

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.8>

УДК: 621.396 : 521.19

ОБОБЩЕНИЕ ТЕОРИИ НОВОГО МЕТОДА МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ СЛУЧАЙНОГО СИГНАЛА

М.Ю. Вешкурцев

Институт радиоэлектроники, сервиса и диагностики,
644077, г. Омск, проспект Мира 57

Статья поступила в редакцию 21 июля 2022 г.

Аннотация. Исследован новый метод модуляции и демодуляции квазидетерминированного сигнала, который в будущем открывает большие возможности в повышении показателей эффективности цифровых систем. Метод содержит новые технические приемы преобразования случайного сигнала, включающие модуляцию характеристической функции и измерение оценок действительной и мнимой части этой функции. Целью данной работы является разработка оптимальных алгоритмов и обобщение теории нового метода модуляции и демодуляции путем применения новых элементов (алгоритмов) при проведении преобразований случайного сигнала со законом распределения арксинус. Рассмотрены одноканальный и двухканальный модемы для работы в радиоканале и в проводном канале соответственно. Проведено сравнение характеристик модемов с оптимальным и неоптимальным алгоритмами модуляции, при этом характеристики первого модема получаются на порядок лучше второго модема. Установлено, что модемы имеют разную помехоустойчивость в канале с «белым» шумом и по этому показателю превосходят известные модемы, как минимум, на десять порядков. Энергетическая эффективность модемов получается высокая и превосходит на

10 дБ эффективность модемов сигналов Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-10}$.

Ключевые слова: случайный сигнал, модуляция, алгоритм, характеристическая функция, модем, помехоустойчивость.

Автор для переписки: Вешкурцев Юрий Михайлович, vym1940@mail.ru

Введение

Ученые прогнозируют получение больших возможностей при разработке новых методов передачи, хранения и обработки информации за счет использования динамического хаоса [1]. Кроме того, направление развития новых методов передачи информации связано с применением стохастических сигналов. Следовательно, методы модуляции и демодуляции случайного сигнала актуальны и найдут широкое применение

Модуляция случайного сигнала известна [2,3]. Однако результаты указанных и других работ не конкурируют с данными известных методов модуляции, например, с QPSK. Сообщение о новом методе модуляции и демодуляции случайного сигнала сделано в работе [4] и детализировано позже в монографии [5], где рассмотрены разные модемы, квазидетерминированные сигналы и алгоритмы модуляции, позволяющие получить минимум ошибок при передаче информации. Для реализации нового метода модуляции требуются квазидетерминированные сигналы, которые по определению [5 с. 28] «описываются функциями времени заданного вида, содержащими один или несколько случайных параметров $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots$, не зависящих от времени». Эксперименты с модемом при приеме квазидетерминированных сигналов с законом распределения арксинус на модели, построенной в программной среде MATLAB, подтвердили основные закономерности теории нового метода [6]. Полученные при этом результаты показывают, что модуляция характеристической функции Ляпунова сигнала, например с законом распределения арксинус, позволяет получить вероятность ошибок модема $1 \cdot 10^{-8}$ при работе в радиоканале и $1 \cdot 10^{-35}$ в проводном канале при отношении

сигнал/шум 3 дБ. И это не предел. Здесь разработаны дополнительные элементы (оптимальные алгоритмы по критерию минимума ошибок в сравнении с известными в литературе алгоритмами) теории нового метода модуляции с условным названием Statistical Shift Keying (SSK), которые позволили указанные значения улучшить еще на несколько порядков. Например, расчеты показывают, что оптимальный алгоритм модуляции SSK понижает в радиоканале вероятность ошибок модема на 10 порядков по сравнению с вероятностью $1 \cdot 10^{-8}$ при отношении сигнал/шум 3 дБ. В проводном канале модем имеет преимущество 20 дБ на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-45}$ перед таким же модемом с неоптимальным алгоритмом модуляции. В данной работе обобщение теории нового метода модуляции характеристической функции случайного сигнала проводится с помощью дополнительных элементов с целью улучшения показателей эффективности разных модемов, в том числе одноканальных и двухканальных.

