

Анализ телеметрии с космического аппарата «Юбилейный»

08, август 2011

авторы: Беневольский С. В., Майорова В. И., Гришко Д. А., Ханеня Н. Н.

УДК 621.398

МГТУ им. Н.Э. Баумана

mgtu-bsv@mail.ru

victoria.mayorova@online.ru

dim.gr@mail.ru

nick3.khanenya@gmail.com

1. Введение.

К настоящему времени в России созданы и практически функционируют университетские наземные центры управления полётами (ЦУП) малых космических аппаратов (МКА), в том числе: ЦУП НИЛАКТ в г. Калуга, ЦУП ВКА им. А.Ф. Можайского - г. Санкт-Петербург, ЦУП МГУ им. М.Ф. Ломоносова - г. Москва, ЦУП МГТУ им. Н.Э. Баумана - г. Москва, ЦУП ОГУ - г. Омск, ЦУП ЦНИИ РТК - г. Санкт-Петербург, ЦУП СибГАУ им. М.Ф. Решетнёва - г. Красноярск. Опыт создания и практической эксплуатации существующих университетских ЦУП показывает, что они являются важным элементом практического обучения студентов и курсантов ракетно-космических специальностей вузов. Развертывание университетского ЦУП не требует больших финансовых затрат и не связано с организационными сложностями, что делает их доступными для университетов. Создание в структуре университета своего ЦУП стимулирует внедрение новых перспективных форм космического образования, служит основой для разработки и реализации перспективных университетских инновационных проектов с использованием космических технологий.

Университетские ЦУП могут выступать основой для создания широких сетей информационного обмена, наблюдения космического пространства, распространения космических технологий, подготовки специалистов в области использования космической информации для социально-экономического развития. Примером может служить Центр управления полётами малых космических аппаратов МГТУ им. Н.Э. Баумана, в котором студенты и аспиранты ежедневно получают практический опыт управления малыми космическими аппаратами, используя телеметрические данные с борта МКА «Юбилейный».

2. Особенности создания университетских ЦУП

Все отечественные университетские ЦУП созданы на базе наземного комплекса дистанционного обслуживания космических аппаратов ДОКА-Н, разработанного Научно-исследовательской лабораторией аэрокосмической техники НИЛАКТ РОСТО. Конструктивная простота и относительно малая стоимость изготовления, развертывания и эксплуатации комплекса ДОКА-Н соответствует возможностям российских вузов по созданию на его базе университетских ЦУП, что подтверждается быстрым развитием отечественных наземных комплексов управления (НКУ).

Наземный комплекс ДОКА-Н и бортовой комплекс управления МКА ДОКА-Б функционально интегрированы в единую систему дистанционного обслуживания КА ДОКА с использованием радиолучевых диапазонов частот.

Комплекс ДОКА-Н обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- организацию связи с КА по радиолучу в соответствии с планами сеансов связи;
- формирование информации для передачи её на КА в соответствии с программой управления КА;
- приём и предварительную обработку информации, поступающей с борта КА и передачу её для
- дальнейшей обработки, накопления, отображения и документирования;
- формирование наземной шкалы точного времени по сигналам GPS/ГЛОНАСС;
- синхронизацию бортового времени к наземному по радиоканалу;
- формирование и передачу исходных данных для работы бортовой аппаратуры;
- приём, хранение и передачу сообщений между комплексами ДОКА-Н в других регионах, участвующими в управлении КА.

Технические и функциональные характеристики комплекса ДОКА-Н:

- комплекс ДОКА-Н обеспечивает отслеживание КА, функционирующих на орбитах с высотами от 400 до 2000 км различного наклонения;
- комплекс ДОКА-Н обеспечивает устойчивую радиосвязь во всём диапазоне углов азимута и при возвышении КА над горизонтом (углах места) выше 7 градусов;
- вероятность ошибки на один бит принимаемой информации не более 10^{-4} при углах возвышения КА над горизонтом (углах места) – не менее 70°;
- время подготовки комплекса ДОКА-Н к сеансу связи с КА не превышает 5 минут.

