

УДК 520.8

УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА

© 2015 г. М. С. Бургин¹, П. А. Войцик¹, А. М. Кутькин¹, М. М. Лисаков¹,
Е. Н. Миронова¹, К. В. Соколовский^{1,2}, Е. Н. Фадеев¹

¹Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ

lisakov@asc.rssi.ru

miroнова@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.12.2013 г.

В настоящей статье излагаются используемые в АКЦ ФИАН методы подготовки командных последовательностей, управляющих режимами работы приборов БКНА, а также описываются средства, обеспечивающие своевременное получение информации о реальном состоянии бортовой аппаратуры и позволяющие, тем самым, оперативно оценивать адекватность выбранных режимов решаемым научным задачам и оперативно реагировать на нештатные ситуации. Кратко описаны основные моменты взаимодействия с другими подсистемами и их средствами управления.

DOI: 10.7868/S0023420615030048

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей наземного сегмента системы управления бортовым комплексом научной аппаратуры (БКНА) космического радиотелескопа является подготовка и передача на борт орбитальной обсерватории “РадиоАстрон” последовательностей команд, обеспечивающих режим работы обсерватории, оптимальный с точки зрения описанной в [1] научной программы наземно-космического интерферометра. Эффективное функционирование интерферометра невозможно без корректной работы большого числа весьма разнородных подсистем, являющихся либо его составной частью (космический радиотелескоп, научные станции слежения, наземные радиотелескопы), либо входящих в систему обеспечения интерферометра теми или иными необходимыми материальными и информационными ресурсами (базовая космическая платформа “Навигатор”, наземная инфраструктура, обеспечивающая управление орбитальной обсерваторией и доставку передаваемых ею данных конечным пользователям, средства определения параметров орбиты и т.п.). Управление этими подсистемами осуществляется большим числом организаций, в том числе АКЦ ФИАН, НПО им. С.А. Лавочкина (НПОЛ), ИКИ РАН, многочисленными наземными радиоастрономическими обсерваториями и др.

СОСТАВЛЕНИЕ РАСПИСАНИЯ СЕАНСОВ РАБОТЫ КРТ

С точки зрения научной программы основной единицей планирования является сеанс наблюдений в режиме радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ). В большинстве случаев, во время РСДБ сеанса антенна космического радиотелескопа непрерывно наведена на один и тот же исследуемый объект, который одновременно наблюдается на наземных РСДБ станциях. При этом антенна высокоинформативного канала связи (ВИРК) [2], обеспечивающего передачу широкополосного интерферометрического сигнала с борта КА, наведена на одну из наземных станций слежения (НСС), осуществляющих прием и запись переданной информации.

Кроме РСДБ сеансов аппаратура КРТ используется и в некоторых других типах сеансов. Из них наиболее важными для выполнения научной программы и чаще всего проводимыми являются т.н. “юстировочные сеансы”, предназначенные для определения параметров диаграммы направленности КРТ и контроля системы ориентации спутника. В этих сеансах наземные обсерватории не участвуют, а с помощью КРТ наблюдается изолированный точечный достаточно яркий объект. Во время наблюдений ориентация спутника меняется по заранее заданной программе таким образом, чтобы можно было измерить изменение мощности принимаемого сигнала при смещении наблюдаемого объекта относительно оптической

оси антенны КРТ. Результаты измерений записываются в бортовое запоминающее устройство и затем передаются на Землю с помощью системы связи базовой платформы.

Для того чтобы по возможности исключить помехи со стороны радиоэлектронной аппаратуры спутника, обмен данными между базовой платформой и Землей во время работы приемников КРТ сведен к минимуму. Передача информации со спутника на Землю во время РСДБ сеансов производится только через ВИРК, а передатчики базовой платформы выключены. Все команды управления бортовой аппаратурой записываются заранее в память бортовой системы управления при проведении специально организуемых для этой цели сеансов связи — т.н. “сеансов управления”. С точки зрения максимизации времени, доступного для астрономических наблюдений, желательно проводить сеансы управления по возможности реже и в каждом полетном задании задавать программы для возможно большего числа РСДБ сеансов. Однако конечный объем памяти бортового вычислительного комплекса и другие причины накладывают определенные ограничения на общее число команд управления КРТ, передаваемых за один сеанс управления, а также на интервал между двумя последовательными управляющими сеансами. Как правило, продолжительность этого интервала составляет от нескольких часов до нескольких суток и за это время производится от 1 до 20 РСДБ сеансов по 30–60 мин каждый.

