

УДК 621.398

## МОДЕЛЬ РАДИОКАНАЛА С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ И НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ

А. М. Анненков

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение  
измерительной техники», г. Королев

Получена 15 июля 2011 г.

**Аннотация.** Выполнено моделирование радиоканала передачи телеметрической информации. Проведены исследования помехоустойчивости и спектральной эффективности метода частотной модуляции с непрерывной фазой. Исследованы зависимости спектральной эффективности и помехоустойчивости от индекса модуляции и низкочастотной фильтрации.

**Ключевые слова:** радиоканал; помехоустойчивое кодирование; чувствительность; помехоустойчивость; непрерывная фаза; частотная манипуляция; низкочастотная фильтрация; минимальный сдвиг частоты.

**Abstract.** Model of transmit channel of telemetry information was created. Research of spectral efficiency and error rate performance of continuous phase frequency shift keying were made. Dependence of spectral efficiency and error rate performance with respect to modulation index and lowpass filtering were studied.

**Keywords:** radiochannel, noise-immune coding, susceptibility, error rate performance, continuous phase, frequency shift keying, lowpass filtering, minimum shift keying.

### **Введение.**

Растущие в части скорости передачи запросы заказчиков разработки бортовой измерительной аппаратуры, предназначенной для передачи телеметрической информации, а также появившееся требование обеспечения передачи с борта космического аппарата видеоинформации в

аналоговом или цифровом виде (выполнение функций видеотелеметрии) способствовали началу процесса модернизации существующего парка радиопередающих устройств метрового и дециметрового диапазонов длин волн. Для обеспечения выполнения требования преемственности новые радиопередающие устройства должны быть пригодны к работе как в существующих, так и в перспективных радиоканалах. Разработка таких устройств была проведена в ОАО «НПО ИТ» по пути универсализации, а это означает, что такое устройство в рамках физических ограничений способно полностью заменить несколько аналогичных существующих устройств. Необходимые для постановки задачи требования, предъявляемые к современным радиопередающим устройствам, указаны в таблице 1.

Основными задачами, решаемыми при модернизации существующих и при разработке перспективных радиопередающих средств, являются [1]:

- обеспечение совместимости с существующими приемно-регистрирующими системами;
- повышение технологичности устройства (снижение массогабаритных характеристик, снижение сложности производства и настройки, повышение надежности за счет выбора более современной элементной базы);
- обеспечение выполнения требований международных стандартов в части методов модуляции, диапазонов рабочих частот, характеристик помехоустойчивости и спектральной эффективности;
- осуществление работы в цифровых радиоканалах;
- обеспечение возможности дальнейшей модернизации устройства (внедрение помехоустойчивого кодирования, применение современных микросхем и микропроцессоров).

Всем перечисленным требованиям в настоящее время удовлетворяют частотные методы модуляции информационных сигналов, в частности частотная модуляция с непрерывной фазой (ЧМНФ) и ее модификация – частотная манипуляция с  $\frac{1}{2}$  минимальным сдвигом частоты

(ММС). Данные методы модуляции относятся к классу сигналов из общего семейства фазовой манипуляции (ФМн), так как, обладая и признаками ФМн, и признаками ЧМн, они занимают особое промежуточное положение. Основная цель применения ЧМНФ и ММС - сужение полосы при частотной манипуляции, что позволяет демодулировать ММС и ЧМНФ режимы обычными частотными детекторами, но это – вынужденный и неоптимальный способ. Так же ММС и ЧМНФ, во-первых, манипулируют фазой несущего колебания, во-вторых, требуют для полной реализации своих потенциальных возможностей когерентные демодуляторы. К тому же, применение низкочастотной фильтрации для сигналов с ММС позволяет снизить занимаемую полосу за счет появления межсимвольной интерференции.

Таблица 1.

<b>Параметр</b>	<b>Требования</b>
Метод модуляции	Гауссовская ММС, квадратурная фазовая модуляция различными типами фильтров (CCSDS) ЧМНФ, 4-ЧМНФ, сглаженная квадратурная фазовая модуляция (IRIG) 2-ЧМ, 4-ЧМ, 2-ФМ (отечественные нормативные документы)
Уровень внеполосных излучений	Маска SF CG 21-2 для систем с информативностью меньше 2 Мбит/с и больше 2 Мбит/с (CCSDS) Рекомендация 106-07 (IRIG) ГОСТ В 24918-81
Скорость передачи	В существующих системах до 4 Мбит/с, в перспективных системах от 4 Мбит/с до 12 Мбит/с
Элементная база	Отечественная элементная база (для устройств, применяемых на борту ракет и ракет-носителей)
Обеспечение требуемой помехоустойчивости	Рекомендации 413.0-G-1, 131.0-B-1 (CCSDS) по применению помехоустойчивых кодов (сверточный код, код Рида-Соломона)
Тип приемника	Обеспечение функционирования радиоканала при условии приема информации на существующие приемные станции

### **Постановка задачи.**

Разрабатываемые в ОАО «НПО ИТ» радиопередающие устройства, при условии выполнения всех указанных в таблице 1 требований, не имеют аналогов в телеметрической отрасли, а следовательно, необходимо детальное исследование ключевых вопросов, касающихся реализуемости предлагаемых характеристик.

