

УДК 621.398

АНАЛИЗ СОВМЕСТИМОСТИ ТРЕБОВАНИЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ СТАНДАРТОВ СОВРЕМЕННОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ ПО ВИДАМ МОДУЛЯЦИИ

А. М. Анненков, инженер ОАО «НПО ИТ»; aannenkov@yahoo.com

Ключевые слова: спектральная маска, спектральная эффективность, помехоустойчивость, частота появления битовых ошибок, частотная манипуляция с непрерывной фазой, международные стандарты.

Для участия отечественных информационно-телеметрических средств в международных космических проектах телеметрические средства должны создаваться с учетом рекомендаций международных стандартов. Обеспечение в ближайшей перспективе совместимости требований российских и зарубежных нормативных документов по организации радиоканала, видам модуляции и структуре кадра становится весьма актуальным при создании перспективных радиотелеметрических систем контроля.

Цель статьи: разработка и обоснование мероприятий и рекомендаций по обеспечению совместимости требований международных стандартов и отечественных нормативных документов современной телеметрии. Это позволит применять разрабатываемые в соответствии с международными стандартами российские устройства и системы в международных проектах.

Введение. Проведенные при выполнении первого этапа НИР «Исследование вопросов совместимости имеющих отечественных и зарубежных стандартов по видам модуляции, структуре кадра, организации радиоканала при создании перспективных радиотелеметрических систем контроля» (НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.) поисковые исследования позволили выработать пути и способы решения вопросов совместимости стандартов по методам модуляции.

Участие российской стороны в международных космических проектах, например, по программе «Союз-Фрегат в Куру» во французской Гвиане, проект ИСЗ SESAT и другие предполагают использование стандартов на зарубежных телеметрические системы. С другой стороны, оснащение некоторых современных систем связи научного назначения телеметрическими средствами должно быть доступно для приема информации зарубежными наземными станциями. Для выхода на широкий международный рынок по реализации совместных проектов необходимо решить вопрос совместимости отечественных и зарубежных стандартов применительно к информационно-телеметрическим средствам.

Для решения проблемы без проведения анализа ситуации в современной телеметрии с российской стороны потребовалась бы кардинальная переработка всей инфраструктуры в части информационного обеспечения. Поэтому необходима разработка научно-методического обеспечения для «безболезненного» перехода к совместимости отечественных и зарубежных стандартов по организации радиоканала, видам модуляции, структуре кадра при создании перспективных радиотелеметрических систем.

Разработка стандарта современной телеметрии обусловлена увеличением роли международной интеграции в области создания телеметрических систем и систем связи. Постоянно возрастающие требования по информативности каналов передачи данных неизбежно накладывают более жесткие требования к использованию диапазонов несущих частот, мощностей излучаемых сигналов, интерференции смежных каналов. Для решения возникающих проблем зарубежные агентства и комитеты, специализирующиеся на создании телеметрических систем и систем связи, разработали ряд рекомендаций и предписаний к маскам внеполосного излучения для мощности сигнала и стандартных методов модуляции. Требования, предъявляемые к этим характеристикам, приведены ниже.

Требование к уровням излучения. Спектральные маски стандартов CCSDS (SFCG 21-2) и IRIG (106-07), изображенные на рис. 1, устанавливают ограничения на допустимые уровни излучения в спектре передаваемого сигнала и являются критерием эффективности методов модуляции. Спектральная маска применяется для оценки эффективности разрабатываемых и разработанных устройств с точки зрения спектральной эффективности и математически является характеристикой, не превышение значений которой свидетельствует об удовлетворении требованиям международных стандартов [2].

В табл. 1 рассмотрены принципы разделения частотных диапазонов, а также рекомендуемые комитетами CCSDS [3] и IRIG [4] для этих диапазонов методы модуляции, удовлетворяющие по уровням излучения требованиям спектральных масок. Все перечисленные в табл. 1 методы модуляции с эффективной полосой пропускания обеспечивают выполнение требований международных стандартов по показателю частоты появления ошибочных битов (BER).

