

УДК 621.391:623.61

## Повышение устойчивости радиолиний передачи информационно-управляющих сигналов к мешающим факторам

С. Н. Кириллов<sup>1</sup>, И. В. Лукашин<sup>2</sup>, Ю. И. Полтавец<sup>3</sup>, А. В. Поляков<sup>4</sup>, С. А. Круглов<sup>5</sup>

<sup>1</sup>д. т. н.

<sup>1,2</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет

<sup>3,4,5</sup>АО «Российские космические системы»

e-mail: lukashin.iv@yandex.ru

**Аннотация.** Произведен анализ устойчивости радиолинии передачи информационно-управляющих сигналов, построенной на основе профиля CSS стандарта IEEE 802.15.4a, в канале связи с многолучевым распространением и доплеровским смещением частоты. Показано, что данная радиолиния обладает высокой устойчивостью при функционировании в канале связи с многолучевым распространением и повышенной устойчивостью к доплеровскому смещению частоты по сравнению с использованием фазоманипулированных сигналов. Так, для скорости перемещения подвижного объекта со скоростью до 300 км/ч требуется увеличение отношения сигнал/шум всего на 0,1 дБ при вероятности битовой ошибки  $10^{-4}$ .

**Ключевые слова:** IEEE 802.15.4a, CSS, ЛЧМ-импульс, многолучевое распространение, доплеровское смещение частоты

## Improving of the Command Data Radio Link Stability to Interfering Factors

S. N. Kirillov<sup>1</sup>, I. V. Lukashin<sup>2</sup>, Yu. I. Poltavec<sup>3</sup>, A. V. Polyakov<sup>4</sup>, S. A. Kruglov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>doctor of engineering science

<sup>1,2</sup>Ryazan state radio engineering university

<sup>3,4,5</sup>Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: lukashin.iv@yandex.ru

**Abstract.** Analysis of the command data radio link's in communication channel with multipath and the Doppler shift is made. The radio link is based on IEEE 802.15.4a standard CSS profile. It is shown the radio link possesses a high stability, when functioning in communication channel with the multipath and increased stability to the Doppler shift compared with the phase-shift keyed signal.

For example the velocity of network point with a speed up to 300 km/h requires increase in the signal-noise ratio on 0,1 dB with a bit error probability  $10^{-4}$ .

**Key words:** IEEE 802.15.4a, profile CSS, LFM pulse, multipath, Doppler shift

К радиолиниям высокоскоростных подвижных объектов (ВСПО), таких как беспилотные летательные аппараты, предъявляются повышенные требования к эффективному функционированию в условиях доплеровского смещения частоты и многолучевого распространения. В целом стандарт IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.15.4a [1] профиль CSS (Chirp Spread Spectrum) отражает способ построения радиолинии, которая обеспечивает устойчивость к вышеперечисленным мешающим факторам. Стандарт IEEE 802.15.4a ориентирован на организацию беспроводных сетей мониторинга и контроля параметров различных радиотехнических объектов.

Представляет интерес анализ возможности использования способа построения радиолинии на основе стандарта IEEE 802.15.4a профиля CSS в каналах передачи информационно-управляющих сигналов ВСПО при скорости передачи до 10 Мбит/с.

Профиль CSS является одним из первых стандартов, в котором регламентируется использование метода расширения спектра импульсами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Согласно этому профилю ЛЧМ-импульсы имеют длительность, равную  $T_{\text{имп}} = 1,1875$  мкс, и коэффициент модуляции частоты, равный  $\mu = 7,3158 \times 10^{12} \text{ с}^{-2}$ , вследствие чего база сигнала равна  $B = \mu T_{\text{имп}}^2 = 10,3$ . Согласно этому стандарту набор из 4 ЛЧМ-импульсов образует ЛЧМ-символ. Всего возможны четыре варианта ЛЧМ-импульсов, которые получаются путем вариации законов изменения частоты: возрастающей или убывающей, и двух частотных полос. В ЛЧМ-символе определено четыре закона изменения частоты (рис. 1), составленные по критерию минимума коэффициента взаимной корреляции между символами. Для минимизации коэффициента взаимной корреляции разработчики стандарта дополнительно ввели временные паузы между ЛЧМ-символами. Временные паузы задаются параметром  $\tau_m$ , где  $m = \overline{1, 4}$ , который определяет временной сдвиг четных ЛЧМ-символов.

