УДК 621.391.1

А. Н. ДЕГТЯРЕВ

Севастопольский национальный технический университет, Украина

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ПРИ МНОГОЛУЧЕВОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН

Передаваемые сигналы предлагается раскладывать в ряд по координатным функциям, которые получены с помощью смещения импульсной характеристики физически реализуемого фильтра на равные интервалы времени. Путем определения веса ортогональности координатных функций вводится квазиортогональный базис. Указывается, что вес ортогональности является периодической функцией, период которой равен интервалу смещения базисных функций. Вес ортогональности вычисляется через определение коэффициентов его ряда Фурье. Показано, что, подбирая соответствующим образом частоты гармоник веса, можно снизить уровень межсимвольной интерференции, вызванной многолучевым распространением радиоволн.

Ключевые слова: *сигнал, физически реализуемые функции, базис, вес ортогональности, канал связи, межсимвольная интерференция.*

Введение

В большинстве высокоэффективных систем передачи информации в дискретной форме дисперсия случайной межсимвольной интерференции (МСИ) существенно превышает мощность шума в канале связи. МСИ обусловлена наложением во времени откликов линейных устройств каналоформирующего оборудования (КО) на различные элементарные сигналы, несущие информацию о передаваемых символах, а также многолучевым распространением радиоволн. В результате действия МСИ на расшифровку одного символа оказывают влияние несколько предыдущих, а в каналах с большим групповым временем запаздывания еще и последующих символов.

В работе [1] было предложено передавать информацию с помощью квазиортогональных сигналов, в качестве которых рекомендовано использовать импульсные характеристики фильтров КО. Сделан вывод о том, что повышение порядка фильтров КО или снижение скорости передачи информации позволяет снизить уровень МСИ до любого заданного значения.

Целью настоящей работы является разработка способа снижения уровня МСИ, вызываемого многолучевым распространением радиоволн.

1. Используемый метод

В работе [2] обосновывается метод ортогонализации функций $\varphi_n(t)$ путем определения веса их ортогональности $h(t)$. В соответствии с указанным методом функция $h(t)$ может быть разложена в ряд

$$h(t) = \sum_{i=1}^{\infty} b_i l_i(t)\,, \qquad (1)$$

где $l_i(t)$ – известные линейно независимые функции;

b_i – неизвестные коэффициенты, которые являются решением бесконечной системы линейных алгебраических уравнений

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_i(t)\varphi_j(t)h(t)dt = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \qquad (2)$$

В [2] показано, что вес ортогональности эквидистантных функций $\varphi_n(t) = \varphi(t - n\alpha)$ (α – интервал смещения, n = 0, 1, 2, ….) является периодической функцией, которая может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

В статье [3] показано, что если функции $\varphi_n(t)$ получены путем смещения на интервалы времени $n\alpha$ импульсной характеристики физически реализуемого фильтра порядка N, то ряд (1) преобразуется в конечную сумму

$$h(t) = \sum_{i=1}^{N} b_i l_i(t)\,. \qquad (3)$$

В этом случае функции $\varphi_n(t)$ образуют квазиортогональную систему функций, которая по своим свойствам приближается к ортогональному базису по мере повышения порядка фильтра N [1].

Рассмотренные положения позволяют представить передаваемый сигнал $x(t)$ в виде ряда

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \varphi_n(t), \qquad (4)$$

где y_n – несущие информацию коэффициенты.

Условие ортогональности (2) дает алгоритм определения коэффициентов y_n решающим устройством приемника

$$y_n = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\varphi_n(t)h(t)dt. \qquad (5)$$

Поскольку система функций $\varphi_n(t)$ является квазиортогональной, то существует некоторая погрешность при вычислении коэффициентов y_n, которая проявляется как МСИ. В работе [1] показано, что уровень МСИ можно снизить повышением порядка фильтра N или увеличением интервала смещения α функций $\varphi_n(t)$.

