

УДК 621.396

Подходы к построению и развитию систем информационно-телеметрического обеспечения функционирования и обработки многоспутниковых космических систем

Approaches to construction and development of information and telemetry support systems for operation and development of multi-satellite space systems

Воронцов / Vorontsov V.

Валерий Леонидович

(a762642@yandex.ru)

кандидат технических наук.

ФГБУ «Российский институт стандартизации»,

главный специалист.

г. Москва

Ключевые слова: информационно-телеметрическое обеспечение – information and telemetry support; программно-технические средства – software and hardware facilities; система информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения – information and telemetry support system for launch vehicle development; система информационно-телеметрического обеспечения функционирования и отработки многоспутниковых космических систем – information and telemetry support system for operation and development of multi-satellite space systems; телеметрируемый объект – telemetered object; телеметрическая информация – telemetry information.

В условиях увеличивающегося количества космических систем (КС) и космических аппаратов (КА) в их составе стремительно приближается момент, когда потребуются принципиальные изменения применяемых отечественных средств информационно-телеметрического обеспечения (ИТО), чтобы успешно решать целевые задачи с их использованием. Необходимы превентивные меры по обеспечению инвариантности средств ИТО по отношению к изменяющимся условиям их применения, причём с учётом отечественной специфики и возможностей, с учётом жёстких ограничений материальных ресурсов. Разработаны элементы научно-методического обеспечения построения и развития систем информационно-телеметрического обеспечения функционирования и отработки многоспутниковых космических систем (СИТО_{МКС}). С их использованием определены подходы к построению и развитию отечественных СИТО_{МКС}, обеспечивающие путём управления избыточностью данных телеизмерений их инвариантность в условиях увеличивающегося количества КС и КА в составе КС.

Amid the increasing number of space systems (SS) and spacecraft (SC) as a part of them, the moment is rapidly approaching when fundamental changes in the applied domestic means of information and telemetry support (ITS) will be required to solve target tasks successfully using these means. Preventive measures are required to ensure the invariance of ITS means in relation to changing conditions of their use, with taking into account domestic specific features and capabilities as well as the strict limitations of material resources. Elements of scientific and methodological support for the construction and development of multi-satellite space systems (ITSS_{MSS}) have been developed. With their use, approaches to the construction and development of domestic ITSS_{MSS} have been defined, that ensure their invariance by managing the redundancy of telemetry data amid the increasing number of SS and SC as a part of SS.

Введение

В настоящее время проявляются устойчивые тенденции развития космических систем (КС), заключающиеся в увеличении их количества и количества космических аппаратов (КА) в их составе, в увеличении разнотипности КА в составе орбитальной группировки (ОГ), в росте количества функций, осуществ-

ляемых космическими системами. Эти тенденции связаны с расширяющимися возможностями получения преимуществ от системного эффекта эмерджентности космических систем.

С учётом этих тенденций должен развиваться (адаптироваться к изменяющимся условиям) существующий наземный автоматизированный комплекс управления космическими аппаратами (НАКУ КА)

и, соответственно, средства информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) функционирования и отработки КА, ОГ, КС (далее, для краткости, – средства ИТО), чтобы успешно выполнять целевые задачи в перспективе.

При традиционном подходе к развитию НАКУ КА и средств ИТО (при экстенсивном подходе) следует ожидать, что с увеличением количества КА и увеличивающемся количестве орбитальных группировок соответственно увеличится суммарное количество телеметрируемых параметров (ТПП) КА и далее увеличится суммарная скорость формирования и передачи данных телеизмерений. Несложный экспертный анализ показывает, что в перспективе (скорее всего, относительно недалёкой) экстенсивный путь развития отечественных средств ИТО, заключающийся в обычном наращивании программно-технических средств (ПТС), окажется бесперспективным. Потребуется принципиальные изменения существующих средств ИТО, применяемых для поддержания и развития отечественной ОГ КА, ориентированных на специалистов-анализаторов, находящихся в центре управления полётами (ЦУП) КА, чтобы успешно решать задачи ИТО в условиях увеличения ОГ до нескольких тысяч КА (как в случае с системой спутниковой связи (ССС) Starlink [1]) в ожидаемой перспективе.

От объёма и скорости передачи данных телеизмерений, доставляемых от источника к потребителю, зависят затраты материальных и временных ресурсов [2]. Компактное представление данных телеизмерений (особенно в месте их зарождения – на телеметрируемом объекте [3]) создаёт благоприятные условия для экономии этих ресурсов. Однако требуются дополнительные затраты ресурсов на его осуществление. Кроме того, затраты ресурсов зависят от состава применяемых ПТС, от осуществляемых ими функций, касающихся компактного представления данных телеизмерений; от их местоположения. При этом должна быть получена телеметрическая информация (ТМИ), требуемая для полноценного анализа состояний отдельных КА, орбитальной группировки в целом и наземных элементов КС, для принятия необходимых решений по управлению космической системой. Отсюда – актуальность управления избыточностью данных телеизмерений и неочевидность способов его осуществления, особенно в относительно отдалённой перспективе и в условиях вышеупомянутых тенденций развития космических систем. Необходим принципиально новый подход к развитию средств ИТО, ориентированный на их интенсивный путь развития, обеспечивающий результативное управление избыточностью данных телеизмерений.

В условиях отсутствия устоявшихся терминов «многоспутниковая орбитальная группировка», «многоспутниковая космическая система» и в контексте настоящей работы принимаем исходное состояние (сегодняшний уровень развития) отечественных ОГ

(КС) как отправную точку развития многоспутниковых орбитальных группировок (МОГ) и многоспутниковых космических систем (МКС). Другими словами, в рассматриваемом случае многоспутниковая орбитальная группировка и многоспутниковая космическая система – это некие ожидаемые в перспективе ОГ и КС, когда в условиях вышеупомянутых тенденций в полной мере проявится невозможность экстенсивного пути развития имеющихся средств НАКУ КА и ИТО и, соответственно, появится необходимость интенсивного пути их развития.

Космическая система (КС) – совокупность одного или нескольких космических комплексов и специальных комплексов, предназначенных для решения целевых задач [4]. Космический комплекс (КК) – совокупность функционально взаимосвязанных орбитальных и наземных технических средств, обеспечивающих как самостоятельное решение целевых задач на основе использования космического пространства, так и в составе космической системы [4]. Специальный комплекс (СпК) предназначен для приёма специальной информации космических аппаратов, её регистрации, обработки, хранения и представления потребителям [4].

Система информационно-телеметрического обеспечения функционирования и отработки космических систем (СИТО_{КС}) – располагаемые материально-технические, стоимостные, временные, людские и другие ресурсы, которыми может воспользоваться оперирующая сторона (в том числе исследователь операции) для достижения цели операции, относящейся к решению задач ИТО функционирования и отработки космических систем (по аналогии с системой информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения [2], см. «Активные средства» в гл. 4 [5]). Соответственно, СИТО_{МКС} – система информационно-телеметрического обеспечения функционирования и отработки многоспутниковых космических систем. Сущности СИТО_{КС} (СИТО_{МКС}) соответствуют системному подходу к построению и развитию вышеупомянутых средств ИТО.

По аналогии со средствами выведения [2], независимо от того, осуществляется ли работа с МОГ по программе лётных испытаний (ЛИ), опытной эксплуатации (ОЭ) или штатной эксплуатации (ШЭ), результаты обработки полученной ТМИ и её анализа используют для совершенствования элементов МКС, т. е. осуществляется отработка МКС. При этом на какую-то часть КА из состава МОГ (и других элементов (МКС) может распространяться программа ЛИ, на другую часть – программа ОЭ, на третью – ШЭ. Одновременно обеспечивается функционирование МКС (включая КА из состава МОГ).

Возрастающая актуальность МКС, а также их специфика требуют, соответственно, определения направлений развития (подходов к развитию) отечественных СИТО_{МКС}.

Целью настоящей работы являются обоснованные подходы к построению и развитию систем информационно-телеметрического обеспечения функционирования и отработки многоспутниковых космических систем, обеспечивающих управление избыточностью данных телеизмерений в условиях увеличивающегося количества космических систем и космических аппаратов в их составе.

При написании настоящей работы использованы полученные ранее результаты, касающиеся решения аналогичных задач ИТО, относящиеся к научно-методическому обеспечению развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения космических аппаратов (СИТО_{СВ}) [2, 6–10 и др.], а также отработки другой ракетно-космической техники (РКТ) [11].

Особенности построения многоспутниковых орбитальных группировок, влияющие на требования, предъявляемые к СИТО_{МКС}

Существующие (и тем более ожидаемые в перспективе) орбитальные группировки КА весьма разнородны. Они могут содержать в своём составе от нескольких КА до нескольких тысяч (как в случае с ССС Starlink [1]) КА. В их составе могут быть КА разной массы – от больших (более 1000 кг) до фемтоспутников (не более 0,1 кг) [12].

Показаны [12] основные типы существующих космических систем, а именно: навигационные КС (например, «ГЛОНАСС»), КС связи [13] (типа ССС Starlink [1], «Луч» [14]), космические метеорологические системы, КС наблюдения и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (например, космические системы оперативного мониторинга различных ситуаций с применением КА «Канопус-В» [15]). Имеются также КС, связанные с исследованиями в дальнем космосе и с пилотируемой космонавтикой, и применяемые в интересах МО РФ.

Кроме традиционных КС и выполняемых с их использованием традиционных целевых задач, в условиях возрастающих возможностей МКС (МОГ) ожидается появление принципиально новых целевых задач. Например, отдельная МОГ, состоящая из фемтоспутников, распределённых в пространстве, в перспективе может выполнять функции антенной системы, конфигурируемой в соответствии с решаемыми задачами [16]. С их использованием возможно изучение гравитационного поля Земли [16]. Сформированное из них облако заданной и управляемой конфигурации может использоваться в качестве противоспутникового оружия или для блокирования определённых орбит [16].

Проявляется неопределённость перспектив развития даже традиционных типов КС, связанная со стремлением усилить эффект эмерджентности в условиях стремительно (и зачастую малопредсказуемо) возрастающих технологических возможностей и

различных (финансовых, производственных и т. д.) ограничений. Даже однотипные существующие КС имеют значительные принципиальные отличия (сравним, например, применяемые в настоящее время различные ССС [13]). В таких условиях появляются принципиально новые решения, касающиеся построения и развития МКС (МОГ).

В частности, для усиления эффекта эмерджентности предложено [17] осуществление кластеров мало-размерных КА (МКА), ориентированных на решение задач ДЗЗ. При этом кластер МКА является единым многофункциональным «виртуальным» аппаратом.

Кластер МКА системы ДЗЗ содержит МКА-«датчики», предназначенные для выполнения задач ДЗЗ в интересах потребителя, и управляющий МКА-«лидер», обеспечивающий взаимодействие с наземным контуром управления (НКУ) и потребителем, а также осуществляющий распределение задач между МКА-«датчиками», организацию их выполнения, контроль функционирования и технического состояния кластера в целом [17].

Предполагается [17], что система управления способна осуществлять контроль функционирования элементов МОГ в автоматическом режиме, а в случае выхода за пределы её способностей, в частности, связанном с аномальной (нештатной) работой бортовой системы какого-либо КА из состава этой МКС, – формирование на борту этого КА и выдачу сигнала «Вызов НКУ», означающего необходимость вмешательства специалистов НКУ в работу по устранению возникшей аномалии.

Необходимым условием успешного развития МКС является поточное производство КА для МОГ. Для его осуществления необходимо значительно повысить производительность и снизить материальные затраты по сравнению с существующими в отечественной практике, связанные с изготовлением и применением отдельного КА для МОГ.

Ниже показаны некоторые (уместные для настоящей работы) особенности построения и развития МКС на примере ССС Starlink [1].

Подъем КА Starlink на рабочую орбиту после выведения занимает в среднем 4 месяца. Расчётное время его функционирования на орбите составляет 5 лет, после чего орбита изменяется, осуществляется торможение об атмосферу и относительно быстрое сгорание КА.

