



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396:519.21

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-110-113

Ю. М. ВЕШКУРЦЕВ

Институт радиоэлектроники,
сервиса и диагностики,
г. Омск

МОДЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ БУДУЩИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ. ЧАСТЬ 1

Рассмотрены новые методы модуляции и демодуляции сигнала, реализованные на уровне изобретения в структуре модема. Теоретически исследована и статистическим моделированием подтверждена помехоустойчивость модема при работе в канале без помех.

Ключевые слова: характеристическая модуляция, демодуляция, помехоустойчивость модема, вероятность ошибок, оценка, характеристическая функция.

Введение. Современная модуляция исторически построена на изменении параметров (амплитуды, фазы, частоты) детерминированных сигналов. Помехоустойчивость систем передачи данных с такой модуляцией напрямую зависит от «скрытности» от помех параметров сигнала с простой математической моделью вида тригонометрической функции синус или косинус.

По этому показателю крайне не защищенной от помех является амплитуда сигнала, и, как результат этого, амплитудная модуляция самая не помехоустойчивая. При этом борьба с помехами и шумами выдвинулась на передний план, а авангардные технологии обработки сигналов направлены на фильтрацию и подавление помех [1–3]. На наш взгляд, этот путь движения тупиковый. Нами предлагается другое направление движения в будущее.

Теория. Будем рассматривать новый метод модуляции [4], в котором все параметры сигнала «спрятаны» за оператор математического ожидания, в результате чего получаем функцию

$$\Theta(V_m) = m_1 \{ \exp(jV_m u(t)) \}, \quad (1)$$

известную в математике, физике, статистической радиотехнике. Математик А. Ляпунов предложил эту функцию и опубликовал её описание в 1901 году [5]. В литературе [6] её называют характеристической функцией. Применяя формулу Л. Эйлера, запишем

$$\Theta(V_m) = m_1 \{ \cos[V_m u(t)] \} + j m_1 \{ \sin[V_m u(t)] \} = A(V_m) + jB(V_m), \quad (2)$$

где $A(V_m)$, $B(V_m)$ — действительная и мнимая части характеристической функции; V_m — параметр характеристической функции.

Характеристическая функция (х.ф.) является вероятностной характеристикой сигнала, например, квазидетерминированного колебания

$$u(t) = U_0 \sin(\omega t + \eta) \quad (3)$$

с параметрами U_0 , ω , $\Phi(t) = \omega t + \eta$, где η — случайный угол сдвига фаз с равномерным законом распределения в пределах $-\pi \dots + \pi$. Физический смысл х.ф. исследован в работе [7], при этом показано, что она является спектральной плотностью вероятностей

мгновенных значений сигнала (3). Х.ф. зависит от плотности вероятностей сигнала. Следовательно, каждой модели квазидетерминированного сигнала соответствует своя единственная х.ф., которая имеет много положительных свойств. Она ограничена, измерима, фильтрует шум, имеет предельные значения $\Theta(0) = 1, \Theta(\infty) = 0, \Theta(-\infty) = 0$. Другие замечательные её свойства описаны в работе [7]. Опираясь на достоинства х.ф., предлагаем способ модуляции этой функции [4].

Способ модуляции х.ф., в котором постоянное напряжение e_0 перемножается с телеграфным сигналом $s(t)$, принимающим значение либо «1», либо «0», после чего произведение $e_0 s(t)$ суммируют с центрированным квазидетерминированным сигналом (3), математическое ожидание которого равно нулю, и таким образом осуществляют модуляцию х.ф. преобразованного квазидетерминированного сигнала по закону:

При $s(t) = 0$ с получением функций вида

$$A(V_m t) = I_0(V_m U_0 t), \quad B(V_m t) = 0; \quad (4)$$

при $s(t) = 1$ с получением функций вида

$$\begin{aligned} A(V_m t) &= I_0(V_m U_0 t) \cos(V_m e_0), \\ B(V_m t) &= I_0(V_m U_0 t) \sin(V_m e_0), \end{aligned} \quad (5)$$

где $I_0(\cdot)$ — функция Бесселя нулевого порядка; U_0 — амплитуда сигнала; V_m — параметр х.ф., причем при $V_m = 1$ функция $A(1, t)$ и функция $B(1, t)$ изменяются в противофазе.