Комплекс ДОКА-Н обеспечивает планирование и проведение сеансов связи (СС) с КА, при этом осуществляется управление полетом КА, включая приём и обработку информации с КА, подготовку и передачу на борт КА программ команд управления, формирование точного времени и синхронизацию бортового и наземного времени. При этом предусмотрены режимы:

- ручного оперативного управления КА (этот режим используется при вводе КА в эксплуатацию и при нештатных ситуациях работы КА);
- автоматизированного управления.

Принципиальная схема наземного комплекса управления полетами малых космических аппаратов ДОКА-Н представлена на рис. 1.

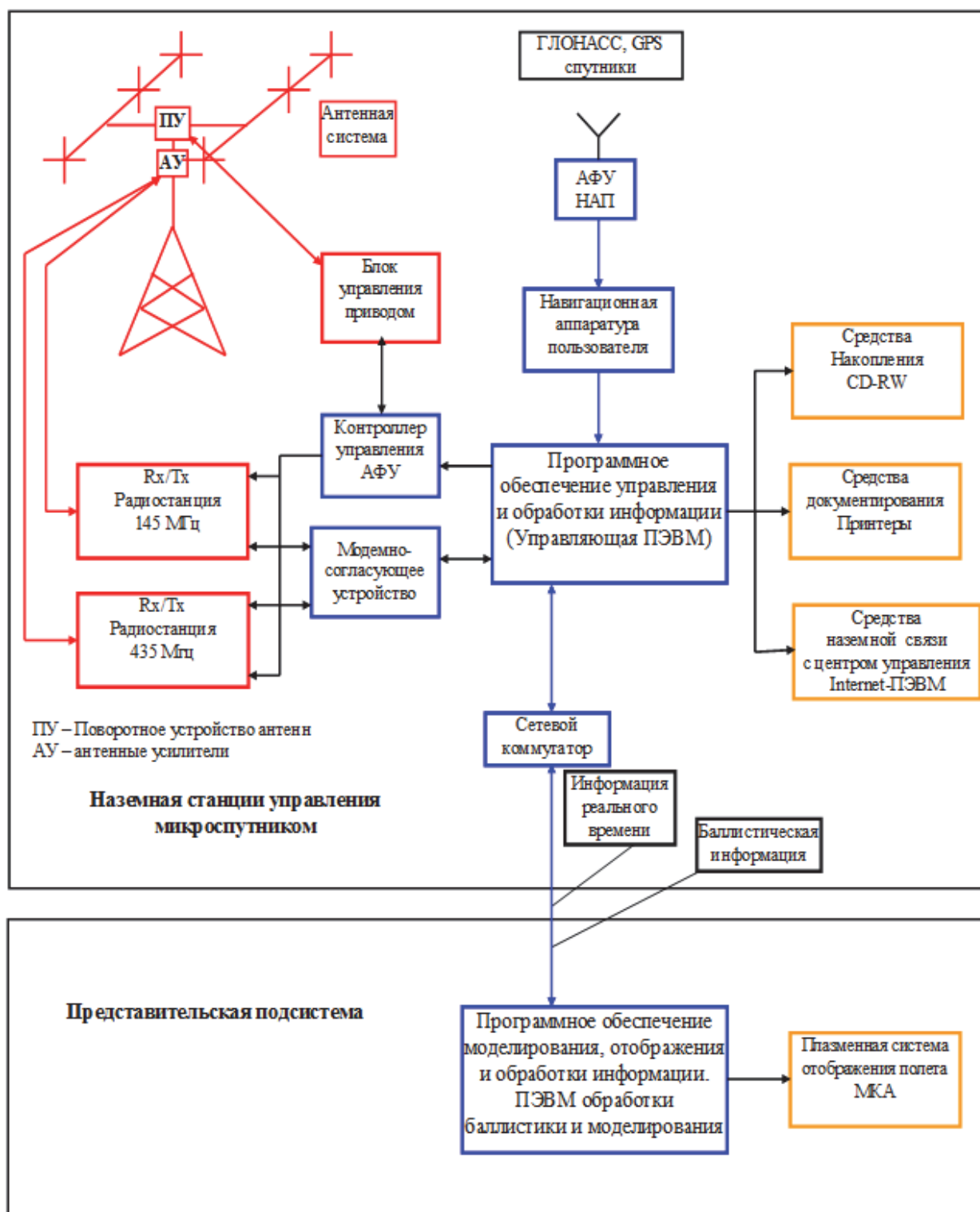


Рис.1. Принципиальная схема наземного комплекса управления полетами МКА Дока-Н.

