

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.13>

УДК: 621.391.072

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ ПРИ ПРИЕМЕ СИГНАЛОВ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Г. В. Куликов, А. А. Лелюх, Е. Н. Граченко

**МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, Москва, пр. Вернадского, д.78**

Статья поступила в редакцию 12 июля 2021 г.

Аннотация. Сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) широко используются в современных системах передачи информации. Известно, что качество работы приемника таких сигналов значительно снижается, если в канале связи кроме шумовой помехи присутствуют еще и нефлуктуационные помехи, особенно узкополосная (гармоническая) помеха, совпадающая по частоте с несущей частотой полезного сигнала. Такое снижение объясняется тем, что алгоритмы работы демодуляторов оптимизированы для приема сигналов на фоне белого гауссовского шума и не учитывают характеристик нефлуктуационных помех. Целью работы является разработка и исследование адаптивного алгоритма подавления такой помехи на основе нерекурсивного цифрового фильтра с регулируемыми весовыми коэффициентами. Методом компьютерного моделирования исследована эффективность алгоритма, основанного на использовании известных данных о форме фазового импульса, а именно, о модуле производной информационной составляющей фазы (наклоне фазового импульса) сигнала. При проверке работоспособности алгоритма определялась оптимальная длина фильтра, величина коэффициента, определяющего степень инерционности и устойчивость процесса адаптации, оценивался спектр сигнала и помехи, анализировалась амплитудно-частотная характеристика адаптивного фильтра и изменение ее формы во времени. Для случая, когда частота помехи совпадает с центральной частотой спектра сигнала,

получены зависимости вероятности битовой ошибки от интенсивности гармонической помехи и от отношения сигнал/шум для сигналов 4-КАМ и 16-КАМ. Показано, что адаптивный фильтр эффективно подавляет гармоническую помеху с относительной интенсивностью $\mu > 0,2$ при приеме сигнала 4-КАМ. Энергетический выигрыш составляет 2 дБ и более. При приеме сигналов КАМ с $M \geq 16$, имеющих, кроме фазовой, еще и амплитудную модуляцию, алгоритм сохраняет работоспособность, хотя эффективность использования этого адаптивного фильтра значительно ниже – энергетический выигрыш не превышает 0,5 дБ

Ключевые слова: квадратурная амплитудная модуляция, гармоническая помеха, адаптивный фильтр, вероятность битовой ошибки.

Abstract. Quadrature amplitude modulation (QAM) signals are widely used in modern information transmission systems. The quality of the receiver of such signals is significantly reduced if non-fluctuation interference is present in the communication channel. Narrow-band (harmonic) interference with the frequency of the useful signal is especially dangerous. The aim of this work is to develop and study an adaptive algorithm for suppressing such interference when receiving QAM signals. The algorithm is based on a non-recursive digital filter with adjustable weights. It uses known information about the shape of the phase pulse of the signal. The efficiency of the algorithm is investigated by the method of computer simulation. When checking the performance of the algorithm, the spectrum of the signal and noise, the amplitude-frequency characteristic of the adaptive filter and the change in its shape over time were estimated. For 4-QAM and 16-QAM signals, the dependences of the bit error probability on the intensity of harmonic interference and on the signal-to-noise ratio are obtained. It is shown that the adaptive filter effectively suppresses harmonic interference with a relative intensity $\mu > 0.2$ when receiving a 4-QAM signal. The energy advantage is 2 dB or more. When receiving QAM signals with $M \geq 16$, which also have amplitude modulation, the algorithm remains operational, but the efficiency of using this adaptive filter is much lower. The energy advantage does not exceed 0.5 dB.

Key words: quadrature amplitude modulation, harmonic interference, adaptive filter, bit error probability.

Введение

Сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) широко используются в современных системах передачи информации. Проведенный в [1-5] теоретический анализ помехоустойчивости приема таких сигналов показал, что качество работы приемника значительно снижается, если в канале связи кроме шумовой помехи присутствуют еще и нефлуктуационные помехи разных видов. Особенно это касается случаев, когда такая помеха является узкополосной (гармонической), совпадающей по частоте с частотой полезного сигнала [1, 3]. Такое снижение объясняется тем, что алгоритмы работы демодуляторов оптимизированы для приема сигналов на фоне белого гауссовского шума и не учитывают характеристик нефлуктуационных помех.

