

УДК 629.7.05, 621.398

© Макаров М.И., Кукушкин С.С., Кузин А.И., Рудаков В.Б.
Makarov M., Kukushkin S., Kuzin A., Rudakov V.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

ADVANCED TECHNOLOGIES OF MEASUREMENTS AND CONTROL OF SPACE ASSETS

Аннотация. Проведен анализ проблем, которые препятствуют созданию высокоэффективных систем измерений и управления КС. Определены сопутствующие области науки и техники, без использования результатов которых нельзя рассчитывать на получение ожидаемого высокого технического эффекта. Прежде всего, это относится к передаче информации по существующим каналам связи с ограниченной пропускной способностью и обеспечению ее защиты от помех и НСД. Значительное внимание уделено проблемам повышения эквивалентной энергетики передаваемых символов и сообщений при неизменных условиях их передачи. Показано, что подобные задачи могут быть решены только при использовании нетрадиционных подходов и технологий.

Annotation. The analysis of problems has been carried out that hinder the development of high performance systems of space assets measurement and control. The related scientific and technological areas were designated without using the results of which one cannot count on getting the anticipated high technologic output. Before everything else this covers the data transmission through existing communication channels with limited communication bandwidth and ensuring data jamming protection and security fetch protection. Significant attention is paid to the problems of raising the equivalent energetics of transmitted symbols and messages under the fixed transmission conditions. It is testified that similar tasks can be solved only with the use of non-conventional approaches and technologies.

Ключевые слова. Космическая система, наземный комплекс управления, командно-измерительный пункт, наземный автоматизированный комплекс управления, командно-измерительная система, несанкционированный доступ, бортовая телеметрическая система.

Key words. Space system, ground control, command and measuring station, the ground automated control system, command-and-measurement system, unauthorized access, on-board telemetry system.

Управление космическими аппаратами (КА) осуществляется с использованием наземных комплексов управления (НКУ), состоящих из объединенных сетью связи центров управления КА и рассредоточенных по территории страны командно-измерительных пунктов (КИП), оснащенных средствами траекторных измере-

ний, передачи на КА командно-программной информации и приема от них данных телеизмерений.

НКУ различными космическими средствами (КС) объединены в единый наземный автоматизированный комплекс управления (НАКУ). НАКУ КА был создан в 1957 г. и более 50 лет осуществляет управление

Макаров Михаил Иванович – доктор технических наук, профессор, директор-главный конструктор, НИИ КС им. АА. Максимова – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, тел. (495) 755-58-93.

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ КС им. АА. Максимова – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева;

Кузин Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор, заместитель Генерального директора ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева;

Рудаков Валерий Борисович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ КС им. АА. Максимова – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Makarov Mikbail – doctor of science (tech), professor, director – designer general of AA. Maksimov Space Systems Research Institute - Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center; Phone: . (495) 755-58-93;

Kukushkin Sergey – doctor of science (tech), professor, principal research scientist of AA. Maksimov Space Systems Research Institute - Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center;

Kuzin Anatolyi – doctor of science (technology) professor, deputy general director of Khrunichev Space Center;

Rudakov Valeriy – doctor of science (tech), professor, principal research scientist of AA. Maksimov Space Systems Research Institute - Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center.

орбитальной группировкой (ОГ) военного, социально-экономического и научного назначения. За это время многое изменилось: существенно увеличились объемы передаваемой информации, однако основополагающие принципы управления остались неизменными.

В настоящее время особо актуальной становится задача использования всей существующей номенклатуры космических радиоканалов, в том числе и каналов командно-измерительных систем (КИС) в качестве резервных средств, которые могли бы быть использованы для передачи информации специального назначения. Поэтому одно из перспективных направлений развития НАКУ КА заключено в том, чтобы существенно повысить информативность всех каналов связи, включая и каналы КИС. Но повышение объемов передаваемой информации приводит к необходимости расширения полосы пропускания радиоканалов и, как следствие этого, к ухудшению показателей помехоустойчивости передачи данных [1, 2]. Одновременно ухудшаются условия и для применения систем защиты информации от НСД, построенных на традиционных принципах. Так для установления устойчивых режимов синхронной работы бортового и наземного шифраторов требуется, чтобы вероятность искажения бит в каналах связи была не хуже значения 10^{-6} [3]. Такие условия могли быть обеспечены ранее при прежней информативности канала управления КА, равной 32 Кбит. Но при современных условиях без принятия специальных мер это требование невыполнимо, а следовательно, и эффективная защита командно-программной информации от НСД, помех и других воздействий в условиях радиоэлектронной борьбы (РЭБ) становится проблематичной.