1. Модем одноканальный

Одноканальный модем содержит известный в литературе амплитудный модулятор для получения сигналов Amplitude Shift Keying (ASK), представленных на рис. 1, и запатентованный демодулятор, который показан на рис. 2 и подробно описан в монографии [5]. Для лучшего понимания принятых на рис. 2 сокращений поясним смысл, заложенный в них. Если на вход ФП – функционального преобразователя поступает величина x , то на выходе ФП получим $\cos x$. Значения $\cos x_1, \cos x_2, \cos x_3, \dots, \cos x_N$ последовательно суммируются (накапливаются) в блоке НУС в течение времени T – длительности логического «0» или логической «1». После окончания интервала времени продолжительностью T появляется команда «синхронизация» и вся сумма косинусов делится на число N . Таким образом, получили значение оценки характеристической функции, которое сравнивается с порогом в пороговом устройстве ПУ. По результатам сравнения принимается решение о приеме логического «0» или логической «1». Заканчивая пояснения, повторим,

демодулятор измеряет оценку характеристической функции Ляпунова процесса, поступающего на вход АЦП. При этом работа модема протекает в следующей последовательности.

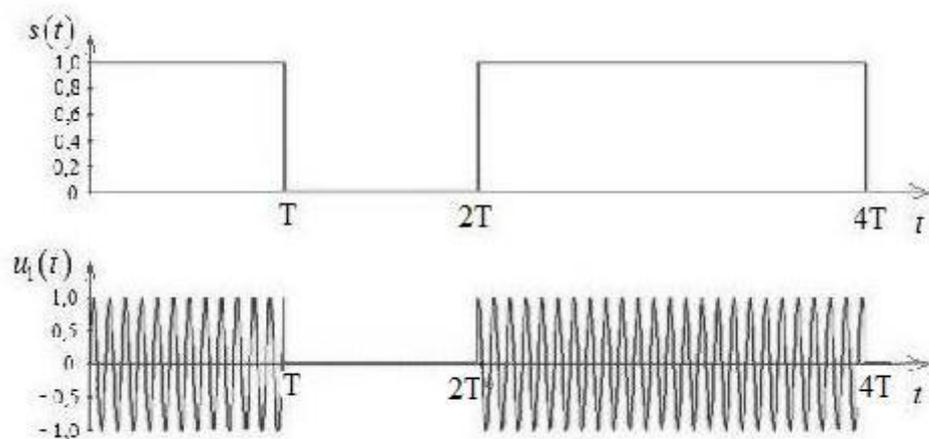


Рис. 1. Амплитудно-манипулированный сигнал: $s(t)$ – телеграфный сигнал ; $u_1(t)$ – квазидетерминированный сигнал; T – длительность логической «1» или логического «0»

На вход модулятора подается центрированный квазидетерминированный сигнал вида:

$$u(t) = U_0 \sin(\omega t + \eta), \quad (1)$$

где U_0, ω – амплитуда и круговая частота являются постоянными величинами; η – начальный угол сдвига фаз, это случайная величина с равномерным законом распределения в пределах $-\pi \dots +\pi$. Модулированный сигнал (1) вида:

$$u_1(t) = [U_0 \times s(t)] \sin(\omega t + \eta) \quad (1a)$$

имеет вероятностные характеристики, в том числе характеристическую функцию (х.ф.):

$$\Theta(V_m, t) = J_0(V_m U_0 \times s(t)), \quad (2)$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка первого рода; V_m – параметр х.ф.; $s(t)$ – телеграфный сигнал в виде последовательности логических «0» и логических «1».

