ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 56527— 2015

СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЕ БОРТОВЫЕ

Методы модуляции с эффективным использованием полосы пропускания

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2015

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Открытым акционерным обществом «Научно-производственное объединение измерительной техники» (ОАО «НПО ИТ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 321 «Ракетно-космическая техника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 июля 2015 г. № 972-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, 2015

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Термины и определения . . . 1
3 Сокращения . . . 2
4 Методы модуляции с эффективным использованием полосы пропускания . . . 2
5 Требования к методам модуляции . . . 3
5.1 Требование к диапазонам несущих частот . . . 3
5.2 Требование к уровням излучений . . . 3
6 Критерии выбора схем модуляции . . . 4
7 Структура кодеров, декодеров, модуляторов бортовых телеметрических систем . . . 4
7.1 GMSK с предварительным кодированием . . . 4
7.2 Методы генерации GMSK . . . 5
7.3 Передатчик с предварительным кодированием . . . 6
7.4 Модуляция OQPSK с фильтрацией основной полосы частот . . . 7
7.5 Методы фильтрации основной полосы частот . . . 9
Приложение А (рекомендуемое) Способы повышения помехоустойчивости с использованием кодирования . . . 15
Библиография . . . 17

Введение

Главная задача настоящего стандарта состоит в обеспечении всех заинтересованных организаций, разрабатывающих и эксплуатирующих радиотелеметрические системы, общими ссылочными данными. Организации несут ответственность за выбор методов модуляции радиочастот излучаемых сигналов, применяемых в конкретной аппаратуре.

Отдельные требования и правила настоящего стандарта могут быть применены в отношении стандартов организаций. Для использования настоящего стандарта при организации бортовых телеметрических систем, в основу которых заложен методы модуляции с эффективным использованием полосы пропускания, рекомендуется указывать в соответствующей ссылке, в какой части настоящий стандарт следует применять в отношении стандартов данной организации. Остальные требования при организации бортовых телеметрических систем, базирующихся на методах модуляции с эффективным использованием полосы пропускания, устанавливают в данной организации самостоятельно с учетом необходимости соблюдения установленного в федеральном законе «О техническом регулировании» принципа обеспечения условий для единообразного применения стандартов.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЕ БОРТОВЫЕ

Методы модуляции с эффективным использованием полосы пропускания

Onboard telemetry systems. Methods of modulation with a pass-band effective utilization

Дата введения — 2016—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на радиоэлектронную аппаратуру бортовых радиотелеметрических систем и устанавливает правила применения методов модуляции высокочастотных сигналов при передаче данных по каналам «борт-земля».

Настоящий стандарт предназначен для установления методов модуляции несущей частоты с эффективным использованием полосы пропускания.

Стандарт рассматривает методы и вопросы построения схем модуляторов, отвечающих за формирование сигналов для управления параметрами высокочастотных сигналов для их дальнейшей передачи по каналам связи на приемную регистрирующую аппаратуру, а также устанавливает ограничительные требования к спектральным маскам излучений.

Настоящий стандарт не распространяется на методы, применяемые для конкретных радиотелеметрических систем, в том числе использующих псевдослучайные последовательности для увеличения помехозащищенности радиолинии.

2 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

2.1 **модуляция:** Процесс управления одним или несколькими параметрами колебания. Управляющим является сигнал, несущий информацию. В аналоговых системах используют амплитудную модуляцию и угловую модуляцию в двух модификациях: фазовая и частотная.

2.2 **полоса пропускания:** Непрерывный диапазон частот, для которого отношение амплитуды выходного сигнала к входному превышает некоторый заранее заданный предел.

2.3 **модуляция с непрерывной фазой**; MSK: Модуляция, при которой информация передается в изменении фазы высокочастотного сигнала.

2.4 **Гауссовская манипуляция с минимальным сдвигом**; GMSK: Модуляция с непрерывной фазой и постоянной огибающей. Данный вид модуляции получен из модуляции с минимальным сдвигом (MSK) добавлением Гауссовского фильтра, уменьшающего внеполосные уровни и спектральную полосу пропускания.

2.5 **квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом**; OQPSK: Модуляция, свободная от межсимвольных интерференций и колебаний, удовлетворяющая требованиям к внеполосному излучению.

2.6 **квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом на основе квадратурно-синфазного модулятора**; OQPSK I/Q: Модуляция, при которой фильтруются NRZ сигналы синфазного и квадратурного каналов. Отфильтрованные сигналы умножаются с синфазными и квадратурными сигналами несущей.

2.7 **квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом на основе фазового модулятора**; OQPSK/PM: Модуляция, при которой сигнал формируется преобразованием синфазных и квадратурных сигналов без возврата к нулю к четырехпозиционному сигналу. Модулируется фаза несущей отфильтрованным сигналом фазы.

Издание официальное

2.8 **фильтр SRRC:** Фильтр OQPSK с фильтрацией основной полосы частот характеристикой функции квадратного корня приподнятого косинуса.

2.9 **сверточное кодирование:** Вид помехозащищенного кодирования, позволяющий исправлять ошибки, возникающие при передаче данных в канале передачи информации с помехами.

2.10 **перемежение:** Метод перестановки символов передаваемой последовательности для изменения расположения ошибок при обработке сигнала на приеме.

2.11 **кодирование Рида-Соломона:** Вид помехозащищенного кодирования, позволяющий исправлять ошибки, возникающие при передаче данных в канале передачи информации с помехами.

3 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

- АЦП — аналого-цифровой преобразователь;
- АЧХ — амплитудно-частотная характеристика;
- БИХ — бесконечная импульсная характеристика;
- ГУН — генератор, управляемый напряжением;
- КИХ — конечная импульсная характеристика;
- УВ — устройство выборки;
- ФЧХ — фазово-частотная характеристика;
- BER — частота появления ошибочных битов;
- BPSK — бинарная фазовая манипуляция со сдвигом;
- BT_s — произведение ширины полосы пропускания предварительного фильтра по уровню минус 3 дБ на длительность символа на входе модулятора;
- CCSDS — консультативный Комитет по космическим информационным системам (КККИС);
- CPFSK — частотная манипуляция с непрерывной фазой;
- E_b/N_0 — отношение энергии бита к мощности белого шума;
- f_c — несущая частота;
- FSK — частотная манипуляция со сдвигом;
- GMSK — манипуляция с минимальным сдвигом фазы несущей частоты с предварительной фильтрацией по Гауссу;
- $h(t)$ — импульсная характеристика;
- MSK — манипуляция с минимальным сдвигом;
- N_g — разрядность данных, поступающих на вход цифрового фильтра;
- NRZ — представление сигнала без возврата к нулю;
- N_t — порядок цифрового фильтра;
- OQPSK — квадратурно-фазовая манипуляция со сдвигом;
- OQPSK I/Q — квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом на основе квадратурно-синфазного модулятора;
- OQPSK/PM — квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом на основе фазового модулятора;
- P_e — мощность сигнала;
- SFCG 21-2 — рекомендация 21-2 группы по координированию вопросов использования радиочастот в космических проектах SFCG;
- SRRC — фильтр с характеристикой эквивалентной функции квадратного корня приподнятого косинуса;
- T_{ChS} — длительность канального символа;
- T_s — длительность закодированного символа на входе модулятора;
- z^{-1} — задержка на один такт последовательности цифровых отсчетов;
- $\varphi(t)$ — мгновенное значение фазы сигнала;
- φ_0 — начальная фаза.

4 Методы модуляции с эффективным использованием полосы пропускания

При проектировании бортовых радиотелеметрических систем для оптимизации занимаемой полосы радиочастот при передаче кодовых данных рекомендуется использовать следующие методы модуляции несущей частоты [1], [2]:

1 Манипуляция с минимальным сдвигом фазы несущей частоты с предварительной фильтрацией по Гауссу (GMSK) и с предварительным кодированием (при BT_s = 0,25 и BT_s = 0,5).