2. Формализация задачи

Пусть полезный сигнал $x(t)$ раскладывается в ряд (4), где $\varphi_n(t)$ – эквидистантные функции, полученные путем смещения импульсной характеристики физически реализуемого фильтра порядка N на интервалы времени $n\alpha$. Вес ортогональности $h(t)$ функций $\varphi_n(t)$, является периодической функцией с периодом α и может быть представлен в виде суммы (3). Рассмотренный метод ортогонализации функций оставляет некоторую свободу в выборе функций $l_i(t)$, составляющих вес $h(t)$.

Пусть $x_п(t)$ – отраженный от препятствия сигнал, поступающий на вход приемника вместе с полезным сигналом $x(t)$:

$$x_п(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_{пn}\varphi_n(t-t_з),$$

где $t_з$ – время запаздывания отраженного сигнала по отношению к полезному;

коэффициенты $y_{пn}$ связаны с символами сообщения, переданного ранее.

Тогда, с учетом выражения (5), поставленная задача формулируется следующим образом.

Необходимо определить функции $l_i(t)$, составляющие вес ортогональности $h(t)$ так, чтобы при выполнении условий (2) функционалы

$$J_{пnl} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_n(t-t_з)\varphi_l(t)h(t)dt, \qquad (6)$$

принимали минимальное значение.

3. Определение оптимального веса

Поскольку $h(t)$ является периодической функцией, то его можно записать в виде одной из приводимых ниже конечных сумм ряда Фурье:

$$h(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{K} b_{i_k} \cos\frac{2\pi}{\alpha} i_k t + \sum_{m=1}^{M} a_{j_m} \sin\frac{2\pi}{\alpha} j_m t, \qquad (7)$$

где K+M=N-1,

$$h(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{N-1} b_{i_k} \cos\frac{2\pi}{\alpha} i_k t, \qquad (8)$$

$$h(t) = \sum_{k=1}^{N} b_{i_k} \cos\frac{2\pi}{\alpha} i_k t, \qquad (9)$$

$$h(t) = c_0 + \sum_{m=1}^{N-1} a_{j_m} \sin\frac{2\pi}{\alpha} j_m t, \qquad (10)$$

$$h(t) = \sum_{m=1}^{N} a_{j_m} \sin\frac{2\pi}{\alpha} j_m t, \qquad (11)$$

где значения целых чисел i_k и j_m необходимо определить так, чтобы функционалы (6) принимали минимальные значения.

Окончательный выбор формы записи веса из выражений (7 – 11) диктуется результатами расчетов значений функционалов (6).

Для определенности примем, что вес имеет вид (9). Учтем, что до тех пор, пока не определены числа i_k, остаются неизвестными величины коэффициентов b_{i_k}, и запишем условия экстремума функционалов (6)

$$\frac{\partial J_{пnl}}{\partial i_k} = 0. \qquad (12)$$

Наибольшие значения функционалы (6) будут иметь, если n = 0, а $0 < t_з \le \alpha/2$, поэтому, приняв указанные пределы изменения $t_з$, условия (12) можно переписать в виде

$$\frac{\partial J_{п00}}{\partial i_k} = 0. \qquad (13)$$

Допишем к системе уравнений (13) условия ортогональности (2) и получим полную систему уравнений для определения неизвестных величин i_k и b_{i_k}:

$$\begin{cases} \int\limits_{-\infty}^{\infty} \varphi_0^2(t) \sum\limits_{k=1}^{N} b_{i_k} \cos\frac{2\pi}{\alpha} i_k t dt = 1, \\ \ldots \\ \int\limits_{-\infty}^{\infty} \varphi_0(t)\varphi_{N-1}(t) \sum\limits_{k=1}^{N} b_{i_k} \cos\frac{2\pi}{\alpha} i_k t dt = 0, \\ \frac{\partial b_{i_k}}{\partial i_k} \int\limits_{-\infty}^{\infty} \varphi_0(t)\varphi_0(t-t_з)\cos\frac{2\pi i_k t}{\alpha} dt - \\ \quad - b_{i_k}\frac{2\pi}{\alpha}\int\limits_{-\infty}^{\infty} t\varphi_0(t)\varphi_0(t-t_з)\sin\frac{2\pi i_k t}{\alpha} dt = 0. \end{cases}$$

Набор целых чисел, ближайших к значениям i_k, обеспечивающим минимумы функционалов (6), и является решением задачи.

