

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ**

УДК 621.396

**Анализ возможностей использования рекомендаций CCSDS
с целью улучшения технических характеристик
отечественных космических радиолиний,
предназначенных для передачи телеметрической
информации с объектов различного назначения**

В. Л. Воронцов

к. т. н.

*Филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация»–
«Научно-исследовательский институт космического приборостроения»*

e-mail: a762642@yandex.ru

Аннотация. Представлен анализ возможностей использования рекомендаций CCSDS при построении отечественных космических радиолиний, предназначенных для передачи телеметрической информации, в условиях отсутствия необходимых отечественных стандартов телеметрии. Показаны преимущества и проблемные вопросы, связанные с использованием рекомендаций CCSDS в отечественной практике. Наиболее важные особенности имеющих силу рекомендаций CCSDS связаны с комплексированием методов действий над данными (сигналами) и данных (сигналов) с целью осуществления определенных функций, обеспечивающих значительные преимущества и используемых при построении космических радиолиний. Открываются хорошие перспективы получения этих преимуществ при построении отечественных космических радиолиний. Однако при этом нужно учитывать особенности российской практики построения космических радиолиний (имеются существенные отличия) и установленный CCSDS порядок использования рекомендаций CCSDS (в частности использования запатентованных технических решений).

Ключевые слова: космическое агентство, рекомендации CCSDS, космическая радиолиния, телеметрическая информация, методы модуляции, методы помехоустойчивого кодирования

**The Analysis of the Potential for Applying the CCSDS
Recommendations with a View to Improve Technical
Characteristics of the Domestic Space Radio Links Intended
for Transmitting Telemetry from Objects of Different Purposes**

V. L. Vorontsov

candidate of engineering science

*Division of Joint Stock Company “Consolidated Rocket & Space Corporation”–
“Research Institute for Space Instrumentation Engineering”*

e-mail: a762642@yandex.ru

Abstract. Analysis is made available of applying the CCSDS recommendations for the domestic radio links serving to transmit telemetry in the absence of the required domestic telemetry standards. Advantages and problematic issues are highlighted as related to applying the CCSDS recommendations for the domestic practice. The most important features of the CCSDS recommendations in force are related to integrating operations with data (signals) and combining data (signals) with a view to implement certain functions ensuring significant advantages and employed for developing space radio links. However, consideration should be given to specific features of domestic space radio links (notable differences exist) and to the procedure for applying the CCSDS recommendations (particularly, using the patented technical solutions).

Keywords: space agency, CCSDS recommendations, space radio link, telemetry, modulation techniques, noiseless coding techniques

Актуальность рекомендаций CCSDS (технических решений, представленных в документах CCSDS) при решении практических задач отечественной телеметрии, в частности касающихся направления (области) SLS, возрастает (CCSDS — Consultative Committee for Space Data Systems — Консультативный комитет по космическим системам передачи данных, SLS — Space Link Services — Средства космических радиолиний). Такая тенденция обусловлена существенным расширением возможностей космических радиолиний при реализации этих рекомендаций. Причем в условиях неуклонного роста численности рекомендаций CCSDS, их постоянного корректирования и отсутствия необходимых отечественных стандартов телеметрии обостряется проблема обоснованного выбора содержащихся в них рациональных технических решений.

Цель данной работы заключается в определении общих подходов к выбору рациональных технических решений, содержащихся в документах CCSDS, относящихся к космическим радиолиниям, предназначенным для передачи телеметрической информации с телеметрируемых объектов различного назначения.

Обычно в практике CCSDS инициирование новых технических решений космическими агентствами и формулирование соответствующих им положений документов CCSDS вызвано следующими причинами:

- новые задачи космических агентств — членов CCSDS (соответствующие рекомендации размещают обычно в Синих Книгах; в Зеленых Книгах — обзоры, разъяснения положений определенных Синих Книг; в Пурпурных Книгах — лучшие практики);

- «жесткие» требования, актуальность которых ожидается в перспективе (их представляют в Оранжевых Книгах, или в Экспериментальных спецификациях);

- на каком-то этапе развития существующих рекомендаций может возникать необходимость согласования (коррекции) их отдельных положений (например, если выявлены противоречия).