Цель работы: научное обоснование выбора метода модуляции для помехоустойчивой передачи телеметрических сообщений, создание математической модели радиопередающего устройства, а также анализ соответствия характеристик разрабатываемого радиопередающего устройства требованиям международных стандартов ракетной телеметрии (IRIG, CCSDS).

Рассмотрим частотно-модулированные сигналы с непрерывной фазой как с точки зрения сложности построения модулятора, так и относительно характеристик помехоустойчивости и спектральной эффективности. Для исследования были выбраны следующие типы сигналов:

1. ЧМНФ с индексом модуляции 0,7 и информативностью  $R = 1$  Мбит/с;
2. ММС (ЧМНФ с индексом модуляции 0,5) с информативностью  $R = 1$  Мбит/с;
3. ГММС (ММС с ФНЧ Гаусса) с коэффициентом скругления 0,3; 0,5 и информативностью  $R = 1$  Мбит/с.

### **Решение задачи.**

Для решения задачи экспериментального моделирования методов модуляции был использован программный пакет математического моделирования VisSim 7,0 производства фирмы Visual Solutions, что позволило визуально отработать модели поведения всей системы в целом. В том числе появилась возможность оценить вероятность появления ошибок при передаче сообщений через радиоканал, а также спектральную эффективность моделируемого устройства в зависимости от метода модуляции и скорости передачи цифровых сообщений.

Пусть «0» и «1» цифровой информации передаются при помощи ЧМНФ модуляции, тогда логической «1» и логическому «0» будет соответствовать сигнал [2]:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \cos((w_0 + w_\partial) \times t) \\ s_0(t) &= \cos((w_0 - w_\partial) \times t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$w_\partial = \pi \times R \times m \quad (2)$$

где  $w_0$  — несущая частота,  $w_\partial$  — девиация частоты.

В модели использованы следующие блоки:

- источник двоичных сигналов вида «без возврата к нулю» и информативностью  $R = 1$  Мбит/с.
- опциональный фильтр Бесселя 12-го порядка, применяемый для скругления информационных символов, что позволяет уменьшить уровень внеполосного излучения, с частотой среза  $1,5 \cdot R$  (рисунок 1).

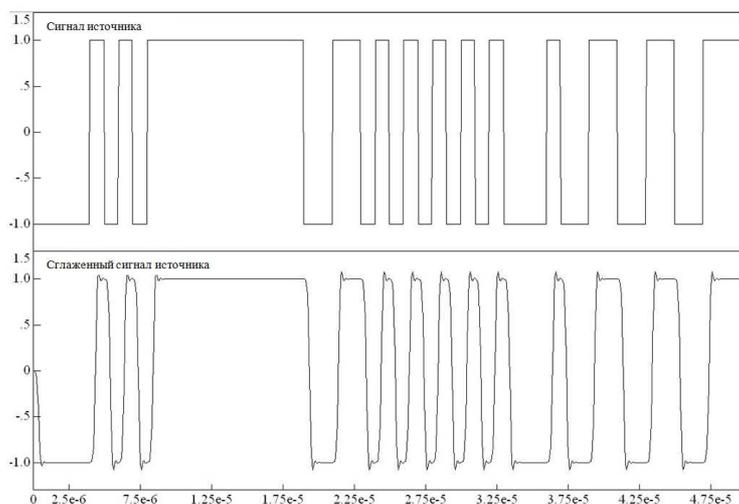


Рис. 1. Информационный сигнал и его скругленная форма.

- частотный модулятор с девиацией  $k \cdot R$ , где  $k = 0,125; 0,35; 0,5; 1$  для индекса модуляции  $m = 0,25; 0,7; 1; 2$  соответственно (рисунок 2).