Пример. Пусть информационный сигнал раскладывается в ряд (4), базисные функции которого получаются смещением на интервалы времени $n\alpha$ импульсной характеристики нормированного фильтра Баттерворта второго порядка. Определим вес ортогональности базисных функций, который обеспечивает минимальное значение функционала $J_{п00}$.

Решение. Импульсная характеристика требуемого фильтра записывается как

$$\varphi_0(t) = \sqrt{2}e^{-\frac{t}{\sqrt{2}}}\sin\frac{t}{\sqrt{2}}. \qquad (14)$$

Базис, состоящий из функций $\varphi_n(t)$, является квазиортогональным, и условия ортогональности (2) выполняются только для первых двух функций $\varphi_0(t)$ и $\varphi_1(t)$, причем

$$\varphi_1(t) = \sqrt{2}e^{-\frac{t-\alpha}{\sqrt{2}}}\sin\frac{t-\alpha}{\sqrt{2}}. \qquad (15)$$

Наибольшее влияние на первый принимаемый символ y_0 оказывает функционал

$$J_{0п} = J_{п00} = \int\limits_{-\infty}^{\infty}\varphi_0(t-t_з)\varphi_0(t)h(t)dt, \qquad (16)$$

где $\varphi_0(t-t_з) = \sqrt{2}e^{-\frac{t-t_з}{\sqrt{2}}}\sin\frac{t-t_з}{\sqrt{2}}$.

Будем искать вес ортогональности в виде

$$h(t) = x_1\cos\frac{2\pi nt}{\alpha} + x_2\cos\frac{2\pi mt}{\alpha}.$$

Вычислим интегралы:

$$J_{00} = \int\limits_{-\infty}^{\infty}\varphi_0^2(t)h(t)dt, \quad J_{01} = \int\limits_{-\infty}^{\infty}\varphi_0(t)\varphi_1(t)h(t)dt,$$

и получим

$$J_{00} = \frac{\alpha^4}{2\sqrt{2}}\left(x_1\frac{\alpha^2-3n^2\pi^2}{(\alpha^2+2n^2\pi^2)(\alpha^4+n^4\pi^4)} + x_2\frac{\alpha^2-3m^2\pi^2}{(\alpha^2+2m^2\pi^2)(\alpha^4+m^4\pi^4)}\right),$$

$$J_{01} = \frac{1}{4}\alpha^2 e^{-\frac{\alpha}{\sqrt{2}}}\times$$

$$\times\left\{x_2\frac{\sqrt{2}(\alpha^2+2m^2\pi^2)(\alpha^2-m^2\pi^2)\sin\frac{\alpha}{\sqrt{2}}}{(\alpha^2+2m^2\pi^2)(\alpha^4+m^4\pi^4)} + x_2\frac{\sqrt{2}\alpha(\alpha^2-3m^2\pi^2)\cos\frac{\alpha}{\sqrt{2}}}{(\alpha^2+2m^2\pi^2)(\alpha^4+m^4\pi^4)} + x_1\frac{\sqrt{2}(\alpha^2+2n^2\pi^2)(\alpha^2-n^2\pi^2)\sin\frac{\alpha}{\sqrt{2}}}{(\alpha^2+2n^2\pi^2)(\alpha^4+n^4\pi^4)} + x_1\frac{\sqrt{2}\alpha(\alpha^2-3n^2\pi^2)\cos\frac{\alpha}{\sqrt{2}}}{(\alpha^2+2n^2\pi^2)(\alpha^4+n^4\pi^4)}\right\}.$$