Предлагаем в дальнейшем модуляцию нового вида называть **характеристической модуляцией (х.м.)**.

На рис. 1 приведена структурная схема модулятора, временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 2. К рисункам можно дать следующие пояснения. В соответствии с определением способа модуляции формируется нецентрированный квазидетерминированный сигнал

$$u_1(t) = e_0 s(t) + U_0 \sin(\omega t + \eta) \quad (6)$$

с х.ф. вида [7]

$$\Theta(V_m t) = I_0(V_m U_0 t) \exp(j V_m e_0). \quad (7)$$

Пусть телеграфный сигнал представляет собой последовательность логических нулей и единиц (рис. 2а). Если $s(t) = 0$, то х.ф. имеет только действительную часть, а мнимая часть ее равна нулю [7], т.е.

$$\Theta(V_m t) = A(V_m t) = I_0(V_m U_0 t), \quad B(V_m t) = 0.$$

В этом случае при $V_m = 1$ имеем $A(1, t)$, $B(1, t)$ на рис. 2г, д. Когда $s(t) = 1$, х.ф. равна (7). Тогда получим

$$\begin{aligned} A(V_m t) &= I_0(V_m U_0 t) \cos(V_m e_0), \\ B(V_m t) &= I_0(V_m U_0 t) \sin(V_m e_0). \end{aligned}$$

При $V_m = 1$ имеем функции

$$\begin{aligned} A(1, t) &= I_0(U_0 t) \cos(e_0), \\ B(1, t) &= I_0(U_0 t) \sin(e_0), \end{aligned} \quad (8)$$

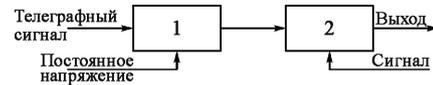


Рис. 1. Структурная схема модулятора

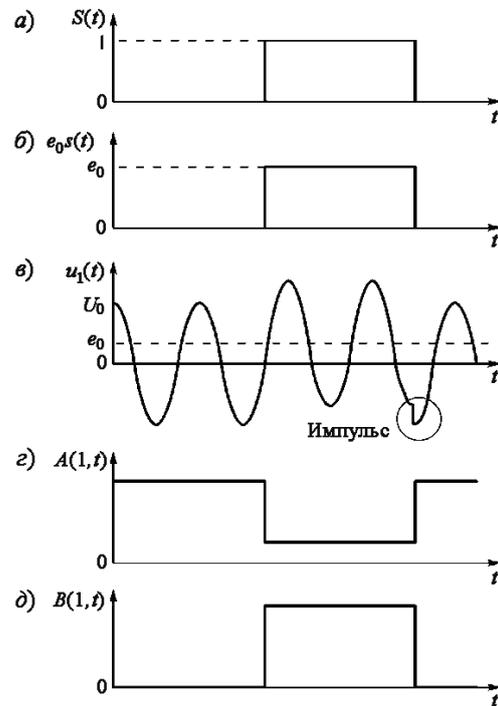


Рис. 2. Временные диаграммы работы модулятора

которые показаны на рис. 2г, д. Эти функции изменяются по закону телеграфного сигнала. Следовательно, х.ф. модулирована телеграфным сигналом, причем функции $A(1, t)$, $B(1, t)$ изменяются в противофазе.

