

Влияние ограничения импульсного отклика фильтра Гаусса на спектральные характеристики и помехоустойчивость когерентного приема «в целом» GMSK сигналов с межсимвольной интерференцией

С. О. Мельников, И. Н. Горбунов, Т. Ю. Кудряшова, С. Б. Макаров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

7atom7@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается сравнение энергетической эффективности разработанного квадратурного алгоритма приема и обработки сигналов и алгоритма Витерби, в частности, проводится изучение значимости ограничения импульсного отклика КИХ-фильтра на примере фильтра Гаусса на помехоустойчивость когерентного приема «в целом» при использовании сигналов GMSK для малых значений нормированной полосы частот $\Delta FT = 0,3 - 0,2$, в условиях межсимвольной интерференции. Имитационная модель разработана в среде MATLAB

Ключевые слова: импульсный отклик, фильтр Гаусса, КИХ-фильтр, когерентный прием, полоса частот, МСИ

1. ВВЕДЕНИЕ

При передаче сообщений в автоматизированных идентификационных системах (АИС) [1] используются сигналы с гауссовской модуляцией с минимальным сдвигом частоты (GMSK). Передача сообщений в АИС происходит в пакетном режиме. Использование сигналов GMSK в информационной части пакета позволяют обеспечить высокую спектральную эффективность [2]. При этом, чем меньше значение нормированной полосы частот, а именно произведения полосы частот ΔF (определенной по уровню -3 дБ от максимума АЧХ гауссовского фильтра) на длительность бита T сообщения, тем выше спектральная эффективность АИС. В существующих системах АИС при приеме таких сигналов используется метод частотного детектирования. Недостатком этого метода является низкая помехоустойчивость приема сообщений. Особенно большой энергетический проигрыш получается при малых значениях $\Delta FT = 0,3 - 0,2$. Этот проигрыш связан с тем, что при указанных значениях нормированной полосы частот возникает межсимвольная интерференция, вызванная наложением соседних сигналов друг на друга. Такая интерференция является следствием уменьшения полосы частот формирующего фильтра и на выходе такого фильтра длительность импульсного отклика в несколько раз будет превосходить длительность бита T сообщения.

Существующие алгоритмы приема сигналов, не учитывающие эту интерференцию, не обеспечивают высокой помехоустойчивости приема сообщений. В этих условиях, разумеется, возможно применение алгоритмов некогерентного приема с частотным детектированием и

последетекторной обработкой сообщений с учетом межсимвольной интерференции. Однако существенно улучшить помехоустойчивость приема возможно путем перехода к когерентному приему «в целом» (например, с использованием алгоритма Витерби [3]) или при использовании квадратурного разделения анализируемого процесса на входе приемного устройства.

При построении устройств формирования GMSK сигналов основной сложностью реализации является выбор метода, алгоритма и структуры цифрового фильтра Гаусса, при обеспечении минимальной вычислительной (программной) сложности. При малых значениях нормированной полосы частот $\Delta FT = 0,3 - 0,2$, длительность импульсного отклика такого фильтра значительно (в 3–5 раз) превышает длительность бита T сообщения. Это требует усложнения структуры цифрового фильтра Гаусса и увеличения вычислительной сложности, что существенно ограничивает реализационные параметры устройств формирования GMSK сигналов. При сохранении значений нормированной полосы частот $\Delta FT = 0,3 - 0,2$ можно искусственно ограничить длительность импульсного отклика фильтра, но это приведет к искажению спектра сигналов и снижению помехоустойчивости приема сообщений.

Целью работы является оценка влияния ограничения импульсного отклика фильтра Гаусса, построенного на основе фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров), на помехоустойчивость когерентного приема «в целом» информационной части пакета сообщения при использовании сигналов GMSK для малых значений нормированной полосы частот $\Delta FT = 0,3 - 0,2$.

II. ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ GMSK

Сигналы с гауссовским законом изменения частоты колебания в моменты манипуляции формируются с использованием фильтра с импульсной характеристикой в виде функции Гаусса [4], которая определяется следующим образом:

$$h(t) = \Delta F \sqrt{\frac{2\pi}{\ln 2}} \exp\left(-\frac{2\pi^2 (\Delta F)^2}{\ln 2} t^2\right). \quad (1)$$

Частотный импульс $g(t)$ можно представить в виде разности двух смещенных во времени на интервал T Q-функций [4]:

$$g(t) = \frac{1}{2T} \left[Q(2\pi\Delta F) \left(\frac{t-T/2}{\sqrt{\ln 2}} \right) - Q(2\pi\Delta F) \left(\frac{t+T/2}{\sqrt{\ln 2}} \right) \right], \quad (2)$$

где $0 \leq \Delta FT \leq \infty$ и $Q(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2}} \pi \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau$.

Структурная схема формирования сигналов GMSK представлена на рис. 1. На этом рисунке входной цифровой сигнал $b(t)$ нормируется (НОРМ) преобразуясь в $b_0(t)$ и поступает на фильтр Гаусса (ГФНЧ). Этот фильтр может быть реализован в виде КИХ-фильтра, структурная схема которого представлена на рис.2. На этом рисунке, структурная схема состоит из последовательно соединенных $N-1$ линий задержки (ЛЗ) на время $\Delta t = T_s/N$, где T_s – длительность частотного импульса (2), а количество коэффициентов в импульсной характеристике на единицу больше порядка фильтра Гаусса $L=N-1$. Порядок фильтра равен количеству ЛЗ структурной схемы, показанной на рис. 2. Коэффициенты фильтра Гаусса эквивалентны значениям отсчетов импульсной характеристики $h(n)$, $n = 0 \dots N-1$. Фильтр Гаусса вносит задержку при фильтрации, что необходимо учитывать при приеме сигналов.

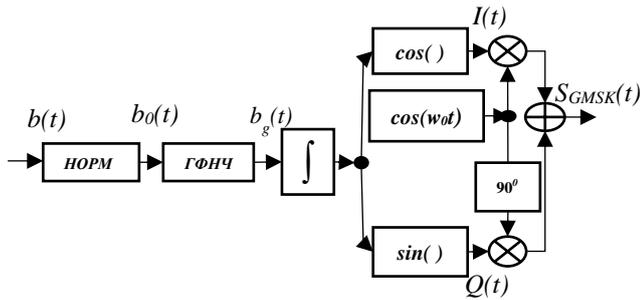


Рис. 1. Структурная схема GMSK модулятора

С выхода фильтра (рис. 1) последовательность функций $b_g(t)$ ((2)) после операции интегрирования разбивается на квадратурные составляющие $I(t)$ и $Q(t)$. Девиация частоты сигналов GMSK выбирается, как и для сигналов с MSK [5].

На выходе GMSK модулятора формируется последовательность сигналов GMSK $s_{GMSK}(t)$ с несущей частотой ω_0 и энергией бита сообщения E_b . Спектральные свойства $s_{GMSK}(t)$ определяются импульсной характеристикой (1).

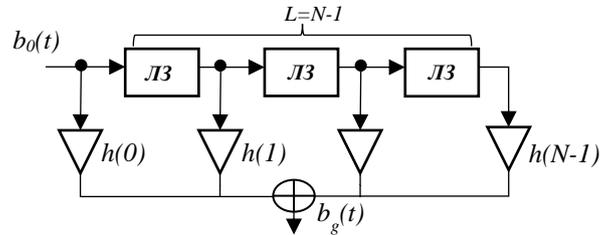


Рис. 2. Структурная схема фильтра Гаусса на основе КИХ-фильтра с конечным откликом