Наземные командно-измерительные пункты (КИП), обеспечивающие решение задач определения параметров движения, информационно-телеметрического и командно-программного обеспечения, разнесены по широте и долготе таким образом, чтобы обеспечить по возможности непрерывную зону радиовидимости над всей территорией РФ для всех реализуемых наклонений запуска КА с отечественных космодромов. Однако эта возможность уже не может дать прежнего положительного эффекта, поскольку после распада СССР многие из КИПов остались за границей. Кроме того, из-за экономических проблем продолжается свертывание работы существующих КИП. Выход из создавшегося положения заключается в создании сети управления КА, находящихся вне зоны радиовидимости с использованием КА, выполняющих функции ретрансляторов сигналов.

В свое время выбор структуры НАКУ с territori-

ально разнесенными командно-измерительными пунктами был обоснован:

- возможностями и уровнем развития бортовых вычислительных систем;
- отсутствием глобальных средств связи;
- увеличением количества витков в зоне радиовидимости командно-измерительных пунктов более чем в 2 раза по отношению к однопунктной системе управления;
- возможностью применения двухпараметрических систем траекторных измерений, как правило, измеряющих наклонную дальность и радиальную скорость, сравнительно дешевых и простых в эксплуатации;
- обеспечением высокой надежности и устойчивости управления КА за счет избыточности видимых наземных КИП;
- простотой построения НАКУ как системы массового обслуживания КА различного назначения и различными требованиями по точности и устойчивости управления.

Необходимо отметить, что в начальный период эксплуатации НАКУ большое количество витков позволяло уточнять параметры верхних слоев атмосферы и гравитационного поля Земли. НАКУ сегодняшнего дня является уникальным комплексом, обеспечивающим функционирование на орбитах подавляющего большинства отечественных КА, а также КА международного сотрудничества. Ежедневно НАКУ проводит порядка 800 сеансов управления, обеспечивая высокую надежность их выполнения.

Управление КА включает в себя управление его движением и бортовой аппаратурой и в настоящее время реализуется по следующим технологиям:

- баллистико-навигационного обеспечения (БНО);
- информационно-телеметрического обеспечения (ИТО);
- командно-программного обеспечения (КПО).

Баллистико-навигационное обеспечение полета КА включает в себя измерение текущих навигационных параметров (ИТНП) движения КА; расчет или уточнение параметров орбиты по данным измерений; расчет требуемого значения корректирующего импульса двигательной установки КА для коррекции этих параметров. Основной технологией БНО является непосредственное ИТНП с наземных станций в комплексе с измерениями автономной системы навигации КА.

В настоящее время чрезвычайно быстро развиваются технологии НБО, ориентированные на комплексирование измерений навигационных параметров, полу-

ченных с использованием различных средств измерений. К их числу относятся: системы навигационных определений на основе сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС/GPS, беззапросных систем и систем телеизмерений. При таком подходе недостатки одной из систем могут быть восполнены за счет других.

Реализация этого научного направления получила существенное развитие на основе алгоритмической теории измерений [5–8]. Особую значимость для совершенствования систем измерений и управления представляют новые достижения в части разработки высокостабильных генераторов опорных частот. В настоящее время их стабильность достигает космических значений от 10^{-12} до 10^{-15} . Если такими генераторами будут синхронизированы передаваемые данные телеметрических систем, то разнесенный прием ТМИ может быть использован помимо основного назначения – контроля телеметрируемых параметров – и для навигационных определений. Кроме того, в состав перспективных бортовых телеметрических систем (БТС) включаются приемники сигналов СРНС с целью повышения точности временной привязки данных телеизмерений. Следовательно, будут созданы условия для того, чтобы телеметрический комплекс мог бы эффективно использоваться и по дополнительному своему назначению – для определения навигационных параметров [6–8].

Информационно-телеметрическое обеспечение включает в себя прием с КА, регистрацию и хранение телеметрической информации, формируемой бортовой телеметрической системой с помощью специальных датчиков; выделение информации этих датчиков, их математическую обработку, распределение по рабочим местам операторов для анализа; автоматизированный анализ с принятием решений о состоянии КА и его восстановлении в случае отказа. Технология ИТО в настоящее время реализуется в виде использования основного режима телеизмерений, предполагающего передачу с КА полных потоков телеметрической информации по автономному радиоканалу, а также использования информации обобщенного контроля, передаваемой по каналу КИС.

Перспективные технологии управления также предполагают широкое использование спутников-ретрансляторов для передачи командно-измерительной информации. Становится особо актуальной задача сокращения избыточности передаваемой информации. При этом формирование обобщенного потока ТМИ является только одной из частных задач, ориентированных на решение данной проблемы. Помимо этого, должны

активно развиваться различные технологии сжатия данных на синтаксическом, семантическом и прагматическом уровнях. Синтаксическое сжатие предполагает, что уменьшается объем передаваемых информационных и служебных символов без потери смыслового содержания передаваемой информации. Семантическое и прагматическое сжатие разнообразно по использованию методов, посредством которых оно реализуется. Один из примеров семантического сжатия при телеизмерениях предполагает устранение временной избыточности передаваемой информации, связанной с тем, что повторяющиеся значения, в том числе и находящиеся в определенном коридоре (интервале), передаются значительно реже по сравнению с требованиями теоремы Котельникова о дискретизации значений контролируемого процесса. Прагматическое сжатие предполагает, что обработка всей или определенной части информации осуществляется на борту контролируемого КА.

