

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-50-59

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ ДЕМОДУЛЯТОРОВ ПРИ РАБОТЕ С ШУМОВЫМИ ПОМЕХАМИ

Герасименко Евгений Сергеевич

преподаватель кафедры математики и моделирования систем,
Воронежский институт МВД России.E-mail: jenya35353@yandex.ru

Шерстюков Сергей Анатольевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникационных систем
и технологий, Воронежский институт МВД России.E-mail: sherserge@gmail.com

Адрес: 394065, Российская Федерация, Воронеж, пр. Патриотов, д. 53.

Аннотация: В статье рассмотрена методика расчёта потенциальной помехоустойчивости демодуляторов при работе с шумовыми помехами различных типов, и доказана её эффективность. Так же приведён пример анализа предлагаемых алгоритмов цифровой демодуляции сигналов с амплитудной и фазовой манипуляцией. Приведена программа статистического имитационного моделирования.

Ключевые слова: демодулятор, демодуляция сигналов, фазоманипулированный сигнал, методика расчёта помехоустойчивости, шумовые помехи.

Введение

Основная масса алгоритмов обработки дискретных сигналов работает на принципе последовательного суммирования всех принимаемых отсчётов и последующем решении о принятом символе. Предлагаемый алгоритм демодуляции сигналов позволяет сократить количество выполняемых операций.

С точки зрения упрощения программной или аппаратной реализации алгоритма обработки целесообразно использовать простые арифметические операции сложения или вычитания, и минимизировать число операций умножения и деления, а особенно нелинейных функциональных преобразований.

Математической моделью алгоритма (и устройства) цифровой обработки сигнала является совокупность выражений типа (1) или последовательностей операций, например, показанных на рис. 1:

$$y_i = \sum_{k=0}^{N-1} (s_{1(i-k)} - s_{2(i-k)}) = \sum_{k=0}^{N-1} x_{(i-k)}. \quad (1)$$

Принимаемый аналоговый сигнал в простейшем случае может иметь детерминированную (гармоническую) форму $s(t) = S(t) \cos(2\pi f_0 t + \psi(t))$, но его параметры являются случайными функциями времени,

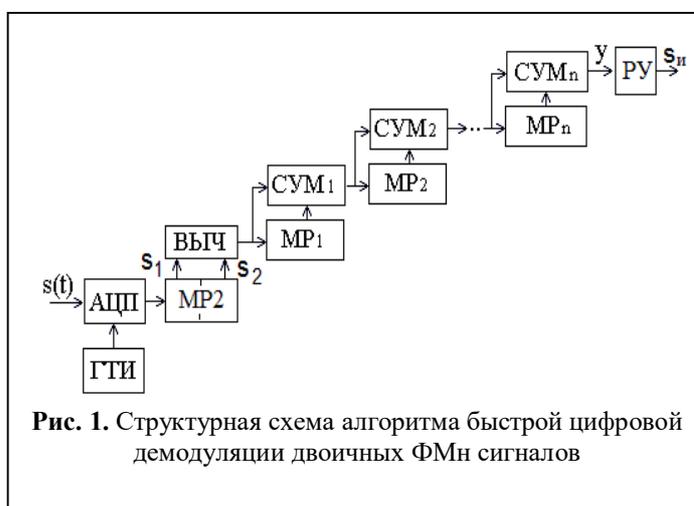


Рис. 1. Структурная схема алгоритма быстрой цифровой демодуляции двоичных ФМн сигналов

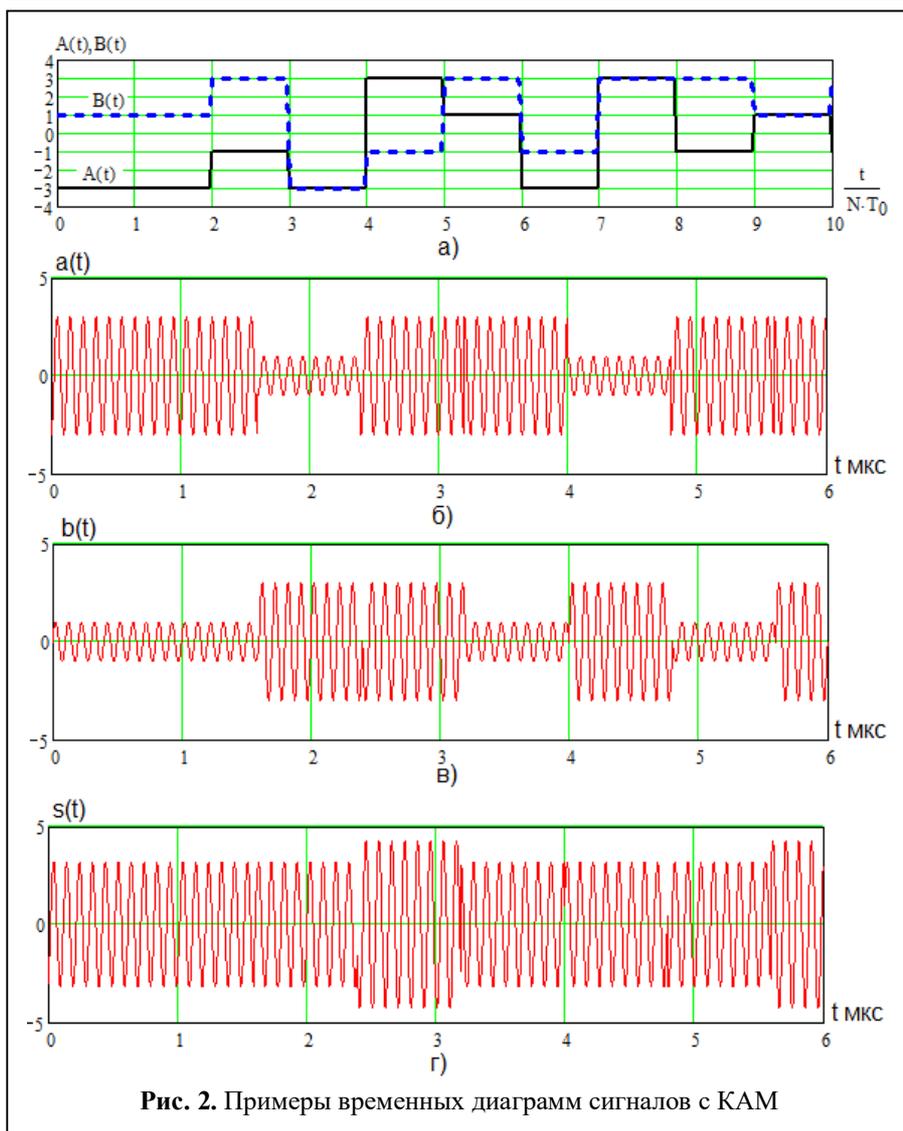


Рис. 2. Примеры временных диаграмм сигналов с КАМ

определяемыми свойствами канала связи, передаваемыми информационными символами и помехами на входе приемника. В простейшем случае используем аддитивную модель с гауссовской шумовой помехой $x(t) = s(t) + n(t)$.

Вычислительный эксперимент на основе статистического имитационного моделирования сигналов и алгоритмов их обработки широко применяется при анализе радиотехнических систем [1, 2]. Основой моделирования являются программные источники (датчики) псевдослучайных чисел с заданными статистическими свойствами [3, 4].

В программе MathCAD [5] представлены датчики случайных чисел с различными распределениями вероятностей. Аналогичные

датчики используются в программах C++ Builder [6] и Delphi [7], например, источник $\text{RandG}(a, \sigma)$ нормальных случайных чисел со средним значением a и среднеквадратическим отклонением σ .

Эффективным средством комплексного моделирования радиотехнических устройств является программа Matlab. При реализации электронного устройства на ПЛИС фирмы Xilinx имеется возможность сформировать его модель в программе ISE и ввести её в программу Matlab.

Простейшие модели модулированных радиосигналов базируются на выражениях $s(t) = S(t) \cos(2\pi f_0 t + \psi(t))$ или $s(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t) + B(t) \sin(2\pi f_0 t)$, соот-

ветствующие идеальные временные диаграммы показаны, например, на рис. 2.

При прохождении через узкополосный радиотракт форма информационных импульсов меняется (сглаживается), появляется задержка сигнала (рис. 3). Для моделирования узкополосных радиосигналов целесообразно использовать цифровую модель радиотракта вида $y_i = a_0 x_i + a_2 x_{i-2} + a_4 x_{i-4} - b_2 y_{i-2} - b_4 y_{i-4}$.

Рассмотренные алгоритмы когерентной демодуляции базируются на базовой операции суммирования $N \gg 1$ разностей отсчётов принимаемого сигнала в смеси с помехами. Эта операция линейна, то есть отклик демодулятора содержит помеховую компоненту вида

$$\zeta_i = \sum_{k=0}^{N-1} \xi_{(i-k)}, \quad (2)$$

где ξ_n — входной шумовой отсчёт на n -м периоде входного воздействия, а ζ_n — выходной шумовой отсчёт демодулятора на том же периоде.

Согласно центральной предельной теореме теории вероятностей [8], суммирование вида (1) большого числа случайных отсчётов с достаточно произвольным распределением вероятностей приводит к нормализации результата суммирования (выходного отсчёта), который имеет распределение вероятностей, близкое к нормальному.

Пусть входная шумовая помеха демодулятора имеет равномерное распределение вероятностей в интервале от a до b ,

$$w(\xi) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq \xi \leq b, \quad (3)$$

оценка которого, полученная методом статистического имитационного моделирования, показана сплошной линией на рис. 4, а. Там же точечной линией показана плотность вероятностей нормального распределения.

На рис. 4, б сплошной линией показана оценка распределения вероятностей шумовой помехи на выходе базового алгоритма демоду-

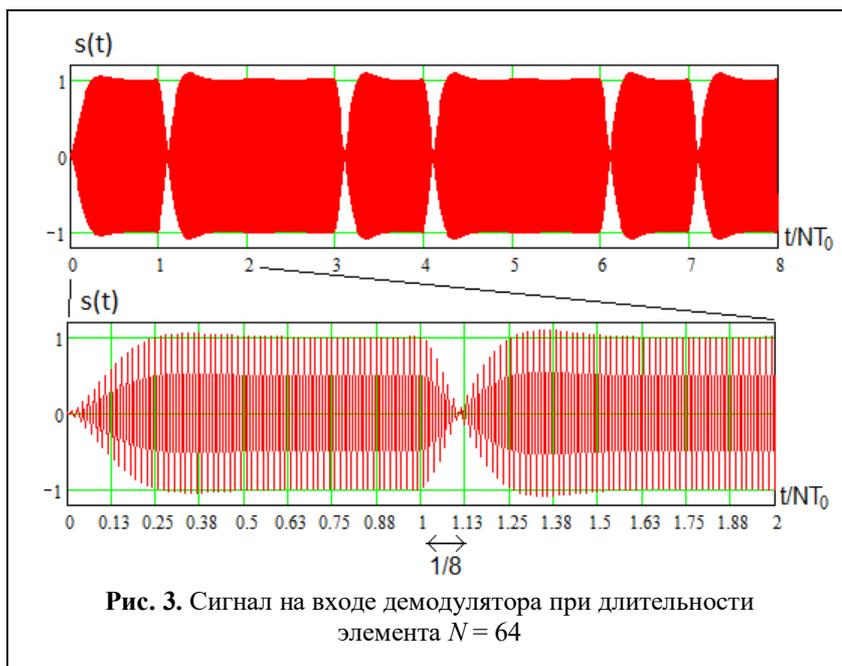


Рис. 3. Сигнал на входе демодулятора при длительности элемента $N = 64$

ляции (рис. 1), а точечной линией — плотность вероятностей значений нормального случайного процесса. Как видно, существенно негауссовский входной шум с высокой точностью становится нормальным на выходе демодулятора.

Логистическое распределение вероятностей [9, 10] имеет функцию плотности вида

$$w(\xi) = \frac{1}{b} \frac{\exp\left(-\frac{\xi-a}{b}\right)}{\left[1 + \exp\left(-\frac{\xi-a}{b}\right)\right]^2}, \quad (4)$$

где a — среднее значение, а b — параметр масштаба и отличается от нормального нали-

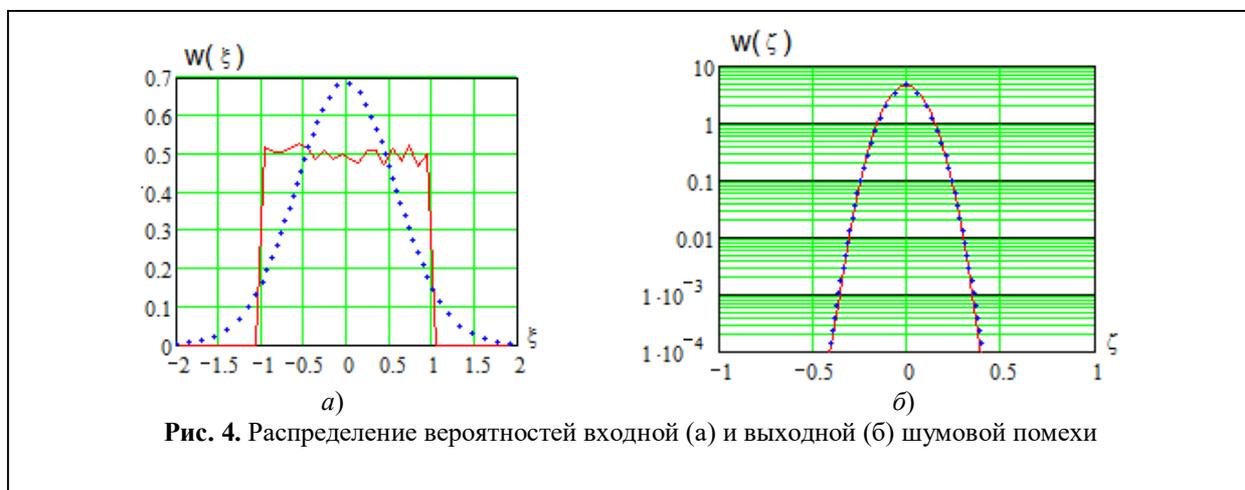


Рис. 4. Распределение вероятностей входной (а) и выходной (б) шумовой помехи

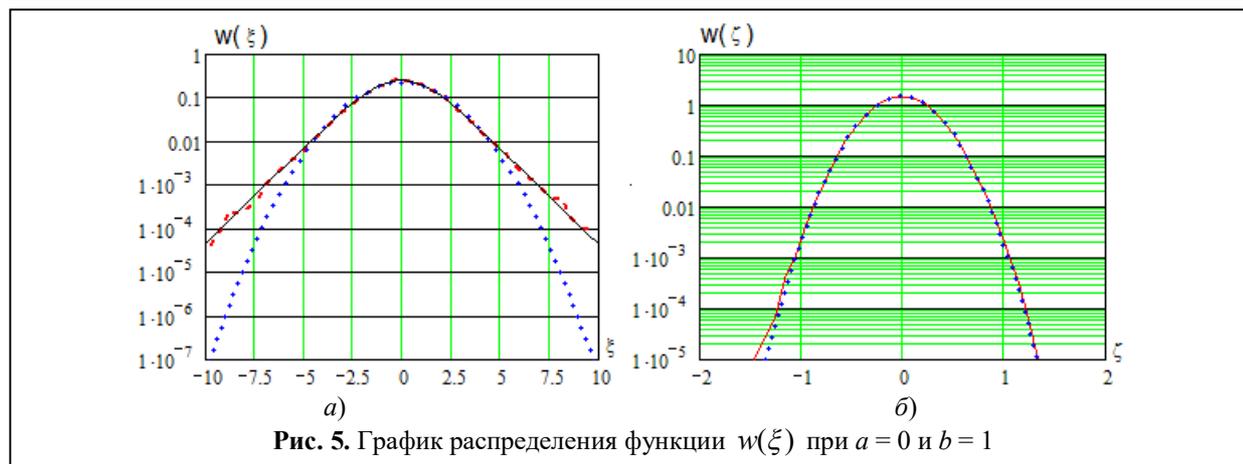


Рис. 5. График распределения функции $w(\xi)$ при $a = 0$ и $b = 1$

чим «тяжёлых хвостов» — повышенной вероятностью выбросов. Функция $w(\xi)$ при $a = 0$ и $b = 1$ отображается сплошной линией на рис. 5, а (пунктиром показан результат статистического моделирования), точечной кривой показано нормальное распределение вероятностей с нулевым средним и $\sigma = 1$.

На рис. 5, б показаны результаты, аналогичные рис. 4, б. И в этом случае негауссовский входной шум с повышенной вероятностью выбросов становится нормальным на выходе демодулятора.

В общем виде логистическое распределение имеет функцию плотности

$$f(x) = \frac{1}{2b} \exp\left(-\frac{x-a}{b} \left[1 + e^{-\frac{x-a}{b}}\right]^{-2}\right), \quad (5)$$

где a — параметр положения; b — параметр масштаба; e — число Эйлера (2,71...).

Таким образом, разработанная методика расчёта потенциальной помехоустойчивости предлагаемых цифровых демодуляторов оказывается применимой для шумовых помех с разнообразными статистическими свойствами.

При статистическом имитационном моделировании характеристик помехоустойчивости демодулятора, прежде всего вероятностей ошибок $p_{ош}$, необходимо обрабатывать достаточно продолжительные последовательности из $L \gg 1$ информационных символов. Величина L должна удовлетворять условию

$$L > \frac{10 \div 100}{P_{ош}}, \quad (6)$$

например, при $P_{ош} = 10^{-4}$ получим $L > 10^5 \div 10^6$.

При $L < 10^5$ для статистического имитационного моделирования целесообразно использовать программу MathCAD, которая предоставляет программисту разнообразные функции по формированию и статистической обработке псевдослучайных чисел, однако платой за удобство является увеличение времени вычислений. При больших L целесообразно использовать системы объектно-ориентированного программирования, например, Delphi, обеспечивающие высокую скорость моделирования.

На рис. 6 показано рабочее окно программы моделирования реализаций аддитивной смеси сигнала и шума на входе и выходе узкополосного радиотракта. Задаётся число информационных символов L , число N периодов сигнала в символе, отношение сигнал/шум h , выбирается цифровая модель узкополосного приёмного тракта при $N_M = 0$ (тракт отсутствует) и $N_M = 16, 32, 64$, а также вид описания результата (график или созвездие) для сигналов с двоичной ФМ (кнопка ФМ2), четырёхпозиционной ФМ (кнопка ФМ4), четырёхпозиционной АМ (кнопка АМ4) и с шестнадцатипозиционной КАМ (кнопка КАМ16). В области результатов моделирования показана временная диаграмма сигнала ФМ2 при $L = 10, N = 64$ и $h = 20$ дБ.

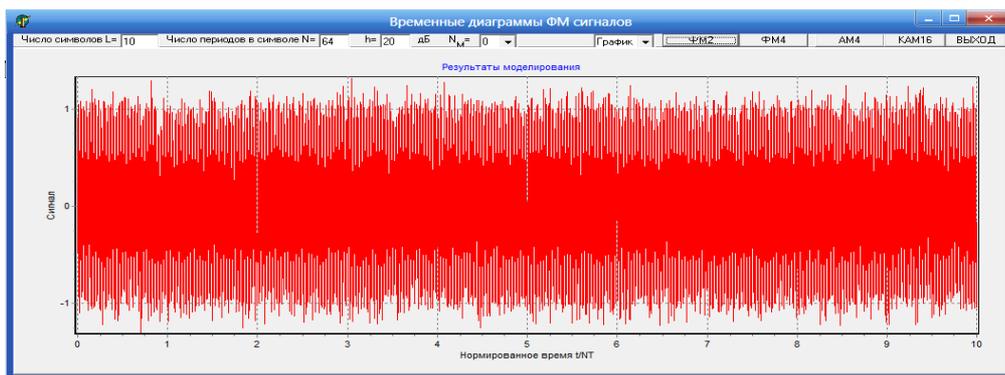


Рис. 6. Рабочее окно программы моделирования реализаций аддитивной смеси ФМн сигнала и шума

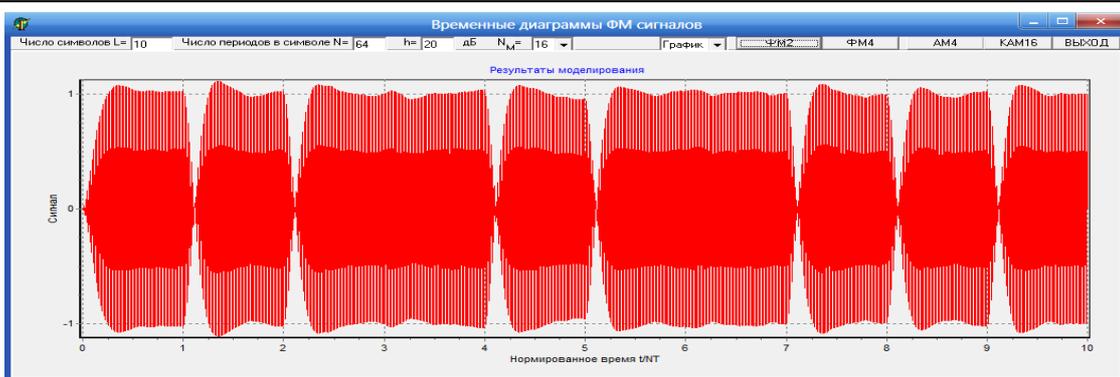


Рис. 7. Временная диаграмма ФМн сигнала на выходе узкополосного радиотракта с $N_M = 16$

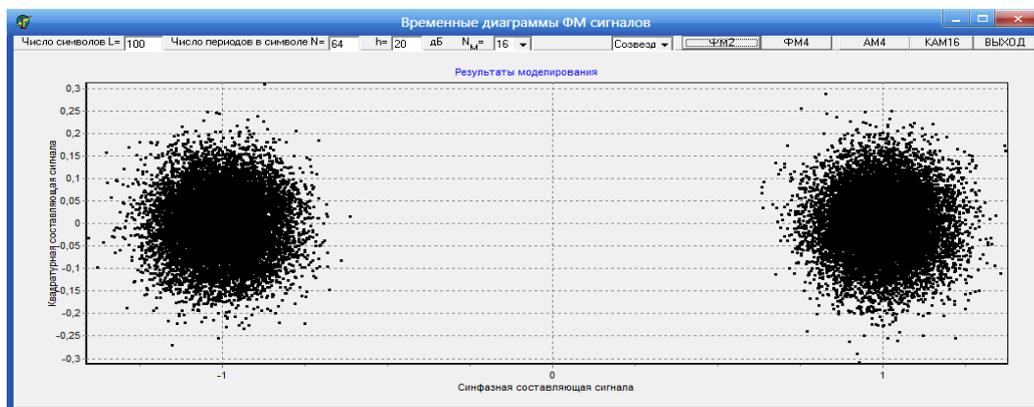


Рис. 8. Созвездие ФМн сигнала

На рис. 7 показан ФМн сигнал на выходе узкополосного радиотракта с $N_M = 16$, а на рис. 8 — его созвездие.

На рис. 9 приведены аналогичная временная диаграмма для четырёхпозиционного ФМ сигнала, а на рис. 10 — соответствующее ему созвездие.

На рис. 11–13 показаны аналогичные диаграммы для сигнала с четырёхпозиционной

АМ, а на рис. 14–16 для сигнала с КАМ16.

Заключение

Как видно, рассматриваемые сигналы являются различными вариантами сигналов с амплитудной и фазовой манипуляцией. При прохождении узкополосного приемного тракта растягиваются фронт и срез радиоимпульсов, они перекрываются, уменьшается энергия символа.

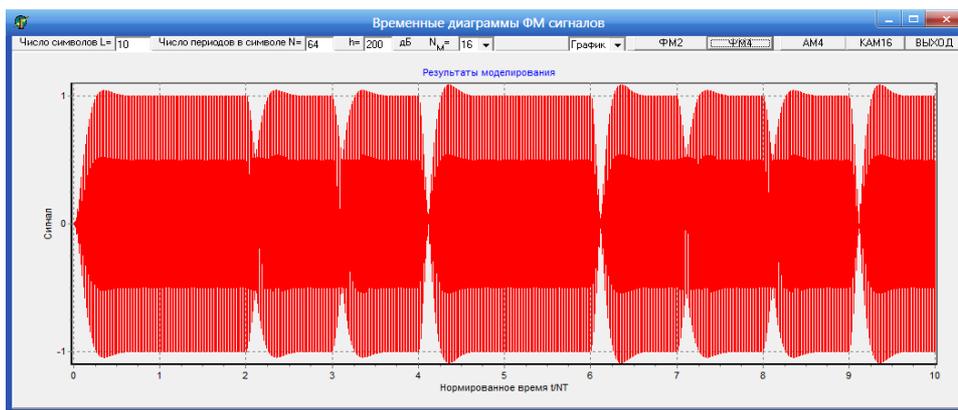


Рис. 9. Временная диаграмма четырёхпозиционного ФМ сигнала на выходе узкополосного радиотракта

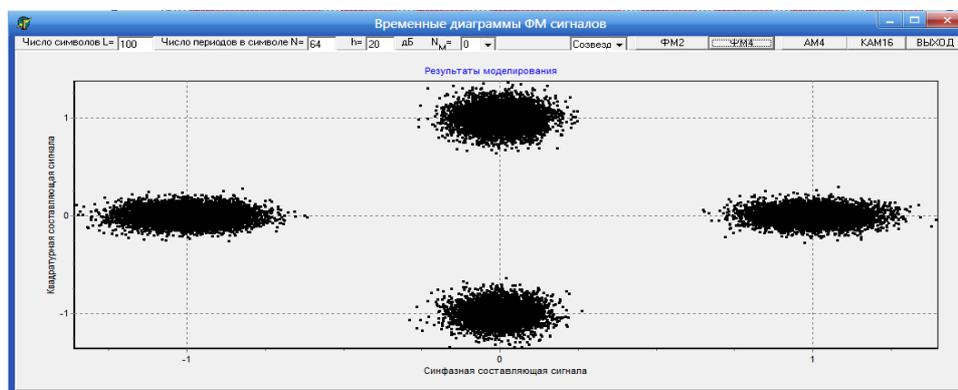


Рис. 10. Созвездие четырёхпозиционного ФМ сигнала

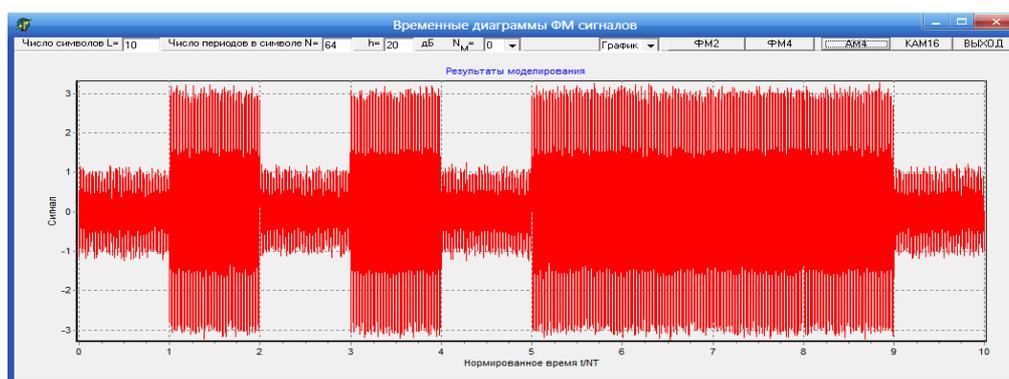


Рис. 11. Временная диаграмма сигнала с четырёхпозиционной АМ

Литература

1. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2009. 343 с.
2. Шелухин О.И., Теняшев А.М., Осин А.В. Моделирование информационных систем: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
3. Бакалов В.П. Цифровое моделирование

- случайных процессов. М.: Сайнс-пресс, 2002. 88 с.
4. Ермаков С.М. Статистическое моделирование. Ч. 1.: Моделирование распределений.. СПб.: НИИММСПбГУ, 2006. 63 с.
5. Макаров Е.Г. Mathcad: учебный курс. СПб.: Питер, 2009. 394 с.
6. Вальна О.Д. Borland C++ Builder: Экспресс-курс. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 224 с.

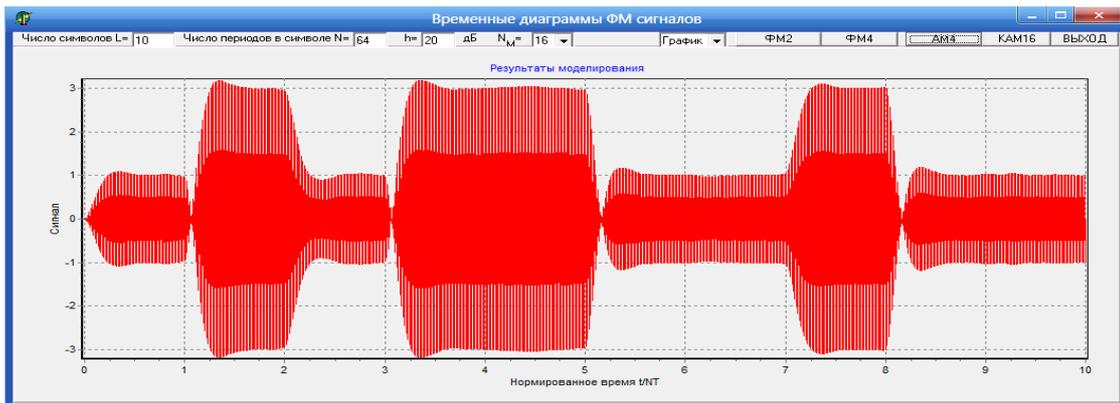


Рис. 12. Временная диаграмма сигнала с четырехпозиционной АМ на выходе узкополосного радиотракта

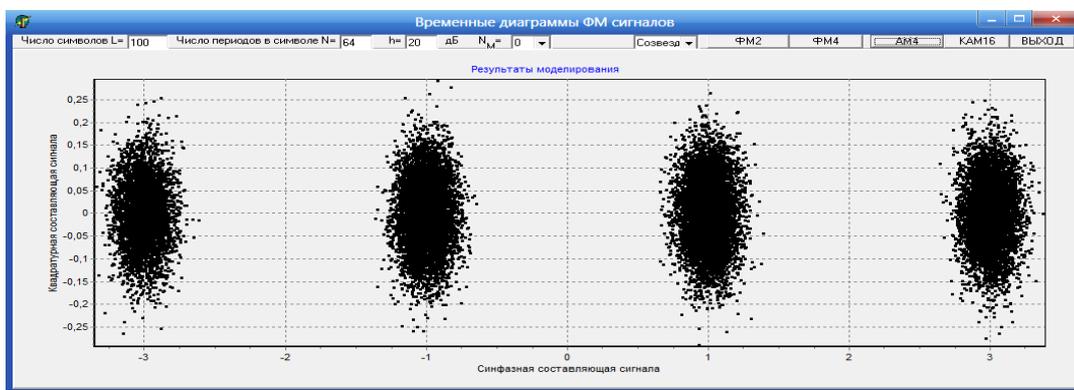


Рис. 13. Созвездие четырехпозиционного АМ сигнала

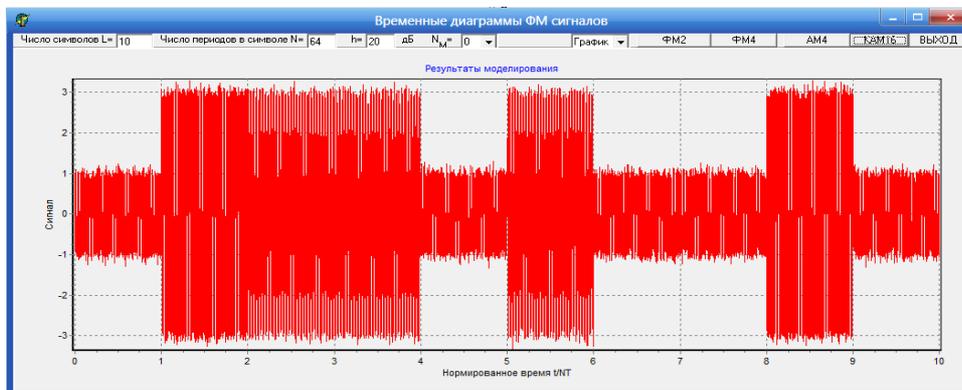


Рис. 14. Временная диаграмма сигнала с KAM16 на входе радиотракта

7. *Архангельский А.Я.* Delphi 2006 : Справочное пособие: Язык Delphi, классы, функции Win32 и .NET. М.: Бином–Пресс, 2006 г. 1152 с.

8. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высш. шк., 2000. 483 с.

9. *Гихман И.И., Хроход А.В.* Введение в теорию случайных процессов. М.: 1977. 568 с.

10. *Кендалл М., Стьюарт А.* Теория распределений. М.: Наука, 1966. 587 с.

Поступила 21 марта 2022 г.

English

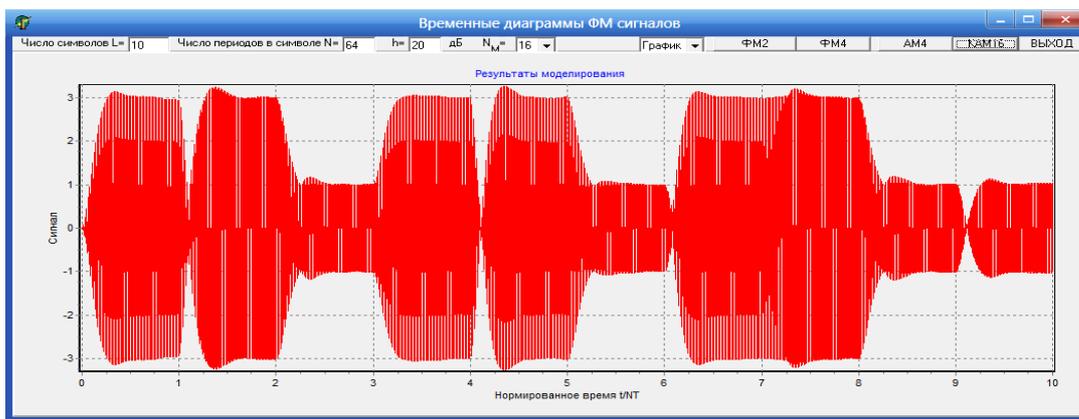


Рис. 15. Временная диаграмма сигнала с КАМ16 на выходе радиотракта

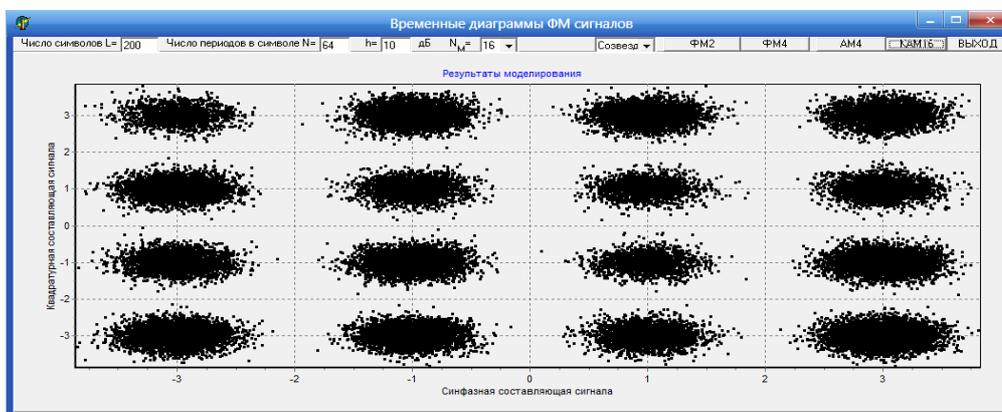


Рис. 16. Созвездие сигнала с КАМ16

CALCULATION METHODS' ANALYSIS OF POTENTIAL NOISE IMMUNITY OF DIGITAL DEMODULATORS IN OPERATING WITH NOISE INTERFERENCE

Evgeny Sergeevich Gerasimenko — Lecturer of the Department of Mathematics and Systems Modeling, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia.

E-mail: jenya35353@yandex.ru

Sergey Anatolyevich Sherstyukov — Grand Dr. in Engineering, Professor of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia.

E-mail: sherserge@gmail.com

Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya st., 23.

Abstract: The article examines a new proposed algorithm scheme of fast digital demodulation of binary phase-shift keyed signals, distinct in implementing minimum possible number of simple mathematical operations for one period of incoming signal. Noise interference is mathematically described that affect received signals' distortion. A computing experiment was performed based on statistical simulation that enables to analyze signal distortions when it passes through a narrowband radio path. Simulation survey findings and cumulative calculations as per common methods enable to conclude about optimality of proposed algorithms and calculations. Calculation methods for potential noise immunity of demodulators when operating with noise interference of various types is examined. Mathematical calculations and applied known formulas proved its validity and efficiency. Developed methods for calculating potential noise immunity of proposed digital demodulators is applicable to noise interference of various statistical properties. MATLAB program is an effective tool for comprehensive simulation of radio devices. When implementing FPGA-based electronic device by Xilinx Co., it is possible to set-up its simulation in ISE program and

introduce it into Matlab program. It makes sense using MathCAD program for statistical simulation modeling with small values of signal periods for information symbol $L \leq 10^5$, which provides program developer with a variety of functions to generate and statistically process pseudo-random numbers, but calculation time increase is retribution for this convenience. When L is big it makes sense using object-oriented programming systems, for example, Delphi ensuring high speed simulation. An example is given for proposed algorithms' analysis of digital demodulation of phase-shift keyed signals. The program of statistical simulation was prepared within the research that implements the proposed calculation methods for potential noise immunity. Work view is presented in this article.

Keywords: demodulator, signal demodulation, phase-manipulated signal, noise immunity calculation method, noise interference.

References

1. *Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A.* Modeling of systems: textbook. For universities. Moscow: Vyshaya shkola, 2009. 343 p.
2. *Shelukhin O.I., Tenyakshev A.M., Osin A.V.* Modeling of information systems: textbook. manual. Moscow: Raditehnika, 2005. 368 p.
3. *Bakalov V.P.* Digital modeling of random processes. Moscow: Science Press, 2002. 88 p.
4. *Ermakov S.M.* Statistical modeling. Part 1.: Modeling of distributions.. St. Petersburg: NIIMM St. Petersburg State University, 2006. 63 p.
5. *Makarov E.G.* Mathcad: training course. St. Petersburg: St. Petersburg, 2009. 394 p.
6. *Valpa O.D.* Borland C++ Builder: Express course. St. Petersburg: BHV–Petersburg, 2006. 224 p.
7. *Arkhangelsky A.Ya.* Delphi 2006 : Reference manual: Delphi language, classes, Win32 and .NET functions. Moscow: Binom–Press, 2006, 1152 p.
8. *Wentzel E.S., Ovcharov L.A.* Probability theory and its engineering applications. Moscow: Vyshaya shkola, 2000. 483 p.
9. *Gihman I.I., Skorokhod A.V.* Introduction to the theory of random processes. Moscow: 1977. 568 p.
10. *Kendall M., Stewart A.* Theory of distributions. Moscow: Nauka, 1966. 587 p.