Рассмотрим формы квадратурных составляющих $I(t)$ и $Q(t)$ последовательностей сигналов, сформированных в соответствии со структурной схемой (рис. 1) для различных значений импульсного отклика фильтра Гаусса. На рис.3 приведены формы квадратурных составляющих последовательности двоичных сигналов для $T_s=2T$ (рис. 3а) и $T_s=3T$ (рис. 3б) для нормированной полосы частот $\Delta FT = 0,2$. Из анализа форм квадратурных составляющих видно, что при изменении длительности T_s частотного импульса изменяется уровень межсимвольной интерференции. Так, при переходе от КИХ-фильтра с $T_s=2T$ (рис. 3а) к КИХ-фильтру с $T_s=3T$ (рис. 3б), длительность импульсного отклика увеличивается на 15 % – 18 %, что должно приводить к ухудшению корреляционных свойств сигналов и энергетическим потерям из-за усиливающейся межсимвольной интерференции. Заметим, что переход от КИХ-фильтра с $T_s=2T$ (рис. 3а) к КИХ-фильтру с $T_s=3T$ (рис. 3б) связан с ростом вычислительной сложности, так как увеличивается число операций сложения и умножения при программной реализации КИХ-фильтра в соответствии с рис. 2.

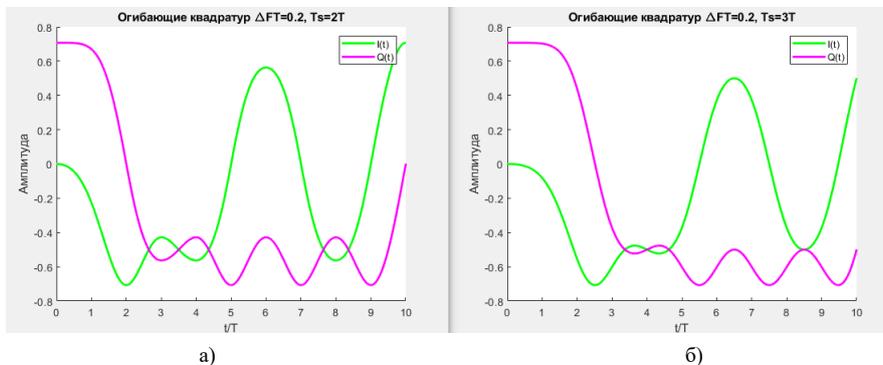


Рис. 3. Формы квадратурных составляющих $I(t)$ и $Q(t)$ последовательностей сигналов

III. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ И ПРИЕМА GMSK СИГНАЛОВ

Для верификации эффективности применения и оценки помехоустойчивости приёма с использованием алгоритма Витерби было проведено имитационное моделирование в среде MATLAB 2017b. Структурная схема разработанной имитационной модели для проведения исследования приведена на рис. 4. Она включает в себя источник сообщений, передающую часть, блок АБГШ формирования аддитивного шума в канале передачи и приемную часть. В канале передачи формируется отношение сигнал/шум (E_b/N_0). При этом в качестве шума используется аддитивный нормальный шум со спектральной плотностью средней мощности $N_0/2$. С выхода источника сообщений последовательность $b(t)$ (рис. 1) символов канального алфавита поступает на NRZ кодер. С его выхода сигналы приходят на гауссовский низкочастотный КИХ-фильтр ГФНЧ и

далее на интегратор. В блоке «Передача» предусмотрена возможность управлять параметрами изменения длительности импульсного отклика ГФНЧ, символьной скоростью передачи и нормированной полосой частот $\Delta FT = 0,3 - 0,2$. Полученная на выходе этого блока последовательность сигналов поступает в блок канала передачи.

Приемная часть (блок Когерентный прием) позволяет реализовать три алгоритма приема: алгоритм приема «в целом» в соответствии с алгоритмом Витерби; алгоритм приема классических сигналов с минимальным сдвигом частоты (MSK) и алгоритм квадратурной подоптимальной обработки (для сравнения), подробно описанный в [6, 7].

В блоке Когерентный прием осуществляется расчет вероятности битовой ошибки для каждого алгоритма обработки сигналов.

