



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396:519.21

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-102-105

Ю. М. ВЕШКУРЦЕВ

Институт радиоэлектроники,
сервиса и диагностики,
г. Омск

МОДЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ БУДУЩИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ. ЧАСТЬ 2

Теоретически исследована помехоустойчивость модема при работе в канале с шумами. Проведено статистическое моделирование модема и установлено, что модем с характеристической модуляцией сигнала работает без ошибок при передаче данных по каналу с шумами при отношении сигнал/шум единица и менее.

Ключевые слова: характеристическая модуляция, помехоустойчивость модема, вероятность ошибок, оценка, характеристическая функция, отношение сигнал/шум, помехоустойчивость.

Часть 1 опубликована в журнале «Омский научный вестник». 2018. № 4 (160). С. 110–113.

Анализ помехоустойчивости в канале с шумами. Методика анализа разработана в первой части работы. Перейдем к анализу помехоустойчивости демодулятора, при действии на его входе аддитивной смеси квазидетерминированного сигнала и «белого» шума

$$z(t) = u(t) + n(t), \quad (1)$$

где $n(t)$ — «белый» шум; $u(t)$ — сигнал.

При $V_m = 1$ определим для аддитивной смеси (1)

$$\begin{aligned} m_1(y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \cos(z)W(z)dz = I_0(U_0) \exp\left(-\frac{\sigma_0^2}{2}\right) = \\ &= I_0\left(\rho \frac{\sqrt{2}}{1+\rho}\right) \exp\left(-\frac{1}{2(1+\rho\sqrt{2})^2}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Когда $s(t) = 0$, аналогично (2) вычислим при $V_m = 1$ для аддитивной смеси (1)

$$m_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \sin(z)W(z)dz = 0, \quad (3)$$

где $W(z)$ — плотность вероятностей мгновенных значений аддитивной смеси; $\rho = \frac{\sigma_c}{\sigma_0}$ — отношение сигнал/шум; $\sigma_c^2 = \frac{U_0^2}{2}$ — дисперсия квазидетерминированного сигнала; σ_0^2 — дисперсия «белого» шума; $U_0 + \sigma_0 = 1$ — условие, вытекающее из неравенства $|z(t)| \leq 1$. Результат (3) не требует проверки, т.к. он меньше порога Π_{1c} .

Следовательно, в синусном канале демодулятора логический «0» определяется правильно при любом отношении сигнал/шум. Результат (2) нуждается в количественном анализе.

В табл. 1 представлены результаты вычислений при $U_0 = 0,6$; $e_0 = 0,9$; $R_2 = 0,6$.

Анализ данных табл. 1 показывает, что в косинусном канале демодулятора логический «0» опре-

Таблица 1

Порог $\Pi_{2к}$	0,912 × 0,6 = 0,55					
Оценка $\tilde{A}(1,t)$	0,6	0,6	0,68	0,78	0,62	0,57
Отношение ρ	0,001	0,01	0,1	1,0	10	100

Таблица 2

Порог $\Pi_{1с}$	0,912 × 0,78 × 0,56 = 0,4					
Оценка $\tilde{B}(1,t)$	0,47	0,47	0,53	0,62	0,48	0,44
Отношение ρ	0,001	0,01	0,1	1,0	10	100

Таблица 3

Порог $\Pi_{2к}$	0,912 × 0,6 = 0,55					
Оценка $\tilde{A}(1,t)$	0,38	0,38	0,42	0,49	0,39	0,35
Отношение ρ	0,001	0,01	0,1	1,0	10	100

деляется без ошибок в диапазоне отношений сигнал/шум от 0,001 до 100.

Пусть на входе демодулятора аддитивная смесь (1) содержит нецентрированный квазидетерминированный сигнал, это соответствует условию $s(t) = 1$. Аналогично (2) при $V_m = 1$ определим

$$m_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos(z)W(z)dz = I_0(U_0) \exp\left(-\frac{\sigma_0^2}{2}\right) \cos(e_0) = \\ = I_0\left(\frac{\rho\sqrt{2}}{1+\rho}\right) \exp\left(-\frac{1}{2(1+\rho\sqrt{2})^2}\right) \cos(e_0) \quad (4)$$

или аналогично (3) при $V_m = 1$ вычислим

$$m_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \sin(z)W(z)dz = I_0(U_0) \exp\left(-\frac{\sigma_0^2}{2}\right) \sin(e_0) = \\ = I_0\left(\frac{\rho\sqrt{2}}{1+\rho}\right) \exp\left(-\frac{1}{2(1+\rho\sqrt{2})^2}\right) \sin(e_0). \quad (5)$$

Результаты (4), (5) нуждаются в количественном анализе. В табл. 2, 3 приведены данные вычислений при $U_0 = 0,6$; $e_0 = 0,9$; $\tilde{R}_1 = 0,56$; $\tilde{R}_2 = 0,6$.

