

DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.9

УДК 621.391.072

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФАЗОВОГО АЛГОРИТМА АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ПРИЕМЕ СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

Г. В. Куликов, До Чунг Тиен

МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2020 г.

Аннотация. Для повышения пропускной способности радиоканалов современных цифровых навигационных, связных и телевизионных систем часто применяют многопозиционную фазовую манипуляцию (М-ФМ). Наличие в радиоканалах нефлуктуационных помех, таких как гармонические, ретранслированные, сканирующие и фазоманипулированные, существенно снижает помехоустойчивость приема дискретной информации, поэтому борьба с ними является важной задачей для каждой радиосистемы. Известным способом борьбы с нефлуктуационными помехами является использование адаптивных нерекурсивных фильтров с регулируемыми весовыми коэффициентами. В работе исследована эффективность применения адаптивного фильтра, использующего информацию о фазовой структуре М-ФМ сигнала. С помощью имитационного моделирования были определены оптимальные параметры фильтра (коэффициент адаптации, длина фильтра) и оценено влияние фильтра на помехоустойчивость квадратурного когерентного приемника сигналов М-ФМ при разных комбинациях помех и их интенсивности. Показано, что фильтр позволяет эффективно бороться с несколькими гармоническими помехами. По мере увеличения количества таких помех эффективность фильтрации снижается. Использование исследуемого адаптивного фильтра является эффективным способом борьбы с узкополосными фазоманипулированными помехами, особенно при их высокой интенсивности. Исследуемый адаптивный фильтр неэффективен для

подавления ретрансляционных помех. Эффективность фильтрации сканирующей помехи зависит от соотношения параметров адаптации фильтра и скорости сканирования помехи.

Ключевые слова: многопозиционная фазовая манипуляция, нефлуктуационные помехи, адаптивный фильтр, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки.

Abstract. Signals with multi-position phase shift keying (M-PSK) are often used to increase the radio channel capacity of modern digital navigation, communications and television systems. The presence of non-fluctuation interference in such radio channels, such as harmonic, retranslated, scanning, and interference with phase shift keying, significantly reduces the noise immunity of receiving discrete information, therefore, the fight against them is an important task for each radio system. A known way to combat non-fluctuation interference is the use of adaptive non-recursive filters with adjustable weight coefficients. In the work, the efficiency of using an adaptive filter using information about the phase structure of the M-PSK signal is studied. Using simulation, the optimal filter parameters were determined: adaptation coefficient, filter length, and the efficiency of using this adaptive filter in a quadrature coherent M-PSK signal receiver was evaluated for different combinations of interference and their intensity. In the simulation, the noise immunity of M-PSK signal reception was evaluated, namely, the dependence of the probability of a bit error on the signal-to-noise ratio. It is shown that the filter allows you to effectively deal with several harmonic interference. As the amount of such interference increases, the filtering efficiency decreases. The use of the adaptive filter under study is an effective way to deal with narrow-band interference with phase shift keying, especially at its high intensity. The adaptive filter under study is ineffective for suppressing retranslated interference. The filtering efficiency of the scanning interference depends on the ratio of the filter adaptation parameters and the scanning speed of the interference.

Key words: multi-position phase shift keying, non-fluctuation interference, adaptive filter, noise immunity, bit error probability.

1. Введение

Энергетические и спектральные преимущества сигналов с фазовой манипуляцией предопределили их широкое применение в современных цифровых навигационных, связных и телевизионных системах. Использование таких сигналов заложено в коммуникационных стандартах DVB-S, DVB-S2/S2X, ГЛОНАСС, CDMA, Wi-Fi IEEE 802.11 и др. Для повышения пропускной способности радиоканалов часто применяют многопозиционную фазовую манипуляцию (М-ФМ). Наличие в таких радиоканалах нефлуктуационных помех существенно снижает помехоустойчивость приема дискретной информации [1-9], поэтому борьба с ними является важной задачей для каждой радиосистемы. Известным способом борьбы с нефлуктуационными помехами является использование адаптивных нерекурсивных фильтров с регулируемыми весовыми коэффициентами (ВК) [10, 11]. В частности, в [12-14] предложен алгоритм адаптивной фильтрации, использующий информацию о фазовой структуре сигнала.

Целью работы является анализ эффективности применения адаптивного фильтра, использующего информацию о фазовой структуре полезного сигнала, для подавления нефлуктуационных помех при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией.

2. Математические модели сигнала и помех

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

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i), \quad \varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, \quad t \in (0, T_s], \quad i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

где $A_0 = \sqrt{2E_s/T_s}$ – амплитуда сигнала; $E_s = kE_b$ – энергия канального символа; E_b – энергия, приходящаяся на один бит информации; ω_0 – несущая частота.

Процесс на входе приемника имеет вид:

$$x(t) = s_i(t) + s_n(t) + n(t), \quad (2)$$

где $n(t)$ – стационарный случайный процесс типа «белый гауссовский шум» с нулевым средним значением и дельта-функцией корреляции:

$$\langle n(t) \rangle = 0; \langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1),$$

N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума; $s_n(t)$ – нефлуктуационная помеха одного из четырех видов (или их совокупность):

1. Гармоническая помеха:

$$s_{n1}(t) = \mu A_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_n)t + \varphi_n] \quad (3)$$

с относительной интенсивностью μ , частотной расстройкой $\Delta\omega_n$ и случайной начальной фазой φ_n .

2. Ретранслированная помеха:

$$s_{n2}(t) = \mu s_i(t - \tau, \varphi_n), \quad (4)$$

где τ – временная задержка помехи.

3. Сканирующая помеха

$$s_{n3}(t) = \mu A_0 \cos(\omega_n(t)t + \varphi_n), \quad (5)$$

$$\omega_n(t) = \omega_0 + \Delta\omega_d - \frac{2\Delta\omega_d t}{T_c}, \quad (6)$$

где $\Delta\omega_d$ – девиация помехи, T_c – период сканирования.

4. Фазоманипулированная помеха

$$s_{n4}(t) = \mu A_0 a_j \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_n)t + \varphi_n], t \in ((j-1)T_n, jT_n), j = 1, \dots, R, \quad (7)$$

$a_j = \pm 1$ – случайный символ помехи, T_n – длительность символа помехи, $R = T_s / T_n$.

3. Модель приемника и алгоритм работы нерекурсивного фильтра

Для приёма сигнала М-ФМ используется когерентный квадратурный демодулятор, на входе которого установлен адаптивный нерекурсивный фильтр.