При этом имеют место следующие подходы, касающиеся решения организационно-технических вопросов:

- обеспечение преемственности; например, использование модуляций, обеспечивающих подавление несущей, с энергетической точки зрения выгоднее использования остаточной несущей, но т.к. многие космические агентства используют наземные станции, работающие с остаточной несущей, в которые они вложили существенные денежные средства (см. рек. 2.3.1 [1], «рек.» — сокращенно «рекомендация»), то по рекомендациям CCSDS [1] могут применяться средства ФАПЧ приемного устройства, предназначенные для работы как с остаточной, так и с подавленной несущими;

- комплексирование методов действий над данными (сигналами) и данных (сигналов) с учетом их взаимозависимости и многообразия космических радиолиний, а также с учетом изменяющихся условий применения радиолиний (например, изменения во времени состояний помеховой обстановки, изменения расстояния между источником информации и получателем);

- согласование корректируемых положений документов CCSDS с космическими агентствами — членами CCSDS для обеспечения взаимной поддержки.

Однако зачастую отдельные технические решения или их совокупности и соответствующие им ограничения (требования), обусловленные условиями их применения, подходят для решения других задач (задач, не инициированных для CCSDS), т.е. оказываются в какой-то мере универсальными. Более того, имеет место стремление к универсальности (к диверсификации). Оно проявляется в комплексировании методов действий над данными (сигналами) и данных (сигналов) с целью осуществления определенных функций, используемых при решении задач построения космической радиолинии.

Рассмотрим на примерах утверждение о комплексировании.

В случае подавления несущей должен использоваться один из следующих методов модуляции (см. рек. 2.3.2A [1]):

- (фильтрованная) BPSK,
- (фильтрованная) QPSK,
- фильтрованная OQPSK (см. рек. 2.4.17A и 2.4.17B [1]),
- GMSK (см. рек. 2.4.17A и 2.4.17B [1]),

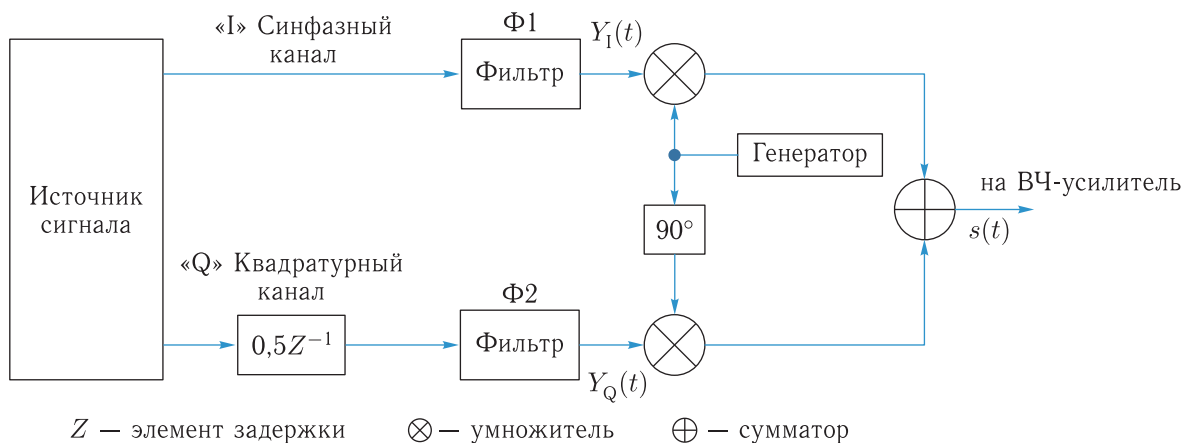


Рис. 1. Блок-схема квадратурно-синфазного модулятора с фильтрацией основной полосы частот

когда система с остаточной несущей превышает ограничения по плотности потока мощности (PPD) на поверхности Земли и при условии, что не превышены следующие значения скорости передачи символов каналов связи «космос–Земля»:

- 2 Мсимв./с в полосах 2 и 8 ГГц;
- 10 Мсимв./с в полосе 26 ГГц;
- 20 Мсимв./с в полосе 32 ГГц.

Если применены перечисленные выше методы модуляции, обеспечивающие подавление несущей, то должна использоваться рандомизация данных, как это определено в рек. 2.3.2А [2].

Заметим, что при скорости передачи символов не более 2 Мсимв./с и полосе частот 2200–2290 МГц к методам модуляции, обеспечивающим подавление несущей, относятся методы BPSK с фильтрацией, QPSK с фильтрацией, OQPSK с фильтрацией и GMSK. При этом предпочтительными являются методы OQPSK с фильтрацией и GMSK. При скорости передачи символов более 2 Мсимв./с и полосе частот 2200–2290 МГц также рекомендованы методы OQPSK с фильтрацией и GMSK.

