

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** **2 628 427** ⁽¹¹⁾ ⁽¹³⁾ **C2**

(51) МПК

H04L 27/38 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: [2015126514](#), 02.07.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.07.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.07.2015

(43) Дата публикации заявки: 13.01.2017 Бюл. № [2](#)

(45) Опубликовано: [16.08.2017](#) Бюл. № [23](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: **RU 2257671 C1 27.07.2005. RU**
2246182 C1 10.02.2005. RU 2286650 C2
27.10.2006. US 5386239 A 31.01.1995.

Адрес для переписки:

**394026, г. Воронеж, Московский просп., 14,
ФГБОУ ВО "ВГТУ", ВГТУ, патентный
отдел**

(72) Автор(ы):

**Литвиненко Владимир Петрович (RU),
Глушков Алексей Николаевич (RU)**

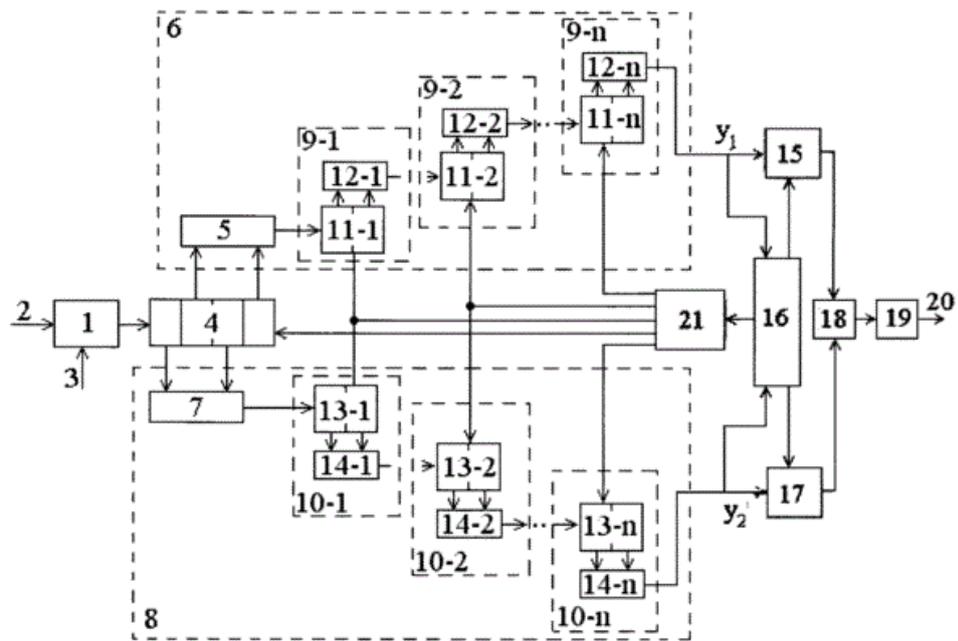
(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Воронежский
государственный технический
университет" (ФГБОУ ВО "ВГТУ",
ВГТУ) (RU)**

(54) **Цифровой демодулятор сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области радиотехники и может быть использовано в устройствах приема цифровых информационных сигналов для цифровой демодуляции многопозиционных сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией (КАМ). Достижимый технический результат - обеспечение высокоскоростной цифровой демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией и устранение амплитудной неидентичности квадратурных каналов демодулятора. Цифровой демодулятор сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией содержит аналого-цифровой преобразователь, регистр сдвига многоразрядных кодов на четыре отсчета, первый и второй n-каскадные каналы квадратурной обработки сигналов, первое и второе пороговые устройства, решающее устройство, декодирующее устройство и нормирующее и синхронизирующее устройство. 8 ил.



Фиг. 1

Изобретение относится к области радиотехники и может быть использовано в устройствах приема цифровых информационных сигналов для цифровой демодуляции многопозиционных сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией (КАМ, Quadrature Amplitude Modulation - QAM).

Известно устройство демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией (см. Феер К. «Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра». Пер. с англ. / Под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000), состоящее из двух перемножителей, двух фильтров нижних частот, фазовращателя, генератора несущей частоты, генератора тактовых импульсов, а также двух преобразователей уровней и параллельно-последовательного преобразователя кода.

Близким к предлагаемому устройству является демодулятор (патент РФ №2246182 «Демодулятор сигналов шестнадцатипозиционной квадратурной амплитудной манипуляции» авторов Пархоменко Н.Г. и Боташева Б.М., опубликован 10.02.2005 г.). Это устройство осуществляют когерентную обработку входного сигнала в квадратурных каналах с формированием выходного информационного кода, а также обнаружением и устранением амплитудной неидентичности квадратурных каналов демодулятора.