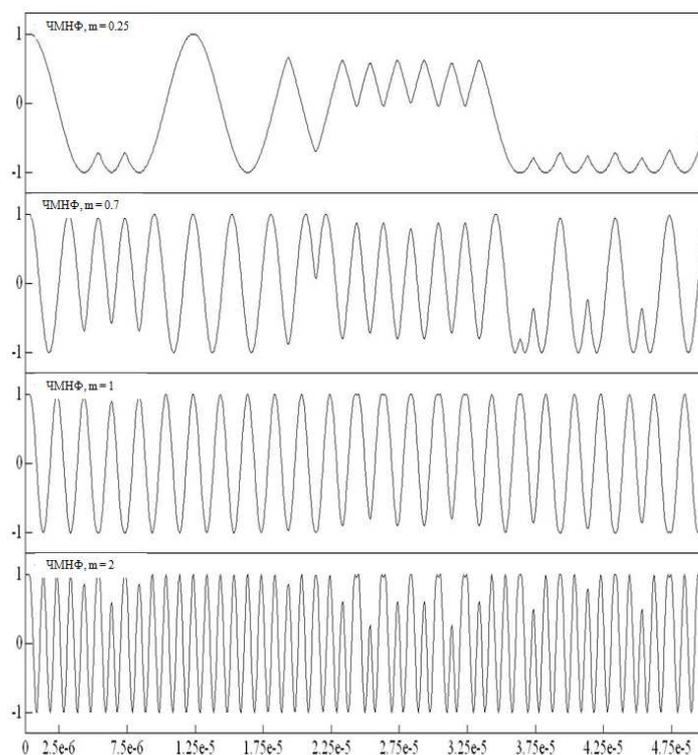


Рис. 2. Форма ЧМНФ-модулированного сигнала с индексом модуляции  $m = 0,25; 0,7; 1$  и  $2$ .

Влияние индекса модуляции на форму спектра ЧМНФ сигнала можно оценить по рисунку 3.

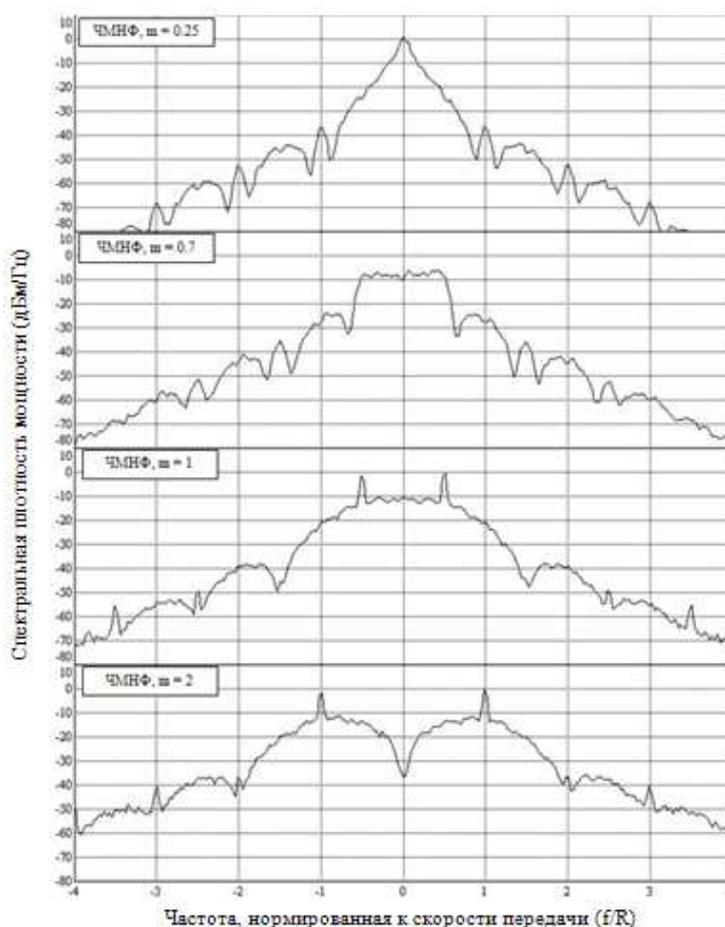


Рис. 3. Спектр ЧМНФ сигнала с индексом модуляции  $m = 0,25; 0,7; 1$  и  $2$ .

**Моделирование работы устройства с частотной манипуляцией и минимальным сдвигом частоты.**

ММС модуляция это частный случай ЧМНФ модуляции при минимально возможном индексе  $m$ , обеспечивающим ортогональность сигналов передающих «0» и «1» цифровой информации. Другими словами, ММС сигнал — сигнал с минимальным разном частот «0» и «1» (т.е. с минимальной девиацией), при котором эти частоты можно различить на интервале времени  $T$ .

Сигналы  $s_1(t)$  и  $s_0(t)$  будут ортогональны на интервале времени  $T$  при условии:

$$\int_0^T s_0(t) \times s_1(t) dt = 0 \tag{3}$$

Рассчитаем минимальный индекс модуляции  $m$ , при котором выполняется условие ортогональности.

$$\int_0^T \cos((w_0 - w_\delta) \times t) \times \cos((w_0 + w_\delta) \times t) dt = 0$$

$$\int_0^T \cos(2 \times w_0 \times t) + \int_0^T \cos(2 \times w_\delta \times t) dt = 0 \quad (4)$$

Поскольку на интервале  $T$  укладывается множество периодов на удвоенной частоте несущего колебания  $2 \cdot w_0$ , то первый интеграл можно считать равным нулю (так как площадь косинуса будет равна нулю). Остается второй интеграл:

$$\int_0^T \cos(2 \times w_\delta \times t) dt = 0$$

$$\frac{1}{2w_\delta} \times \sin(2 \times w_\delta \times T) = 0 \quad (5)$$

Таким образом, можно записать:

$$2 \times w_\delta \times T = k \times \pi$$

или с учетом (2)

$$2 \times \pi \times m = k \times \pi \quad (6)$$

где  $k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

Поскольку индекс модуляции не может быть отрицательный и не может равняться 0, то минимальное  $m$  будет при  $k = 1$ , т.е.  $m = 0,5$ .