Точная стоимость изготовления одного КА неизвестна, но по некоторым экспертным оценкам она составляет примерно 200–500 тыс. долларов США. Такая (исключительно низкая) стоимость стала возможной благодаря применению электронных комплектующих, изначально не предназначенных для работы в космическом пространстве, а также благодаря упрощению технологии изготовления КА (применён новый подход к производству и развёртыванию КА, заключающийся в том, что проблемы выявляют и устраняют

не в процессе наземных испытаний, а после вывода КА на орбиту). Обеспечиваемая скорость производства КА Starlink позволяет с высокой оперативностью поддерживать МОГ CCC Starlink.

Вероятность вывода КА Starlink на рабочую орбиту и последующего штатного функционирования на ней в течение запланированного срока равна примерно 0,89 (т.е. каждый десятый КА Starlink оказывается неисправным). Такая низкая надёжность является платой за очень низкую стоимость и относительно высокую скорость производства КА. При этом осуществляют меры по повышению надёжности и (как подтверждает статистика) количество неисправных спутников уменьшается.

Поверхность Земли разбита на ячейки обслуживания диаметром 24 км. В каждой ячейке могут размещаться 125–130 активных абонентских терминалов (АТ). Каждый КА Starlink, пролетая над соответствующей ячейкой обслуживания, обеспечивает прием/передачу данных от АТ пользователей, расположенных в этой ячейке, для дальнейшей ретрансляции их по фидерным линиям на шлюзовые станции (ШС). ШС через узлы доступа PoP (Point of Presence) посредством волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) подключены к наземной сети и далее к сети Интернет.

Управление CCC Starlink осуществляется из центра мониторинга и управления сетью NCMC (NCMC – network control and monitoring center). Судя по имеющимся сведениям [1], NCMC опрашивает каждый АТ и ШС в CCC не реже одного раза в 100 мс, оценивает их работоспособность и мощность излучения и при необходимости выдает команды на управление связью. ШС опрашивается через наземную сеть, а АТ – посредством передачи служебных пакетов через КА.

Осуществляется телеметрирование как КА МОГ, так и наземной части CCC Starlink, причём расчетное время сброса ТМИ с отдельного КА Starlink составляет 60 мин в сутки [1].

Зачастую целевая информация, поступающая пользователям от КС (МКС) или через КС (МКС), является лишь частью информации, используемой ими при решении своих целевых задач. Например, источниками геопространственной информации геоинформационных систем (ГИС) [19] являются не только данные ДЗЗ, полученные с применением КА, но и данные аэросъёмки, данные от геодезических станций, данные различных баз данных и т. д. При этом окончательными устройствами ГИС могут быть планшеты или смартфоны с соответствующим программным обеспечением и с доступом к сети Интернет, на экранах которых изображаются нужные пользователю карты местности с указанием его местоположения на них [19].

При построении и развитии отдельной КС (МКС) целесообразно учитывать требования, исходя из много-типности целевых задач, решаемых разными поль-

зователями (например, данные ДЗЗ, полученные с КА, могут использоваться как в геоинформационной системе, так и в системе оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций – пожаров, наводнений и т. д. – в заданных регионах страны). Эти требования могут оказаться противоречивыми. Особенно в условиях постановки принципиально новых целевых задач.

С целью систематизации знаний, используемых для увеличения преимуществ от системного эффекта эмерджентности космических систем в рассмотренных условиях проявляющейся их разнородности, неопределённости их развития и количественного роста целевых задач, решаемых с их использованием, целесообразно выделить следующие иерархические уровни:

- первый уровень (G_1): множество отдельных КА, ограниченное по количеству типов КА в нём, что позволяет рационально распределить силы и средства (применение однотипных ПТС, одинаковая или близкая специфика действий обслуживающего персонала – как это делается в настоящее время в ЦУП КА);

- второй уровень (G_2): множество отдельных (возможно, разнотипных) КА (G_1), объединённых в орбитальные группировки с целью получения системного эффекта (усиления эмерджентности);

- третий уровень (G_3): отдельные орбитальные группировки (G_2) дополнены наземными средствами (типа ЦОД, ВОЛС, CCC и т. д.), образующими вместе с этими ОГ космические системы; наземные ПТС могут быть как из состава ПТС НАКУ КА и специальных комплексов (СпК), так и внешними по отношению к ним (аренда, аутсорсинг);

- четвёртый уровень (G_4): разные КС (МКС) содержат множество одних и те же элементов (из множества G_3) для экономии сил и средств при выполнении разных целевых задач с использованием этих КС (МКС).

Для решения задач, относящихся к уровням G_1, \dots, G_4 , касающихся развития КС (МКС), необходимы соответствующие органы. Некоторые из них существуют в отечественной практике (в частности, ЦУП КА, ЦСАКП, ЦКЭР) и в какой-то мере решают задачи, относящихся к уровням G_1, \dots, G_4 . (ЦУП КА – центр управления полётом КА, ЦСАКП – центр ситуационного анализа и координационного планирования, ЦКЭР – центр координации эксплуатации и развития средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений).

Без детализации органов (типа ЦСАКП, ЦКЭР и т. д.) сосредоточимся на обосновании выбора путей (направлений) развития отечественных СИТО_{МКС}.

Многообразие сущностей отдельных КС (МКС), условия значительной неопределённости их развития должны быть учтены при обосновании выбора подходов (направлений) развития отечественных СИТО_{МКС} и, в частности, бортовой радиотелеметрической системы (БРТС) [3].

В условиях поточного производства КА, относительно низкой стоимости изготовления и выведения отдельного КА на орбиту и относительно низкой его надёжности (например, КА для МОГ Starlink) соответствующими (соразмерными) должны быть материальные затраты на изготовление БРТС для этих КА и требуемая скорость их изготовления, устанавливаемая с учётом частоты запусков КА, необходимой для поддержания нормального функционирования МОГ (типа МОГ Starlink).

В условиях массового использования МКА, позволяющих одним запуском РКН выводить на орбиту значительное количество МКА, а также выводить их в виде попутной полезной нагрузки, становятся актуальными требования по обеспечению низкой стоимости и высокой скорости изготовления отдельного МКА (аналогичные предъявляемым к КА Starlink). Соответствующие требования должны учитываться при построении БРТС для этих МКА, а именно: низкая стоимость и высокая скорость изготовления отдельного комплекта БРТС, его малые масса и габариты.

Целесообразно учитывать особенности условий (аналогичных условиям поддержания МОГ Starlink), когда выгоднее заменить новым КА исправный КА из состава МОГ, ресурс которого заканчивается (заканчивается расчётное время его активного существования на орбите), чем заменять его после отказа и превращения в космический мусор. В этих условиях повышается актуальность способов получения обобщённых параметров, характеризующих по результатам диагностирования степень деградации бортовых систем КА [20], используемых, в частности, при идентификации неисправностей (нештатных ситуаций) и формировании сигнала «Вызов НКУ» [17].

Замечено [21], что при удалении КА от Земли ухудшается качество радиосигнала, принимаемого по каналам «борт-Земля», вследствие чего могут оказаться обязательными ограничения скорости передачи информации по ним и, соответственно, скорости формирования данных телеизмерений БРТС.

Из представленных выше результатов краткого анализа отношений КС (МКС) и БРТС следует, что даже общие требования (без их детализации) к БРТС разнотипных КА не только разнообразны, но и во многом неопределённые. Вряд ли в таких условиях окажется возможным (и целесообразным) построение в обозримой перспективе однотипных (и тем более универсальных) БРТС.

Нужно отметить не только неопределённость, касающуюся БРТС для разнотипных КА из состава МОГ, но и невозможность построения НКУ для решения задач ИТО, связанных с МОГ, с использованием существующих (имеющихся) средств НАКУ КА, а также неочевидность направлений необходимого развития этих средств.

При этом кроме телеметрирования КА необходимо телеметрирование наземной части КС (МКС) –

типа АТ и ШС в ССС Starlink [1].

В отечественной практике при решении задач ИТО формируют данные ТМП, содержащие информацию о состоянии отдельных ПТС ИТО (в частности, информацию о состоянии датчика – «норма», «обрыв», «короткое замыкание»; об уровне сигнала АРУ, о соотношении «сигнал/шум» в задействованных наземных приёмно-регистрирующих станциях (ПРС)) – и т. д. Другими словами, осуществляется «телеметрия телеметрии» [22]. Эти (и аналогичные) данные целесообразно использовать при осуществлении контроля состояний и управления системой СИТО_{МКС}. Соответственно, актуальны подсистемы (системы в составе СИТО_{МКС}), выполняющие функции контроля и управления СИТО_{МКС}.

В сложившихся условиях значительной неопределённости искомые результаты развития СИТО_{МКС} таковы (они аналогичны искомым результатам развития СИТО_{СВ} [2]):

- построение компактного НАКУ КА, инвариантного по отношению к изменяющимся задачам ИТО;
- обеспечение подключения к НАКУ КА (временного включения в состав НКУ) внешних ПТС для расширения его возможностей (типа ЦОД, ВОЛС, ССС и т. д.);
- существенное сокращение потерь (получение дополнительной) телеметрической информации, обеспечение требуемой оперативности решения задач ИТО, уменьшение материальных затрат на решение задач ИТО.

Для получения искомого результата развития отечественных СИТО_{МКС} (как и в случае с СИТО_{СВ} [2]) необходима работа по двум направлениям. Первое направление связано с улучшением управления развитием СИТО_{МКС} (прежде всего с разработкой официальной концепции развития СИТО_{МКС}, системы стандартов телеметрии, соответствующей требованиям этой концепции), а второе – с разработкой и внедрением элементов СИТО_{МКС}.

Необходимо устранить эвентуальные угрозы, связанные с тенденциями развития МКС, предпринять превентивные меры по недопущению полномасштабного проявления подрывных технологий [9] в процессе развития отечественных СИТО_{МКС}.

Прежде всего необходимо обосновать подходы к построению и развитию отечественных СИТО_{МКС}. Они связаны (как и в случае с СИТО_{СВ} [2]) с управлением избыточностью данных телеизмерений.

Информационные потоки космических систем и связанные с ними противоречия при увеличении количества космических аппаратов в составе орбитальной группировки

Результаты усовершенствования и применения СИТО_{МКС} во многом зависят от методов действий

над сигналами/данными, содержащими ТМИ, от места, времени и ПТС их осуществления. Чтобы корректно сформулировать общие требования к развитию СИТО_{МКС} (выбрать обоснованные подходы к построению и развитию отечественных СИТО_{МКС}), проанализированы сущности потоков ТМИ, относящейся к рассматриваемой СИТО_{МКС}, их отношения с другими информационными потоками рассматриваемой КС. Актуальность понимания сущностей вышеупомянутых отношений связана с взаимовлиянием информационных потоков КС и СИТО_{МКС} и, соответственно, с актуальностью гармонизации их свойств (характеристик), направленной на оптимизацию суммарных материальных и временных затрат (исходим из того, что при решении задач усовершенствования и применения КС и СИТО_{МКС} расходуют ресурсы, которые могут перераспределяться).

ТМИ, получаемая от СИТО_{МКС}, предназначена для решения следующих задач:

- текущие задачи функционирования МКС, включая текущие задачи управления орбитальной группировкой;

- выявление и устранение недостатков в ходе ЛИ, ОЭ и ШЭ (в ходе отработки) – конструктивных и связанных с особенностями применения элементов МКС (прежде всего, недостатков КА, входящих в состав ОГ МКС);

- усовершенствование самой СИТО_{МКС}.

В контексте настоящей работы рассмотрены информационные потоки космических систем, содержащие следующие виды информации (по её назначению):

- управляющая информация;
- телеметрическая информация (ТМИ);
- информация о текущих навигационных параметрах;
- целевая информация (ЦИ);
- бортовая шкала времени.

Источники и конечные потребители (оконечные устройства) перечисленных выше информации в существующих КС расположены на борту КА или являются наземными ПТС.