К недостаткам известных устройств следует отнести:

- аналоговую обработку сигнала с необходимостью компенсации амплитудной неидентичности квадратурных каналов и других погрешностей;
- сложность цифровой реализации процедуры обработки сигнала, что приводит к необходимости выполнения большого числа арифметических операций на каждый поступивший отсчет сигнала и требует использования высокоскоростных вычислителей.

Наиболее близким по технической сущности и внутренней структуре к предлагаемому устройству является цифровой обнаружитель узкополосных сигналов (патент РФ №2257671 С1, Н04В 1/10, 27.07.2005, Бюл. №21, авторы Глушков А.Н., Литвиненко В.П., Проскураков Ю.Д.), способный выполнять функции амплитудного демодулятора (детектора).

Его недостатком является отсутствие возможности демодуляции сигналов с КАМ.

Задачей предлагаемого технического решения является обеспечение высокоскоростной цифровой демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией и устранение амплитудной неидентичности квадратурных каналов демодулятора.

Поставленная задача решается тем, что цифровой обнаружитель узкополосных сигналов, содержащий аналого-цифровой преобразователь (АЦП), регистр сдвига многоразрядных кодов на четыре отсчета, первый и второй n -каскадные каналы квадратурной обработки (ККО) сигналов и генератор тактовых импульсов (ГТИ), дополнительно содержит первое и второе пороговые устройства (ПУ), решающее устройство (РУ), декодирующее устройство (ДУ) и нормирующее и синхронизирующее устройство (НСУ). Выход первого ККО соединен с входом первого ПУ и первым входом НСУ, а выход второго ККО соединен с входом второго ПУ и вторым входом НСУ. Выход первого ПУ соединен с первым входом РУ, а его второй вход соединен с выходом второго ПУ. Выход РУ соединен с входом дешифратора, выход которого является выходом демодулятора. Выход НСУ соединен с входом синхронизации ГТИ.

Предлагаемое техническое решение поясняется чертежами.

На фиг. 1 представлена структурная схема предлагаемого устройства, на фиг. 2 - созвездие сигнала КАМ16, на фиг. 3 - временные диаграммы квантования сигналов синфазного $x_1(t)$ и квадратурного $x_2(t)$ каналов, тактовыми сигналами $s_C(t)$ и $s_K(t)$ соответственно, на фиг. 4 - примеры временных диаграмм x_{1i} , x_{2i} и сигнала с КАМ 16 s_i в зависимости от номера i тактового импульса. На фиг. 5 представлены временные диаграммы нормированных результатов квадратурной обработки $y_1(k)$ и $y_2(k)$ как функции номера k поступившего периода при отсутствии помех (пунктиром показаны модулирующие сигналы), на фиг. 6 - аналогичные диаграммы при наличии шумовой помехи, на фиг. 7 созвездие сигнала КАМ 16 при наличии помех, а на фиг. 8 - зависимость вероятности ошибки приема M - позиционного сигнала с КАМ от отношения сигнал/шум h для различных M .

Устройство содержит АЦП 1, на вход которого поступает принимаемый сигнал 2 с выхода усилителя промежуточной частоты приемника, а на управляющий вход тактовые импульсы 3. Выход АЦП 1 соединен с входом регистра 4 сдвига многоразрядных кодов на четыре отсчета, четные выходы которого соединены с соответствующими входами вычитателя 5 первого ККО 6, а нечетные выходы - с соответствующими входами вычитателя 7 второго ККО 8. Каждый ККО помимо вычитателя содержит n каскадно соединенных блоков накопления отсчетов (БНО). Количество БНО n зависит от числа N периодов сигнала в информационном символе и определяется двоичным логарифмом N ($n = \log_2 N$). Такое построение устройства обеспечивает минимальное количество БНО, при этом число обрабатываемых периодов сигнала равно $N = 2^n$.

Первый ККО 6 содержит последовательно соединенные БНО 9-1, ..., 9- n , а второй ККО 8 - последовательно соединенные БНО 10-1, ..., 10- n . Каждый из БНО состоит из регистра сдвига многоразрядных кодов и сумматора. Блоки 9-1, ..., 9- n накопления отсчетов содержат регистры 11-1, ..., 11- n сдвига многоразрядных кодов и сумматоры 12-1, ..., 12- n соответственно, а БНО 10-1, ..., 10- n - соответственно регистры 13-1, ..., 13- n сдвига многоразрядных кодов и сумматоры 14-1, ..., 14- n . В каждом блоке 9 (10) накопления отсчетов первый вход регистра 11 (13) сдвига является входом блока 9 (10) накопления отсчетов. Второй вход сумматора 12 (14) соединен с выходом регистра 11 (13) сдвига. Выход сумматора 12 (14) является выходом блока 9 (10) накопления отсчетов, а тактовый вход регистра 11 (13) сдвига является управляющим входом блока 9 (10) накопления отсчетов. Выход вычитателя 5 соединен с входом блока 9-1 накопления отсчетов ККО 6, а выход блока 9- n накопления отсчетов ККО 6 - с входом первого порогового устройства 15 и первым

входом нормирующего и синхронизирующего устройства 16. Выход вычитателя 7 соединен с входом БНО 10-1 ККО 8, а выход БНО 10-n ККО 8 - с входом второго порогового устройства 17 и вторым входом нормирующего и синхронизирующего устройства 16. Выход ПУ 15 соединен с первым входом решающего устройства 18, а выход ПУ 17 - с его вторым входом, а выход решающего устройства 18 соединен с входом декодирующего устройства 19, выход которого 20 является выходом демодулятора сигналов с КАМ.

Первый управляющий выход НСУ 16 соединен с управляющим входом первого ПУ 15, а второй управляющий выход НСУ 16 - с управляющим входом второго ПУ 17. Синхронизирующий выход НСУ 16 соединен с синхронизирующим входом ГТИ 21. Тактовые входы АЦП 1, регистра 4 сдвига многоразрядных кодов на четыре отсчета, блоков 9 и 10 накопления отсчетов соединены с соответствующими выходами генератора тактовых импульсов 21.

Устройство работает следующим образом.

Входной сигнал с КАМ на входе 2 демодулятора имеет вид

$$s(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t) + B(t) \sin(2\pi f_0 t),$$

где $A(t)$ и $B(t)$ - амплитуды информационных символов синфазной и квадратурной составляющих сигнала, определяемые передаваемым двоичным кодом, а f_0 - несущая частота. Передаваемый код с четной длиной $2m$ бит разделяется на две равные части по m элементов, которые определяют амплитуды $A(t)$ и $B(t)$ соответственно. Например, код с $2m=4$ делится на две части по 2 бита, по которым выбираются значения амплитуд согласно приведенной ниже таблице (U - минимальная амплитуда), отрицательная амплитуда соответствует изменению фазы на 180° .

Двоичный код	Амплитуда (А или В)
00	U
01	3U
10	-U
11	-3U

Всего в примере имеется 16 комбинаций амплитуд синфазной и квадратурной составляющих сигнала, который обозначается как КАМ 16. Их отображают в виде созвездия, как показано на фиг. 2. Число элементов созвездия может достигать 512 (в протоколе v.32bis при скорости 14400 бит/с используется КАМ 128).

Процесс квантования поясняется временными диаграммами процессов квантования сигналов синфазного $x_1(t)$ и квадратурного $x_2(t)$ каналов тактовыми импульсами $s_c(t)$ и $s_k(t)$ (в четных и нечетных тактах) соответственно, показанными на фиг. 3. Примеры фрагментов временных диаграмм сигналов x_{1i} , x_{2i} и суммарного сигнала s_i с КАМ 16 на границе передаваемых символов в зависимости от номера i тактового импульса приведены на фиг. 4, сетка по оси абсцисс соответствует тактовым импульсам на фиг. 3, на периоде сигнала формируются 4 тактовых импульса (два четных и два нечетных).

Принятый сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 1, который формирует по четыре отсчета входного сигнала на период

повторения $T = 1/f_0$ в соответствии с тактовыми импульсами 3 от генератора 21. Информационный элемент сигнала длительностью T_3 содержит N периодов T несущего колебания, $T = 2^n$, n - целое число.

Отсчеты входного сигнала (фиг. 3в) поступают в регистр 4 сдвига многоразрядных кодов на четыре отсчета. Четные отсчеты (фиг. 3а) за текущий период сигнала

поступают в вычитатель 5 первого ККО 6, отклик которого равен удвоенной амплитуде $2A$, а нечетные (фиг. 3б) - в вычитатель 7 второго ККО 8, отклик которого равен удвоенной амплитуде $2B$. Как видно, для четных отсчетов значения x_2 (фиг. 3б) равны нулю, а для нечетных величины x_1 (фиг. 3а) также оказываются нулевыми, то есть происходит разделение синфазного и квадратурного каналов обработки, что и требуется для демодуляции сигнала с КАМ.