При выбранных значениях порогов по данным табл. 2, 3 различие логической единицы от нуля в синусном и косинусном каналах демодулятора происходит без ошибок в диапазоне отношений сигнал/шум от 0,001 до 100, т.е. в диапазоне, равном 100дБ. В итоге можно говорить, что при наличии «белого» шума в канале передачи данных потенциальная помехоустойчивость по Котельникову предлагаемого модема предельная, т.к. при точной синхронизации обоих каналов модема ошибок при приеме телеграфного сигнала нет в диапазоне отношений сигнал/шум 100 дБ.

Статистическое моделирование. Для проверки теоретических выводов и получения количественных результатов нами проведено статистическое моделирование работы модема с точной синхронизацией синусного и косинусного каналов. На современном этапе исследований цифровые технологии в моделировании физических процессов и электронных устройств широко распространены [1–3]. Статистическое моделирование проводилось в следующей последовательности.

На первом этапе моделирования сформированы дискретные мгновенные значения нецентрированного квазидетерминированного сигнала, передающего логическую единицу ($s(t) = 1$), а потом центрированного квазидетерминированного сигнала (3), передающего логический нуль ($s(t) = 0$). Амплитуда сигналов, математическое ожидание сигнала — это переменные величины. Частота сигналов равна 100 кГц, частота дискретизации — 250 кГц. Для конкретных значений амплитуды и математического ожидания сигнала в модели демодулятора установлены пороги П1, П2, П3, П4, в соответствии с неравенствами (1–4), приведенными в первой части работы. Оценки х.ф. сигнала рассчитывались по формулам (9, 10), приведенным в первой части работы, при $V_m = 1$, $N = 150$ и сравнивались с порогом. Количество ошибок в синусном и косинусном каналах демодулятора равно нулю при проведении 105 испытаний. При отсутствии помех модем работает без ошибок.

На втором этапе моделирования сформированы дискретные мгновенные значения аддитивной смеси (1) сигнала и «белого» шума, оценки вероятностных характеристик которого измерены с погрешностью 15 % с помощью характеристикиметра [4]. Отношение сигнал/шум рассчитывалось по формуле

$$h^2 = \frac{\sum_{k=1}^{N_1} [u(k\Delta t)]^2}{N_1 \sigma_0^2}, \quad (6)$$

где $u(k\Delta t)$ — дискретные мгновенные значения сигнала; σ_0^2 — дисперсия «белого» шума; $N_1 = 500$ — объем выборки мгновенных значений сигнала. При этом амплитуда сигнала изменялась с шагом 0,1 в диапазоне от 0,1 до 0,9, среднее квадратичное

Таблица 4

Канал модема				Синусный					
Порог верхний				0,2					
Порог нижний				-0,18					
Математическое ожидание				0,4					
Отношение h	0,08	0,18	0,3	0,47	0,71	1,06	1,65	2,8	6,5
Вероятность P	$8,85 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0

Таблица 5

Канал модема				Косинусный					
Порог верхний				0,8					
Порог нижний				0,8					
Математическое ожидание				0,1					
Отношение h	0,08	0,18	0,3	0,47	0,71	1,06	1,65	2,8	6,5
Вероятность P	$9,9 \cdot 10^{-1}$	$9,6 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0

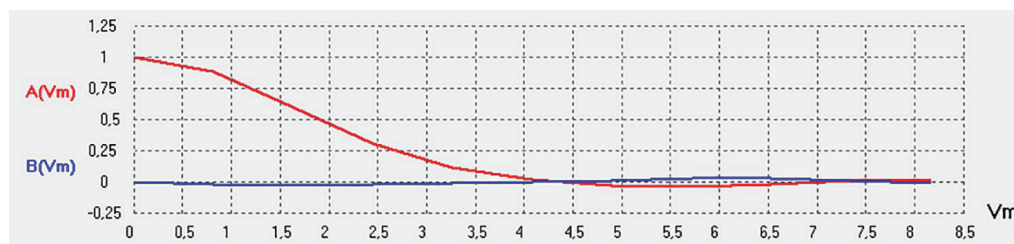


Рис. 1. Оценки действительной и мнимой частей характеристической функции аддитивной смеси квазидетерминированного сигнала и «белого» шума

Таблица 6

h	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5
P	8×10^{-2}	5×10^{-2}	1×10^{-2}	5×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-5}

отклонение «белого» шума — с шагом 0,1 в пределах от 0,1 до 0,9.