Таким образом, при  $m = 0,5$  частотная манипуляция с непрерывной фазой ЧМНФ превращается в минимальную частотную манипуляцию ММС.

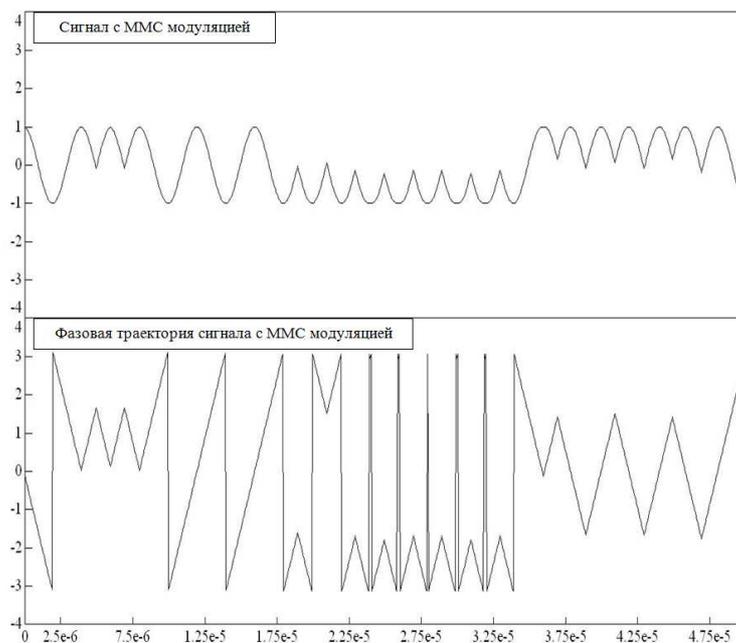


Рис. 4. Форма сигнала с модуляцией ММС и его фазовая траектория.

Изменение формы спектра ЧМНФ сигнала при минимальном сдвиге частоты можно оценить по рисунку 5 в сравнении с ЧМНФ с индексом модуляции  $m = 0,7$  и с использованием фильтра Бесселя для уменьшения внеполосных излучений.

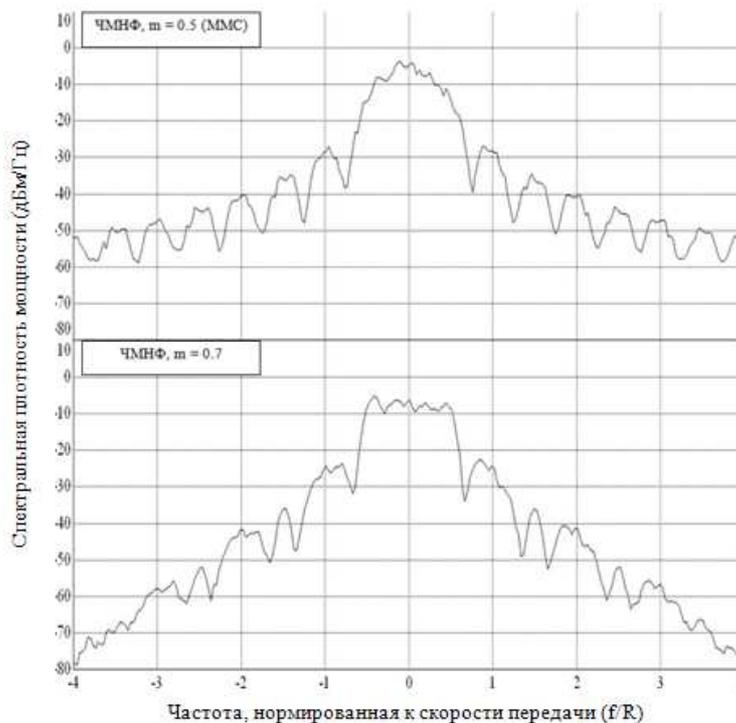


Рис. 5. Спектры сигналов с ММС и ЧМНФ модуляциями.

Дальнейшего улучшения спектральной характеристики сигнала с ММС

можно добиться применением предмодуляционной фильтрации фильтром низких частот Гаусса.

### Моделирование работы устройства с частотной модуляцией с непрерывной фазой и скруглением импульсов посредством применения ФНЧ.

Для моделирования сигналов с гауссовской манипуляцией с минимальным сдвигом была модифицирована модель сигналов с ММС. Модель дополнена следующими элементами:

- предмодуляционный фильтр нижних частот Гаусса, применяемый для скругления информационных символов, а следовательно и уменьшения уровня внеполосных излучений, с частотой среза  $BT_s \cdot R$ , где  $BT_s$  (произведение полосы фильтра по уровню минус 3 дБ на длительность информационного символа) = 1; 0,5 и 0,3 для различных степеней скругления (импульсная характеристика фильтра Гаусса

$$h(t) = R \times \sqrt{\frac{2 \times \pi}{\ln(2)}} e^{-\frac{(R \times t \times \pi)^2}{\ln(2)}} \quad (7)$$

с  $BT_s = 0,3$  и  $0,5$  показана на рисунке 6, степень скругления импульсов информационной последовательности показана на рисунке 7).