Значения разностей на выходе вычитателя 5 накапливаются в блоках накопления отсчетов 9-1 (на двух соседних периодах), 9-2 (на четырех периодах) и т.д., в результате на выходе первого ККО 6 по окончании информационного символа формируются величины $y_1=2NA$. Аналогично разности на выходе вычитателя 7 накапливаются в блоках накопления отсчетов 10-1 (на двух соседних периодах), 10-2 (на четырех периодах) и т.д., в результате на выходе второго ККО 8 по окончании информационного символа формируются величины $y_2=2NB$. Таким образом, отклики каналов квадратурной обработки пропорциональны амплитудам синфазной $A(t)$ и квадратурной $B(t)$ составляющих принятого сигнала с КАМ.

Временные диаграммы нормированных результатов квадратурной обработки $y_1(k)$ и $y_2(k)$ как функции номера k поступившего периода (нормированного времени) при отсутствии помех показаны на фиг. 5 (пунктиром показаны модулирующие сигналы). В моменты окончания приема элемента значения квадратурных компонент определяют принятый сигнал с КАМ. Прямолинейная форма откликов $y_1(k)$ и $y_2(k)$ квадратурных каналов свидетельствует о согласованности алгоритма обработки с поступающим сигналом, то есть об оптимальности алгоритма демодуляции.

Значения y_1 и y_2 поступают в пороговые устройства 15 и 17 соответственно, которые в соответствии с созвездием вида фиг. 2 формируют первую (m бит) и вторую (m бит) половины принятого кодового слова, всего $2m$ бит, которое передается в декодирующее устройство 19 для формирования принятого сообщения 20.

Нормирующее и синхронизирующее устройство 16 в процессе установления синхронного состояния оценивает уровни сигналов в квадратурных каналах и управляет работой пороговых устройств 15 и 17, устанавливая пороги сравнения для откликов квадратурных каналов.

Для обеспечения синхронного режима работы демодулятора НСУ 16 в начале сеанса связи устанавливает частоту и фазу генератора тактовых импульсов 21, необходимые для когерентной обработки принимаемого сигнала с КАМ.

Устранение амплитудной неидентичности квадратурных каналов демодулятора обеспечивается за счет того, что их отсчеты формируются общим АЦП 1.

В предлагаемом демодуляторе за один период сигнала необходимо выполнить всего $2\log_2 N$ операций сложения/вычитания многоразрядных кодов и запоминать $2N$ полученных значений. При этом обеспечивается минимум арифметических операций на период сигнала для решения поставленной задачи и, следовательно, высокая скорость обработки сигнала с КАМ. Технически устройство может быть реализовано либо как специализированная интегральная схема, либо как микропроцессорное устройство. Регистры сдвига многоразрядных кодов могут выполняться на базе однобитовых регистров сдвига либо оперативных запоминающих устройств.

На фиг. 6 показаны полученные при статистическом имитационном моделировании временные диаграммы нормированных откликов квадратурных каналов $y_1(k)$ и $y_2(k)$ от нормированного времени (номера обрабатываемого периода) при наличии шумовой помехи с отношением сигнал/шум h^2 , приведенным к эквивалентному двоичному элементу, $h=12$ дБ. Созвездие сигнала КАМ 16 при наличии тех же помех показано на фиг. 7. Как видно, появляется разброс принятых сигналов относительно центральных точек созвездия, что приводит к появлению ошибочных решений в пороговых устройствах.

Вероятность ошибки приема сигнала с КАМ в канале с белым шумом определяется выражением

$$P_{QSH} = 4Q\left(\frac{h}{\sqrt{\log_2 \sqrt{M}}}\right) \left[1 - Q\left(\frac{h}{\sqrt{\log_2 \sqrt{M}}}\right)\right],$$

где

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Аналогичное выражение получено в литературе (Прокис Д. Цифровая связь. Пер. с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. - М.: Радио и связь, 2000).

На фиг. 8 показана зависимость вероятности ошибки приема M - позиционного сигнала с КАМ от отношения сигнал/шум h для различных M . Как видно, вероятность ошибки достаточно велика и для ее снижения необходимо обеспечивать высокое отношение сигнал/шум или использовать помехоустойчивое кодирование.

Литература

1. Феер К. «Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра». Пер. с англ. / Под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000.
2. Патент РФ №2246182 «Демодулятор сигналов шестнадцатипозиционной квадратурной амплитудной манипуляции», авторы Пархоменко Н.Г. и Боташева Б.М., опубликован 10.02.2005 г.
3. Патент RU 2257671 С1, Н04В 1/10, 27.07.2005 «Цифровой обнаружитель узкополосных сигналов», Бюл. №21, авторы Глушков А.Н., Литвиненко В.П., Проскуряков Ю.Д.
4. Прокис Д. Цифровая связь. Пер. с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. - М.: Радио и связь, 2000, 800 с.