

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-34-43>



УДК 621.391.072

## Эффективность адаптивного фильтра с алгоритмом слежения за огибающей при приеме сигналов с многопозиционной ФМ на фоне нефлуктуационных помех

Г.В. Куликов<sup>@</sup>,  
До Чунг Тиен

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия  
<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Энергетические и спектральные преимущества сигналов с фазовой манипуляцией предопределили их широкое применение в современных цифровых навигационных, связанных и телевизионных системах. Использование такого вида сигнала в многопозиционном формате с увеличенным количеством возможных фазовых состояний позволяет повысить информационную емкость канального символа, а вследствие этого – пропускную способность радиоканалов. Наличие в радиоканалах нефлуктуационных помех сильно снижает помехоустойчивость приема информации. Известным способом борьбы с такими помехами является использование в приемнике адаптивных нерекурсивных фильтров. В статье оценивается эффективность применения адаптивного нерекурсивного фильтра с алгоритмом настройки весовых коэффициентов, следящим за постоянной огибающей полезного сигнала, при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией на фоне шумовых и нефлуктуационных помех. Рассматриваются два типа таких помех – гармонические и ретранслированные. С помощью компьютерного моделирования определяются оптимальные параметры фильтра (коэффициент адаптации и его длина); оценивается влияние фильтра на помехоустойчивость квадратурного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией для различных комбинаций помех и их интенсивности. Показано, что такой адаптивный фильтр может успешно справляться с наиболее опасными прицельными гармоническими помехами.

**Ключевые слова:** многопозиционная фазовая манипуляция, гармоническая помеха, ретранслированная помеха, адаптивный фильтр, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки.

*Для цитирования:* 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*. 2020;8(5):34-43. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-5-34-43>

## Efficiency of adaptive filter with envelope tracking algorithm when receiving signals with multi-position PSK against the background of non-fluctuation interferences

Gennady V. Kulikov<sup>@</sup>,  
Do Trung Tien

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia  
<sup>@</sup>Corresponding author, e-mail: [kulikov@mirea.ru](mailto:kulikov@mirea.ru)

The energy and spectral advantages of signals with phase-shift keying predetermined their widespread use in modern digital navigation, communications and television systems. The use of this type of signal in a multi-position format with an increased number of possible phase states allows increasing the information capacity of the channel signal, and consequently the throughput rate of radio channels. The presence of non-fluctuation interference in such radio channels greatly reduces the noise immunity of information reception. A well-known way to deal with such interference is to use adaptive non-recursive filters in the receiver. The article evaluates the effectiveness of using such a filter with an algorithm for setting weight coefficients that controls the constant envelope of a useful signal when receiving signals with multi-position phase shift keying against the background of noise and non-fluctuation interference. Two types of such interference are considered – harmonic and relayed. Using computer simulation, the optimal filter parameters (adaptation coefficient and its length) are determined; the effect of the filter on the noise immunity of the quadrature signal receiver with multi-position phase shift keying for various combinations of interference and their intensity is estimated. It is shown that such an adaptive filter can successfully cope with the most dangerous sighting harmonic interference.

**Keywords:** multi-position phase shift keying, non-fluctuation interference, adaptive filter, noise immunity, bit error rate.

**For citation:** Kulikov G.V., Do Trung Tien. Efficiency of adaptive filter with envelope tracking algorithm when receiving signals with multi-position PSK against the background of non-fluctuation interferences. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):34-43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-5-34-43>

### Введение

Широкое применение сигналов с фазовой манипуляцией в современных цифровых связных, телевизионных и навигационных системах связано с их энергетическими и спектральными преимуществами. Использование таких сигналов с многопозиционным форматом (М-ФМ) позволяет существенно повысить информационную емкость канального символа и, как следствие, увеличить пропускную способность радиоканала. При этом наличие помех в радиоканале, в том числе, гармонических и ретранслированных,

сильно снижает помехоустойчивость систем передачи данных, особенно при большой позиционности применяемых сигналов [1–7]. Борьба с такими помехами является важной задачей для каждой радиосистемы.

Известным способом борьбы с нефлуктуационными помехами является использование адаптивных нерекурсивных фильтров (рис. 1) с регулируемыми весовыми коэффициентами (ВК) [8–10]. Так, в [8] предложен алгоритм подстройки коэффициентов, учитывающий постоянную огибающую полезного сигнала. В [11] проведен анализ работоспособности алгоритма на примере приема модулированных сигналов с непрерывной фазой и показана его эффективность.

Целью работы является анализ эффективности применения адаптивного фильтра, учитывающего постоянную огибающую полезного сигнала, для подавления гармонических и ретранслированных помех при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией и анализ помехоустойчивости приема.

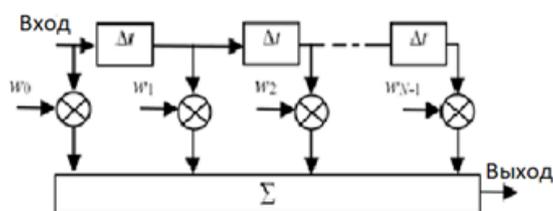


Рис. 1. Адаптивный нерекурсивный фильтр.

### Математическая модель сигнала и помех

Передаваемый 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:

$$s_i(t) = S_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i), \quad \varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, \quad t \in (0; T_s], \quad i = 0, 1, \dots, M - 1, \quad (1)$$

где  $S_0 = \sqrt{2E_s/T_s}$  – амплитуда сигнала;  $E_s = kE_b$  – энергия канального символа;  $E_b$  – энергия, приходящаяся на один бит информации;  $\omega_0$  – несущая частота.

На входе приемника процесс имеет вид:

$$x(t) = s_i(t) + s_{\text{int}}(t) + n(t),$$

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

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

$N_0$  – односторонняя спектральная плотность мощности шума;  $s_{\text{int}}(t)$  – нефлуктуационная помеха одного из двух видов (или их совокупность):

1. Гармоническая помеха:

$$s_{\text{int}}(t) = \mu A_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_{\text{int}})t + \varphi_{\text{int}}] \quad (2)$$

с относительной интенсивностью  $\mu$ , частотной расстройкой  $\Delta\omega_{\text{int}}$  и случайной начальной фазой  $\varphi_{\text{int}}$ .

2. Ретранслированная помеха:

$$s_{\text{int}}(t) = \mu s(t - \tau, \varphi_{\text{int}}), \quad (3)$$

где  $\tau$  – временная задержка помехи.

### Модель приемника и алгоритм работы нерекурсивного фильтра

Для приёма сигнала М-ФМ используется когерентный квадратурный приёмник (рис. 2).

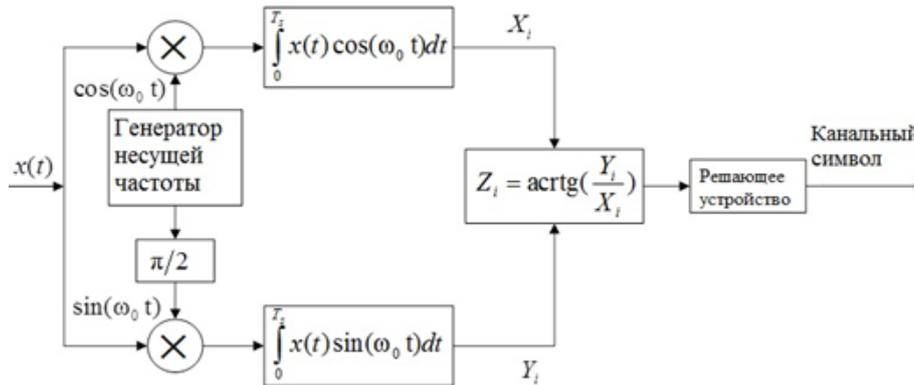


Рис. 2. Когерентный квадратурный приёмник.

На входе приемника установлен адаптивный нерекурсивный фильтр (рис. 1), выполненный на основе алгоритма настройки вектора ВК [8]:

$$\mathbf{W}^{i+1} = \mathbf{W}^i - d \cdot (|b_i|^2 - 1) b_i \mathbf{A}_i^*.$$

Здесь  $d$  – коэффициент, определяющий степень инерционности и устойчивость процесса адаптации,  $(\cdot)^*$  – знак комплексного сопряжения,  $\mathbf{A}_i = [a_i, a_{i-1}, \dots, a_{i-N+1}]^T$  – вектор последовательности входных отсчетов фильтра;  $\mathbf{W}^i = [w_0^i, w_1^i, \dots, w_{N-1}^i]$  – вектор ВК в  $i$ -й момент времени,  $b_i$  – элемент выходной последовательности нерекурсивного фильтра.

### Результаты моделирования

Результаты получены с помощью компьютерного имитационного моделирования. При этом использована программа [12].

#### А. Определение оптимального значения коэффициента адаптации $d$ .

Вначале было определено оптимальное значение коэффициента адаптации  $d$ . Оценка проводилась 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. 3 видно, что при  $d = 10^{-7}$  адаптация осуществляется наилучшим образом, и такое значение этого параметра приближается к оптимальному.

#### В. Зависимость вероятности битовой ошибки от длины нерекурсивного фильтра.

Точность фильтрации, а, следовательно, и вероятность битовой ошибки BER приемника существенно зависят от длины фильтра  $N$ . Это иллюстрирует рис. 4, из которого видно, что при  $N < 128$  значения BER возрастают. При  $N > 128$  значения BER практически стабилизируются на минимальном уровне.

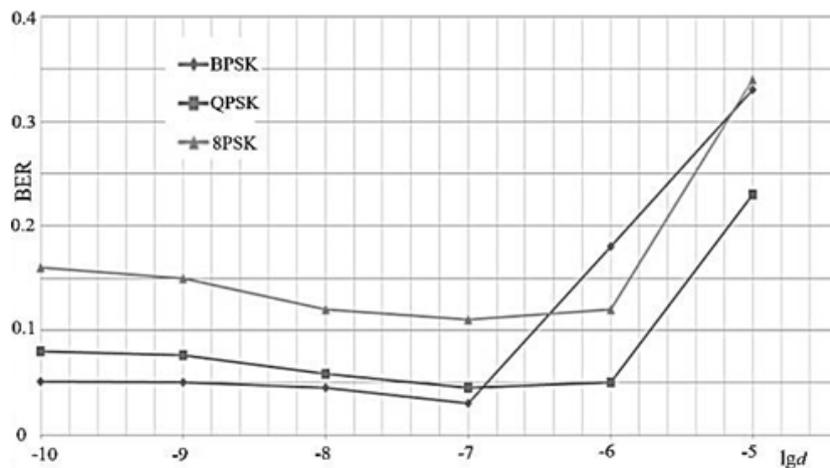


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от коэффициента адаптации  $d$ .

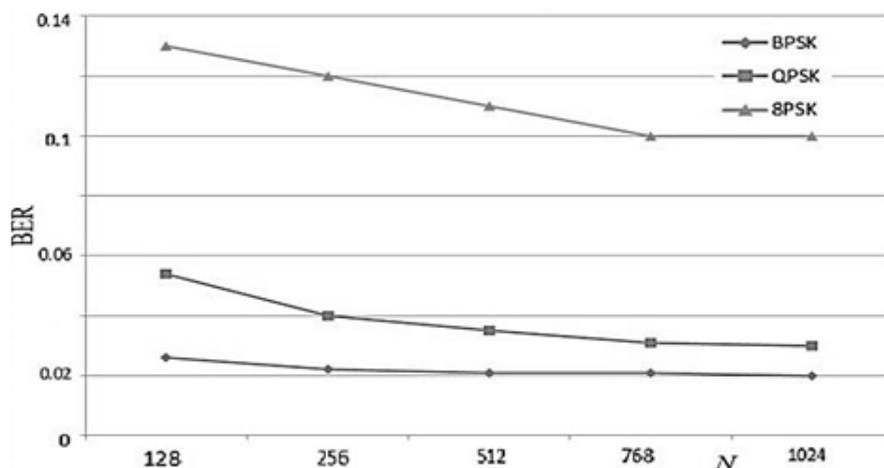


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от длины фильтра  $N$ .

### С. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

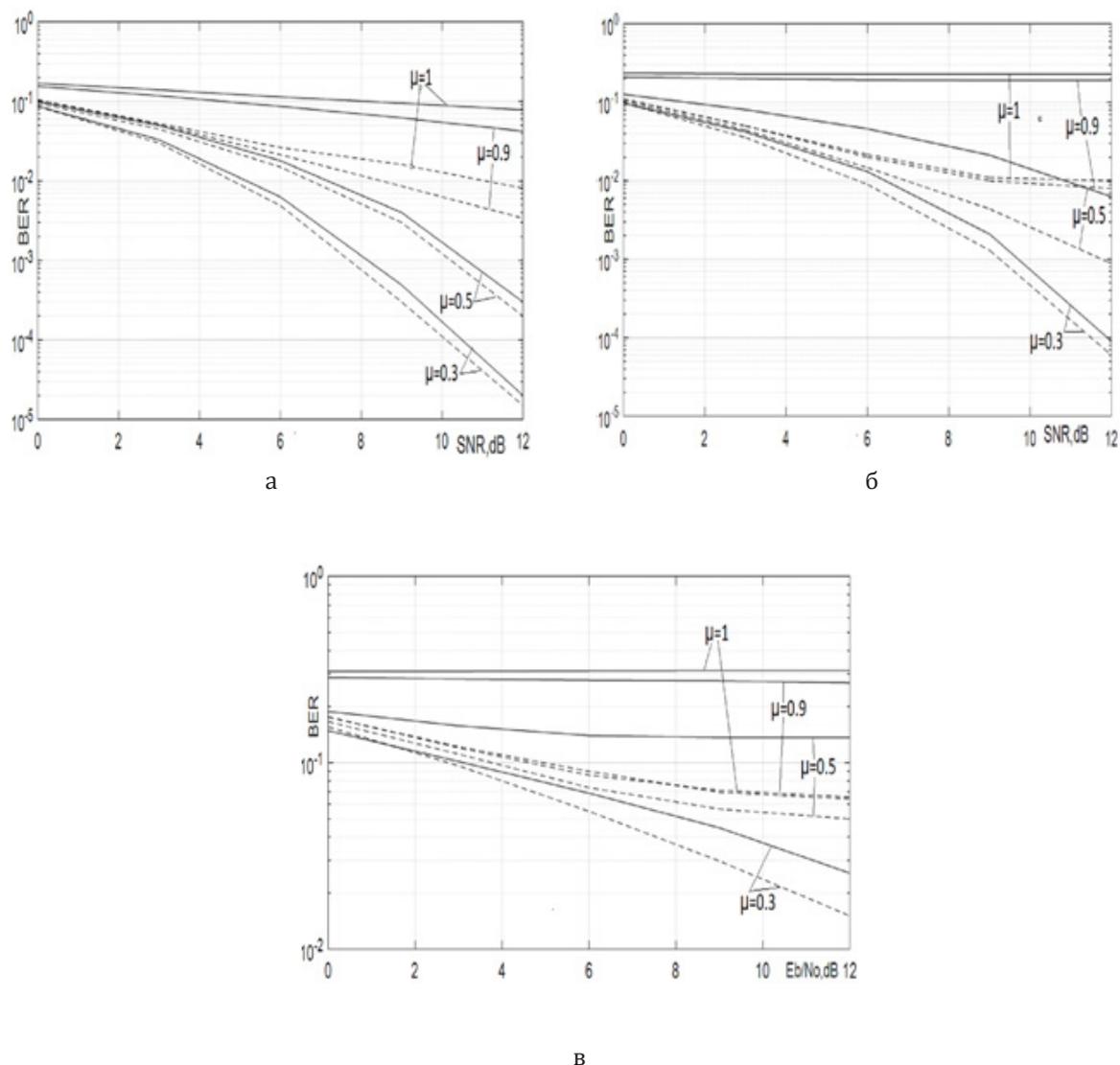
Исследования зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум  $SNR = E_b/N_0$  были проведены для различной помеховой ситуации в радиоканале: шум, гармоническая помеха, ретранслированная помеха, обе помехи одновременно.

1) На входе приемника присутствует сигнал, шум и гармоническая помеха ( $\Delta\omega_{int} = 0$ ).

На рис. 5 показаны зависимости вероятности битовой ошибки BER от SNR. Для сравнения сплошными линиями даны кривые, полученные без адаптивного фильтра. Наглядно виден положительный эффект использования такого фильтра – вероятность битовой ошибки значительно снижается. Это особенно заметно при большой интенсивности помехи и большой позиционности сигнала. Так, при  $\mu = 0.5$  для  $M = 2$  использование адаптивного фильтра дает энергетический выигрыш не более 0.5 dB, для  $M = 4$  – около 3 dB, для  $M = 8$  – более 5 dB. Это объясняется разной шириной спектра сигналов и, соответственно, разной степенью их поражения гармонической помехой.

2) 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 параметры огибающей, как и полезный сигнал, и его использование не изменяет величины BER.



**Рис. 5.** Зависимость BER от SNR при наличии гармонической помехи:  
а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

3) На входе приемника присутствует сигнал, шум, гармоническая ( $\Delta\omega_{int} = 0$ ) и ретранслированная помеха ( $\tau = 0.5T_s$ ).

При исследовании полагалось, что обе помехи имеют одинаковую интенсивность  $\mu$ . Видно (рис. 6), что без адаптивного фильтра (сплошные линии) значения BER значительно ухудшаются по сравнению со случаем, когда на входе приемника присутствует только одна гармоническая помеха (рис. 5). Использование фильтра (пунктирные линии) несколько снижает величину BER за счет подавления гармонической помехи, но она все же остается достаточно высокой из-за невозможности подавления ретранслированной помехи.

4) На входе приемника присутствует сигнал, шум и три гармонические помехи с разными частотными расстройками.

На рис. 7 показаны зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум, когда на входе приемника кроме шума присутствуют одновременно три гармонические помехи, имеющие разные частотные расстройки относительно несущей частоты

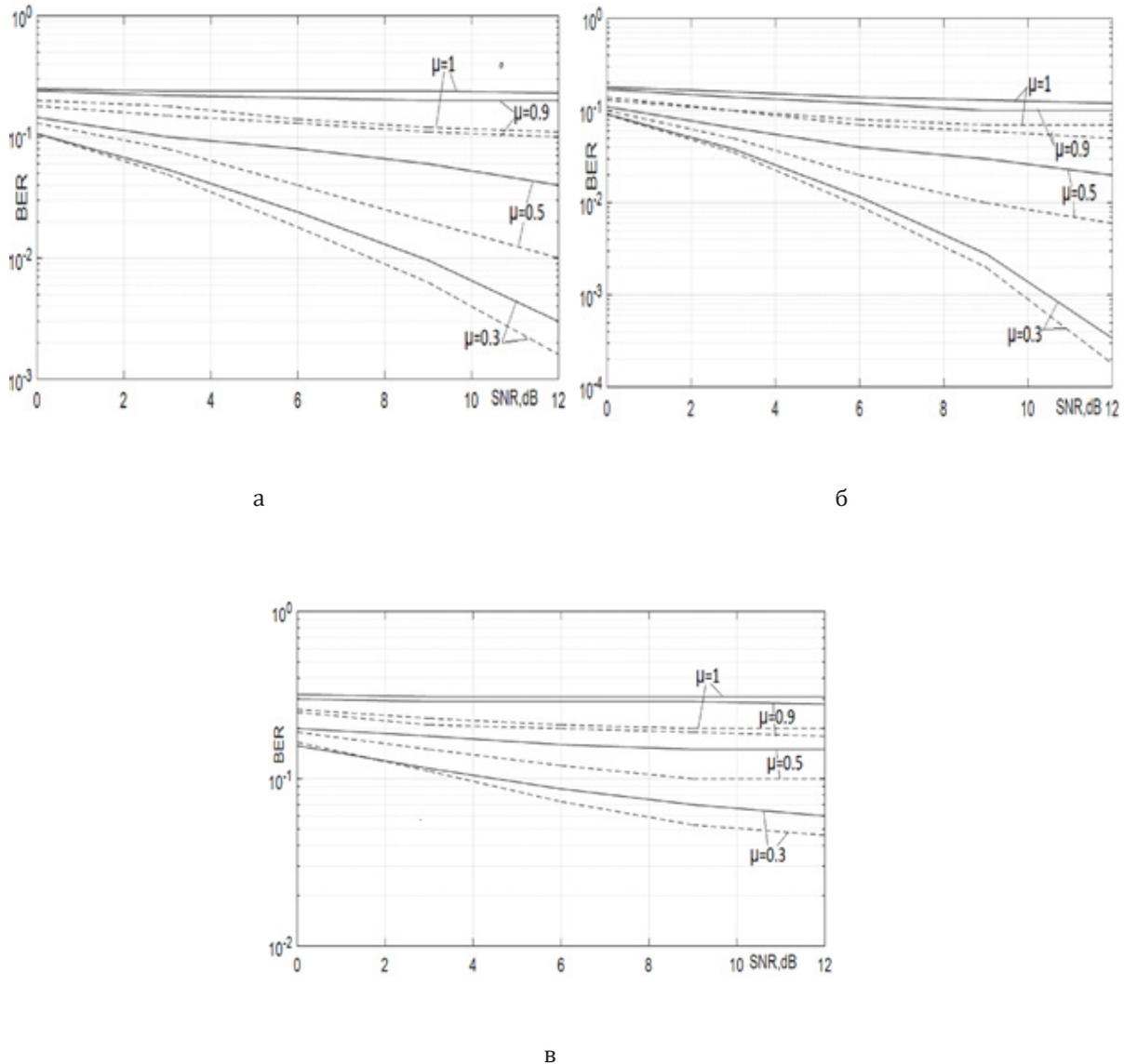


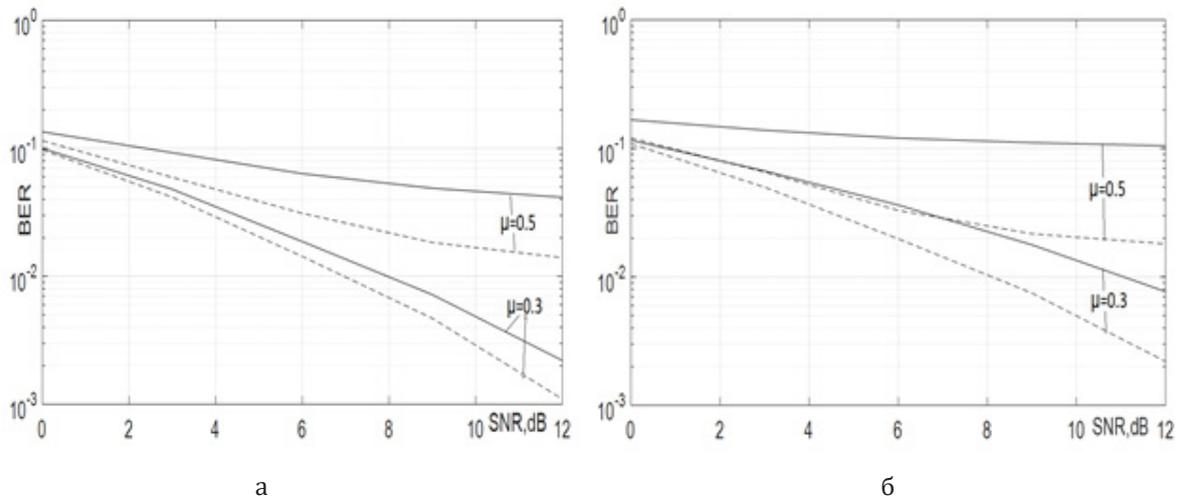
Рис. 6. Зависимость BER от SNR при наличии гармонической и ретранслированной помех:  
а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

сигнала. Видно, что, хотя в целом ситуация ухудшилась по сравнению со случаем 1 (одна гармоническая помеха), адаптивный фильтр справляется со своей задачей.

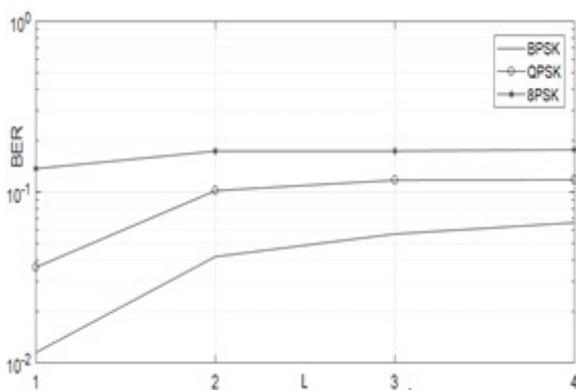
*D. Зависимость вероятности битовой ошибки от количества гармонических помех на входе приемника.*

На рис. 8 и 9 показаны зависимости вероятности битовой ошибки при  $SNR = 7$  dB от количества гармонических помех  $L$  одинаковой интенсивности  $\mu = 0.5$ , одновременно присутствующих на входе приемника и имеющих разные частотные расстройки  $\Delta\omega_{int}$  относительно несущей частоты сигнала. Кривые на рис. 8 получены без адаптивного фильтра, а на рис. 9 – с адаптивным фильтром.

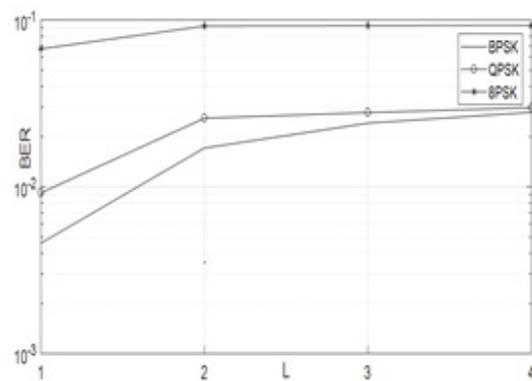
Видно, что при всех  $L$  адаптивный фильтр улучшает помехоустойчивость приема, но при увеличении числа гармонических помех эффективность фильтра все же несколько снижается.



**Рис. 7.** Зависимость BER от SNR при наличии трех гармонических помех:  
а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.



**Рис. 8.** Зависимость BER от количества гармонических помех  $L$  без адаптивного фильтра.



**Рис. 9.** Зависимость BER от количества гармонических помех  $L$  с адаптивным фильтром

## Выводы

Проведенный анализ эффективности применения адаптивного фильтра при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование адаптивного нерекурсивного фильтра с алгоритмом подстройки весовых коэффициентов, учитывающим постоянную огибающую полезного сигнала, является эффективным способом для борьбы с гармонической помехой, особенно при ее большой интенсивности.
2. При увеличении числа гармонических помех эффективность адаптивного фильтра снижается.
3. Для эффективной работы адаптивного нерекурсивного фильтра его длина должна быть не менее 256 элементов.
4. Исследуемый адаптивный фильтр неэффективен для подавления ретранслированной помехи.

## Литература:

1. Rosenbaum A.S. PSK error performance with Gaussian noise and interference. *BSTJ*. 1969;48:413-442. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01122.x>
2. Nandi M. Symbol Error Probability of Coherent PSK System in the Presence of Two Path Interference. *IJPA*. 2013;5(2):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;10(5):152-155. [http://paper.ijcsns.org/07\\_book/201005/20100522.pdf](http://paper.ijcsns.org/07_book/201005/20100522.pdf)
4. Chiani M., Win M.Z., Zanella A. Error Probability for Optimum Combining of M-ary PSK Signals in the Presence of Interference and Noise. *IEEE Trans. Commun.* 2003;51(11):1949-1957. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.819197>
5. Milošević M.S., Stefanović M.Č. Performance Loss Due to Atmospheric Noise and Noisy Carrier Reference Signal in QPSK Communication Systems. *Elektronika i Elektrotehnika*. 2005;58(2):5-9.
6. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многофазной фазовой манипуляцией при наличии гармонических помех. *Научные технологии*. 2018;11:32-38. <https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06>
7. Нгуен Ван Зунг. Помехоустойчивость когерентного приема сигналов с многофазной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированных помех. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2019;3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
8. Treichler J.R., Agee B.G. A new approach to multipath correction of constant modulus signals. *IEEE Trans. ASSP*. 1983;31(2):459-472. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1983.1164062>
9. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive signal processing. New York: Prentice-Hal, 1985. 492 p.
10. Monzingo R.A., Haupt R.L., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays, 2nd Edition. SciTech Publishing, 2011. 686 p.
11. Куликов Г.В. Два алгоритма адаптивной фильтрации нефлуктуационных помех при приеме модулированных сигналов с непрерывной фазой. *Научные технологии*. 2003;6:19-23.
12. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Кулагин В.П. Программа моделирования канала передачи дискретных сообщений методом QPSK на фоне нефлуктуационных помех. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617939, зарег. 25.06.2019

## References:

1. Rosenbaum A.S. PSK error performance with Gaussian noise and interference. *BSTJ*. 1969; 48:413-442. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01122.x>
2. Nandi M. Symbol Error Probability of Coherent PSK System in the Presence of Two Path Interference. *IJPA*. 2013;5(2):133-137.
3. Mohammad Samir Modabbes and Salem Nasri. Bit Error Rate Analysis for BPSK Modulation in Presence of Noise and Two Co-channel Interferers. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2010;10(5):152-155. [http://paper.ijcsns.org/07\\_book/201005/20100522.pdf](http://paper.ijcsns.org/07_book/201005/20100522.pdf)
4. Chiani M., Win M.Z., Zanella A. Error Probability for Optimum Combining of M-ary PSK Signals in the Presence of Interference and Noise. *IEEE Trans. Commun.* 2003;51(11):1949-1957. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.819197>
5. Milošević M.S., Stefanović M.Č. Performance Loss Due to Atmospheric Noise and Noisy Carrier Reference Signal in QPSK Communication Systems. *Elektronika i Elektrotehnika*. 2005;58(2):5-9.
6. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Nesterov A.V., Lelyuh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2018;11:32-38 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06>
7. Nguyen Van Dung. Noise immunity of a coherent reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of a retranslated interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics. [online journal]*. 2019;3 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
8. Treichler J.R., Agee B.G. A new approach to multipath correction of constant modulus signals. *IEEE Trans. ASSP*. 1983;31(2):459-472. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1983.1164062>
9. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive signal processing. New York: Prentice-Hal; 1985. 492 p.
10. Monzingo R.A., Haupt R.L., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays, 2nd Edition. SciTech Publishing; 2011. 686 p.
11. Kulikov G.V. Two algorithms for adaptive filtering of non-fluctuation interference when receiving modulated signals with a continuous phase. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2003;6:19-23 (in Russ.).
12. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Kulagin V.P. A QPSK method for modeling a discrete message transmission channel against non-fluctuation interference. Certificate of state registration of computer programs No. 2016917939, registered. 06/25/2019. (in Russ.).

**Об авторах:**

**Куликов Геннадий Валентинович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>.

**До Чунг Тиен**, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**About the authors:**

**Gennady V. Kulikov**, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Radio electronic systems and complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA - Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>.

**Do Trung Tien**, Postgraduate Student of the Department of Radio electronic systems and complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA - Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Поступила: 24.12.2019; получена после доработки: 17.04.2020; принята к опубликованию: 06.05.2020.