УДК 621.391.24

НОВЫЕ КЛАССЫ СИГНАЛОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ

СУКАЧЕВ Э. А., ШКУЛИПА П. А.
ИРТЭ ОНАС им. А. С. Попова, Украина

NEW CLASSES OF SIGNALS WITH CONTROLLED INTERSYMBOL INTERFERENCE

SUKACHEV E. A., SHKULIPA P. A.
ONAT named after A. S. Popov, Ukraine

Аннотация. *Исследованы особенности формирования спектра сигналов с управляемой межсимвольной интерференцией, когда частотная характеристика ограничивающего спектра ФНЧ отличается от прямоугольной формы, оставаясь, однако, в классе функций, удовлетворяющих первому критерию Найквиста. Предложены расчетные формулы для определения сигнальных функций и их спектров. Для иллюстрации предложенного метода приведены примеры.*

Summary. *Formation features of signals spectra with controlled intersymbol interference when frequency response of the low-pass filter (LPF) is not rectangular but satisfies Nyquist's first criterion are analyzed. Formulas are derived for signal functions and their spectra. The application of this method is illustrated by several examples.*

Системы с коррелятивным кодированием, где применяются сигналы с управляемой межсимвольной интерференцией, находят сегодня применение в различных телекоммуникационных технологиях [1, с. 473, 2, с. 197].

Сигналы с управляемой межсимвольной интерференцией (МСИ) или сигналы в виде парциального (частичного) отклика линейной системы формируются коррелятивным кодером, состоящим из трансверсального фильтра (ТФ) и ФНЧ с характеристиками, удовлетворяющими первому критерию Найквиста. Такой кодер можно рассматривать как предмодуляционный фильтр в передающем устройстве.

Важной характеристикой ТФ является число и величина коэффициентов в отводах, поскольку эти показатели связаны с отсчетными значениями его импульсной реакции в тактовых точках, определяющими управляемую МСИ. Эти показатели также полностью определяют форму периодической частотной характеристики ТФ. На основании этих показателей в работах [3,4] была предпринята классификация всех известных в то время сигналов с управляемой МСИ.

Что касается второго элемента коррелятивного кодера – ограничивающего полосу ФНЧ – то все приведенные в [3,4] классы сигналов с управляемой МСИ были получены для случая, когда в качестве ФНЧ использовался идеальный фильтр нижних частот с прямоугольной АЧХ.

В работе [5] впервые были получены обобщенные сигналы класса 1, когда в качестве ограничивающего полосу ФНЧ использовался фильтр с линейным срезом.

В целом вопрос о выборе частотной характеристики ФНЧ при формировании спектра сигнала с управляемой МСИ не получил должного отражения в литературе.

Цель настоящей работы – разработать метод построения новых классов сигналов с управляемой МСИ за счет использования ФНЧ с многопараметрическими АЧХ, удовлетворяющими первому критерию Найквиста.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫВОД ОБЩИХ СООТНОШЕНИЙ

Частотная характеристика коррелятивного кодера (рис. 1) может быть представлена в виде:

$$G(j\omega) = H(j\omega)F(j\omega). \qquad (1)$$

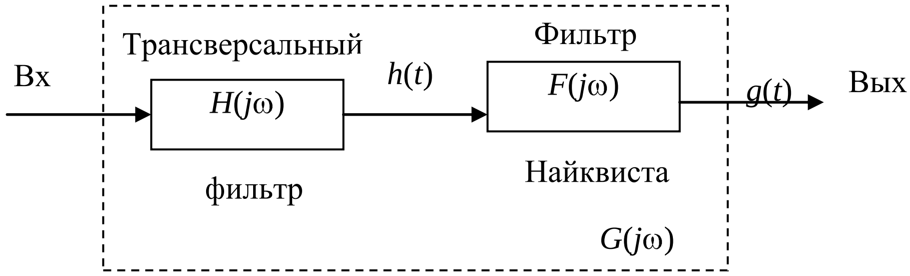


Рисунок 1 – Схема коррелятивного кодера

Передаточная характеристика ТФ, совпадающая по форме со спектральной плотностью сигнала на его выходе, определяется как:

$$H(j\omega) = \sum_{n=0}^{L-1} c_n \exp(-j\omega nT), \qquad (2)$$

где c_n – коэффициент в n-м отводе линии задержки ТФ; L – число отводов линии задержки; T – длительность тактового интервала в цифровой последовательности.