Элемент выходной последовательности нерекурсивного фильтра длиной N в пространстве комплексных огибающих можно записать следующим образом:

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

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

При одинаковой структуре фильтры такого типа отличаются способами настройки вектора ВК, направленными на минимизацию заданной целевой функции. В данной работе проанализирована эффективность адаптивного фильтра, выполненного на основе алгоритма настройки вектора ВК, контролирующего фазовую траекторию принимаемого процесса [13-14]:

$$\mathbf{W}^{i+1} = \mathbf{W}^i - d \cdot (|y'_i| - G) y_i \mathbf{X}_i^*,$$

где d – коэффициент, определяющий степень инерционности и устойчивость процесса адаптации, G – модуль производной информационной составляющей фазы на длительности тактового интервала полезного сигнала, который для рассматриваемых сигналов равен нулю.

4. Результаты моделирования

Результаты получены с помощью компьютерного имитационного моделирования. Вначале были определены общие параметры адаптации.

А. Определение оптимального значения коэффициента адаптации d .

Для определения оптимального значения параметра проводилась оценка по критерию минимума вероятности битовой ошибки BER для трех значений позиционности сигналов М-ФМ: $M=2$ (BPSK), $M=4$ (QPSK) и $M=8$ (8PSK).

Из рис. 1 видно, что при $d=10^{-6}$ адаптация осуществляется наилучшим образом, и такое значение этого параметра приближается к оптимальному.

Точность фильтрации, а, следовательно, и вероятность битовой ошибки BER приемника существенно зависят от длины фильтра N . Это иллюстрирует рис. 2, из которого видно, что при $N < 128$ значения BER возрастают. При $N > 256$ значения BER практически стабилизируются на минимальном уровне.

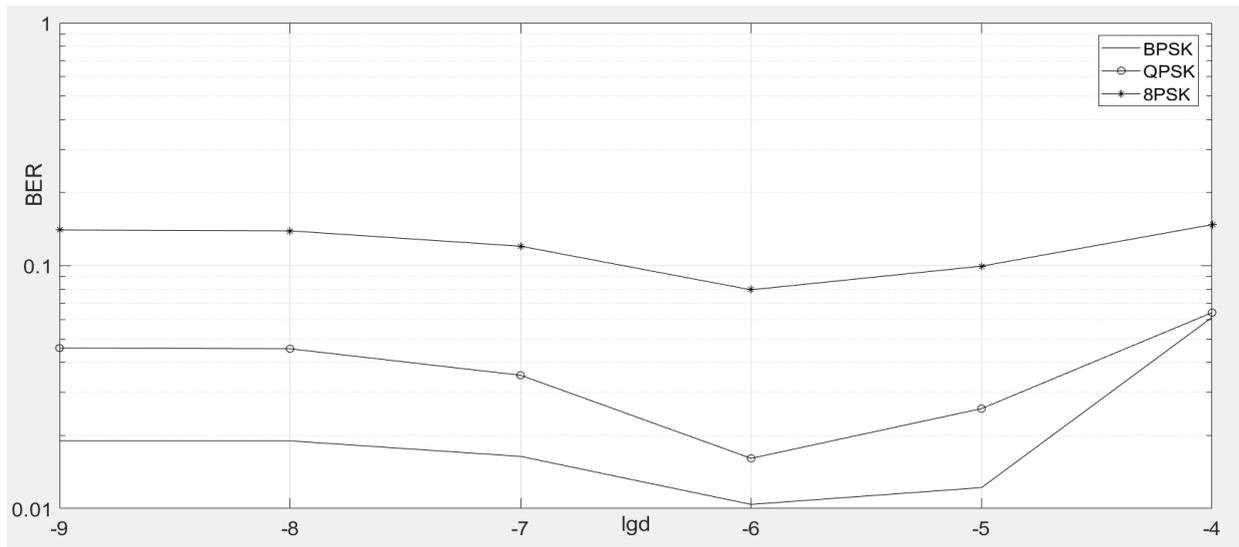


Рис 1. Зависимость вероятности битовой ошибки от коэффициента адаптации d .

В. Определение необходимой длины нерекурсивного фильтра.

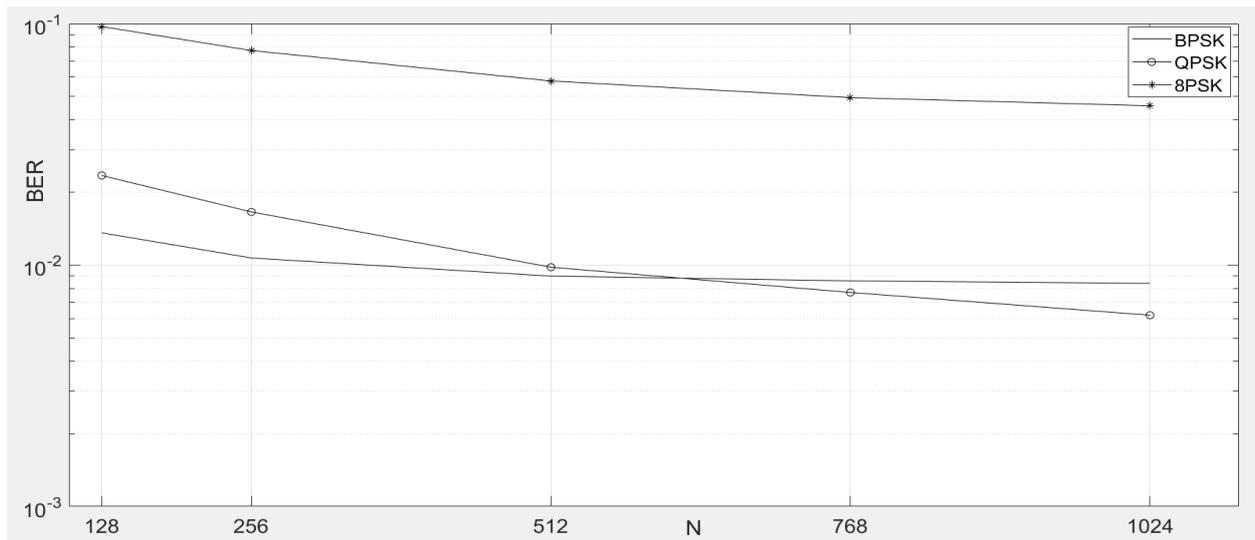
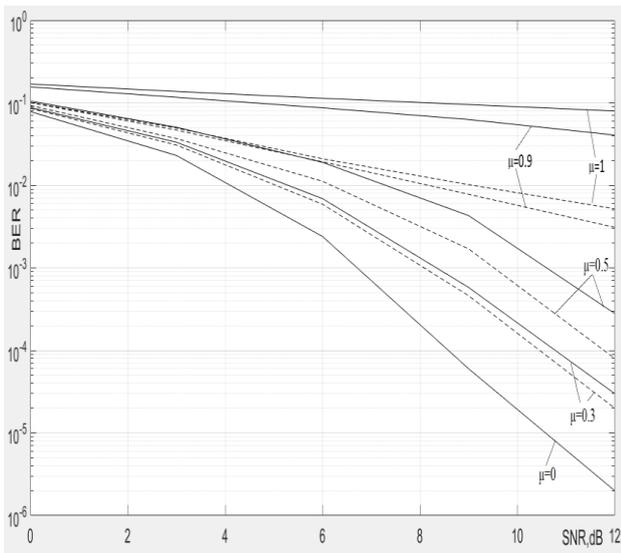


Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки от длины фильтра N .

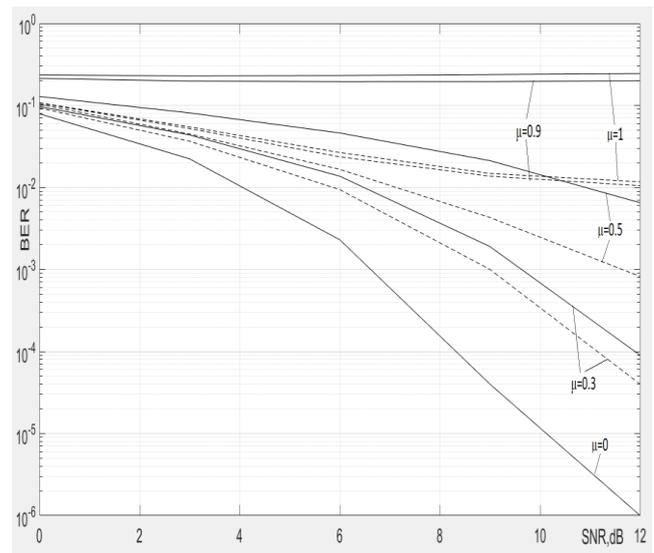
С. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум.

Исследования зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум $SNR=E_b/N_0$ были проведены для различной помеховой ситуации в радиоканале: шум, гармоническая помеха, ретранслированная помеха, обе помехи одновременно, фазоманипулированная и сканирующая помехи.

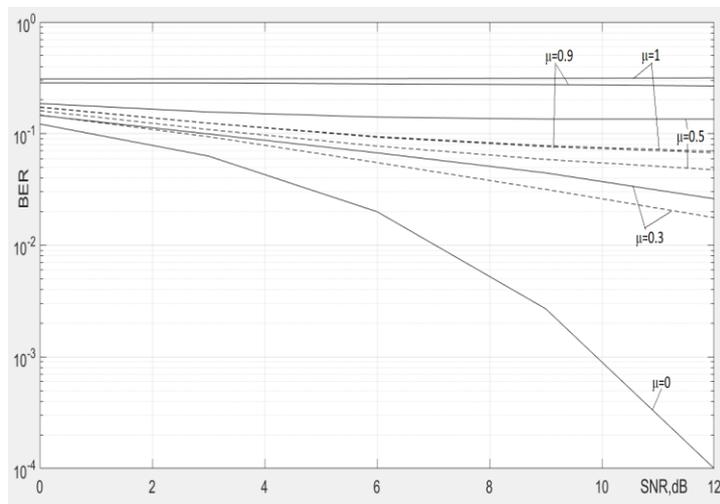
1) На входе приемника присутствуют сигнал, шум и гармоническая помеха ($\Delta\omega_n=0$).



а)



б)



в)

Рис 3. Зависимость BER от SNR при наличии гармонической помехи:
а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

На рис. 3 пунктиром показаны зависимости вероятности битовой ошибки BER от SNR при наличии исследуемого адаптивного фильтра, сплошными линиями даны кривые, полученные без фильтра. Из сравнения графиков видно, что эффективность фильтра весьма высока, и вероятность битовой ошибки при его использовании значительно снижается. Это особенно заметно при большой интенсивности помехи.

2) *Зависимость вероятности битовой ошибки от количества гармонических помех на входе приемника.*

На рис. 4 и 5 показаны зависимости вероятности битовой ошибки при $SNR=7dB$ от количества L гармонических помех одинаковой интенсивности $\mu=0.5$, одновременно присутствующих на входе приемника и имеющих разные частотные расстройки $\Delta\omega_{\Pi}$ относительно несущей частоты сигнала. Графики на рис. 4 получены без адаптивного фильтра, а графики на рис. 5 – с адаптивным фильтром. Видно, что адаптивный фильтр при всех значениях L улучшает помехоустойчивость приема, но при увеличении числа гармонических помех эффективность фильтра несколько снижается.

