

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НОВЫХ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Мищуров, С. П. Панько

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы использования стандарта Международного консультативного комитета по системам космических данных (CCSDS). Показано на примере измерения дальности космического аппарата, что рекомендации CCSDS отстают от нынешнего уровня науки и техники, что вызвано, в первую очередь, большим периодом между пересмотром рекомендаций. В рекомендациях CCSDS вопрос одновременной передачи команд и дальномерной псевдослучайной последовательности рассматривается в основном как цель использования различных поднесущих частот. Однако это противоречит требованию уменьшения ширины полосы занимаемых частот. Наиболее продуктивно использовать командную и дальномерную псевдослучайные последовательности одинаковой длительности. Важно поочередно излучать командную и дальномерную последовательности и измерять дальность по обеим последовательностям. Наиболее высокая точность измерения дальности достигается при равенстве длин дальномерной и командной последовательностей. Ещё один аспект, не рассматриваемый CCSDS, – точность измерения радиальной составляющей скорости движения космического аппарата. По результатам оценки стандартов CCSDS сделан вывод о необходимости разработки их подвида – отечественного стандарта, учитывающего современные методы модуляции/демодуляции и направленного на защиту командного канала от несакционированного вмешательства, обеспечивающего повышение точности измерения текущих навигационных параметров, таких как дальность и скорость космического аппарата относительно наземного комплекса управления.

Ключевые слова: космический аппарат, наземный комплекс управления, телеметрия, измерение дальности, CCSDS.

Многие страны разработали и успешно используют собственные стандарты спутниковых технологий для координации деятельности эксплуатирующих организаций и предприятий промышленности, выпускающих различные составные части космических аппаратов (КА). Однако поскольку спутниковые технологии являются общим достижением человечества, то возникла необходимость международного сотрудничества участников национальных космических программ. Это вылилось в создание в 1982 г. Международного консультативного комитета по системам космических данных (The Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS), генеральной целью которого является координация деятельности в этой сфере [1]. В CCSDS в настоящее время входят 11 национальных космических агентств, 28 стран-наблюдателей и более 140 промышленных партнеров. Это интернациональный

форум для развития стандартов систем связи, передачи данных и космических полетов.

Библиотека стандартов CCSDS, опубликованная в русскоязычной транскрипции, содержит следующие разделы [8]:

1. Глобальное поле идентификатора КА CCSDS 320.0-B-5 («Розовая книга»).
2. Протокол космической радиолинии – Ближняя-1 CCSDS 211.1-B-3.
3. Псевдошумовые системы измерения дальности CCSDS 414.1-B-1.
4. Псевдошумовые системы измерения дальности CCSDS 414.0-G-0.
5. Форматы кода времени CCSDS 301.0-B-4.

Из этих разделов могут быть наиболее развиты разделы, касающиеся протоколов космической радиолинии, и разделы, посвященные дальномерным измерениям. Протоколы космических радиолиний должны учитывать реальную скорость передачи команд и телеметрии, что обеспечит равномерную загрузку приемопередающей

аппаратуры и создаст предпосылки повышения эффективности измерения текущих навигационных параметров. Процедуры дальномерных измерений могут быть оптимизированы по типам сигналов и методам их обработки. Конечной целью этих задач должно явиться обеспечение высокой точности измерения дальности и скорости космического аппарата в реальном времени.

Разделы 1 и 5 Библиотеки стандартов CCSDS в меньшей степени могут быть подвергнуты модернизации, поскольку затрагивают общемировые интересы, однако такой возможностью не стоит пренебрегать.

