

УДК 621.391.01

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ЦИФРОВОГО ДЕМОДУЛЯТОРА ПО ОТНОШЕНИЮ К НЕГАУССОВЫМ ПОМЕХАМ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ЗАВИСИМОМ НАБЛЮДЕНИИ

А.Л. СЕНЯВСКИЙ

В статье анализируется помехоустойчивость по отношению к негауссовым помехам типа атмосферных, промышленных помех и мешающих частотно - и фазоманипулированных сигналов цифрового демодулятора сигнала с минимальной частотной модуляцией на поднесущей частоте, используемого при передаче навигационных данных в системах управления воздушным движением с автоматическим зависимым наблюдением.

Ключевые слова: радиосвязь, помехоустойчивость, негауссовы помехи, управление воздушным движением, автоматическое зависимое наблюдение.

В системах управления воздушным движением (УВД) с автоматическим зависимым наблюдением (АЗН) для передачи в диспетчерский пункт (ДП) навигационных данных от бортового датчика навигационной информации, в качестве которого обычно используется аппаратура потребителей (АП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) типа ГЛОНАСС и GPS, как правило, используется диапазон метровых волн (МВ). Для связи с дальними ДП может использоваться также диапазон декаметровых волн (ДКМВ).

С точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств перспективными видами модуляции является минимальная частотная модуляция (МЧМ) и ее разновидность: минимальная частотная модуляция на поднесущей частоте МЧМ – АМ, обеспечивающих наибольшую компактность спектра сигнала. МЧМ – АМ, в частности, применяется при использовании для передачи данных традиционных средств связи, предназначенных для передачи речи, модернизированных путем включения в состав аппаратуры цифрового модема.

Анализ помехоустойчивости дискретных каналов передачи данных, работающих в МВ и ДКМВ диапазонах, обычно проводится в предположении, что помеха может быть описана нормальной моделью. Однако такая модель описывает не все помеховые ситуации. В частности, существенно негауссов характер имеют промышленные помехи, имеющие широкий спектр частот, охватывающий ДКМВ и МВ диапазоны [1]. Негауссов характер в ДКМВ и длинноволновой части МВ диапазона имеют также атмосферные помехи [2].

Для цифровых систем передачи данных полезно иметь сведения о амплитудно-вероятностном распределении (АВР), показывающем процент времени, в течение которого огибающая помехи $E(t)$ превышает ее среднеквадратическое значение. Оно зависит от кратковременных изменений помехи. АВР принято представлять в виде семейства идеализированных кривых, зависящих параметрически от «отклонения напряжения»

$$V_d = 20 \lg \frac{\left(\overline{E^2}\right)^{1/2}}{E}, \quad (1)$$

представляющего собой разность среднеквадратического значения огибающей помехи и ее среднего значения в децибелах.

При расположении приемного устройства системы связи в непосредственной близости от городов и крупных промышленных центров основной составляющей внешних помех, особенно для МВ связи, являются промышленные помехи, источниками которых являются системы зажигания автомобильных двигателей, линии электропередачи, электрофицированные железные дороги, электрооборудование промышленных предприятий, газоразрядные приборы, дуговая электросварка и др.

Уровень промышленных помех на несколько десятков децибел превышает мощность остальных помех в диапазоне 30 – 300 МГц, то есть в МВ диапазоне. Причем уровень помех с ростом высоты точки приема над промышленным районом возрастает [3], что обусловлено суммированием помех от многих источников, попадающих в приемную антенну. Уменьшение уровня помех при увеличении высоты свыше 3 – 4 км связано с удалением от промышленного района, рассматриваемого как групповой источник помех. При этом разность уровней поверхностной и надповерхностной промышленных помех составляет примерно 8 дБ.

Уровни промышленных помех существенно различаются для пунктов приема в черте города, в пригороде и в сельской местности. Уровень помех в черте города превышает уровень помех в сельской местности в среднем на 36 дБ. Превышение же уровня помех в пригороде над уровнем помех в сельской местности составляет в среднем 19 дБ. В сельской местности уровни атмосферных и промышленных помех соизмеримы.

На частотах, превышающих 300 МГц, атмосферные помехи по сравнению с промышленными помехами пренебрежимо малы. Уровень галактических шумов на частотах $f = 1 - 100$ МГц соизмерим с уровнем помех в сельской местности и превышает его на 6 дБ на частотах 1 – 10 МГц, оставаясь существенно меньше уровня помех в черте города (на 28 – 40 дБ) и в пригороде (на 10 – 20 дБ).

Кратковременные изменения промышленных помех также как и аналогичные изменения атмосферных помех описываются амплитудно-вероятностным распределением [4]. Характер распределения таков же, как в случае атмосферных помех. Качественное отличие состоит в большем уровне «фоновой» (нормальной) составляющей. При этом зависимость так называемого «отклонения напряжения» V_d , характеризующего степень импульсности помехи от частоты, имеет менее выраженный характер, чем в случае атмосферных помех.

