

**АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ
С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СКАНИРУЮЩЕЙ ПОМЕХИ**

**Г.В. Куликов[@],
Нгуен Ван Зунг**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru*

Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ) давно и успешно применяются в цифровых системах передачи информации с высокой пропускной способностью. Их применение регламентировано различными коммуникационными стандартами. Характеристики помехоустойчивости приема сигналов с М-ФМ на фоне белого гауссовского шума хорошо изучены. В статье рассмотрен случай, когда на входе приемника, кроме шума, присутствует сканирующая помеха. Методами статистической радиотехники проанализирована помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии шумовой и сканирующей помехи. При этом помеха представлена в виде гармонической помехи с частотой, изменяющейся по пилообразному закону. Рассмотрены два случая: первый – когда сканирующая помеха не попадает в зону основного лепестка спектра сигнала – в таком случае ее влияние ничтожно, и она практически не изменяет помехоустойчивости приема – второй, когда диапазон сканирования по частоте совпадает с зоной главного лепестка спектра сигнала – он более опасен. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от девиации частоты сканирующей помехи, ее интенсивности и от отношения сигнал/шум. Показано, что помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией сильно ухудшается при наличии сканирующей помехи, попадающей в область главного лепестка спектра полезного сигнала, и с увеличением позиционности сигналов это влияние значительно усиливается. При изменении девиации частоты такой помехи ее влияние на помехоустойчивость демодулятора М-ФМ изменяется незначительно. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов на фоне сканирующей помехи необходимо использовать алгоритмы компенсации помех, например, следящие режекторные фильтры.

Ключевые слова: вероятность битовой ошибки, сканирующая помеха, многопозиционная фазовая манипуляция, помехоустойчивость.

ANALYSIS OF NOISE IMMUNITY OF RECEPTION OF SIGNALS WITH MULTIPLE PHASE SHIFT KEYING UNDER THE INFLUENCE OF SCANNING INTERFERENCE

G.V. Kulikov@,
Nguyen Van Dung

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author e-mail: kulikov@mirea.ru

Signals with multi-phase shift keying (M-PSK) have long been successfully used in digital information transmission systems with high bandwidth. Their use is regulated by various communication standards. The noise immunity characteristics of their reception against the background of white Gaussian noise are well studied. The article deals with the case when, at the input of the receiver, besides noise, there is a scanning interference. The noise immunity of signal reception with multi-phase shift keying in the presence of noise and scanning interference was analyzed using statistical radio engineering methods. In this case, the interference is represented as a harmonic interference with a frequency varying according to the sawtooth law. Two cases are considered in the study. The first is when the scanning interference does not fall into the zone of the main lobe of the signal spectrum. In this case, its influence is negligible, and it practically does not change the noise immunity of the reception. The second case, when the frequency range of the scan coincides with the zone of the main lobe of the signal spectrum, is more dangerous. The dependences of the probability of a bit error on the deviation frequency of the scanning interference, its intensity and the signal-to-noise ratio are obtained. It is shown that the noise immunity of receiving signals with multi-phase shift keying deteriorates greatly in the presence of scanning interference falling in the region of the main lobe of the spectrum of the useful signal, and this effect is greatly enhanced with increasing signal positionality. When changing the frequency deviation of such interference, its effect on the noise immunity of the M-PSK demodulator changes only slightly. To increase the noise immunity of receiving signals against the background of scanning interference, it is necessary to use interference compensation algorithms, for example, tracking notch filters.

Keywords: bit error rate, scanning interference, multiple phase-shift keying, noise immunity.

Введение

Применение сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ) в цифровых системах передачи информации с высокой пропускной способностью регламентировано различными коммуникационными стандартами. Такой сигнал на тактовом интервале, равном длительности канального символа T_s , несущего информацию о $k = \log_2 M$ информационных битах, может принимать одно из возможных значений:

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

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.

Одним из важнейших параметров систем передачи информации является их помехоустойчивость. При анализе помехоустойчивости необходимо учитывать, что на входе приемника наряду с шумовой помехой могут присутствовать и другие виды помех – непреднамеренных и преднамеренных, которые сильно влияют на качество радиосвязи [1–8]. К таковым относится и сканирующая помеха. Под сканирующей помехой будем понимать мешающий сигнал с относительной интенсивностью μ и частотой ω_{Π} , изменяющейся вокруг несущей частоты полезного сигнала ω_0 по некоторому периодическому закону. В простейшем случае этот закон может быть пилообразным:

$$s_{\Pi}(t) = \mu A_0 \cos(\omega_{\Pi}(t)t + \varphi_{\Pi}), \quad (2)$$

$$\omega_{\Pi}(t) = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{д}} - \frac{2\Delta\omega_{\text{д}}t}{T_{\text{с}}},$$

здесь φ_{Π} – случайная начальная фаза помехи;

$\Delta\omega_{\text{д}}$ – девиация помехи;

$T_{\text{с}}$ – период сканирования.