Первым этапом подготовки наблюдений на наземно-космическом интерферометре является составление оптимального месячного расписания сеансов, совместимого со всеми ограничениями, накладываемыми на работу наземно-космического интерферометра. При этом оптимизируемым параметром является степень удовлетворения заявок от научных групп. Ограничения вызваны естественными (видимостью источников со спутника и наземных РСДБ станций, видимостью спутника со станций слежения), техническими (ограничениями на продолжительность РСДБ сеансов КРТ и интервалов между ними, необходимостью выделения времени на сеансы управления и т.п.) и организационными (занятостью наземных РСДБ станций другими программами) причинами.

Существует два подхода к использованию наземно-космического интерферометра для решения научных задач: “обзор лепестков” и “построение изображения”. Обзор лепестков предполагает измерение амплитуды отклика интерферометра (интерференционного лепестка) на нескольких наземно-космических базах для последующего сравнения с простой параметрической моделью. Эта модель может задавать пространственное

(при наблюдении внегалактических источников в континууме) и спектрально-пространственное (при наблюдениях мазеров) распределение яркости, или статистические характеристики, описывающие рассеяние излучения в межзвездной среде (при наблюдениях пульсаров). Обработка наблюдений позволяет получить параметры модели и, тем самым, информацию о физических свойствах исследуемых объектов. Наблюдения в рамках обзора лепестков обычно состоят из нескольких отдельных сеансов. Продолжительность каждого сеанса определяется необходимостью получить несколько независимых измерений (каждое из которых ограничено возможным временем когерентного накопления сигнала, составляющим около 10 мин на сантиметровых волнах) и составляет, обычно, величину порядка одного часа. Интервал между сеансами, входящими в обзор, определяется временем, требуемым для значительного изменения базы вследствие движения спутника. В обзорных наблюдениях необходимо участие, как минимум, одного крупного наземного телескопа для получения отклика на наземно-космической базе и одного телескопа меньшего диаметра для измерения амплитуды отклика на базе Земля–Земля и проверки правильности работы большого телескопа. Преимуществами обзора лепестков являются малые требования по времени наблюдения и количеству участвующих наземных телескопов, а также отсутствие принципиальных ограничений на величину проекции наземно-космической базы. Основным ограничением метода является то, что получаемые с его помощью результаты являются модельно-зависимыми, и их точность зависит от того, насколько адекватно используемая модель описывает исследуемый объект.

Построение изображения требует участия большого количества наземных телескопов, наблюдающих совместно с КРТ в течение продолжительного времени с небольшими перерывами на охлаждение космического телескопа и калибровку наземных телескопов. Полученные в таком эксперименте измерения амплитуды и фазы коррелированного сигнала на большом количестве различных баз позволяют восстановить изображение радиоисточника путем обратного Фурье-преобразования измеренного комплексного сигнала с использованием алгоритмов CLEAN и самокалибровки (т.н. “гибридное картографирование”). Такой метод наблюдений позволяет получить значительно больше информации о структуре радиоисточника, чем наблюдения в режиме обзора, однако он имеет ограничения, связанные с необходимостью достаточно равномерного заполнения измерениями исследуемого диапазона баз. На практике это означает, что для успешного восстановления изображения максимальная наземно-космическая база не должна более чем в не-

сколько раз превышать максимальную из наземных баз. Это условие накладывает ограничение на достигаемое угловое разрешение интерферометра и требует проведения наблюдений в то время, когда спутник находится вблизи перигея.