3. Анализ телеметрии с космического аппарата «Юбилейный»

Телеметрия представляет собой совокупность технологий, позволяющих производить удалённые измерения и сбор информации для предоставления оператору или пользователю [4]. Все космические аппараты имеют в составе своей бортовой аппаратуры блок телеметрии, который собирает информацию о параметрах работы систем спутника и по радиоканалу отправляет полученные данные на Землю. Многие владельцы КА (радиолюбительских и университетских микроспутников) предоставляют возможность любому университету, при наличии соответствующего оборудования, принимать телеметрию и декодировать её. Возможность привлечения к работам с конкретными МКА наземных комплексов управления ДОКА-Н других университетов обеспечивает повышение надежности управления полётом спутников, информативности каналов передачи на Землю служебной и научной информации с борта МКА. Ограниченность зоны приема телеметрических данных с МКА приводит к тому, что в некоторые моменты отсутствует информация о состоянии спутника, когда он находится вне зоны видимости ЦУП, т.е. по сути, не известно, что с ним происходит [6]. Последствия этого могут быть самые плачевные – примером тому может служить печальный инцидент 7 марта 2007 г. со спутником «Университетский – Татьяна» МГУ РФ. Спутник, после ухода из зоны видимости ЦУП (расположен в МГУ, Москва) на следующем витке перестал подавать какие-либо сигналы. Что с ним случилось, пока он пребывал вне зоны видимости, так и осталось неизвестным, вызвав, тем самым, множество домыслов [7]. Если бы имелась информация о работе бортовых систем вне зоны видимости ЦУП, то, возможно, удалось бы если не спасти спутник, то хотя бы понять причину выхода его из строя. Спутник на орбите могут подстерегать многие опасности, одна из которых – резкое (в 10-100 раз) увеличение потоков частиц высоких энергий, бомбардирующих КА, когда он пролетает над Южно-Атлантической магнитной аномалией [5]. В этой зоне происходит большинство сбоев в работе электроники искусственных спутников Земли.

В качестве решения проблемы дистанционного получения телеметрии, когда КА находится вне прямой радиовидимости ЦУП, на борту КА «Бауманец» (погиб при неудачном запуске) и «Бауманец-2» (находится на этапе сборки) планируется эксперимент по управлению КА путём ретрансляции сигнала в системе спутников связи Globalstar.

Данные телеметрии являются одним из главных элементов в системе управления КА, обеспечивая контроль состояния его отдельных узлов и всех параметров движения (в том числе ориентацию и стабилизацию КА). В типовую телеметрическую систему входит несколько разновидностей формирователей сигналов, каждый из которых используется

для преобразования выходного сигнала того или иного конкретного преобразователя (датчика) в стандартный сигнал напряжения от 5 до 10 В.

Рассмотрим телеметрическую систему и её показания с КА «Юбилейный». Бортовая телеметрическая система КА «Юбилейный» обеспечивает сбор информации от различных служебных и научных датчиков, преобразует выходные сигналы этих датчиков в цифровую форму, обеспечивает хранение информации в период между сеансами связи и формирование единого цифрового потока двоичных данных.

Особо важным необходимо считать не только наличие обработанной телеметрии, полученной с минимальными потерями данных, но и её качественную визуализацию и анализ, на основании которого оперативно разрешаются возникающие в полёте нештатные ситуации. Обычно через 0,25 с после выполнения декодирования результат измерения воспроизводится на приемной станции для проведения экспресс-анализа [3]. Любое отклонение от нормы отображается другим цветом и может инициировать сигнал звукового предупреждения, чтобы привлечь к данной ситуации внимание оператора [2]. Среди всех способов отображения телеметрии наиболее предпочтительным является графический. В этом случае, рассматривая зависимость основных телеметрических параметров от времени, можно определить закономерности поведения КА на любом витке и внести соответствующие корректирующие изменения в программу полёта.