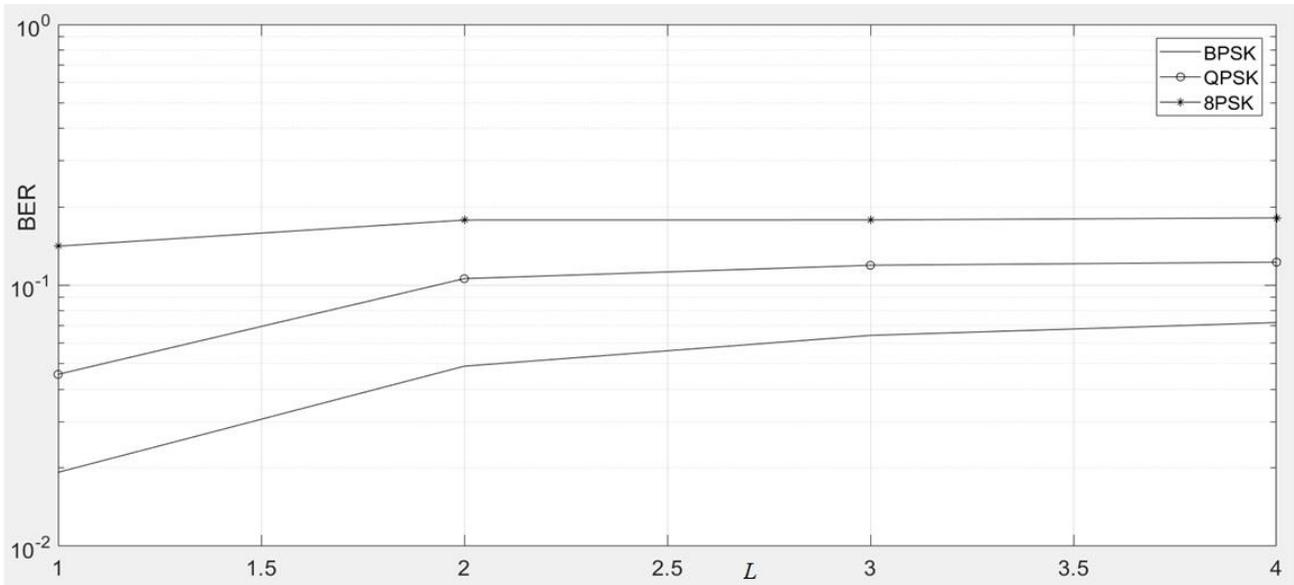


Рис. 4. Зависимость BER от количества L гармонических помех без адаптивного фильтра.

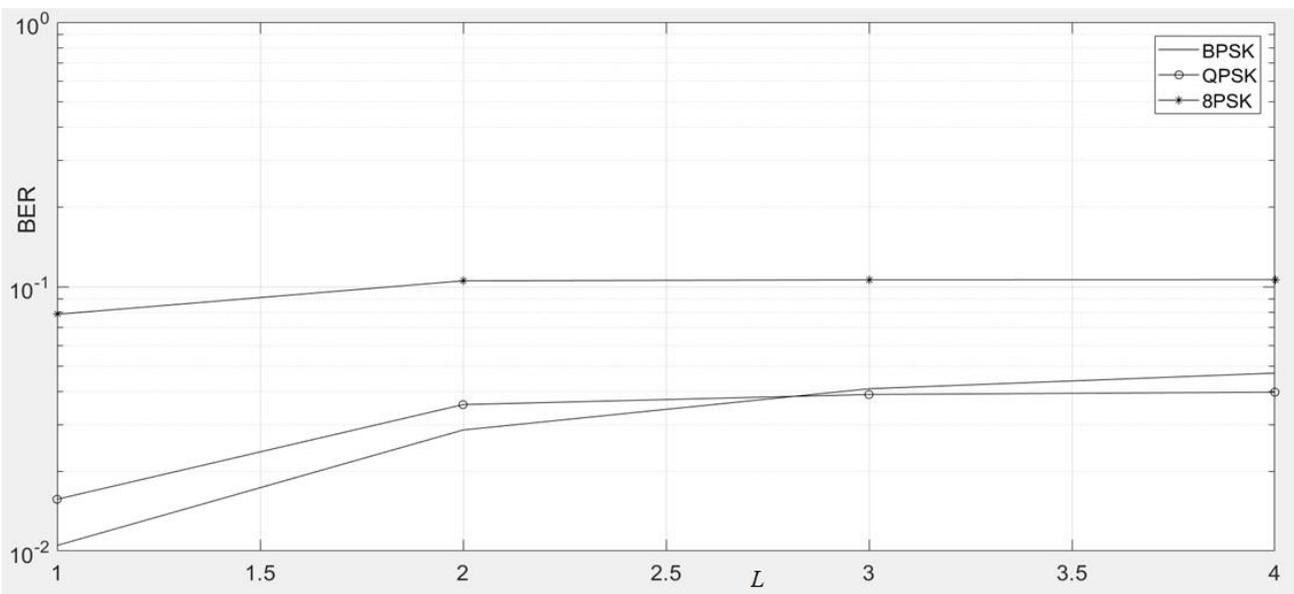


Рис. 5. Зависимость BER от количества L гармонических помех с адаптивным фильтром.

Режекция гармонических помех в частотной области хорошо иллюстрируется рис. 6 и 7, где, соответственно, показаны спектры сигнала и помех до адаптивного фильтра (отмечены крестиками на нижней части рис. 6) и амплитудно-частотная характеристика этого фильтра в установившемся состоянии.

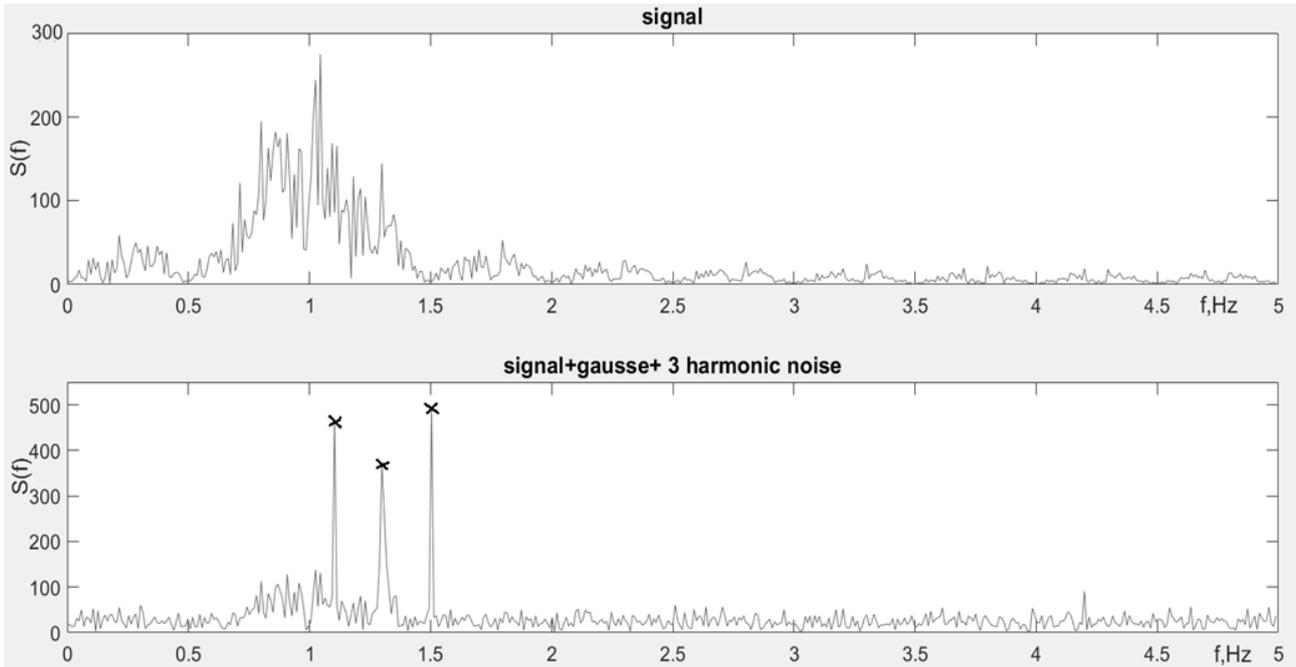


Рис. 6. Спектры сигнала и трех гармонических помех.