Требование помехоустойчивого кодирования. Однако для каждой из этих модуляций точное значение BER системы зависит от алгоритма обнаружения, используемого в приемнике. Оптимальные по вероятности появления ошибки приемники, необходимые для достижения требуемых теоретических показателей, применяются с согласо-

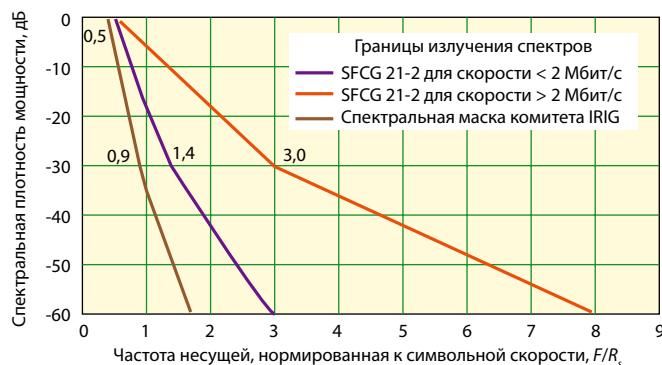


Рис. 1

Таблица 1

Диапазон частот	Применимые рекомендации CCSDS	Рекомендуемые методы модуляции
2200—2290 МГц 8450—8500 МГц	401 (2.4.17 А) В-1	GMSK $BTS = 0,25$ с предварительным кодированием FQPSK-B OQPSK с фильтрацией
2290—2300 МГц 8400—8450 МГц	401 (2.4.17 В) В-1	GMSK $BTS = 0,5$ с предварительным кодированием T-OQPSK
8025—8400 МГц	401 (2.4.18 А) В-1	4 D-8 ФМН-модуляция с треллис-кодированием

Таблица 2

Метод модуляции	Тип приемника	E_b/N_0 для 10^{-3} BER (с кодированием), дБ	E_b/N_0 для 10^{-3} BER (без кодирования), дБ	E_b/N_0 для 10^{-5} BER (без кодирования), дБ
BPSK без фильтрации	Схема интегрирования со сбросом	2,55	6,8	9,6
OQPSK/ФМ с фильтрацией полосы пропускания:	Схема интегрирования со сбросом			
Баттерворта 6 порядка		3,09	7,6	10,5
ККПС ($\alpha = 0,5$)		3,16	7,6	10,6
Бесселя 6 порядка		—	7,6	10,8
OQPSK I/Q с фильтрацией полосы пропускания:	Схема интегрирования со сбросом			
Баттерворта 3 порядка		2,91	7,4	10,5
Баттерворта 6 порядка		3,04	7,4	10,5
Бесселя 6 порядка		—	7,4	10,5
ККПС ($\alpha = 0,5$)		3,06	7,4	10,5
Сглаженный ККПС ($\alpha = 0,5$)	Согласованный фильтр	2,77	7,4	10,5
GMSK $BTS = 0,25$ с предварительным кодированием	Приемник Витерби	7,0	7,0	10,0
GMSK $BTS = 0,5$ с предварительным кодированием	Приемник Витерби	2,58	6,8	9,7
FQPSK-B	Приемник Витерби	2,88	7,4	10,4

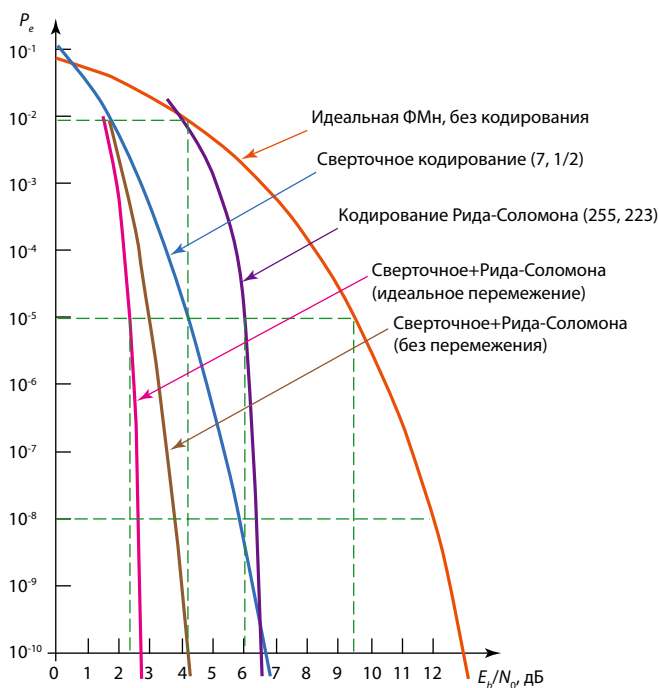


Рис. 2

ваным фильтром и в некоторых случаях с использованием алгоритма обнаружения Витерби (табл. 2).

Для того чтобы соответствовать требованиям показателя частоты появления ошибочного бита, используются коды с коррекцией ошибок, понижающие параметр E_b/N_0

[5]. Табл. 2 содержит данные об эффективности сверточного внутреннего кода, объединенного с внешним кодом Рида-Соломона.