Исходными данными для составления расписаний являются поступающие от научных групп заявки на наблюдения, в которых содержится описание решаемых задач и используемых подходов. При планировании наблюдений, в первую очередь, определяются даты экспериментов по построению изображений, т.к. они жестко привязаны во времени к интервалу вблизи прохождения перигея и требуют участия большого количества наземных телескопов. Поскольку у многих телескопов возможности участия в совместных с КРТ наблюдениях ограничены, то организация таких экспериментов требует согласования времени наблюдений с наземными обсерваториями за 6–12 мес. до его проведения. Необходимость такого долгосрочного планирования создает трудности, связанные с невозможностью уверенного предсказания времени наблюдения для КРТ из-за ограниченной точности долгосрочного предсказания орбиты. При планировании на год вперед реальные наблюдения КРТ могут оказаться сдвинутыми относительно запланированных на несколько десятков минут. Отрицательные последствия такого сдвига частично смягчаются большой длительностью экспериментов по картографированию, которая обычно составляет более 10 ч. Короткие наблюдения в рамках обзоров лепестков, для которых точность предсказания времени наблюдения в несколько минут является критически важной, планируются за 1–4 мес. При этом обзорные сеансы планируются в промежутки времени, не занятые наблюдениями, для построения изображения. Для расчета видимости радиоисточников космическим и наземными телескопами используются программы *Fakerat* [3] и *SCHED* (<http://www.aoc.nrao.edu/software/sched/index.html>). Эти программы могут использоваться как в интерактивном режиме, когда условия эксперимента задаются непосредственно пользователем, так и в режиме пакетной обработки, когда генерация исходных данных, также как и анализ полученных результатов, производится автоматически управляющей командной процедурой *autofake.sh*, реализованной на языке *bash*. Пакетный режим позволяет проводить массовую проверку условий видимости для большого количества радиоисточников и продолжительного интервала времени, что необходимо при планировании наблюдений в режиме обзора лепестков. Управляющие процедуры написаны на языке *bash* и доступны по запросу у одного из авторов настоящей работы (kirx@scan.sai.msu.ru). При подготовке серии наблюдений активных ядер галактик, проводимых в режиме обзора лепестков, разработана

компьютерная программа (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2013arXiv1303.5451S>), автоматизирующая составление расписания сеансов. В качестве исходных данных программа использует список интересных для наблюдения источников, информацию об их видимости для космического и наземных телескопов, выдаваемую процедурой *autofake.sh*, историю предыдущих наблюдений, информацию о приоритете источников (большой приоритет присваивается источникам, для которых возможность наблюдений возникает редко) и список интервалов, недоступных для наблюдений из-за занятости под другие научные программы, сеансы управления аппаратом или по причине вхождения аппарата в тень Земли.

Доступное наблюдательное время программа распределяет между исследуемыми источниками, предусматривая при этом продолжительность интервалов между сеансами достаточную для обеспечения допустимого теплового режима спутника. При выборе источников для наблюдения предпочтение отдается тем, которые видны наибольшему числу наземных телескопов (для повышения вероятности того, что среди них наберется достаточно телескопов, готовых проводить наблюдения в данный интервал времени) и тем, которые могут наблюдаться на сильно различающихся проекциях базы и позиционных углах базы в течение одной или нескольких близких орбит. При прочих равных условиях, предпочтение отдается источникам, направление на которые составляет с направлением на Солнце углы в диапазоне 90° – 110° , наиболее благоприятные с точки зрения теплового режима спутника. Автоматизация процедуры планирования наблюдений позволяет максимально эффективно использовать все доступное наблюдательное время.

После получения заявок на наблюдения в течение месяца от всех научных групп скомбинированный запрос отправляется в НПОЛ для баллистической и тепловой проверки. Одновременно отправляются запросы на наземные телескопы. Их ответы позволяют выяснить, какие из возможных сеансов имеют достаточную для их проведения поддержку наземными телескопами и утвердить окончательное расписание на данный месяц. Утвержденная программа наблюдений становится основой для составления заданий для космического и наземных телескопов. Управление наземными телескопами, а также записью данных с космического телескопа на НСС в Пушино и Green Bank осуществляется с помощью *veh*-файлов, создаваемых программой *SCHED*. Эти файлы имеют стандартный формат, широко применяемый в наземных РСДБ наблюдениях, и содержат полную информацию об эксперименте, включая частотные настройки, времена записи, координаты радиоисточников и наблюдающих их телескопов. Генерация на основе утвержденного расписания управля-

ющих *vet*-файлов с использованием *SCHED*, их размещение на основном и запасном FTP серверах, а также оповещение РСДБ станций о готовности расписания производится серией программ, также реализованных на *bash*.

ГЕНЕРАЦИЯ ПОЛЕТНЫХ ЗАДАНИЙ

Последовательность команд, закладываемых во время сеанса управления в память бортового вычислительного комплекса, называется полетным заданием (ПЗ) и является основной единицей обмена данными между наземным и бортовым сегментами системы управления спутником. В штатном режиме работы во время исполнения ПЗ никакие дополнительные команды на борт не поступают. В стандартном представлении, используемом при передаче данных из АКЦ ФИАН в НПОЛ, полетное задание представляет собой текстовый файл, содержащий фрагменты следующих типов:

1. Команды управления БКНА КРТ.
2. Команды управления экспериментом “Плазма-Ф”. Эта часть ПЗ подготавливается в ИКИ РАН и объединяется с остальными фрагментами задания в АКЦ ФИАН перед передачей ПЗ в НПОЛ.
3. Псевдокомментарии управления подсистемой приема телеметрической информации.
4. Комментарий.