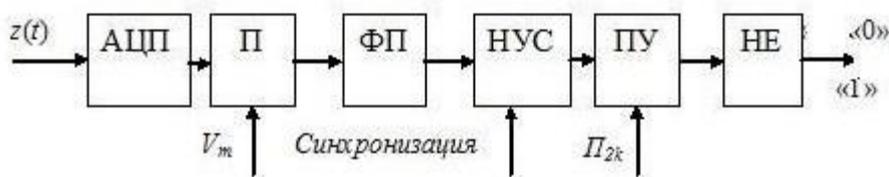


Рис. 2. Демодулятор: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; П – перемножитель; ФП – функциональный преобразователь функции косинус; НУС – накапливающий усредняющий сумматор; ПУ – пороговое устройство; ИЕ – инвертор; $\Pi_{2к}$ – порог; V_m – значение параметра х.ф.

Пусть на вход демодулятора поступает аддитивная смесь $z(t) = u_1(t) + n(t)$ сигнала (1а) и «белого» шума соответственно. Алгоритм модуляции сигнала (1) записан в таблице 1. Неоптимальный алгоритм модуляции сигнала рассмотрен в работе [7]. Математические выражения из этой работы остаются прежними и для дальнейшего использования повторяются здесь в общем виде для вычисления точного значения характеристической функции Ляпунова. Это значит, что значения функции при необходимости можно рассчитать в отдельности при любом значении параметра, а именно при $V_m=1$ или $V_m=2$, или $V_m=3$, или $V_m=4$, или при другом:

$$A_z(V_m, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos(V_m z) W_1(z) dz = J_0(V_m U_0) \exp\left(-\frac{V_m^2 \sigma_u^2}{2}\right) = J_0(V_m \sigma_c \sqrt{2}) \exp\left(-\frac{V_m^2 \sigma_c^2}{2h^2}\right), \quad (3)$$

где $W_1(z)$ – плотность вероятностей мгновенных значений аддитивной смеси $z(t) = u_1(t) + n(t)$ сигнала (1а) и шума соответственно; $h^2 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_u^2}$ – отношение сигнал/шум; $\sigma_c^2 = \frac{U_0^2}{2}$ – дисперсия модулированного квазидетерминированного сигнала; $A_z(V_m, t)$ – действительная часть х.ф. Согласно формуле (2) выражение (3) записано для телеграфного сигнала $s(t)=1$, а если $s(t)=0$, то результат вычисления выражения (3) принимает другой вид:

$$A_z(V_m, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos(V_m z) W_1(z) dz = J_0(0) \exp\left(-\frac{V_m^2 \sigma_u^2}{2}\right) = \exp\left(-\frac{V_m^2 \sigma_c^2}{2h^2}\right). \quad (4)$$

С учетом сказанного ранее подтверждаем, демодулятор измеряет оценки характеристической функции Ляпунова, значения которых могут отличаться от точных значений функции, рассчитанных по формулам (3,4).

В выражениях (3,4) функция Бесселя играет главную роль, так как при значении аргумента $x = 2,4$ она равна $J_0(2,4) = 0,0025$, а при $x = 0$ имеем $J_0(0) = 1$. Таким образом, значение функции Ляпунова, вычисленное по формуле (4) при $s(t) = 0$, будет в 400 раз больше ее значения, рассчитанного по формуле (3) при $s(t) = 1$. Следовательно, пороговое устройство демодулятора с большой достоверностью отличит логическую «1» от логического «0». В итоге, такое поведение функции Ляпунова существенно повысит помехоустойчивость модема. Покажем это на примере оптимального, на наш взгляд, алгоритма модуляции, записанного в таблице 1.

Таблица 1. Алгоритмы модуляции сигнала

Алгоритм	Телеграфный сигнал	Дисперсия сигнала	Математическое ожидание сигнала	Значение параметра V_m в демодуляторе
Неоптимальный	логическая «1»	1,125	0	$V_m = 1$
	логический «0»	0	0	$V_m = 1$
Оптимальный	логическая «1»	0,72	0	$V_m = 2$
	логический «0»	0	0	$V_m = 2$

С помощью выражений (3,4) рассчитаем значения функции Ляпунова при параметре $V_m = 2$, дисперсии $\sigma_c^2 = 0,72$ и поместим их в таблицу 2.

