УДК 621.396

АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ДВОИЧНЫХ СИГНАЛОВ С ОФМ И ЕГО ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ

А.Н. Глушков, Е.С. Герасименко

В статье рассмотрена проблема обработки сигналов и создания помехоустойчивой связи. Устойчивость к различным видам искажений, увеличение быстродействия и повышение помехозащищенности являются важными задачами, которые ставят перед разработчиками аппаратуры приема и обработки сигналов. В рамках исследования и предложения решения проблемы рассмотрен модернизированный алгоритм когерентной демодуляции сигналов. В тексте приведена структурная схема и рассмотрен принцип работы предлагаемого алгоритма цифровой когерентной демодуляции двоичных сигналов с относительной фазовой манипуляцией, обозначены его преимущества и недостатки относительно других известных алгоритмов. Произведено статистическое имитационное моделирование устройства, которое будет работать на основе предлагаемого алгоритма цифровой когерентной демодуляции двоичных сигналов с относительной фазовой манипуляцией. Для создания помехоустойчивой связи возможно использовать разработанные алгоритмы и соответствующее устройства когерентной цифровой демодуляции сигналов с двоичной фазовой манипуляцией и относительной фазовой манипуляцией. В результате моделирования проведена оценка помехоустойчивости когерентной демодуляции двоичных сигналов с относительной фазовой манипуляцией, доказано, что предлагаемый цифровой алгоритм демодуляции оказывается оптимальным. Определена вероятность ошибки цифровой демодуляции сигналов с четырехпозиционной относительной фазовой манипуляцией, показана высокая эффективность демодулятора при отсутствии явления «обратной работы»

Ключевые слова: алгоритм, когерентная демодуляция, относительная фазовая манипуляция

Введение. Проблема обработки сигналов и создание помехоустойчивой связи актуальна в системах радиосвязи. Устойчивость к различным видам искажений, увеличение быстродействия и повышение помехозащищенности являются важными задачами, которые ставят перед разработчиками аппаратуры приема и обработки сигналов.

Содержание работы. Структурная схема алгоритма когерентной демодуляции сигнала с относительной фазовой манипуляцией (ОФМ) показана на рис. 1. Информационный символ передается за счет разности фаз принимаемого и предшествующего элементов, равной 0 или π .

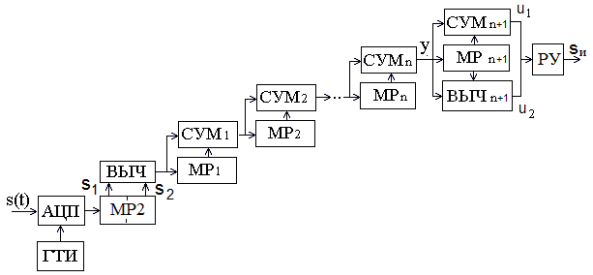

Рис. 1. Структурная схема алгоритма когерентной демодуляции сигнала с относительной фазовой манипуляцией

Основой демодулятора является базовый алгоритм когерентной обработки сигнала с ОФМ. Значения его отклика y_i для принятого элемента длительностью N периодов складываются в блоке СУМ $_{n+1}$ и вычитаются в блоке ВЫЧ $_{n+1}$ со значением y_{i-N} для предшествующего элемента, записанным в многоразрядном регистре сдвига МР $_{n+1}$ емкостью $(N-1)$ отсчетов. В результате

$$u_{1i} = y_{0i} + y_{0(i-N)} = \sum_{k=0}^{2N-1} \left(s_{1(i-k)} - s_{2(i-k)} \right), \quad (1)$$

$$u_{2i} = y_{0i} - y_{0(i-N)} = \sum_{k=0}^{N-1} \left(s_{1(i-k)} - s_{2(i-k)} \right) - \sum_{k=N}^{2N-1} \left(s_{1(i-k)} - s_{2(i-k)} \right) \quad (2)$$

Если фазы этих элементов одинаковы, на выходе сумматора СУМ $_{n+1}$ в момент окончания символа накопится величина $u_1 = \pm 4NS$ (знак определяется значением обеих фаз 0 или π), а на выходе вычитателя ВЫЧ$_{n+1}$ получим u_2=0. Если соседние элементы противофазны, то $u_1 = 0$ и $u_2 = \pm 4NS$ (фазы чередуются 0, π или π, 0). Зависимости нормированных значений u_1 и u_2 от номера символа k при отсутствии помех показаны на рис. 2, сплошная линия относится к u_1, точечная линия – к u_2, пунктиром показаны начальные фазы элементов, а точками отмечены моменты принятия решения.

Глушков Алексей Николаевич – ВИ МВД России, канд. техн. наук, доцент, e-mail: a.glushkov75@yandex.ru
Герасименко Евгений Сергеевич – ВИ МВД России, адъюнкт, e-mail: jenya35353@yandex.ru

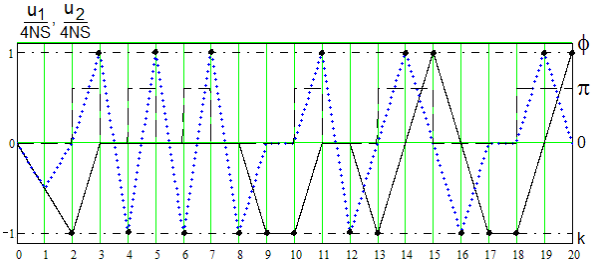

Рис. 2. Зависимости нормированных значений u_1 и u_2 от номера символа k при отсутствии помех

Разработанный алгоритм когерентной демодуляции позволяет различать все четыре возможных варианта изменения фазы для двух соседних символов, фактически реализуя их прием «в целом» [1]. В этом случае алгоритм работы решающего устройства (РУ) заключается в следующем: сравниваются модули u_1 и u_2, и если $|u_1| \geq |u_2|$, то при $u_1 \geq 0$ фазы двух принятых равны 00, а иначе ππ, а если $|u_1| < |u_2|$, то при $u_2 \geq 0$ фазы двух принятых равны 0π, а иначе π0.

Сигналы с ОФМ были предложены [2–4] как средство борьбы с обратной работой фазового демодулятора, и в этом случае необходимо определять модули величин u_1 и u_2 для формирования в РУ решения о наличии или отсутствии изменения фазы соседних элементов: если $|u_2| > |u_1|$, то принимается решение об изменении фазы на π, а в противном случае – об одинаковых фазах соседних информационных элементов.

На рис. 3 показаны полученные в результате статистического имитационного моделирования временные диаграммы u_1 и u_2, аналогичные приведенным на рис. 2, при наличии шумовой помехи. Как видно из этих зависимостей, демодулятор оптимально сглаживает демодулированный сигнал и фильтрует шумовую помеху, что благоприятно сказывается на помехоустойчивости демодуляции.

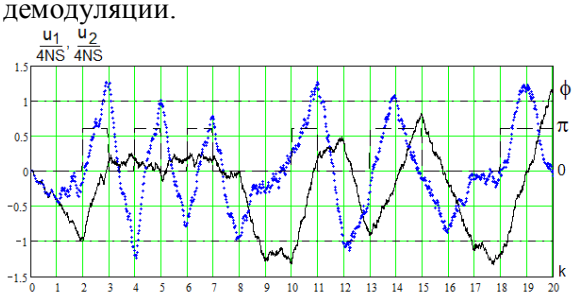

Рис. 3. Временные диаграммы результатов статистического имитационного моделирования u_1 и u_2

Определим помехоустойчивость алгоритма когерентной демодуляции двоичных сигналов с ОФМ, показанного на рис. 1. Как уже отмечалось, в демодуляторе имеется возможность принимать решения о фазах сразу двух принимаемых элементов. Для устранения явления обратной работы фазового демодулятора сигналов с ОФМ необходимо выявлять только совпадение или несовпадение фаз принятого и предшествующего элементов. Для этого необходимо определять модули величин u_1 и u_2 для формирования в решающем устройстве (РУ) (рис. 1) решения о наличии или отсутствии изменения фазы соседних элементов: если $|u_2| > |u_1|$, то принимается решение об изменении фазы на π, а в противном случае – об одинаковых фазах соседних информационных элементов.

При отсутствии сигнальной составляющей плотность вероятностей модуля отклика канала $z = |u|$ имеет вид

$$w_{Ш}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right], \; z \geq 0, \tag{3}$$

а при ее наличии

$$w_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\left\{\exp\left[-\frac{(z-\alpha)^2}{2\sigma^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+\alpha)^2}{2\sigma^2}\right]\right\}, \; z \geq 0, \; a \geq 0, \tag{4}$$

при $a = 4NS$ и $\sigma = \sqrt{4N}\sigma_{Ш}$. В результате получим выражение для вероятности правильного определения наличия или отсутствия изменения фазы двух соседних информационных элементов

$$q_1 = \frac{1}{2}\left\{1 + [\Phi(h)]^2\right\} = \frac{1}{2}\left\{1 + \left[\Phi\left(\sqrt{2}g\right)\right]^2\right\}, \tag{5}$$

тогда вероятность ошибки приема элемента сигнала с ОФМ равна

$$p_{ОШ\ ОФМ} = 1 - \frac{1}{2}\left\{1 + \left[\Phi\left(\sqrt{2}g\right)\right]^2\right\}. \tag{6}$$

Функции Крампа

$$\Phi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \tag{7}$$

и Лапласа $F(x)$

$$F(h) = \int_{-\infty}^{h} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt \qquad (8)$$

связаны соотношением

$$\Phi(x) = 2F(x) - 1 \ , \qquad (9)$$

в результате для вероятности ошибки $p_{ОШ\ ОФМ}$ приема сигнала с ОФМ с учетом выражения

$$P_{ош} = 1 - F(\sqrt{2}h) \ , \qquad (10)$$

для вероятности ошибки $p_{ОШ\ ФМ}$ приема сигнала с двоичной ФМ получим:

$$p_{ОШ\ ОФМ} = 2F\left(\sqrt{2}g\right)\left[1 - F\left(\sqrt{2}g\right)\right] \approx 2\left[1 - F\left(\sqrt{2}g\right)\right] = 2p_{ОШ\ ФМ} \ . \qquad (11)$$

Когерентный прием сигналов с ОФМ проигрывает сигналам с ФМ по вероятности ошибки примерно в два раза. Это известный результат, например [5], соответствующий оптимальной обработке сигнала с ОФМ, что свидетельствует об **оптимальности** предложенного алгоритма демодуляции.

Зависимость $p_{ОШ\ ОФМ}$ от отношения сигнал/шум h (дБ) показана на рис. 4, пунктиром показана кривая $p_{ОШ\ ФМ}$. Как видно, помехоустойчивость алгоритма демодуляции сигнала с ОФМ мало отличается от аналогичной характеристики для ФМ сигнала, но при этом у ОФМ отсутствует возможность обратной работы демодулятора.

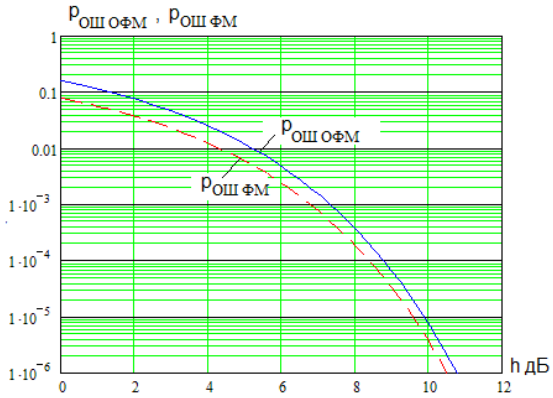

Рис. 4. Зависимость $p_{ОШ\ ОФМ}$ от отношения сигнал/шум h

Базовый алгоритм когерентной обработки сигналов позволяет реализовать алгоритмы демодуляции различных сигналов с фазовой манипуляцией. Он является универсальной алгоритмической основой для реализации демодуляторов на программной и аппаратной основе.

В качестве аппаратной основы для реализации предлагаемого алгоритма можно использовать:

- заказные специализированные цифровые сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), спроектированные под конкретный алгоритм демодуляции;
- процессор цифровой обработки сигналов (цифровой сигнальный процессор – Digital Signal Processor – DSP) [6, 7] – микропроцессор, обеспечивающий поточный характер обработки данных в реальном времени, например процессоры серий TMS320;
- программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), например фирм Xilinx и Altera.

Заказные СБИС цифровой обработки сигналов имеют высокую стоимость, и их применение целесообразно при высокой серийности.

При использовании сигнальных процессоров алгоритм обработки реализуется программно в виде последовательности операций, что требует высокой скорости их выполнения. Процессоры TMS320C54xx имеют быстродействие до 200 MIPS при невысокой стоимости. Серия TMS320C6000 имеет высокое быстродействие как с фиксированной, так и с плавающей точкой. Примером могут служить процессоры TMS320C62x с фиксированной точкой и быстродействием 1600 MIPS и TMS320C67x с плавающей точкой и производительностью от 1000 MIPS. Разрядность обрабатываемых данных 32–48 бит, имеется возможность параллельной организации вычислений, однако они имеют высокую стоимость. Несмотря на высокую производительность сигнальных процессоров, программная реализация алгоритма обработки существенно ограничивает возможности процедур когерентной демодуляции в реальном времени на высоких частотах (до нескольких мегагерц).

Широкие возможности обеспечивает аппаратная реализация предлагаемого быстрого алгоритма цифровой обработки сигналов на современных ПЛИС [8-10], например фирмы Xilinx.

Заключение. Для создания помехоустойчивой связи возможно

использовать разработанные алгоритмы и соответствующее устройства когерентной цифровой демодуляции сигналов с двоичной ФМ и ОФМ. В результате моделирования проведена оценка помехоустойчивости когерентной демодуляции двоичных сигналов с ОФМ, доказано, что предлагаемый цифровой алгоритм демодуляции оказывается оптимальным. Определена вероятность ошибки цифровой демодуляции сигналов с четырехпозиционной ОФМ, показана высокая эффективность демодулятора при отсутствии явления «обратной работы».

Литература

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений / Л.М. Финк. – М.: Советское радио, 1970. – 728 с.

2. Окунев Ю.Б. Теория фазоразностной модуляции / Ю.Б. Окунев. – М.: Связь, 1979. – 216 с.

3. Петрович Н.Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией / Н.Т. Петрович. – М.: Сов радио, 1965. – 263 с.

4. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами / Ю.Б. Окунев. – М.: Радио и связь, 1991. – 296 с.

5. Информационные технологии в радиотехнических системах: учеб. пособие / под ред. И.Б. Федорова. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 846 с.

6. Круг П.Г. Процессоры цифровой обработки сигналов: учеб. пособие / П.Г. Круг. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 128 с.

7. Богатырев Е.А. Энциклопедия электронных компонентов / Е.А. Богатырев, В.Ю. Ларин, А.Е. Лякин. – Т. 1. – М.: МАКРО ТИМ, 2003. – 224 с.

8. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС / К. Максфилд. – М.: Издательский дом Додэка XXI, 2007. – 408 с.

9. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы Alterra: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры / В.Б. Стешенко. – М.: Издательский дом Додэка XXI, 2007. – 576 с.

10. Тарасов И.Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС Xilinx с применением языка VHDL / И.Е. Тарасов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 252 с.

11. Герасименко Е.С. Алгоритм цифровой когерентной демодуляции фазоманипулированных сигналов и его характеристики / Е.С. Герасименко // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – № 1. – С. 137-143.

Воронежский институт МВД России

ALGORITHM OF DIGITAL COHERENT DEMODULATION OF BINARY SIGNALS WITH DIFFERENTIAL PHASE KEYING AND ITS INTERFERENCE IMMUNITY

A.N. Glushkov[1], E.S. Gerasimenko[2]

[1]PhD, Associate Professor, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation
e-mail: anglush@rambler.ru
[2]Post-graduate cadet, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation
e-mail: jenya35353@yandex.ru

The article deals with the problem of signal processing and creation of noise-immune communication. Proofness to various types of distortion, increase in speed and increase of noise immunity are important tasks that are put before the developers of the equipment for signals receiving and processing. Within the framework of the research and solving the problem, a modernized algorithm of coherent signal demodulation is considered. The text shows the block diagram and discusses the operation principle of the proposed algorithm for digital coherent demodulation of binary signals with differential phase-shift keying, its advantages and disadvantages are indicated with respect to other known algorithms. A statistical simulation of the device has been made, which will work on the basis of the proposed algorithm for digital coherent demodulation of binary signals with differential phase-shift keying. The developed algorithms and the corresponding device for coherent digital demodulation of signals with binary phase-shift keying and differential phase-shift keying can be used to create an interference-proof connection. As a result of the simulation, an estimation of noise immunity of coherent demodulation of binary signals with differential phase-shift keying has been carried out, it is shown that the proposed digital demodulation algorithm proves to be optimal. The probability of an error of the digital demodulation of signals with four-position differential phase-shift keying is determined, the high efficiency of the demodulator is shown in the absence of the phenomenon of "sign ambiguity"

Key words: algorithm, coherent demodulation, differential phase-shift keying

References

1. Fink L.M. “Theory of transmission of discrete messages” (“Teoriya peredachi diskretnykh soobshcheniy”), Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 728 p.

2. Okunev Yu.B. “Theory of phase-difference modulation” (“Teoriya fazoraznostnoy modulyatsii”), Moscow, Svyaz’, 1979, 216 p.

3. Petrovich N.T. “Transmission of discrete information in channels with phase-shift keying” (“Peredacha diskretnoy informatsii v kanalakh s fazovoy manipulyatsiey”), Moscow, Sov. Radio, 1965, 263 p.

4. Okunev, Yu.B. “Digital transmission of information with phase-modulated signals” (“Tsifrovaya peredacha informatsii fazomodulirovannymi signalami”), Moscow, Radio i Svyaz’, 1991, 296 p.

5. Fedorov I.B. “Information technology in radio engineering systems: Manual” (“Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh: ucheb. posobie”),Moscow, Bauman MSTU, 2011, 846 p.

6. Krug. P.G. “Processors of digital signal processing: Manual” (“Protsessory tsifrovoy obrabotki signalov: ucheb. posobie”), Moscow, Publishing house MEI, 2001, 128 p.

7. Bogatyrev E.A., Larin V.Yu., Lyakin A.E. “Encyclopedia of electronic components” (“Entsiklopediya elektronnykh komponentov”), vol. 1, Moscow, MACRO TEAM, 2003, 224 p.

8. Maxfield C. “The Design Warrior's Guide to FPGA's” (“Proektirovanie na PLIS”), Moscow, Publishing house Dodeka XXI, 2007, 408 p

9. Steshenko V.B. “FPGA Alterra: element base, system design languages and hardware description” (“PLIS firmy Alterra: elementnaya baza, sistema proektirovaniya i yazyki opisaniya apparatury”), Moscow, Publishing house Dodeka XXI, 2007, 576 p.

10. Tarasov I.E. “Development of digital devices based on FPGA Xilinx using VHDL language” (“Razrabotka tsifrovykh ustroystv na osnove PLIS Xilinx s primeneniyem yazyka VHDL”), Hotline–Telecom, 2005, 252 p.

11. Gerasimenko E.S. “Algorithm for digital coherent demodulation of phase-shift keyed signals and its characteristics”, *Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation*, 2017, no. 1, pp. 137-143.