В свою очередь, методы OQPSK с фильтрацией и GMSK построены по принципу комплексирования [3]. Из примера схемы OQPSK-модулятора (рис. 1) [3] следует, что собственно модуляции несущей частоты предшествуют определенные действия над сигналами. Синфазный и квадратурный сигналы фильтруют с помощью сглаживающих фильтров Φ1

и Φ2, а задержка сигнала в канале Q составляет половину длительности символьного интервала T_S для создания фазового сдвига между каналами I и Q. Причем сигналы каналов I и Q на выходе источника сигнала сформированы в формате NRZ.

С комплексированием методов модуляции и помехоустойчивого кодирования связаны технологии VCM и ACM, представленные в стандарте DVB-S2 [4], направленные на повышение помехоустойчивости.

Суть технологии адаптивного кодирования и модуляции (Adaptive Coding and Modulation — ACM) заключается в возможности оперативного изменения типа модуляции и (или) 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 (и соответственно демодулятора и декодера) осуществляется без потери информации.

В случае переменного кодирования и модуляции (Variable Coding and Modulation — VCM)

оперативное изменение типа модуляции и (или) скорости помехоустойчивого кода осуществляется программно.

С комплексированием также связаны методы помехоустойчивого кодирования и условия их осуществления (рис. 2) [2].



Рис. 2. Внутренняя организация подуровня синхронизации и кодирования каналов стороны источника информации

Кроме иллюстрирования характера вышеупомянутого комплексирования, приведенные примеры (несмотря на их относительную малочисленность) достаточно полно показывают, что обоснование выбора методов действий над данными (сигналами) и свойств данных (сигналов) при построении определенной космической радиолинии связано с априори не очевидным выбором соответствующих рекомендаций CCSDS (при условии, что данная радиолиния должна отвечать требованиям CCSDS).

Имеют место также другие аспекты, касающиеся построения космической радиолинии, связанные

с необходимостью выполнения специфических требований CCSDS.

В частности, существуют требования электромагнитной совместимости (ЭМС) путем ограничения уровня побочных излучений.

Из рекомендации CCSDS (см. рек. 2.4.16 [1]) следует, что полная мощность, содержащаяся в любом отдельном побочном излучении, не должна превышать -60 дБн (дБн измеряется относительно полной мощности уровня немодулированной несущей).

Один из путей выполнения этого требования связан с устранением асимметрии символов цифровых сигналов на входе модулятора. Суть рекомендации CCSDS (см. рек. 2.4.8 [1]) такова: асимметрия символа не должна превышать $0,2\%$ (в рекомендации представлено описание сущностей параметра «Асимметрия символа», т.е. методика оценивания асимметрии).

Другой путь связан с устранением неустойчивости фазы и амплитуды. В рекомендации CCSDS (см. рек. 2.4.12A [1]; модуляторы BPSK/(O)QPSK/GMSK подавленная несущая, каналы «космос-Земля», категория А) исходят, в частности, из следующего: для квадратурной модуляции, при которой скорость и мощность передачи данных для синфазных (I) каналов и квадратурных (Q) каналов одинаковы, неустойчивость фазы и неустойчивость амплитуды вызывают взаимные помехи каналов либо из-за невозможности поддерживать межканальную ортогональность, либо из-за несовершенного отслеживания несущей, что неблагоприятно сказывается на эффективности системы. Ее суть такова: неустойчивость фазы модулятора не должна превышать 5 градусов и неустойчивость амплитуды не должна превышать $0,5$ дБ между точками созвездия.

Так как в основе рекомендуемых CCSDS методов модуляции (в частности, вышеупомянутых методов BPSK, QPSK, OQPSK, GMSK) — методы фазовой манипуляции, то соответствующие специфические требования связаны с устранением фазовой неопределенности сигналов, причем либо с помощью синхромаркеров, либо с помощью модуляции, нечувствительной к полярности (см. рек. 2.4.11 [1]).

Необходимость выполнения вышеупомянутых (и других) специфических требований, оценивания по установленным CCSDS методикам (типа

методики оценивания асимметрии символа) вносит определенные ограничения, касающиеся выбора рациональных технических решений из рекомендаций CCSDS при построении космической радиолинии.