Специфика корректирующих изменений программы полета определяется необходимостью анализа полученной телеметрической информации с нескольких витков КА и требует достаточно длительного времени [1]. Для этого необходимо иметь программное обеспечение, преобразующее информацию в виде текста в графики изменения измеряемых датчиками величин, сгруппированные по общим признакам. С этой целью программный пакет «NavWin-Навигатор v.5.2», обеспечивающий связь с КА «Юбилейный», был дополнен разработанным в ЦУП МГТУ им Н.Э. Баумана приложением для построения графиков на основе получаемой телеметрии.

Проведенный анализ телеметрии показал, что некоторые параметры КА «Юбилейный» могут сохранять постоянные значения на протяжении всего витка, а некоторые меняются в зависимости от решаемой целевой задачи и проводимых на борту научных экспериментов. Кроме того, существуют ошибки ориентации и стабилизации КА, которые приводят к колебаниям всех магнитно-электрических и тепловых измеряемых величин. В частности, колебания температурного режима предъявляют высокие требования к чувствительности размещенной на борту КА полезной нагрузки.

Поступающая телеметрическая информация может содержать потерянные участки вследствие различного рода помех, неизменно присутствующих в процессе сеанса связи с КА. Если ошибка или невозможность декодирования значения какого-то одного

параметра в конкретный момент времени хотя и является нежелательной, но вполне допустима, то неопределенность в часах, минутах или секундах приводит к невозможности обработки всей строки с контролируемыми параметрами.

Передача строковых данных происходит через определенные временные интервалы, поэтому существует возможность восстановления значений времени по известным временным меткам. Заметим, что простейшее восстановление значения часа между двумя известными точками с постоянным (неизменившимся) значением часа выполняется автоматически, а для интерполяции общего случая требуется специальный модуль. В среднем, частично потерянными являются 50-90% временных меток.

Выполнить интерполяцию **частично** поврежденных меток времени таким образом, чтобы не исказить их неповрежденные поля – задача нетривиальная. Метка времени состоит из шести следующих одно за другим полей - года, месяца, дня, часа, минуты и секунды. В идеальном случае пакеты данных разделяют равные промежутки времени, поэтому интерполяция линейна, что несколько облегчает задачу.

Интерполяция проходит в два этапа.

Первый этап – восстановление полей, значение которых очевидно. Рассмотрим ряд идущих последовательно меток с одним и тем же поврежденным полем. Если значения всех полей до и после поврежденной метки одинаковы, то можно сделать вывод, что значения поврежденного поля для всех меток ряда одинаковы.

Второй этап – восстановление большей части оставшихся не восстановленными полей. Рассмотрим только неповрежденные метки, коих обычно меньшинство. Путем линейной интерполяции получаем «идеальные» значения всех промежуточных меток. На каждом отрезке интерполяции сопоставляем идеальные значения меток с имеющимися поврежденными метками. Среди поврежденных меток выбираем одну по следующим критериям:

- 1) повреждения выбранной метки должны быть минимальными (то есть ошибка должна содержаться в поле секунд);
- 2) после восстановления метки, отклонение её значения от идеального должно быть минимальным на отрезке интерполирования.

Сделав выбор метки, присваиваем ей восстановленное значение, разбивая изначальный отрезок интерполяции на два, и применяем ту же последовательность действий для каждого из двух получившихся отрезков.

Необходимо также отметить, что возможны сбои, являющиеся результатом неверного декодирования. Они выражаются в наличии элементов типа «В3», «К8» и т.д. вместо числа или в заведомо невозможном логически или физически значении, как это показано на рис. 2.

FF:FF:FF	14,3	?????	03:45:FF	14,4	0,19	0,10
FF:FF:FF	?????	?????	03:44:B3	14,4	0,90	0,10
FF:FF:FF	?????	0,19	FF:43:33	14,5	?????	0,10
FF:FF:FF	?????	?????	FF:FF:FF	?????	?????	?????
84:15:01	?????	?????	FF:37:33	14,4	0,19	0,10
04:FF:FF	?????	?????	FF:36:FF	14,4	?????	?????
04:03:01	14,4	?????	03:B3:FF	14,3	0,19	0,10
04:02:FF	?????	?????	03:31:FF	?????	0,86	0,10
04:01:FF	14,2	0,93	03:FF:FF	?????	?????	0,10
FF:00:01	14,4	?????	FF:FF:33	?????	0,86	0,10
03:FF:01	?????	0,93	03:FF:33	14,3	?????	0,10
FF:FF:FF	14,9	?????	03:19:33	?????	0,19	0,10

Рис. 2. Пример текстового файла с телеметрической информацией. Обозначены возможные ошибки декодирования.