Целью работы является анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии сканирующей помехи.

1. Методика анализа помехоустойчивости

Примем, что входное колебание приемника, кроме полезного сигнала (1), включает в себя белый гауссовский шум $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 и сканирующую помеху (2):

$$x(t) = s_i(t) + s_{\Pi}(t) + n(t).$$

Классический корреляционный прием сигнала (1) предполагает вычисление интегралов свертки I_i принимаемого колебания $x(t)$ и M опорных сигналов:

$$I_i = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) \cos(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}) dt, i = 0, 1, \dots, M-1. \quad (3)$$

Вероятность правильного обнаружения любого канального символа, например, с индексом "0", находится при условии:

$$I_0 > \{I_i\}, i = 1, \dots, M-1.$$

Общая вероятность правильного обнаружения канального символа равна

$$P_s = \prod_{i=1}^{M-1} p_i(I_0 > I_i), \quad (4)$$

а вероятность ошибочного приема канального символа, соответственно, равна:

$$P_{es} = 1 - P_s. \quad (5)$$

Эта ошибка, в свою очередь, вызывает ошибку в один или более бит информации в зависимости от уровня помехового сигнала. При достаточно больших отношениях сигнал/шум можно принять [9, 10]:

$$P_{eb} = P_{es} / \log_2 M. \quad (6)$$

Если предположить, что скорость изменения частоты сканирующей помехи мала по сравнению со скоростью передачи полезной информации ($T_c \gg T_s$), то на каждом тактовом интервале сигнала такую помеху можно считать гармонической с той или иной расстройкой несущей частоты $\Delta\omega_{\Pi}$ относительно величины ω_0 .

Методика расчета вероятности ошибки заключается в следующем [1]. Предположим, что начальная фаза ω_{Π} помехи $s_{\Pi}(t)$ является некоторой фиксированной величиной. В этом случае можно рассчитать статистические характеристики условных по указанному параметру распределений случайных процессов I_i на выходах всех корреляторов приемника: средние значения $m_0, \dots, m_i, \dots, m_{M-1}$, дисперсии $D_0, \dots, D_i, \dots, D_{M-1}$, взаимные корреляционные моменты M_{0i} , а также параметры суммарных процессов $y_i = I_0 - I_i$ на входе устройства сравнения корреляционных интегралов:

$$m_{y_i} = \langle y_i \rangle = \langle I_0 \rangle - \langle I_i \rangle = m_0 - m_i; \quad D_{y_i} = D_0 + D_i - 2M_{0i}.$$

Распределения всех указанных случайных процессов с учетом наличия на входе демодулятора белого гауссовского шума являются нормальными.

2. Результаты расчетов

Выполненные расчеты показывают, что средние значения m_{y_i} и дисперсии D_{y_i} определяются следующим образом:

$$m_{y_i} = \frac{2E_s}{N_0} \left\{ 1 - \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M}\right) + \mu \frac{\sin\frac{\Delta\omega_{\Pi}T_s}{2}}{\frac{\Delta\omega_{\Pi}T_s}{2}} \left[\left(\cos\varphi_0 - \cos\frac{i2\pi}{M}\right) \cos\left(\frac{\Delta\omega_{\Pi}T_s}{2} + \varphi_{\Pi}\right) + \left(\sin\varphi_0 - \sin\frac{i2\pi}{M}\right) \sin\left(\frac{\Delta\omega_{\Pi}T_s}{2} + \varphi_{\Pi}\right) \right] \right\},$$

$$D_{y_i} = \frac{4E_s}{N_0} \left[1 - \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M}\right) \right].$$

Условные по параметрам φ_{Π} и $\Delta\omega_{\Pi}$ вероятности, входящие в (4), находят по формуле:

$$p_i(I_0 > I_i) = 1 - Q\left(\frac{m_{y_i}}{\sqrt{D_{y_i}}}\right), \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt.$$

С целью получения безусловной вероятности ошибки приема канального символа (5) и битовой ошибки (6) необходимо провести усреднение полученных результатов $P_{es}(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi})$ и $P_{eb}(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi})$ по этим параметрам, причем необходимо учесть, что случайная величина φ_{Π} равномерно распределена на полуинтервале $(-\pi, \pi]$, а величина $\Delta\omega_{\Pi}$ – на интервале $[-\Delta\omega_{\Delta}, +\Delta\omega_{\Delta}]$:

$$P_{eb} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{1}{2\Delta\omega_{\Delta}} \int_{-\Delta\omega_{\Delta}}^{+\Delta\omega_{\Delta}} P_e(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi}) d\Delta\omega_{\Pi} \right] d\varphi_{\Pi}$$

Ввиду сложности подынтегральных выражений для получения окончательных результатов воспользуемся численным усреднением.