Передаточная характеристика ФНЧ $F(j\omega)$ должна удовлетворять первому критерию Найквиста, что может быть записано следующим образом:

$$F(j\omega) = \begin{cases} 1 & при \quad |\omega| < \omega_A, \\ F_\Delta(\omega) & при \quad \omega_A \le |\omega| \le \omega_B, \\ 0 & при \quad |\omega| > \omega_B, \end{cases} \qquad (3)$$

где $F_\Delta(\omega)$ – частотная характеристика ФНЧ в переходной области $[\omega_A, \omega_B]$, где она обладает нечетной симметрией относительно точки с координатами $[\omega_c; 0,5]$; $\omega_A = (1-\alpha)\omega_c$ и $\omega_B = (1+\alpha)\omega_c$ – граничные частоты переходной области; $\alpha = \frac{(\omega_c - \omega_A)}{\omega_c}$ или $\alpha = \frac{(\omega_B - \omega_c)}{\omega_c}$ – коэффициент «скругления» АЧХ и $\omega_c = \frac{\pi}{T}$.

Представим АЧХ ФНЧ в переходной области $[\omega_A, \omega_B]$ следующим образом:

$$F(\omega) = \begin{cases} F_\Delta^-(\omega) & при \quad \omega_A \le |\omega| \le \omega_c, \\ F_\Delta^+(\omega) & при \quad \omega_c \le |\omega| \le \omega_B. \end{cases}$$

Учитывая нечетную симметрию характеристики ФНЧ на интервале $[\omega_A, \omega_B]$, можно записать:

$$F_\Delta^-(\omega) = 1 - F_\Delta^+(2\omega_c - \omega), \qquad \omega_A \le |\omega| \le \omega_c. \qquad (4)$$

Подставляя (3) с учетом (4) в (1), имеем:

$$G(j\omega)=\begin{cases} H(j\omega) & \text{при} \quad |\omega|<\omega_A, \\ H(j\omega)-F_{\Delta}^{+}(\omega_c-\omega)H(j\omega) & \text{при} \quad \omega_A\le|\omega|\le\omega_c, \\ F_{\Delta}^{+}(\omega)H(j\omega) & \text{при} \quad \omega_c\le|\omega|\le\omega_B, \\ 0 & \text{при} \quad |\omega|>\omega_B. \end{cases} \tag{5}$$

Применяя к выражению (5) обратное преобразование Фурье, находим импульсную реакцию коррелятивного кодера:

$$g(t)=\frac{1}{\pi}\int_0^{\omega_c}H(j\omega)\cos(\omega t)\,d\omega-\frac{1}{\pi}\int_{\omega_A}^{\omega_c}H(j\omega)F_{\Delta}^{+}(\omega_c-\omega)\cos(\omega t)\,d\omega+$$
$$+\frac{1}{\pi}\int_{\omega_c}^{\omega_B}H(j\omega)F_{\Delta}^{+}(\omega)\cos(\omega t)\,d\omega. \tag{6}$$

Таким образом, выражение (6) позволяет определить форму сигнала с управляемой МСИ с характеристикой ТФ (2) и ограничивающим ФНЧ с частотной характеристикой (3).

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО СИГНАЛА С УПРАВЛЯЕМОЙ МСИ КЛАССА 4

Для определенности рассмотрим систему с коррелятивным кодированием класса 4, согласно классификации, предложенной в [4].

В этом случае L = 3 и коэффициенты в (2) принимают значения c_0 = 1, $c_1 = 0$ и $c_2 = -1$.