Эффект от применения различных методов помехоустойчивого кодирования можно оценить по рис. 2. Анализируя рисунок, можно сделать вывод, что сложные методы кодирования (в наиболее предпочтительном варианте — это комбинация из двух видов кодирования с добавлением перемежения) позволяют добиваться выигрыша в энергетических характеристиках сигнала, существенно повышая помехоустойчивость: выигрыш составляет 4 дБ по уровню $P_e = 10^{-3}$ и 7 дБ по уровню $P_e = 10^{-5}$. Но, с другой стороны, такие методы требуют существенного усложнения системы и алгоритмов обработки сигналов.

Требование к уровням внеполосного излучения. Выполнение поисковых исследований позволило достичь следующих результатов.

Рассмотрены рекомендации комитета CCSDS по вопросам методов модуляции в космических системах передачи телеметрической информации, в том числе рекомендации № 401.0-B, 413.0-G-1, 131.0-B-1, 231.0-B-1 и 121.0-B-1. Это позволило проанализировать последние достижения и инженерные решения, утвержденные многими зарубежными агентствами в связи с развивающейся международной интеграцией в космической отрасли.

На рис. 3 показана спектральная эффективность рекомендованных международными стандартами методов модуляции MSK, OQPSK, FQPSK, GMSK, а на рис. 4 — уровни их внеполосного излучения [6].

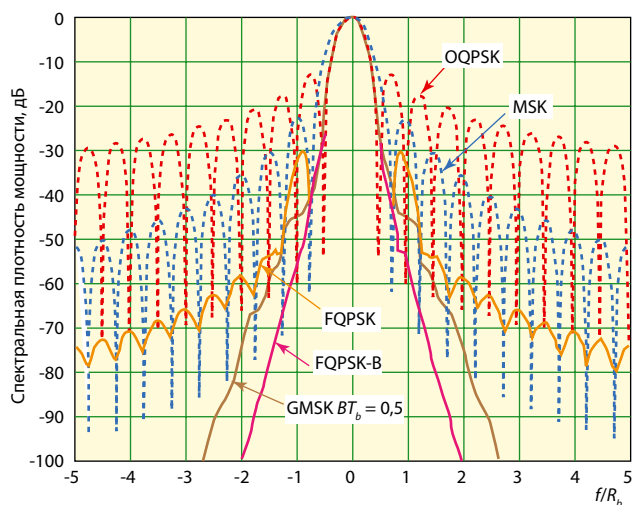


Рис. 3

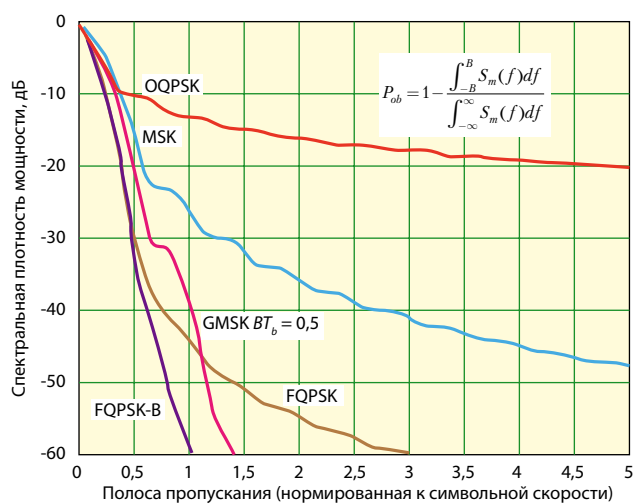


Рис. 4

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что по критерию спектральной эффективности наиболее перспективными являются методы модуляции FQPSK и GMSK ($BT_\zeta = 0,5$). Другие же методы (OQPSK с различными вариантами применяемых фильтров, MSK), также удовлетворяющие условиям спектральной маски SFCG, но уступающие вышеуказанным методам в спектральной эффективности, могут найти свое применение в зависимости от поставленной задачи за счет выигрыша в устойчивости к межсимвольной интерференции.

Для оценки совместности требований международных стандартов и нормативной документации отечественных разработок в области методов модуляции проведен спектральный анализ и выполнено сравнение эффективности использования полосы пропускания. В отечественных телеметрических системах в настоящее время наибольшее распространение получил метод импульсной ЧМ (ЧМ с добавлением амплитудной — (РАМ/ФМ), временной (РТМ/ФМ) и кодовой модуляции (PCM/ФМ)). Соотношения спектров PCM-ФМ, SOQPSK, CPM и QPSK методов модуляции изображены на рис. 5.