Нами рассмотрены два случая: первый – когда сканирующая помеха не попадает в зону основного лепестка спектра сигнала (здесь влияние помехи ничтожно, и она практически не изменяет помехоустойчивости приема); второй случай, когда диапазон сканирования по частоте совпадает с зоной главного лепестка спектра сигнала, более опасен. Рассмотрим второй случай более подробно. Результаты расчетов представлены на рис. 1–3.

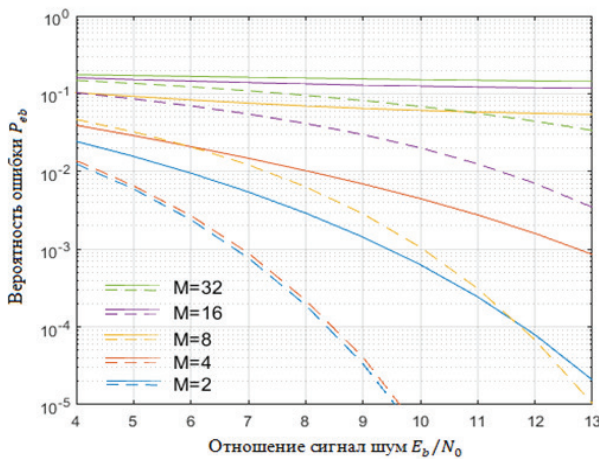


Рис. 1. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум.

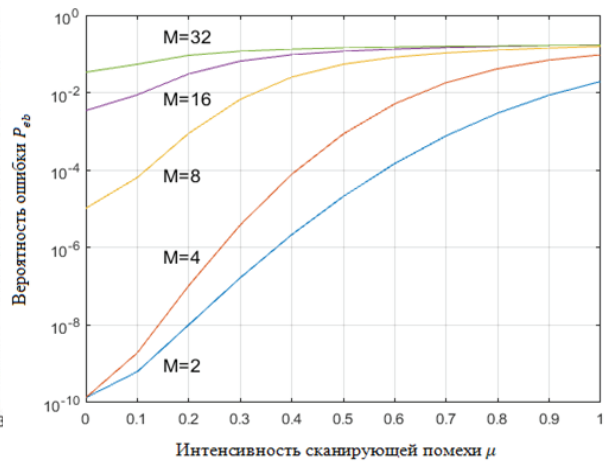


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от интенсивности сканирующей помехи.

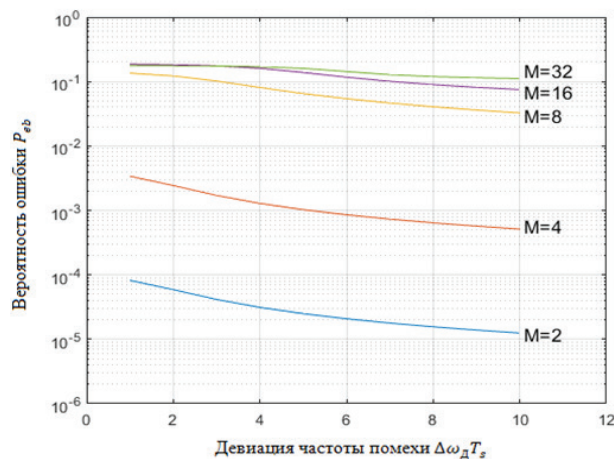


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от девиации частоты сканирующей помехи при $\mu = 0.5$; $E_b / N_0 = 13$ дБ.

На рис. 1 для разной позиционности M показаны зависимости вероятности ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b / N_0 . Сплошные кривые соответствуют приему сигнала на фоне сканирующей помехи с девиацией частоты $\Delta\omega_d T_s = 6$ и интенсивностью $\mu = 0.5$, пунктирные – приему без сканирующей помехи. Рис. 2 иллюстрирует для разных M зависимости вероятности ошибки P_{eb} от интенсивности сканирующей помехи μ при $E_b / N_0 = 13$ дБ и $\Delta\omega_d T_s = 6$.

Очевидно (рис. 2), что с увеличением позиционности M влияние сканирующей помехи значительно усиливается: если слабая помеха ($\mu = 0.1$) для $M = 2$ или 4 практически не

увеличивает вероятность ошибки P_{eb} , то для $M = 16$ или 32 при такой же помехе снижение помехоустойчивости становится заметным. Помеха большой интенсивности ($\mu \geq 0.5$) опасна для всех видов сигналов М-ФМ и практически разрушают прием.

При изменении девиации частоты помехи, «накрывающей» зону главного лепестка спектра сигнала, ее влияние на помехоустойчивость демодулятора М-ФМ меняется незначительно, оставаясь при этом весьма существенным (рис. 3). Это связано с тем, что основной отрицательный вклад приходится на частоты помехи, близкие к частоте несущего колебания полезного сигнала. При стремлении девиации частоты помехи к нулю вероятность ошибки стремится к величине, полученной для случая прицельной гармонической помехи.

