

Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, Е. В. Иванов

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА FSK-СИГНАЛОВ УСТРОЙСТВОМ КВАДРАТУРНОГО ПРИЕМА

Проведена сравнительная оценка модельных и теоретической кривых зависимости вероятности битовой ошибки на выходе устройства квадратурного беспорогового приема MSK-сигналов на фоне белого гауссового шума. Показано, что данный способ обработки обеспечивает заявленную повышенную помехоустойчивость приема в области порога по сравнению с существующими демодуляторами.

A comparative evaluation of the model and the theoretical curves of the probability of bit error at the output of the unbounded receiving device of MSK-signals in presence of white Gaussian noise. It is shown that this method of signal processing provides declared value of noise stability in critical values of SNR region compared with existing demodulators.

Ключевые слова: частотная манипуляция, беспороговый прием, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки.

Key words: frequency manipulation, unbounded receiving, noise stability, bit error ratio.

Сигналы FSK (frequency shift key) и их модификации CPFSK (continuous phase FSK), и в частности MSK (minimum shift key), нашли широкое применение в системах передачи дискретной информации и современной цифровой связи. Демодуляция сигналов данного типа, как правило, осуществляется либо на основе частотного детектора, либо на основе фильтров [1, с. 4]. Демодуляторы первого типа популярны из-за простоты схемотехнического решения, однако настройки обладают не-



высокой помехоустойчивостью по сравнению с потенциальной. Кроме того, данные демодуляторы находят ограниченное применение при работе с FDM-сигналами (frequency division multiplexing) и не используются при работе с DFSK-сигналами (double frequency shift key). Демодуляторы второго типа позволяют уменьшить вероятность битовой ошибки при передаче дискретной информации по каналу связи.

Для обработки когерентных FSK-сигналов применяют демодуляторы на основе полосовых фильтров, настроенных на частоты *mark* и *space*, соответствующие передаче двоичных «1» и «0» в системах передачи дискретной информации на фоне белого гауссового шума. Критерий принятия решения о передаче того или иного бита – сравнение уровней сигналов на выходах полосовых фильтров. Демодулятор данного типа оптимален в том отношении, что характеристики полосовых фильтров согласованы с характеристиками полезного сигнала.

Для обработки некогерентных FSK-сигналов на фоне белого гауссового шума применяют демодуляторы, принцип действия которых заключается в выделении огибающих сигналов с частотами *mark* и *space* и их последующем сравнении для принятия решения. Недостатками таких демодуляторов являются невысокая помехоустойчивость при приеме FSK-сигнала в условиях помех иного рода и наличие взаимосвязи между формой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра, обеспечивающей максимальное ослабление уровня шума, и его оптимальной полосой пропускания.

Из-за наличия шумов сигналы в каналах детекторов огибающей являются медленно меняющимися случайными функциями времени. Для сравнения уровней этих огибающих в каналах *mark* и *space* нецелесообразно использовать фиксированный порог компаратора. В связи с этим нашли применение детекторы с переменным порогом, характеристики которых оптимизированы по отношению к характеристикам полезного сигнала.

Многообразие форм FSK-сигналов приводит к необходимости выбора схемотехнического решения демодулятора для их обработки. Так, для передачи дискретной информации в радиоканалах связи широкое применение нашли MSK-сигналы. Демодуляция таких сигналов осуществляется на базе стандартного частотного детектора (СЧД) [2, с. 41] или устройств квадратурного приема. Принцип действия устройств квадратурного приема базируется на выделении квадратурных составляющих MSK-сигнала с последующей их обработкой в соответствии с тем или иным алгоритмом [3–6]. При малых отношениях «сигнал – шум» СЧД обладает низкой помехоустойчивостью по сравнению с устройствами квадратурного приема.

В настоящее время ведутся разработки устройств квадратурного приема [4–6], обладающих повышенной помехоустойчивостью при относительно низких значениях входного отношения «сигнал – шум» (ОСШ) – от 0 до 5 дБ. В ряде работ [6; 7, с. 146] приводятся результаты теоретической оценки вероятности битовой ошибки при приеме данными демодуляторами MSK-сигналов на фоне белого гауссового шума.



Оценка полученных результатов показывает, что применение устройств квадратурного приема позволяет снизить пороговое ОСШ на 4,5–6 дБ по сравнению с СЧД, в то время как другие помехоустойчивые демодуляторы (на основе оптимальных алгоритмов обработки, принципа слежения за мгновенной частотой или последетекторной обработки) обеспечивают снижение порогового ОСШ на 2–3 дБ.

С целью подтверждения теоретически заявленной помехоустойчивости разрабатываемых устройств квадратурного приема были проведены модельные исследования, в ходе которых оценивалась помехоустойчивость устройства беспорогового приема MSK-сигналов [6]. Анализ полученных результатов показал, что предложенный алгоритм позволяет сделать лишь качественные выводы по помехоустойчивости разрабатываемого демодулятора, однако из-за введенных ограничений на учет влияния шумов на характеристики аддитивной смеси MSK-сигнала и белого гауссового шума данный алгоритм не позволяет с достаточной достоверностью произвести количественную оценку.

Для решения задачи адекватной количественной оценки помехоустойчивости устройства беспорогового приема был применен иной критерий принятия решения о передаче того или иного бита. Суть данного критерия заключается в определении полярности бита в принятом сигнале на выходе интегратора, подключенного к исследуемому демодулятору. Если к моменту окончания элементарной посылки сигнал на выходе интегратора имеет положительную полярность, то принимается решение о приеме бита *mark*, а если отрицательную — то *space*. Если сигнал на выходе интегратора в момент окончания элементарной посылки имеет нулевое значение, делается вывод о наличии ошибки. Ошибкой также считаются ситуации, в которых полярности битов в исходном и принятом сигналах отличаются.