Разработка, производство и эксплуатация КА, находящегося на значительном удалении от наземного комплекса управления (НКУ) и работающего в агрессивной среде глубокого вакуума, формируют особые требования по сравнению с аппаратурой земного базирования, доступной для контроля работоспособности и ремонта. В настоящее время освоен достаточно большой срок активного существования, вплоть до 15 лет и выше, что достигается не только использованием конструкционных материалов особой прочности или высоконадежных изделий микроэлектроники, но и резервированием узлов и подсистем. Кроме того, важную роль играет управление работой систем и узлов КА, обеспечивающее изменение режимов работы, если это вызвано необходимостью восстановления хотя бы части функций. Для выполнения этих требований значения параметров и режимов КА непрерывно передаются в НКУ, где они контролируются операционным персоналом. В случае необходимости принимаются адекватные меры путем отправки соответствующих команд на КА. Эти функции выполняют командно-измерительные системы (КИС) КА, в англоязычной литературе известные как TT&C – tracking, telemetry and command subsystem.

КИС КА обеспечивает передачу команд на КА на основе выделенного радиоканала. Бортовая часть КИС КА обеспечивает передачу в НКУ телеметрических данных с датчиков подсистем и узлов КА, а также полезной нагрузки. Кроме того, на КИС КА возложено измерение текущих навигационных параметров КА, в первую очередь дальности и скорости. Работа бортовой части

КИС поддерживается другим самостоятельным радиоканалом.

Управление режимами работы и функциями КА осуществляется путем передачи из НКУ на КА команд и полетных заданий в соответствии с обобщенной структурной схемой бортовой части КИС (рис. 1), разработанной в соответствии с рекомендациями CCSDS [1].

Функционально КИС состоит из двух сегментов: бортовой аппаратуры (БА) и сегмента НКУ. Команды и исходный дальномерный сигнал поступают на одной и той же несущей частоте по линии Up link на КА. Принятые сигналы дешифрируются, и выделенные команды направляются на исполнение узлами и подсистемами КА. Выделенный дальномерный сигнал по внутренней линии КПИПО – каналу передачи для измерения параметров орбиты – с помощью передатчика излучается по линии Down link в сторону НКУ.

Подсистема телеметрии отвечает за сбор данных из широкого спектра датчиков, извлекающих информацию о давлении в топливных баках, напряжения и потребляемых токов передатчиков, излучаемой мощности передатчика, критических напряжений и токов, температуры в различных подсистемах, состояния переключателей и подвижных механизмов, датчиков системы жизнеобеспечения, датчиков других инженерных подсистем на борту КА. Появление оборудования на микропроцессорной базе привело к повышению производительности обработки информации, в результате повысилась автономность КА и сложность выполняемой им миссии. Позиция КА и ее эволюции отслеживаются также с помощью телеметрии.

Командный канал КА работает следующим образом. На вход приемника ПРМ КА поступает сигнал с приемной антенны ПРМА, сигнал демодулируется и декодируется. В дешифраторе производится оценка достоверности декодированных команд и распределение их по назначению.

По ответному радиоканалу, который принято называть телеметрическим, на НКУ передаются квитанции о приеме и исполнении команд, отчеты о режимах работы, выполняемых функциях и телеметрические сведения о текущих параметрах бортовых узлов и систем. БА КИС поддерживает измере-

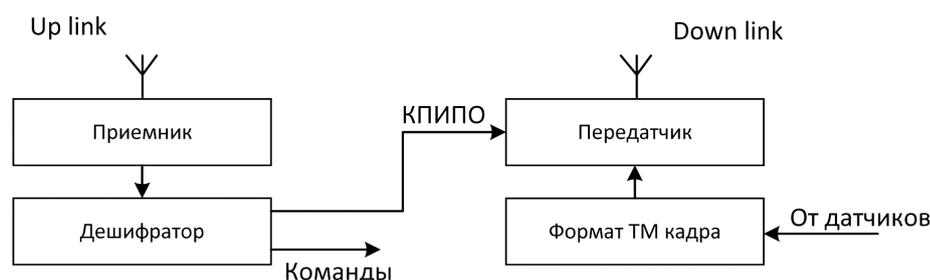


Рис. 1. Обобщенная структурная схема КИС КА

ние параметров орбиты – текущих навигационных параметров КА. Дальность КА измеряется на основе оценки задержки времени прохождения тестового сигнала по трассе НКУ – КА – НКУ за вычетом задержки в бортовой аппаратуре. Скорость движения КА, как и дальность, измеряется в НКУ на основе обработки сигналов, поступающих от КА.