Заключение

По результатам анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией весьма сильно подвержены влиянию сканирующей помехи, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается. Так, для $M > 8$ помехоустойчивость приема на фоне сканирующей помехи заметно снижается даже при малых уровнях помехи.

2. Сканирующая помеха, попадающая в область несущей частоты полезного сигнала, наиболее опасна. При изменении девиации частоты такой помехи ее влияние на помехоустойчивость демодулятора М-ФМ изменяется незначительно.

3. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ на фоне сканирующей помехи необходимо использовать алгоритмы компенсации помех, например, следящие режекторные фильтры.

Литература:

1. Куликов Г.В. Влияние гармонической помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов МЧМ // Радиотехника. 2002. № 7. С. 42–44.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Мухин Н.П., Шестопапов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.
3. Ложкин К.Ю., Стиценко А.И. Помехоустойчивость некогерентного и когерентного приема ДФРМ-сигнала в условиях воздействия фазоманипулированной, гармонической или гауссовской помех // Журн. Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 2. С. 260–270.
4. Куликов Г.В. Помехоустойчивость приемников модулированных сигналов с непрерывной фазой при наличии нефлуктуационных помех // Радиотехника. 2003. № 7. С. 21–25.
5. Куликов Г.В. Помехоустойчивость автокорреляционного демодулятора сигналов МЧМ в канале связи с гармонической помехой // Радиотехника. 2004. № 8. С. 20–22.
6. Перов А.И. Синтез оптимального алгоритма обработки сигналов в приемнике спутниковой навигации при воздействии гармонической помехи // Радиотехника. 2005. № 7. С. 37–42.
7. Кондратенко А.Е., Поддубный В.Н. Эффективность воздействия гармонической

и гауссовской помех на линии многоканальной радиосвязи с синхронным нелинейным кодовым уплотнением каналов // Радиотехника. 2009. № 6. С. 52–56.

8. Зеленецкий В.В. Помехоустойчивость приема избыточных частотно-манипулированных сигналов на фоне гармонических помех // Радиотехника. 2002. № 7. С. 32–36.

9. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

10. Боккер П. Передача данных. Техника связи в системах телеобработки данных: в 2-х т. Т. I. Основы: пер. с нем. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Связь, 1980. 264 с

References:

1. Kulikov G.V. The effect of harmonic interference on the noise immunity of the correlating demodulator of the MSK signals. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2002; 7: 42-44. (in Russ.).

2. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mukhin N.P., Shestopalov V.I. Noise immunity of radio communication systems with spreading of the signal spectrum by the method of pseudo-random adjustment of the operating frequency. Moscow: Radio and Svyaz' Publ., 2000. 384 p. (in Russ.).

3. Lozhkin K.Yu., Stitsenko A.I. The immunity of non-coherent and coherent reception of a signal DPSK in the conditions of influence of PSK, a harmonic interference or Gaussian noise. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. (Journal of the Siberian Federal University. Engineering & Technologies). 2017; 10(2): 260-270. (in Russ.).

4. Kulikov G.V. Noise immunity of receivers of modulated signals with a continuous phase in the presence of non-fluctuations interference. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2003; 7: 21-25. (in Russ.).

5. Kulikov G.V. Noise immunity of the auto-correlation demodulator of the MSK signals in the communication channel with harmonic interference. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2004; 8: 20-22. (in Russ.).

6. Perov A.I. Synthesis of the optimal signal processing algorithm in a satellite navigation receiver under the influence of harmonic interference. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2005; 7: 37-42. (in Russ.).

7. Kondratenko A.E., Poddubnyi V.N. Effectiveness of the impact of harmonic and Gaussian interference on a multichannel radio link with a synchronous nonlinear code channel multiplexing. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2009; 6: 52-56. (in Russ.).

8. Zelenevsky V.V. Noise immunity of reception of excessive frequency-manipulated signals against the background of harmonic interference. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2002; 7: 32-36. (in Russ.).

9. Proakis J.G. Digital communications. 4th Edition. New York: McGraw-Hill, 2001. 1002 p.

10. Bocker P. Transmission of data. Communication techniques in data teleprocessing systems: in 2v. Volume I. Basics. / Ed. D.D. Klovsky. Moscow: Svyaz' Publ., 1980. 264 p. (in Russ.).

Об авторах:

Куликов Геннадий Валентинович, доктор технических наук, 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).

Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи

Нгуен Ван Зунг, 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, D.Sc. (Engineering), Professor, Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Nguyen Van Dung, Postgraduate Student, Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 5–12. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12

For citation: Kulikov G.V., Nguyen Van Dung. Analysis of noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying under the influence of scanning interference. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 5-12. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12