На борту КА размещены следующие ПТС (важные с точки зрения настоящей работы):

- бортовая аппаратура командно-измерительной системы (БАКИС);
- бортовая система управления (БСУ);
- БРТС [3];
- целевая аппаратура (ЦА).

Выделим следующие наземные ПТС:

- наземная командно-измерительная система (НКИС);
- приёмно-регистрирующая станция (ПРС);
- ПТС наземного специального комплекса космической системы (НСпК КС) [4] (например, для информации о ДЗЗ таким комплексом является наземный комплекс приёма, обработки и распространения информации (НКПОР));

- ПТС центра управления полётами космических аппаратов (ЦУП КА).

Рассмотрим кратко типичные сущности вышеупомянутых информационных потоков (рис. 1).

Управляющая информация (радиокоманды, командно-программная информация) поступает по радиоканалам от НКИС в БАКИС и от БАКИС – в БСУ. Сформированная в БСУ управляющая информация поступает на управляющие входы различных бортовых систем, в частности, в БРТС и в ЦА, соответственно изменяя их конфигурацию и режимы работы.

Непосредственно к БСУ подключены определённые датчики (например, датчики первичной информации БСУ, в частности, астродатчики, приборы ориентации на Землю, приборы ориентации на Солнце и т. д. [21]). В бортовой цифровой вычислительной системе (БЦВС) БСУ, кроме управляющих данных, формируют данные, содержащие информацию о состояниях КА (например, о выданных и исполненных командах на включение или отключение различных бортовых устройств, о физических параметрах – углах, токах, температурах и т. д., позволяющих получить оценки функционирования отдельных бортовых систем; об определённых состояниях КА или какой-либо его бортовой системы типа «на данный момент идет приём от НКИС полётного задания для управления системой управления движением КА» [21]). Назовём эту информацию «информацией БЦВС». Информация БЦВС инжектируется в структуру ТМИ (см. рис. 1), формируемую БРТС (БИТС).

От БСУ в ЦА может поступать «поддерживающая информация» [21] (данные, содержащие сведения о местоположении КА, о текущем бортовом времени космического аппарата, командно-программную информацию для изменения бортовых программ целевой аппаратуры [21]).

С использованием управляющей информации, полученной от НКИС, а также с использованием других информации (типа от вышеупомянутых астродатчиков, приборов ориентации на Землю и т. д.; см. рис. 1), поступивших от бортовых систем КА, БСУ по заложенным в неё алгоритмам (программам) генерирует управляющую информацию, реагируя на изменения состояний КА и изменяя состояния КА.

Для формирования ТМИ бортовой радиотелеметрической системой измерений (бортовой информационно-телеметрической системой (БИТС) [3]) в соответствии с программой телеметрических измерений (ПТИ) [3] от датчикопреобразующей аппаратуры на входы БИТС (на входы БРТС) поступают первичные сигналы [3] (см. рис. 1). В блоки данных, формируемые БИТС, кроме данных, содержащих информацию БЦВС, могут быть инжектированы (и это существующий в практике пример) данные навигационной аппаратуры потребителя (если эта аппаратура установлена на борту КА), видеометрии и т. д. (см. рис. 1). Другими словами, по телеметрическим каналам (через БИТС) обычно

передают, кроме ТМИ, другие (например, вышеупомянутые) виды информации.

Альтернативой вышеупомянутому инжектированию в блоки данных, формируемые БИТС, является применение технологии «пакетной телеметрии» CCSDS [23] (CCSDS – Consultative Committee for Space Data Systems – Консультативный Комитет по космическим системам передачи данных). Особенность технологии состоит в том, что каждый вид информации передают в отдельных пакетах, сформированных по правилам CCSDS [23], что позволяет передавать эти пакеты в едином информационном потоке (по единому каналу связи).

Сформированные БИТС (БРТС) блоки данных передают по каналам «борт-Земля» и принимают наземными ПРС из состава НКУ. ТМИ, принятую ПРС, передают в ЦУП КА в темпе её поступления или в режиме воспроизведения (в отложенном режиме).

Целевую информацию (ЦИ), сформированную ЦА, по радиоканалам передают в НСпК КС (в частности, информация о ДЗЗ поступает в НКПОР) и далее (из НСпК КС) – её конечным потребителям. При этом данные о состоянии ЦА (данные от датчиков преобразующей аппаратуры, применённой для телеметрирования ЦА) могут поступать как непосредственно на входы БИТС (БРТС), так и на входы БИТС через БСУ (БЦВС) в виде информации БЦВС (см. выше).

Целевую информацию (ЦИ) и ТМИ передают по радиоканалам «борт-Земля» как совмещённо, так и отдельно. В случае совмещённой передачи применяют технологии «пакетной телеметрии» CCSDS [23]. С использованием ПТС НСпК КС из единого информационного потока (из потока данных, передаваемых по единому каналу связи) выделяют ЦИ и ТМИ, ТМИ передают в ЦУП КА.

Блоки данных с ТМИ от БРТС в заданные временные интервалы (по командам от БСУ) поступают в БАКИС и через его передающее устройство (по обратному каналу командной радиолнии) – в НКИС. Это могут быть, например, временные интервалы выдачи на борт КА радиокоманд наземной командно-измерительной системой и, соответственно, контроля их прохождения. ТМИ от БРТС для БАКИС и далее для НКИС называется [17] «информацией обобщённого контроля» (ИОК).

Для получения информации о текущих навигационных параметрах широко применяют навигационную аппаратуру потребителя (НАП), размещаемую на борту КА, если высота его орбиты не превышает 2000 км [24]. Альтернативой НАП могут быть ПТС, в которых реализован фазовый метод измерения дальности с применением, в частности, телеметрических сигналов, содержащих ПСП-последовательности [25, 26].

На борту КА осуществляют (в частности, с использованием информации, полученной от системы ГЛОНАСС или GPS) формирование и хранение бортовой шкалы времени, а также формирование высокостабильных синхронизирующих сигналов [21].

Данные бортовой шкалы времени (см. рис. 1) передают в потоке данных телеизмерений, формируемых БИТС (БРТС). Они необходимы, чтобы (в частности, в случае воспроизведения ТМИ, накопленной в бортовом запоминающем устройстве БИТС) привязать полученные с задержкой с использованием наземных ПТС данные телеизмерений к шкале полётного времени КА.

Заметим, что данные телеизмерений, принимаемые наземными ПТС (в частности, ПРС), сопровождаются данными шкалы станционного времени, формируемыми с использованием сигналов системы единого

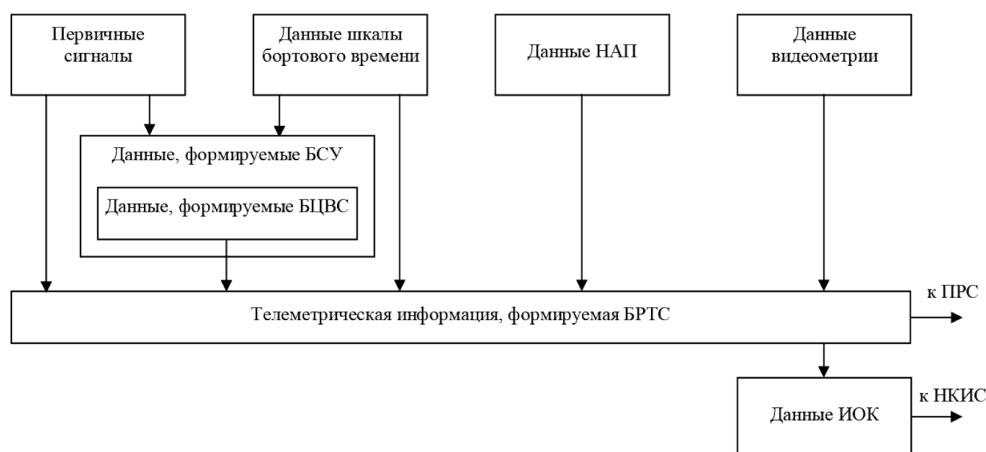


Рис. 1. Отношения ТМИ, формируемой БРТС, с другими информациями, формируемыми на борту КА

времени. При обработке ТМИ шкалу станционного времени приводят к шкале полётного времени КА.

Обычно обмен данными на борту КА [21] осуществляют (в том числе с применением БРТС, БАКИС, БЦВС и ЦА) по стандартным мультиплексным каналам обмена [27].

ТМИ и ИОК, принятые, соответственно, ПРС и НКИС, по каналам системы сбора поступают в ЦУП КА. В ЦУП КА также поступает ТМИ, принятая ПТС НСПК КС (в случае совмещённой передачи ЦИ и ТМИ, см. выше). В ЦУП КА решают задачи информационно-телеметрического обеспечения функционирования КА (осуществляют формирование, передачу, приём, обработку, хранение, документирование ТМИ [4]). (Кроме информационно-телеметрического обеспечения в ЦУП КА решают задачи командно-программного, баллистико-навигационного обеспечения [4]). По результатам обработки и анализа принятой информации (в том числе принятой ТМИ) в ЦУП КА осуществляют планирование режимов функционирования (сеансов связи) бортовых систем КА и, соответственно, ПТС НКУ (в том числе планирование режимов функционирования БРТС, ПРС и НКИС).

Данные результатов обработки ТМИ в ЦУП КА передают различным потребителям. Например [28], ТМИ КА «Канопус-В» передают, в частности, сотрудникам подразделения при главном конструкторе этого КА; необходимый обмен данными, связанными с ТМИ, осуществляется между ЦУП КА и единым ЦУП управления разгонными блоками (ЕЦУП РБ). В зависимости от состава КА в ОГ, целевых задач, решаемых космической системой, специфики задач ИТО функционирования и обработки КС будет изменяться состав потребителей (пользователей) ТМИ. Неопределённость состава потребителей ТМИ, их требований к получаемой ТМИ нужно учитывать при определении направлений (стратегий [2]) развития СИТО_{МКС}.

Также нужно учитывать ограничения, касающиеся скорости передачи и накапливаемых ПТС НКУ объёмов ТМИ [21]. Так, уменьшение скорости передачи ТМИ по каналу «борт-Земля» может быть связано с увеличением расстояния от КА до Земли и соответствующим увеличением уровня шума в канале [21], а устанавливаемый максимальный суточный объём ТМИ, передаваемой с борта КА [21], – с возможностями НКУ, связанными с относительно большим суммарным количеством сеансов связи с КА в течение суток и с существующим (относительно невысоким) уровнем автоматизации задач ИТО. Другими словами, существуют требования (ограничения), касающиеся полноты ТМИ и времени морального старения данных результатов обработки ТМИ.

В случае традиционных действий над сигналами/данными, содержащими ТМИ, (аналогично СИТО_{СВ} [2]) при увеличении количества КА соот-

ветственно увеличивается количество ТМП и далее увеличиваются суммарная скорость формирования данных телеизмерений в месте их зарождения и суммарная скорость передачи данных телеизмерений по каналам связи СИТО_{МКС}. При этом увеличивается количество ПТС в составе НКУ, возрастают затраты материальных ресурсов на решение задач ИТО.

Чтобы нивелировать по возможности разницу между ОГ с относительно малым и относительно большим количеством ТМП и создать таким образом необходимые условия обеспечения инвариантности НАКУ КА к изменяющимся задачам ИТО (неизменности ПТС НКУ, формируемых для работы с различными ОГ/МОГ), необходимо компактное представление ТМИ. Особенно в месте её зарождения, особенно на борту КА.

Обеспечение вышеупомянутой инвариантности и минимизации количества ПТС в составе НАКУ КА должно осуществляться также путём унификации и стандартизации [2] элементов СИТО_{МКС}.

Показано [2], что обычно употребляемый термин «сжатие данных» [29] определён, но не всегда достаточно полно характеризует действия, составляющие сущности термина «компактное представление ТМИ», применённого в настоящей работе. С компактным представлением ТМИ (а не «сжатием данных» по общепринятой [29, 30] терминологии) связаны преобразования первичных сигналов [2], рациональное (максимальное) заполнение структур телеметрических слов и блоков данными, содержащими информацию [2], и т. д. Следовательно, сжатие данных является частным случаем компактного представления ТМИ.