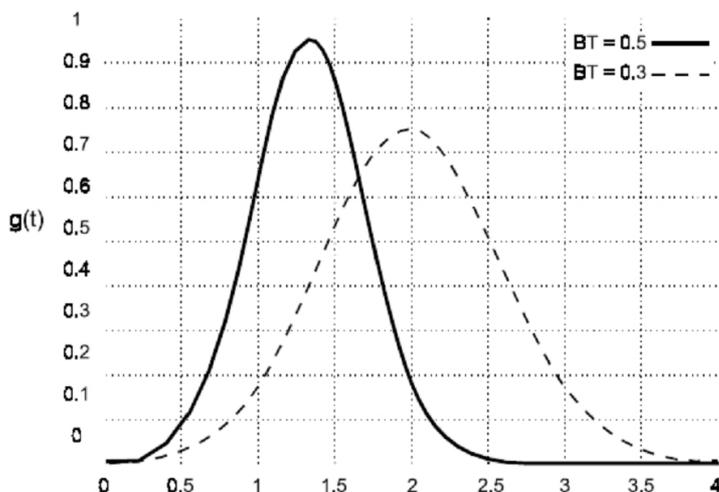


Рис. 6. Импульсная характеристика ФНЧ Гаусса ( $BT_s = 0,3$  и  $0,5$ ).

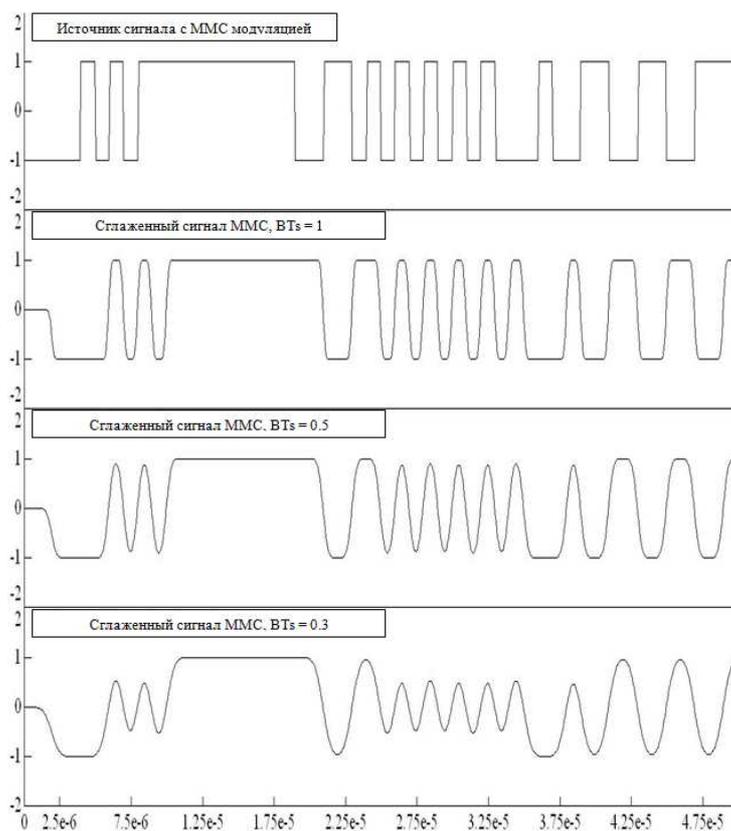


Рис. 7. Информационный сигнал и его сглаженная посредством ФНЧ Гаусса форма с параметром скругления  $BT_s = 1; 0,5$  и  $0,3$ .

- частотный модулятор, соответствующий модулятору, примененному в модели ЧМНФ, с девиацией  $0,25 \cdot R$ , для индекса модуляции  $m = 0,5$ , требуемому для осуществления минимального сдвига частоты.

Изменение формы спектра ММС сигнала при скруглении информационных символов фильтром нижних частот Гаусса можно оценить по рисунку 8.