Основная позиция CCSDS относительно системы слежения, телеметрии и передачи команд с НКУ на КА концентрируется не только на обеспечении большей автоматизации в рамках отдельных КА относительно более ранних решений, но и достижении единства информационной основы различных подсистем, что приводит к большей перекрестной поддержке возможностей и услуг.

В соответствии с семиуровневой моделью OSI [2] и рекомендациями CCSDS телеметрическая система КА основывается на таких двух основных концептуальных категориях, как «пакетная телеметрия» и «канальное кодирование телеметрии».

Пакетная телеметрия обеспечивает эффективную передачу данных, полученных от источников, в стандартизированном виде и характеризуется высокой степенью автоматизации за счет использования помехоустойчивого кодирования, а также обнаружения и исправления ошибок, возникших в процессе распространения сигнала. Пакетная телеметрия предоставляет механизм для реализации общих структур данных и протоколы, которые могут способствовать развитию и эксплуатации КИСКА [3]. Канальное кодирование телеметрии обеспечивает обработку исходных данных таким образом, что отдельные сообщения легко отличаются друг от друга. Это позволяет реконструировать данные, передаваемые с КА в НКУ, с низкой вероятностью ошибок, тем самым улучшая производительность канала. Кроме того, канальное кодирование направлено на обеспечение защиты телеметрического канала от возможного несанкционированного вмешательства.

Оценка параметров орбиты КА производится на основе измерения дальности КА и радиальной составляющей его скорости. Для измерения дальности и скорости движения КА относительно НКУ предусмотрен канал передачи поднесущих частот измерения параметров орбиты (КПИПО) между узлами приемника и передатчика.

Известны различные подходы к реализации БА КИС. В частности, в [4] сигнал команды и аудиосигнал, который можно рассматривать в качестве дальномерного, суммируются и передаются на общей поднесущей частоте. В остальных трактах земных станций и КА мало отличаются от обычного супергетеродинного приемника. В другом случае используются широкополосные сигналы для передачи командного и дальномерного сигналов на одной общей несущей частоте. Командный сигнал модулируется первым широко-

полосным кодом, а дальномерный – вторым; длина второго кода кратна длине первого. Модуляция несущей частоты содержит модуляцию одной или более поднесущих множеством дальномерных тонов. Сигналы с модуляцией BPSK/FM занимают достаточно широкую полосу частот, около 800 кГц для ФМ с девиацией ± 400 кГц, что требует для управления созвездием из 11 КА полосу частот до 15 МГц. Широкополосные сигналы снижают остроту проблемы. В [6] используется поочередная передача сигналов, к которым можно отнести как командные, так и дальномерные сигналы.

В основном технические решения по КИС КА относятся не к системным вопросам, а к измерению, в первую очередь, дальности. Наиболее распространены два подхода – использование для этих целей псевдослучайных или тоновых сигналов. Широко известно решение для измерения дистанции состоит в излучении Земной станцией нескольких синусоидальных тонов. Эти тоны демодулируются на борту и используются для ремодуляции несущей сигнала телеметрии на канале вниз одновременно с телеметрической поднесущей. Дальность оценивается по измеренному фазовому сдвигу на высшей частоте, на т.н. «мажорном» тоне с уточнением по «минорным» тонам, которые соотносятся с мажорным тоном в геометрической прогрессии 1/5 по рекомендации ESA. Задача снятия неоднозначности свойственна не только тоновым, но и псевдослучайным сигналам. Неоднозначность состоит в том, что наиболее высокая точность достигается на высоких частотных составляющих. Но при этом возникает множественность показаний. Наиболее проста и эффективна процедура разрешения неоднозначности путем перебора сигнальных составляющих, начиная с наиболее высокочастотной.