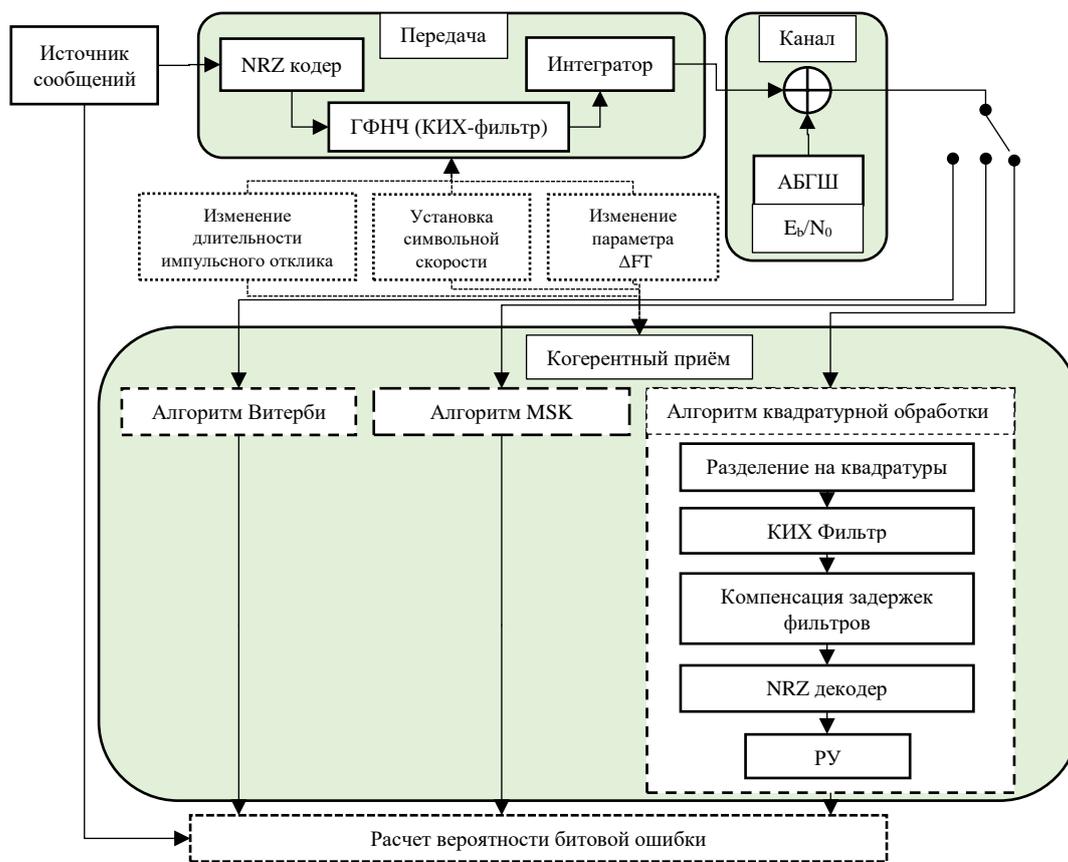


Рис. 4. Структурная схема имитационной модели

Моделирование проводилось со следующими основными параметрами: размер последовательности сигналов $N=10^5$; количество дискретных цифровых отсчётов, приходящийся на один символьный интервал равно 10; количество итераций работы модели для оценки одной точки битовой вероятности ошибки: не менее 10^2 . Оценки точности определения значений вероятностей ошибочного приема для различных длительностей сигналов и скоростей передачи сообщений получены для доверительного интервала для точки средней вероятности ошибочного приема $BER=0.0001 (10^{-4})$ при значении числа испытаний (числа сигналов в пакете передачи $N=10^6$), которая равна $\{7.42 \cdot 10^{-5}; 12.58 \cdot 10^{-5}\}$.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При оценке помехоустойчивости когерентного приема сигналов GMSK «в целом» с использованием модификации алгоритма Витерби [3] получим зависимости вероятности ошибок от отношения сигнал/шум для канала передачи с постоянными параметрами.