Командно-программное обеспечение (КПО) включает получение заявок от пользователей спецсистем КА на включение необходимых режимов, на основании которых (а также рассчитанных корректирующих импульсов и решений о поддержании работы КА, сформированных системами БНО и ИТО) осуществляется формирование необходимых последовательностей команд и передача их на КА. Технология КПО реализуется через непосредственную передачу командно-программной информации (КПИ) с наземных станций на находящиеся в зоне их радиовидимости КА, а также передачу КПИ через специальные спутники-ретрансляторы. Использование существующей технологии управления КА обуславливает значительную загрузку средств НАКУ. Совершенствование технологии управления КА является одним из основных направлений развития НАКУ КА, обеспечивающим наращивание его количественных показателей, прежде всего снижение загрузки и, соответственно, затрат на эксплуатацию средств управления КА.

Перспективные технологии КПО предполагают, что будет создана спутниковая сеть связи, благодаря чему управление станет непрерывным, не зависящим от зон радиовидимости, а технологии использования КА превратятся в адаптивные и интеллектуальные.

Основные проблемы поддержания технической готовности и развития НАКУ КА, измерительных комплексов космодромов (ИКК) связаны с ограниченными возможностями бюджетного финансирования на НАКУ, резко сниженными темпами замены устаревших образцов средств управления. Многие средства требуют капитального ремонта. Поддержание технической готовно-

сти сталкивается с серьезными трудностями из-за большого количества типов технических средств, а также прекращения производства целого ряда комплектующих элементов и приборов.

Обеспечение надежного управления ОГ КА требует поэтапного переоснащения НАКУ новым поколением высокотехнологичных средств управления и автоматизации и одновременного поддержания технической готовности существующих средств. Развитие и использование космических средств связи и ретрансляции, создание высокоточного глобального навигационного поля, технический прогресс в области малогабаритных вычислительных средств, а также вышедшие на первый план экономические факторы предопределили новые требования в развитии технологии управления КА.

Для обоснования перспективных направлений развития НАКУ КА разработана комплексная методика синтеза структуры НАКУ. На первом шаге осуществляется формирование детерминированных исходных данных (ИД) для синтеза. Осуществляется фиксация значений параметров, характеризующихся неопределенностью и не зафиксированных заранее, а также оценка характеристик оперативности, надежности и устойчивости функционирования элементов НАКУ при решении ими различных задач управления. На основе сформированных ИД последовательно решаются задача выбора состава бортовой аппаратуры управления и измерений КС, задача выбора технологии управления и измерений КС, задачи синтеза технической, функциональной и топологической структуры интегрированного НАКУ. После решения задачи синтеза топологической структуры следует детальная оценка степени удовлетворения заданных требований, для чего используются аналитические и имитационные модели. Аналитические модели используются на начальных циклах итерационного процесса, имитационные – на завершающих.

Если в результате моделирования установлено, что все ограничения и требования к ТТХ удовлетворяются, осуществляется переход к формированию программы развития структуры НАКУ. Если же какие-либо ограничения не выполняются, то проводится ужесточение последних и итерационный процесс повторяется. Новый подход к моделированию заключается в том, что разрабатываются различные нетрадиционные технологии измерений и управления КС, использование которых позволит снять остроту существующих проблем.

В том случае, когда не удастся найти допустимую программу развития структуры, то это означает, что перспективная структура не может считаться реализуемой

и, следовательно, должна быть уточнена. В этом случае вновь осуществляется коррекция ограничений частных задач синтеза, и процесс синтеза повторяется. Если решение задачи выбора программы найдено, то проверяется допустимость соответствующей структуры на аналитико-имитационных моделях.

Когда же сформированная программа является допустимой, методом статистических испытаний проводится оценка надежности ее реализации с учетом неопределенности соответствующих ИД (оценка риска заказчика). Если надежность программы не ниже требуемой, то процесс синтеза считается завершенным. В противном случае осуществляется корректировка значений ИД, зафиксированных на первом шаге. А именно, корректировке подлежат параметры, изменение которых позволит повысить вероятность выполнения ограничений.

Такая же процедура используется и в том случае, если требования по надежности не заданы, поскольку она обеспечивает минимизацию риска заказчика при выполнении тактико-технических и ресурсных ограничений.

Применение рассмотренной методики требует активного участия лица, принимающего решение (ЛПР). Поэтому ее программная реализация выполнена с использованием принципов построения гибридных экспертных систем, которые объединяют достоинства классических математических моделей и новых информационных технологий.