Для каждой команды управления указывается планируемое время ее выполнения. Фрагменты типов 3 и 4 не влияют непосредственно на содержание программы, передаваемой на борт спутника. Использование информации, содержащейся в фрагментах типа 3, описано в нижеследующих разделах статьи. К сентябрю 2013 г в АКЦ ФИАН было создано более 500 полетных заданий. Опыт первых месяцев работы, когда необходимо было ежемесячно составлять от 2 до 10 ПЗ, каждое содержащее по 1–2 РСДБ сеанса, показал, что трудоемкость и вероятность потерь наблюдательного времени из-за ошибок управления при ручном составлении ПЗ слишком велики и необходимо в максимально возможной степени автоматизировать составление полетных заданий. Первые созданные автоматически файлы ПЗ появились в августе 2012 года, и в дальнейшем составление ПЗ было автоматизировано практически полностью. На момент написания статьи количество автоматически составленных ПЗ уже превысило количество составленных вручную.

При разработке ПЗ используются две специализированные программы: программа автоматического составления ПЗ и программа контроля корректности ПЗ. Необходимость создания двух программ, функции которых в определенной степени дублируют друг друга, обусловлена следую-

щими причинами. Во-первых, в некоторых случаях автоматически созданное ПЗ на последних фазах подготовки подвергается тем или иным модификациям вручную. Это происходит, в частности, в тех случаях, когда испытываются не опробованные ранее режимы работы БКНА. Последующая проверка корректности позволяет выявить ошибки, которые могут быть внесены при ручной правке. Во-вторых, поскольку последствия ошибки в ПЗ могут быть весьма тяжелыми (обычно, это целиком или частично потерянный сеанс наблюдений), то желательно минимизировать влияние возможных ошибок в программе автоматического создания ПЗ. Поскольку программа создания и программа контроля создавались и выполняются полностью независимо друг от друга (написаны разными авторами на разных языках программирования и работают под управлением разных ОС), то вероятность того, что ошибка в автоматически созданном ПЗ не будет обнаружена при проверке корректности, исчезающе мала.

Программа автоматического составления ПЗ реализована на языке Perl v. 5.14 в ОС Linux. Входной информацией для программы является расписание работы КРТ, содержащее информацию о проведении наблюдений, управляющих сеансов, юстировок и т.п. Месячное расписание включает в себя описатели всех наблюдений, планируемых на соответствующий интервал времени. Каждый описатель содержит следующую информацию, используемую при генерации команд ПЗ: моменты начала и конца наблюдения, используемые приемники, режим форматора, мощность передатчика ВИРК, название станции слежения и время ее работы. Кроме того, в описателе содержатся следующие данные, которые не влияют на последовательность генерируемых команд, но используются при создании комментариев: код эксперимента, список наземных телескопов, участвующих в данном эксперименте, название и координаты наблюдаемого объекта. В качестве внутреннего представления исходного расписания и генерируемых полетных заданий используются ассоциативные массивы. В качестве индексов этих массивов используется время (начала наблюдения в расписании или выдачи команды в ПЗ) в формате POSIX, т.е. время в секундах, прошедшее с момента 1.I.1970 00.00 UTC, а значениями служат атрибуты сеанса (для расписания) или выдаваемая команда (для ПЗ). При планировании наземных РСДБ наблюдений для их идентификации принято использовать так называемый “код эксперимента”. Однако использование кода для идентификации сеансов наблюдений КРТ оказалось невозможным, поскольку в некоторых случаях отсутствует взаимно-однозначное соответствие между кодом наземного наблюдения и сеансом КРТ. Для связи с подсистемой планирования наземных наблюдений код эксперимента со-

хранится в комментариях ПЗ в качестве одного из атрибутов сеанса.