Подходы к разработке научно-методического обеспечения построения и развития СИТО_{МКС}

Как и в случае с СИТО_{СВ} [2], развитие СИТО_{МКС} осуществляется в результате выполнения операций по их усовершенствованию и по применению (в том числе по применению усовершенствованных СИТО_{МКС}). Также используемый при этом научно-методический аппарат базируется на имеющемся [5, 31] научно-методическом аппарате, предназначенном для оценивания эффективности операций с использованием технических систем.

Аналогия, касающаяся развития СИТО_{СВ} и СИТО_{МКС}, связана с тем, что в обоих случаях оперируют элементами информационных систем, ориентированных на задачи анализа функционирования телеметрируемых объектов [3], имеющих, однако, отличительные особенности.

Полагают [31], что для оценивания результата операции Y , выполненной в соответствии со стратегией u , используют три группы параметров, харак-

теризующих полезный эффект q , материальные затраты C и оперативность T :

$$Y(u) = Y(q(u), C(u), T(u)). \quad (1)$$

Соответственно, результат Y_{yc} операции усовершенствования СИТО_{МКС}:

$$Y_{yc}(u_{yc}) = \langle \Delta Y_{прим}(u_{yc}), C_{yc}(u_{yc}), T_{yc}(u_{yc}) \rangle, u_{yc} \in U_{yc}, \quad (2)$$

где $\Delta Y_{прим}$ – улучшение результата применения усовершенствованной СИТО_{МКС}, или полезный эффект от усовершенствования (аналогично q (1));

C_{yc} – материальные затраты на усовершенствование СИТО_{МКС};

T_{yc} – время выполнения операции усовершенствования СИТО_{МКС};

u_{yc} – выбранная из множества U_{yc} стратегия усовершенствования СИТО_{МКС}.

В частности, показатели C_{yc} и T_{yc} (2) могут быть связаны с затратами и сроками выполнения НИОКР в соответствии с Техническим заданием, или стратегией u_{yc} (2) [2].

Из (2) следует [2]:

$$W_{эф_Y_yc} = \langle W_{эф_ΔY_прим}, W_{эф_C_yc}, W_{эф_T_yc} \rangle, \quad (3)$$

где $W_{эф_Y_yc}$ – общий показатель эффективности усовершенствования СИТО_{МКС};

$W_{эф_ΔY_прим}, W_{эф_C_yc}, W_{эф_T_yc}$ – частные показатели, соответствующие $\Delta Y_{прим}, C_{yc}$ и T_{yc} (2), причём

$$W_{эф_ΔY_прим} = \langle \Delta W_{эф_W_ан_Σ}, \Delta W_{эф_C_прим}, \Delta W_{эф_T_прим} \rangle, \quad (4)$$

где $\Delta W_{эф_W_ан_Σ}$ – показатель улучшения качества данных для решения задач анализа;

$\Delta W_{эф_C_прим}, \Delta W_{эф_T_прим}$ – показатели сокращения материальных затрат при решении задач ИТО и повышения оперативности решения задач ИТО (при осуществлении стратегий $U_{прим}$ применения СИТО_{МКС}), соответственно.

Подставив (4) в (3), получим

$$W_{эф_Y_yc} = \langle \Delta W_{эф_W_ан_Σ}, \Delta W_{эф_C_прим}, \Delta W_{эф_T_прим}, W_{эф_C_yc}, W_{эф_T_yc} \rangle. \quad (5)$$

Установлены [2] правила вычисления общего показателя $W_{эф_Y_yc}$ (5), базирующиеся на балльных оценках.

Формализованное описание альтернативных стратегий $U_{прим_**}$ применения СИТО_{МКС}, из которых предстоит выбрать с использованием общих (обобщённых) показателей $W_{эф_Y_yc}$ (5) рациональные стратегии $U_{прим_рац}$ ($U_{прим_рац} \subset U_{прим_**}$), как и в случае СИТО_{СВ}, представлено в виде последовательностей кортежей [2]:

$$U_{прим_**} = \langle Z_{ИТО_иссл}, O^*, Reg_{R_**}, F_{R_**}, R^{**}, Met_{R_**}, Q_{R_**}, T_{R_**} \rangle, \quad (6)$$

где $U_{прим_**}$ – множество стратегий операций применения СИТО_{МКС} по целевому назначению;

$Z_{ИТО_иссл}$ – задачи ИТО;

$Reg_{R_**}(F_{R_**})$ – режимы функционирования (функции), осуществляемые ПТС R^{**} ;

Met_{R_**} – методы, реализованные ПТС R^{**} ; обычно методы $Met_{Q_ТМИ}$ – методы непосредственных действий над ТМИ;

Q_{R_**} – сигналы и данные, относящиеся к СИТО_{МКС};

$Q_{ТМИ}$ – сигналы и данные, содержащие ТМИ;

T_{R_**} – последовательности текущего времени при осуществлении функций F_{R_**} , режимов Reg_{R_**} ;

O^* – множество телеметрируемых объектов [3], причём функции F_{R_**} реализуют в отдельных ПТС или в отдельных группах ПТС R^* из состава ПТС СИТО_{МКС}:

$$F_{R_**} = \langle R^*, Met_{R_**}, Q_{R_**}, T_{R_**} \rangle, \quad (7)$$

а совокупности функций F_{R_**} , выбираемые при осуществлении стратегий $U_{прим_**}$ (6), характеризуют режимы функционирования ПТС СИТО_{МКС} в целом:

$$Reg_{R_**} = \langle F_{R_**}^{(1)}, F_{R_**}^{(2)}, \dots, F_{R_**}^{(N)}, T_{R_**} \rangle. \quad (8)$$

Сущности телеметрируемых объектов O^* (6) опосредованы через множество $Q_{ТМИ_ПП_O_**}$ первичных сигналов [3] ($Q_{ТМИ_ПП_O_**} \subset Q_{R_**}$ (6)), траекторий Tr_{O_**} , которые могут быть в свою очередь опосредованы через зоны радиовидимости ПТС телеметрического комплекса НКУ, и (с учётом специфики СИТО_{МКС}) через последовательности T_{R_**} (6) текущего времени:

$$O^* = \langle Q_{ТМИ_ПП_O_**}, Tr_{O_**}, T_{R_**} \rangle. \quad (9)$$

Элементы кортежа (6) соответствуют определённым моментам или периодам времени T_{R_**} (т. е. стратегии $U_{прим_**}$ осуществляются во времени). Первичные сигналы $Q_{ТМИ_ПП_O_**}$ (9) (аналогично СИТО_{СВ} [2]) поступают на входы ПТС СИТО_{МКС}, являются выходными сигналами датчикопреобразующих устройств, размещённых на различных элементах КС_{МОГ}, включая и элементы НКУ, и самой СИТО_{МКС}. В этом случае элементы КС_{МОГ} и СИТО_{МКС} также являются телеметрируемыми объектами [3].

Наиболее важные атрибуты стратегий (6) – методы $Met_{Q_ТМИ}$ действий над сигналами/данными $Q_{ТМИ}$, содержащими ТМИ, ($Met_{Q_ТМИ} \subset Met_{R_**}$ (6)):

$$Met_{Q_ТМИ} = \langle Met_{Q_ТМИ_измер}, Met_{Q_ТМИ_преоб}, Met_{Q_ТМИ_накопл}, Met_{Q_ТМИ_обмен} \rangle, \quad (10)$$

где $Met_{Q_ТМИ}$ – методы непосредственных действий над ТМИ $Q_{ТМИ}$;

$Met_{Q_TMI_измер}$ – методы измерений физических величин для последующего формирования ТМИ (для формирования первичных сигналов [3] $Q_{TMI_ПП}$);

$Met_{Q_TMI_преоб}$ – методы преобразования (обработки) ТМИ;

$Met_{Q_TMI_накопл}$ – методы накопления (регистрации) ТМИ;

$Met_{Q_TMI_обмен}$ – методы обмена данными при передаче ТМИ по каналам связи.

Методы Met_{Q_TMI} (10) осуществляют в ПТС $R_{СИТО}$ СИТО_{МКС}. Они аналогичны методам, относящимся к СИТО_{СВ} [2].

Показано [2], что цели Cel действий над сигналами/данными Q^* с использованием программно-технических средств R^* и реализованных методов Met^* (рис. 2)

$$Cel = \{Pred, Osh, Izb\} \quad (11)$$

связаны с решением триединой задачи:

– представление сигналов/данных в соответствии с заданной формой (структурой) $Pred$;

– обнаружение Osh_1 и устранение Osh_2 искажений (ошибок) Osh ($Osh = \{Osh_1, Osh_2\}$);

– создание $Izb_{соз}$ и устранение $Izb_{уст}$ избыточности Izb ($Izb = \{Izb_{соз}, Izb_{уст}\}$).

Компоненты Cel взаимосвязаны и противоречивы [2].

Наиболее ценны новые методы, обеспечивающие сокращение потерь ТМИ и компактное представление данных телеизмерений (т. е. методы, обеспечивающие управление избыточностью данных телеизмерений СИТО_{МКС}).

Широкие возможности СИТО_{МКС} связаны с управлением методами Met_{Q_TMI} (10).

Сущности действий по изменению свойств методов множества Met_{Q_TMI} (10) в зависимости от изменяющихся условий их применения таковы (Upr_1) [2]:

– отсутствие действий (неизменные априори устанавливаемые свойства методов), $Upr_1=1$;

– изменение исходных данных ($Q_{ИД}$) для функционирования отдельного метода (например, изменение размера апертуры для метода сжатия данных

путём аппроксимации полиномом первой степени), $Upr_1=2$;

– замена одного метода, осуществляемого в отдельном ПТС, другим (например, методы сжатия данных CCSDS [32] – перебор методов с целью выбора обеспечивающего максимальный коэффициент сжатия), $Upr_1=3$;

– осуществление комбинирования отдельных методов, реализованных в распределённых ПТС СИТО_{МКС} ($Upr_1=4$).

Для осуществления управляемого процесса комбинирования отдельных методов, реализованных распределённо в СИТО_{МКС} ($Upr_1=4$), необходима синхронизация процесса изменения свойств методов по времени (аналогично описанной в [33]).

Представленная выше классификация соответствует иерархической структуре. Её нижний уровень касается управления свойствами отдельного метода, а верхний – всей совокупности методов множества Met_{Q_TMI} (10), используемых в СИТО_{МКС}.

Представлены [2] следующие характеристики гибкости изменения свойств методов из множества Met_{Q_TMI} (10) (Upr_2):

– априори устанавливаемые (неизменные) свойства, $Upr_2=1$;

– изменяемые оператором вручную с помощью органов управления ПТС (например, с использованием клавиатуры ПЭВМ), в том числе дистанционно, $Upr_2=2$;

– программируемые изменения свойств (в заданные моменты времени), $Upr_2=3$;

– изменения свойств путём адаптации к изменяющимся условиям, $Upr_2=4$.

Управляющие данные в виде исходных данных $Q_{ИД}$ или команд $Q_{ком}$ могут быть сформированы самим отдельным ПТС, в котором реализован какой-либо метод множества Met_{Q_TMI} (10) (см., например, вышеупомянутый перебор методов сжатия данных CCSDS [32]), а могут поступать по обратному каналу связи от другого ПТС (например, при применении методов множества $Met_{Q_TMI_обмен}$ (10) обмена данными).