Результаты сравнения: современные методы модуляции (рекомендуемые международными стандартами FQPSK, ЧМНФ, GMSK) эффективно используют полосу пропускания и могут быть рекомендованы к применению при проектировании отечественных систем, однако существу-

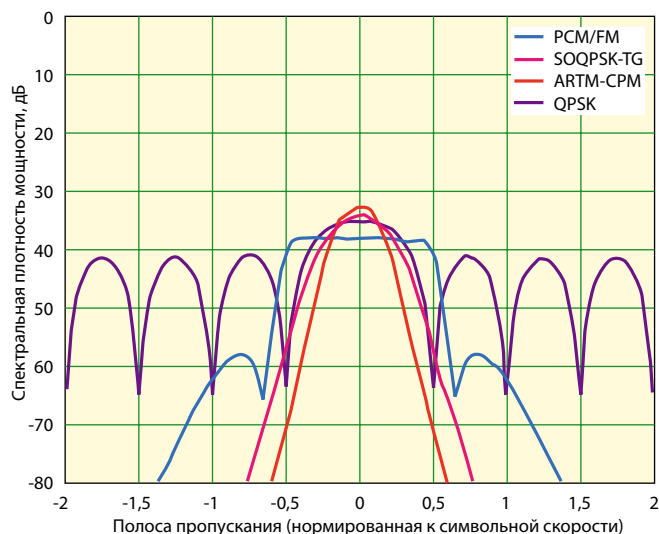


Рис. 5

ющее требование о сохранении совместности действующих и разрабатываемых телеметрических устройств и распространенность ЧМ не позволит осуществить быстрый переход на фазовую манипуляцию (как наиболее эффективную).

С этой точки зрения более перспективен метод ЧМ с непрерывной фазой (ЧМНФ), обладающий рядом полезных свойств (постоянная по уровню огибающая, позволяющая использовать эффективные передающие устройства с усилителями мощности в режиме класса С, компактный спектр на выходе усилителя мощности передающего устройства, обеспечивающий низкий уровень внеполосного излучения, хорошие характеристики помехоустойчивости канала связи). Для достижения такими каналами энергетических характеристик, требуемых международными стандартами, необходимо при проектировании устройств применять современные методы кодирования и сжатия информации, что позволит повысить энергетику радиолинии (сверточные коды, коды Рида-Соломона и турбо-коды, а также механизмы сжатия телеметрической информации по рекомендациям CCSDS).

Вместе с тем, в настоящее время очень широко используются аналоговые радиоканалы с ЧМ. По экономическим соображениям предлагается унифицировать приемное устройство цифровых и аналоговых сигналов, так как разработка приемника только цифровых сигналов дорогое удовольствие (стоимость модулей DSP для цифровой обработки сигналов, разработка алгоритмов и привлечение квалифицированных специалистов разработки цифровых приемных устройств и программирования ПЛИС). В целом, прием цифровых сигналов на частотный детектор приводит к относительно небольшой потере помехоустойчивости. Наличие предмодуляционной фильтрации делает сопоставимой спектральную эффективность ЧМНФ и OQPSK систем. Это позволяет использовать в цифровых радиоканалах ЧМ с приемом на частотный детектор. Причем сегодня эту меру следует считать как компромиссную [7].

Заключение. В качестве перспектив совместности отечественных и зарубежных радиотелеметрических устройств могут быть предложены следующие рекомендации.

- Для создания надежного физического канала передачи считать перспективным видом модуляции, обеспечивающим требуемую энергетику радиолинии при передаче аналогового сигнала и цифровом методе синтеза радиоча-

стоты, — минимальную частотную манипуляцию с непрерывной фазой (ЧМНФ или MSK) во всех диапазонах.

- Характеристики спектра выходного сигнала должны удовлетворять ГОСТ В 24918—81, таблица 3 (класс излучения 11 а), американскому стандарту IRIG standard 106-07 Part 1 и спектральной маске SFCG 21-2 по рекомендациям CCSDS.

- Рекомендации IRIG и CCSDS должны выполняться в части рабочих диапазонов частот (за исключением рекомендаций по сетевым протоколам).

- Применение методов помехоустойчивого кодирования на основе сверточных кодов, кодов Рида-Соломона, турбо-кодов (в зависимости от требований поставленной задачи) следует расширить.