В рамках модельного эксперимента, проводимого в среде MathCAD, анализировалась зависимость вероятности битовой ошибки на выходе демодулятора при прохождении через него аддитивной смеси MSK-сигнала и белого гауссового шума с различными значениями ОСШ в смеси. При этом были выбраны следующие характеристики аддитивной смеси: центральная частота спектра составляла 450 кГц в соответствии с частотой второго преобразователя частоты широко распространенных приемных устройств; сдвиг между частотами *mark* и *space*, соответствующий удвоенной девиации частоты, выбирался равным 4 кГц, что приемлемо для служебной радиосвязи; отношение «сигнал — шум» в аддитивной смеси варьировалось от 0 до 5 дБ с шагом 0,5 дБ. При таком выборе девиации частоты число посылок в полезном сигнале при однократном измерении вероятности битовой ошибки в зависимости от количества временных отсчетов в исследуемом сигнале составляло от 25 до 100, но поскольку интервал наблюдения теоретически должен быть бесконечен, то проводилась серия из 100 измерений с последующим усреднением полученных результатов. Уменьшение девиации частоты до типовых значений порядка 800 Гц оказалось нецелесообразным ввиду необходимости значительного увеличения машин-



ного времени для создания и обработки сигнала с тем же количеством элементарных посылок.

На рисунке представлены пороговые кривые устройства квадратурного приема [6] для различного числа временных отсчетов во входной аддитивной смеси MSK-сигнала и белого гауссового шума.

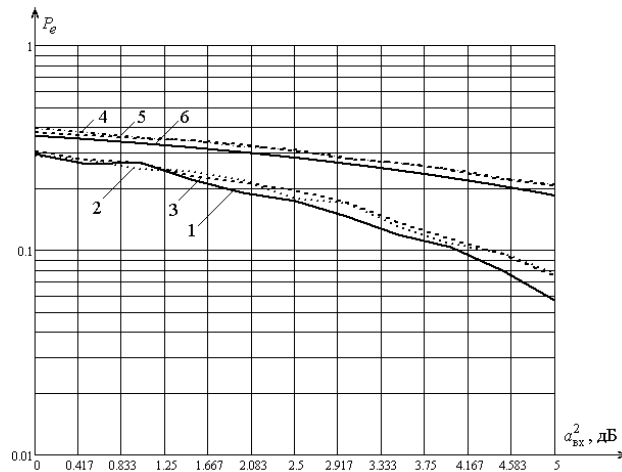


Рис. Зависимость вероятности битовой ошибки P_e на выходе устройства беспорогового приема MSK-сигналов [6] от ОСШ во входной аддитивной смеси $a_{вх}^2$ для различных количеств временных отсчетов: 1 – 100 тыс. отсчетов; 2 – 200 тыс.; 3 – 300 тыс.; 4 – 400 тыс.; 5 – 500 тыс.; 6 – теоретическая зависимость

Сравнительный анализ полученных модельных кривых с теоретической зависимостью показывает, что увеличение объема выборки, соответствующее увеличению длительности интервала наблюдения, приводит к приближению модельной пороговой кривой к теоретической (рис., зависимость 6), уже при объемах выборки свыше 400 тыс. отсчетов (рис., зависимости 4, 5) модельная и теоретическая кривые практически совпадают. Модельные кривые 1–3 на рисунке не описывают реальную помехоустойчивость демодулятора, так как лежат ниже заявленной теоретической зависимости, что объясняется недостаточным объемом выборки и малым интервалом наблюдения.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о действительной повышенной помехоустойчивости разрабатываемого демодулятора в области порога по сравнению с существующими демодуляторами, что является основанием для проведения в дальнейшем физического эксперимента.

Список литературы

1. Watson B. FSK: signals and demodulation // Watkins-Johnson Company. URL: www.wj.com



2. Кантор Л. Я., Дорофеев В. М. Помехоустойчивость приема ЧМ-сигналов. М., 1977.

3. Гаранин А. С. Демодулятор частотно-манипулированных сигналов : авт. свид. СССР № 1461358 МПК H04 L27/14 от 01.04.85.

4. Карлов А. М., Волхонская Е. В., Авдеев Е. Н. Способ квадратурного приема частотно-манипулированных сигналов с минимальным сдвигом : пат. на изобретение № 2192101 от 13.07.1999 7Н 04 L 27/14.

5. Карлов А. М., Волхонская Е. В. Устройство квадратурного приема частотно-манипулированных сигналов : пат. на изобретение. № 2247474 от 19.06.2003 МПК⁷ H 04 L 27/14.

6. Карлов А. М., Волхонская Е. В., Иванов Е. В. Устройство квадратурного приема частотно-манипулированных сигналов : пат. на изобретение. № 2425457 от 27.07.2010.

Об авторах

Елена Вячеславовна Волхонская — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Евгений Владимирович Коротей — ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Евгений Валентинович Иванов — менеджер проекта, ООО «Экосолдерс».

E-mail: kld.ivanov@gmail.com

About authors

Dr Elena Volkhonskaya — prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Evgeny Korotey — ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Evgeny Ivanov — project manager Ecosolders Ltd.

E-mail: kld.ivanov@gmail.com