Для демодуляции сигнала предлагаем новый способ [8], в котором используется аналогово-цифровое преобразование сигнала (6), перемножение дискретных мгновенных значений сигнала с параметром V_m , функциональное преобразование с целью получения функций синус и косинус произведений с последующим накоплением значений этих функций на интервале времени, равном длительности символа логической «0» и логическая «1», после чего с помощью функции синус вычисляют оценку $\hat{B}(V_m t)$ мнимой части х.ф., а с помощью функции косинус — оценку действительной части х.ф. $\hat{A}(V_m t)$, текущие значения которых сравнивают с порогами, а решение принимают в соответствии с выполнением следующих неравенств:

- 1) если $\hat{B}(V_m t) \leq (0 - R_1) = \Pi_1$, то считают, что принят логический «0»;
- 2) если $\hat{B}(V_m t) > R_2 I_0(V_m U_0) \sin(V_m e_0) = \Pi_2$, то считают, что принята логическая «1»;
- 3) если $\hat{A}(V_m t) \geq R_3 I_0(V_m U_0) = \Pi_3$, то считают, что принят логический «0»;
- 4) если $\hat{A}(V_m t) < R_4 I_0(V_m U_0) \cos(V_m e_0) = \Pi_4$, то считают, что принята логическая «1», где U_0 — амплитуда сигнала; e_0 — математическое ожидание сигнала; $I_0(\cdot)$ — функция Бесселя нулевого порядка; $V_m = 1$ — параметр х.ф.; R_1, R_2, R_3, R_4 — коэффициенты.

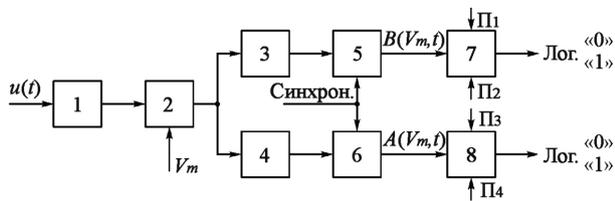


Рис. 3. Структурная схема демодулятора:
1 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
2 — перемножитель; 3, 4 — функциональные преобразователи синус и косинус соответственно;
5, 6 — накапливающие усредняющие сумматоры;
7, 8 — пороговые устройства

На рис. 3 приведена структурная схема демодулятора. Принцип работы его следующий. На вход демодулятора поступает сигнал (6). После преобразования в АЦП дискретные мгновенные значения сигнала $u_i(k\Delta t)$ перемножаются с параметром V_m , а произведения преобразуются с целью получения функции $\sin[V_m u_i(k\Delta t)]$ и функции $\cos[V_m u_i(k\Delta t)]$. Накопивающие усредняющие сумматоры 5, 6 работают одновременно. В сумматоре 5 накапливаются текущие значения функции синус, а в сумматоре 6 — текущие значения функции косинус. При появлении импульса синхронизации на стробирующих входах сумматоров на их выходах появляются значения оценок действительной и мнимой частей х.ф.

$$\hat{A}(V_m, t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \cos[V_m u_i(k\Delta t)] \quad (9)$$

$$\hat{B}(V_m, t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sin[V_m u_i(k\Delta t)] \quad (10)$$

Значения оценок х.ф. (9, 10) при равенстве $V_m = 1$ сравниваются в пороговых устройствах 7, 8 с порогами $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$. Для удобства анализа последовательное соединение блоков 3, 5, 7 будем называть синусным каналом демодулятора, а последовательное соединение блоков 4, 6, 8 — косинусным каналом демодулятора, на выходе блока 8 которого включен инвертор. При невыполнении записанных выше неравенств при $V_m = 1$ возникают ошибки в решении относительно принятого символа телеграфного сигнала.

Анализ помехоустойчивости в канале без помех. Выполним анализ ошибок демодулятора. Заранее задаем коэффициенты равными, например, $R_1 = 0, R_2 = 0,78, R_3 = 0,6, R_4 = 1,1$. Амплитуда сигнала $U_0 = 0,6$ и математическое ожидание $e_0 = 0,9$.