Таблица 2. Значения функции Ляпунова

1	2	3	4	5	6	7
$A_z(2, t)$	$s(t) = 1$	0	0	0,0006	0,002	0,002
	$s(t) = 0$	0	0	0,24	0,869	1,0
h^2		0,01	0,1	1,0	10	100

Затем установим в демодуляторе порог $P_{2k} = 0,2$, а по методике из работы [5] рассчитаем вероятность ошибок при приеме телеграфного сигнала. В разработанной ранее методике используется интеграл вероятностей и вероятностные характеристики оценки характеристической функции. Полученные данные записаны в таблицу 3. Здесь и далее рисунки построены для вероятности ошибки на бит (BER) при равенстве ширины полосы частот канального фильтра и скорости передачи информации. На рис. 3 представлены графики для модемов, принимающих сигналы с разными модуляциями. График 1 построен для модема с оптимальным алгоритмом модуляции SSK, график 2 – с неоптимальным алгоритмом модуляции SSK; график 3 – модуляции QPSK; график 4 – модуляции ASK.

Таблица 3. Вероятность ошибок разных модемов

1	2	3	4	5
Вероятность ошибок модема с оптимальным алгоритмом модуляции SSK	0,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-45}$	менее $1,0 \cdot 10^{-45}$
Вероятность ошибок модема из работы [7]	0,5	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-17}$	$7,5 \cdot 10^{-9}$
Вероятность ошибок модема для приема QPSK	0,5	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-45}$
Отношение по мощности сигнал/шум	0,1	1,0	10	100

Сравнение графиков 1 и 2 показывает, что оптимальный алгоритм модуляции SSK выгодно отличается от неоптимального алгоритма. Выигрыш первого алгоритма относительно второго составляет 7 дБ на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-17}$, которая у модема с неоптимальным алгоритмом обработки аддитивной смеси получилась самая лучшая. Однако для модема с оптимальным алгоритмом обработки это не предел. Добавим к сказанному, что оптимальный алгоритм обработки сигналов SSK понижает вероятность ошибок модема еще на 28 порядков по сравнению с вероятностью $1 \cdot 10^{-17}$.

Тем не менее, оба алгоритма модуляции позволяют получить вероятность ошибок модемов меньше, чем у модема с модуляцией QPSK при значении $0,1 \leq h^2 \leq 10$. Когда $h^2 > 1$, то графики 1 и 3 идут практически параллельно друг другу. При этом выигрыш модема с оптимальным алгоритмом модуляции SSK перед модемом с модуляцией QPSK составляет 10 дБ на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-10}$. Выходит, модуляция SSK может составить достойную конкуренцию известному мировому лидеру в виде модуляции QPSK. График 4 показывает ограниченные возможности и бесперспективность модема с модуляцией ASK.