2 Квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом (OQPSK) со следующими вариантами амплитудно-частотных характеристик предварительных фильтров:

- квадратного корня приподнятого косинуса (SRRC) при α = 0,5;
- Баттерворта шестого порядка (при BT_S = 0,5);
- другие типы полосовых фильтров с полосой пропускания немодулированного сигнала при BT_S, не превышающего значения 0,5.

3 Частотная манипуляция с непрерывной фазой (CPFSK).

5 Требования к методам модуляции

Методы модуляции с эффективной полосой пропускания должны соответствовать следующим требованиям:

- требование к диапазонам несущих частот;
- требование к уровням излучения.

5.1 Требование к диапазонам несущих частот

5.1.1 Применяемые методы модуляции с эффективной полосой пропускания должны соответствовать диапазонам частот, указанным в таблице 1.

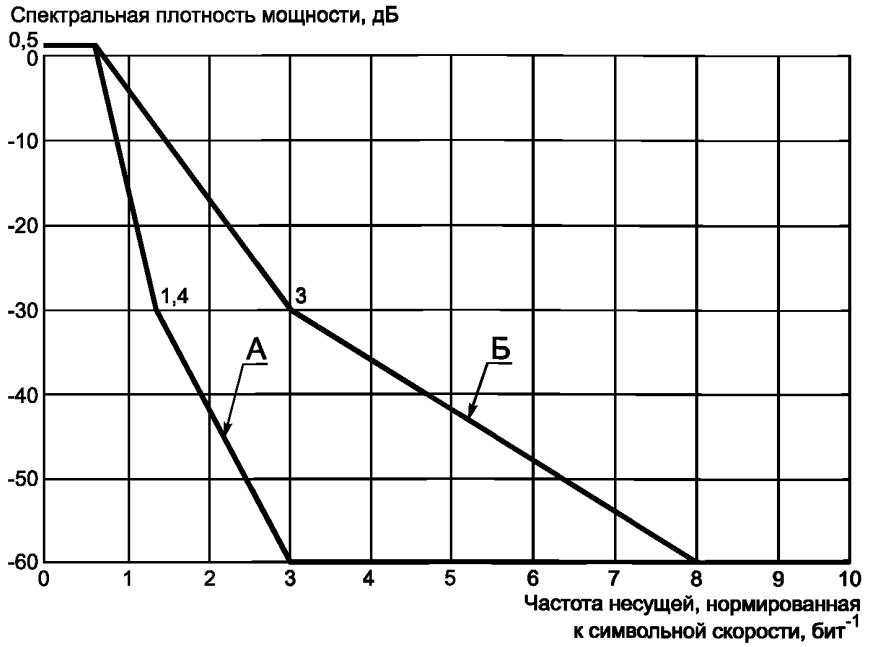
Таблица 1 — Диапазоны несущих частот для методов модуляции с эффективной полосой пропускания

№	Диапазон несущих частот, МГц	Метод модуляции	Примечание
1	175—220 230—250 625—650 950—1050 2200—2290 4000—8000 12000—18000	Манипуляция с минимальным сдвигом фазы несущей частоты с предварительной фильтрацией по Гауссу (GMSK) и с предварительным кодированием (при BT_s = 0,25), CPFSK	Применяют для объектов, удаленных от Земли, не более чем 2 млн км
2		Квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом (OQPSK) с вариантами предварительных фильтров по 7.5	
3	2290—2300	Манипуляция с минимальным сдвигом фазы несущей частоты с предварительной фильтрацией по Гауссу (GMSK) и с предварительным кодированием (при BT_s = 0,5), CPFSK	Применяют для объектов, удаленных от Земли, не менее чем на 2 млн км
4	8400—8450	Манипуляция с минимальным сдвигом фазы несущей частоты с предварительной фильтрацией по Гауссу (GMSK) и с предварительным кодированием (при BT_s = 0,5), CPFSK	Применяют для объектов, удаленных от Земли, не менее чем на 2 млн км
5	8450—8500	Манипуляция с минимальным сдвигом фазы несущей частоты с предварительной фильтрацией по Гауссу (GMSK) и с предварительным кодированием (при BT_s = 0,25), CPFSK	Применяют для объектов, удаленных от Земли, не более чем 2 млн км
6		Квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом (OQPSK) с вариантами предварительных фильтров по 7.5	

5.2 Требование к уровням излучения

5.2.1 Для оценки спектральной эффективности разрабатываемых бортовых систем должны применять спектральные маски. Спектральные маски стандартов CCSDS (SFCG 21-2) устанавливают ограничения на допустимые уровни излучения в спектре передаваемого сигнала [3]. Не допускается превышение значений спектральных составляющих передаваемого сигнала над ограничительными значениями спектральной маски в соответствии с требованиями международных стандартов [1], [2].

На рисунке 1 представлены спектральные маски стандартов CCSDS (SFCG 21-2) для двух диапазонов информативности передачи данных.



Кривая А — спектральная маска для информативности передачи данных более 2 Мбит/с.
Кривая Б — спектральная маска для информативности передачи данных менее 2 Мбит/с.

Рисунок 1 — Спектральные маски SFCG 21-2

6 Критерии выбора схем модуляции

Выбор схем модуляции рекомендуется осуществлять по следующим критериям [2]:
- эффективность полосы пропускания;
- высокая скорость передачи данных;
- достоверность передаваемой информации;
- восприимчивость к интерференции;
- сложность выполнения и стоимость бортовых передатчиков и наземных приемников.

7 Структура кодеров, декодеров, модуляторов бортовых телеметрических систем

Для реализации методов модуляции с эффективным использованием полосы пропускания телеметрические системы должны содержать кодеры, декодеры и модуляторы [2].

7.1 GMSK с предварительным кодированием

7.1.1 Модуляция с минимальным фазовым сдвигом и наличием Гауссовского фильтра на входе модулятора (GMSK) получена из модуляции с минимальным сдвигом (MSK) добавлением Гауссовского фильтра основной полосы частот [2]. Наличие Гауссовского фильтра позволяет уменьшить спектральную полосу пропускания и внеполосные уровни излучения.

На рисунке 2 представлена блок-схема предварительного кодера GMSK.

Z — элемент задержки;

⊗ — умножитель;

K — номер текущего символа в битовом потоке;
d_K — значение К-го бита потока входной последовательности;
a_K — значение К-го бита потока выходной последовательности

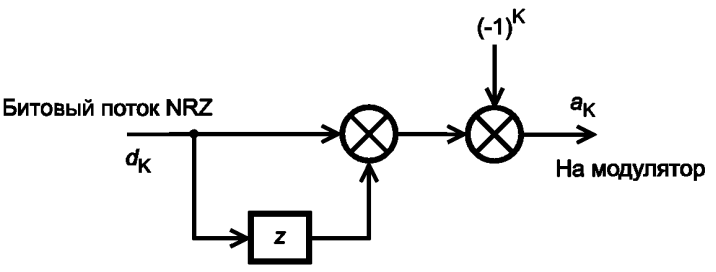


Рисунок 2 — Блок-схема предварительного кодера GMSK

7.1.2 Для моделирования сигнала кодера GMSK используют следующие математические выражения [2]:

Выражение для расчета мгновенного значения несущей частоты с модуляцией по GMSK

$$S_{GMSK}(t) = \sqrt{2P}\cos(2\pi f\tau + \varphi(t) + \varphi_0), \quad (1)$$

где P — мощность несущей частоты, Вт;

f — значение несущей частоты, Гц;

$\varphi(t)$ — мгновенное значение фазы несущей частоты, радиан;

φ_0 — начальное значение фазового сдвига несущей, радиан.

$$\varphi(t) = \sum_k \left(a_k \frac{\pi}{2} \int_{-\infty}^{t-kT_s} g(\tau)d(\tau) \right), \quad (2)$$

$$a_k = (-1)^k d_k d_{k-1}, \quad (3)$$

где k — номер текущего такта входной последовательности;

$\kappa - 1$ — номер предыдущего такта входной последовательности;

d_i — значение i-го бита входной последовательности;

T_s — длительность закодированного символа на выходе модулятора.