Проведенные с использованием комплексной методики синтеза структуры интегрированного НАКУ исследования показали, что наиболее перспективными направлениями совершенствования технологий измерений и управления КС являются:

- внедрение траекторного контроля КС на основе использования спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС/GPS;
- совершенствование информационно-телеметрического обеспечения на базе внедрения малогабаритных приемо-регистрирующих станций, адаптивного сжатия ТМИ, обработки ТМИ на борту КС, использования пакетной телеметрии;
- использование сетевых технологий управления многоспутниковыми системами;
- внедрение глобальных космических систем ретрансляции между объектами ракетно-космической техники (РКТ), центрами управления и обработки информации.

Результаты моделирования показали, что необходимость интеграции контуров траекторного и телеметри-

ческого контроля особенно важна для ракет-носителей (РН), где в силу скоротечности и однократности применения РН отсутствует необходимость периодического контроля и юстировки навигационной аппаратуры потребителей (НАП). Это позволяет, в первую очередь, именно на РН отказаться от автономного контура траекторных измерений, что, в свою очередь, снижает остроту проблемы оборудования наземными средствами новых азимутов для новых трасс запуска РН. В перспективе для РН должна быть создана интегрированная бортовая информационно-управляющая система, реализующая функции траекторного и телеметрического контроля, а также функции системы управления, с единым радиоканалом передачи информации с РН на средства интегрированного НАКУ.

Следующим важным направлением развития технологий управления КА является разработка и внедрение единых стандартов (форматов, протоколов) обмена информацией бортовой аппаратуры управления (БАУ) КС с наземными средствами, независимо от вида передаваемой информации, с переходом в перспективе к принципам пакетной коммутации. Это позволит отказаться от специализированных наземных средств обработки и передачи различных видов информации, резко сократить общее число соответствующих средств при значительном повышении эффективности их использования. При этом вся совокупность средств интегрированного НАКУ и бортовых средств управления должна рассматриваться как единая информационно-вычислительная сеть, соответствующая многоуровневой эталонной архитектуре открытых систем.

Эффективность использования средств НАКУ и его пропускная способность, особенно в пиковых ситуациях, могут быть повышены за счет внедрения гибких многовариантных технологий измерений и управления КС. При этом наряду со штатными технологическими циклами управления (ТЦУ), обеспечивающими наибольшую полноту и качество контроля КС, должны быть реализованы не менее одного-двух вариантов, так называемых сокращенных ТЦУ (СТЦУ), позволяющих на определенных интервалах времени без снижения целевой эффективности существенно сократить загрузку тех или иных средств. Это позволяет, как показывают оценки, на 15-20% повысить пропускную способность НАКУ, на 10-15% повысить эффективность и устойчивость управления КС в различных условиях обстановки.

В связи с разработкой новых космических систем, КА которых требуют оперативного и высокоточного навигационного обеспечения, не реализуемого с помощью НКУ, а также в связи с изменением геополитической об-

становки (уменьшение количества КИПов в России), актуальным является переход к использованию навигационного поля спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС/GPS для навигационного обеспечения КА научного и народнохозяйственного назначения, а также РН и разгонных блоков (РБ).

Использование радионавигационного поля полностью развернутой системы ГЛОНАСС позволит глобально до высот около 2000 км непрерывно определять положение КА-потребителей на орбите за время 0,5...4 мин с предельными погрешностями на уровне десятков метров и единиц см/с по составляющим вектора скорости.

Точность определения параметров движения КА-потребителя в основном зависит от погрешности взаимной синхронизации бортовых генераторов (БГ) НКА, погрешностей эфемерид и измерений псевдодальности и псевдоскорости. Обычно в состав погрешностей измерений также включают собственно аппаратурные погрешности и погрешности за счет условий распространения радиосигнала.

Методы навигационных определений околоземных КА по информации КНС имеют свои особенности по сравнению с другими видами потребителей. Так, по отношению к приземным потребителям КА отличаются большей детерминированностью их движения на длительных временных интервалах полета. Траектория их движения в пассивном полете представляется возмущенной кеплеровской орбитой со специфическим составом характерных для нее возмущений. Зависимость точности определения параметров орбитального движения от продолжительности интервала измерений приводит к новой задаче организации измерений на интервале навигационного сеанса. В то же время определение параметров движения КА по информации КНС имеет особенность по сравнению с задачей определения орбиты средствами наземного командно-измерительного комплекса, заключающаяся в возникающей в данном случае новой возможности непрерывных многопараметрических измерений, позволяющих в каждый момент определять положение и скорость КА с высокой степенью точности.

Следующей важной особенностью навигации околоземных КА является изменение условий навигации с изменением высоты орбиты КА. Речь идет, в первую очередь, о числе видимых навигационных КА КА-потребителем и связанной с этим точности навигации. Действительно, известно, что для достижения наивысшей точности навигационных определений потребитель должен проводить измерения навигационных параметров, как минимум, по специально выбранной четверке рабо-

чих навигационных КА (НКА) или по всем видимым НКА.