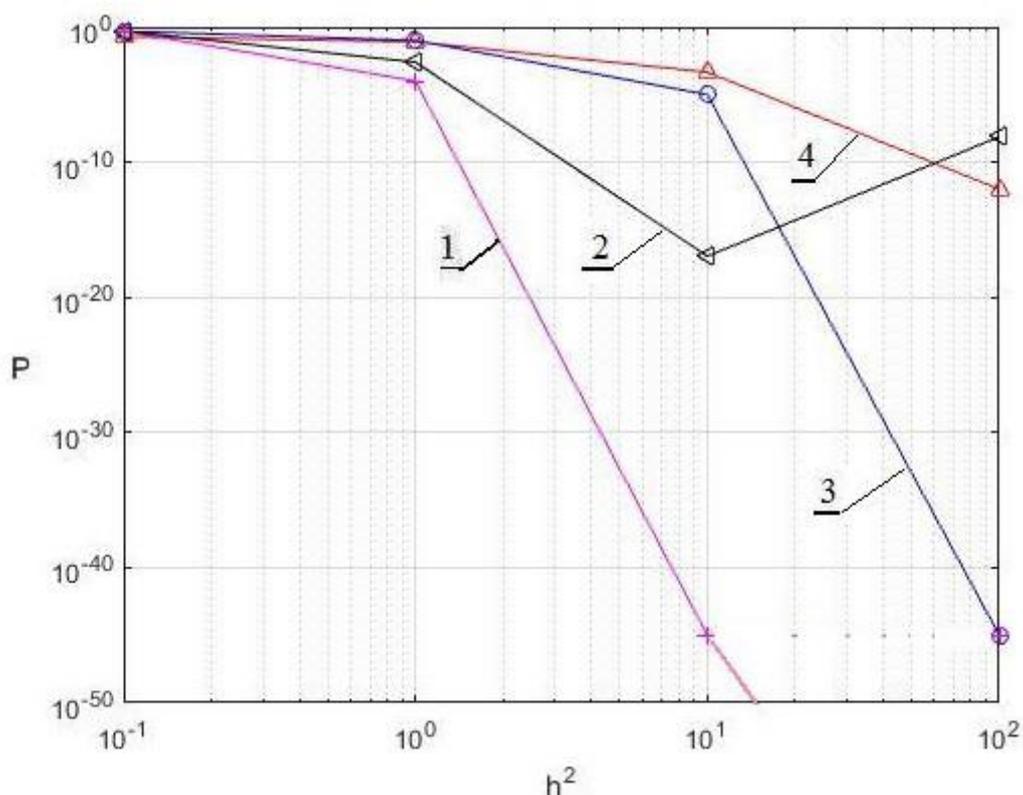


Рис. 3. Вероятность ошибок разных модемов

2. Модем двухканальный

Модулятор и демодулятор двухканального модема по отдельности запатентованы. Модем подробно описан в монографии [5]. В отличие от сигнала (1) на выходе модулятора двухканального модема получают нецентрированный квазидетерминированный процесс:

$$u_1(t) = e_0 s(t) + U_0 \sin(\omega_0 t + \eta), \quad (5)$$

где e_0 – математическое ожидание сигнала. В случайном процессе (5) телеграфный сигнал скачком изменяет математическое ожидание. Выходит, алгоритм модулирует характеристическую функцию сигнала путем изменения скачком математического ожидания процесса. И как результат этого, характеристическая функция сигнала становится комплексной. Действительная и мнимая части функции будут модулированы телеграфным сигналом и несут одну и ту же цифровую информацию. При этом демодулятор сигнала имеет два независимых канала для приема информации с помощью действительной части функции и отдельно с помощью мнимой части функции. Двухканальный демодулятор показан на рис. 4 и подробно описан в монографии [5], где соединение блоков 3, 5, 7 называют синусным каналом, а соединение блоков 4, 6, 8, 9 – косинусным каналом.