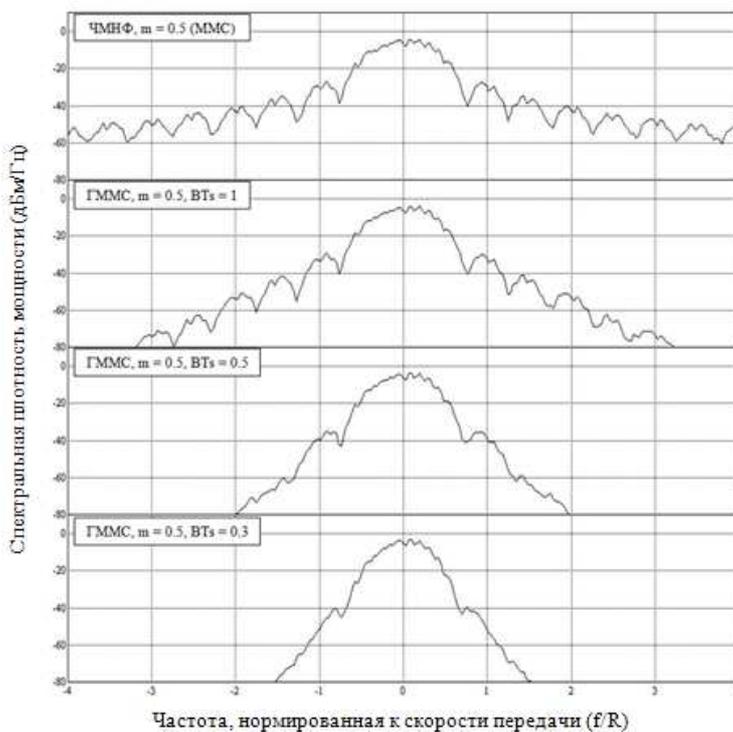


Рис. 8. Форма спектра ММС сигнала и его изменение после применения ФНЧ Гаусса с характеристикой  $BT_s = 1; 0,5; 0,3$ .

Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что теоретические данные и математические модели соответствуют друг другу, а, следовательно, дальнейший анализ в части расчета вероятности появления ошибок и помехоустойчивости, проведенный на основе этих моделей, теоретически обоснован.

Для сравнения помехоустойчивости методов частотной манипуляции с непрерывной фазой (ЧМНФ и ММС) был применен модуль математического анализа «bertool» среды моделирования MatLab 2008 производства фирмы MathWorks. Для сравнения был выбран метод модуляции частоты с непрерывной фазой и изменением индекса модуляции  $m$  от 1 до 0. Методу модуляции с минимальным сдвигом (ММС) соответствует характеристика BER ЧМНФ с индексом модуляции  $m = 0,5$ . Характеристика помехоустойчивости сигналов с ЧМНФ и ММС показана на рисунке 9.

Формулы для расчета помехоустойчивости сигнала ЧМНФ:

$$P_s > K_{\delta \min} \times \frac{1}{2 \times \pi} \times Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0} \times \delta \min^2}\right)$$

$$\begin{aligned} \delta \min^2 &> \min\{2i(1 - \sin c(2im))\} \\ 1 &\leq i \leq M - 1 \\ P_b &\cong \frac{P_s}{k} \end{aligned} \quad (8)$$

Формулы для расчета помехоустойчивости сигнала ММС:

$$P_s = P_b = Q\left(\sqrt{2 \times \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (9)$$

Формулы для расчета помехоустойчивости сигнала ГММС:

$$P_s = P_b \leq \frac{1}{2} \times [1 - Q(\sqrt{b_1}, \sqrt{a_1}) + Q(\sqrt{a_1}, \sqrt{b_1})] + \frac{1}{4} \times [1 - Q(\sqrt{b_4}, \sqrt{a_4}) + Q(\sqrt{a_4}, \sqrt{b_4})] + \frac{1}{2} \times e^{-\frac{E_b}{N_0}}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{E_b}{N_0} \times \left(1 - \sqrt{\frac{3 - \frac{4}{\pi^2}}{4}}\right) \\ b_1 &= \frac{E_b}{N_0} \times \left(1 + \sqrt{\frac{3 - \frac{4}{\pi^2}}{4}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} a_4 &= \frac{E_b}{N_0} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4}{\pi^2}}\right) \\ b_4 &= \frac{E_b}{N_0} \times \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4}{\pi^2}}\right) \\ Q &= \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \end{aligned} \quad (11)$$

Где  $P_s$  – коэффициент ошибочных символов (SER);  $P_b$  – коэффициент ошибочных бит (BER);  $E_b$  – энергия бита;  $N_0$  – мощность шума;  $K_{\delta\min}$  – число состояний с минимальным евклидовым расстоянием;  $m$  – индекс модуляции;  $M$  – число позиций сигнала;  $k$  – число бит в символе ( $k = \log_2 M$ ).

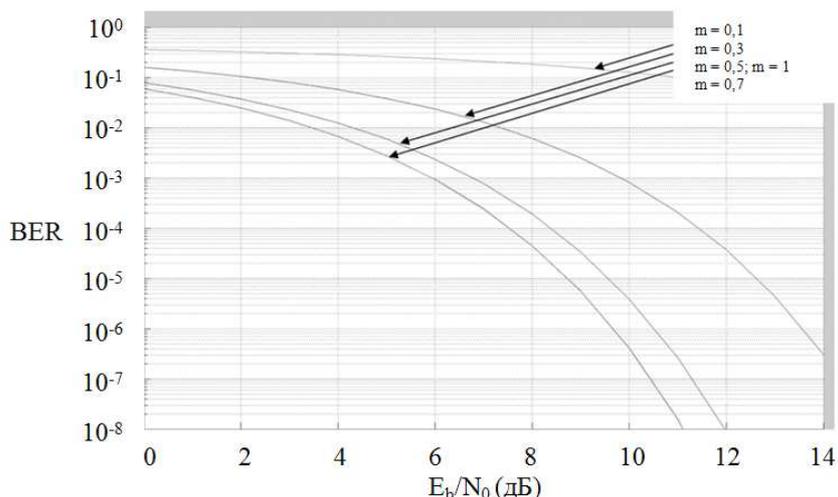


Рис. 9. Помехоустойчивость сигналов ЧМНФ при  $m = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$  и  $1$ .