Решим систему уравнений

$$\begin{cases} J_{00} = 1, \\ J_{01} = 0 \end{cases}$$

относительно коэффициентов x_1 и x_2. Будем иметь

$$x_1 = \frac{\sqrt{2}\left\{\alpha^6+2\alpha^4n^2\pi^2+\alpha^2n^4\pi^4+2n^6\pi^6\right\}}{2\alpha^4-\alpha^2m^2\pi^2-\alpha^2n^2\pi^2+3m^2n^2\pi^4}\times\frac{(\alpha^4-3\alpha^2m^2\pi^2)\operatorname{tg}\frac{\alpha}{\sqrt{2}}+\alpha^4+\alpha^2m^2\pi^2-2m^4\pi^4}{\alpha^4\pi^2(m^2-n^2)},$$

$$x_2 = -\frac{\sqrt{2}\left\{\alpha^6+2\alpha^4m^2\pi^2+\alpha^2m^4\pi^4+2m^6\pi^6\right\}}{2\alpha^4-\alpha^2m^2\pi^2-\alpha^2n^2\pi^2+3m^2n^2\pi^4}\times\frac{(\alpha^4-3\alpha^2n^2\pi^2)\operatorname{tg}\frac{\alpha}{\sqrt{2}}+\alpha^4+\alpha^2n^2\pi^2-2n^4\pi^4}{\alpha^4\pi^2(m^2-n^2)}.$$

Определим

$$J_{0п} = \frac{1}{4}\alpha^2 e^{-\frac{t_з}{\sqrt{2}}}\times$$

$$\times\left\{x_2\left(\frac{(\alpha^2+2m^2\pi^2)\sin\frac{t_з}{\sqrt{2}}}{\alpha^2+2m^2\pi^2}\times\right.\right.$$

$$\times\frac{\sqrt{2}(\alpha^2-m^2\pi^2)\cos\frac{2m\pi t_з}{\alpha}-2\alpha m\pi\sin\frac{2m\pi t_з}{\alpha}}{\alpha^4+m^4\pi^4}+$$

$$
+\frac{\alpha^2\sqrt{2}(\alpha^2-3m^2\pi^2)\cos\frac{t_з}{\sqrt{2}}\cos\frac{2m\pi t_з}{\alpha}}{(\alpha^2+2m^2\pi^2)(\alpha^4+m^4\pi^4)}+
$$

$$
\left.+\frac{2\alpha m\pi(m^2\pi^2-2\alpha^2)\sin\frac{2m\pi t_з}{\alpha}\cos\frac{t_з}{\sqrt{2}}}{(\alpha^2+2m^2\pi^2)(\alpha^4+m^4\pi^4)}\right)+
$$

$$
+x_1\left(\frac{(\alpha^2+2n^2\pi^2)\sin\frac{t_з}{\sqrt{2}}}{\alpha^2+2n^2\pi^2}\times\right.
$$

$$
\times\frac{\sqrt{2}(\alpha^2-n^2\pi^2)\cos\frac{2n\pi t_з}{\alpha}-2\alpha n\pi\sin\frac{2n\pi t_з}{\alpha}}{\alpha^4+n^4\pi^4}+
$$

$$
+\frac{\alpha^2\sqrt{2}(\alpha^2-3n^2\pi^2)\cos\frac{t_з}{\sqrt{2}}\cos\frac{2n\pi t_з}{\alpha}}{(\alpha^2+2n^2\pi^2)(\alpha^4+n^4\pi^4)}+
$$

$$
\left.\left.+\frac{2\alpha n\pi(n^2\pi^2-2\alpha^2)\sin\frac{2n\pi t_з}{\alpha}\cos\frac{t_з}{\sqrt{2}}}{(\alpha^2+2n^2\pi^2)(\alpha^4+n^4\pi^4)}\right)\right\}.
$$

Подстановка выражений, полученных для коэффициентов x_1 и x_2, в соотношение для $J_{0п}$ дает зависимость функционала $J_{0п}$ от n, m, α, $t_з$.

На рисунке 1 показаны зависимости функционала $J_{0п}$ от *m* при различных значениях n, α и $t_з$. Так, своего наименьшего значения 0,001633 функционал $J_{0п}$ достигает при n = 1, m = 43, α = 7 с, $t_з = 3$ с, или $J_{0п}$ минимален и $J_{0п} = 0{,}00019636$ при n = 5, m = 52, α = 7 с, $t_з = 1$ с.