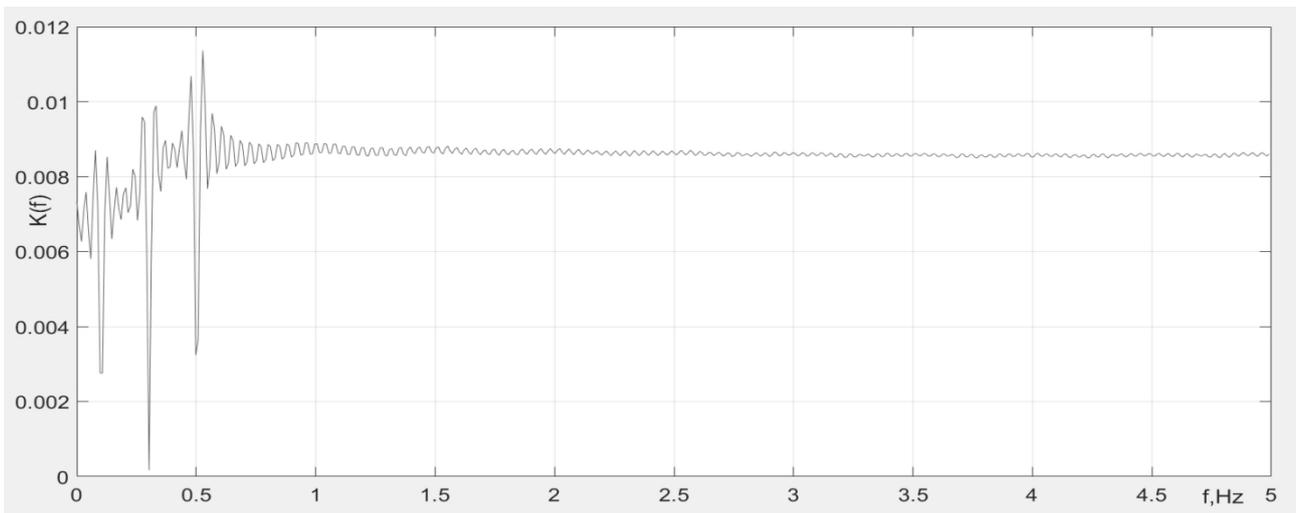


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика адаптивного фильтра при трех гармонических помехах.

3) На входе приемника присутствует сигнал, шум и ретранслированная помеха ($\tau=0.5T_s$).

Установлено, что исследуемый адаптивный фильтр не подавляет ретранслированную помеху, которая имеет такие же информационные фазовые параметры, что и полезный сигнал, и его использование не изменяет величины BER.

4) На входе приемника присутствует сигнал, шум, гармоническая ($\Delta\omega_n=0$) и ретранслированная помеха ($\tau=0.5T_s$).

Использование фильтра (пунктирные линии на рис. 8) несколько снижает величину BER за счет подавления гармонической помехи, но, она остается достаточно высокой из-за невозможности подавления ретранслированной помехи.