Для атмосферных помех величина V_d падает с ростом частоты, для промышленной же помехи эта зависимость имеет немонотонный характер, что связано с тем, что в разных диапазонах частот преобладают различные источники помех.

Существенное значение для авиационной связи имеет зависимость степени импульсности помехи от высоты точки приема. С увеличением высоты параметр V_d убывает и на высотах 3 – 4 км принимает значение 1,05 дБ, соответствующее нормальному шуму, что связано с эффектом «нормализации» помехи при увеличении числа источников помех.

Таким образом, поверхностная и надповерхностная промышленные помехи имеют качественно различный характер. Если поверхностная помеха имеет вид квазиимпульсной помехи с преобладающей импульсной составляющей, то есть аналогична атмосферной помехе, то надповерхностная помеха сильно изменяется при изменении точки приема и при высотах, превышающих 4 км, и аналогична нормальному шуму.

Из изложенного следует, что условия работы наземного и бортового радиоэлектронного оборудования (РЭО) средств связи МВ диапазона, используемого для передачи навигационных данных при УВД с АЗН и навигационных поправок в СРНС при работе в дифференциальном либо относительном режиме, значительно отличаются.

Заметим, что негауссов характер имеют также помехи от мешающих радиотехнических средств, использующих квазигармонические сигналы с частотной (ЧМ) и фазовой (ФМ) модуляцией.

В настоящей работе проводится анализ помехоустойчивости цифрового демодулятора МЧМ – АМ сигнала. Подробное описание такого демодулятора, а также анализ его помехоустойчивости по отношению к нормальной (гауссовой) помехе, проведенный с использованием характеристик выбросов огибающей смеси сигнала и помех приводится в [5].

Аналогичным методом проанализировать помехоустойчивость демодулятора по отношению к негауссовым помехам не представляется возможным, поэтому используем другой метод. Как и в [5], для краткости рассмотрим только один вариант передачи 1 и 0. При этом физически возникновение ошибки, например при передаче 1, объясняется тем, что суммарная длительность возникающих за счет действия помехи выбросов огибающей ее смеси с сигналом

выше уровня компарирования A_0 (рис. 1) на интервале $[T - T/2, T]$ и ниже этого уровня на интервале $[T, T + T/2]$.

При анализе были приняты следующие допущения. Тактовый интервал T разбивается на участки длительностью $\Delta t \approx 1/\Delta f \approx \tau_{\text{корр.}}$, где Δf и $\tau_{\text{корр.}}$ – соответственно, полоса пропускания приемника и интервал корреляции процесса на его выходе. При этом огибающая $A_s(t)$ МЧМ – АМ сигнала на выходе амплитудного детектора аппроксимируется ступенчатой функцией (рис. 1) с шириной ступеньки Δt и высотой A_k , равной значению огибающей в середине k -го участка.

Выбросы огибающей смеси сигнала и помехи $E_s(t)$ на любых двух несовпадающих участках полагаются статистически независимыми, причем предполагается, что на каждом участке имеет место не более одного выброса.

Аналогично тому, как это делается в [6] при решении подобной задачи, можно полагать, что вероятность P_k появления на k -м участке выброса, приводящего к искажению сигнала на выходе компаратора, в первом приближении совпадает с вероятностью того, что эта огибающая находится выше уровня компарирования A_0 на интервале $[T - T/2, T]$ и ниже этого уровня на интервале $[T, T + T/2]$, то есть

$$P_k = \begin{cases} F(-A_0)|_{A_s = A_k}, & T - T/2 \leq t \leq T; \\ F(A_0)|_{A_s = A_k}, & T \leq t \leq T + T/2, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$F(A_0)|_{A_s = A_k} = \int_0^{A_0} W(E_s)|_{A_s = A_k} dE_s \text{ и } W(E_s)|_{A_s = A_k} -$$

интегральная функция распределения и плотность вероятностей огибающей смеси сигнала и помехи, определяемые при значении огибающей сигнала, равном A_k .

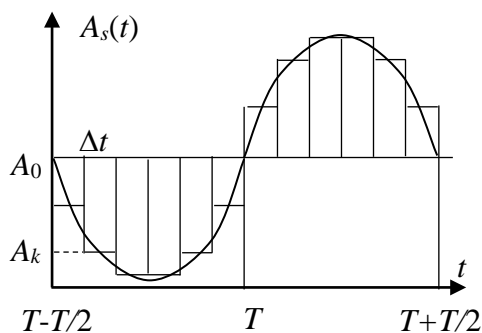


Рис. 1. К объяснению способа аппроксимации сигнала на выходе амплитудного детектора