- Существующие естественные ограничения и проблемы адаптации отечественных телеметрических систем к международным стандартам заключаются в невозможности мгновенного перехода на новые (пока еще не приспособленные к отечественным условиям) методы проектирования, одобренные комитетом CCSDS, а также в необходимости экономических и временных затрат на переоборудование телеметрических систем. Рекомендуется постепенное внедрение в существующие устройства методов модуляции и помехоустойчивого кодирования, улучшающих энергетические и спектральные характеристики до требуемых международными стандартами уровней.

- Дальнейшее углубленное моделирование спектрально-эффективных методов модуляции позволит проектировать системы передачи и приема телеметрической информации с добавлением фильтрации и алгоритмов кодирования сигнала, что необходимо для априорной оценки качества проектируемой системы на этапе формулирования технического задания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс. — СПб.: Наука и Техника, 2007. — 672 п.
2. SFCG Recommendation 21-2. Efficient spectrum utilization. SFCG, 2003. — 44 п.
3. CCSDS 413.0-G-1. Green Book. Bandwidth-efficient modulations. Summary of definition, implementation and performance. — April 2003 — 87 п.
4. IRIG Telemetry standards 106-07. — September 2007 — 81 п.
5. CCSDS 131.0-B-1. Blue Book. TM synchronization and channel coding. — September 2003 — 43 п.
6. Digital Modulation in Communications Systems. Agilent Technologies. — 95 п.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е испр.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом Вильямс, 2003—1104 с.

Получено 05.07.10

ПАМЯТИ БОРИСА ИВАНОВИЧА КУЗЬМИНА



22 августа 2010 г. в С.-Петербурге скончался **Борис Иванович Кузьмин**, действительный член международных академий транспорта и связи, профессор кафедры радиоэлектронных систем С.-Петербургского государственного университета гражданской авиации, почетный радист СССР, кавалер орденов Петра Великого и Святого князя Александра Невского.

Б. И. Кузьмин родился 9 апреля 1937 г. в деревне Чашково Лихославского района Калининской (ныне Тверской) области. В 1956 г. окончил с отличии-

ем радиоотделение Ленинградского арктического училища. Был призван на службу в армию, где прошел путь от мичмана Военно-морского флота до подполковника-инженера — старшего преподавателя Ленинградского высшего военного инженерного училища связи им. Ленсовета. Параллельно продолжал учиться заочно в Ленинградском высшем инженерном морском училище им. адмирала С. О. Макарова (которое закончил в 1963 г., получив диплом радиотехника по специальности радиотехника) и в аспирантуре при Горьковском политехническом институте. В 1971 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию, выполненную под руководством заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, д. т. н., профессора Д. В. Агеева.

После ухода из армии в запас с 1985 по 1997 гг. работал старшим научным сотрудником НПО им. Коминтерна (ныне ОАО «Российский институт мощного радиостроения»), где руководил научно-исследовательской группой комплексного системного анализа. Начиная с 1996 г. работал в качестве доцента, профессора кафедры радиоэлектронных систем Академии гражданской авиации (сегодня С.-Петербургский государственный университет гражданской авиации). За время работы в Академии гражданской авиации Б. И. Кузьмин рекомендовал себя как профессионал самого высокого уровня в области средств и систем авиационной цифровой электросвязи.

Борис Иванович — автор 250 научных статей, 12 книг и брошюр (восемь из которых опубликованы в союзных и республиканских издательствах). Ему принадлежат более десятка изобретений, реализованных в изделиях отечественной промышленности.

В 2005 г. Б. И. Кузьмин был награжден профессиональной медалью имени Н. Е. Жуковского и в 2006 г. именной серебряной медалью «За укрепление авторитета российской науки». Биография Б. И. Кузьмина опубликована в сборнике «Приборостроители России» и энциклопедии «Инженеры Санкт-Петербурга».

Активно работая с 1996 г. в составе редколлегии журнала «Электросвязь», Борис Иванович большое внимание уделял изданию тематических номеров и подборок. При этом ему удавалось привлекать к сотрудничеству с журналом как авторитетных ученых и специалистов, так и молодых авторов.

При непосредственном участии Бориса Ивановича вышли подборки, посвященные цифровой радиосвязи в высоких широтах, мобильной связи специального назначения, авиационной электросвязи, цифровой связи силовых ведомств, электросвязи на железных дорогах и др.

Редколлегия и редакция журнала «Электросвязь» выражают соболезнование родным и близким Б. И. Кузьмина. Память об этом прекрасном специалисте, жизнерадостном, доброжелательном человеке навсегда сохранится в наших сердцах.