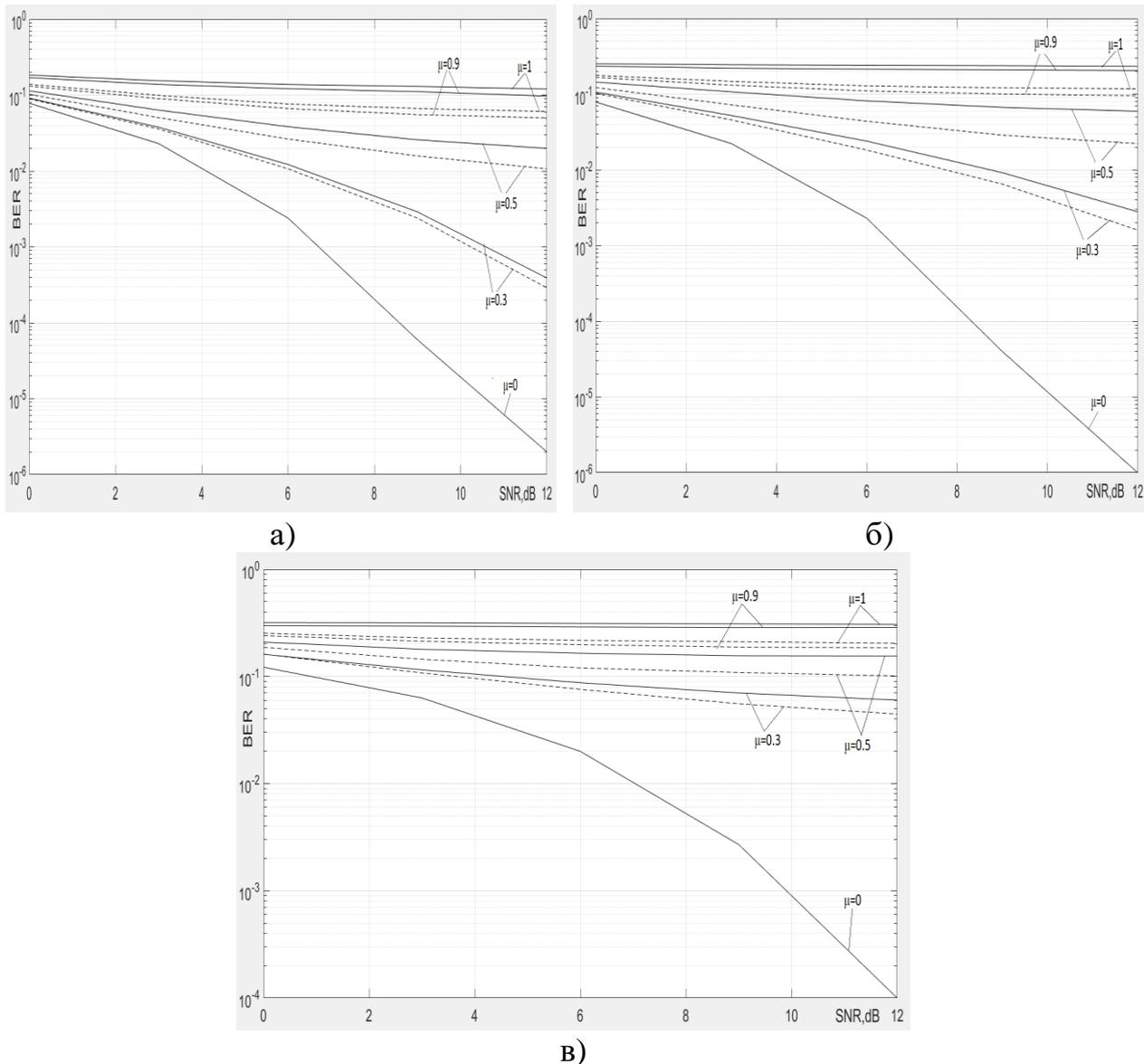


Рис. 8. Зависимость BER от SNR при наличии гармонической и ретранслированной помех: а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

5) На входе приемника присутствует сигнал, шум и фазоманипулированная помеха.

Для примера рассмотрен случай, когда фазоманипулированная помеха имеет скорость передачи в два раза меньшую, чем символьная скорость сигнала М-ФМ ($R=0.5$). Видно, что положительный эффект от использования адаптивного фильтра (пунктирные линии на рис. 9) проявляется незначительно и наблюдается лишь при большой интенсивности помехи. Это объясняется тем фактом, что при режекции помехи в спектральной области (рис. 10, 11) производится также и режекция значительной части полезного сигнала. При дальнейшем снижении скорости передачи помехи эффективность фильтра растет, приближаясь к соответствующей эффективности при гармонической помехе.

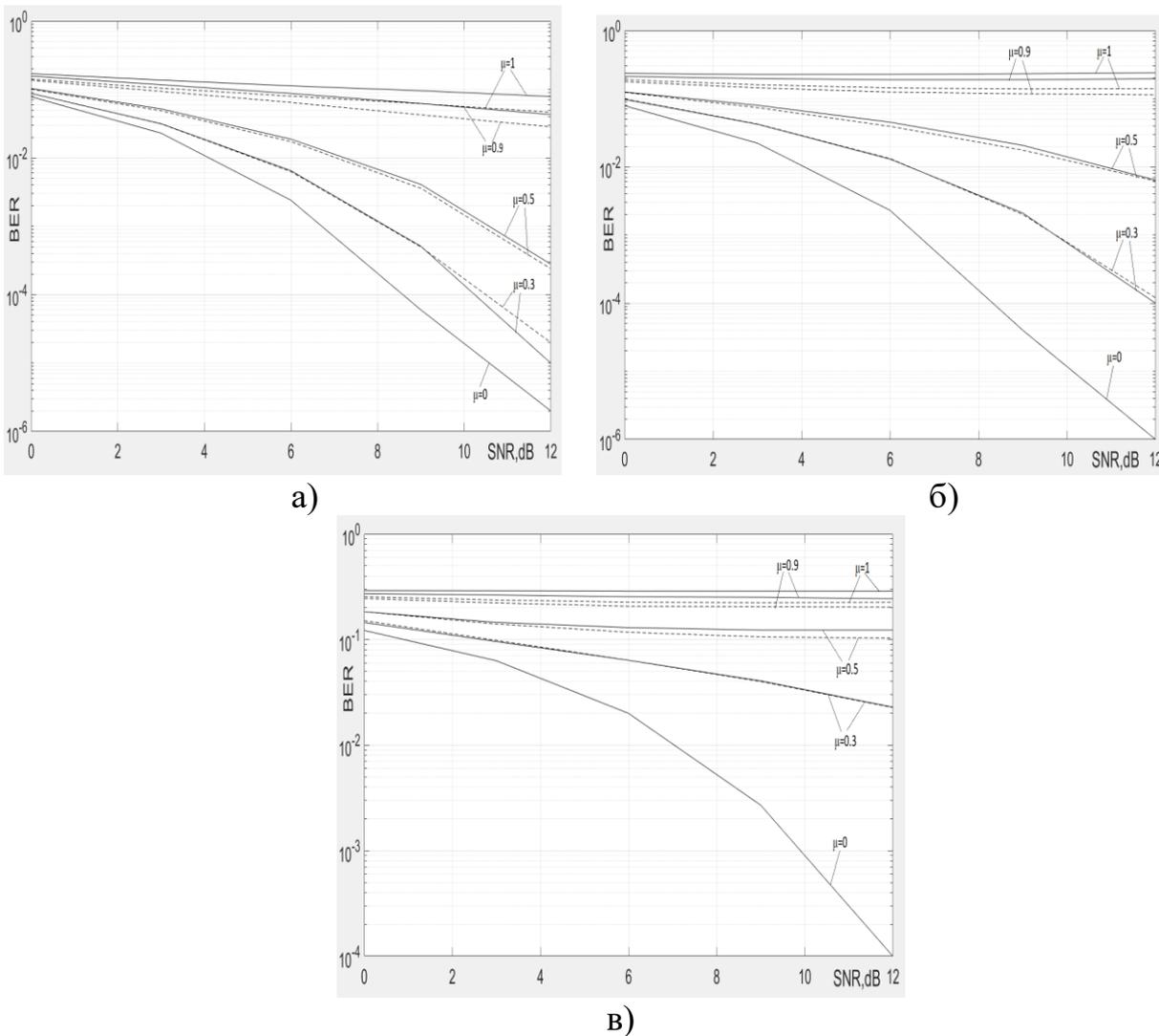


Рис. 9. Зависимость BER от SNR при наличии фазоманипулированной помехи:
 а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