На первой фазе работы программы месячное расписание переводится во внутреннее представление и делится на части, ограниченные последовательными управляющими сеансами. Из каждой такой части основной модуль программы создает отдельное ПЗ. Все команды для управления системами КРТ: включение приемников, установка режима работы или перекоммутация ключей форматора, установка частоты гетеродина, калибровка системы, изменение настройки аттенуаторов и т.п. относятся к одному из логических блоков. Команды, принадлежащие одному блоку, управляют одним и тем же прибором, и полетное задание составляется так, чтобы среди команд, принадлежащих одному из блоков, не встречались команды из других. Блоки команд делятся на два типа. Для так называемых “фиксированных” блоков момент начала выполнения жестко привязан к тому или иному событию, заданному в исходных данных программы. К “фиксированным” относят блоки калибровок (калибровки должны проводиться строго перед началом наблюдения и после их окончания), блоки управления мощностью передатчика ВИРК (мощность передатчика может меняться либо перед началом приема данных наземной станцией слежения, либо после окончания приема), команды включения/выключения питания приемников, которые должны гарантировать, что приемники выключены во время проведения управляющих сеансов. Остальные блоки относятся к разряду “перемещаемых”. Время начала фиксированных блоков определяется исходя из расписания наблюдений, заносится в ассоциативный массив, используемый в качестве внутреннего представления ПЗ и в дальнейшем не изменяется. Далее для каждого блока рассчитывается его длительность исходя из того, что время между подачей последовательных команд составляет 5 с, а также учитывая то, что большинство команд подается с повтором для увеличения надежности. После того, как определена длительность всех блоков, а фиксированные блоки вставлены в ПЗ, в ассоциативный массив последовательно вставляются перемещаемые блоки. При этом начало выполнения каждого следующего блока выбирается так, чтобы гарантировать отсутствие пересечений с уже вставленными. После того, как все блоки вставлены, производится преобразование ПЗ во внешнее представление и вывод в файл.

Программа проверки ПЗ реализована в системе MATLAB и работает под управлением ОС Windows. Программа считывает файл полетного задания и проверяет синтаксическую правильность записи команд. Далее проводится проверка того, что последовательность выполнения команд и продолжительность интервалов между команда-

ми удовлетворяют заданным ограничениям. После этого проводится моделирование логики работы бортового комплекса научной аппаратуры и определяется зависимость его состояния от времени, соответствующая проверяемому полетному заданию. Результат выводится в графической форме, оптимизированной для визуальной проверки специалистами группы управления.

СОСТАВ И КАНАЛЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ БКНА

Обрабатываемая в АКЦ ФИАН информация о состоянии БКНА содержит три потока данных, различающиеся своим назначением, происхождением и методами доставки и обработки.

Генерируемый форматором [4] дискретизированный широкополосный видеосигнал, используемый в качестве исходных данных при проведении корреляционной обработки. В силу высокой информативности (~128 Мбит/с) этот поток может передаваться на Землю только через ВИРК. Обеспечение надлежащих статистических характеристик этого сигнала, собственно, и является одной из основных задач системы управления экспериментом. Описание методов его обработки приведено в [5] и в настоящей работе не рассматривается.

Измеряемые с помощью ТМС-Р — штатной системы телеизмерений КА — параметры приборов, входящих в БКНА (далее, для краткости, ТМС-параметры). Значения ТМС-параметров могут передаваться на Землю либо с помощью штатных средств КА (в реальном времени или с предварительной записью в бортовое ЗУ), либо передаваться из ТМС-Р в форматор и далее передаваться на Землю одновременно с видеосигналом в заголовках кадров ВИРК. При передаче с помощью штатных средств первичная обработка информации производится в НПОЛ, а затем через ИКИ РАН результаты передаются в АКЦ. При передаче через ВИРК данные принимаются на одной из научных станций слежения и затем передаются в АКЦ и НПОЛ.

Небольшое число параметров БКНА (называемых далее “непосредственно телеметрируемыми” или НТ-параметрами) записывается форматором в заголовки кадров ВИРК непосредственно, без участия системы ТМС-Р, и после передачи на Землю доставляются из НСС в АКЦ. Важнейшими из НТ-параметров являются так называемые “коды мощности”, характеризующие статистические свойства видеосигнала и, тем самым, работу БКНА в целом.

В настоящей работе описываются методы, используемые для передачи в АКЦ параметров БКНА, принимаемых на научной станции слежения в составе заголовков кадров ВИРК, и алгоритмы их первичной обработки.