В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритмов подавления таких помех. Качество этих алгоритмов в значительной степени зависит от объема априорной информации о действующей помехе. В случае, когда априорных сведений о помехах мало, эффективным способом борьбы с ними является использование адаптивных фильтров (АФ) – нерекурсивных цифровых фильтров с регулируемыми весовыми коэффициентами (ВК).

1. Алгоритмы адаптации.

Элемент выходной последовательности нерекурсивного цифрового фильтра (рис. 1) в пространстве комплексных огибающих можно записать следующим образом [6, 7]:

$$\dot{y}_i = \mathbf{W}_i^T \dot{\mathbf{X}}_i,$$

где $\dot{\mathbf{X}}_i = [\dot{x}_i, \dot{x}_{i-1}, \dots, \dot{x}_{i-N+1}]$ – вектор последовательности входных отсчетов фильтра; $\mathbf{W}_i = [w_0, \dots, w_k, w_{N-1}]^T$ – вектор ВК в i -й момент времени; t – символ

транспонирования; N – длина фильтра.

Адаптивные фильтры могут иметь различные алгоритмы настройки вектора ВК, направленные на минимизацию заданной целевой функции. Методы адаптации разделяются на адаптацию с эталонной моделью и адаптацию без таковой [6-8]. В первом случае для формирования на приемной стороне эталонной реакции системы при передаче сигнала используется дополнительная обучающая последовательность. Во втором – дополнительная обучающая последовательность не требуется, а вектор ВК подстраивается в процессе приема сигнала по результату анализа реакции фильтра на соответствие выбранному критерию.

В качестве такого критерия могут быть использованы характерные свойства полезного сигнала, отличающие его от помехи. При этом в принимаемой смеси «сигнал + помеха» будет максимизироваться сигнальная составляющая и подавляться помеховая.

В [9] предложены схема и два алгоритма работы АФ, совместно использующие априорную информацию о двух параметрах полезного сигнала – постоянной огибающей и фазовой структуре (форме фазового импульса). Первый алгоритм, изначально в отдельности предложенный в [10], осуществляет подстройку вектора ВК в соответствии с уравнением:

$$\dot{\mathbf{W}}_{i+1} = \dot{\mathbf{W}}_i - d \cdot (|\dot{y}_i|^2 - 1) \dot{y}_i \dot{\mathbf{X}}_i^*, \quad (1)$$

где d – коэффициент, определяющий степень инерционности и устойчивость процесса адаптации; $(\cdot)^*$ – знак комплексного сопряжения.

При этом минимизируется целевой функционал $M\{(|\dot{y}_i|^2 - 1)\}$, где $M\{\cdot\}$ – знак математического усреднения.

Такой алгоритм применим к сигналам с постоянной огибающей, к числу которых сигнал КАМ относится только в частном случае при $M = 4$. Этот случай подробно рассмотрен в [11].

Работа второго алгоритма, впервые предложенного и исследованного в [12], основана на использовании известных данных о форме фазового импульса, а именно, о модуле производной информационной составляющей фазы (наклоне фазового импульса) сигнала. В случае сигнала КАМ этот параметр равен нулю.

Данный алгоритм контролирует форму (наклон) фазового импульса принимаемого сигнала в соответствии с уравнением:

$$\dot{\mathbf{W}}_{i+1} = \dot{\mathbf{W}}_i - b | \dot{y}_i | \dot{y}_i \mathbf{X}_i^*, \quad (2)$$

где b – коэффициент, определяющий степень инерционности и устойчивость этого процесса адаптации.

В результате работы АФ происходит выравнивание фазового импульса и, как следствие, уменьшение влияния помехи и повышение точности фильтрации.

2. Результаты моделирования адаптивного фильтра.

Моделирование алгоритма (2) проводилось для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (4-КАМ и 16-КАМ) при наличии в радиоканале шумовой и гармонической помех.

Сигнал КАМ на тактовом интервале, равном длительности канального символа T_s , несущего информацию о $k = \log_2 M$ информационных битах, принимает одно из M возможных значений:

$$s_i(t) = A(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), \quad t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M-1,$$

где $A = \sqrt{2E_s / T_s}$ – средняя амплитуда сигнала ($E_s = E_b \log_2 M$ – энергия канального символа, средняя по всем информационным комбинациям; E_b – средняя энергия, приходящаяся на один бит информации); I_i и Q_i – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала; ω_0 – несущая частота. Гармоническая помеха в общем случае имеет относительную интенсивность μ , частотную расстройку $\Delta\omega_n$ и случайную фазу φ_n , равномерно распределенную в диапазоне $(0, 2\pi]$:

$$s_n(t) = \mu A \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_n)t + \varphi_n].$$

2.1. Проверка работоспособности алгоритма.