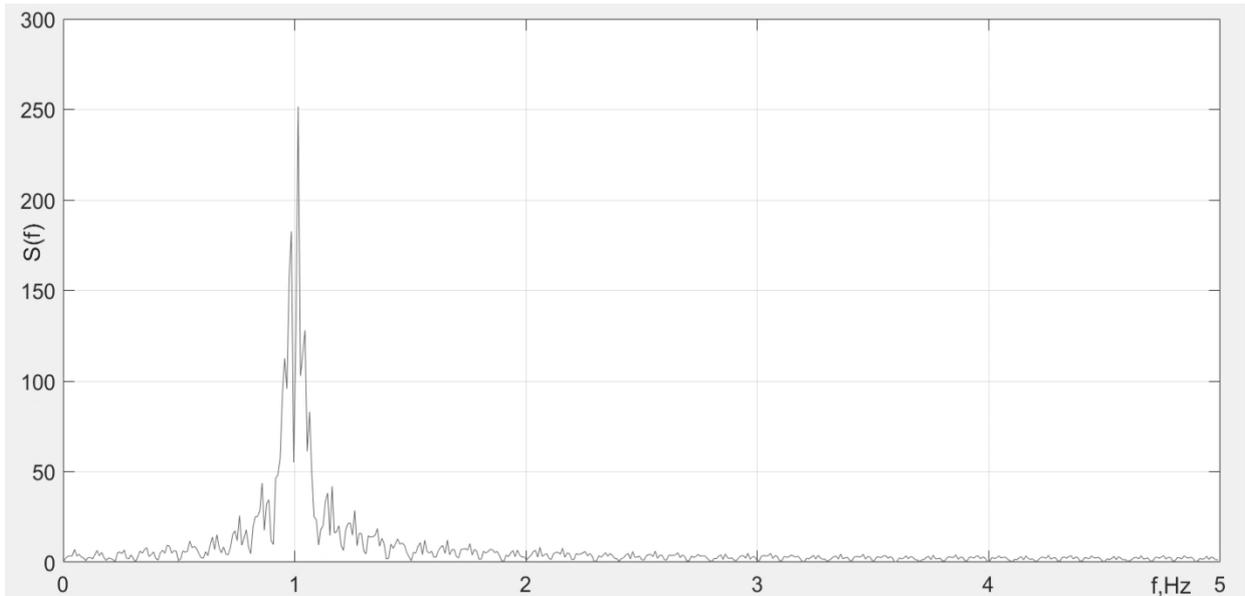


Рис. 10. Спектр фазоманипулированной помехи ($K=0.5$).

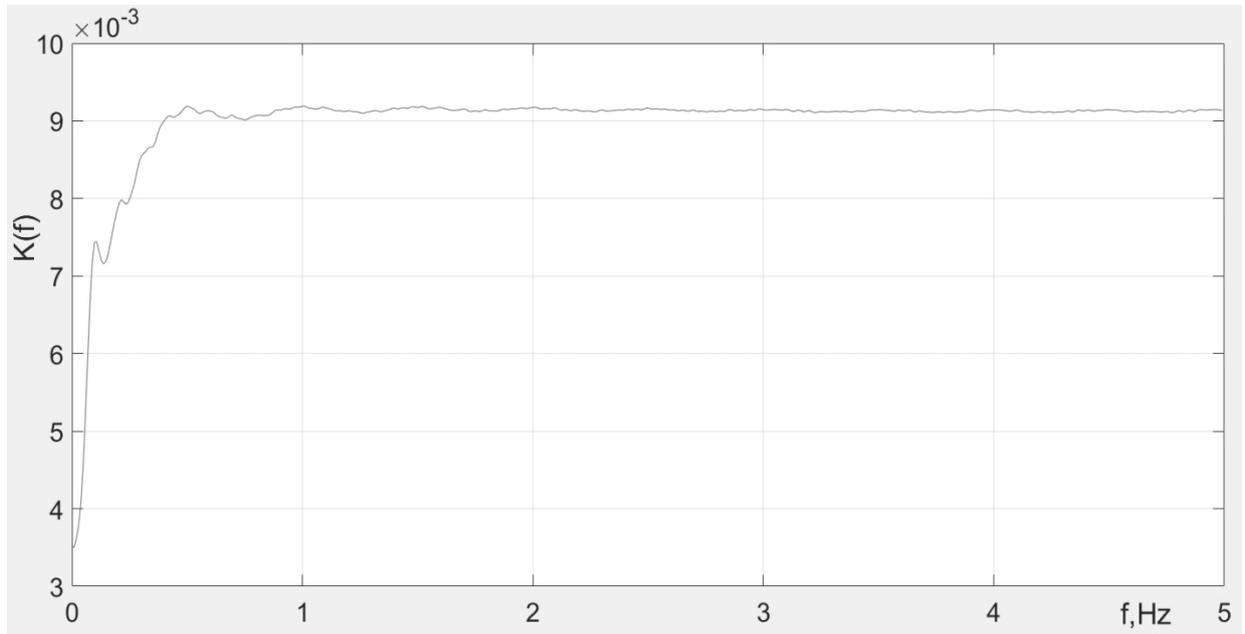
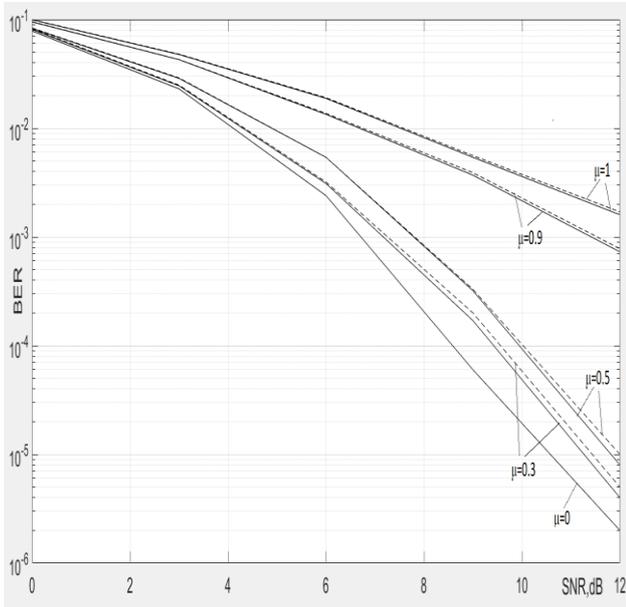


Рис. 11. Амплитудно-частотная характеристика адаптивного фильтра при наличии фазоманипулированной помехи.

