты в задаче трех тел // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». 2012. № 03. Режим доступа: <http://www.technomag.bmstu.ru/doc/352636.html>. (Дата обращения 21.03.2012).
37. *Звягин Ф.В.* Двухимпульсные перелеты с околосолнечных орбит ожидания на орбиты F-класса задачи трех тел // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». 2012. № 04. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/353104.html>. (Дата обращения 27.05.2012).
38. *Звягин Ф.В.* Одноимпульсные межорбитальные перелеты в системе тел Солнце—Земля—Луна // Известия РАН. 2012. № 3(73). С. 82—85.
39. *Иванов Н.М., Лысенко Л.Н., Мартынов А.И.* Методы теории систем в задачах управления космическим аппаратом. М.: Машиностроение, 1981.
40. *Иванов Н.М., Лысенко Л.Н., Дмитриевский А.А.* Баллистика и навигация космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1986.
41. *Иванов Н.М., Поляков В.С.* Наведение автоматических межпланетных станций. М.: Машиностроение, 1987.
42. *Иванов Н.М.* Особенности развития баллистики и навигации КА и АМС в ЦНИИмаш // Космонавтика и ракетостроение. 2000. Т. 21. С. 72—83.
43. *Иванов Н.М., Лысенко Л.Н.* Баллистика и навигация космических аппаратов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Дрофа, 2004.
44. *Иванов Н.М., Лысенко Л.Н.* Назначение и состав баллистико-навигационного обеспечения в структуре технологии управления космическим полетом // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004. № 2. С. 156—169.

45. Информатика / Под ред. Н.В. Макаровой. М.: Финансы и статистика. 2009.
46. Калинин В.Н. Теоретические основы управления космическим аппаратом на основе концепции активного подвижного объекта. Л.: ВИКУ, 1999.
47. Конструирование автоматических космических аппаратов / Д.И. Козлов и др.; Под ред. Д.И. Козлова. М.: Машиностроение, 1996.
48. Коптев Ю.Н. Российская космонавтика вчера, сегодня и завтра // ОНТЖ «Полет». 2003. № 1. С. 3—9.
49. Космический научный центр: монография в 2 кн. / Под ред. Г.Г. Райкунова. ЦНИИмаш, 2011.
50. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / А.Н. Кирилин и др.; Под ред. А.Н. Кирилина. Самара: Изд. дом «АГНИ», 2011.
51. Кравец В.Г., Любинский В.Е. Основы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1983.
52. Кравец В.Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1995.
53. Кубасов В.Н., Дашков А.А. Межпланетные полеты. М.: Машиностроение, 1979.
54. Кубасов В.Н., Данков Г.Ю., Яблонько Ю.П. Методы сближения на орбите. М.: Машиностроение, 1985.
55. Лебедев А.А., Соколов В.Б. Встреча на орбите. М.: Машиностроение, 1969.
56. Лидов М.Л. Математическая аналогия между некоторыми оптимальными задачами коррекции траекторий и выбора состава измерений и алгоритмы их решений // Космические исследования. 1971. Т. IX. Вып. 5. С. 3—15.
57. Лобачев В.И., Почукаев В.Н. Некоторые теоретические аспекты синтеза и анализа Центра управления полетом. М., 1988 (Препринт ИКИ АН СССР, Т-14347).
58. Лысенко Л.Н., Панкратов И.А. Основы спутниковой навигации. М.: Воениздат, 1988.
59. Математическое моделирование реализации технологического цикла баллистико-навигационного обеспечения при управлении космическим полетом / Л.Н. Лысенко и др. // НТЖ «Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики». 2000. № 1. С. 37—44.
60. Лысенко Л.Н., Кузьмин А.В. О возможности применения теории нечеткого управления при сближении космических аппаратов // ОНТЖ «Полет». 2002. № 1. С. 37—44.