7.1.3 Выражение для мгновенного частотного импульса записывают следующим образом:

$$g(\tau) = h_{GF}F(t)*\text{rect}(\tau / T_s), \quad (4)$$

где * — операция свертки сигналов;

$$\left.\begin{array}{l} \text{rect} — \text{функция «окна»: } \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_s}\right) = \frac{1}{T_s}, \text{ для } |\tau| < \frac{T_s}{2}; \\ \text{и} \\ \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_s}\right) = 0, \text{ для } |\tau| > \frac{T_s}{2}; \end{array}\right\} \quad (5)$$

$h(t)$ — импульсная характеристика Гауссовского фильтра:

$$h(t) = \frac{1}{\sigma T_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2 T_s^2}}, \quad (6)$$

где $\sigma = \sqrt{ln2} / (2\pi B T_s)$ (7)

B — односторонняя полоса пропускания Гауссовского фильтра по уровню минус 3 дБ.

7.1.4 Для обеспечения возможности изменения эффективной полосы пропускания для радиочастотных сигналов с модуляцией GMSK изменяют значение BT_S, представляющее собой произведение двух параметров B и T_S.

Уменьшение величины BT_S приводит к уменьшению занимаемой полосы спектра выходного сигнала и энергетического потенциала радиолинии, но и одновременно — к увеличению межсимвольной интерференции.

7.2 Методы генерации GMSK

Методы генерации GMSK различают на следующие типы:

- методы модуляции с частотным сдвигом (FSK);
- методы квадратурной модуляции с фазовым сдвигом (OQPSK) при значениях $BT_S = 0,5$ и $BT_S = 0,25$.

7.2.1 Методы модуляции с частотным сдвигом (FSK)

7.2.1.1 Схема модулятора по методу частотного сдвига FSK должна содержать генератор, управляемый напряжением (ГУН), на вход которого должен поступать сигнал после Гауссовского фильтра. Схема модулятора GMSK с ГУН представлена на рисунке 3.

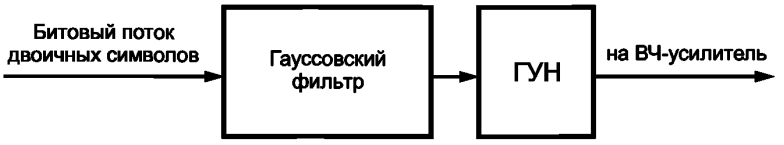


Рисунок 3 — Схема модулятора GMSK с ГУН

Примечание — Для частотной манипуляции с непрерывной фазой (CPFSK) наличие Гауссовского фильтра в схеме, представленной на рисунке 3, не требуется.

7.2.1.2 Выбор диапазона граничных частот ГУН определяен требованиями к полосе частот проектируемого устройства. Частотные свойства Гауссовского фильтра вычисляют по формулам (6) и (7).

7.2.1.3 Допускается замена аналогового Гауссовского фильтра на цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ) не ниже 6-го порядка с импульсной характеристикой $h[n]$, рассчитанной таким образом, чтобы аппроксимация по отношению к импульсной характеристике аналогового фильтра $h\mathrm{GF}[t]$ не превышала 5 %.

7.2.2 Метод квадратурной модуляции с фазовым сдвигом (OQPSK)

7.2.2.1 В схеме квадратурного модулятора GMSK с фазовым сдвигом поток двоичных данных NRZ после прохождения через Гауссовский фильтр с импульсной характеристикой, математически определяемой формулами (6) и (7), должен быть подвергнут интегрированию и разложению на квадратурные составляющие. После чего квадратурные составляющие должны быть перемножены с ортогональными гармоническими сигналами несущей частоты, сформированными от одного генератора. Результаты перемножения должны быть просуммированы в один выходной сигнал, и результирующий сигнал передан на вход высокочастотного усилителя.

7.2.2.2 Блок схема квадратурного модулятора GMSK с фазовым сдвигом представлена на рисунке 4.

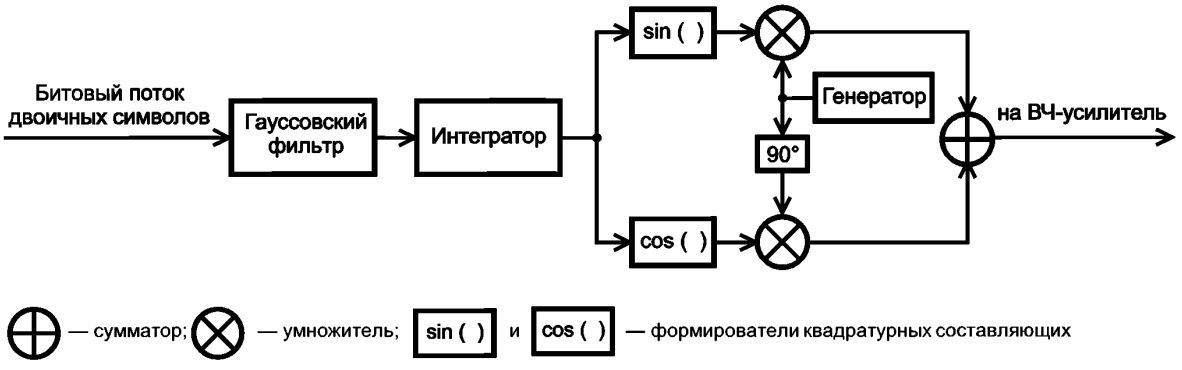


Рисунок 4 — Блок-схема квадратурного модулятора GMSK с фазовым сдвигом

7.3 Передатчик с предварительным кодированием

7.3.1 В цифровом передатчике GMSK с предварительным кодированием входная последовательность в коде NRZ поступает со входа формирователя сигнальных импульсов (ФСИ) на предварительный кодер ПрК, выполненный по схеме, представленной на рисунке 2.

Закодированная таким образом последовательность поступает на УВ, которое формирует необходимое число отсчетов N_B на один символ предварительно закодированной в ПрК входной последовательности данных. С выхода УВ цифровые отсчеты поступают на цифровой фильтр, обладающей КИХ и аппроксимирующей импульсной характеристикой $h[n]$, инвариантной амплитудно-частотной характеристике Гауссовского фильтра. Цифровой КИХ-фильтр должен иметь такие характеристики разрядности обрабатываемых данных N_g и порядок фильтра N_T, чтобы при заданном значении N_B искажения в передаваемом сигнале от цифрового передатчика были незначительны.

Выходные отсчеты $z[n]$ с КИХ-фильтра должны передаваться на цифро-аналоговый преобразователь (АЦП), выходной сигнал с которого должен управлять ГУН.

7.4 Модуляция OQPSK с фильтрацией основной полосы частот

7.4.1 Различают два варианта модуляции OQPSK, выполненных по схеме с фильтрацией основной полосы частот:

- OQPSK с линейным модулятором фазы;
- OQPSK с квадратурно-фазовой модуляцией.

Исполнение 1. OQPSK с линейным модулятором фазы

Блок-схема линейного фазового модулятора OQPSK представлена на рисунке 5.