Принятые на НСС данные с выхода демодулятора поступают на декодер телеметрии [6], который выделяет из заголовков кадров ВИРК значения телеметрируемых параметров и присоединяет к ним служебную информацию, формируемую на НСС. Для каждого заголовка ВИРК служебная информация включает в себя время приема декодером соответствующего кадра и число обнаруженных в кадре ошибок четности. Для каждого кадра декодер формирует отдельную текстовую строку, которая записывается в файл на жесткий диск и может одновременно передаваться по сети на сервер обработки телеметрии. В штатном режиме при записи на диск каждому сеансу приема данных по ВИРК соответствует один файл. При передаче по сети каждой записи соответствует одна дейтаграмма протокола UDP. Записанные на жесткий диск файлы впоследствии передаются по протоколу FTP на сервер хранения информации ЦОНИ.

ПЛАНИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИЕМА ТЕЛЕМЕТРИИ

Система обработки телеметрии предназначена для преобразования получаемых от декодера НСС данных к виду, максимально упрощающему ее дальнейший анализ, и обеспечения доступа конечных пользователей к результатам обработки. Результаты обработки являются основным источником информации о состоянии аппаратуры, и в случае возникновения нештатных ситуаций на основе анализа этих результатов принимаются решения о тех или иных изменениях в полетных заданиях. В связи с этим, система должна обеспечивать оперативность достаточную для того, чтобы анализ результатов и подготовка модифицированных ПЗ могла быть выполнена, по возможности, до очередного сеанса управления. Система включает в себя подсистему первичной обработки ТМКРТ, состоящую из комплекса программ, выполняющихся на серверах централизованной обработки телеметрии, и ряд специализированных подсистем вторичной обработки, предназначенных для анализа и визуализации данных, относящихся к отдельным приборам БКНА и группам телеметрируемых параметров. Далее описывается подсистема первичной обработки и средства, используемые для ее связи с программами вторичной обработки. Подсистема ТМКРТ выполняет следующие основные операции:

1. Планирование сеансов приема данных, передаваемых по сети декодером НСС.
2. Подготовка и завершение сеансов приема.
3. Прием и сохранение принятых по сети исходных данных.
4. Демультимплексирование вложенных подпотоков, входящих в общий поток данных, получаемых с НСС.

5. Выделение кадров ТМС-Р и формирование файла в формате ТМІ.

6. Усреднение кодов мощности и формирование файла в формате ТРА.

7. Копирование на сервер Центра обработки научных данных АКЦ полученных по сети файлов с исходной информацией и файлов с результатами обработки.

8. Экспресс-анализ результатов обработки и, в случае выявления аномалий, рассылка сообщений с предупредительной диагностикой.

В случае необходимости, выполнение любой из перечисленных выше операций может быть инициировано по команде оператора. Однако, в основном режиме все перечисленные выше операции, за исключением планирования сеансов приема, выполняются полностью автоматически. Дополнительно, в ручном режиме может быть также выполнено считывание с сервера хранения данных файлов, переданных с НСС по протоколу FTP. Необходимость в этом возникает в тех случаях, когда по той или иной причине при передаче данных с НСС в АКЦ в реальном времени во время сеанса произошли недопустимо большие потери.

Подсистема ТМКРТ функционирует на двух серверах, работающих под управлением операционной системы GNU/Linux. Один из серверов выполняет роль рабочего, а второй находится в горячем резерве. Определяющим отличием между рабочим и резервным серверами является адрес сетевого интерфейса. При передаче телеметрии по сети, декодер НСС всегда использует в качестве назначения адрес, зарезервированный для рабочего сервера. Обычно, оба сервера системы находятся в состоянии готовности приема данных. Используемая ОС настроена таким образом, что при получении UDP дейтаграммы через порт, зарезервированный для приема телеметрической информации, автоматически запускается программа копирования полученных данных на диск. Все полученные с этого момента и до принудительного завершения программы копирования дейтаграммы записываются в один файл. Каждый из серверов может находиться в одном из двух состояний — “Прием с НСС” или “Прием теста”, отличающихся настройкой межсетевого экрана. По умолчанию, рабочий сервер находится в режиме “Прием с НСС”, в котором программа приема может принимать данные только с сетевого адреса, зарезервированного для декодера НСС. В режиме “Прием теста” данные могут приниматься только с адреса, зарезервированного для администратора системы обработки. Этот режим, используемый для тестирования аппаратуры и отладки новых версий программного обеспечения, является основным для резервного сервера. Переключение между режимами производится по командам, которые могут выдаваться либо непосред-

ственно администратором системы, либо от его имени в предварительно запрограммированные моменты времени. Данные, передаваемые с любого адреса, не разрешенного в текущем режиме, блокируются межсетевым экраном и не попадают в систему. Тем самым устраняется опасность создания помех и потери принимаемой информации.