61. *Лысенко Л.Н., Кузьмин А.В.* Сближение космических аппаратов по модифицированному методу двухимпульсной коррекции // ОНТЖ «Полет». 2004. № 2. С. 18—26.
62. *Лысенко Л.Н., Разумный Ю.Н.* Прикладная баллистика спутниковых систем. Состояние и перспективы. В сб. «Баллистика вчера, сегодня, завтра». СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. С. 98—110.
63. *Лысенко Л.Н.* Наведение и навигация баллистических ракет. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
64. *Лысенко Л.Н.* Исторические аспекты создания баллистического обеспечения пусков первых РН и КА конструкции С.П. Королева // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. 2007. № 2(24). С. 31—45.
65. *Лысенко Л.Н., Бетанов В.В.* Принципы и основные направления совершенствования наземного автоматизированного комплекса управления космическими полетами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № 1(82). С. 17—30.
66. *Лысенко Л.Н., Звягин Ф.В.* Теоретические основы баллистического обеспечения межпланетных полетов с использованием орбит, проходящих в окрестностях точек либрации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 3(88). С. 12—29.
67. *Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В.* Последовательная структурно-параметрическая оптимизация моделей в едином технологическом цикле баллистика-навигационного обеспечения оперативного управления космическими полетами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 4(89). С. 18—32.
68. *Лысенко Л.Н., Звягин Ф.В.* Перспективы использования орбит F-класса при решении задач баллистического обеспечения межпланетных полетов // ОНТЖ «Полет». 2013. № 4. С. 3—9.
69. *Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Райкунов К.Г.* Применение теории стохастической коррекции орбит при планировании проектно-баллистического обеспечения межпланетных миссий // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 3. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/621.html>.
70. *Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю.* Системный анализ космических аппаратов. М.: МО РФ, 2007.
71. *Максимов Г.Ю.* Теоретические основы разработки космических аппаратов. М.: Наука, 1980.
72. *Мамон П.А., Половников В.И., Слезкинский С.К.* Баллистическое обеспечение космических полетов. Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1990.
73. *Мартиросов М.Г., Поляков В.С.* Оценка точности прогнозирования траекторий межпланетного перелета // Некоторые вопросы теории космических полетов / Под ред. И.К. Бажинова. 1971. Вып. 4. С. 11—18.

74. *Маршал К.* Задача трех тел. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
75. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / Б.Г. Волина и др. М.: Энергоатомиздат, 1988.
76. Отображение информации в Центре управления космическими полетами / А.В. Милицин и др. М.: Радио и связь, 1982.
77. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2009.
78. Основы математического обеспечения АСУ: в 2 ч. / Под ред. Б.И. Глазова. Ч. 2 / Под ред. Д.А. Ловцова. М.: ВА им. Ф.Э. Дзержинского, 1992.
79. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г.С. Нариманова, М.К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972.
80. *Охоцимский Д.Е.* Исследование движения в центральном поле под действием постоянного касательного ускорения // *Космические исследования.* 1964. Т. 2. С. 42—56.
81. *Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г.* Основы механики космического полета. М.: Наука, 1990.
82. Пакет прикладных программ «Линейное программирование в АСУ». Описание применения. Калинин: Центрпрограммсистем. 1978.
83. Пилотируемая экспедиция на Марс / Под ред. А.С. Коротева. Москва—Королев.: Изд. РАКЦ, 2006.
84. *Плотников Ю.И., Воробьев С.Н., Егоров Е.С.* Математические методы обоснования оперативно-тактических решений. М.: ВА РВСН, 1992.
85. Повышение автономности и безопасности полетов пилотируемых космических станций и кораблей за счет внедрения интегрированной системы искусственного интеллекта в бортовые комплексы управления / В.П. Легостаев и др. // Труды 5-й Межд. конф. «Авиация и космонавтика — 2006». М., 2006. С. 38.
86. *Попович П.Р., Скребушевский Б.С.* Баллистическое проектирование космических систем. М.: Машиностроение, 1987.
87. *Почукаев В.Н.* О некоторых тенденциях в развитии систем управления космическими аппаратами // *Космонавтика и ракетостроение.* 2000. № 20. С. 32—34.
88. Программно-математическое обеспечение автоматизированной системы управления космическими полетами / Под ред. Д.А. Ловцова. М.: ВА им. Ф.Э. Дзержинского, 1995.
89. Протокол информационного обмена между КС ЦУП-М и БВС, БКУ, РСУС «Регул-ОС». М.: РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 1999.

90. Ракетно-космическая техника. Информационные системы и технологии: в 2 т. / Под общ. ред. М.И. Макарова. М.: НИИ КС им. А.А. Максимова, 2012.

91. *Разоренов Г.Н.* Введение в теорию оценивания состояния динамических систем по результатам измерений. М.: МО СССР, 1981.

92. *Разыграев А.П.* Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. М.: Машиностроение, 1977.

93. Роль математического моделирования при управлении полетом международной космической станции / М.Ю. Беляев [и др.] // Труды XXXI—XXXII чтений имени К.Э. Циолковского. Доклад. М.: ИЕЕТ РАН. 1999. С. 65—70.

94. *Себехей В.* Теория орбит: ограниченная задача трех тел / Пер. с англ.; Под ред. Г.Н. Дубошина. М.: Наука, 1982.

95. *Семенов Ю.П., Горшков Л.А.* Концепция марсианской экспедиции // ОНТЖ «Полет». 2001. № 11. С. 12—18.

96. *Скребушевский Б.С.* Управление полетом беспилотных космических аппаратов. М.: ВЛАДМО, 2003.

97. Современные технологии навигации геостационарных спутников / Ю.М. Урличич и др. М.: Физматлит, 2006.

98. *Соколов Б.В.* Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. М.: МО РФ, 1992.

99. *Соловьев В.А., Лысенко Л.Н.* Обобщение опыта выполнения российско-американских космических программ в интересах управления полетом международной космической станции // ОНТЖ «Полет». 1999. № 1. С. 15—20.

100. *Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полетами: в 2 ч. / Под ред. Л.Н. Лысенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 (ч. I), 2010 (ч. II).

101. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / В.К. Абалкин и др.; Под ред. Г.Н. Дубошина. М.: Наука, 1976.

102. *Ступак Г.Г., Ряполов С.И., Колесников Н.П.* История КИК управления КА от истоков до Главного испытательного центра имени Г.С. Титова. Книга 1. М.: МО РФ, 2006.

103. *Черноусько Ф.Л.* Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. М.: Наука, 1988.

104. *Чечкин А.В., Гудим Н.Н., Кобзарь М.Г.* Разработка автоматизированных систем контроля и проектирование процессов обработки данных на основе общей теории систем и ультрасистем. М.: МО СССР, 1986.

105. Экспериментальная баллистика ракетно-космических средств / Под ред. Л.Н. Лысенко, В.В. Бетанова, И.В. Лысенко. М.: ВА РВСН, 2000.

106. *Эльясберг П.Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1965.
107. *Эльясберг П.Е., Бахшиян Б.Ц.* Определение траектории полета космического аппарата при отсутствии сведений о законе распределения ошибок измерений // *Космические исследования.* 1969. Т. VII. Вып. 1. С. 18—28.
108. *Эльясберг П.Е.* Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976.
109. Java™ Language Specification, Third Edition, James Gosling; Bill Joy; Guy Steele; Gilad Bracha Publisher: Prentice HallPub Date: June 14, 2005.
110. J2EE. Разработка бизнес-приложений / П. Аллен и др. ДиаСофт, 2002.
111. Designing Web Services with the J2EE™ 1.4 Platform JAX-RPC, SOAP, and XML Technologies by Interjeet Singh; Sean Brydon; Greg Murray; Vijay amachandran; Thierry Violleau; Beth Stearns Publisher: Prentice HallPub Date: June 09, 2004.
112. Dynamical Systems: The Three-body Problem and Space Mission Desing (Interdisciplinary Applied Mathematics) / Wang Sang Koon, et al. Springer, 2011.
113. Dynamical Systems with Applications using Mathematica / Stephen Lynch. Boston: Birkhauser, 2007.
114. J2EE. Лучшие решения и стратегии проектирования / Алур и др. Лори, 2004.
115. Java Enterprise in a Nutshell, 2nd Edition William Crawford; Jim Farley; David Flanagan, Publisher: O'Reilly Media, Inc. Pub Date: April 25, 2002.

Оглавление

Предисловие	3
Условные обозначения	11
Список основных сокращений	15
Введение	19
<i>Раздел 1. Общесистемные принципы информационного обеспечения функционирования АСУ КП и пути повышения эффективности технологий управления, методов и средств реализации технологических циклов БНО</i>	38
Глава 1. Формулировка предметной области БНО как средства организации управления полетом конкретного типа КА	38
1.1. Информационное обеспечение управления КП	38
1.2. Организация управления пилотируемыми КП	44
1.3. Формулировка основных задач БНО этапов оперативного управления и послеполетного анализа	50
1.4. Методы проектирования и особенности разработки СПМО задач БНО	52
1.5. Структура и задачи автоматизированной системы БНО беспилотных космических средств	54
Глава 2. Технологии управления КП и методы повышения их эффективности	56
2.1. Краткий обзор существующих типов технологий управления КП	56
2.2. Оценка возможностей методов и принципов формирования технологических циклов управления	67
2.3. Концептуальная модель процессов управления КП	72
2.4. Методы формализации структурирования моделей АСУ КП и технологий автоматизированного управления полетом	83
2.5. Структуризация процесса функционирования АС БНО	85