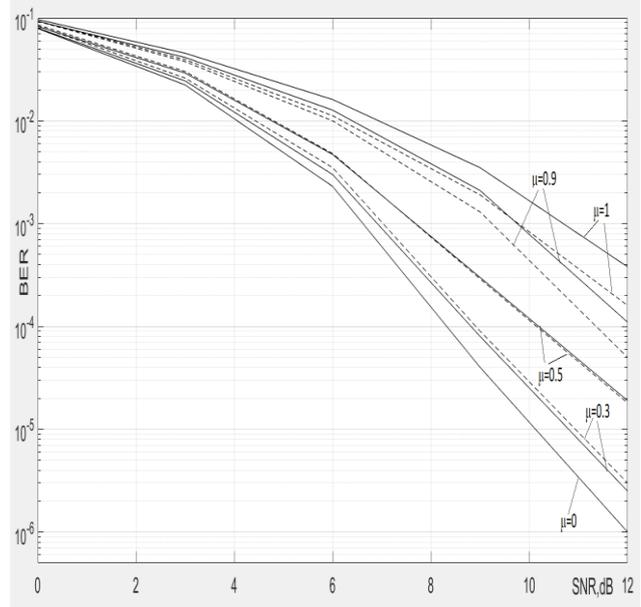
б) На входе приемника присутствует сигнал, шум и сканирующая помеха с девиацией $\Delta\omega_d T_s=5$ и периодом повторения $T_c=20$.

Степень подавления сканирующей помехи зависит от значений позиционности сигнала M и интенсивности помехи μ . Из рис. 12 видно, что при позиционности $M=4, 8$ и большой интенсивности μ ($\mu=0.9, 1$) фильтрация осуществляется, но вероятность битовой ошибки все же остается высокой. Это объясняется необходимостью проведения в фильтре двух процессов

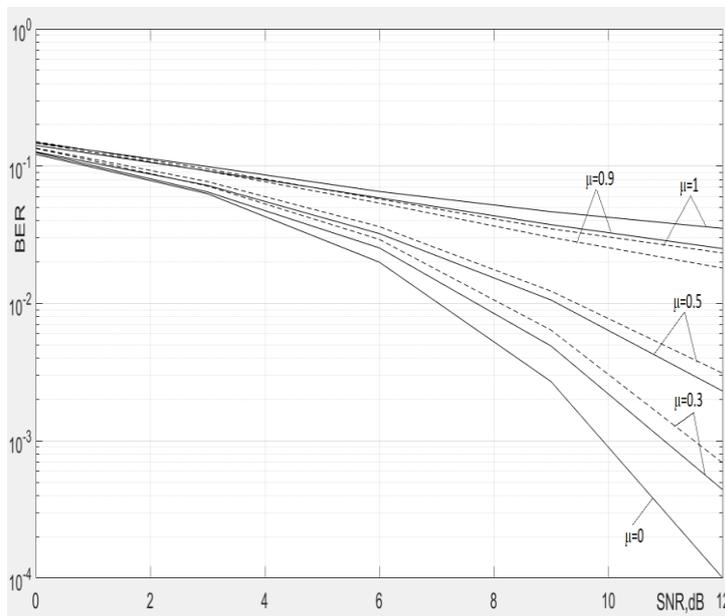
одновременно: адаптивной подстройки весовых коэффициентов и динамической перестройки частоты режекции адаптивного фильтра при изменении частоты сканирующей помехи. Для улучшения характеристик необходимо более тонко оптимизировать величину коэффициента адаптации d .



а)



б)



в)

Рис. 12. Зависимость BER от SNR при наличии сканирующей помехи:
а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

5. Заключение

Проведенный анализ эффективности применения адаптивного фильтра с алгоритмом подстройки весовых коэффициентов, контролирующим фазовую траекторию принимаемого сигнала, при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией на фоне нефлуктуационных помех позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование исследуемого адаптивного фильтра является эффективным способом борьбы с гармоническими и узкополосными фазоманипулированными помехами, особенно при их большой интенсивности.
2. Исследуемый адаптивный фильтр неэффективен для подавления ретранслированной помехи.
3. Эффективность фильтрации сканирующей помехи зависит от соотношения параметров адаптации фильтра и скорости сканирования помехи.

Литература

1. Rosenbaum Arnold S. PSK error performance with Gaussian noise and interference // BSTJ. 1969. Vol. 48. P. 413–442.
2. Nandi M. Symbol Error Probability of Coherent PSK System in the Presence of Two Path Interference // International Journal of Physics and Applications. 2013. Vol. 5. № 2. P. 133–137.
3. Mohammad Samir Modabbes and Salem Nasri . Bit Error Rate Analysis for BPSK Modulation in Presence of Noise and Two Co-channel Interferens // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. 2010. Vol. 10. №. 5. P. 152–155.
4. Marco Chiani, Moe Z. Win and Alberto Zanella. Error Probability for Optimum Combining of M-ary PSK Signals in the Presence of Interference and Noise // IEEE Transactions on Communications. 2003. Vol. 51. №. 11. P. 1949–1957.
5. Milošević M.S. and Stefanović M.Č. Performance Loss Due to Atmospheric Noise and Noisy Carrier Reference Signal in QPSK Communication Systems // Elektronika i Elektrotehnika. 2005. Vol. 58. №.2. P. 5–9.

6. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Научные технологии. 2018. № 11. С. 32–38.
7. Нгуен Ван Зунг. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/4/text.pdf>. DOI [10.30898/1684-1719.2019.3.4](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4).
8. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен. Влияние фазоманипулированной помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией // Российский технологический журнал [электронный журнал]. 2019. Т. 7. № 2. С. 18–28. Режим доступа: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/4c2/RTZH_2_2019_18_28.pdf. DOI: [10.32362/2500-316X-2019-7-2-18-28](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-18-28).
9. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи // Российский технологический журнал [электронный журнал]. 2018. Т. 6. № 6. С. 5–12. Режим доступа: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/947/RTZH_6_2018_5_12.pdf. DOI: [10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12).
10. Уидроу Б., Стирнз С. Д. Адаптивная обработка сигналов. Пер. с англ. под ред. Шахгильдяна В. В. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
11. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: Техносфера, 2013. – 530 с.
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., Кулагин В.П., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен. Адаптивный цифровой фильтр для подавления нефлуктуационных помех. Патент на полезную модель RU 194496 U1. Дата регистрации: 12.12.2019.

14. Куликов Г.В., Кулагин В.П., Шмелева А.Г., Наумов В.В. Программа адаптивного цифрового фильтра со слежением за фазой сигнала. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661320, зарег. 27.08.2019.

Для цитирования:

Куликов Г.В., До Чунг Тиен. Эффективность фазового алгоритма адаптивной фильтрации при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией. Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/9/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.9