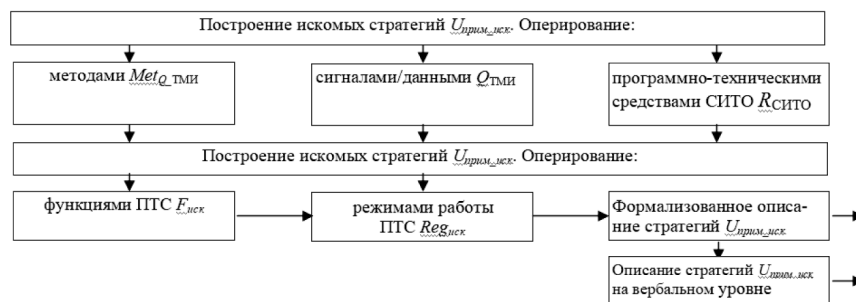


Рис. 2. Схема оперирования методами, сигналами/данными, ПТС, функциями ПТС, режимами работы ПТС, поясняющая механизм управления избыточностью данных телеизмерений СИТО_{МКС}

Атрибуты Upr ($Upr = \langle Upr_1, Upr_2 \rangle$, $Upr_1 = \{1, 2, 3, 4\}$, $Upr_2 = \{1, 2, 3, 4\}$) достаточно полно характеризуют сущности управления свойствами методов $Met_{Q_{ТМИ}}$ (12) в текущем времени. Существуют определённые возможности установления априори условий комбинирования атрибутов Upr_1 и Upr_2 . Выгоды от управления свойствами методов $Met_{Q_{ТМИ}}$ (10) нужно оценивать по общим показателям $W_{эф.у.ус}$ (5).

Следует заметить, что признаком рациональных стратегий $U_{прим.рац}$ (6) применения СИТО_{МКС} является использование методов множества $Met_{Q_{ТМИ}}$ (10), адаптирующихся к изменяющимся условиям ($Upr_2 = 4$).

Обосновано [2], что возможности улучшения ИТО (улучшения показателей $W_{эф.у.ус}$ (5)) во многом связаны с унификацией процедур (операций) осуществления стратегий $U_{ус}$ и $U_{прим}$ (6), прежде всего осуществления методов $Met_{Q_{ТМИ}}$ (10); в частности, унифицированных (стандартизированных) методов $Met_{Q_{ТМИ_преоб}}$ ($Met_{Q_{ТМИ_преоб}} \subset Met_{Q_{ТМИ}}$), позволяющих при требуемом разнообразии структур ТМИ не допустить их многотипности и, соответственно, исключить применения принципиально отличающихся ПТС. Для этого необходимы одинаковые (стандартные) правила формирования разнообразных структур ТМИ (такие правила применяют, например, в «пакетной телеметрии» CCSDS [23]). Разные потребители, получая стандартные блоки данных и используя установленные (стандартные) процедуры, выделяют из них данные, содержащие нужную им информацию.

Чтобы результативно использовать разработанное научно-методическое обеспечение, касающееся развития СИТО_{СВ} [2, 6–10 и др.], нужно отметить (и учесть) некоторые важные отличительные особенности СИТО_{МКС}.

В случае СИТО_{МКС} отсутствует влияние неопределённых факторов, связанных с факелом работающей двигательной установки РН, с плазмой, образующейся при отделении ступеней РН и сбросе головного обтекателя, и вызывающих искажения телеметрических сигналов в радиоканалах «борт-Земля» (вызывающих потери ТМИ); практически отсутствует влияние неопределённых факторов, связанных с незнанием априори поведения ТМП (это касается прежде всего вибропа-

раметров РН) и, соответственно, вызывающих ошибки [2] в выборе ожидаемого диапазона измерений ТМП.

Если принят подход, заключающийся в том, что лучше исправный КА, ресурс которого заканчивается (заканчивается расчётное время его активного существования на орбите), удалить с орбиты и заменить его на новый или резервный КА, чем действовать после отказа этого КА, который превращается в космический мусор и создаёт большие проблемы, то возрастает актуальность разработки и внедрения методов диагностирования степени деградации бортовых систем КА [20] и, соответственно, получения обобщённых параметров, используемых, в частности, при формировании сигнала «Вызов НКУ» [17].

В условиях вышеупомянутых тенденций (рост количества МКС, многочисленность КА в составе МОГ и т. д.), а также динамичного изменения состава и местоположения элементов МКС и СИТО_{МКС} (в том числе подвижных элементов СИТО_{МКС}, размещённых в космическом пространстве) соответственно изменяется специфика учёта обычных для НАКУ КА ограничений (требований) $L_{ГНОМ}$ [17]:

$$L_{ГНОМ} = \langle L_G, L_H, L_O, L_M \rangle, \quad (12)$$

где L_G, L_H, L_O, L_M – ограничения (требования) глобальности, непрерывности, оперативности и массовости соответственно.

Ограничения (требования) $L_{ГНОМ}$ (12) отражают сущности КС_{МОГ} и СИТО_{МКС} и позволяют сузить множество альтернативных вариантов построения стратегий $U_{прим}$ (6) применения СИТО_{МКС}, причём без ущерба качеству, определяемому общими показателями $W_{эф.у.ус}$ (5).

Общие сведения о методах и их использовании для управления избыточностью данных телеизмерений в СИТО_{МКС}

Управление избыточностью осуществляется путём оперирования методами $Met_{Q_{ТМИ}}$ (10) действий над сигналами/данными $Q_{ТМИ}$, содержащими ТМИ; над сигналами/данными $Q_{ТМИ}$, над программно-техниче-

Таблица

Сигналы/данные и методы для компактного представления ТМИ в БИТС

№ п/п	$Q_R *_{ax}$	$Q_R *_{вых}$	$Met_{Q_{ТМИ_преоб}}$	Примечания
1	$Q_{ТМИ_ПП}$	$Q_{ТМИ_КП_1}$	$Met_{Q_{ТМИ_преоб}} \wedge$ ТМП	См. разд. 4.1 [2]
2	$Q_{ТМИ_КП_1}$	$Q_{ТМИ_КП_2}$	$Met_{Q_{ТМИ_преоб_КП_1_2}}$	См. методы сжатия данных CCSDS [32]
3	$Q_{ТМИ_КП_1}$	$Q_{ТМИ_КП_3}$	$Met_{Q_{ТМИ_преоб_КП_1_3}}$	
4	$Q_{ТМИ_КП_3}$	$Q_{ТМИ_КП_4}$	$Met_{Q_{ТМИ_преоб_КП_3_4}}$	См. методы сжатия данных CCSDS [32]
5	$Q_{ТМИ_КП}$	$Q_{ТМИ_КП_j}, j = 1, \dots, 4$	$Met_{Q_{ТМИ_преоб_КП_1234_j}}$	

скими средствами (ПТС) $R_{СИТО}$ СИТО_{МКС} и далее – над функциями F_{R^*} (7) ПТС, над режимами работы $Reg_{R^{**}}$ (8) ПТС (см. рис. 2).

Ниже представлено краткое описание сущностей методов $Met_{Q_{ТМИ}}$ (10).

Методы $Met_{Q_{ТМИ_измер}}$. С использованием методов $Met_{Q_{ТМИ_измер}}$ формируют первичные сигналы [3] $Q_{ТМИ_ПП}$ (9), которые поступают на входы ПТС СИТО_{МКС}.

Методы $Met_{Q_{ТМИ_преоб}}$. Из множества $Met_{Q_{ТМИ_преоб}}$ нужно выбрать методы, обеспечивающие компактное представление ТМИ в БИТС, в том числе их комплексированием [2] (таблица).

Пояснение обозначений (см. таблицу):

$Q_{R^*_{вх}}$ ($Q_{R^*_{вых}}$) – сигналы/данные на входах (на выходах) ПТС R^* (7);

$Q_{ТМИ_ПП}$ – первичные сигналы [3];

$Q_{ТМИ_КП_1}$ – данные кодов параметров, полученные преобразованием первичных сигналов (в частности, квантованием первичных сигналов по уровню);

$Q_{ТМИ_КП_2}$ – данные $Q_{ТМИ_КП_1}$, сжатые обратимыми методами;

$Q_{ТМИ_КП_3}$ – интегральные характеристики (ИХ), полученные преобразованием данных $Q_{ТМИ_КП_1}$ (данные, сжатые необратимыми методами; типа методов [20], обеспечивающих получение обобщённых параметров телеметрируемых объектов [3]).

Как и в случае СИТО_{СВ} [2], данные $Q_{ТМИ_КП_j}$ ($j=1, \dots, 4$), $Q_{ТМИ_КП}$ системы СИТО_{МКС} размещают в телеметрических словах $Q_{ТМИ_ТС}$ (используют при этом методы $Met_{Q_{ТМИ_преоб_КП_ТС}}$ формирования слов), а слова $Q_{ТМИ_ТС}$ – в блоках данных $Q_{ТМИ_БД}$ (используют методы $Met_{Q_{ТМИ_преоб_ТС_БД}}$ формирования блоков данных). При этом структуры слов $Q_{ТМИ_ТС}$ и блоков $Q_{ТМИ_БД}$ (и, соответственно, сущности методов $Met_{Q_{ТМИ_преоб_КП_ТС}}$ и $Met_{Q_{ТМИ_преоб_ТС_БД}}$), применяемые в СИТО_{СВ} и в СИТО_{МКС}, могут быть разными.

Методы $Met_{Q_{ТМИ_накопл}}$. Суть управления избыточностью данных телеизмерений путём оперирования методами $Met_{Q_{ТМИ_накопл}}$ (10) заключается в том, что накопленные данные телеизмерений хранятся в распределённых в пространстве элементах СИТО_{МКС} (причём время хранения их установлено и ограничено), и воспроизводятся они лишь по запросам потребителей ТМИ СИТО_{МКС}. Если накопленная ТМИ в установленные сроки оказывается невосстановленной, она уничтожается (высвобождается память ПТС СИТО_{МКС} для новой ТМИ). Из практических примеров известно [15], что продолжительность временного хранения принятой целевой информации КА «Канопус-В» составляет не менее трёх суток, причём её приём производится четыре раза в сутки с суточным объёмом данных до 110 Гбайт [15]. Аналогичное накопление позволяет экономить ресурсы, относящиеся к СИТО_{МКС}, связанные с каналами связи, предназначенными для передачи ТМИ её потребителям. Предполагается, что для обеспечения оперативного контроля функционирования элементов КС_{МОГ}

(при выполнении требований L_0 (12)) будут использоваться преимущественно данные ИХ $Q_{ТМИ_КП_3}$ (см. табл.), аналогичные обобщённым параметрам [20] телеметрируемых объектов [3].

Необходимо предпринять меры по предотвращению потерь ТМИ при осуществлении накопления и хранения данных телеизмерений (при осуществлении методов $Met_{Q_{ТМИ_накопл}}$ (10). В БРТС КА могут быть предусмотрены режимы записи и ускоренного воспроизведения в установленное время накопленной ТМИ, что расширяет возможности задействования наземных ПТС НКУ для приёма-регистрации ТМИ. Отпадает необходимость задействования ПТС ИПов по всей траектории движения этого КА. Однако при возникновении полётной аварии до вхождения телеметрируемого КА в зону радиовидимости задействованных ПТС НКУ накопленная ТМИ может быть полностью потеряна. Один из известных примеров потери накопленной ТМИ связан с неудачным запуском межпланетной станции «Марс-96» 16.11.1996 г. Тогда из-за финансовых трудностей корабельный командно-измерительный комплекс «Космонавт Виктор Пацаев» не был направлен к берегам Африки, и ТМИ разгонного блока на аварийном участке траектории полёта не была получена [34]. Аналогичные случаи потери ТМИ повторялись и позже.

В этой связи актуально разнесение контролируемого телеметрируемого объекта [3] и элемента СИТО_{МКС}, в котором осуществляется накопление и хранение ТМИ с этого телеметрируемого объекта (т. е. с точки зрения предотвращения потерь накопленной ТМИ при возникновении полётной аварии на борту КА желательно ТМИ с этого КА накапливать и хранить или на борту другого КА или в наземном элементе СИТО_{МКС}).

С целью повышения надёжности хранения накопленной ТМИ возможно дублирование (резервирование) элементов СИТО_{МКС}, в которых оно осуществляется.