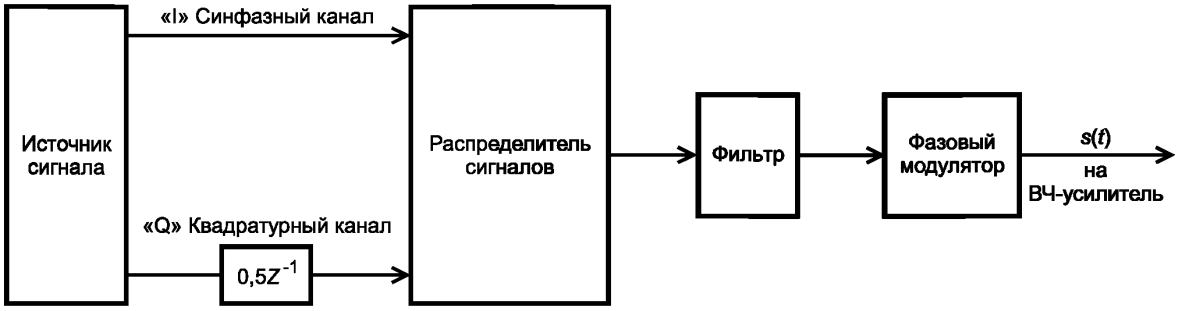


Рисунок 5 — Блок схема линейного фазового модулятора OQPSK

Выходной сигнал схемы формируется преобразованием синфазного и квадратурного каналов в основной полосе частот.

Описание схемы

В OQPSK/PM должны использовать линейный модулятор фазы с целью переноса фильтрованного фазового сигнала на несущую частоту.

На вход модулятора подают две составляющие: синфазная (I) и квадратурная (Q) в коде NRZ. Данные в канале Q должны быть задержаны относительно данных в канале I на половину длительности символьного интервала T_S для создания фазового сдвига между каналами. Выходной сигнал после преобразования фаз должен поступать на сглаживающий фильтр с импульсной характеристикой $h[n]$ и далее на модулятор фазы несущей частоты.

Описание сигнала на выходе модулятора OQPSK с фильтрацией основной полосы частот

$$s_{\text{OQPSKIPM}}(t) = \sqrt{2P}\cos(2\pi ft + \varphi(t)*h\text{GF}(t)), \quad (8)$$

где P — мощность несущей частоты, Вт;

f — значение несущей частоты, Гц;

$\varphi(t)$ — мгновенное значение фазы сигнала после преобразования из квадратурно-синфазного в фазовое представление, радиан;

$h(t)$ — импульсная характеристика сглаживающего Гауссовского фильтра;

$*$ — операция свертки сигналов.

Применение фазового модулятора в OQPSK с фильтрацией основной полосы частот обеспечивает синтез сигнала с постоянной огибающей. Это уменьшает влияние нелинейных амплитудно-амплитудных и амплитудно-фазовых искажений в усилителе мощности передатчика, находящегося в режиме насыщения.

Фазовые диаграммы для модуляции OQPSK с применением фильтров Баттерворта и квадратного корня приподнятого косинуса SRRC при $BT_s = 0,5$ показаны на рисунке 6.

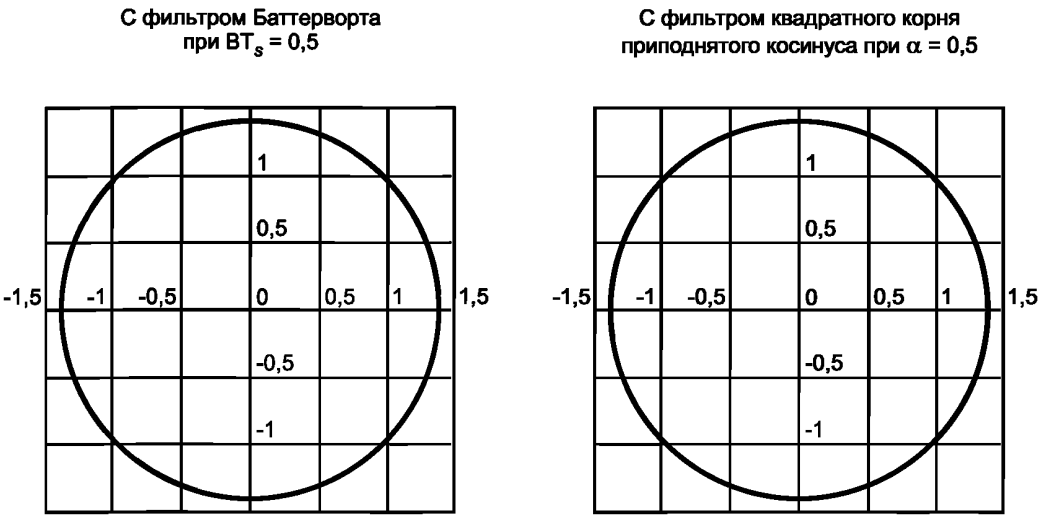


Рисунок 6 — Фазовые диаграммы для модуляции OQPSK с применением разных типов фильтров

Исполнение 2. Квадратурно-синфазный OQPSK модулятор с фильтрацией основной полосы частот

Блок-схема квадратурно-синфазного модулятора с фильтрацией основной полосы частот представлена на рисунке 7.

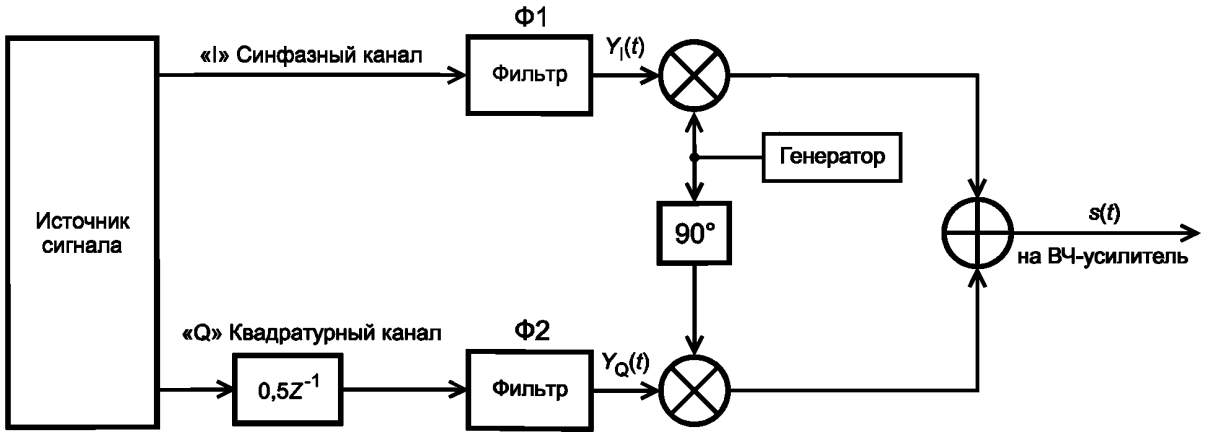


Рисунок 7 — Блок-схема квадратурно-синфазного модулятора с фильтрацией основной полосы частот

Описание схемы

В данной схеме необходимо использовать квадратурно-синфазный модулятор, в котором синфазный и квадратурный сигналы несущей частоты должны быть модулированы с помощью сглаживающих фильтров Ф1 и Ф2 для входных последовательностей в коде NRZ.

Входные сигналы для модулятора по *I*- и *Q*-каналам должны быть представлены в коде NRZ. При этом задержка сигнала в канале *Q* должна составлять половину длительности символьного интервала T_S для создания фазового сдвига между каналами.

Математическая модель выходного сигнала

$$s_{\text{OQPSK I/Q}}(t) = y_I(t)\sin(2\pi ft + \varphi) + y_Q(t)\cos(2\pi ft + \varphi), \quad (9)$$

где $y_I(t)$ и $y_Q(t)$ выходные сигналы сглаживающих фильтров Ф1 и Ф2;

f — частота несущей , Гц;

φ — начальная фаза генератора, радиан.

В данном варианте модуляции используют OQPSK модулятор, и из-за наличия фильтров для входных сигналов *I* и *Q* амплитуда выходного сигнала непостоянна.

Совместное применение данного типа модулятора с усилителем мощности в нелинейном режиме вызывает расширение спектра выходного сигнала и межсимвольную интерференцию.