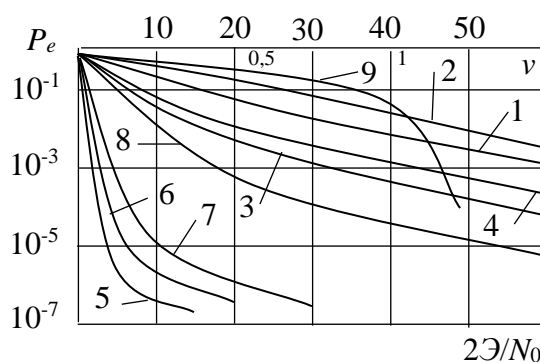


Рис. 2. Вероятности ошибки при демодуляции МЧМ – АМ сигналов при гауссовой (1, 2) атмосферной (3, 4), промышленной (5 – 8) и квазигармонической (9) помехах

Среднее значение вероятности искажения сигнала на выходе компаратора в одном из

$$N = T/\Delta t \text{ участков очевидно равно } P = (1/N) \sum_{k=1}^N P_k .$$

В рамках принятой модели ошибка имеет место при возникновении искажений более чем на $N/2$ участках тактового интервала T . Вероятность такого события в рамках модели последовательности независимых испытаний определяется следующим образом:

$$P_e = 0,5 C_N^{N/2} P^{N/2} (1 - P)^{N/2} + \sum_{n=N/2+1}^N C_N^n P^n (1 - P)^{N-n}. \quad (3)$$

Оценим помехоустойчивость рассматриваемого демодулятора МЧМ – АМ сигнала по отношению к атмосферной и индустриальной помехам, а также по отношению к квазигармоническим помехам типа мешающих ЧМ и ФМ сигналов и сравним ее с помехоустойчивостью демодулятора по отношению к гауссовой помехе. Функции плотности вероятностей огибающей смеси сигнала и соответствующих помех, необходимые для расчета вероятности ошибок демодулятора [7 – 9], имеют вид:

а) для атмосферных помех:

$$W(E_s) = \frac{2E_s / \sigma_\eta}{\pi \sigma_\eta [1 + (S - E_s / \sigma_\eta)^2]^{3/2}} \times \left\{ \frac{4[1 + S^2 + (E_s / \sigma_\eta)^2]}{1 + (S - (E_s / \sigma_\eta)^2)} E(r) - K(r) \right\}, \quad (4)$$

где $S = A_s / \sigma_\eta$, σ_η – среднеквадратическое значение помехи, $r = 2\{(SE_s / \sigma_\eta) / [1 + (S + E_s / \sigma_\eta)^2]\}^{1/2}$, $E(r)$ и $K(r)$ – полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода;

б) для квазигармонических помех типа мешающих ЧМ и ФМ сигналов:

$$W(E_s) = \frac{2E_s / E}{\pi E \sqrt{4(E_s / E)^2 v^2 - [(E_s / E)^2 + v^2 - 1]^2}}, \quad (5)$$

где $v = A_s / E$ – отношение амплитуд сигнала и помехи;

в) для индустриальных помех:

$$W(E_s) = \int_0^{2\pi} \frac{E_s}{2\pi \sqrt{2\pi\sigma} (E_s^2 + A_s^2 - 2E_s A_s \cos \varphi)} \times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \ln^2(E_s^2 + A_s^2 - 2E_s A_s \cos \varphi)^{1/2} / A\right\}, \quad (6)$$

где $A = \sqrt{2\sigma_\eta} \exp(-2\sigma^2)$, σ – параметр, характеризующий степень импульсности помехи.

Для гауссовой помехи плотность вероятностей огибающей смеси сигнала и помехи хорошо известна и описывается законом Райса.

На рис. 2 представлены результаты расчетов вероятности ошибки P_e при демодуляции МЧМ – АМ сигнала для гауссовой (кривые 1 и 2), атмосферной (кривые 3 и 4), индустриальной (кривые 5 – 8) и квазигармонической (кривая 9) помех. Для гауссовой, атмосферной и индустриальной помех кривые на рис. 2 построены в функции отношения сигнал/помеха по мощности $2\mathcal{E}/N_0 = (A_0/\sigma_\eta)^2 \Delta f / F_1$, где $\mathcal{E} = A_0^2 T / 2$ – энергия немодулированного сигнала на интервале наблюдения T , равном длительности одного двоичного символа; $N_0 = \sigma_\eta^2 \Delta f$ – спектральная мощность помехи; $F_1 = 1/T = 2400$ Гц – тактовая частота.

При этом глубина амплитудной модуляции (АМ) сигнала M принята равной 1. Кривые 1 – 6 получены для двух значений полосы пропускания приемника: Δf : 20 кГц (кривые 1, 3 и 6) и 30 кГц (кривые 2, 4 и 5). Характеристики индустриальной помехи зависят от высоты H расположения точки приема над индустриальным районом.