Методы $Met_{Q_{ТМИ_обмен}}$. Суть управления избыточностью данных телеизмерений путём оперирования методами $Met_{Q_{ТМИ_обмен}}$ (10) заключается в том, что элементы СИТО_{МКС} для накопления и хранения ТМИ выбирают таким образом, чтобы минимизировать издержки на осуществление каналов связи для доставки ТМИ к месту её накопления и хранения, а также для доставки ТМИ её потребителям, например, уменьшить материальные затраты на их осуществление.

В условиях увеличения количества каналов связи и скорости передачи данных по ним возрастает актуальность разделения каналов, а именно:

– по поляризации (например [1], используется одновременно круговая поляризация с левым и правым направлениями вращения);

– по радиочастотам (использование сигналов различных несущих частот и поднесущих; расширение диапазона используемых радиочастот, использование, в частности [13], Ку-диапазона (10,7–13,25; 14,0–

14,5 ГГц), Ka-диапазона (27,5–30,0 ГГц), V-диапазона (37,5–42,5; 47,2–50,2 ГГц), W-диапазона (75–110 ГГц); для космического пространства актуальны лазерные межспутниковые линии связи (МЛС) [1] (использование сигналов оптического диапазона для обмена данными между КА);

- кодовое разделение каналов, организация много-станционного доступа [35];
- по времени (например, разнесение во времени данных, передаваемых на одной и той же несущей частоте; их повторная передача в случае искажений вследствие помех, действующих в каналах связи);
- в пространстве (например, построение НКУ с минимальным количеством ПТС в его составе, причём при соблюдении установленных ограничений (требований) $L_{\text{ГНОМ}}$ (12); широкие возможности пространственного уплотнения ПТС НКУ связаны с применением антенн с узкой и управляемой диаграммой направленности (с применением фазированных антенных решеток (ФАР) [1, 12]), а также с применением лазерных МЛС).

Заметим, что с построением и с применением ФАР связаны методы множества $Met_{R...}$ (6), обеспечивающие действия над радиосигналами, касающиеся их мощности в зависимости от направления их распространения.

Полезный эффект от применения методов $Met_{Q_ТМИ}$ (10) может усиливаться при их комплексировании. При этом расширяются возможности построения альтернативных стратегий (6) (рис. 3).

В практике CCSDS известны технологии, при реализации которых осуществляется оперативное

комплексирование методов повышения (обеспечения требуемой) помехоустойчивости; в частности, известны технологии комплексирования методов модуляции и помехоустойчивого кодирования VCM и ACM, представленные в стандарте DVB-S2 [36] (ACM – Adaptive Coding and Modulation – адаптивное кодирование и модуляция, VCM – Variable Coding and Modulation – переменное кодирование и модуляция).

Суть технологии ACM (см. рис. 3) заключается в возможности оперативного изменения типа модуляции и скорости помехоустойчивого кода в зависимости от состояния помеховой обстановки, оцениваемой на стороне получателя по соотношению сигнал/шум. При этом априори определены сочетания параметров модуляции и помехоустойчивого кодирования, структуры и смысловая нагрузка формируемых на стороне получателя команд для правильной настройки модулятора и кодера. Формируемые на стороне источника информации данные для отправления получателю содержат справочные сведения о настройке модулятора и кодера, что позволяет автоматически изменять настройку демодулятора и декодера на стороне получателя. Изменение настроек модулятора и кодера [36] (и, соответственно, демодулятора и декодера) осуществляется без потери информации.

В случае VCM изменение типа модуляции и скорости помехоустойчивого кода осуществляется программно [36].

Возможности расширения множества (6) альтернативных стратегий построения СИТО_{МКС} могут быть связаны с использованием технологий когнитивного радио (Cognitive Radio) [33].

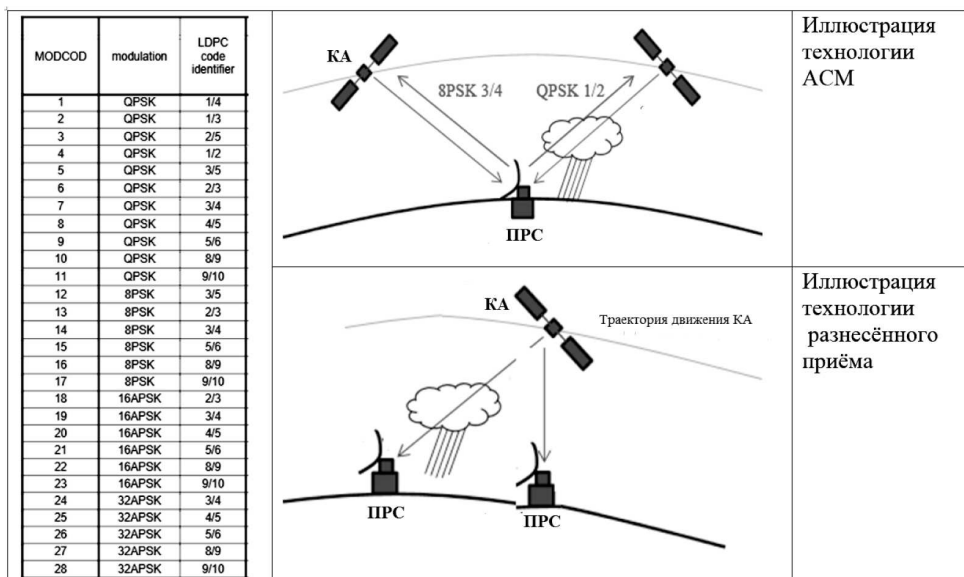


Рис. 3. Технологии CCSDS, предназначенные для повышения помехоустойчивости (на примере технологий ACM и разнесённого приёма)

Суть технологии когнитивного радио [33] заключается в оптимизации использования радиочастотного спектра путём автоматического анализа уровня помех в широкой полосе частот и по результатам анализа выбора в этой полосе диапазонов частот для приёма-передачи радиосигналов с минимальными искажениями. При этом некоторые диапазоны частот могут быть заняты потребителями.

Для построения альтернативных стратегий (6) СИТО_{МКС} актуальны технологии DTN-сетей CCSDS (DTN – Delay/Disruption Tolerant Networking – сети, Толерантные (Терпимые) к Задержкам/Дезорганизациям) [37].

Сущности DTN-сетей CCSDS [37] заключаются в следующем.

В практике применения космических радиолиний возникают ситуации, когда связь с объектом и наземными ПРС относительно длительное время невозможна. Возникает необходимость в построении ПТС для ретрансляции данных с этих объектов на Землю, причём в условиях отсутствия возможности ретрансляции в темпе поступления данных с объекта. Например [38], невозможна передача данных с объекта на поверхности Марса на Землю через спутник-ретранслятор, находящийся на орбите Марса, в темпе их поступления с объекта. DTN-сети (технология DTN) обеспечивают доставку блоков данных пользователям с объекта через DTN-узлы (node), в которых осуществляется накопление и хранение данных в ожидании благоприятных условий их ретрансляции, причём ретрансляция осуществляется автоматически.

В условиях постоянного или частого действия помех в радиоканалах DTN-сети существуют возможности улучшения достоверности данных комплексированием технологий DTN и разнесённого приёма.

Предложно [39] три способа комплексирования.

Первый из возможных способов комплексирования заключается в дублировании DTN-узлов, обеспечивающих разнесение данных в пространстве. Поступившие из каналов разнесения (от этих дублируемых DTN-узлов) данные нужно направить на входы средств формирования обобщённых данных (обобщённые данные – данные, полученные методами разнесённого приёма [2]). При формировании обобщённых данных необходимо сделать поправку на временные задержки данных, поступивших из разных каналов разнесения. Формирование может осуществляться не в темпе поступления данных (с поправкой на временные задержки), а в отложенном режиме.

Второй способ комплексирования заключается в разнесении во времени (в неоднократной передаче данных, накопленных на объекте или в DTN-узле). При этом управление повторной передачей данных может осуществляться по-разному – от установления постоянного (фиксированного) количества повторов до реализации методов управляемого разнесённого приёма [2], обеспечивающих улучшение достоверности

данных по сравнению с обычными методами разнесённого приёма путём более полного использования возможностей адаптации к изменяющимся условиям помеховой обстановки. Предполагается, что создание благоприятных условий для осуществления разнесённого приёма (для осуществления алгоритмов получения обобщённых данных, например, алгоритма А4 [2, 40]) с управлением повторной передачей данных может быть обеспечено соответствующей доработкой протокола обмена данными DTN-сети.

Третий способ комплексирования может быть осуществлён комбинированием первого и второго способов. Детализацию этого комбинирования следовало бы начать с анализа возможностей управляемого разнесённого приёма [2] при значительном увеличении временных интервалов между повторной передачей данных, и соответственно, возможностей доработки протоколов обмена данными DTN-сети.

Представленные выше описания возможных способов комплексирования технологий DTN и разнесённого приёма весьма общи. Для начала работ по комплексированию необходимо иметь исходные сведения, прежде всего касающиеся условий помеховой обстановки, зон радиовидимости задействуемых ПТС, в которых предстоит решать задачи с использованием закомплексированных технологий DTN и разнесённого приёма.

Следует заметить, что ценность той или иной стратегии $U_{\text{прим}}$ (6), связанной с выбором методов $Met_{Q_ТМИ}$ (10) и способов их комплексирования, определяется общими показателями $W_{\text{эф.}_Y_{\text{ус}}}$ (5) с учётом ограничений $L_{\text{ГНОМ}}$ (12).

Облик перспективной (искомой) СИТО_{МКС}

Перспективы развития отечественных средств ИТО, касающегося КА (особенно в части средств НАКУ КА), постоянно находятся в поле зрения отечественных специалистов [24, 41 и др.]. В контексте настоящей работы наибольший интерес представляет статья [24], опубликованная в 2016 году. В ней представлены предложения по развитию средств НАКУ КА и ИКК на 10-летний период (до 2025 года), выделены следующие наиболее важные направления развития отечественных средств ИТО, остающиеся актуальными и в настоящее время (ИКК – измерительный комплекс космодрома):

- применение (где это возможно) НАП, что позволит существенно сократить число проводимых сеансов связи и уменьшить количество командно-измерительных пунктов (КИП), имеющих ограниченные зоны радиовидимости;

- совершенствование ИТО в части сжатия данных телеизмерений в БИТС, что позволяет осуществить следующее [24]:

- а) в 5–10 раз сократить объёмы передаваемой ТМИ и повысить на 5–6 дБ эквивалентную энер-

гетику радиолинии и таким образом создать благоприятные условия для использования наземных приёмных антенн меньшего диаметра;

б) существенно смягчить требования к пропускной способности каналов связи, значительно расширив возможности сбора ТМИ (особенно сбора ТМИ с использованием радиоканалов спутников-ретрансляторов, имеющих относительно малую пропускную способность);

- применение ретрансляционных технологий с использованием СР, размещённых как на геостационарных, так и на низких орбитах;

- применение сетевых технологий управления, заключающихся в создании сети управления КА и приёма информации от РН, РБ с использованием КА-ретрансляторов, а также в использовании межспутниковых линий связи – как альтернатива созданию новых наземных измерительных пунктов;

- интеграция каналов передачи данных, связанная с реализацией технологии пакетной обработки и маршрутизации потоков данных, с разработкой и внедрением единых стандартов (форматов, протоколов) обмена информацией независимо от её семантической нагрузки.

Перечисленные выше направления [24] остаются актуальными и в настоящее время и соответствуют искомым результатам развития СИТО_{МКС}. Они могут оказаться полезными при разработке стратегий (б) усовершенствования и применения СИТО_{МКС}, однако при этом необходимо учитывать специфику, связанную с построением распределённой перспективной СИТО_{МКС}.

Ожидается, что у СИТО_{МКС} будут многочисленные потребители, причём с различными требованиями к форме представления и оперативности представления ТМИ. Возможны заявки от кандидатов в потребители ТМИ на оперативное подключение к СИТО_{МКС}. Поэтому целесообразно централизованное управление работой СИТО_{МКС}. Однако Центр СИТО_{МКС} не должен быть полной копией центра системы информационно-телеметрического обеспечения наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами и измерений [4]. Он должен быть ориентирован на управление распределёнными в пространстве элементами СИТО_{МКС}.