Фазовые диаграммы для модуляции OQPSK с фильтрацией основной полосы частот с применением квадратурно-синфазных каналов для фильтров Баттерворта и квадратного корня приподнятого косинуса SRRC при BT_S = 0,5 показаны на рисунке 8.

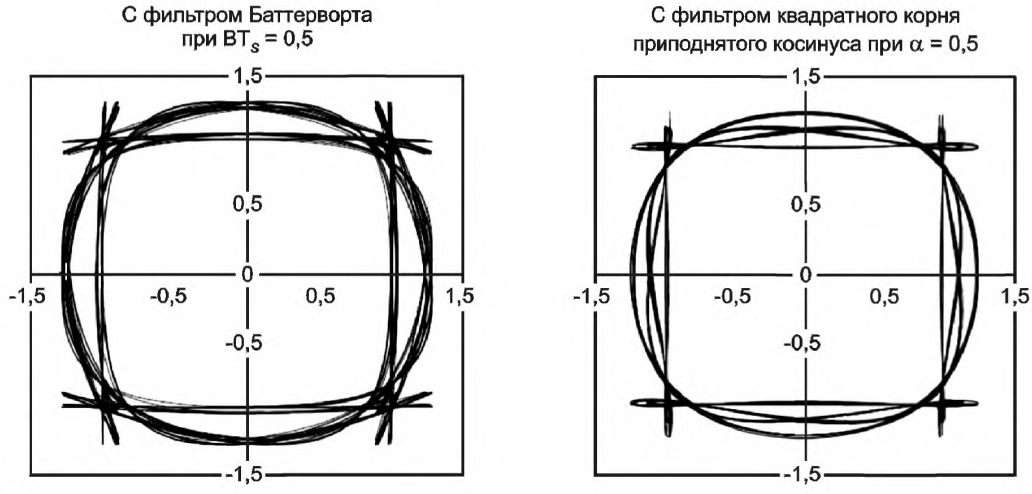


Рисунок 8 — Фазовые диаграммы для методов с использованием квадратурно-синфазного OQPSK модулятора с фильтрацией основной полосы частот для фильтров Баттерворта и квадратного корня приподнятого косинуса SRRC при BT_S = 0,5

7.5 Методы фильтрации основной полосы частот

Характеристики трех нижеприведенных типов фильтров основной полосы частот, которые применимы для работы устройств с модуляцией OQPSK.

К указанным типам фильтров относят:

- фильтры Баттерворта 6-го порядка с BT_S = 0,5,

где B — односторонняя полоса пропускания фильтра по уровню 3 дБ,

T_S — длительность закодированного символа на входе модулятора;

- фильтр квадратного корня приподнятого косинуса SRRC при α = 0,5;
- фильтр Бесселя 6-го порядка при BT_S = 0,5.

Примечание — Фильтры Баттерворта и Бесселя должны быть выполнены как цифровые фильтры не ниже 6-го порядка с БИХ, а фильтр квадратного корня приподнятого косинуса SRRC — как трансверсальный фильтр с КИХ. За качество и технические характеристики фильтров полностью несет ответственность разработчик.

7.5.1 Методы модуляции OQPSK с фильтрацией основной полосы частот на основе фильтра Баттерворта

АЧХ и ФЧХ фильтра Баттерворта 6-го порядка приведены на рисунках 9 и 10.

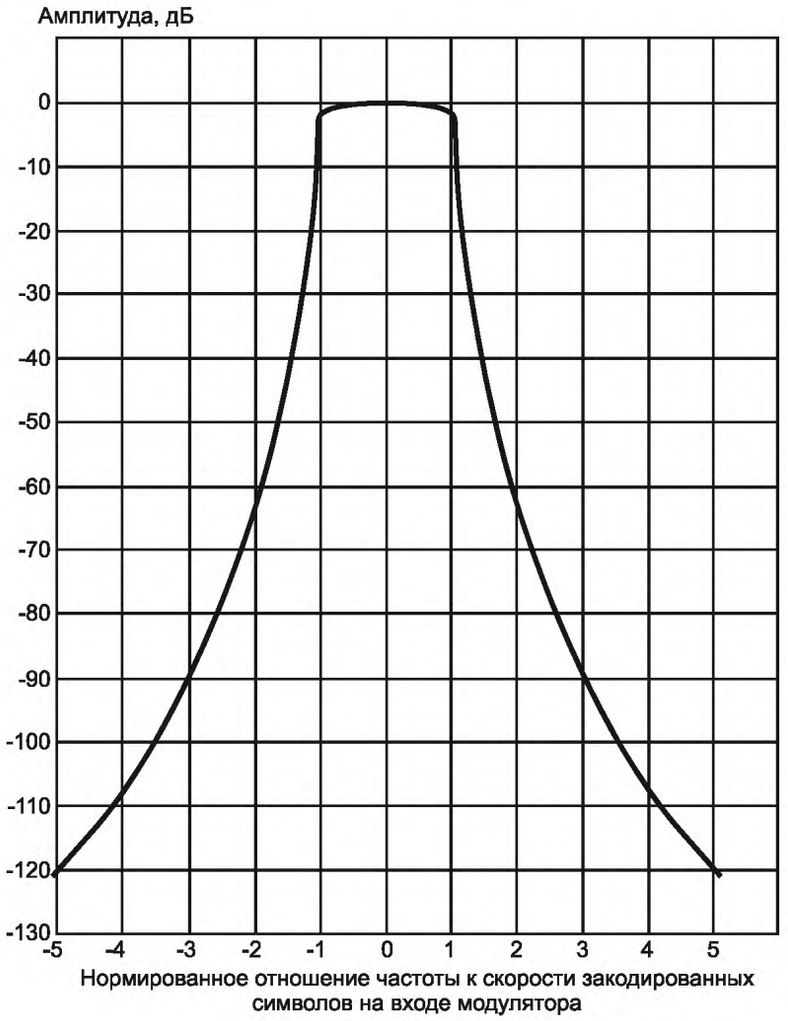


Рисунок 9 — АЧХ фильтра Баттерворта 6-го порядка

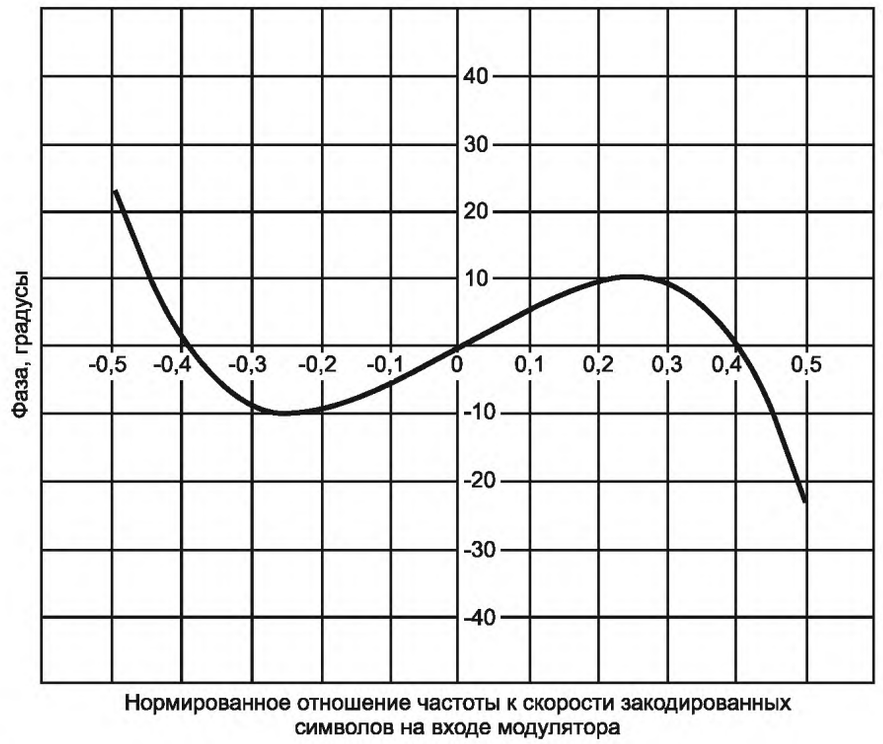


Рисунок 10 — ФЧХ фильтра Баттерворта 6-го порядка

7.5.2 Методы модуляции OQPSK на основе фильтра квадратного корня приподнятого косинуса SRRC

В методах модуляции OQPSK на основе фильтра квадратного корня приподнятого косинуса различают два метода:

- OQPSK с фильтрацией основной полосы частот на основе фильтра SRRC;
- SRRC OQPSK со скруглением по Найквисту.