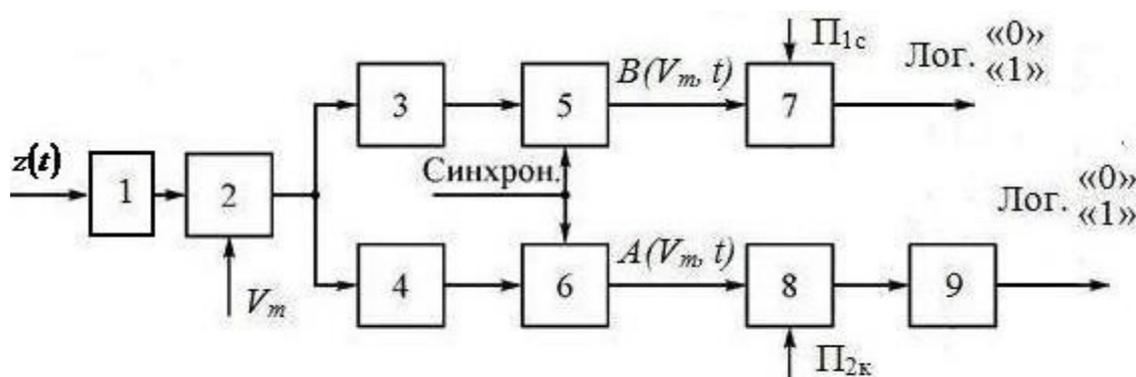


Рис. 4. Двухканальный демодулятор: 1 – аналого-цифровой преобразователь; 2 – перемножитель; 3, 4 – функциональные преобразователи функции синус и косинус, соответственно; 5, 6 – накапливающий усредняющий сумматор; 7, 8 – пороговое устройство; 9 – инвертор; V_m – значение параметра х.ф.

Пусть на вход демодулятора поступает аддитивная смесь $z(t) = u_1(t) + n(t)$ случайного процесса и «белого» шума соответственно. Алгоритм модуляции процесса (5) записан в таблице 4. Неоптимальный алгоритм модуляции сигнала рассмотрен в работах [8,9]. При анализе помехоустойчивости двухканального модема в канале с «белым» шумом выражение (3) сохранятся только для действительной части функции Ляпунова, если $s(t) = 0$. Мнимая же часть функции Ляпунова будет равна нулю:

$$B_z(V_m, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \sin(V_m z) W_1(z) dz = 0, \quad (6)$$

так как х.ф. здесь вещественная.

Когда телеграфный сигнал $s(t)=1$, то действительная и мнимая часть функции Ляпунова равна

$$\begin{aligned} A_z(V_m, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \cos(V_m z) W_1(z) dz = J_0(V_m U_0) \exp\left(-\frac{V_m^2 \sigma_u^2}{2}\right) \cos(V_m e_0) = \\ &= J_0(V_m \sigma_c \sqrt{2}) \exp\left(-\frac{V_m^2 \sigma_c^2}{2h^2}\right) \cos(V_m e_0), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B_z(V_m, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \sin(V_m z) W_1(z) dz = J_0(V_m U_0) \exp\left(-\frac{V_m^2 \sigma_u^2}{2}\right) \sin(V_m e_0) = \\ &= J_0(V_m \sigma_c \sqrt{2}) \exp\left(-\frac{V_m^2 \sigma_c^2}{2h^2}\right) \sin(V_m e_0), \end{aligned} \quad (8)$$

где $A_z(\cdot)$ – действительная часть функции Ляпунова; $B_z(\cdot)$ – мнимая часть функции Ляпунова. В выражениях (7,8) главную роль играют тригонометрические функции синус и косинус. Если выполнить равенство $V_m e_0 = \pi/2$, то действительная часть (7) функции Ляпунова $A_z(V_m, t) = 0$. По нашему мнению, такое поведение функции Ляпунова обеспечит оптимальный алгоритм модуляции из таблицы 4.

С помощью выражений (3,6-8) рассчитаем значения функции Ляпунова при параметре $V_m = 2$, дисперсии $\sigma_c^2 = 0,045$, $e_0 = 0,7854$ и запишем их в таблицу 5.

В косинусном и синусном канале модема установим одинаковые пороги $\Pi_{2k} = 0,2$, $\Pi_{1c} = 0,2$ и по методике из работы [5] рассчитаем вероятность ошибок при работе модема в проводном канале с «белым» шумом. Данные вычислений записаны в таблицу 6, где значения вероятности менее $1 \cdot 10^{-45}$ не указаны из-за отсутствия значений интеграла ошибок в математических справочниках.

Таблица 4. Алгоритмы модуляции сигнала

Алгоритм	Телеграфный сигнал	Дисперсия сигнала	Математическое ожидание сигнала	Значение параметра V_m в демодуляторе
Неоптимальный	логическая «1»	0,18	0,9	$V_m = 1$
	логический «0»	0,18	0	$V_m = 1$
Оптимальный	логическая «1»	0,045	0,7854	$V_m = 2$
	логический «0»	0,045	0	$V_m = 2$

На рис. 5 построены графики вероятности ошибок разных модемов. Графики 1 и 2 построены для модема с оптимальным алгоритмом модуляции SSK, графики 3 и 4 – с неоптимальным алгоритмом модуляции SSK по данным из работы [9], график 5 – по данным из таблицы 3.

