

УДК 621.396.49

Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, К. В. Власова

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ СПУТНИКОВОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОРМИРУЮЩИХ ФИЛЬТРОВ НАЙКВИСТА

53

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

Рецензия от 22.04.2021 г.

В данной статье приведены результаты построения обобщенной модели спутникового канала в среде MathCAD, включающие синтез дискретного информационного сигнала, реализацию сверточного кодера, формирующего фильтра Найквиста и BPSK модулятора, синтез дискретного аддитивного узкополосного гауссова шума, реализацию демодулятора BPSK и декодера на основе алгоритма Виттерби. В результате верификации модели показано, что в отсутствие аддитивного шума фильтр Найквиста позволяет устранить межсимвольную интерференцию. Выигрыш в значении отношения сигнал / шум, при котором достигается заданное значение коэффициента битовых ошибок, может составить до 9 дБ при уменьшении коэффициента округления фильтра Найквиста с 0,9 до 0,3.

The results of generalized satellite channel model constructing in MathCAD, including the synthesis of a discrete information signal, the implementation of a convolutional encoder, a forming Nyquist filter and a BPSK modulator, the synthesis of a discrete additive narrow-band Gaussian noise, the implementation of a BPSK demodulator and a decoder based on the Witterby algorithm are presented in this article. As a result of verification of the model, it is shown that in the absence of additive noise, the Nyquist filter eliminates intersymbol interference. The gain in the signal-to-noise ratio (SNR), at which the set value of the bit error rate (BER) is achieved, can be up to 9 dB when the rounding factor of the Nyquist filter is reduced from 0.9 to 0.3.

Ключевые слова: спутниковый канал, фильтр Найквиста, межсимвольная интерференция, коэффициент битовых ошибок, отношение сигнал / шум

Keywords: satellite channel, Nyquist filter, intersymbol interference, bit error rate, signal-to-noise rate

Введение

В настоящее время спутниковые системы передачи информации являются широко востребованными в различных сферах народно-хозяйственной деятельности, в частности в обеспечении безопасности



мореплавания, мониторинге воздушного, наземного, морского транспорта, спутниковом телевизионном вещании и пр. При их разработке предъявляются системные требования в виде увеличения скорости передачи информации до максимально возможной, минимизации вероятности появления битовой ошибки, минимизации ширины полосы пропускания ввиду ограниченности частотного ресурса и необходимости увеличения абонентской емкости системы [1].

Ограничение спектра излучаемого сигнала посредством полосовых фильтров передатчика приводит к временным искажениям прямоугольной формы передаваемых символов, которые заключаются в их расширении во временной области. В результате этого соседние символы накладываются друг на друга, что приводит к появлению так называемой межсимвольной интерференции (МСИ) [2], являющейся причиной роста числа битовых ошибок, а значит, ухудшения качества передачи информации.

Применительно к спутниковым каналам связи используется метод борьбы с МСИ, заключающийся в синтезе такой формы символа, которая отличается от прямоугольной, но не вызывает МСИ на выходе канала связи с ограниченной полосой. Получить требуемую временную форму символа удастся за счет использования специальных формирующих фильтров [3] на передающем конце канала и согласованных с ними фильтров на приемном конце.

Модель спутникового канала

Построение модели спутникового канала передачи информации включало реализацию процедур синтеза дискретного информационного сигнала, сверточного кодирования [4], предмодуляционной фильтрации, BPSK модуляции [5], синтеза дискретного аддитивного узкополосного гауссова шума [6], BPSK демодуляции [5] и декодирования по алгоритму Виттерби [4].

Для реализации произвольного дискретного информационного сигнала использовались встроенные функции среды MathCAD:

$$Inf = \text{round}(\text{runif}(Ni, 0, 1)), \quad (1)$$

где $\text{round}(\)$ – функция округления результата вычислений; $\text{runif}(Ni, 0, 1)$ – функция создания вектора из Ni отсчетов (число информационных символов) случайной величины, равномерно распределенной на интервале от 0 до 1.

Для реализации сверточного кодирования был выбран код со скоростью $1/2$. Процедура кодирования пары выходных бит описывается выражениями вида

$$b1_i = Inf_i, \quad b2_i = Inf_i \oplus Inf_{i-1}, \quad (2)$$

где знак \oplus означает суммирование по модулю 2.