В то же время отдельные рекомендации CCSDS зачастую содержат описания ограничений, которые существенно расширяют возможности их структурирования, создают благоприятные условия для их дальнейшего рассмотрения (или игнорирования), причем на ранних стадиях анализа. К таким ограничениям относятся следующие:

- высота от Земли, на которой решаются задачи (менее $2,0 \times 10^6$ км относятся к категории А и не менее $2,0 \times 10^6$ км — к категории В);
- направление передачи данных (сигналов) («космос–Земля» и «Земля–космос»);
- сущности семантической составляющей сигналов (данных) радиолинии (только телеметрическая информация (ТМИ), ТМИ и телекоманды; ТМИ и сигналы для измерения дальности (типа описанных в [5,6] или [7]); радиометрия и т. д.);
- отдельные программно-технические средства (ПТС), являющиеся фрагментами радиолинии (бортовые средства КА (ПТС телеметрируемого объекта), наземная станция, транспондер и т. д.);
- и т. д.

Некоторые ограничения (дополнительные по отношению к перечисленным выше) связаны с особенностями развития отечественной телеметрии. Так, обычно типичная для отечественной практики радиолиния предназначена для передачи только ТМИ. При этом (в частности, для ракет-носителей (РН)) ее совмещение с передачей телекоманд или сигналов для измерения дальности (типа описанных в [5] или [6]) не осуществляется. Судя по всему, в обозримой перспективе сохранится автономное управление полетом РН и определение параметров ее движения с помощью навигационной аппаратуры потребителей (НАП). При таком подходе частично отпадает необходимость реализации соответствующих технических решений, описанных в рекомендациях CCSDS [1], и полностью — в [5] и [6].

Следует заметить, что имеющие силу рекомендации CCSDS не обязательны для исполнения. В зарубежной практике руководством к действию являются положения соответствующих стандартов.

Причем их формулируют не только исходя из рекомендаций CCSDS, но и с учетом требований других документов; в частности регламентов радиосвязи ITU, процедур распределения частот SFCG (ITU, International Telecommunications Union — Международный союз электросвязи, SFCG, Space Frequency Coordination Group — Группа координации космических частот). Поэтому, например, положения стандарта Европейского космического агентства ECSS-E-ST-50-05C [8], касающегося радиочастот и модуляции, не является копией рекомендаций CCSDS [1].

Необходимых отечественных стандартов телеметрии не существует (см. предложения по развитию процесса стандартизации отечественной телеметрии, относящейся к ракетно-космической и ракетной технике [9]). В условиях их отсутствия возможно использование рекомендаций CCSDS при разработке ТЗ на построение космической радиолинии. При этом нужно учесть следующие особенности условий распространения опыта CCSDS на отечественную практику:

- взаимная поддержка (в случае совместных проектов с другими космическими агентствами, например, с NASA, с ESA);

- существенные преимущества от использования технических решений, представленных в положениях документов CCSDS (например, существенное улучшение достоверности данных); при этом проявляются следующие осложняющие обстоятельства:

- а) требования рекомендаций CCSDS плохо согласуются с существующей отечественной практикой (см. представленный выше анализ, касающийся сущностей рекомендаций CCSDS);

- б) необходимость получения права на законное осуществление отдельных технических решений, в частности:

- 1) ряд технических решений, представленных в имеющих силу документах CCSDS, запатентован, нужно приобрести лицензию (см., например, разд. 1.7, В3.1 и В3.2 Приложения В [2] о турбокодировании и о кодировании с помощью кодов низкой плотности с контролем на четность, разд. 1.8 и Приложение В [4] о технологии DVB-S2, а также см. разд. 3.4.1.7 [10] с установленным подходом к запатентованным технологиям);

2) необходимо получение права использования PN-кодов; существует соглашение SNIP между тремя агентствами — членами CCSDS (NASA, ESA и JAXA), которые используют PN-коды под названием «семейство кодов SNIP» (Space Network Interoperability Panel); разработан также новый комплект кодов, обозначенный как «комплект PN-кодов CCSDS» [5];

— с целью использования коллективных усилий в своих интересах — как принято в практике CCSDS — инициирование российской стороной технических решений (технологий) для CCSDS-сообщества (пример такого инициирования: CCSDS-сообществу представлена отечественная технология повышения достоверности данных, базирующаяся на более полном использовании возможностей разнесенного приема [11]); в этом случае они должны быть одобрены другими космическими агентствами (кроме Роскосмоса). Проявляются следующие проблемные вопросы:

а) должна быть обоснована необходимость (целесообразность) совместного выполнения задач, соответствующих этим техническим решениям, в противном случае одобрение невозможно (одобрение проекта космическим агентством означает взятие определенных обязательств по его финансированию);

б) чтобы полноценно управлять развитием выбранных технических решений (корректированием соответствующих положений определенных документов CCSDS) нужно согласовать специфические интересы российской стороны с технической политикой CCSDS, что весьма проблематично (для этого нужны совместные проекты, в противном случае — остается лишь подстраиваться);

в) необходимы силы и средства для работы в CCSDS по поддержанию и развитию соответствующих положений документов CCSDS в интересах российской стороны (в интересах отечественных предприятий ракетно-космической отрасли);

г) возможна проблема ноу-хау, связанных с техническими решениями, проблема конфиденциальности данных (например, в военной области) — в этих случаях CCSDS-совместимость может оказаться крайне нежелательной.

Следует также заметить, что технические решения, актуальные для построения отечественных

космических радиолиний, возможны и вне рекомендаций CCSDS (ими могут быть в том числе разработки российских специалистов, описанные в российских же источниках).

Таким образом, в существующих условиях отсутствия необходимых отечественных стандартов телеметрии необходимым условием актуальности рекомендаций CCSDS при построении отечественных космических радиолиний, предназначенных для передачи ТМИ, является улучшение их технических характеристик. При обосновании выбора технических решений CCSDS (соответствующих им рекомендаций CCSDS) нужно также учитывать особенности российской практики построения космических радиолиний и установленный CCSDS порядок использования рекомендаций CCSDS.

Список литературы

1. Radio Frequency and Modulation Systems — Part 1: Earth Stations and Spacecraft, Recommendation for Space Data System Standards CCSDS 401.0-B-23, Issue 23, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, December 2013.
2. TM Synchronization and Channel Coding, Recommended Standard CCSDS 131.0-B-2, Issue 2, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, August 2011.
3. Bandwidth-Efficient Modulations: Summary of Definition, Implementation, and Performance, Informational Report CCSDS 413.0-G-2, Issue 2, Green Book, Consultative Committee for Space Data Systems, October 2009.
4. CCSDS Space Link Protocols over ETSI DVB-S2 Standard, Recommendation for Space Data System Standards CCSDS 131.3-B-1, Issue 1, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, March 2013.
5. Data Transmission and PN Ranging for 2 GHz CDMA Link via Data Relay Satellite, Recommended Standard CCSDS 415.1-B-1, Issue 1, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, September 2011.
6. Pseudo-Noise (PN) Ranging Systems, Recommended Standard CCSDS 414.1-B-1, Issue 1, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, March 2009.

7. Pseudo-Noise (PN) Ranging Systems, Informational Report CCSDS 414.0-G-1, Issue 1, Green Book, Consultative Committee for Space Data Systems, March 2010.
8. European cooperation for space standardization. ECSS-E-ST-50-05C — Space engineering — Radio frequency and modulation, July 2008.
9. *Артемьев В. Ю., Воронцов В. Л.* О стандартизации, эффективности, целях и стимулах, касающихся развития отечественной телеметрии, относящейся к ракетно-космической и ракетной технике // Электронный журнал «Труды МАИ», 2011, № 44. С. 1–15.
10. CCSDS Publications Manual, CCSDS Record, A20.0-Y-3, Issue 3, Yellow Book, Consultative Committee for Space Data Systems, December 2011.
11. Correlated Data Generation, Research and Development for Space Data System Standards CCSDS 551.1-O-1, Issue 1, Orange Book, Consultative Committee for Space Data Systems, July 2015.

Редакция журнала и авторы статьи О. Е. Хромов, В. А. Благодырев «Научно-методические основы системного подхода к построению информационно-измерительного комплекса» (Вып. 1, т. 1, 2014, с. 68–77) приносят свои извинения В. Л. Воронцову за то, что в вышеназванной статье не указана ссылка на рис. 4 и 5 и пояснения к ним с результатами научного исследования, заимствованные из работ:

1. Воронцов В. Л. Возможности алгоритма преобразования первичных сигналов в бортовой информационно-телеметрической системе // Приборы и системы управления, 1998, № 8. С. 68–71.
2. Воронцов В. Л. Методы разнесенного приема телеметрической информации и условия их применения в процессе развития телеметрического комплекса космодрома. 2-е изд., перераб. и доп. Набережные Челны: Изд-во Кам. гос. инж.-экон. акад., 2009. 284 с.