Помехоустойчивость сигналов с гауссовской манипуляцией с минимальным сдвигом и скруглением  $0,3; 0,5$  и  $1$  показана на рисунке 10.

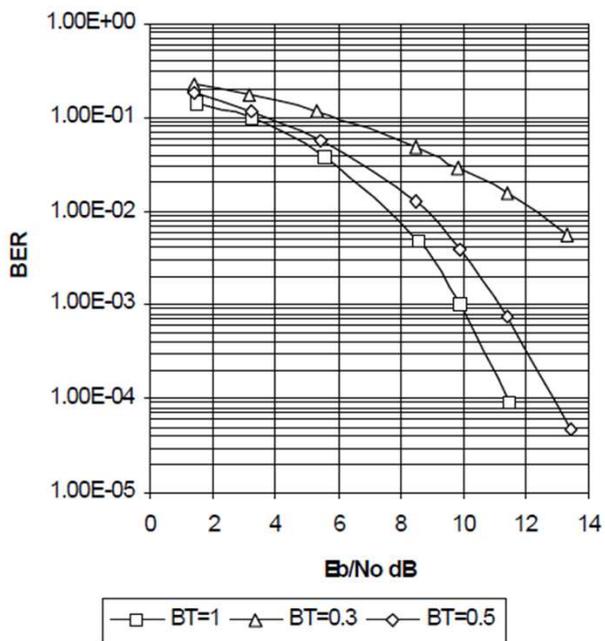


Рис. 10. Помехоустойчивость сигналов с ГММС при коэффициенте скругления  $0,3; 0,5$  и  $1$ .

**Анализ полученных результатов.**

Анализируя сигнал с частотной модуляцией без разрывов фазы (ЧМНФ), можно сделать вывод о том, что наибольшей эффективности можно добиться, выбирая индекс модуляции, равный  $0,7$ , так как при индексе модуляции  $m = 0,5$  формируется сигнал с ММС.

В результате проведенных исследований получено, что  $m = 0,5$  - это минимальный индекс ЧМНФ, при котором возможно выделение цифровой информации. При меньших  $m$  ( $< 0,5$ ) также возможно выделить информацию, но будут иметь место ошибки, связанные с неортогональностью сигналов «0» и «1» (это так называемая межсимвольная интерференция, когда ноль может быть принят за единицу и наоборот).

Сигнал с ММС, обладая свойствами минимального сдвига частоты, имеет более широкий спектр, чем сигнал с ЧМНФ и скруглением импульсов применением ФНЧ Бесселя. Для повышения спектральной эффективности сигнала с ММС применяют сглаживающий предмодуляционный фильтр нижних частот Гаусса, основной характеристикой которого является коэффициент ВТs. Наибольшее распространение получили модуляторы ГММС с коэффициентом ВТs = 0,3 и 0,5 (модуляторы ГММС с данными значениями ВТs также являются рекомендуемыми международным комитетом по космическим информационным системам CCSDS).

График для сравнения спектральной эффективности методов модуляции ЧМНФ, ММС, ГММС с ВТs 0,5 и 0,3 изображен на рисунке 11, также отмечены ограничительные маски стандартов CCSDS и IRIG.