Низкоорбитальные КА - потребители в этом смысле имеют ряд преимуществ по сравнению с наземными средствами. В частности, КА-потребители имеют возможность наблюдения навигационных КА, расположенных ниже плоскости местного горизонта. При этом чем выше расположен КА-потребитель, тем большее число НКА он может наблюдать. Расчеты показывают, что с ростом высоты расположения потребителя оптимальное созвездие НКА приближается к потенциально достижимому, а наивысшая точность навигации по системе ГЛОНАСС и GPS может быть реализована для потребителей, расположенных на высотах начиная с 380 км.

Дальнейшее увеличение высоты потребителя прироста в точности уже не дает, и более того, начиная с некоторой высоты, условия наблюдаемости НКА начнут ухудшаться. Это связано с тем, что диаграммы направленности антенн НКА, излучающих навигационные сигналы, имеют конечную ширину. Так, для НКА системы GPS ширина диаграммы направленности на уровне половинной мощности для сигнала C/A составляет 44 град., что позволяет получать этот сигнал на орбитах потребителей высотой до 4100 км.

Навигационное обеспечение КА на орбитах высотой более 2000 км можно осуществлять по дискретному радионавигационному полю (ДРНП). Пространственно-временная дискретность радионавигационного поля обусловлена детерминированностью диаграммы направленности антенны НКА, невозможностью излучения радиосигналов в верхнюю полусферу, а также радиотенью из-за экранирующего влияния Земли.

В этих условиях для КА на орбитах с перигеем ниже 200 км и апогеем выше 2000 км («Молния» и др.) целесообразно использовать технологию, сочетающую определение параметров движения КА по единичным наблюдениям по ДРНП на перигейном участке с прогнозированием параметров движения (ПД) на апогейный участок орбиты с последующим уточнением ПД на апогейном участке орбиты по дискретному радионавигационному полю, формируемому даже одним НКА.

Для проведения особо точных работ, требующих знания положения центра масс КА - потребителей с погрешностями на уровне единиц метров по положению (например, при стыковке, проведении научных экспериментов и т.п.), может использоваться дифференциальный метод навигации.

Дифференциальный метод основан на том, что погрешности определения координат потребителя, обусловленные погрешностями синхронизации бортовых

эталонов времени НКА, погрешностями эфемерид и во многих случаях условиями распространения радиоволн, практически одинаковы для всех потребителей, расположенных в локальных областях с радиусом порядка 1000...2000 км. Определив эти погрешности на опорном пункте с хорошо известными координатами и передав их потребителям в данном локальном районе, можно существенно (на порядок и более) повысить точность определения их координат.

Широкое использование СРНС ГЛОНАСС/GPS даст существенный экономический эффект, так как при значительном увеличении числа КА в орбитальной группировке, возрастании требований к точности и оперативности определения орбит практически нет необходимости наращивать количество измерительных средств НАКУ, число сеансов измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) и, соответственно, потоки измерительной информации в системе управления.

Большой выигрыш от использования навигационной аппаратуры может быть получен в тех космических системах, где требуется поддержание заданной структуры системы и взаимного положения отдельных КА в системе (например, в низкоорбитальных системах связи). Навигационная аппаратура в этом случае будет выдавать непрерывно параметры взаимного положения отдельных КА в системе, что сократит загрузку НКУ и позволит оперативно проводить коррекции орбит отдельных спутников. В частности, для навигационно-связных и геодезических КА внедрение перспективной технологии позволит в 3...5 раз уменьшить загрузку средств НКУ, в 2...5 раз улучшить точностные характеристики решения целевых задач и в 5...10 раз увеличить интервал автономного функционирования.

Реализация новых технологий НБО на основе использования информации космических навигационных систем позволяет по-новому подойти к распределению функций в АСУ КА между бортовыми и наземными комплексами управления КА, перенося решение основной части задач управления КА на борт.

Эффективность информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) испытаний и управления космическими средствами определяется уровнем внедрения в практику телеметрического контроля достижений в области вычислительной техники (ВТ), измерительных и информационных технологий [3, 4]. Как показывают проведенные исследования, к числу перспективных технологий, в наибольшей степени удовлетворяющих потребностям практики, относятся измерительные и вычислительные технологии, связанные с формально-аналитическим

аппаратом представления результатов телеизмерений гомоморфными образами, а также информационные технологии, предполагающие обработку ТМИ на борту КС, сжатие объемов передаваемых данных и использование пакетных способов передачи результатов телеизмерений. Перспектива развития средств телеметрического контроля (ТК) предполагает разработку и внедрение в практику телеизмерений малогабаритных наземных приемо-регистрирующих станций (НПРС). Однако их облик и эффективность использования определяются техническими решениями и возможностями адаптации к измеряемым процессам и условиям функционирования бортовых средств телеизмерений, способствующих превращению их в интеллектуальную, интегрированную с бортовыми комплексами управления (БКУ) и внешними источниками измерений (тракторных, оптических) систему телеизмерений.