Глава 3. Прогнозный анализ применимости существующих АСУ КП для управления полетом перспективных КА.....	91
3.1. Оценка потенциальной точности информационного обеспечения управления полетом при использовании существующих измерительных средств НАКУ	91
3.2. Требования к точности решения задач координатного обеспечения управления движением существующих и перспективных КА	94
3.3. Концепция применения НАКУ КП в современных условиях.....	96
3.4. Условия перехода на новые технологии управления на основе построения и анализа областей достижимости	97
Раздел 2. Теоретические основы синтеза моделей динамических систем БНО.....	104
Глава 4. Учет наблюдаемости как фундаментального свойства динамических систем при разработке алгоритмов БНО	104
4.1. Условия и критерии наблюдаемости в задачах навигационных определений	104
4.2. Общие сведения о структуре и типах математических моделей движения КА.....	108
4.3. Согласование структуры ММД с составом навигационных измерений и оптимизация их параметров	111
4.4. Понятие адекватности ММД и методика ее проверки.....	120
4.5. Критерии и методы сравнения ММД КА по точности и оперативности их использования	123
Глава 5. Обобщенная постановка задач определения параметров движения КА по результатам измерений.....	126
5.1. Определение параметров движения КА по результатам измерений в технологическом цикле БНО.....	126
5.2. Методы определения параметров движения КА	129
5.3. Повышение оперативности обработки измерений текущих навигационных параметров	135
5.4. Методы последовательного определения вектора состояния КА в условиях априорной неопределенности	137
5.5. Концепция и алгоритмы построения полиномиальной среды.....	157
5.6. Некорректность постановки и решения классических задач оперативного определения вектора состояния КА по результатам измерений	162

- 5.7. Особенности постановки задач БНО с учетом действия системных возмущений и дефектов внутренней структуры 173

Раздел 3. Содержание и структуризация математических моделей БНО околоземных космических полетов 178

Глава 6. Синтез функциональных структур корректных моделей движения КА 178

- 6.1. Общий подход к выбору математической модели движения и ее алгоритмическому представлению 178
- 6.2. Построение функциональной структуры системы 186
- 6.3. Использование таблиц узловых значений при решении задач сервисной баллистики 192
- 6.4. Линеаризация уравнений состояния и методы расчета изохронных производных 199
- 6.5. Функциональная структура подсистемы БО и иерархия решаемых ею задач 216
- 6.6. Прогнозирование движения КА 218
- 6.7. Постановка задачи создания проектно-исследовательского специального математического обеспечения 222

Глава 7. Технология построения математических моделей состояния и навигационных определений различной структуры 224

- 7.1. Системы координат, их преобразования и временные привязки 224
- 7.2. Выбор структуры математической модели внешних сил, действующих на КА в полете 232
- 7.3. Математическое описание управляющих сил 234
- 7.4. Модели воздействия на КА внешних условий, учитываемых при решении задач БНО 236
- 7.5. Представление моделей движения КА 248
- 7.6. Дифференциальные уравнения движения КА в неособенных переменных 252
- 7.7. Алгоритмические основы решения навигационных задач с использованием спутниковых радионавигационных систем 255

Глава 8. Баллистическое обеспечение задач проектной баллистики 279

- 8.1. Линеаризованные уравнения возмущенного движения КА этапа баллистического проектирования 279