Измерение дальности производится на основе измерения времени распространения дальномерного сигнала вида псевдослучайной последовательности по трассе НКУ – КА – НКУ [5]. Вторым вариантом рекомендуется измерение дальности путем оценки задержки фазы тонового сигнала, излучаемого и принимаемого в НКУ.

Широко известно [5], что точность измерения дальности определяется отношением сигнал/шум на выходе коррелятора:

$$q = \frac{E}{N_0}.$$

Здесь N_0 – спектральная плотность мощности источника шума, $N_0 = 2D_{ш}/\Delta F$, где $D_{ш}$ – дисперсия шума, ΔF – ширина полосы частот, занимаемых сигналом ($-\Delta F \dots + \Delta F$); E – энергия сигнала $s(t)$. В случае псевдослучайной последовательности в составе M чипов

$$E = \int_0^{MT} s^2(t) dt.$$

Здесь T – длительность чипа. Отсюда следует, что повышение точности измерения дальности в соответствии с рекомендациями CCSDS обеспечивается при увеличении M , что особенно актуально при работе с КА на высокоэллиптических орбитах. Однако в рекомендациях CCSDS не акцентируется важный вопрос одновременной передачи команд и дальномерной ПСП, кроме использования с этой целью различных поднесущих частот. Но это не отвечает требованию уменьшения ширины полосы занимаемых частот. В [6] предлагается решение этого вопроса путем поочередной передачи команд и дальномерного сигнала на одной несущей частоте. Недостаток такого подхода состоит в ограничении точности измерения дальности сверху, что особенно проявляется на этапе выведения КА в рабочую точку, когда управляющие команды отсылаются наиболее интенсивно. На этапе устойчивого функционирования в рабочей точке наиболее продуктивно использовать командную и дальномерную ПСП одинаковой длительности. Полезно излучать поочередно командную и дальномерную последовательности и измерять дальность не только по дальномерной, но и по командной последовательностям. Наиболее высокая точность достигается при равенстве длин дальномерной и командной последовательностей.

Вторым аспектом, не рассматриваемым CCSDS, является точность измерения радиальной составляющей скорости движения КА, которая определяется исключительно на основе измерения доплеровского смещения частоты. Исследования показывают, что имеются резервы повышения точности доплеровских измерений [7]. Кроме того, в процессе разрешения неоднозначности имеется резерв повышения точности Доплеровских измерений и, соответственно, скорости КА. Имеют место другие несоответствия современному уровню развития науки и техники.

Причина отставания рекомендаций CCSDS от новых результатов интеллектуальной деятельности заключается в большом сроке со времени его принятия в 2010 г. Поэтому назрела необходимость разработки отечественного стандарта – эквивалента CCSDS, который должен учитывать современные достижения системных возможностей развития КИС КА, а также давать большую свободу творчества исследователям с целью повышения точности измерения телеметрических параметров и текущих навигационных параметров.

В настоящий момент в России действует ГОСТ 56096-2014 «Система передачи космиче-

ских данных и информации. Пакетная телеметрия», который обеспечивает гармонизацию отечественных систем управления с рекомендациями CCSDS в части формирования и передачи телеметрической информации.

Данный стандарт устанавливает правила построения и организации измерительных систем на объектах и изделиях ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры только в части организации пакетной передачи данных. Однако в стандарте не предусмотрены разделы, рекомендуемые применение современных методов модуляции/демодуляции, обеспечивающих эффективное использование частотного ресурса, а также рекомендации по повышению точности измерения текущих навигационных параметров.

Этим вызвана целесообразность разработки собственного отечественного стандарта, являющегося подвидом CCSDS. Российский стандарт по космическим системам передачи данных в части командно-измерительных систем КА – аналог CCSDS – должен учитывать современные достижения науки и техники и содержать как минимум следующие разделы:

- «Организация КИС КА с целью передачи командной и командно-полетной информации с НКУ на КА, а также телеметрической информации по обратному каналу КА – НКУ»;
- «Современные методы модуляции/демодуляции, обеспечивающие повышение эффективности передачи информации с уменьшением ширины полосы занимаемых частот и ЭИИМ»;
- «Повышение точности измерения текущих навигационных параметров, а именно дальности и скорости КА относительно НКУ, обеспечивающее высокую точность определения параметров орбиты КА»;
- «Защита командного канала от несанкционированного вмешательства при сохранении энергетических показателей».

Также очевидно, что отечественный стандарт должен быть согласован с текущими и вновь вводимыми положениями CCSDS.

Исследование выполнено при поддержке краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках реализации проекта «Подготовка к внедрению программно-аппаратного комплекса для автоматизации испытаний бортовой аппаратуры командно-измерительной системы в АО "ИСС"».

Список литературы

1. CCSDS. Recommendation for space. Data system standard. A blue book, 2000. A green book, The CCSDS website, www.ccsds.org.
2. International Standards Organization. www.iso.org.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Москва – Санкт-Петербург – Киев, 2003.
4. Pham T. T., DSN Chief System Engineer. 203, Rev. C. Sequential Ranging DSN Telecommunications Link Design Handbook October 31, 2009.
5. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М., 1966.
6. Harleset G., e.a. Ranging system and method for satellites. US Patent 6864838, March, 8, 2005.
7. Панько С. П., Цимбал М. С. Измерение скорости космического аппарата // Исследования наукограда. 2015. № 4. С. 25–29.

История статьи

Поступила в редакцию 15 февраля 2017 г.

Принята к публикации 24 марта 2017 г.

THE USE OF INTERNATIONAL STANDARDS IN THE DESIGN OF NEW TRACKING, TELEMETRY AND COMMAND SUBSYSTEMS FOR SPACECRAFTS

A. V. Mishurov, S. P. Panko

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

The issues of the use of the standard of the Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) are considered. It is shown that CCSDS recommendations lag behind the current level of science and technology, which is caused, first of all, by the long period between the revision of recommendations. This is shown in the example of the range tracking of a spacecraft. In the CCSDS recommendations, the issue of simultaneous command transmission and a range-wise pseudo-random sequence is mainly considered as the purpose of using different frequency subcarriers. However, this contradicts the requirement to reduce the bandwidth of occupied frequencies. It is shown that it is most productive to use command and range-finding pseudo-random sequences of the same duration. It is important to alternately emit the command and rangefinder sequences and measure the range of both sequences. The highest accuracy of measuring range is achieved when the lengths of rangefinder and command sequences are equal. One more aspect not considered by CCSDS is shown, – the accuracy of measuring the radial component of the speed of the spacecraft. Based on the results of the CCSDS standards assessment, it is concluded that it is necessary to develop their subspecies – a domestic standard that takes into account both modern modulation / demodulation methods and aimed at protecting the command channel from unauthorized interference and improving the accuracy of measuring current navigational parameters such as the range and speed of the spacecraft regarding the ground control.

Keywords: spacecraft, ground control, telemetry, range tracking, CCSDS.

References

1. CCSDS. Recommendation for space. Data system standard. A blue book, 2000. A green book, The CCSDS website, www.ccsds.org.
2. International Standards Organization. www.iso.org.
3. Sklyar B. *Cifrovaya svyaz'* [Digital communication]. Moscow – St. Petersburg – Kiev, 2003. (In Russian).
4. Pham T. T., DSN Chief System Engineer. 203, Rev. C. Sequential Ranging. DSN Telecommunications Link Design Handbook. October 31, 2009.
5. Tikhonov V. I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical Radio Engineering]. Moscow, 1966. (In Russian).
6. Harles G., e.a. Ranging system and method for satellites. US Patent 6864838, March, 8, 2005.
7. Panko S. P., Tsimbal M. S. *Izmerenie skorosti kosmicheskogo apparata* [Measurement of the velocity of the spacecraft]. The Research of the Science City, 2015, no. 4, pp. 25–29. (In Russian).

Article history

Received 15 February 2017

Accepted 24 March 2017