Технологии адаптивного сжатия ТМИ относятся к числу основных информационных и алгоритмических направлений совершенствования телеметрического комплекса (ТК), призванных существенно разрешить или ослабить существующие противоречия между необходимостью передачи огромных объемов данных, достигающих нескольких сотен млрд. бит, и оперативностью управления ракетно-космической техникой, космическими средствами, предполагающей значительное сокращение сроков обработки и анализа ТМИ, в том числе и до значений реального масштаба времени (РМВ).

Основу современных технологий сокращения избыточности передаваемых сообщений составляют алгоритмы синтаксического и семантического сжатия ТМИ. Синтаксическое сжатие предполагает повышение информационной нагруженности каждого из передаваемых символов ТМИ. Его основу составляют нетрадиционные представления данных телеизмерений их образами, сокращающие структурную избыточность ТМИ. Семантическое сжатие обеспечивает сокращение временной избыточности передаваемых данных. Его основу составляют апертурные методы уменьшения избыточности ТМИ, связанные с установлением границ, выход за пределы которых представляет собой существенный результат телеизмерения, подлежащий передаче.

Объединение различных методов сжатия в сочетании с вычислениями и алгоритмами обратного восстановления телеизмерений, представленных в конечных полях, является одним из подходов к построению и совершенствованию перспективных бортовых радиотелеметрических систем.

Сжатие ТМИ позволит в 5-10 раз сократить объе-

мы передаваемой информации и повысить на 5-6 дБ эквивалентную энергетику радиолинии. Это означает, что требуемые показатели достоверности приема ТМИ будут обеспечены при снижении в 8-10 раз требований к эффективной поверхности антенных систем. Возможность использования малогабаритных антенных систем создает условия для уверенного приема ТМИ при развертывании малогабаритных приемо-регистрирующих станций (ПРС) на необорудованных трассах, благодаря чему повышаются показатели мобильности и адаптируемости телеметрического комплекса (ТК). Кроме того, сжатие ТМИ обеспечивает возможность реализации ретрансляции сокращенных потоков телеизмерений с использованием спутников-ретрансляторов (СР) и передачи результатов телеизмерений по узкополосным телефонным каналам связи. Вследствие этого повышается качество управления КС.

Перспектива совершенствования обработки ТМИ связана с расширенным внедрением в телеметрический комплекс (ТК) персональной и микропроцессорной вычислительной техники (ВТ). Включение в состав бортовых радиотелеметрических систем (БРТС) микропроцессорной ВТ обеспечивает возможность постановки и решения следующих задач ИТО испытаний и штатной эксплуатации РКТ:

- обработки измерительной информации непосредственно на испытываемых КС с целью повышения качества управления КА;
- диагностирования неисправностей и прогнозирования аварий и отказов;
- определения стратегии устранения неисправностей и предотвращения аварий;
- реализации новых информационных технологий анализа, обработки, сжатия и помехоустойчивого кодирования передаваемой информации.

В свою очередь, перспектива совершенствования обработки ТМИ на борту КА связана с использованием и дальнейшим развитием следующих технологий:

- распараллеливания обработки и вычисления для реализации сверхбыстрых алгоритмов переработки ТМИ, обеспечивающих возможность анализа данных телеизмерений в реальном масштабе времени;
- создания условий для обнаружения ошибок как при передаче, так и на внутренних магистралях обмена информацией;
- упрощения алгоритмов и повышения точности вычислений на основе предварительной классификации и упорядочения данных, выбора соответствующего решаемым задачам замещающего поля представления дан-

ных и вычислений;

- адаптированного к условиям испытаний проблемно-ориентированного представления данных телеизмерений гомоморфными образами;
- использования нейрокомпьютерных технологий обработки данных и пакетных структур передачи сообщений.

Перспективные технологии передачи информации внешних источников через БРТС (тракторной, видеотелеметрической, сигнальной), сбора на борту, сжатия, передачи и ретрансляции сформированных данных также связаны с реализацией сверхбыстрых алгоритмов обработки ТМИ, вычислений сверток, преобразований Фурье, Лапласа и других специальных функций. Все они связаны с нетрадиционными представлениями данных телеизмерений и новыми информационными технологиями анализа экспериментальных данных.

Другим направлением развития технологий измерений и управления КС является внедрение сетевых технологий управления многоспутниковыми системами. Информационные сети, обеспечивающие возможность обмена данными между кооперирующимися абонентами, а также более эффективного использования их совокупного интеллектуального ресурса появились в процессе развития вычислительной техники. Перенесение этой идеи на системы обмена данными и управления космическими аппаратами представляется плодотворным, по крайней мере, в плане повышения оперативности доведения информации и сокращения количества наземных станций управления КА. Это обеспечивается за счет возможности при развитой сети с любой наземной станцией управлять любым КА без ожидания вхождения в зону непосредственной радиовидимости с использованием каналов ретрансляции информации.

Создание наземно-космической информационной сети (НКИС) предполагает наличие ретрансляционной аппаратуры на самих управляемых КА и наземных станциях (узлах сети). Основным системообразующим элементом такой сети может быть командно-измерительная система (КИС), устанавливаемая на всех КА для их управления. Отличительной особенностью такой КИС является возможность ее функционирования в режиме переретрансляции информации.