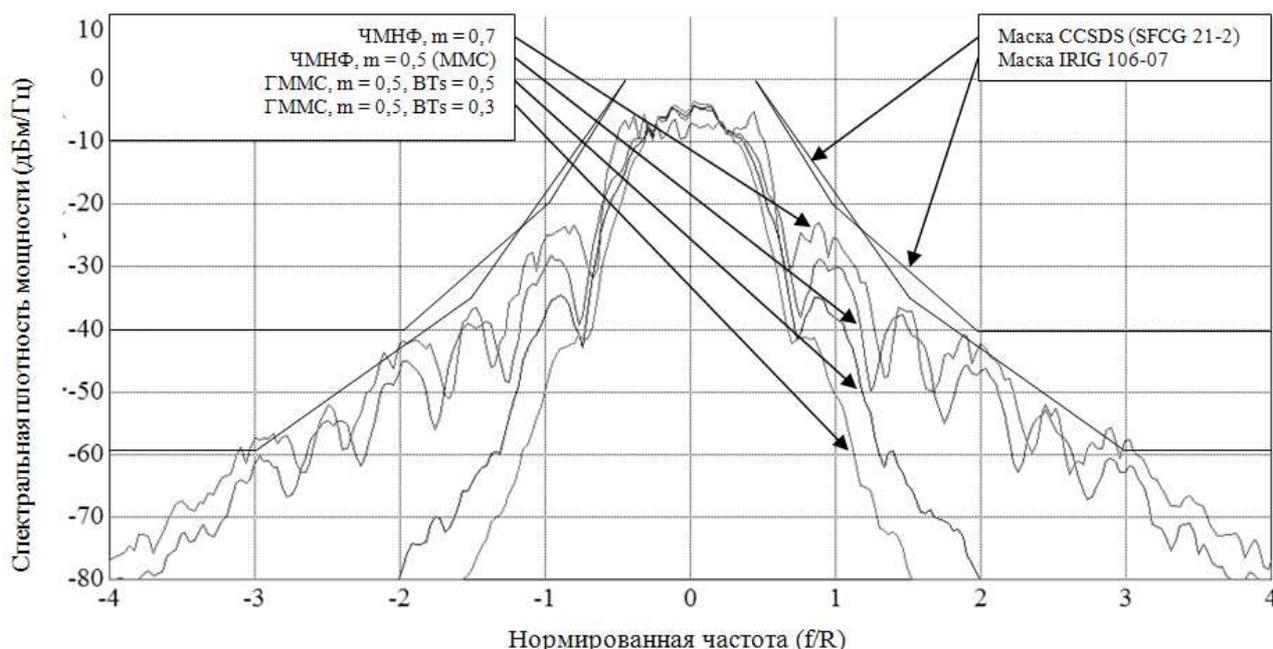


Рис. 11. Спектры сигналов с ЧМНФ, ММС и ГММС (ВТs = 0,5 и 0,3).

Сигнал с ГММС ( $BT_s = 0,3$ ) является наиболее спектрально эффективным, но, вследствие высокой степени скругления информационных символов, повышает межсимвольную интерференцию [3], а также требует для безошибочной работы присутствия в системе элементов выравнивания (эквалайзеров) или сверточного кодирования и декодирования [4].

Анализируя по рисункам 9 и 10 помехоустойчивость исследуемых сигналов, можно сделать вывод, что помехоустойчивость сигналов с ЧМНФ увеличивается с ростом индекса  $m$  до значения 0,7, а при дальнейшем увеличении  $m$  помехоустойчивость снижается и при  $m = 1$  становится равной помехоустойчивости сигналов с ММС ( $m = 0,5$ ). Наилучшей помехоустойчивостью ( $E_b/N_0 = 8,7$  дБ при  $BER = 10^{-5}$ ) обладает сигнал ЧМНФ с индексом модуляции  $m = 0,7$ . Относительно сигналов с модуляцией ГММС следует заключить, что вероятность появления ошибочных бит зависит от влияния фильтра низких частот на форму сигнала. Следовательно, межсимвольная интерференция, проявляющаяся при сильной степени скругления ( $BT_s = 0,3$  и  $0,5$ ) снижает помехоустойчивость при  $BER = 10^{-5}$  с 12 дБ (при  $BT_s = 1$ , то есть при отсутствии межсимвольной интерференции) до 14 и 17 дБ соответственно.

Результаты моделирования указаны в таблице 2.

Таблица 2.

Метод модуляции, $R = 1$ Мбит/с	Ширина спектра по уровню -30 дБ	Помехоустойчивость при $BER=10^{-5}$ , дБ
2ЧМНФ, $m = 0,1$	$1,4 * R$	21,5
2ЧМНФ, $m = 0,3$	$1,6 * R$	12,5
2ЧМНФ, $m = 0,7$	$2,6 * R$	8,7
2ЧМНФ, $m = 1$	$4 * R$	9,6
2ЧМНФ, $m = 0,5$ (ММС)	$2,2 * R$	9,6
ГММС, $BT_s = 0,3$	$1,4 * R$	17
ГММС, $BT_s = 0,5$	$1,6 * R$	14
ГММС, $BT_s = 1$	$2,4 * R$	12

### **Заключение.**

Получены следующие результаты:

1. Исследованы преимущества и недостатки частотных методов модуляции ЧМНФ, ММС, ГММС. Показано, что наибольшей спектральной эффективностью обладает метод манипуляции с минимальным сдвигом и фильтрацией Гаусса (ГММС), помехоустойчивость которого уступает модуляциям ЧМНФ и ММС.

2. Разработаны математические модели методов модуляции ЧМНФ, ММС, ГММС, на основе которых проведен анализ помехоустойчивости и спектральной эффективности.

Работа выполнена в рамках НИР «Исследование вопросов совместимости имеющихся отечественных и зарубежных стандартов по видам модуляции, структуре кадра, организации радиоканала при создании перспективных радиотелеметрических систем контроля» (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.).

### **Библиографический список.**

1. Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс. – СПб.: Наука и Техника, 2007. – 672с.
2. Складар Б. Цифровая связь. - М.: Издательский дом Вильямс. 2003 – 1104с.
3. CCSDS 413.0-G-2, «Bandwidth-efficient modulations». Green book, 2009 – 65p.
4. CCSDS 131.0-B-1, «TM synchronization and channel coding». Blue book, 2003 – 69p.