В настоящее время КА «Юбилейный» находится на консервации, работая только в режиме азбуки Морзе (согласно данным, полученным из научно-исследовательского института «Лаборатория аэрокосмической техники» (НИИ ЛАКТ) г. Калуги и подтверждённых при дальнейших сеансах связи в ЦУП МГТУ). Последний раз приём телеметрической информации в формате стандартного протокола в ЦУП МГТУ был осуществлён с витка №12951 от 30.03.11. В результате постоянного отслеживания динамики состояния бортовых систем аппарата, сотрудники Молодёжного космического центра выделили несколько важных моментов:

1. На начальных витках (приём телеметрии с КА «Юбилейный» в МГТУ им. Н.Э. Баумана вёлся с 36 витка от 26.05.08) КА «Юбилейный» функционировал в режиме, близком к штатному. Наблюдался (продолжался на всех последующих витках) недостаток тока на магнитометре. Температура некоторых датчиков и бортового центрального компьютера (БЦК) колебалась, переходя верхний и нижний предел допустимых температурных нагрузок на небольшую величину. Имели место нарушения ориентации по отдельным каналам, которые вплоть до последних витков успешно парировались системой стабилизации аппарата. Ток, приходящий с солнечных батарей постоянно превышал верхний предел в 1,5-2 раза.

2. Начиная с витка №4471 от 18.05.09 (см. рис. 2), в бортовой системе начинают появляться негативные тенденции. Синусоидальность графика напряжения на магнитометре постоянно прерывается одиночными всплесками в сторону увеличения или уменьшения значения величины. Кроме того, температура одной из плат корпуса (плата № 4) превышает допустимую величину (рис. 3) на 50 °С (155 °С вместо максимально возможной 100 °С) в течение длительного периода времени (около одного часа). Уже на следующем витке температура платы постоянно держится на отметке 155 °С и остается таковой до последних сеансов связи с КА.

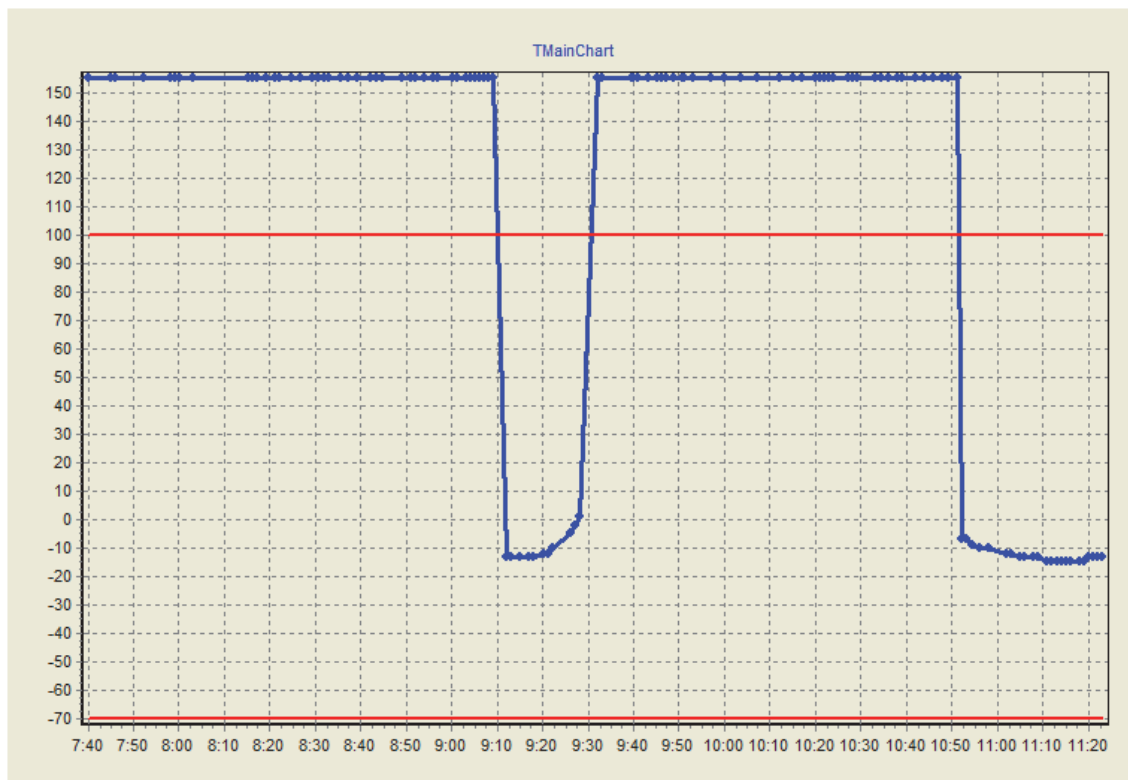


Рис. 3. Виток № 4471. Наблюдается начало необратимых изменений в температурном режиме платы №4. Горизонтальными линиями обозначены границы допустимого диапазона значений.

3. Виток №12951 от 30.03.11 был последним, принятым из ЦУП МГТУ. В бортовых системах присутствуют тревожные состояния. Температура БЦК на отдельных временных участках (до 40%) находится ниже установленной границы. По-прежнему остаётся перегрев платы № 4 на 55 °С и увеличено значение тока солнечных батарей почти в 2 раза. Значение силы тока на магнитометре вопреки обычному состоянию чрезмерно превышено в результате двух сильных скачков в 20 и в 10 раз. Похожие по силе скачки по току наблюдались на электрическом нагревателе и некоторых экспериментальных установках, которые обычно полностью обесточены. Были зафиксированы три сильные ошибки ориентации с интервалом 25-30 минут, первые две из них были ликвидированы. По стабилизации КА во время третьей ошибки данных нет, так как она пришлась на конец приёма. Отметим, что вторая и третья ошибка по своей величине вышли за допустимые границы, установленные технической документацией.

4. В настоящее время (на 10.09.11) связь с КА «Юбилейный» возможна и реализуется только в режиме азбуки Морзе. Информация, передаваемая в течение витка, по объёму существенно меньше стандартной многопараметрической развёртки и отражает состояние только основных параметров борта (ток и напряжение борта и солнечных батарей, температура центрального бортового компьютера, принимающего и

передающего устройства, режим функционирования). Тем не менее, по этим ограниченным данным видно, что имеет место постоянное превышение установленного технической документацией температурного режима на устройствах приема и передачи данных, а также на навигационном блоке. Более того, ток борта практически равен нулю и составляет 0,18 мА вместо установленного диапазона 0,1-3,5 А. Сотрудники ЦУП МГТУ им. Н.Э. Баумана продолжают следить за развитием ситуации.

4. Заключение

В заключение следует отметить, что для обеспечения штатного функционирования КА на орбите в течение заложенного на этапе проектирования срока, необходим постоянный контроль параметров бортовой аппаратуры КА. Своевременная корректировка программ полёта, выполненная на основе проанализированных телеметрических данных, продлевает жизнь КА на орбите.

Список литературы:

1. Лысенко Л.Н., Соловьев В.А., Любинский В.Е.. Управление космическими полетами. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2009. 902 с.
2. Матюшин М.М. Оперативная оценка параметров состояния космического аппарата. //i-Маш. Ресурс машиностроения <http://www.i-mash.ru/materials/automation/15003-operativnaja-ocenka-parametrov-sostojanija.html>
3. Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. Современная телеметрия в теории и на практике – СПб.: Наука и техника, 2007. 627с.
4. Отображение информации в центре управления космическими полетами / Милицин А.В., Самсонов В.К., Ходак В.А. - М.: Радио и связь, 1982. 192с
5. Панасюк М.И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/pilgrims/cr16.htm>
6. Получение и декодирование телеметрии ИСЗ. <http://www.belastro.net/?menu=1&submenu=103&page=&nid=80>
7. Российский спутник мог стать жертвой военных экспериментов. <http://lenta.ru/news/2007/04/04/satellite/>