В качестве исходных данных были выбраны скорость передачи информации $v = 600$ бод [7], число отсчетов в одном бите $n = 33$.

На рисунке 1 приведены результаты данного этапа моделирования.

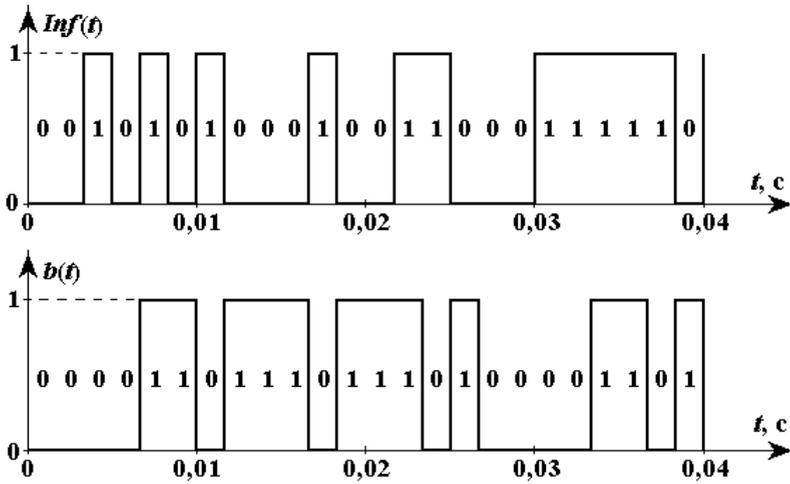


Рис. 1. Временные реализации дискретной информационной последовательности $Inf(t)$ и последовательности $b(t)$ на выходе сверточного кодера

На следующем этапе была реализована процедура предмодуляционной обработки, включающая синтез низкочастотной квадратуры

$$I(t) = \cos(\pi \cdot b(t)), \tag{3}$$

ее дискретизацию и прохождение через формирующий фильтр Найквиста. На рисунке 2 приведены результаты данного этапа моделирования.

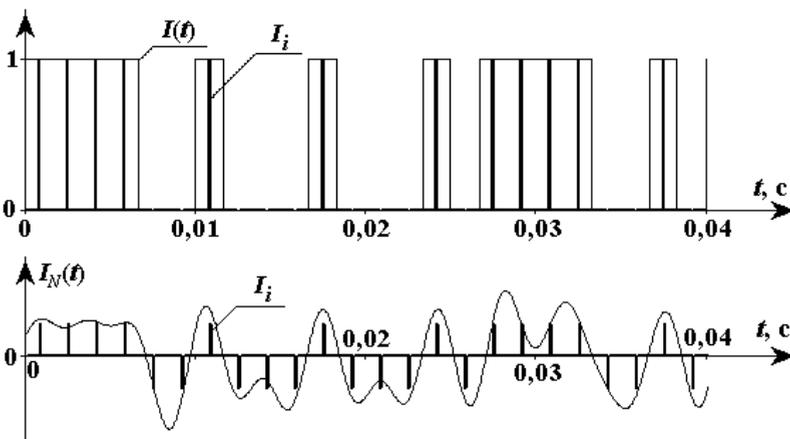


Рис. 2. Временные реализации непрерывной $I(t)$ и дискретной I_i низкочастотной квадратуры на входе и выходе формирующего фильтра Найквиста

Комплексный коэффициент передачи формирующего фильтра Найквиста задавался в виде

$$K(\omega) = \begin{cases} \frac{\omega T/2}{\sin(\omega T/2)}, & \text{если } 0 \leq \omega < \frac{\pi}{T}(1-\alpha), \\ \frac{\omega T/2}{\sin(\omega T/2)} \cdot \cos\left[\frac{T}{4\alpha}\left(\omega - \frac{\pi}{T}(1-\alpha)\right)\right], & \text{если } \frac{\pi}{T}(1-\alpha) \leq \omega \leq \frac{\pi}{T}(1+\alpha), \\ 0, & \text{если } \omega > \frac{\pi}{T}(1+\alpha), \end{cases} \quad (4)$$

где $T = \frac{1}{\nu}$ – длительность бита, $0 \leq \alpha \leq 1$ – коэффициент скругления.