Метод OQPSK с фильтрацией основной полосы частот использует принцип фильтрации прямоугольных импульсов в коде NRZ фильтром, имеющим АЧХ, математическая модель которой описана следующим выражением:

$$h(t) = \frac{4\alpha}{\pi\sqrt{T_{ChS}}} \frac{\cos\left(\frac{(1+\alpha)\pi t}{T_{ChS}}\right) + \frac{T_{ChS}}{4\alpha t}\sin\left(\frac{(1-\alpha)\pi t}{T_{ChS}}\right)}{1-(4\alpha t / T_{ChS})^2}. \quad (10)$$

На рисунках 11 и 12 представлены АЧХ и ФЧХ для данного типа фильтра.

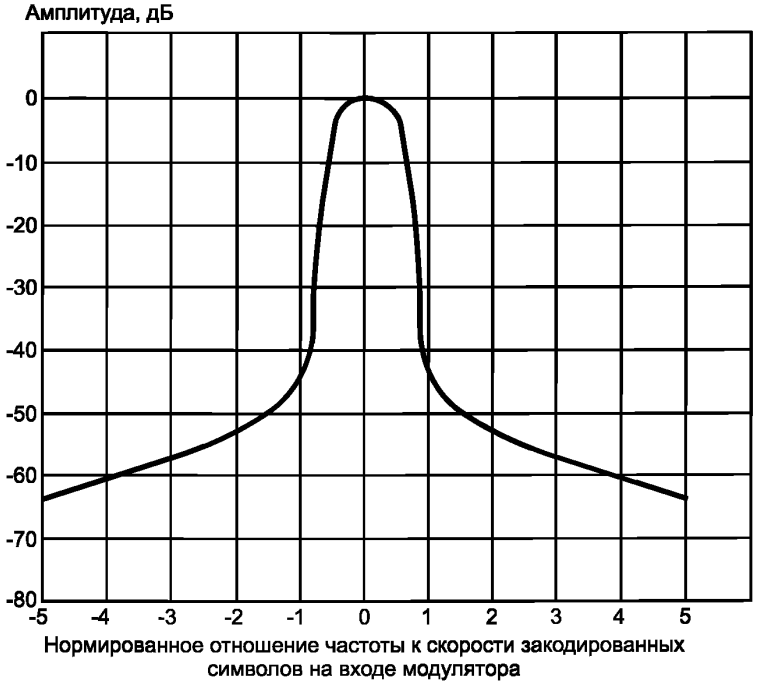


Рисунок 11 — Вид АЧХ фильтра SRRC при α = 0,5

В методе SRRC OQPSK со скруглением по Найквисту используют принцип синтеза формы сигнала, поступающего на модулятор, в виде импульсной характеристики SRRC фильтра.

В сочетании с применением согласованного фильтра в приемнике этот тип модуляции удовлетворяет критерию Найквиста по передаче сигналов с минимальной межсимвольной интерференцией. Это означает, что в линейном канале передачи данных без ошибок синхронизации отсчеты сигнала в моменты времени T_{ChS} на выходе согласованного фильтра имеют минимальную межсимвольную интерференцию.

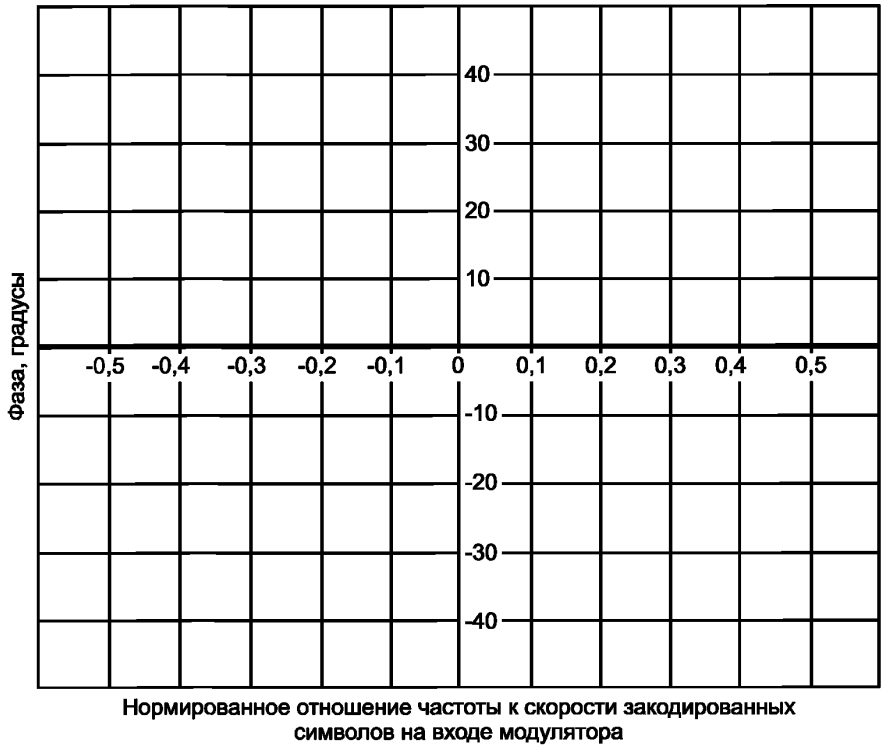


Рисунок 12 — ФЧХ фильтра SRRC при $\alpha = 0,5$

7.5.3 Математическая модель сигнала по методу SRRC OQPSK со скруглением по Найквисту

Математически выходной сигнал рассчитывают следующим выражением:

$$S_{SRRC}(t) = d_I(t)*h_{SRRC}(t)\sin(2\pi ft + \varphi_0) + d_Q(t - 0,5T_{ChS})*h(t)_{SRRC}\cos(2\pi ft + \varphi), \quad (11)$$

где * — операция свертки сигналов,

$h(t)$ — импульсная характеристика SRRC фильтра вида:

$$h(t) = \frac{4\alpha}{\pi\sqrt{T_{ChS}}}\frac{\cos\left(\frac{(1+\alpha)\pi t}{T_{ChS}}\right) + \frac{T_{ChS}}{4\alpha t}\sin\left(\frac{(1-\alpha)\pi t}{T_{ChS}}\right)}{1-(4\alpha t / T_{ChS})^2}, \quad (12)$$

d_I и d_Q — синфазный и квадратурный сигналы, выраженные через импульсную функцию Дирака:

$$\left.\begin{aligned} d_I(t) &= \sum_k I_k\delta(t - kT_{ChS}) \\ d_Q(t) &= \sum_k Q_k\delta(t - kT_{ChS}) \end{aligned}\right\}, \quad (13)$$

где $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака;

I_k и Q_k — символы синфазного и квадратурного каналов;

α — коэффициент затухания.

Блок-схема модулятора OQPSK с фильтром квадратного корня приподнятого косинуса со скруглением по Найквисту представлена на рисунке 13.