Степень импульсности помехи с увеличением высоты падает, что связано с частичной нормализацией помехи за счет сложения помеховых сигналов от многих источников. Кривые 7 и 8 построены соответственно для высот 1 км и 2 км. Кривая 9 для квазигармонической помехи построена в функции отношения сигнал/помеха по напряжению $v = A_s / E$.

Из проведенного рассмотрения можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением степени импульсности квазиимпульсных помех типа атмосферных и индустриальных, имеющего место при увеличении полосы пропускания приемника, помехоустойчивость демодулятора МЧМ – АМ сигнала повышается.

2. С увеличением высоты расположения точки приема над индустриальным районом маскирующее действие индустриальной помехи увеличивается вследствие снижения степени ее импульсности.

3. При воздействии квазигармонических помех типа ЧМ и ФМ сигналов от мешающих радиотехнических средств имеет место резко выраженный пороговый эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Spaulding A.D., Ahlbeck W.H., Espeland L.R.** Urban residential man – made radio noise analysis and predictions // Telecommunications research and engineering, 1971, rpt. 14, ITS.
2. **Shinde M.P., Gupta S.N.** A model of HF impulsive atmospheric noise // IEEE., Trans., v. EMC–19, 1974, N 2.
3. **Buchler W.F., King C.H., Lunder C.D.** VHF City Noise. IEEE Electromagnetic Compatibility, Symp. Rec., 1968, p. 113 - 118.
4. **Disneg R.T., Spaulding A.D.** Amplitude and Time Statistics of Atmospheric and Man-made Radio Noise. Report ERL – 160 ITS – 98, U.S. Department of Commerce, Wash., Febr., 1970.
5. **Константинов П.А., Куликов Г.В.** Анализ помехоустойчивости модема при цифровой обработке сигналов с минимальной частотной манипуляцией // Радиотехника, 1985, № 1. С. 31-39.
6. **Рубцов В.Д.** Статистические характеристики смеси сигнала и атмосферной помехи в ВЧ диапазоне // Радиотехника и электроника. 1979. Т. XVI. № 4. С. 31-43.
7. **Рубцов В.Д.** Вероятностные характеристики смеси узкополосного сигнала и квазигармонической помехи // Радиотехника и электроника. 1979. Т. XVI. № 6. С. 87-95.
8. **Рубцов В.Д.** Оптимизация приемного тракта в условиях квазиимпульсных радиопомех // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 1979. Т. 22. № 4. С. 64-70.

REFERENCES

1. **Spaulding A.D., Ahlbeck W.H., Espeland L.R.** Urban residential man – made radio noise analysis and predictions // Telecommunications research and engineering, 1971, rpt. 14, ITS.
2. **Shinde M.P., Gupta S.N.** A model of HF impulsive atmospheric noise // IEEE., Trans., v. EMC–19, 1974, no 2.
3. **Buchler W.F., King C.H., Lunder C.D.** VHF City Noise. IEEE Electromagnetic Compatibility, Symp. Rec., 1968, p. 113-118.
4. **Disneg R.T., Spaulding A.D.** Amplitude and Time Statistics of Atmospheric and Man-made Radio Noise. Report ERL – 160 ITS – 98, U.S. Department of Commerce, Wash., Febr., 1970.
5. **Konstantinov P.A., Kulikov G.V.** *Radiotekhnika*, 1985, no 1, pp. 31-39.
6. **Roubtsov V.D.** *Radiotekhnika i elektronika*, 1979, vol. XVI, no 4, 31-43.
7. **Roubtsov V.D.** *Radiotekhnika i elektronika*, 1979, vol. XVI, no 6, pp. 87-95.
8. **Roubtsov V.D.** *Radioelektronika*, 1979, vol. 22, no 4, pp. 17-21., pp. 64-70.

THE NOISE IMMUNITY OF THE DIGITAL DEMODULATOR MFM-AM SIGNAL USED IN DATA COMMUNICATIONS SYSTEMS OF AIR TRAFFIC CONTROL WITH AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE AGAINST A NON-GAUSSIAN NOISE

Senyavskiy A.L.

The article analyzes the robustness of the digital demodulator of the signal with the lowest frequency shift keying at a subcarrier frequency with respect to non-Gaussian interference type of atmospheric, industrial noise and interfering frequency -and phase-shift keyed signals. This type of demodulator is used for the transmission of navigation data in the systems of air traffic control with automatic dependent surveillance.

Keywords: radio, noise immunity, non-Gaussian noise, air traffic control, automatic dependent surveillance.

Сведения об авторе

Сенявский Александр Леонидович, 1937 г.р., окончил МЭИС (1960), кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой метрологии, стандартизации и измерений в инфокоммуникациях МТУСИ, автор более 100 научных работ, область научных интересов: метрология, радиосвязь, радионавигация, навигация и управление воздушным движением.