Спектральная плотность сигнала на выходе ТФ известна и может быть записана следующим образом:

$$H_4(j\omega)=j2UT\sin(\omega T). \tag{7}$$

Если частотная характеристика $F(j\omega)$ ограничивающего ФНЧ идеальна, т.е. имеет прямоугольную форму, а его полоса пропускания составляет [$-\omega_c$, ω_c], то сигнал с управляемой МСИ на выходе коррелятивного кодера (рис. 1) так же описывается известным выражением [4]:

$$g_4(t)=\frac{2U}{\pi}\frac{\sin(\pi t/T)}{(t/T)^2-1}. \tag{8}$$

Для получения новых классов сигналов с управляемой МСИ при сохранении числа и величины коэффициентов c_n, необходимо в коррелятивном кодере использовать ФНЧ с другой частотной характеристикой. Единственное требование, предъявляемое к ФНЧ, состоит в том, что он должен удовлетворять первому критерию Найквиста.

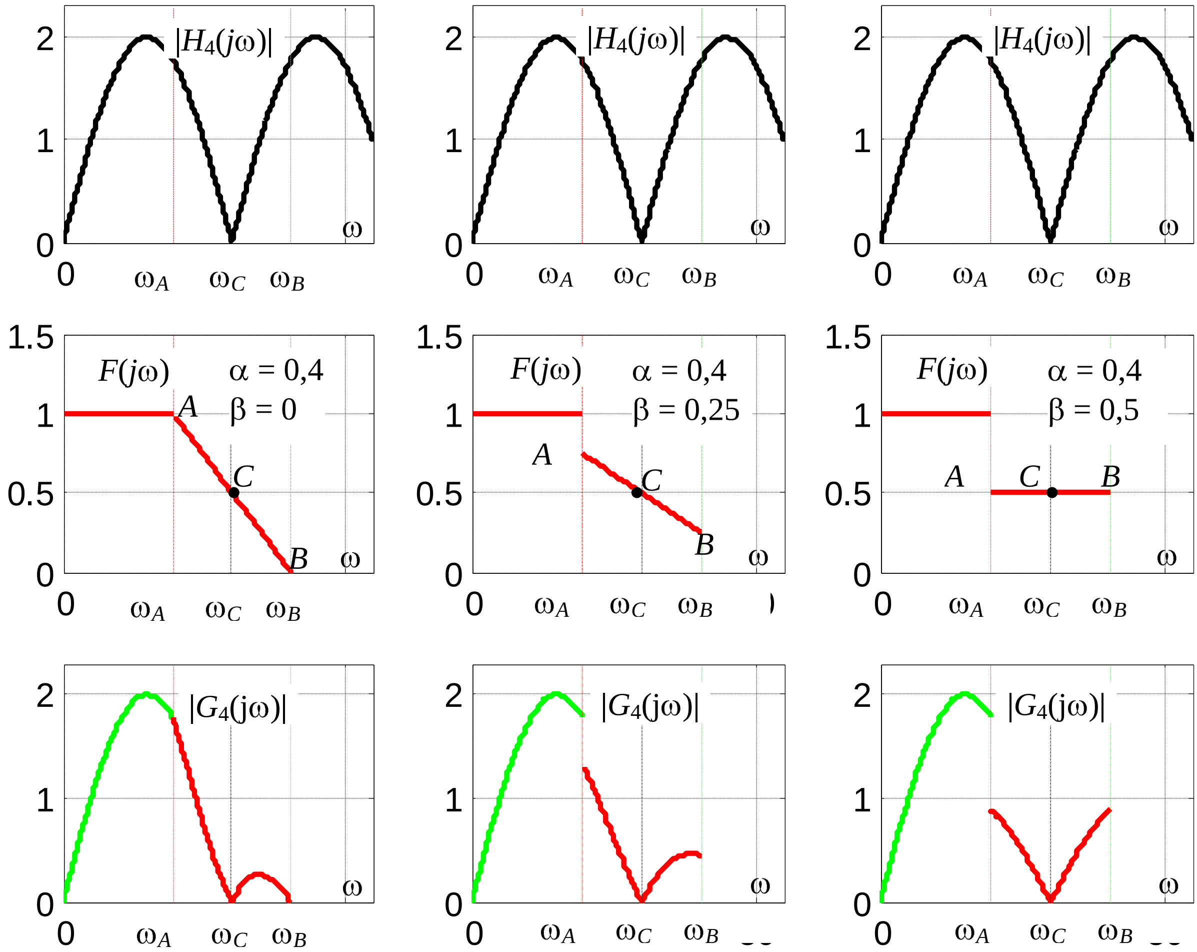
Для определенности выберем в качестве ФНЧ найквистовский фильтр с двухпараметрической $F(j\omega)$, предложенный в [6]. В общем виде частотная характеристика этого фильтра описывается выражением (3), где для переходной области справедлива запись:

$$F_\Delta(\omega) = (2\beta - 1)\frac{\omega}{2\alpha\omega_c} + \frac{1+\alpha-2\beta}{2\alpha}, \quad 0 \le \alpha \le 1, \quad 0 \le \beta \le 1. \qquad (9)$$

Подставляя (9) с учетом (3), (4) и (7) в (5), получаем:

$$|G_4(j\omega)| = \begin{cases} 2UT|\sin(\omega T)| & \text{при} \quad |\omega| < \omega_A, \\ 2UT|\sin(\omega T)| \left[(2\beta - 1)\frac{\omega}{2\alpha\omega_c} + \frac{1+\alpha-2\beta}{2\alpha}\right] & \text{при} \quad \omega_A \le |\omega| \le \omega_B, \\ 0 & \text{при} \quad |\omega| > \omega_B. \end{cases} \qquad (10)$$

На рис. 2, *а*, *б*, *в* представлен процесс формирования спектральной плотности модифицированного сигнала класса 4 при вариациях параметра β.



а) *б*) *в*)

Рисунок 2 - Расчет формы сигнала на выходе коррелятивного кодера

Для получения аналитического выражения сигнала $g_4(t;\alpha,\beta)$ необходимо подставить (10) в (6) и выполнить необходимые вычисления, которые приводят к следующему результату:

$$g_{4m}(t;\alpha,\beta)=\frac{2U}{\pi}\frac{\sin\left(\frac{\pi t}{T}\right)}{(t/T)^2-1}\left\{2\beta\left[\left(\frac{t}{T}\right)\cdot\sin\left(\alpha\pi\frac{t}{T}\right)\cdot\sin(\alpha\pi)+\cos\left(\alpha\pi\frac{t}{T}\right)\cdot\cos(\alpha\pi)\right]-\right.$$
$$\left.-(\beta-1)\left[\frac{2\frac{t}{T}\sin\left(\alpha\pi\frac{t}{T}\right)\cdot\cos(\alpha\pi)}{\alpha\pi\left[\left(\frac{t}{T}\right)^2-1\right]}-\frac{\left[\left(\frac{t}{T}\right)^2+1\right]\cos\left(\alpha\pi\frac{t}{T}\right)\cdot\sin(\alpha\pi)}{\alpha\pi\left[\left(\frac{t}{T}\right)^2-1\right]}\right]\right\}. \qquad (12)$$

Выражение (12) может быть названо модифицированным сигналом класса 4. Рис. 3 иллюстрирует зависимость формы сигнала от параметров α и β.