Несмотря на ожидаемое значительное различие требований к ТМИ, выдаваемой СИТО_{МКС} разным потребителям, имеется возможность (и целесообразно) сформулировать общие требования к ней в зависимости от задач ИТО, решаемых с её использованием.

При решении текущих задач функционирования КС (ОГ, МОГ) необходимо обеспечить высокую оперативность принятия решений при возникновении аномальных ситуаций (например, аварийной ситуации на борту КА). В этих условиях актуальны методы множества $Met_{Q_{ТМИ_преоб}}$ (10) для формирования данных ИХ $Q_{ТМИ_КП_3}$ (см. таблицу), характеризующих, например, степень деградации бортовых систем КА [20] или факт наличия неисправностей

(нештатных ситуаций) на его борту и последующее формирование сигнала «Вызов НКУ» [17]. Также актуальны методы отбора относительно малочисленного множества ТМП, «чувствительных» к разнообразным аномальным состояниям КА, что позволит идентифицировать аномалию (в случае её возникновения) и по результатам анализа данных этого множества ТМП запросить (в случае необходимости) данные дополнительных ТМП, позволяющие конкретизировать идентифицированную аномалию. Известны [7, 42] примеры идентификации вышеупомянутых аномалий.

Необходимо заметить, что подход к контролю функционирования бортовых систем КА, заключающийся в передаче ТМИ с КА лишь в случае идентификации его критичных (аномальных) состояний (типа состояний, инициирующих выдачу сигнала «Вызов НКУ» [17]), имеет недостатки, не позволяющие получить следующие важные сведения:

- в случае перехода какой-либо бортовой системы КА в критичное состояние анализаторам важно знать скорость перехода (стремительный, скачкообразный переход или постепенный);

- в случае отсутствия критичных состояний анализаторам важно знать, как близко к таким состояниям приближались (здесь проявятся недостатки и особенности допускового контроля, если он применён);

- в случае отсутствия критичных состояний (т. е. при нормальном функционировании бортовых систем КА) анализаторам важно знать, что КА «молчит» не по причине его неисправности.

При решении задач по выявлению и устранению недостатков в ходе ЛИ, ОЭ и ШЭ (в ходе обработки) КС (ОГ, МОГ) целесообразно иметь в качестве исходных весь объём данных телеизмерений, сформированных на телеметрируемых объектах [3] и, соответственно, предварительно накопленных в ПТС СИТО_{МКС}, распределённых в пространстве. Эти задачи, связанные с ИТО, целесообразно выполнять по крайней мере в два этапа. На первом этапе (назовём его «оперативная обработка ТМИ») нужно с учётом результатов анализа текущего функционирования КС (ОГ, МОГ) определить, какая ТМИ из предварительно накопленной необходима для второго этапа обработки ТМИ (назовём его «полная обработка ТМИ»). По результатам этапа полной обработки ТМИ и последующего анализа нужно определить, какая ТМИ из предварительно накопленной необходима для архивирования, и осуществить её сбор. Нужность выбранной для архивирования ТМИ определяется потребителями, решающими задачи анализа по выявлению и устранению недостатков, проявившихся в ходе ЛИ, ОЭ и ШЭ (в ходе обработки) КС (ОГ, МОГ), а её объём ограничивается организационно-техническими возможностями СИТО_{МКС}.

На этапе выполнения настоящей работы преждевременно конкретизировать продолжительность времени

хранения предварительно накопленной ТМИ и её объёмы, однако по опыту действий над целевой информацией, принятой с КА «Канопус-В», который может быть ориентиром при определении стратегий дальнейшего развития СИТО_{МКС}, время предварительного хранения составляет не менее трёх суток, а суточный объём данных – до 110 Гбайт [15]. Также не актуальна конкретизация ПТС для хранения заархивированной ТМИ. В принципе, ими могут быть ПТС ЦОД или виртуальные ПТС облачных технологий.

При осуществлении сбора ТМИ и её последующего накопления и хранения актуальны методы $Met_{Q_ТМИ}$ (10) действий над ТМИ, обеспечивающие управление избыточностью данных телеизмерений. В частности, реализация на борту КА методов (алгоритмов), аналогичных по сути разработанному [7] способу предобработки, позволит управлением избыточностью данных телеизмерений обеспечить компактное представление данных телеизмерений с возможностью последующего восстановления с заданной точностью значений ТМП, причём без потерь ТМИ при возникновении полётных аварий на борту КА.

В дальнейшем заархивированная ТМИ может быть использована для получения статистических сведений, относящихся к каким-либо событиям на телеметрируемом объекте [3]; для подтверждения обнаруженного на телеметрируемом объекте [3] какого-то важного события его проявления и на других аналогичных телеметрируемых объектах (например, применением новых технологий обработки ТМИ или более профессиональным анализом данных результатов обработки ТМИ установлен факт близости КА к аварийной ситуации во время его орбитального полёта и важно понять, это исключительный случай или закономерное следствие конструктивных недостатков этого типа КА) – и т. д.

При решении задач совершенствования самой СИТО_{МКС} также целесообразно иметь в качестве исходных весь объём данных телеизмерений, сформированных на телеметрируемых объектах [3] и, соответственно, предварительно накопленных в ПТС СИТО_{МКС}.

Необходим поиск дефектов [2] в предварительно накопленной ТМИ, создающих предпосылки дезинформирования специалистов-анализаторов. Необходимо установить природу выявленных дефектов, чтобы выработать результативные меры по их недопущению в дальнейшем, при разработке стратегий совершенствования СИТО_{МКС}.

Выборки из предварительно накопленной ТМИ целесообразно использовать для подтверждения ожидаемых результатов от осуществления разработанных (альтернативных) стратегий применения (6) усовершенствованных СИТО_{МКС} их имитационным моделированием. Наиболее важными элементами этих стратегий являются методы множества $Met_{Q_ТМИ}$ (10), обеспечивающие сокращение потерь (получение дополнительной) ТМИ управлением избыточностью данных телеизмерений.

Выборки из предварительно накопленной ТМИ также целесообразно использовать для отработки (для усовершенствования) методов множества $Met_{Q_ТМИ}$ (10), предназначенных для формирования данных ИХ $Q_{ТМИ_КП_3}$ (см. таблицу). В частности, актуально обучение нейросетевых ПТС [20], в которых реализованы методы получения обобщённых параметров (типа $Q_{ТМИ_КП_3}$), причём обучение с учётом новых выявленных ситуаций на телеметрируемых объектах, отражённых в полученной с них ТМИ, например, с учётом новых аварийных ситуаций, с учётом проявления новых дефектов ТМИ.

Решение о том, какую ТМИ из предварительно накопленной нужно заархивировать, должны принимать прежде всего разработчики стратегий усовершенствования СИТО_{МКС}.

Таким образом, ожидается, что перспективная (искомая) СИТО_{МКС} будет реализована в виде распределённой системы. В распределённых в пространстве элементах СИТО_{МКС} (они могут размещаться как на Земле в виде ПТС НКУ, так и в космическом пространстве) реализованы методы Met_R (6), прежде всего методы $Met_{Q_ТМИ}$ (10) действий над сигналами/данными $Q_{ТМИ}$, содержащими ТМИ ($Met_{Q_ТМИ} \subset Met_R$). Из рассмотренных выше аспектов, касающихся облика перспективной СИТО_{МКС}, следует, что при разработке стратегий (6) осуществления СИТО_{МКС} наиболее подходят (в качестве аналога) технологии DTN-сетей CCSDS [37].

Предполагается, что ТМИ с телеметрируемых объектов [3] (в том числе с КА МОГ) будет накапливаться и временно храниться в разных предназначенных для этого элементах СИТО_{МКС} (в том числе в элементах СИТО_{МКС}, размещённых на разных КА и являющихся их специфической бортовой системой; возможно также, что отдельные КА будут реализованы для того, чтобы быть лишь элементом СИТО_{МКС}).

Специалисты, решающие задачи применения ПТС СИТО_{МКС} по назначению, должны осуществлять контроль качества ТМИ, принимаемой СИТО_{МКС} и выбор ТМИ для дальнейшей обработки её потребителями. Такой выбор особенно актуален, если осуществляется разнесённый приём ТМИ [2]. Применением технологий разнесённого приёма [2] обеспечивается сокращение потерь ТМИ, возникающих вследствие действия помех в каналах разнесения, и уменьшение объёма данных телеизмерений (исключением избыточной дублирующей ТМИ улучшаются условия для хранения принятой ТМИ). Важны рекомендации, адресованные потребителям ТМИ, сформулированные по результатам контроля качества ТМИ и выбора ТМИ для её последующей обработки, касающиеся её особенностей (например, касающиеся выявленных неустранимых дефектов ТМИ [2]). К специалистам, решающим задачи применения ПТС СИТО_{МКС} по назначению, через Центр СИТО_{МКС} должны поступать заявки с указанием предварительно накопленной ТМИ, которую нужно заархивировать.

Для хранения заархивированной ТМИ могут быть использованы как специально внедрённые в состав СИТО_{МКС} программно-технические средства (например, дополнительные ПТС, включённые в состав НАКУ КА), так и внешние ПТС по отношению к СИТО_{МКС}, которыми, в принципе, могут быть ПТС ЦОД или виртуальные ПТС облачных технологий (использование этих внешних ПТС может осуществляться, в частности, путём аренды, аутсорсинга).

При этом Центр СИТО_{МКС} должен управлять обеспечением доступа разных пользователей к накопленной (хранимой) ТМИ; должны применяться технические и административные процедуры, обеспечивающие оперативный и надёжный доступ и быть относительно простыми для пользователей.

Через Центр СИТО_{МКС} должна обеспечиваться возможность доступа не только к ТМИ, полученной с КА из состава МОГ и с наземных элементов МКС, но и к ТМИ, полученной на техническом комплексе при подготовке РКН к запуску; к ТМИ РН и РБ, принятой в полётное время средствами ИКК и т. д. При этом подключение к СИТО_{МКС} новых (дополнительных) источников ТМИ разных телеметрируемых объектов [3], полученной на разных их жизненных циклах, должно осуществляться эволюционно, по мере необходимости их подключения.

Заключение

Из результатов анализа сущностей космических систем, тенденций их развития и, соответственно, сущностей и тенденций развития отечественных СИТО_{МКС}, полученных с использованием разработанных элементов научно-методического обеспечения построения и развития СИТО_{МКС}, сформулированы следующие выводы.

1. Необходимым условием результативного развития отечественных СИТО_{МКС} является его научно-методическое обеспечение, отражающее научно-технические и организационно-технические аспекты развития. В этой связи актуальны элементы научно-методического обеспечения, представленные в настоящей работе.

2. Чтобы купировать возможную туиковую ситуацию, касающуюся ИТО функционирования и отработки многоспутниковых космических систем и обеспечить результативное развитие отечественных СИТО_{МКС}, необходимо управление избыточностью данных телеизмерений, реализованное в СИТО_{МКС}. Управлением избыточностью нивелируются различия между МОГ при значительном количественном разбросе КА в их составе, что позволяет обеспечить инвариантность СИТО_{МКС} по отношению к изменяющимся задачам ИТО в условиях увеличивающегося количества КС и КА в составе КС, а также иметь относительно малочисленные ПТС в составе СИТО_{МКС}.

3. Важной особенностью предложенной СИТО_{МКС} является распределённое размещение её элементов в

пространстве (в том числе в космическом пространстве), что открывает дополнительные (и большие) возможности управления избыточностью данных телеизмерений осуществлением разнесённого во времени сбора ТМИ для её временного хранения и для последующего архивирования, а также постоянным контролем качества ТМИ (поиском дефектов в принятой ТМИ) и определением её ценности для потребителей. Для построения распределённых СИТО_{МКС} актуальны технологии DTN-сетей CCSDS, адаптированные к отечественной специфике.