Далее была реализована процедура BPSK модуляции, заключающаяся в перемножении полученной на выходе фильтра Найквиста квадратуры с несущим гармоническим колебанием. Результат модуляции приведен на рисунке 3.

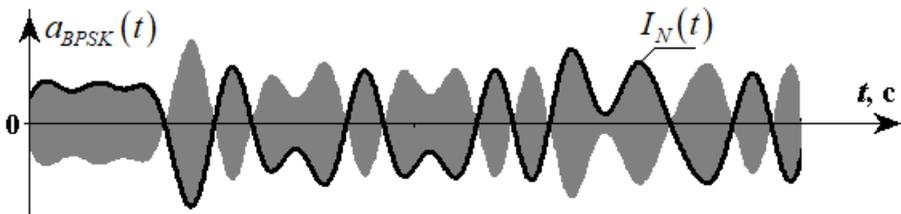


Рис. 3. Временная реализация BPSK радиосигнала $a_{BPSK}(t)$

В качестве модели канального шума была использована разработанная ранее модель аддитивного узкополосного гауссова шума с регулируемой дисперсией для возможности задания величины отношения сигнал / шум (ОСШ) в канале [6].

Процедура демодуляции BPSK радиосигнала на приемном конце была реализована с помощью линейного амплитудного детектора и фильтра Найквиста, согласованного с формирующим фильтром на передающем конце. Комплексный коэффициент передачи фильтра Найквиста задавался в виде

$$K(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq \omega < \frac{\pi}{T}(1-\alpha), \\ \cos\left[\frac{T}{4\alpha}\left(\omega - \frac{\pi}{T}(1-\alpha)\right)\right], & \text{если } \frac{\pi}{T}(1-\alpha) \leq \omega \leq \frac{\pi}{T}(1+\alpha), \\ 0, & \text{если } \omega > \frac{\pi}{T}(1+\alpha). \end{cases} \quad (5)$$

Полученный на выходе фильтра сигнал подвергался дискретизации и процедуре двухпозиционного квантования (0 или 1). На рисунке 4 приведены результаты демодуляции и квантования при отсутствии шумов в канале связи.



Анализ временных диаграмм, приведенных на рисунках 1–4, свидетельствует об адекватности созданной модели спутникового канала.

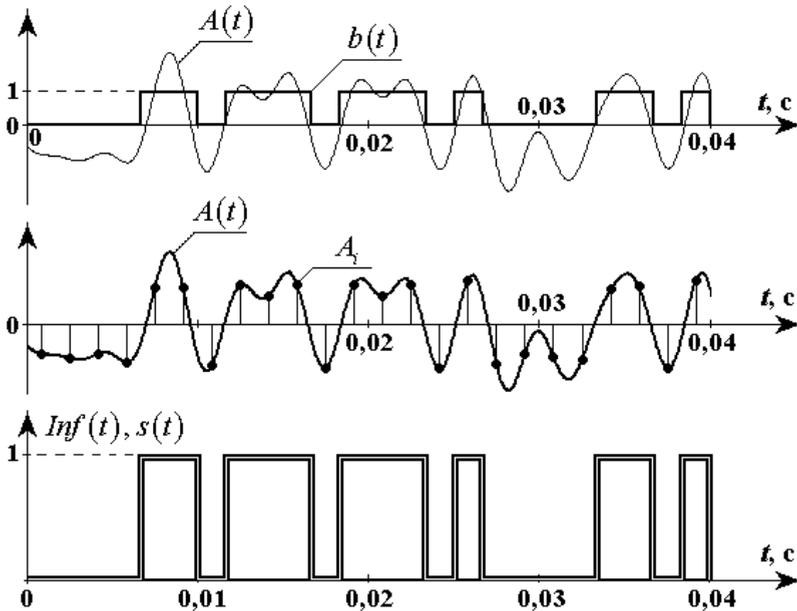


Рис. 4. Временные реализации огибающей BPSK радиосигнала на выходе фильтра Найквиста $A(t)$ и ее дискретного аналога A_i , информационной последовательности $s(t)$ на выходе квантователя

Для сравнения на рисунке 4 также приведены временные реализации последовательности $b(t)$ на выходе сверточного кодера и дискретной информационной последовательности $Inf(t)$. Отсутствие битовых ошибок в выделенной информационной последовательности говорит об эффективности применения фильтров Найквиста для борьбы с МСИ.