8.2.	Определение затрат характеристической скорости на основе анализа влияния импульса скорости на отклонения параметров орбит в заданной точке.	283
8.3.	БО решения задач маневрирования в линеаризованной постановке	286
8.4.	Общая постановка задачи приближенного анализа влияния возмущающих ускорений на эволюцию орбиты	289
8.5.	Итерационная схема решения задач баллистического проектирования.....	292
Глава 9. Баллистическое обеспечение предполетной подготовки выведения КА на орбиту и расчет СБИ		295
9.1.	Учет возможных астробаллистических условий функционирования КА.....	295
9.2.	Определение положения подспутниковой точки при априорном построении трасс КА.....	301
9.3.	Условия видимости КА с пункта наблюдения	305
9.4.	Время существования КА на орбите ИСЗ.....	310
9.5.	Определение исходных данных на пуск РН для выведения КА на заданную орбиту	312
9.6.	Баллистическое обоснование зон отчуждения для падения отработавших ступеней РН	316
Глава 10. Методы оптимизации и расчета орбитальных маневров в полете		317
10.1.	Оперативное определение параметров управления маневрами как задача условной оптимизации	317
10.2.	Постановка задачи управления маневрами низкоорбитальных КА и основные пути ее решения.....	319
10.3.	Общий подход к аналитическому определению управляющего воздействия при различных составах регулируемых параметров при выполнении многоимпульсного маневра.....	328
10.4.	Расчет параметров управления маневров уклонения КА от поражающего воздействия космического мусора	331
10.5.	Аналитическое определение параметров оптимального управления двухимпульсным маневром коррекции географической долготы восходящего узла, экстремальной высоты и географической широты ее положения	338

10.6. Одноимпульсная коррекция фокального параметра и аргумента перигея	345
10.7. Методы численного уточнения параметров управления маневрами КА в общем случае	348
10.8. Совершенствование алгоритмов уточнения параметров управления в одноимпульсных вариантах маневров	369
Глава 11. Программно-математическое обеспечение БНО управления космическим полетом	372
11.1. Принципы построения комплекса программно-математических средств	372
11.2. Структура автоматизированного комплекса программ БНО	375
11.3. Автоматизированный банк баллистических данных	383
11.4. Технологические требования к баллистико-навигационным комплексам, ориентированным на большие объемы формально публичной информации	389
Раздел 4. Расчетно-теоретические основы БНО экспедиций освоения дальнего космоса	393
Глава 12. Прикладные аспекты баллистического обеспечения межпланетных полетов	393
12.1. Формулировка задач и анализ полетных схем экспедиций к планетам и телам Солнечной системы	393
12.2. Исходная постановка и методы решения «задачи n тел»	404
12.3. Формулировка ограниченной задачи трех тел	408
12.4. Метод гравитационных сфер и основные аспекты его применения	411
12.5. Постановка задачи синтеза БО формирования орбит с использованием гравитационных маневров	416
Глава 13. Особенности постановки задач коррекции орбит при выполнении межпланетных полетов	420
13.1. Принципы классификации коррекций траекторного движения КА при построении универсальных методик анализа БНО экспедиций освоения дальнего космоса	420
13.2. Постановка задачи определения условий применения теории стохастической коррекции орбит при планировании проектно-баллистического обеспечения межпланетных миссий	423

13.3. Элементы теории линейной коррекции.....	432
13.4. Математические основы параметрической коррекции.....	437
13.5. Связанные и независимые коррекции	439
13.6. Постановка задачи определения характеристик стохастической коррекции	442
13.7. Анализ стратегий коррекции движения АМС «Вега»	450
Глава 14. Баллистическое обеспечение полетов по периодическим орбитам, проходящим в окрестностях точек либрации	460
14.1. Введение в формирование баллистических схем межпланетных полетов с использованием точек либрации	460
14.2. Формы моделей движения задачи трех тел.....	465
14.3. Анализ допустимых движений.....	476
14.4. Математическая трактовка точек либрации и методы их определения	481
14.5. Структура фазового пространства задачи трех тел в окрестности коллинеарных точек либрации	483
14.6. Пространственное движение в окрестности точек либрации	487
14.7. Построение инвариантных многообразий	490
14.8. Расчетная схема построения двухимпульсных перелетов.....	492
14.9. Орбиты F-класса	495
14.10. Орбиты F-класса в Солнечной системе.....	499
14.11. Свойство синхронности F-орбит.....	501
14.12. Двухимпульсные перелеты на F-орбиты Земли и Луны.....	503
Литература	505

Научное издание

Лысенко Лев Николаевич
Бетанов Владимир Вадимович
Звягин Феликс Валерьевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ**

Технический редактор *Э.А. Кулакова*
Художник *А.К. Ездовой*
Корректор *О.Ю. Соколова*
Компьютерная графика *В.А. Филатовой*
Компьютерная верстка *М.Р. Фишера*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении обложки использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 28.05.2014. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 42,25. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.
E-mail: press@bmstu.ru
<http://www.baumanpress.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.
E-mail: baumanprint@gmail.com