4. Для осуществления результативного управления избыточностью данных телеизмерений в предложенной СИТО_{МКС} необходимо целенаправленное и согласованное применение интегральных (обобщённых) характеристик ТМП, выборки данных относительно малочисленного множества ТМП, «чувствительных» к разнообразным аномальным состояниям телеметрируемых объектов (прежде всего «чувствительных» к аварийным состояниям КА). Соответственно, актуальна разработка методов (технологий), обеспечивающих такое управление избыточностью, а также обеспечивающих выбор дополнительной ТМИ, необходимой для дальнейшего анализа в случае идентификации аномалии на телеметрируемом объекте.

5. Для осуществления результативного управления избыточностью данных телеизмерений в предложенной СИТО_{МКС} также актуальны традиционные методы сжатия данных (в частности, рекомендуемые CCSDS), осуществляемые, прежде всего, в местах зарождения ТМИ – на телеметрируемых объектах.

6. При осуществлении предложенной СИТО_{МКС} актуальны методы (технологии) разнесённого приёма, обеспечивающие разнесение ТМИ по поляризации, по частоте, во времени и в пространстве, обеспечивающие разделение каналов связи, используемых для приёма-передачи ТМИ. Разделение каналов позволяет более рационально использовать материальные и временные ресурсы. Наиболее актуальны методы (технологии) управляемого разнесения ТМИ во времени с синхронизацией применяемых методов действий над ТМИ, реализованных в отдельных ПТС СИТО_{МКС}, а также методы (технологии) разнесения ТМИ в пространстве с использованием антенн с узкой и управляемой диаграммой направленности (типа ФАР), с использованием лазерных МЛС.

7. При осуществлении предложенной СИТО_{МКС} актуален управляемый процесс комбинирования отдельных методов действий над ТМИ, реализованных в различных отдельных ПТС СИТО_{МКС}, причём с синхронизацией процесса изменения свойств этих методов во времени. Наиболее ценные методы действий над ТМИ – методы, адаптирующиеся к изменяющимся условиям применения СИТО_{МКС} по целевому назначению. Гибкое управление свойствами методов действий над ТМИ позволит просто автоматизировать процесс применения СИТО_{МКС} по целевому назначению, сделав минимальным вмешательство в него специалистов НКУ.

8. Ценность стратегий операций усовершенствования отдельных элементов СИТО_{МКС} определяется их влиянием на общие (обобщённые) показатели эффективности, характеризующие улучшение СИТО_{МКС} в целом. Необходим системный подход к развитию средств ИТО функционирования и отработки многоспутниковых космических систем.

9. Развитие подходов к построению и развитию отечественных СИТО_{МКС}, описанных в настоящей работе, целесообразно осуществлять в ходе выполнения объединённых общим замыслом НИОКР, определяющей научно-технические и организационно-технические аспекты построения и развития. Научно-технические аспекты касаются создания и отработки элементов СИТО_{МКС} с последующим внедрением отработанных элементов в отечественную практику, а организационно-технические аспекты – улучшения управления развитием отечественных СИТО_{МКС} (прежде всего создания инструментов регламентирования процесса развития отечественных СИТО_{МКС} – концепции их развития, системы стандартов телеметрии, соответствующей требованиям этой концепции).

Литература

1. Пехтерев, С.В. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink / С.В. Пехтерев, С.И.Макаренко, А.А. Ковальский // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 4. – С. 190–255.
2. Воронцов, В.Л. Система информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения. Стратегии усовершенствования и применения / В.Л. Воронцов. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2021. – 236 с.
3. ГОСТ 19619–74. Оборудование радиотелеметрическое. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 20 с.
4. ГОСТ Р 53802–2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 34 с.
5. Надёжность и эффективность в технике. Справочник. В 10 т. Т. 1. Методология. Организация. Терминология / ред. совет: В.С. Авдудевский (пред.) [и др.] ; под ред. А.И. Рембезы. – Москва : Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. Воронцов, В.Л. Регламентирование процесса развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения / В.Л. Воронцов, И.А. Давыдов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 43–50.
7. Воронцов, В.Л. Некоторые аспекты преобработки данных телеизмерений на телеметрируемом объекте / В.Л. Воронцов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2022. – Т. 9, № 4. – С. 36–46.
8. Воронцов, В.Л. Концепция развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения / В.Л. Воронцов, И.Д. Давыдов // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. – 2023. – № 11. – С. 24–32.
9. Воронцов, В.Л. Управление развитием систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения в условиях влияния подрывных технологий / В.Л. Воронцов // Лесной вестник. – 2023. – Т. 27, № 6. – С. 160–177.
10. Воронцов, В.Л. Научно-технические и организационно-технические аспекты управления развитием отечественных систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения / В.Л. Воронцов, И.Д. Давыдов // Информация и Космос. – 2024. – № 4. – С. 170–181.
11. Воронцов, В.Л. Подходы к регламентированию процесса развития средств информационно-телеметрического обеспечения отработки объектов ракетно-космической техники / В.Л. Воронцов, И.А. Давыдов, Е.В. Медведев // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2022. – Т. 9, № 1. – С. 42–54.
12. Пузин, Ю.Я. Основы устройства и эксплуатации космических комплексов : учебное пособие / Ю.Я. Пузин, С.Л. Сафронов. – Самара : Издательство Самарского университета, 2022. – 236 с.
13. Михайлов, Р.Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения / Р.Л. Михайлов. – Санкт-Петербург : Научно-технические технологии, 2019. – 150 с.
14. Развитие отечественной радиотелеметрии от первых пусков ракет и космических аппаратов / В.П. Коновалов, А.А. Мурашов, В.И. Ващенко, В.С. Чаплинский // Информационно-управляющие и измерительные системы – 2023 : материалы отраслевой научно-технической конференции приборостроительных организаций Госкорпорации «Роскосмос», посвященной 60-летию полёта первой женщины-космонавта В.В. Терешковой (Королев, 20–23 апреля 2023 г.). – Москва : 2023. – С. 186–193.
15. Наземный комплекс приёма, обработки и распространения информации «Канопус-В» / В.А. Кровотынцев, С.А. Успенский, А.Н. Семериков, М.С. Леонов // Вопросы электромеханики. – 2015. – Т. 148, № 5. – С. 24–35.
16. «Фемтоспутники»: возможности и перспективы // ГЕОПРОФИ [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://geoprofi.ru/news/femtospudniki-vozmozhnosti-i-perspektivyh> (дата обращения: 18.02.2026).
17. Потюпкин, А.Ю. Управление многоспутниковыми космическими системами / А.Ю. Потюпкин. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 292 с.
18. Вандышева, О. «Менять придётся чуть более чем всё!»: Алексей Чадаев о причинах технологического лидерства Запада / О. Вандышева // БизнесOnline [сайт]. – 2022. – URL: <https://www.business-gazeta.ru/article/567396> (дата обращения: 05.11.2024).
19. Катанцев, Д. Современное состояние геоинформационных систем / Д. Катанцев // Завтра.ру [сайт]. – 2024. – https://zavtra.ru/books/sovremennoe_sostoyanie_geoinformatcionnih_sistem (дата обращения: 05. 06.2025).
20. Мальцев, Г.Н. Подход к формированию обобщённых параметров технического состояния сложных технических систем с использованием нейросетевых структур / Г.Н. Мальцев, В.Л. Якимов // Научно-технический вестник

- информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 828–835.
21. Бортовые системы управления космическими аппаратами : Учебное пособие / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко [и др.] ; под ред. А.С. Сырова. – Москва : МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.
22. Шестопалова, О.Л. Основы построения систем сбора и обработки информации о техническом состоянии космических средств / О.Л. Шестопалова. – Набережные Челны : Изд-во Камской государственной инженерно-экономической академии, 2007. – 92 с.
23. ГОСТ Р 56096–2014. Система передачи космических данных и информации. Пакетная телеметрия. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 23 с.
24. Кисляков, М.Ю. Системно-технические аспекты развития НАКУ КА НСЭН и измерений до 2025 года / М.Ю. Кисляков, Н.С. Логачев, А.М. Петушков // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 62–71.
25. Pseudo-Noise (PN) Ranging Systems. Recommended Standard CCSDS 414.1-B-1 // Blue Book. – Iss. 1. – Washington : Consultative Committee for Space Data Systems, 2009. – 34 p.
26. Pseudo-Noise (PN) Ranging Systems. Informational Report CCSDS 414.0-G-1 // Green Book. – Iss. 1. – Washington : Consultative Committee for Space Data Systems, 2010. – 92 p.
27. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. – Москва : Госстандарт России, 2004. – 27 с.
28. Перспективы развития наземного комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли / А.В. Лешошко, В.Н. Осьминин, К.В. Киселёв, В.А. Трегуб // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – Т. 164, № 3. – С. 19–25.
29. Ольховский, Ю.Б. Сжатие данных при телеизмерениях / Ю.Б. Ольховский, О.Н. Новосёлов, А.П. Мановцев ; под ред. В.В. Чернова. – Москва : Советское радио, 1971. – 304 с.
30. Мановцев, А.П. Основы теории радиотелеметрии / А.П. Мановцев. – Москва : Энергия, 1973. – 592 с.
31. Надёжность и эффективность в технике. Справочник. В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / ред. совет: В.С. Авдеевский (предс.) [и др.] ; под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. – Москва : Машиностроение, 1988. – 328 с.
32. Lossless Data Compression. Report Concerning Space Data System Standards CCSDS 120.0-G-1 // Green Book. – Iss. 1. – Washington : Consultative Committee for Space Data Systems, 1997. – 43 p.
33. Mitola J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio / J. Mitola : Ph. D. Dissertation ; KTH- Royal Institute of Technology. – Stockholm, 2000.
34. Лантратов, К. Пресс-конференция перед стартом «Марса-96» / К. Лантратов // Новости космонавтики (Компания «Видеокосмос»). – 1996. – № 22/23.
35. Data Transmission and PN Ranging for 2 GHz CDMA Link via Data Relay Satellite. Recommended Standard CCSDS 415.1-B-1 // Blue Book. – Iss. 1. – Washington : Consultative Committee for Space Data Systems, 2011. – 49 p.
36. CCSDS Space Link Protocols over ETSI DVB-S2 Standard. Recommended Standard CCSDS 131.3-B-1 // Blue Book. – Iss. 1. – Washington : Consultative Committee for Space Data Systems, 2013. – 32 p.
37. Rationale, Scenarios, and Requirements for DTN in Space, Informational Report CCSDS 734.0-G-1 // Green Book. – Iss. 1. – Washington : Consultative Committee for Space Data Systems, 2010. – 106 p.
38. Основные принципы создания космической информационной сети, устойчивой к разрывам и задержкам в каналах связи / И.Д. Антонов, А.В. Глазков, Д.А. Зеленов [и др.] // Лесной вестник. – 2015. – Т. 19, № 6. – С. 140–147.
39. Vorontsov, V. Role and place of the technology described in the Orange Book CCSDS 551.1-O-2 «Correlated Data Generation» among CCSDS traditional technologies for improving interference resistance / V. Vorontsov, V. Nazarov // Materials ID # 73 international conference SpaceOps2025 (Montreal, 26-30 May 2025). – 2025. – P. 1–10.
40. Correlated Data Generation, Research and Development for Space Data System Standards CCSDS 551.1-O-2 // Consultative Committee for Space Data Systems. – 2020. – Orange Book. – Iss. 2. – 74 p.
41. Концептуальные основы организационных преобразований управления космическими аппаратами / Л.А. Федорова, М.А. Фролов, Н.В. Андреев, В.В. Анохин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 5–10.
42. Алгоритмы оценивания вероятностных характеристик информационных процессов по статистикам превышений уровней / В.А. Каргин, Я.А. Скороходов, Д.А. Николаев, А.П. Шовкалюк // Труды МАИ. – 2015. – № 84. – С. 30.