Модельные исследования

На последнем этапе работы были проведены модельные исследования коэффициента битовых ошибок (КБО) в канале с аддитивным белым гауссовым шумом при различных значениях ОСШ (от -15 до +6 дБ с шагом 1 дБ) и коэффициента скругления α (0,3; 0,5; 0,9). Для каждого значения ОСШ проводилось по 20 измерений величины коэффициента битовых ошибок. Измерения величины КБО осуществлялись как с использованием помехоустойчивого кодирования / декодирования, так и без него.

На рисунке 5 приведены кривые зависимости КБО от ОСШ для трех значений коэффициента скругления. Анализ полученных зависимостей позволяет заключить, что при уменьшении коэффициента скруг-

ления фильтра Найквиста с 0,9 до 0,3 значение отношения сигнал / шум, при котором достигается заданное значение коэффициента битовых ошибок (КБО) 0,01, уменьшается на величину порядка 9 дБ, а применение помехоустойчивого кодирования / декодирования позволяет уменьшить величину КБО в 2–3 раза при том же значении ОСШ.

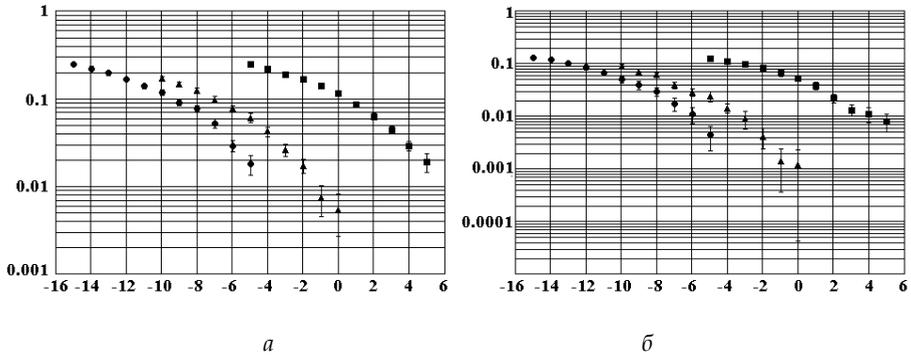


Рис. 5. Кривые зависимости КБО от ОСШ при отсутствии (а) и наличии (б) помехоустойчивого кодирования: кружки – $\alpha=0,3$; треугольники – $\alpha=0,5$; квадраты – $\alpha=0,9$

Заключение

Таким образом, построенная математическая модель показала свою адекватность и может быть использована для прогнозирования помехоустойчивости спутникового канала передачи информации при наличии в канале аддитивного гауссова шума и при использовании формирующих фильтров Найквиста для устранения МСИ.

Список литературы

1. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь / пер. с англ. ; под ред. В.В. Макарова. М., 1979.
2. Теория электрической связи : учеб. пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко ; под общ. ред. К.К. Васильева. Ульяновск, 2008.
3. Основы формирования, передачи и приема цифровой информации : пособие для студ. вузов, обучающихся по направлению подготовки 210400 – Радиотехника в УрФО / В.И. Лузин, Н.П. Никитин, В.И. Гадзиковский. М., 2014.
4. Банкет В.Л., Дорофеев В.М. Цифровые методы в спутниковой связи. М., 1988.
5. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / пер. с англ. ; под ред. В.И. Журавлева. М., 2000.
6. Волхонская Е.В., Коротей Е.В. Моделирование случайных процессов в среде MathCAD : учеб.-метод. пособие по дисциплине «Основы статистической радиотехники». Калининград, 2019.
7. Макаренко С.И. Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat // Системы управления, связи и безопасности. 2018. №4. URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/04-Makarenko.pdf> (дата обращения: 02.03.2020).



Об авторах

Елена Вячеславовна Волхонская — д-р техн. наук, доц., проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Евгений Владимирович Коротей — ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Ксения Валерьевна Власова — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Россия.

E-mail: p_ksenia@mail.ru

The authors

Prof. Elena V. Volkhonskaya, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Evgeny V. Korotey, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Dr Kseniya V. Vlasova, Associate Professor, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: p_ksenia@mail.ru