На рис. 5 приведены значения вероятности ошибок BER от отношения сигнал/шум для трех алгоритмов когерентного приема.

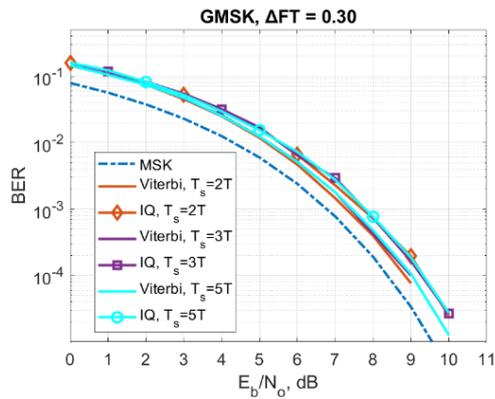


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал шум при различных значениях длительности импульсного отклика КИХ-фильтра

Пунктирной линией обозначены зависимости когерентного приема классических MSK сигналов. Сплошными линиями условно соединены значения BER для различных отношений E_b/N_0 при использовании алгоритма Витерби и значками обозначены зависимости BER от E_b/N_0 при использовании под-оптимального алгоритма квадратурной обработки [6, 7].

Из сравнения зависимостей рис. 5 можно сделать следующие выводы. Для нормированного значения полосы частот $\Delta FT = 0,3$ применение алгоритма Витерби позволяет приблизиться по помехоустойчивости приема к потенциальным возможностям (приема классических MSK сигналов) и энергетический проигрыш для $BER=10^{-4}$ составляет не более 0,8 дБ для длительности импульсного отклика $T_s=5T$; $T_s=3T$ и $T_s=2T$. Применение под-оптимального алгоритма квадратурной обработки увеличивает энергетический проигрыш в этих же условиях до 1 дБ.

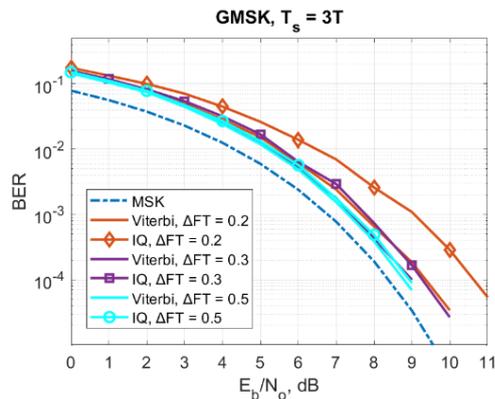


Рис. 6. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал шум при различных значениях нормированной полосы частот (ΔFT)

На рис. 6 приведены зависимости BER от E_b/N_0 для длительности импульсного отклика $T_s=3T$ при различных значениях нормированной полосы частот. Эти зависимости обозначены по аналогии с зависимостями на рис. 5. Как видно из сравнения графиков на рис. 6, можно оценить увеличение энергетического проигрыша при уменьшении значения нормированной полосы частот сигналов GMSK. Так, при снижении до $\Delta FT = 0,2$ этот проигрыш возрастает до значений 1,2 дБ при приеме «в целом» по алгоритму

Витерби и до 2,1 дБ при использовании под-оптимального алгоритма квадратурной обработки.

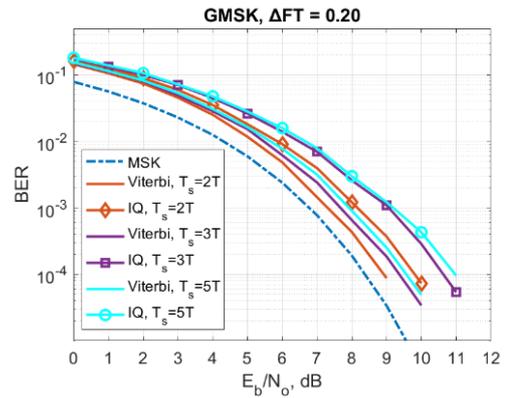


Рис. 7. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал шум при различных значениях длительности импульса