Рассмотрим идеальный случай, когда внутренние и внешние шумы и помехи отсутствуют. Пусть на входе демодулятора имеется сигнал (3), это соответствует условию $s(t) = 0$. Мгновенные значения сигнала (3) распределены по закону арксинуса [6], его х.ф. равна (4). Физический смысл х.ф. определен [7], она представляет собой математическое ожидание аналитического сигнала с постоянным модулем

$$[\cos^2[V_m u(t)] + \sin^2[V_m u(t)]]^{1/2}. \quad (11)$$

Вычислим математическое ожидание процесса после преобразований сигнала (3) с помощью функций синус и косинус. При этом получим:

для $y = \cos(x)$ при $V_m = 1$

$$m_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} y(x)W(x)dx, \quad (12)$$

$$m_1(y) = \frac{1}{\pi} \int_{-U_0}^{U_0} \cos(x) \frac{dx}{\sqrt{U_0^2 - x^2}} = I_0(U_0), \quad (13)$$

для $y = \sin(x)$ при $V_m = 1$

$$m_1(y) = \frac{1}{\pi} \int_{-U_0}^{U_0} \sin(x) \frac{dx}{\sqrt{U_0^2 - x^2}} = 0, \quad (14)$$

где $W(x)$ — закон арксинуса для центрированного квазидетерминированного сигнала (3).

Анализируя результаты (13, 14), видим, что они удовлетворяют первому и третьему неравенствам, при $R_1 \leq 1, R_3 \leq 1$, в соответствии с которыми установлены пороги Π_1, Π_3 в схеме демодулятора. Следовательно, при условии $s(t) = 0$ ошибок на выходе демодулятора не будет.

Пусть на входе демодулятора имеется сигнал (6), это соответствует условию $s(t) = 1$. Мгновенные значения нецентрированного квазидетерминированного сигнала (6) распределены по закону арксинуса с математическим ожиданием $m_1\{u_1(t)\} = e_0$, а х.ф. равна (7). Вычислим математическое ожидание процесса после преобразований сигнала (6) с помощью функций синус и косинус. В результате получим:

для $y = \cos(x)$ при $V_m = 1$

$$m_1(y) = \frac{1}{\pi} \int_{-U_0+e_0}^{U_0+e_0} \cos(x) \frac{dx}{\sqrt{U_0^2 - (x - e_0)^2}} = I_0(U_0) \cos(e_0), \quad (15)$$

для $y = \sin(x)$ при $V_m = 1$

$$m_1(y) = \frac{1}{\pi} \int_{-U_0+e_0}^{U_0+e_0} \sin(x) \frac{dx}{\sqrt{U_0^2 - (x - e_0)^2}} = I_0(U_0) \sin(e_0). \quad (16)$$

Результат (16) превышает порог Π_2 , а результат (15) меньше порога Π_4 , которые, в свою очередь, установлены в соответствии с неравенствами вторым и четвертым с коэффициентами $R_2 \leq 1, R_4 > 1$. Следовательно, при условии $s(t) = 1$ ошибок на выходе демодулятора не будет. Такое утверждение основывается на том, что значения оценок (9, 10), согласно физическому смыслу х.ф., равны математическим ожиданиям (13–16). Причем строгость утверждения зависит от свойств оценок. Оценки (9, 10) являются точечными, их свойства исследованы нами и описаны в литературе [7], они асимптотически состоятельны, эффективны и не смещены. Значит, равенства значений (9, 13); (9, 15); (10, 14); (10, 16) выполняются, причем асимптотическая несмещенность оценок зависит от N -объема выборки мгновенных значений сигнала, где $N \gg 1$. Обратим внимание на выражения (13–16). Всегда выполняются неравенства

$$I_0(U_0) > I_0(U_0) \cos(e_0), \quad I_0(U_0) \sin(e_0) > 0. \quad (17)$$

Следовательно, в демодуляторе решения могут быть приняты на основании более простых неравенств:

- 1) если $\hat{B}(V_m, t) > \hat{R}_1 I_0(V_m U_0) \sin(V_m e_0)$, то считают, что принята логическая «1»;
- 2) если $\hat{B}(V_m, t) < \hat{R}_1 I_0(V_m U_0) \sin(V_m e_0)$, то считают, что принят логический «0»;
- 3) если $\hat{A}(V_m, t) > \hat{R}_2 I_0(V_m U_0)$, то считают, что принят логический «0»;

4) если $\hat{A}(V_m, t) < \hat{R}_2 I_0(V_m U_0)$, то считают, что принята логическая «1», где \hat{R}_1, \hat{R}_2 — коэффициенты, значения которых отличаются от предыдущих R_1, R_2 . Эти неравенства записаны в соответствии с теорией потенциальной помехоустойчивости по Котельникову [9], в которой используется различие сигналов и всего только один порог в каждом из каналов, а именно P_{1c} — в синусном канале демодулятора и P_{2c} — в косинусном канале демодулятора. Статистическое моделирование устройства показало предельную помехоустойчивость модема при работе в канале без помех.

Заключение. Предложены новые методы модуляции и демодуляции квазидетерминированного сигнала, реализованные на уровне изобретения в структуре модема нового поколения. Проверена помехоустойчивость модема в канале без помех. Она получилась предельной в том смысле, что, согласно теории в синусном и косинусном каналах демодулятора, ошибки не появляются при приёме символов телеграфного сигнала. Статистическое моделирование модема данный вывод подтвердило.

Библиографический список

1. Попов Д. И. Анализ алгоритмов адаптивного режек-тирования пассивных помех // Радиотехника. 2016. № 4. С. 32–37.
2. Гусев С. И., Спиркина О. В. Эффективность адаптивно-го алгоритма подавления помех с использованием простран-ственной предпроцессорной обработки сигналов // Радиотех-ника. 2016. № 8. С. 86–90.
3. Попов Д. И. Адаптивное подавление пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 4. С. 32–37.
4. Пат. 2626554 Российская Федерация, МПК Н 03 С 5/00. Способ модуляции сигнала / Вешкурцев Ю. М., Вешкур-цев Н. Д., Алгазин Е. И. № 2016114366; заявл. 13.04.2016; опубл. 28.07.17, Бюл. № 22.

5. Ляпунов А. М. Собрание сочинений. В 6 т. // Об одной теореме теории вероятностей. Одно общее предложение те-ории вероятностей. Новая форма теоремы о пределе вероят-ностей. М., 1954. Т. 1. С. 125–176.

6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической ра-диотехники. М.: Советское радио, 1966. 728 с.

7. Вешкурцев Ю. М. Прикладной анализ характери-стической функции случайных процессов: моногр. М.: Радио и связь, 2003. 204 с.

8. Пат. 2626332 Российская Федерация, МПК Н 04 L 27/06. Способ демодуляции сигнала / Вешкурцев Ю. М., Вешкур-цев Н. Д., Алгазин Е. И. № 2016131149; заявл. 27.07.16, опубл. 26.07.17, Бюл. № 21.

9. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустой-чивости: моногр. М.: Госэнергоиздат, 1956. 152 с.

ВЕШКУРЦЕВ Юрий Михайлович, доктор техниче-ских наук, профессор (Россия), заведующий кафе-дрой «Контроль и измерения», президент ИРСИД; действительный член Международной академии наук высшей школы; член-корреспондент Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова, Сибирское отделение АИН им. А. М. Прохорова.

SPIN-код: 3742-6503

AuthorID (РИНЦ): 685211

Адрес для переписки: vum1940@mail.ru

Для цитирования

Вешкурцев Ю. М. Модем нового поколения для будущих систем передачи данных. Ч. 1 // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 110–113. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-110-113.

Статья поступила в редакцию 21.05.2018 г.

© Ю. М. Вешкурцев