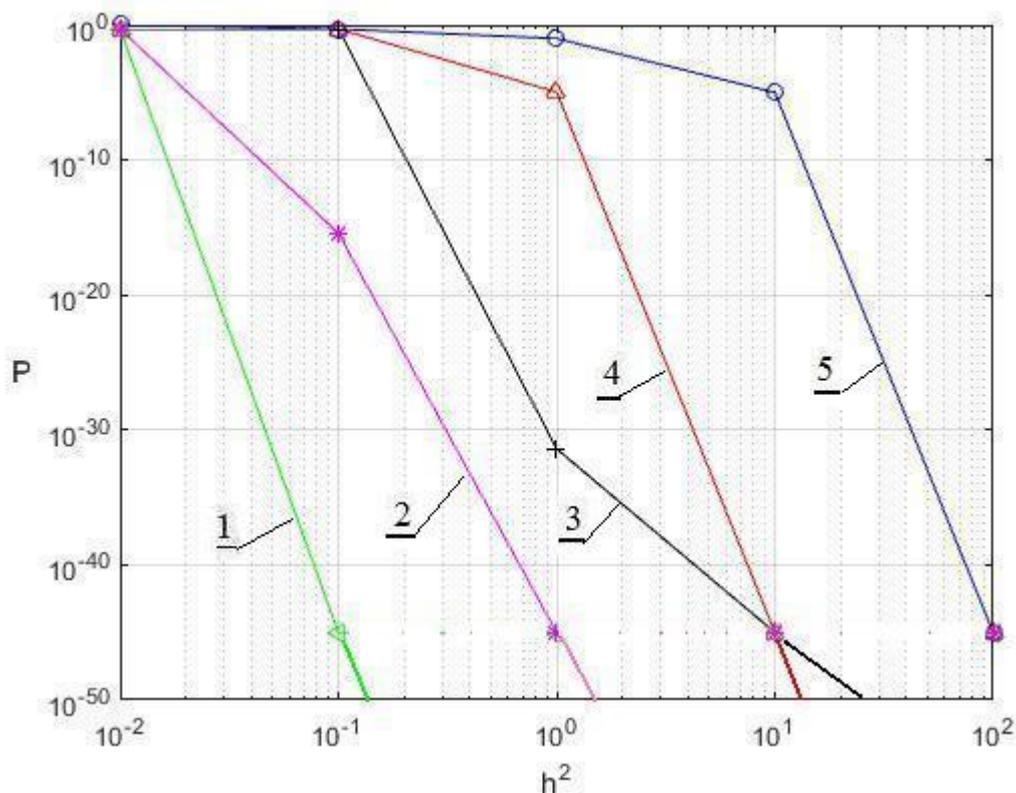


Рис. 5. Вероятность ошибок модема с разными алгоритмами модуляции

Таблица 5. Значения функции Ляпунова

1	2	3	4	5	6	7
$s(t)=1$	$A_z(2,t)$	0	0	0	0	0
	$B_z(2,t)$	0,0001	0,3708	0,833	0,912	0,912
$s(t)=0$	$A_z(2,t)$	0,0001	0,3708	0,833	0,912	0,912
	$B_z(2,t)$	0	0	0	0	0
h^2		0,01	0,1	1,0	10	100

Кривые 1 и 4 относятся к косинусному каналу модема и идут практически параллельно, однако, модем с оптимальным алгоритмом модуляции имеет преимущество 20 дБ перед таким же модемом с неоптимальным алгоритмом на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-45}$. Энергетические показатели синусного канала модема получились хуже на 10 дБ, чем у косинусного канала для модема с оптимальным алгоритмом модуляции и на 20 дБ для модема с неоптимальным алгоритмом на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-45}$. Выходит, оптимальный алгоритм модуляции является предпочтительным, поэтому уточнение теории нового метода модуляции необходимо продолжить. Модем с модуляцией QPSK по всем показателям эффективности проигрывает обоим каналам модема с модуляцией SSK, в частности, 30 дБ косинусному каналу с оптимальным алгоритмом модуляции на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-45}$.