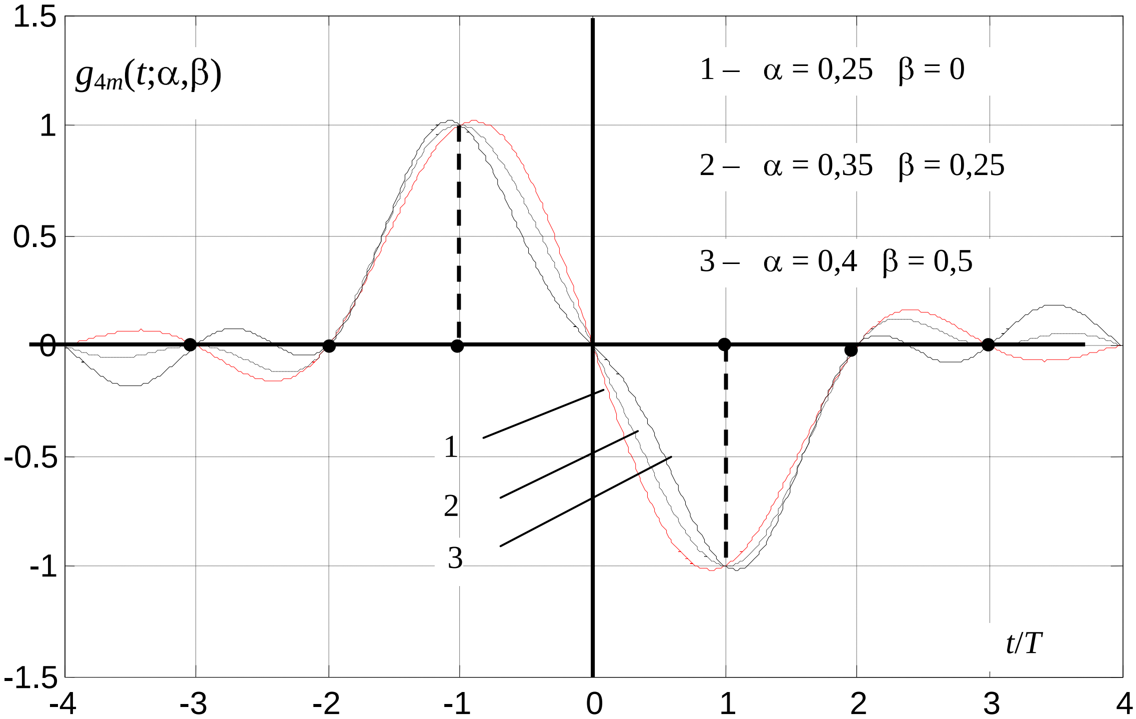


Рисунок 3 - Легко заметить, что (12) можно представить в виде:

$$g_{4m}(t;\alpha,\beta)=g_4(t)\cdot m(t;\alpha,\beta), \qquad (13)$$

т.е. модифицированный сигнал можно представить в виде произведения известной сигнальной функции класса 4 (8) на некоторую мультипликативную функцию $m(t;\alpha,\beta)$, зависящую от вида частотной характеристики ФНЧ и параметров α и β.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод синтеза новых классов сигналов с управляемой МСИ посредством подбора найквистовских ФНЧ с конечной переходной областью АЧХ позволяет получать сигнальные функции, обладающие заданными свойствами во временной области и финитной спектральной плотностью. При этом ширина спектра синтезированного таким образом сигнала в (1+α) раз больше, чем у сигнала-прототипа. Скорость затухания сигнала зависит от формы АЧХ в переходной области, т.е. от параметра β.

Литература

1. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. Беллами Дж. Цифровая телефония: Пер. с англ. – М.: Эко-Трендз, 2004. – 640 с.
3. Андреев А.М. и др. Состояние теории и практики использования сигналов с частичным откликом // Зарубежная радиоэлектроника. – 1992. – №9. – С. 57-83.
4. Kabal P., Pasupathy S. Partial – response signaling // IEEE Trans. on Commun. – 1975. – Vol. COM–23, №9. – P. 921-934.
5. Сукачев Э. А. Формирование спектра сигнала в системах с коррелятивным кодированием посредством синтеза характеристики ФНЧ // Наукові праці УДАЗ ім. О. С. Попова. – 1999. – №2. – С. 70-75.
6. Сукачев Э. А. Класс функций, удовлетворяющих первому критерию Найквиста // Труды УНИИРТ. – 1995. – №1. – С. 30-32.