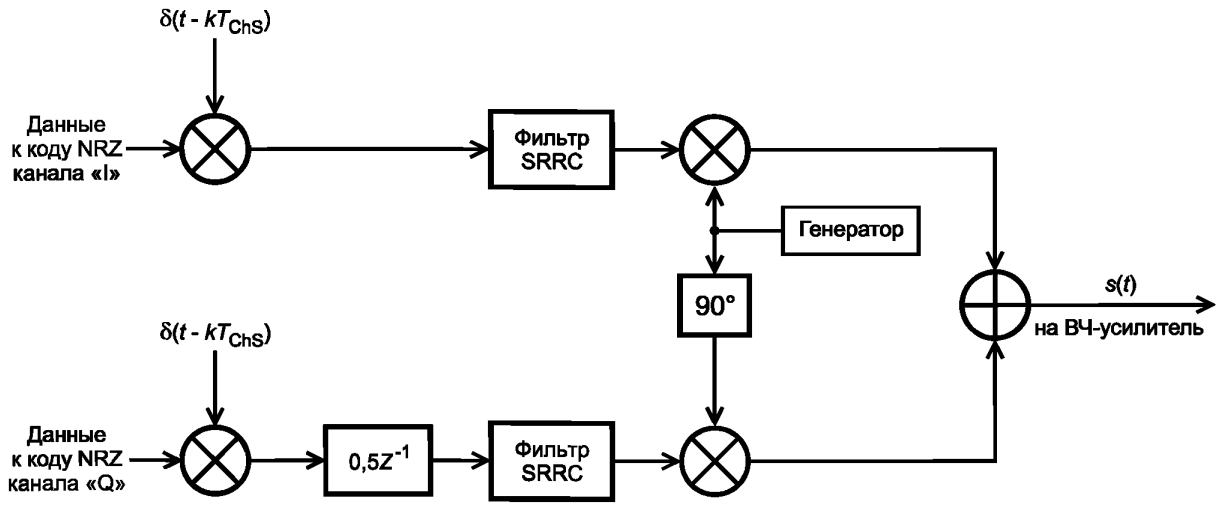


Рисунок 13 — Блок-схема модулятора OQPSK с фильтром квадратного корня приподнятого косинуса со скруглением по Найквисту

7.5.4 OQPSK с фильтрацией основной полосы частот на основе фильтра Бесселя 6-го порядка при BT_s = 0,5

Фильтр Бесселя 6-го порядка может быть использован в качестве альтернативного фильтра по отношению к фильтрам SRRC и Баттерворта.

АЧХ и ФЧХ фильтра Бесселя 6-го порядка при BT_s = 0,5 приведены на рисунках 14 и 15.

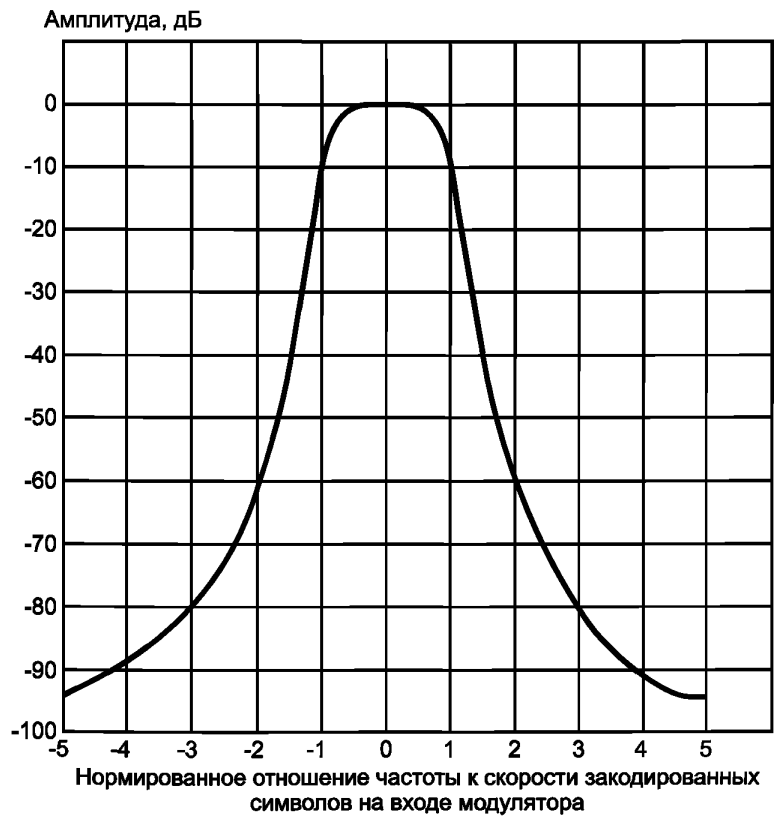


Рисунок 14 — АЧХ фильтра Бесселя 6-го порядка

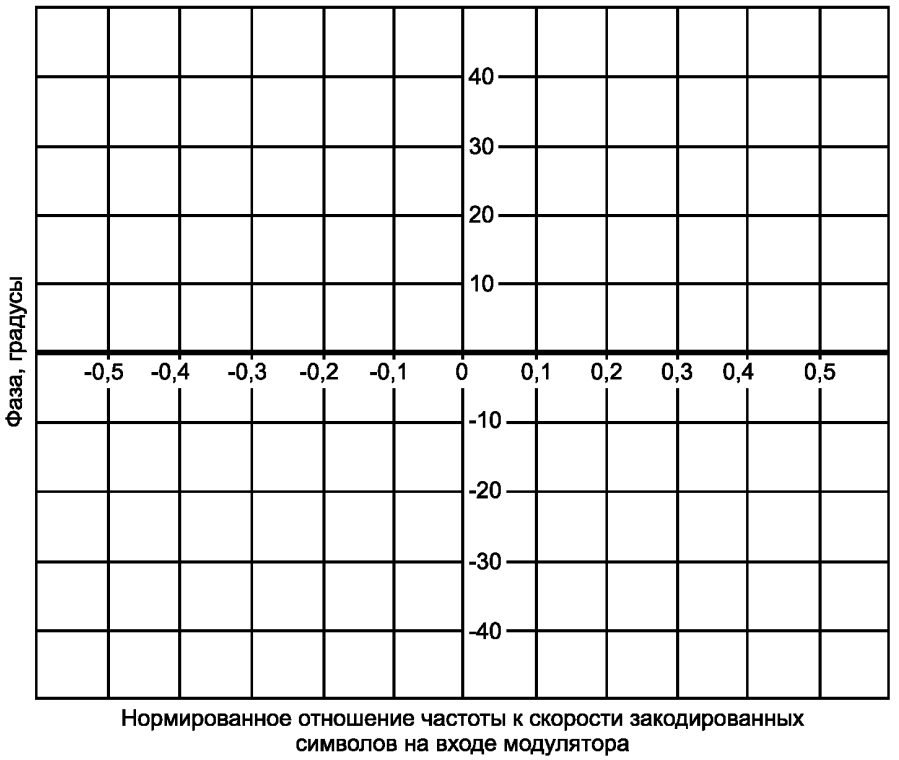


Рисунок 15 — ФЧХ фильтра Бесселя 6-го порядка

Приложение А
(рекомендуемое)

Способы повышения помехоустойчивости с использованием кодирования

Рекомендуемые методы модуляции должны обеспечивать требования международных стандартов по показателю BER. Для каждого вида модуляции, представленного в таблице 1, точное значение показателя BER зависит от алгоритма обнаружения, используемого на приемной стороне [4].

Для улучшения показателя BER рекомендуется использовать следующие типы приемников:

- с согласованным фильтром;
- с квазисогласованным фильтром;
- с квазисогласованным фильтром и эквалайзером;
- со схемой интегрирования со сбросом;
- приемник Витерби.

Для улучшения показателя BER необходимо использовать корректирующие коды.

Рекомендуется применять сложные методы кодирования. Для защиты от шумов телеметрическую информацию необходимо кодировать одним или двумя рекомендуемыми кодами, исправляющими ошибки:

- блочный код Рида-Соломона (255, 223);
- сверточный код (7, $^1/_2$).