При моделировании рассмотрен случай, когда частота помехи совпадает с центральной частотой спектра сигнала, что согласно исследованиям [1, 3] является наихудшей ситуацией с точки зрения помехоустойчивости приема. При проверке работоспособности алгоритма оценивалась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) адаптивного фильтра и изменение ее формы во времени. АЧХ получалась из импульсной характеристики фильтра – вектора ВК – с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье. Длина фильтра полагалась равной $N = 256$, так как предварительная проверка показала, что при значениях $N > 200$ зависимость качества фильтрации от N стабилизируется.

Адаптивный фильтр в модели приемника был включен после квадратурного преобразователя – переноса спектра на нулевую частоту, и его АЧХ, наблюдаемая в процессе адаптации при указанной выше частоте помехи, приведена на рис. 1.

Как видно, фильтр осуществляет режекцию конвертированной смеси сигнала и гармонической помехи в узкой полосе в районе нулевой частоты. Кроме того, наблюдается дополнительный провал АЧХ в более высокочастотной области, связанный, видимо, с настройкой фильтра на дополнительные комбинационные частоты, возникающие при оцифровке сигнала и помехи.

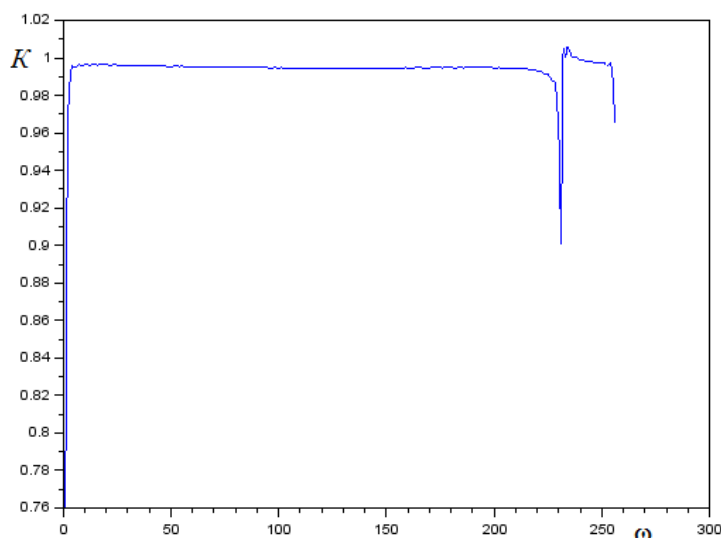


Рис. 1. АЧХ адаптивного фильтра.

Спектр $S(\omega)$ смеси «сигнал + гармоническая помеха» при $\mu = 0,9$ в конце процесса адаптации до адаптивного фильтра и после него показан на рис. 2. Видно, что в данном случае помеха подавляется на ~ 8 дБ.

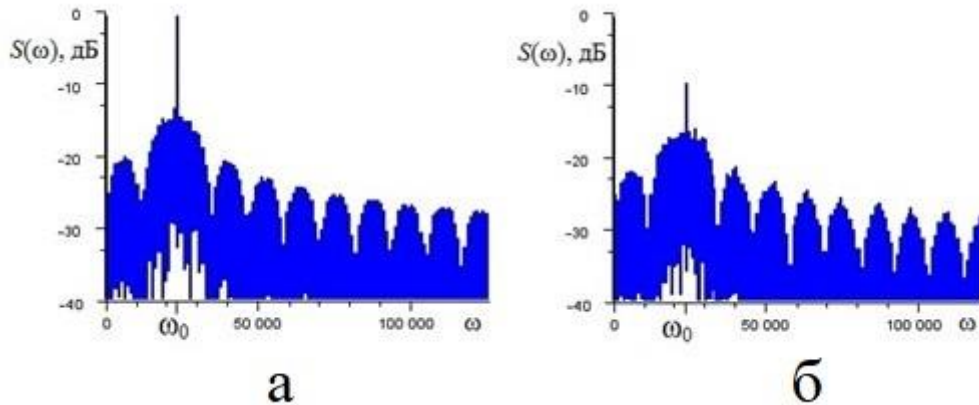


Рис. 2. Спектр смеси «сигнал + гармоническая помеха» до (а) и после (б) адаптивного фильтра.

Динамику процесса адаптации фильтра при разных величинах b демонстрирует изменение во времени коэффициента передачи фильтра K_0 на нулевой частоте, характеризующего степень подавления гармонической помехи (рис. 3).

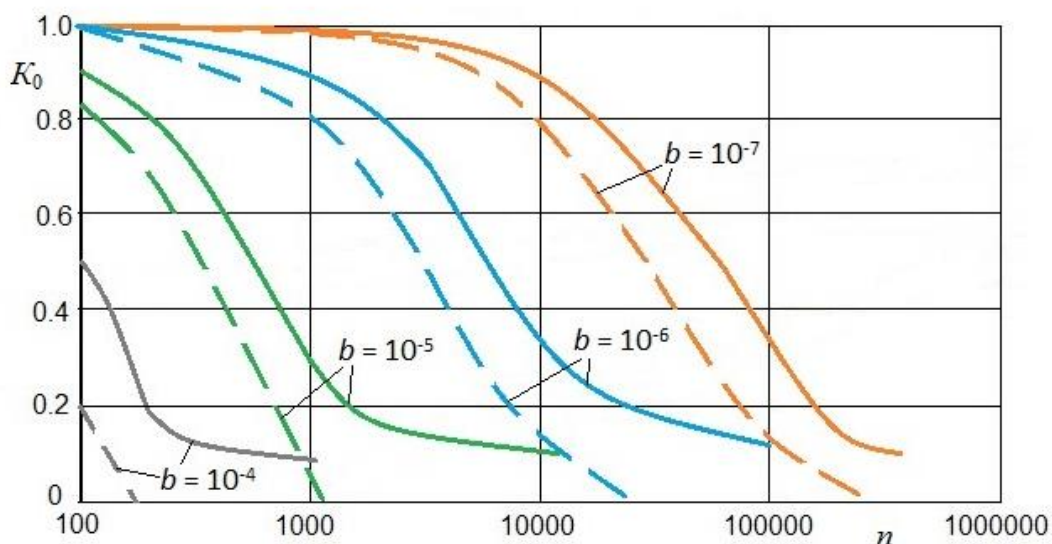
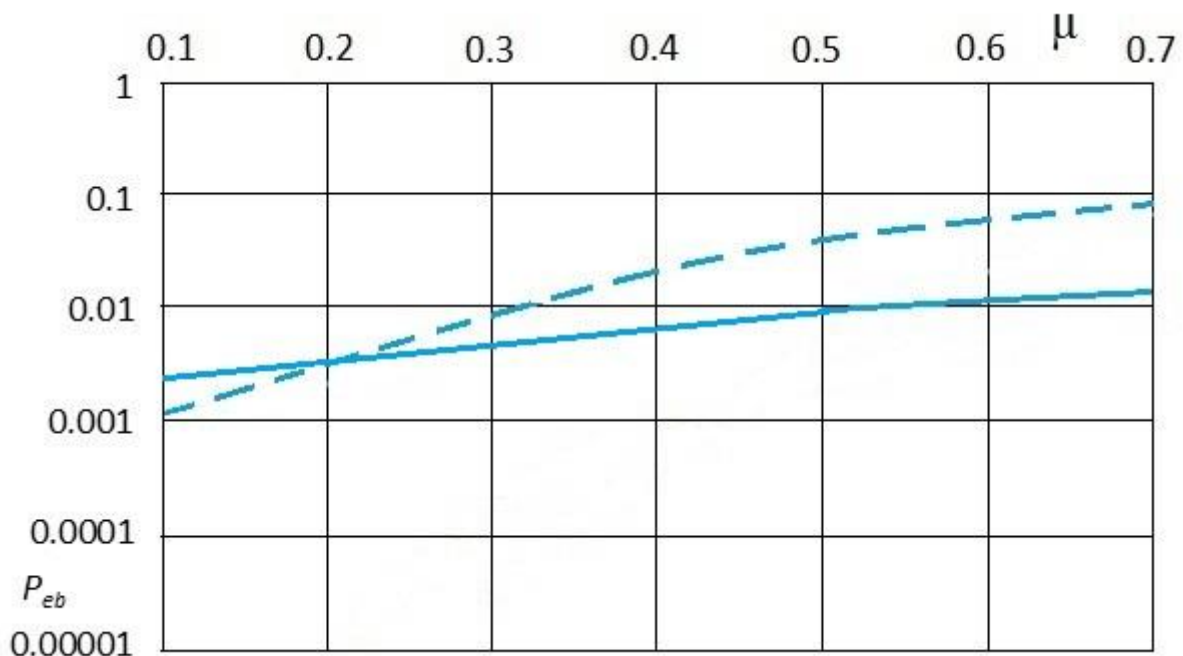


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи фильтра K_0 на нулевой частоте от времени адаптации (n – количество принятых информационных битов): 4-КАМ (штриховые линии) и 16-КАМ (сплошные линии).

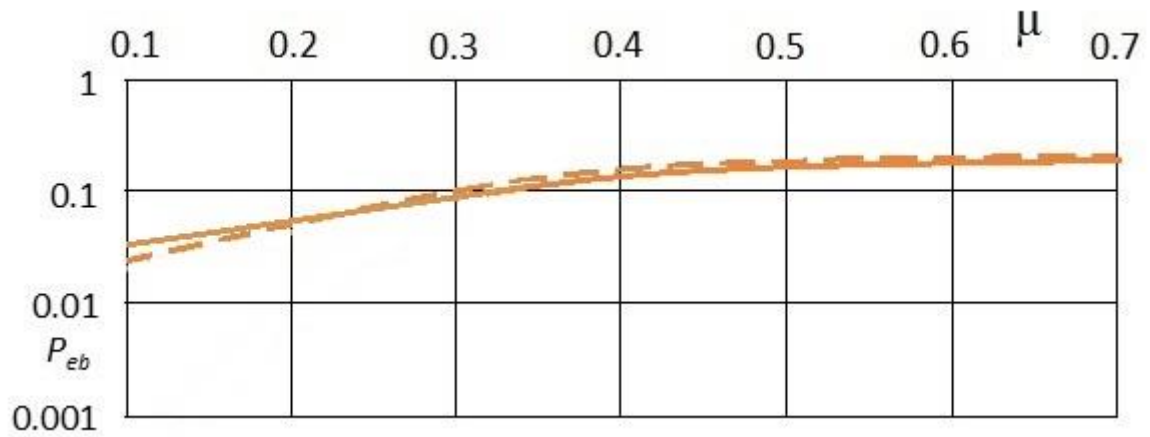
Можно наблюдать разную скорость адаптации фильтра для случаев 4-КАМ и 16-КАМ, а также тот факт, что при 16-КАМ коэффициент передачи фильтра K_0 в конце адаптации не опускается ниже 0,1, в то время, как при 4-КАМ он стремится к нулю. В результате анализа этих графиков для модели была выбрана величина коэффициента $b = 10^{-5}$.

2.2. Зависимость вероятности битовой ошибки от интенсивности гармонической помехи.

Зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от интенсивности гармонической помехи μ при $E_b/N_0 = 7$ дБ приведены на рис. 4. Из полученных графиков видно, что в случае 4-КАМ с возрастанием интенсивности помехи возрастает и эффективность ее фильтрации, но для 16-КАМ адаптивный фильтр улучшает помехоустойчивость приема лишь в очень малой степени. При малых величинах $\mu < 0,2$ наблюдается даже ухудшение помехоустойчивости за счет частичного подавления фильтром полезного сигнала. Кроме этого, для сигнала 16-КАМ в этом диапазоне μ наблюдалась неустойчивость процесса адаптации.



a)

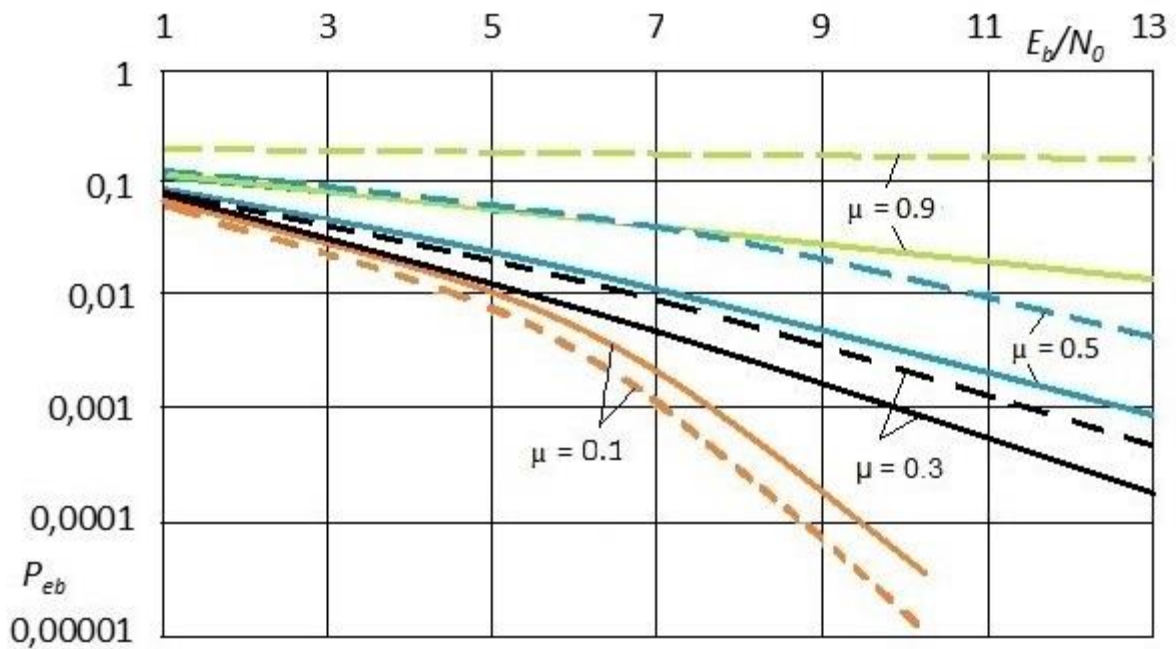


б)

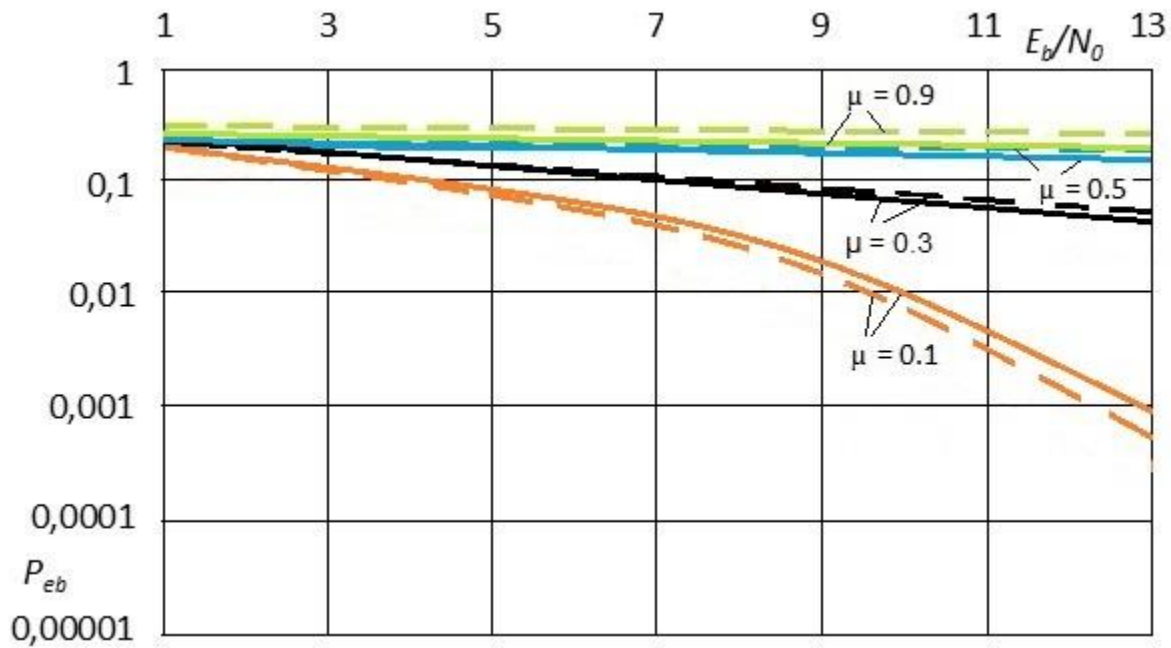
Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от интенсивности гармонической помехи μ при $E_b/N_0 = 7$ дБ: а) $M = 4$, б) $M = 16$. Штриховые линии – без АФ; сплошные линии – с АФ (алгоритм (2)).

2.3. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум.

Зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при наличии гармонической помехи с относительной интенсивностью μ приведены на рис. 5.



а)



б)

Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 (дБ) для: а) $M = 4$, б) $M = 16$. Штриховые линии – без АФ; сплошные линии – с АФ (алгоритм (2)).

Кривые для $M = 4$ совпадают с результатами, полученными в [13] для сигнала 4-ФМ, что закономерно. В этом случае использование адаптивного фильтра существенно повышает помехоустойчивость приема сигналов. Энергетический выигрыш при $\mu = 0,3$ составляет около 2 дБ, при $\mu = 0,5$ доходит до 4 дБ и увеличивается с возрастанием μ .

При $M = 16$ исследуемый алгоритм работы АФ, хотя и сохраняет работоспособность, но его эффективность низка – энергетический выигрыш при $\mu = 0,5$ составляет ориентировочно от 0,1 до 0,5 дБ. Это объясняется тем, что сигналы КАМ с $M \geq 16$ имеют амплитудную модуляцию, и скачки амплитуды, возникающие в тактовые моменты, приводят к резким изменениям комплексной огибающей и ее производной, что нарушает процесс адаптации (2).

Заключение

Проведенное исследование эффективности адаптивного фильтра с алгоритмом подстройки, контролирующим форму (наклон) фазового импульса принимаемого сигнала, при приеме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией на фоне гармонической помехи показало следующее:

1. Адаптивный фильтр эффективно подавляет гармоническую помеху с относительной интенсивностью $\mu > 0,2$ при приеме сигнала 4-КАМ. Энергетический выигрыш составляет 2 дБ и более;
2. При приеме сигналов КАМ с $M \geq 16$, имеющих, кроме фазовой, еще и амплитудную модуляцию, алгоритм сохраняет работоспособность, хотя эффективность использования этого адаптивного фильтра значительно ниже – энергетический выигрыш не превышает 0,5 дБ

Литература

1. Ложкин К.Ю., Петров А.В., Прожеторко С.С. Аналитические зависимости средней вероятности искажения бита М-КАМ сигнала на фоне гармонической или фазоманипулированной помех. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2018. Т.23. №5. С.32-41.
2. Ложкин К.Ю., Миронов В.А., Прожеторко С.С., Токарева Н.Ю. Эффективность приема М-КАМ-сигнала в условиях воздействия импульсной гармонической помехи. *Радиотехника*. 2018. №11. С.52-57.
3. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2018. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
4. Куликов Г.В., Лелюх А.А. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией при воздействии сканирующей помехи. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2019. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.2.5>

5. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В., Кузеленков П.И. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2019. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.10>
6. Курицын С.А. *Методы адаптивной обработки сигналов передачи данных*. Москва, Радио и связь. 1988. 144 с.
7. Уидроу Б., Стирнз С. Д. *Адаптивная обработка сигналов*. Пер. с англ. под ред. Шахгильдяна В. В. – Москва, Радио и связь. 1989. 440 с.
8. Джиган В.И. *Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы*. Москва, Техносфера. 2013. 530 с.
9. Патент на полезную модель RU 198305 U1. Куликов Г.В., Кулагин В.П., До Чунг Тиен, Лелюх А.А. *Адаптивный цифровой фильтр для подавления нефлуктуационных помех*. Дата заявки 26.02.2020. Опубликовано 30.06.2020. Бюл. № 19.
10. Treichler J.R., Agee V.G. A new approach to multipath correction of constant modulus signals. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*. 1983. V.ASSP-31. №2. P.459-472.
11. Куликов Г.В., До Чунг Тиен. Эффективность адаптивного фильтра с алгоритмом слежения за огибающей при приеме сигналов с многопозиционной ФМ на фоне нефлуктуационных помех. *Российский технологический журнал* [электронный журнал]. 2020. Т.8 (5). С.34-43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-34-43>.
12. Куликов Г.В. Два алгоритма адаптивной фильтрации нефлуктуационных помех при приеме модулированных сигналов с непрерывной фазой. *Научные технологии*. 2003. №6. С.19-23.
13. Куликов Г.В., До Чунг Тиен. Эффективность фазового алгоритма адаптивной фильтрации при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.9>

Для цитирования:

Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Адаптивная фильтрация гармонической помехи при приеме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.13>