При значении нормированной полосы частот $\Delta FT = 0,2$ зависимости BER от E_b/N_0 для различной длительности импульсного отклика приведены на рис. 7. Напомним, что увеличение длительности импульсного отклика приводит к увеличению уровня межсимвольной интерференции, которую можно учитывать при использовании алгоритма Витерби. Исходя из сравнения кривых рис. 7, можно сделать следующие выводы. При увеличении длительности импульсного отклика $T_s=5T$, при использовании алгоритма Витерби энергетические потери практически не изменяются и составляют 1,3 дБ для $BER=10^{-4}$. В то же время применение под-оптимального алгоритма квадратурной обработки приводит к росту энергетического проигрыша до 2,8 дБ.

V. ВЫВОДЫ

1. Для нормированного значения полосы частот $\Delta FT = 0,3$ применение алгоритма Витерби позволяет приблизиться по помехоустойчивости приема к потенциальным возможностям (приема классических MSK сигналов) и энергетический проигрыш для $BER=10^{-4}$ составляет не более 0,8 дБ для длительности импульсного отклика $T_s=5T$; $T_s=3T$ и $T_s=2T$.

2. Энергетический проигрыш увеличивается при уменьшении значения нормированной полосы частот сигналов GMSK. Так, при снижении до $\Delta FT = 0,2$ этот проигрыш возрастает до значений 1,2 дБ при приеме «в целом» по алгоритму Витерби и до 2,1 дБ при использовании под-оптимального алгоритма квадратурной обработки.

3. При увеличении длительности импульсного отклика $T_s=5T$, с использованием алгоритма Витерби энергетические потери практически не изменяются и составляют 1,3 дБ для $BER=10^{-4}$, применение под-оптимального алгоритма квадратурной обработки приводит к росту энергетического проигрыша до 2,8 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kuang T., Gee L. L., Binary GMSK: Characteristics and Performance, 2023.
- [2] Biswas P., Pandey C., Thakur A.K., Khan M.R. and Rathore S. Algorithm Design Simulation Performance Analysis of MIMO GMSK System for Radio Communication on AWGN Channel // 2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCCSP), Chennai, India, 2020, pp. 1261-1264, doi: 10.1109/ICCCSP48568.2020.9182061.

- [3] D. Song, R. Yao, H. Ma, X. Zuo, Y. Fan and J. Xu, One-Step Backtracking Algorithm Based on Viterbi Algorithm in GMSK Demodulation // 2020 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Macau, China, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSPCC50002.2020.9259557.
- [4] Prof. Roberto Garello, Dott. Andrea Modenini, Prof. Guido Montorsi. Study of Advanced Techniques for Simultaneous Transmission of PN Ranging and High Bit Rate, Anno Accademico 2020/2021.
- [5] Elnoubi S.M. "Analysis of GMSK with discriminator detection in mobile radio channels," // in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 35, no. 2, pp. 71-76, May 1986, doi: 10.1109/T-VT.1986.24073.
- [6] Melnikov S., Gorbunov I., Makarov S., Kuleshov E., Nguyen C.M. and Gruzdev A. "Quadrature Formation and Element-by-Element Reception of Signals with GMSK Modulation and Controlled Inter-Symbol Interference," // 2023 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, ST PETERSBURG, Russian Federation, 2023, pp. 148-151, doi: 10.1109/EEEPolytech58658.2023.10318554
- [7] Мельников С.О., Горбунов И.Н., Макаров С.Б., Кудряшова Т.Ю. Выбор интервала интегрирования в алгоритмах квадратурного приема сигналов с GMSK модуляцией и управляемой межсимвольной интерференцией, 2023 // Всероссийская конференция «Неделя науки ИЭиТ», Санкт-Петербург, Россия.