Функциональные задачи НКИС при управлении КА аналогичны задачам традиционных КИС вплоть до режимов измерения текущих навигационных параметров КА. Однако НКИС представляется целесообразным создавать, прежде всего, как системы оперативного обмена информацией, в том числе информацией целевого на-

значения КА и др.

Узлы НКИС в общем случае должны иметь в своем составе направленные и ненаправленные антенны (возможны также варианты построения малоинформативных НКИС, в которых в радиополосах КА-КА могут применяться, например, радиоволны КВ-диапазона и соответственно только слабонаправленные антенны).

Необходимость применения направленных антенн обуславливает основные проблемы реализации НКИС:

- организацию высокоскоростного поиска, вхождения в связь, поддержание линий визирования большого числа космических и наземных абонентов, движущихся по отношению друг к другу по различным траекториям;
- определение маршрутов прохождения информации с многократной переретрансляцией.

Можно выделить ряд способов организации НКИС. К основным относятся следующие:

- образование и удержание всеобщей информационной магистрали, объединяющей все узлы НКИС, после чего абоненты могут обмениваться информацией по определенным дисциплинирующим правилам;
- формирование при необходимости частных маршрутов обмена информацией, которые после проведения сеансов управления могут не удерживаться.

Образование всеобщей магистрали предопределяет возможность обмена информацией любого узла с любым другим. Инициативы обмена (источники информации) сообщают о себе соответствующей заявкой, которая удовлетворяется в плановое время. Достоинством такого способа организации НКИС является беспроисковый по радиотехническим параметрам (направление, частота, временная задержка и т.д.) режим работы после образования магистрали. Основным недостатком является необходимость с течением времени реорганизации магистрали, вследствие ее свойства разрушаться из-за перемещения КА относительно друг друга и наземной станции. Удержание всеобщей магистрали для системы низкоорбитальных КА (300...600 км), например, не превышает 5...7 мин времени нахождения КА в зоне радиовидимости наземной станции. Поэтому организация НКИС по типу всеобщей магистрали целесообразна при включении в сеть высокоорбитальных КА, когда сеть может удерживаться десятками минут и часами.

При организации частных маршрутов для обмена информацией недостатки, присущие всеобщей магистрали, исключаются, но требуется перед каждым сеансом связи выполнять технологические операции по вхождению в связь.

Процесс вхождения в связь в НКИС технически

может осуществляться следующим образом. Источник информации рассчитывает маршрут передачи информации, направленной антенной осуществляет поиск соседнего на маршруте абонента, который в это время функционирует в дежурном режиме приема с ненаправленной антенной (обязательной для КИС на случай управления КА в неориентированном режиме полета). После вхождения в связь по традиционным для КИС алгоритмам источник сообщает этому абоненту остаточный маршрут и находится в режиме ожидания квитанции от последнего на маршруте абонента. По мере образования радиолиний КА, работающие в режиме ненаправленного приема, могут при получении исходных данных переходить к применению направленных антенн. Получение квитанции источником информации свидетельствует о включении на всем маршруте режимов автосопровождения по текущим параметрам.

Учитывая динамичность процессов, протекающих в НКИС, наиболее адекватным инструментом исследования ее характеристик являются имитационные статистические модели, позволяющие вычислять как обобщенные показатели типа вероятностей выполнения операций по управлению КА, так и показатели, характеризующие качество сети, в частности:

- времена образования и удержания всеобщей магистралей и частных маршрутов;
- связность НКИС в виде зависимостей коэффициентов доступности КА с наземной станции (вероятностей наличия хотя бы одного маршрута в любой момент времени) от состава орбитальной группировки КА и наземных станций.

Оценки показывают, что при организации НКИС в составе нескольких десятков низкоорбитальных КА и 1...2 наземных станций время доведения информации между абонентами сети не превысит единиц минут; скорость передачи информации в радиолиниях может составлять от 1...2 кбит/с до нескольких десятков Мбит/с. Такая НКИС может обеспечить выполнение функций управления всеми КА - абонентами НКИС, передачи целевой информации с КА, информации телеметрического контроля, выполнение задач системы связи и передачи данных без применения специализированных спутников-ретрансляторов (СР).

Несмотря на наличие достаточно большого количества командно-измерительных пунктов (КИП) НАКУ и измерительных пунктов (ИП) космодромов и полигонов, общая зона радиосвязи с КА не превышает 15% от всей траектории движения, при этом число «глухих» витков может составлять 6 из 16 для низкоорбитальных КА. При

запусках объектов РКТ измерениями охвачены только отдельные сектора, а активные участки включения двигателей разгонных блоков остаются вне зоны видимости наземных пунктов.