Таблица 6. Вероятность ошибок разных модемов

1	2	3	4	5	6	7
Вероятность ошибок модема с оптимальным алгоритмом модуляции SSK	Косинусный канал	0,5	$1 \cdot 10^{-45}$	$1 \cdot 10^{-45}$	менее $1 \cdot 10^{-45}$	менее $1 \cdot 10^{-45}$
	Синусный канал	0,5	$3,8 \times 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-45}$	менее $1 \cdot 10^{-45}$	менее $1 \cdot 10^{-45}$
Вероятность ошибок модема с неоптимальным алгоритмом модуляции SSK	Косинусный канал	0,5	0,5	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-45}$	менее $1 \cdot 10^{-45}$
	Синусный канал	0,5	$2 \cdot 10^{-21}$	$4 \cdot 10^{-32}$	$1 \cdot 10^{-45}$	менее $1 \cdot 10^{-45}$
Отношение по мощности сигнал/шум		0,01	0,1	1,0	10	100

Заключение

Обобщение теории нового метода модуляции случайного сигнала с помощью оптимальных алгоритмов положительно сказывается на показателях эффективности модемов, а именно – скачком на несколько порядков повышает их помехоустойчивость. Впервые полученные результаты показали выигрыш 7 дБ в радиоканале на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-17}$ для одноканального модема с оптимальным алгоритмом модуляции SSK и 20 дБ в проводном канале на уровне вероятности ошибок $1 \cdot 10^{-45}$ для двухканального модема с оптимальным алгоритмом. При этом, скачок вероятности ошибок составил в радиоканале 10 порядков и в проводном канале 20 порядков вниз при отношении сигнал/шум 3 дБ по сравнению с ранее известными данными.

Финансирование: Оставить пустым если финансирование отсутствует.

Литература

1. Гуляев Ю.В., Беляев Р.В, Воронцов Г.Н., Залогин Н.Н. и др. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2018. Т.10. №2. С.279-312.
2. Парфенов В.И. Исследование системы передачи информации, основанной на манипуляции коэффициентом эксцесса стохастического процесса. *XIII Международная научная конференция «Радиолокация, навигация, связь»*. Воронеж, ВГУ. 2007. Т.1. С.436-444.
3. Залогин Н.Н., Колесов В.В. Манипуляция характеристиками шумоподобного сигнала в широкополосной системе связи. *Радиотехника*. 2005. №3. С.13-17.
4. Вешкурцев Ю.М. Новый метод модуляции и демодуляции сигнала. *Электросвязь*. 2019. №5. С.66-69.

5. Вешкурцев Ю.М. *Основы теории построения модемов нового поколения*. Новосибирск, ООО «СибАК». 2020. 184 с.
6. Вешкурцев Ю.М., Титов Д.А. Исследование модели модема сигналов с новой модуляцией. *Теория и техника радиосвязи*. 2021. №3. С.23-29.
7. Вешкурцев Ю.М. Повышение помехоустойчивости модема цифровых систем с амплитудной манипуляцией. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2019. №7. С.38-44.
8. Вешкурцев Ю.М. Модем нового поколения для будущих систем передачи данных. Часть 1. *Омский научный вестник*. 2018. Т.4. №160. С.110-113.
9. Вешкурцев Ю.М. Модем нового поколения для будущих систем передачи данных. Часть 2. *Омский научный вестник*. 2018. Т.5. №161. С.102-105.

Для цитирования:

Вешкурцев Ю.М. Обобщение теории нового метода модуляции и демодуляции случайного сигнала. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.8>