Проведенные вычисления показывают, что получить минимальные значения функционала $J_{0п}$ возможно и при одновременном изменении величин m и n. Так, если α = 7, $t_з = 3$, то $J_{0п}$ = -0,00524993 при n = 3, m = 2. При α = 7, $t_з = 3$, можно получить $J_{0п}$ = -0,0956485, если принять n = 5 и m = 2.

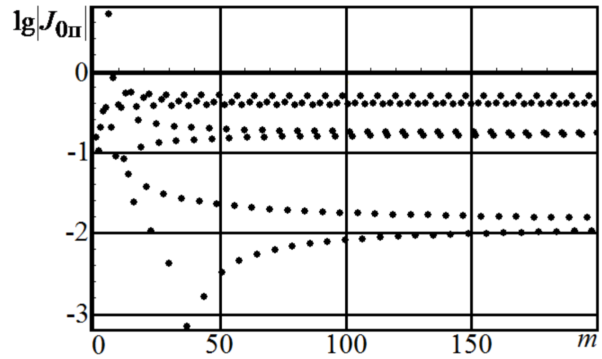
В таблице 1 приведены значения функционала $J_{0п}$ для некоторых целых значений m при n = 1, α = 7, $t_з = 3$.

На рисунке 2 показаны зависимости функционала $J_{0п}$ от $t_з$ при фиксированных значениях m, n и α. Расчеты показывают, что минимизация величины функционала $J_{0п}$ при фиксированных $t_з$, m, n и α не гарантируют достижения минимума $J_{0п}$ во всем диапазоне изменения $t_з$.

Таблица 1

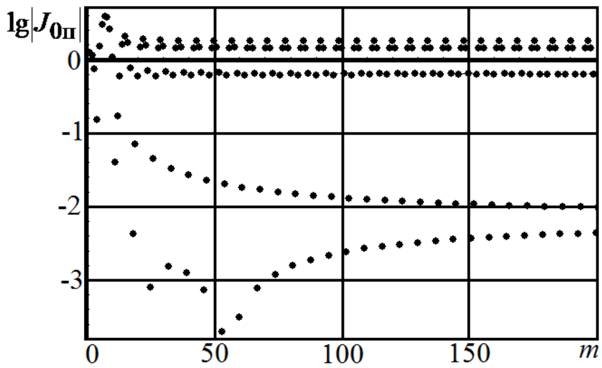
Значения функционала $J_{0п}$ для некоторых целых значений m при n = 1, α = 7, $t_з = 3$

m	$J_{0п}$	m	$J_{0п}$	m	$J_{0п}$
29	-0,004269	62	0,020549	83	0,018641
36	-0,000699	64	0,005461	85	0,007353
43	0,001633	69	0,019784	90	0,018203
50	0,003282	71	0,006219	92	0,007788
55	0,021510	76	0,019160	97	0,017828
57	0,004510	78	0,006838	99	0,008161



n =1, α =7, $t_з$ =3

а



n = 5, α = 7, $t_з$ = 1

б

Рис. 1. Зависимость функционала $J_{0п}$ от n, m, α, $t_з$

Заключение

Принимаемый сигнал раскладывается в ряд по координатным функциям. Указанные координатные функции получаются смещением импульсной характеристики физически реализуемого фильтра на кратные интервалы времени. Введением веса ортогональности координатных функций, задается квазиортогональный базис. Вес ортогональности эквидистантного базиса является периодической функцией с периодом, равным интервалу смещения координатных функций. Коэффициенты ряда Фурье веса определяются из условий ортогональности.