Проведено 10^5 независимых испытаний для каждого значения отношения сигнал/шум. Вероятность ошибок в синусном и косинусном каналах демодулятора рассчитывалась по формуле

$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{N_2} + \frac{n}{N_2} \right), \quad (7)$$

где $N_2 = 10^5$ — количество испытаний; m — количество ошибок при приеме логического «0»; n — количество ошибок при приеме логической «1».

Результаты статистических испытаний сведены в табл. 4, 5.

Скажем сразу, в табл. 4, 5 показаны удовлетворительные результаты моделирования, т.к. хорошие результаты моделирования подтвердили выводы теоретических исследований, а именно — в синусном и косинусном каналах демодулятора при точной

синхронизации каналов ошибок при приеме телеграфного сигнала нет при отношении сигнал/шум в пределах от 0,68 до 6,5. При этом длительность логической единицы и логического нуля одинаковая и равна 0,6 мс.

Обратим внимание на пороги, указанные в табл. 4, 5. Они не соответствуют расчетным значениям, записанным в табл. 1–3. Этим объясняются ошибки при проведении статистического моделирования. Особенно удивляет коэффициент $R_1 = 0,18$, в результате чего получаем $\Pi_1 = -0,18$. Это связано с оценкой мнимой части х.ф. На рис. 1 показаны оценки х.ф. аддитивной смеси (1) сигнала и «белого» шума, измеренные характеристикометром [4]. Видим, что равенство $\hat{B}(V_m, t) = 0$ не выполняется при $V_m = 1$, $e_0 = 0$. И как результат, при моделировании демодулятора эмпирически удалось подобрать порог $\Pi_1 = -0,18$, при котором ошибки в синусном канале демодулятора исчезли.

Для сравнения в табл. 6 приведена вероятность ошибок при демодуляции сигналов с относитель-

ной фазовой модуляцией, известная из литературы [5, с. 117].

Сопоставление данных табл. 4–6 показывает, что при $h \geq 1$ в синусном и косинусном каналах демодулятора ошибок нет при приеме телеграфного сигнала. Следовательно, демодулятор имеет помехоустойчивость, превышающую помехоустойчивость известных демодуляторов сигналов с относительной фазовой модуляцией, которая на данный момент времени считается самой помехоустойчивой [6–8].

Модем с характеристической модуляцией работает без ошибок при передаче данных по каналу с шумами при отношении $1 \leq h \ll 1$.

Заключение. Теоретические исследования и статистическое моделирование показывают, что оператор математического ожидания надежно защищает сигнал от действия шумовых помех. Следовательно, модуляция характеристической функции квазидетерминированного сигнала оправдана, характеристическая модуляция — это модуляция будущего. Несомненно, она принесёт положительные результаты, позволит в проводных линиях связи превысить порог помехоустойчивости модемов величиной 10^{-6} при отношении сигнал/шум единица и менее.

Библиографический список

1. Карташевский В. Г., Бельский К. А., Слипечук К. С. Прием сигналов OFDM в каналах с рассеянием // Радиотехника. 2015. № 2. С. 62–68.
2. Гладких А. А., Пчелин Н. А. Моделирование алгоритмов адаптивной обработки данных в системе с мягким декодером // Радиотехника. 2016. № 9. С. 40–43.
3. Бова Ю. И., Крюковский А. С., Лукин Д. С. Моделирование распространения частотно-модулированного излучения в анизотропной ионосферной плазме // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. № 5. С. 4–11.

4. Вешкурцев Ю. М., Вешкурцев Н. Д. Статистический контроль веществ. Новосибирск: Изд-во АНС СибАК, 2016. 64 с. ISBN 978-5-4379-0453-4.

5. Теплов Н. Л. Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации. М.: Связь, 1964. 359 с.

6. Помехозащищенность приема дискретных сигналов / Под ред. Ю. И. Савватеева, О. В. Назарова. М.: Радиотехника, 2015. 584 с.

7. Журавлев В. И., Руднев А. И. Цифровая фазовая модуляция. М.: Радиотехника, 2012. 208 с.

8. Карташевский В. Г. Помехоустойчивость приема сигналов ФМ-4 в канале с памятью // Радиотехника. 2012. № 9. С. 103–111.

ВЕШКУРЦЕВ Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Контроль и измерения», президент ИРСИД; действительный член Международной академии наук высшей школы; член-корреспондент Академии инженерных наук (АИН) 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. 2 // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 102–105. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-102-105.

Статья поступила в редакцию 21.05.2018 г.
© Ю. М. Вешкурцев