Малая зона непрерывной связи с КА приводит к занижению возможностей целевого использования КА. Например, для КА оптико-электронного наблюдения Земли время заполнения бортового ЗУ видеoinформацией составляет единицы минут, после чего он не имеет возможности наблюдения до сброса целевой информации при пролете наземных пунктов приема. Поэтому эффективность целевого применения таких КА составляет единицы процентов по отношению к потенциальным возможностям наблюдения. Преодоление указанных недостатков возможно на основе внедрения космических систем ретрансляции (КСР) между объектами РКТ и центрами управления и обработки информации.

Традиционные экстенсивные технологии измерений и управления КС были ориентированы на количественное наращивание комплексов, систем и средств. Они требуют чрезмерных затрат и не позволяют существенно повысить показатели эффективности функционирования. В целом ряде случаев достигнуты граничные значения положительного эффекта от их применения, возможности улучшения которых ограничены физическими законами. Такое положение стало реальностью, например, при передаче телеметрической информации при испытаниях перспективных образцов ракетных комплексов, когда объемы передаваемых данных увеличились на порядок. При этом простой переход на цифровые технологии передачи ТМИ, реализованный в новом телеметрическом комплексе в составе: БРТС «ОРБИТА-IVMO» - МПРС, не смог компенсировать потери энергетики в радиоканале. Стало очевидным, что эту проблему без новых нетрадиционных технологий сжатия данных и обеспечения защиты информации от НСД и помех решить не представляется возможным. Следующим шагом на пути совершенствования систем измерений и управления является переход к адаптивным технологиям, методам, комплексам и системам. То, что делалось до настоящего времени - наращивание номенклатуры средств измерений и управления - также можно рассматривать как самую примитивную адаптацию к различным типам и условиям применения КС, осуществляемую на аппаратном уровне. Начат переход к новым адаптивным принципам построения перспективных систем измерений и управления КС на основе разработки нетрадиционных методов и технологий, которые могли бы быть реализованы в бортовом и наземном программно-математическом

обеспечении (ПМО). Научно-методическая база для подобного перехода подготовлена в результате расширяющегося внедрения в состав современной бортовой аппаратуры микропроцессорной вычислительной техники. При этом аппаратная составляющая модернизированных систем измерений и управления КС становится унифицированной, а требуемый уровень приспособления к изменяющимся условиям их применения обеспечивается путем перепрограммирования микроконтроллеров на борту и наземных вычислительных средств.

Очередной рубеж развития адаптивных методов и технологий, связанный с переходом к интеллектуальным системам, предполагает, что будет наработано множество различных вариантов проблемно-ориентированного оптимального решения задач измерений и управления КС [5-7]. Они должны отличаться друг от друга различными вариантами ограничений при постановке оптимизационных задач и учетом имеющихся отличий в части:

- используемых принципов измерений и управления КС;
- видов формируемой и обрабатываемой информации;
- условий и режимов ее передачи;

• методов защиты передаваемых сообщений и команд от НСД и помех.

Важная особенность предстоящего периода развития космических технологий заключается в том, что научная задача синтеза множества различных вариантов функционирования систем измерений и управления КС уже не может быть решена без прикладной теории, позволяющей поставить разработку различных нетрадиционных решений существующих проблем, и тех, что ожидают нас в будущем, на поток. Начало этому уже положено. В настоящее время разработаны конструктивная теория измерений и конструктивная теория конечных полей [6–8], применение которых позволило создать целый ряд новых технологий, относящихся к передаче, приему, сбору и обработке получаемой информации. Нарботанное к настоящему времени множество различных проблемно-ориентированных нетрадиционных подходов к решению проблем измерений и управления КС позволяет перейти к первому этапу разработки адаптивных технологий, предполагающему защиту данных от НСД и помех, повышение показателей достоверности и оперативности переработки передаваемой информации.

Литература

1. Калашиников ИД., Степанов В.С., Чуркин А.В. Адаптивные системы сбора и передачи информации. – М.: Энергия, 1975. – 240 с.
2. Адаптивные телеизмерительные системы / Под ред. А.В. Фремке. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
3. Меньшиков В.А., Макаров М.И., Пушкарский С.В. Многофункциональная космическая система Союзного государства. – М. НИИ КС, 2007. – 480 с.
4. Кузин А.И., Лозин С.Н. и др. Проектные исследования ГКНПЦ им. М.В. Хруничева по обоснованию многофазовой ракетно-космической системы // *Авиационная техника и технологии*. – 2010. – № 1.
5. Стахов А.П. Введение в алгоритмическую теорию измерения. – М. Сов. Радио, 1977. – 288 с.
6. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика: т. 1 «Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках», – М.: МО РФ, 2003 – 284 с.
7. Кукушкин С.С., Гладков И.А., Чаплинский В.С. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. – М.: МО РФ, 2008 – 327 с.
8. Кукушкин С.С. Математические методы преобразования и обработки измерительной информации при испытаниях и штатной эксплуатации ракетно-космической техники. – М.: Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, 2009. – 276 с.

Материал поступил в редакцию 1. 03. 2012 г.