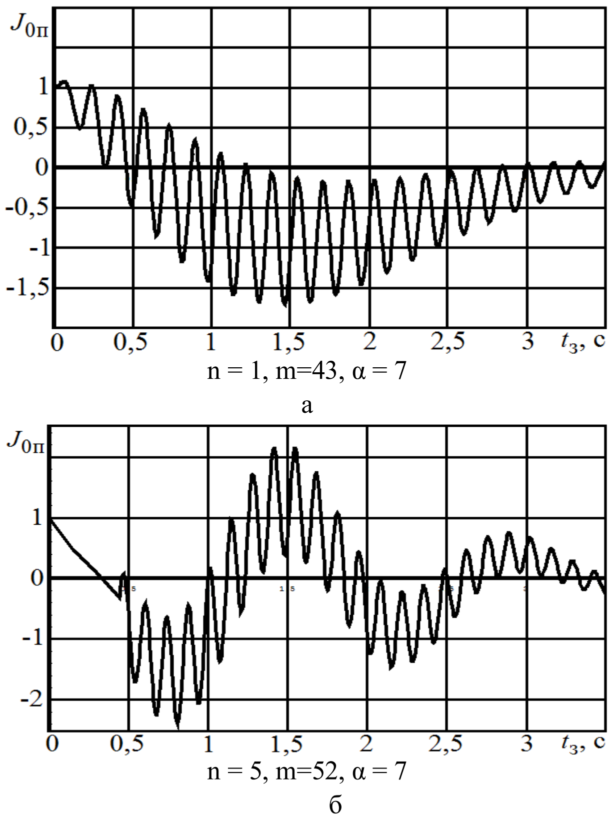


Рис. 2. Зависимость функционала $J_{0п}$ от $t_з$

Влияние на принимаемый сигнал межсимвольной интерференции, вызываемой многолучевым распространением радиоволн, можно снизить, подобрав соответствующим образом частоты гармоник, составляющих вес ортогональности базисных функций.

Изменение времени задержки отраженного сигнала приводит к необходимости изменять вес ортогональности базиса.

Литература

1. Дегтярев, А. Н. Минимизация межканальных помех и межсимвольной интерференции в высокоэффективных системах связи [Текст] / А. Н. Дегтярев // Зв'язок. – 2012. – №3 (99). – С. 53 – 56.

2. Агаханянц, Р. Е. Об одном методе ортогонализации функций [Текст] / Р. Е. Агаханянц, А. Н. Дегтярев // Вестн. Севаст. гос. техн. ун-та. Серия Физика и математика : сб. науч. тр. – 2005. – № 70. – С. 158 – 167.

3. Дегтярев, А. Н. Особенности ортогонализации физически реализуемых эквидистантных функций [Текст] / А. Н. Дегтярев // Зв'язок. – 2013. – № 1 (101). – С. 52 – 57.

Поступила в редакцию 10.03.2014, рассмотрена на редколлегии 24.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры радиотехники Э. Ф. Бабуров, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина.

INTERSYMBOL INTERFERENCE LEVEL REDUCTION IN MULTIBEAM WAVE PROPAGATION

A. M. Degtyaryev

Transmitted signals are suggested to be aligned by coordinate functions derived by means of shifting of impulse characteristic of physically realized filter into equal time intervals. By defining coordinate functions orthogonality weight the quasi-orthogonal basis is introduced. It is indicated that the orthogonality weight is a periodical function the period of which equals the basis functions shift interval. The orthogonality weight is calculated through defining of its Fourier series coefficients. It is demonstrated that by selecting appropriate weight harmonic frequencies it is possible to reduce inter-symbol interference generated by multibeam wave propagation.

Key words: signal, physically relised functions, basis, orthogonality weight, communication channel, intersymbol interference.

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ МІЖСИМВОЛЬНІ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ ПРИ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

А. М. Дегтярьов

Сігнали, що передаються, пропонується розкладати у ряд за координатними функціями, які отримані за допомогою зміщення імпульсної характеристики фізічно реалізованого фільтра на рівні інтервали часу. Шляхом визначення ваги ортогональности координатних функцій вводиться квазіортогональний базіс. Вказується, що вага ортогональности є періодичною функцією, період якої дорівнює інтервалу зміщення базісних функцій. Вага ортогональности обчислюється за допомогою визначення коефіцієнтів її ряду Фур'є. Доведено, що, підбираючи відповідним чином частоти гармонік ваги, можна знизити рівень міжсимвольної інтерференції, викликаної багатопроменевим поширенням радіохвиль.

Ключові слова: сігнал, функції, що фізично реалізуються, базіс, вага ортогональності, канал зв'язку, міжсимвольна інтерференція.

Дегтярев Андрей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Судовых и промышленных электромеханических систем, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина, e-mail: degtyaryov1966@yandex.ru.