Как отмечено выше, рабочий сервер обработки принимает и записывает все дейтаграммы, полученные от НСС. Однако, для контроля функционирования БКНА, данные, полученные вне сеансов работы ВИРК — например, при тестировании декодера — интереса не представляют. Кроме того, для удобства дальнейшего анализа желательно все данные, относящиеся к одному сеансу, и результаты их обработки хранить совместно. Для этого работа сервера обработки должна быть синхронизирована с работой ВИРК и НСС. Для такой синхронизации используются псевдокомментарии, упомянутые выше в разделе “Генерация полетных заданий”. Эти псевдокомментарии записываются в файл полетного задания для каждого сеанса, в котором работает ВИРК. Они содержат информацию о моментах начала и конца наведения антенны ВИРК на НСС и о том, через какую НСС будет производиться передача информации. На сервере обработки раз в несколько часов запускается программа, сканирующая оглавление на сервере хранения информации, в которое записываются файлы ПЗ, передаваемые в НПОЛ. При обнаружении в этом оглавлении нового полетного задания производится поиск и анализ содержащихся в нем псевдокомментариев и операторам ТМКРТ посылаются сообщения со списком вновь запланированных сеансов работы ВИРК. Все эти операции производятся полностью автоматически. При получении сообщения оператор анализирует список и на его основе выполняет планирование сеансов приема. Обычно такое планирование сводится к запуску соответствующей программы, которая в качестве входного файла использует файл полетного задания. В некоторых редких (примерно 1%) случаях требуется предварительная небольшая модификация файла исходных данных программы планирования приема. Это необходимо в тех ситуациях, когда последовательные РСДБ сеансы следуют вплотную друг за другом, и интервал между ними слишком мал для того, чтобы гарантировать выполнение всех необходимых действий по завершении и обработке данных первого сеанса до начала подготовки второго. В такой ситуации псевдокомментарии в файле полетного задания модифицируются и планируется один удлиненный сеанс приема, включающий в себя несколько РСДБ сеансов. Планирование сеанса приема заключается в том, что с помощью стандартных средств операционной системы (команды “at”) назначаются моменты запуска программ подго-

товки и завершения приема. Запуск программы подготовки производится за 5–10 мин до указанного в ПЗ момента начала наведения антенны ВИРК на НСС, а запуск программы завершения — через 1 мин после конца наведения. Программа подготовки приема выполняет следующие основные функции. Прежде всего, сетевой экран переводится в состояние, запрещающее прием данных от НСС. Это временное запрещение продолжительностью ~1 с гарантирует отсутствие внешних помех при выполнении описываемых ниже подготовительных операций. Если работает программа приема данных от НСС, то она принудительно завершается. Все данные, записанные вне сеанса приема, переносятся в специально предназначенное для них оглавление. Далее, запускается программа мониторинга приема, которая периодически опрашивает состояние формируемого файла с полученными с НСС данными и сетевого интерфейса, вычисляет скорость приема информации и записывает результаты в протокол приема. Наконец, выдается команда на перевод сетевого экрана в состояние приема данных от НСС, и выполнение программы подготовки завершается.

Получение первой дейтаграммы с НСС вызывает запуск программы копирования принимаемых данных в файл данных. При этом дополнительно создается файл с метаданными, описывающими происхождение данных. В этот же файл метаданных в дальнейшем записываются интегральные характеристики сеанса, вычисляемые при обработке данных. Далее копирование продолжается до тех пор, пока прием информации не будет прерван при выполнении программы завершения сеанса. Программа завершения сеанса закрывает, прежде всего, доступ данным с НСС в систему и завершает работу программ копирования принимаемых данных и мониторинга приема. После этого, исходя из времени приема первого заголовка ВИРК, формируется уникальный идентификатор сеанса приема. Создается т.н. “оглавление сеанса” с именем, в состав которого входит идентификатор сеанса, и в него перемещаются файлы, сформированные программой приема. После этого запускается программа обработки и экспресс-диагностики, причем соответствующее задание операционной системы выполняется как фоновое, параллельно с основным заданием, управляющим общей последовательностью действий, и независимо от него. Последней операцией программы завершения сеанса является перевод сетевого экрана в режим разрешения приема данных с НСС.

ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ТЕЛЕМЕТРИИ И ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА БКНА

С точки зрения общей структуры программ обработки, формат данных, передаваемых с НСС на сервер обработки, принадлежит к семейству т.н. контейнерных форматов. То есть содержательно поток обрабатываемых данных представляет собой объединение нескольких подпотоков (ТМС-параметры, НТ-параметры и служебная информация НСС), созданных независимо друг от друга и имеющих совершенно различную структуру. Мультиплексирование, т.е. объединение независимо сформированных подпотоков в общий поток, производится, как указано выше, в формате, в аппаратуре НСС и программном обеспечении декодера. Первой фазой обработки является демultipлексирование, т.е. выделение отдельных подпотоков из общего потока принимаемых данных. При этом подпоток ТМС-параметров отделяется в первую очередь и его дальнейшая обработка производится независимо от обработки других подпотоков. Логически, отделение этого потока и его обработка могут производиться независимо друг от друга. Однако, из соображений эффективности и для облегчения диагностики ошибочных ситуаций обе эти операции производятся в одной программе. В этой же программе производится начальная фаза совместной обработки подпотоков НТ-параметров и служебной информации НСС.

Первой фазой первичной обработки подпотока ТМС-Р является выделение телеметрических кадров и их запись в файл в формате ТМІ. Первичная обработка подпотока НТ-параметров заключается в усреднении кодов мощности по отрезкам времени заданной продолжительности (обычно, 1 с). Для каждого отрезка усреднения в формируемый файл формата ТРА выводится время начала отрезка усреднения в бортовой шкале времени, его продолжительность и статистические характеристики кодов мощности. Файлы с исходными данными, результатами обработки и диагностической информацией передаются по протоколу FTP на сервер Центра обработки научных данных АКЦ в создаваемое там оглавление сеанса, доступное по чтению для всех участников эксперимента. Для того, чтобы в максимальной степени ускорить реакцию на аварийные ситуации, во время первичной обработки производится автоматический анализ т.н. “быстрых критериев качества” — тех параметров, которые можно получить из телеметрической информации, которые характеризуют функционирование системы в целом, и заметное отклонение которых от номинальных значений с большой вероятностью свидетельствует об аномалиях, требующих оперативного вмешательства.

На момент написания настоящей работы в качестве основного критерия качества использова-

лась доля кадров ВИРК с нулевыми кодами мощности. Если доля нулевых кодов в сеансе превосходит заданное пороговое значение, то немедленно рассылаются диагностические сообщения для специалистов группы управления и группы приема и обработки телеметрической информации. Для рассылки используется протокол SMTP. Адресаты получают сообщение об обнаруженных аномалиях через несколько минут после завершения сеанса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате совместной работы достигнута высокая степень автоматизации процессов подготовки к проведению наблюдений, а также получения служебной информации о них. Основные результаты представленной работы:

- создана автоматическая система оперативного реагирования на нештатные режимы работы БКНА КРТ, включающая в себя систему сбора и обработки телеметрической информации и систему оповещения;
- минимизирована необходимость ручного составления и редактирования полетных заданий;
- автоматизированы процессы подготовки и планирования наблюдений, а также проверки корректности полетных заданий.

Проект “РадиоАстрон” осуществляется Астро-космическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и НПО им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно со многими научно-техническими организациями в России и других странах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кардашев Н.С., Хартов В.В., Абрамов В.В. и др. “РадиоАстрон” — телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрон. журн. 2013. Т. 90. № 3. С. 179.
2. Каневский Б.З., Смирнов А.И., Сазанков С.В. и др. Наземная станция слежения (проект “РадиоАстрон”) // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 47.
3. Журавлев В.И. Пакет FakeGat в международном интерферометрическом проекте “РадиоАстрон” со сверхдлинными наземно-космическими базами // Космич. иссл. 2015. № 3. С. ...
4. Андреев В.В., Кардашев Н.С., Хартов В.В. Наземно-космический радиоинтерферометр “РадиоАстрон” // Космич. иссл. 2014. № 5. С. 353. (Cosmic Research. P. 319).
5. Андрианов А.С., Гирин И.А., Жаров В.Е. и др. Корреляционная обработка данных наземно-космического интерферометра “РадиоАстрон” // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 55.
6. Белоусов К.Г., Дронова О.Б., Лихачев С.Ф., Чибисов А.В. Система регистрации радиоастрономических данных // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 60.