Математическое представление непрерывного видеосигнала во временной области, построенного из ЛЧМ-символов с учетом временных пауз

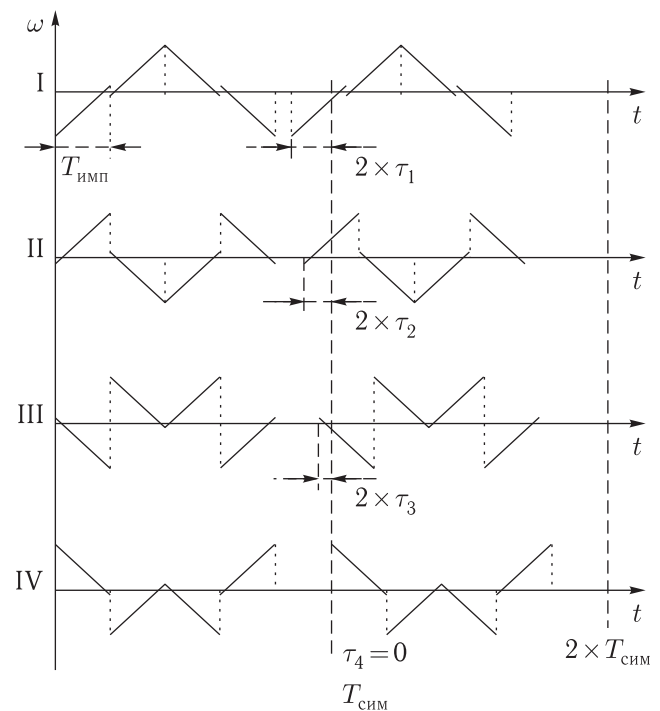


Рис. 1. Варианты законов изменения частоты ЛЧМ-символов в стандарте IEEE 802.15.4a

описывается следующим выражением [1]:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^4 \exp(j\mathbf{c}_{n,k}) \cdot s_m(t, \omega_{k,m}, T_{n,k,m}) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^4 \exp(j\mathbf{c}_{n,k}) \cdot \exp \left[ j\omega_{k,m}(t - T_{n,k,m}) + j\xi_{k,m} \frac{\mu}{2} (t - T_{n,k,m})^2 \right] \cdot W(t - T_{n,k,m}), \quad (1)$$

где  $n$  — порядковый номер ЛЧМ-символа,  $m$  — номер закона изменения частоты ЛЧМ-символа,  $k = \overline{1, 4}$  — номер ЛЧМ-импульса в составе ЛЧМ-символа,  $\mathbf{c}_{n,k}$  — фаза информационного символа,  $\omega_{k,m}$  — центральная частота ЛЧМ-импульса,  $\xi_{k,m}$  — определяет закон изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса,  $T_{n,k,m} = (k + \frac{1}{2}) T_{\text{имп}} + nT_{\text{сим}} - (1 - (-1)^n)\tau_m$  — время начала ЛЧМ-импульса,  $W(t)$  — весовая функция,  $T_{n,k,m} = (k + \frac{1}{2}) T_{\text{имп}} + nT_{\text{сим}} - (1 - (-1)^n)\tau_m$  — время начала ЛЧМ-импульса. Все значения параметров  $\omega_{k,m}$ ,  $\xi_{k,m}$ ,  $\tau_m$  определены в [1].

При описании стандарта IEEE 802.15.4a отсутствуют сведения по построению приемного тракта для профиля CSS. В соответствии с рекомендацией, приведенной в [2], приемный тракт состоит из банка фильтров (БФ) и блока демодуляции и декодирования (БДД) (рис. 2). Банк фильтров, описанный в [3], состоит из 4 фильтров с импульсными характеристиками  $h_{k,m}(t)$ , соответствующими ЛЧМ-импульсам в составе ЛЧМ-символа. Блок стробирования осуществляет фиксирование значений откликов согласованных фильтров в моменты окончания ЛЧМ-импульсов. Блок демодуляции и декодирования осуществляет операции, связанные с дифференциальным декодированием, фазовой демодуляцией (ФД), дегерметизацией (Д) и биортогональным декодированием (БД) сигнала.

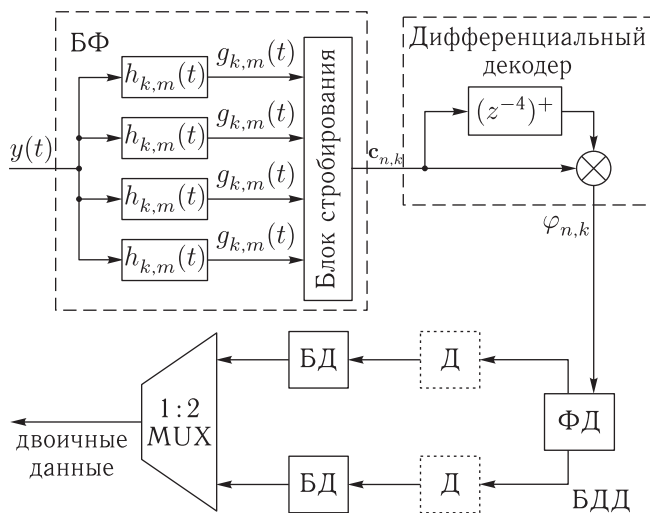


Рис. 2. Функциональная схема приемного тракта

При разработке и исследовании радиолоний, работающих в условия многолучевого распространения, обычно ограничиваются рассмотрением моделей с дискретным многолучевым распространением [4]. Огибающая импульсной характеристики каналов передачи информации ВСПО в любой момент времени распределена по рэлеевскому закону распределения.

Для исследования устойчивости радиолоний, построенной на основе профиля CSS, в условиях доплеровского смещения частоты и многолучевого

распространения осуществлено имитационное моделирование для канала передачи информации. Достоверность работы имитационной модели подтверждается тем, что полученные зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ (отношения сигнал/шум) в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом для диапазона вероятностей битовой ошибки  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  имели отклонения экспериментальной зависимости от теоретической, приведенной в [1], которые не превышали 0,3 дБ для всех законов изменения частоты в ЛЧМ-символе. Имитационная модель обеспечивала вероятность битовой ошибки  $P_0 = 10^{-5}$  при  $q = -5$  дБ.

Проведенные исследования радиолоний, построенной на основе профиля CSS, показали высокую эффективность по сравнению со случаем использования фазоманипулированных сигналов при функционировании в условиях многолучевого распространения и доплеровского смещения частоты. При исследовании влияния доплеровского смещения частоты на функционирование радиолоний было показано, что для скорости перемещения ВСПО до 300 км/ч отношение сигнал/шум увеличивается не более чем на 0,1 дБ при вероятности битовой ошибки  $P_0 = 10^{-4}$ . В случае исследования влияния многолучевого распространения было показано, что при использовании профиля CSS влияние меньше, чем при использовании фазоманипулированных мультипликативных составляющих сигналов.

Таким образом, проведенные исследования радиолоний ВСПО, построенной на основе профиля CSS, показали, что используемая схема приемного тракта обладает более высокой эффективностью при функционировании в многолучевых каналах связи по сравнению с фазоманипулированными сигналами. Дополнительное повышение устойчивости радиолоний в данном случае обеспечивает наличие схемы многолучевого разнесения [5]. Также исследования продемонстрировали повышенную устойчивость радиолоний к доплеровскому смещению частоты.

## Список литературы

1. IEEE Std 802.15.4a-2007. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer

- (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
2. *De Dominicis C.M., Ferrari P., Flammini A., Sissinni E.* Wireless Sensors Exploiting IEEE 802.15.4a for Precise Timestamping // International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, Portsmouth: IEEE, 2010, p. 48–54.
3. *Abou Bakr Othman M., Farhang-Boroujeny B., Schmid T.* Exploiting Quasi-Orthogonal Chirp Signals in Multi-User Access Communication Systems. [http://www.academia.edu/2045074/Exploiting\\_Quasi-Orthogonal\\_Chirp\\_Signals\\_in\\_Multi-User\\_Access\\_Communication\\_Systems](http://www.academia.edu/2045074/Exploiting_Quasi-Orthogonal_Chirp_Signals_in_Multi-User_Access_Communication_Systems)
4. *Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С.* Системы цифровой радиосвязи. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
5. *Ипатов В.* Расширение спектра и CDMA. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 488 с.