Целесообразно использовать комбинацию из двух видов кодирования с добавлением перемежения.

Как правило, это позволит получить преимущество в энергетических характеристиках сигнала, повысить помехоустойчивость. При таких методах кодирования требуется усложнение бортовой телеметрической системы и алгоритмов обработки сигналов.

В таблице А.1 представлены значения параметра E_b/N_0 без использования и при использовании сверточного кода и кода Рида-Соломона.

Таблица А.1 — Значения параметра E_b/N_0 как без использования, так и при использовании сверточного кода и кода Рида-Соломона [1], [2]

Метод модуляции	Тип приемника	E_b/N_0 для 10^{-3} BER (без кодирования), дБ	E_b/N_0 для 10^{-5} BER (без кодирования), дБ	E_b/N_0 для 10^{-6} BER (с кодированием), дБ
OQPSK/PM с применением: - фильтра Баттерворта 6-го порядка (при BT_s = 0,5); - фильтра Бесселя 6-го порядка (при BT_s = 0,5); - фильтра SRRC (при α = 0,5)	Схема интегрирования со сбросом	 7,6 7,6 7,6	 10,5 10,8 10,6	 3,09 — 3,16
OQPSK I/Q с применением: - фильтра Баттерворта 3-го порядка (при BT_s = 0,5); - фильтра Баттерворта 6-го порядка (при BT_s = 0,5); - фильтра Бесселя 6-го порядка (при BT_s = 0,5); - фильтра SRRC (при α = 0,5)	Схема интегрирования со сбросом	 7,4 7,4 7,4	 10,5 10,5 10,5	 2,91 3,04 —
	С согласованным фильтром	7,4	10,5	2,77
GMSK (BT_S = 0,25) с предварительным кодированием	Приемник Витерби	7,0	10,0	—
	Квазисогласованный фильтр с эквалайзером	—	—	2,73
GMSK (BT_S = 0,5) с предварительным кодированием	Приемник Витерби	6,8	9,7	—
	Квазисогласованный фильтр	—	—	2,58
BPSK без фильтрации	Схема интегрирования со сбросом	6,8	9,6	2,55
CPFSK без фильтрации	Приемник Витерби	7,0	9,5	2,35

На рисунке А.1 представлена графическая зависимость вероятности искажения информационного символа от величины отношения сигнал/шум(E_b/N_0 при различных методах помехоустойчивого кодирования.

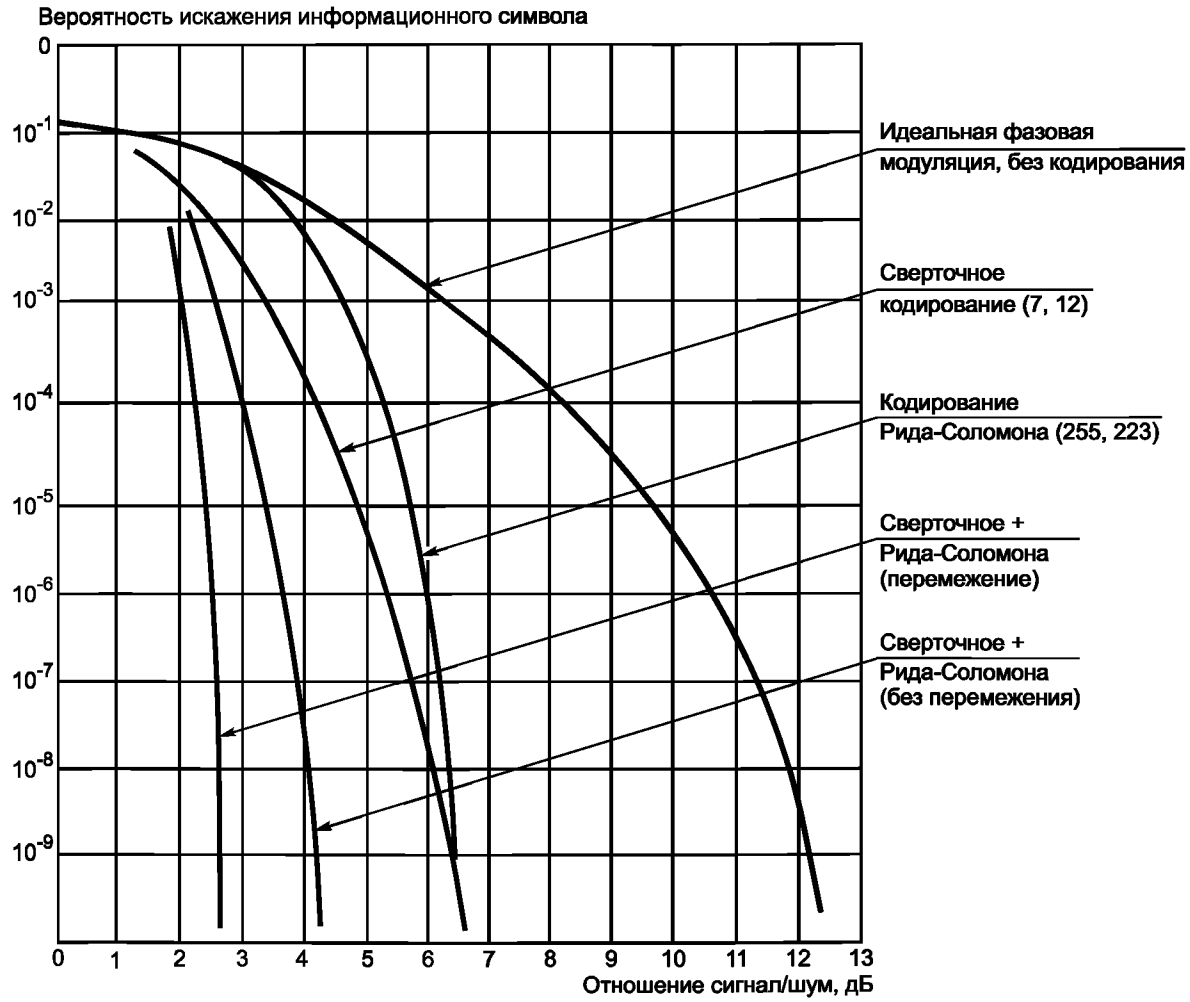


Рисунок А.1 — Графическая зависимость вероятности искажения информационного символа от величины отношения сигнал/шум E_b/N_0 при различных методах помехоустойчивого кодирования

Библиография

[1] Модуляция с эффективной полосой пропускания. Рекомендация CCSDS B20.0-Y-2. Выпуск 2. Желтая книга. Консультативный комитет по космическим системам передачи данных, июнь 2001

[2] Модуляции с эффективной полосой пропускания. Рекомендация CCSDS 413.0-G-2. Выпуск 2. Зеленая книга. Консультативный комитет по космическим системам передачи данных, октябрь 2009

[3] Сборник рекомендаций группы по координированию вопросов использования радиочастот в космических проектах SFCG. Редакция 2008 г.

[4] Радиочастоты и системы модуляции наземных станций и космических аппаратов. Рекомендация CCSDS 401.0-B. Выпуск 23. Синяя книга. Консультативный комитет по космическим системам передачи данных, декабрь 2013

[5] Положение об опубликовании национальных стандартов и общероссийских классификаторов технико-экономической и социальной информации, утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 25 сентября 2003 г. № 594 «Об опубликовании национальных стандартов и общероссийских классификаторов технико-экономической и социальной информации»

УДК 621.78:006.354 ОКС 49.090

Ключевые слова: модуляция, полоса пропускания, модель сигнала, фильтр, эффективная ширина полосы частот, методы модуляции ВЧ, бортовые телеметрические системы

Редактор *В.М. Романов*
Технический редактор *В.Ю. Фотиева*
Корректор *М.С. Кабашова*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 11.11.2015. Подписано в печать 24.12.2015. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,20. Тираж 35 экз. Зак. 4318.

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru