

Г.Н. МАЛЬЦЕВ, А.В. ЕВТЕЕВ
**УСТОЙЧИВОСТЬ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ЗАДЕРЖКОЙ
ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С
РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА В СИСТЕМАХ СИНХРОНИЗАЦИИ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Мальцев Г.Н., Евтеев А.В. Устойчивость слежения за задержкой фазоманипулированных сигналов с расширением спектра в системах синхронизации радиотехнических систем.

Аннотация. Рассматриваются вопросы обеспечения устойчивости слежения за задержкой в системах синхронизации радиотехнических систем при приеме фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе псевдослучайных последовательностей. При работе с подвижными объектами задержка принимаемого сигнала непрерывно меняется, возникают ошибки синхронизации, и качество приема сигнала в значительной степени зависит от устойчивости работы схемы слежения за задержкой, характеризуемой вероятностью срыва слежения. Слежение за задержкой, как правило, рассматривается в качестве основной задачи синхронизации радиотехнических систем с фазоманипулированными сигналами с расширением спектра на основе псевдослучайных последовательностей.

Исследовано влияние ошибок синхронизации при слежении за задержкой принимаемого фазоманипулированного сигнала с расширением спектра на основе псевдослучайных последовательностей на вероятность срыва слежения. Расчетным методом получены семейства зависимостей вероятности срыва слежения от величин случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой, нормированных к полосе захвата временного дискриминатора, при различных сочетаниях этих параметров. Определены области слабого и сильного влияния величины ошибок слежения за задержкой принимаемого сигнала на вероятность срыва слежения. Проанализирован характер влияния случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой на вероятность срыва слежения. Установлено, что в общем случае имеет место неоднозначность среднего квадрата нормированной ошибки слежения за задержкой как критерия оптимизации при выборе параметров системы синхронизации.

Расчеты, проведенные для широкого диапазона изменения нормированных ошибок слежения за задержкой, показывают, что для обеспечения заданного качества приема сигналов в радиотехнической системе с фазоманипулированными сигналами с расширением спектра на основе псевдослучайных последовательностей необходим совместный выбор параметров системы синхронизации, определяющих величину случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой. Полученные результаты могут быть использованы при анализе характеристик систем синхронизации информационных и измерительных радиотехнических систем и при обосновании технических решений, обеспечивающих требуемое качество приема фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе псевдослучайных последовательностей.

Ключевые слова: фазоманипулированные сигналы с расширением спектра, синхронизация, схема слежения за задержкой, вероятность срыва слежения

1. Введение. В радиотехнических системах (РТС) передачи информации, навигации и управления подвижными объектами широкое распространение получило использование фазоманипулированных

сигналов с расширением спектра на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП) [1-4]. Такие сигналы используются в РТС отечественных и зарубежных космических систем [5-8], в том числе в глобальных навигационных спутниковых системах ГЛОНАСС и GPS, и представлены в рекомендациях международного Консультативного комитета по системам передачи космических данных (Consultative Committee for Space Data Systems – CCSDS) [9-11].

Особенностью оптимального корреляционного приема фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП является узкая ширина полосы захвата временного дискриминатора корреляционного приемника, которая определяется длительностью символа модулирующей ПСП. Слежение за задержкой принимаемого сигнала осуществляется схемой слежения за задержкой модулирующей ПСП, входящей в состав системы синхронизации РТС. Под системой синхронизации в данном случае понимается система слежения за параметрами принимаемого сигнала в приемном устройстве РТС [6, 12]. В общем случае слежение осуществляется за задержкой, частотой и фазой принимаемого сигнала [13-16]. При этом из-за узости полосы захвата схемы слежения за задержкой, соизмеримой с длительностью символа модулирующей ПСП, число которых в периоде ПСП в РТС различного назначения может составлять от сотен до десятков тысяч, слежение за задержкой, как правило, рассматривается в качестве основной задачи системы синхронизации РТС с фазоманипулированными сигналами с расширением спектра на основе ПСП [17-21].

При радиосвязи с подвижными объектами, в частности, при работе наземных РТС с космическими и летательными аппаратами задержка принимаемого сигнала непрерывно меняется вследствие изменения дальности до объекта. В этих условиях может иметь место существенное влияние точности синхронизации по задержке на качество приема фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП, которое будет зависеть от устойчивости работы схемы слежения за задержкой. В [22] исследовано влияние ошибок слежения за задержкой принимаемого сигнала на вероятность ошибочного приема символов передаваемой информации в условиях, когда ошибка слежения за задержкой не выходит за пределы полосы захвата системы слежения. При выходе ошибки слежения за задержкой принимаемого сигнала за пределы полосы захвата происходит срыв синхронизации. Для достижения требуемого качества приема сигналов необходим обоснованный выбор параметров следящей системы с учетом

влияния связанных с ними случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой на выбранный показатель устойчивости системы синхронизации.

Представлены результаты исследования устойчивости слежения за задержкой модулирующей ПСП в РТС с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок слежения. В качестве показателя устойчивости системы синхронизации рассматривается вероятность срыва слежения. Цель работы – анализ влияния ошибок синхронизации при слежении за задержкой принимаемого фазоманипулированного сигнала с расширением спектра на основе ПСП на вероятность срыва слежения. Представлены результаты исследования влияния случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой на вероятность срыва слежения.

2. Особенности дискриминационной характеристики схемы слежения за задержкой при приеме фазоманипулированных сигналов на основе ПСП и постановка задачи. Роль систем синхронизации в РТС определяется тем, что слежение за изменяющимися параметрами принимаемых сигналов позволяет получить оценки их текущих значений и использовать эти оценки для соответствующей настройки опорных сигналов при реализации оптимального приема сигналов, что обеспечивает достижение потенциальной помехоустойчивости РТС [2, 14]. В общем случае система синхронизации осуществляет слежение за частотой, задержкой и фазой принимаемого сигнала после поиска и захвата принимаемого сигнала по этим параметрам. Слежение осуществляется в пределах полосы захвата, ширина которой определяется шириной дискриминационной характеристики по соответствующему параметру сигнала. При выходе ошибки слежения за пределы полосы захвата происходит срыв синхронизации и необходим повторный поиск сигнала по одному или нескольким параметрам. В типичных условиях приема фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП область неопределенности превышает ширину полосы захвата по частоте в единицы и десятки раз, а ширину полосы захвата по задержке – в сотни и тысячи раз, поэтому слежение за задержкой, как правило, рассматривается в качестве основной задачи системы синхронизации РТС, использующих такие сигналы.

Используемые в РТС фазоманипулированные сигналы с расширением спектра на основе ПСП могут быть в общем виде представлены следующим образом [2, 6]:

$$s(t) = U \sum_{n=1}^N \text{rect} \left[\frac{t - \tau - (n-1)\Delta t}{\Delta t} \right] \sin \left[2\pi(f_0 + F_D)t + \varphi + \varphi_n \right], \quad (1)$$

где U – амплитуда сигнала; f_0 – несущая частота; φ – начальная фаза; τ – временная задержка; F_D – доплеровский сдвиг частоты сигнала; Δt – длительность символа модулирующей ПСП; N – число символов в периоде (длина) модулирующей ПСП; φ_n – дискретные фазовые сдвиги, соответствующие символам ПСП $n=1, \dots, N$.

Прямоугольная функция «окна» вида $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1, \\ 0, & x < 0, \quad x \geq 1, \end{cases}$ под

знаком суммы в (1) задает длительность символа Δt модулирующей двоичной ПСП. Длительность анализируемого сигнала определяется длительностью периода модулирующей ПСП $\Delta T = N\Delta t$. Наибольшее распространение в РТС с фазоманипулированными сигналами на основе ПСП получает фазовая манипуляция $[0, \pi]$ в соответствии с чередованием символов $[0, 1]$ модулирующей ПСП. В этом случае $\varphi_n = \{0, \pi\}$. При этом используются ПСП с числом символов N в периоде, составляющем сотни и тысячи, а в глобальных навигационных спутниковых системах и радиолиниях с высокой энергетической скрытностью – до десятков тысяч [5, 6, 23].

Основой технической реализации поиска и слежения за фазоманипулированными сигналами с расширением спектра на основе ПСП по задержке являются корреляционный приемник ПСП, представляющий собой квазиоптимальный следящий измеритель [12–14]. В нем формирование дискриминационной характеристики временного дискриминатора $D(\tau)$ осуществляется с помощью корреляционных функций $B(\tau)$ опорной и принимаемой ПСП, сдвинутых на Δt или на $2\Delta t$, как это показано на рисунке 1. Ширина рабочего участка дискриминационной характеристики при этом составляет $\Delta = \Delta t$ (а) или $\Delta = 2\Delta t$ (б) соответственно. Тем самым определяется максимально возможная ширина полосы захвата Δ при слежении за задержкой τ принимаемого сигнала.

Практически ширина полосы захвата по задержке выбирается исходя из допустимых потерь в отношении сигнал/шум, вызванных уменьшением значения автокорреляционной функции ПСП. В типовом временном дискриминаторе схемы слежения за задержкой ПСП ширина полосы захвата равна длительности одного символа ПСП. На рисунке 2 показан главный пик нормированной корреляционной функции ПСП $B(\tau)$. Длительности одного символа ПСП Δt соответствует изменение нормированной задержки в

диапазоне $-0,5 < \tau/\Delta t < 0,5$. При этом на границах полосы захвата значения нормированной корреляционной функции ПСП $B(\tau)$ равны 0,5 (сечение функции $B(\tau)$ штриховой линией), что соответствует потерям в отношении сигнал/шум 3 дБ. Принцип формирования дискриминационной характеристики не изменяется при использовании различных видов ПСП и модификаций корреляционного приема с вычислением корреляционной функции сегментов ПСП или моментов высших порядков корреляционной функции ПСП, а также при программной реализации корреляционного приема [15, 24-26].

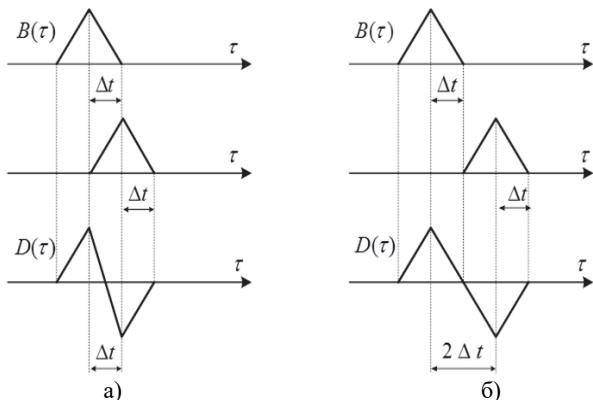


Рис. 1. Дискриминационные характеристики корреляционного приемника ПСП: а) $\Delta = \Delta t$; б) $\Delta = 2\Delta t$

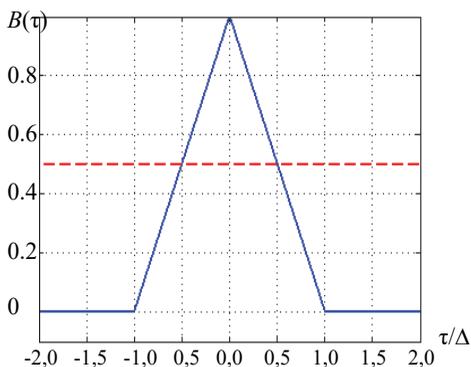


Рис. 2. Определение потерь в отношении сигнал/шум на границе полосы захвата по задержке

При выходе ошибки Δt слежения за задержкой τ принимаемого сигнала за пределы полосы захвата Δ происходит срыв синхронизации. В этих условиях качество приема фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП в значительной степени зависит от устойчивости слежения за задержкой, которая будет тем выше, чем выше точность оценки задержки принимаемого сигнала в схеме слежения за задержкой системы синхронизации. Правильный выбор параметров следящего фильтра схемы слежения за задержкой позволяет уменьшить случайную и систематическую составляющие ошибки слежения за задержкой и связанную с ними вероятность срыва слежения системы синхронизации.

Содержательная постановка задачи исследования состоит в следующем. Необходимо выполнить статистическое описание ошибок слежения за задержкой принимаемого фазоманипулированного сигнала с расширением спектра на основе ПСП и получить аналитические зависимости вероятности срыва слежения за задержкой от параметров закона распределения ошибок слежения за задержкой. При этом рассматриваются условия приема сигналов, характерные для работы наземных РТС с космическими и летательными аппаратами, когда в приемном устройстве в смеси с аддитивным шумом выделяется фазоманипулированный сигнал РТС вида (1) с временной задержкой τ , за которой осуществляется слежение системой синхронизации, а эффекты многолучевого распространения проявляются слабо. В качестве параметров статистического описания ошибок слежения за задержкой рассматриваются случайная и систематическая составляющие ошибки слежения, которые в рассматриваемых условиях зависят от отношения сигнал/шум на входе приемного устройства, параметров следящего фильтра схемы слежения за задержкой и динамики изменения задержки принимаемого сигнала.

3. Статистическое описание ошибок слежения за задержкой принимаемого сигнала. При анализе динамики слежения за параметрами сигнала в следящих системах используется описание процесса слежения в виде марковского случайного процесса [27]. В этом случае плотность распределения ошибки слежения $\Delta\lambda$ за параметром сигнала λ в условиях помех определяется решением уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова относительно плотности распределения $w(t, \Delta\lambda)$ сигнала рассогласования следящей системы. Однако общее аналитическое решение уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова для переходных режимов и произвольного вида помех отсутствует, и

большинство известных результатов связаны с анализом стационарного решения для $w(\Delta\lambda)$, как точного [27], так и приближенного [28], при $dw(t, \Delta\lambda)/dt=0$.

В схеме слежения за задержкой модулирующей ПСП принимаемого фазоманипулированного сигнала с расширением спектра сигналом рассогласования следящей системы является ошибка слежения за задержкой: $\Delta\lambda=\Delta t$. Анализ точных и численных решений уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова, представленных в работах [27, 28], показывает, что при приеме сигналов в условиях белого гауссовского шума для описания плотности распределения ошибки слежения за задержкой Δt в стационарном режиме может быть использован нормальный закон распределения с параметрами: σ_τ – среднеквадратическое отклонение ошибки слежения за задержкой (случайная составляющая ошибки); $\delta\tau$ – математическое ожидание ошибки слежения за задержкой (систематическая составляющая ошибки).

Ширина полосы захвата Δ схемы слежения за задержкой фазоманипулированного сигнала с расширением спектра определяется длительностью символа модулирующей ПСП: $\Delta=\Delta t$ или $\Delta=2\Delta t$ в зависимости от варианта реализации дискриминатора корреляционного приемника ПСП. При проведении аналитических расчетов удобно использовать параметры системы слежения за задержкой, нормированные к полуширине дискриминационной характеристики Δ . Введем обозначения: $\Delta x = 2\Delta\tau/\Delta$ – нормированная ошибка слежения за задержкой; $\delta x = 2\delta\tau/\Delta$ – математическое ожидание нормированной ошибки слежения за задержкой; $\sigma_x = 2\sigma_\tau/\Delta$ – среднеквадратическое отклонение нормированной ошибки слежения за задержкой. Тогда при нормальном законе распределения ошибки слежения за задержкой Δt плотность распределения нормированной ошибки слежения за задержкой Δx имеет вид:

$$w(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\Delta x - \delta x)^2}{2\sigma_x^2}\right]. \quad (2)$$

В общем случае гауссовское приближение (2) является хорошей аппроксимацией более точных описаний плотности распределения ошибки слежения за задержкой, например, закона распределения Тихонова [13, 29, 30]:

$$w(\Delta x) = \frac{\exp\left[\cos(2\pi\Delta x)/(2\pi\sigma_x)^2\right]}{I_0\left[1/(2\pi\sigma_x)^2\right]}, \quad (3)$$

где $I_0(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка, Δx и σ_x соответствуют введенным параметрам нормированной ошибки слежения за задержкой и среднеквадратического отклонения нормированной ошибки слежения за задержкой при этом полагается, что систематическая ошибка слежения отсутствует ($\delta x = \delta t = 0$).

Результаты расчетов плотности распределения ошибки слежения за задержкой в соответствии с выражениями (2) и (3) представлены в работах [22, 30, 31], в которых показано, что в области существенных значений ошибки слежения за задержкой оба закона распределения практически совпадают. На рисунке 3 приведены результаты расчетов плотности распределения ошибки слежения за задержкой в соответствии с выражениями (2) и (3) при $\sigma_x = 0,1$ и $\delta x = 0$ [22]. Кривая 1 соответствует нормальному закону распределения, кривая 2 – закону распределения Тихонова. В области существенных значений ошибки слежения за задержкой оба закона распределения практически совпадают.

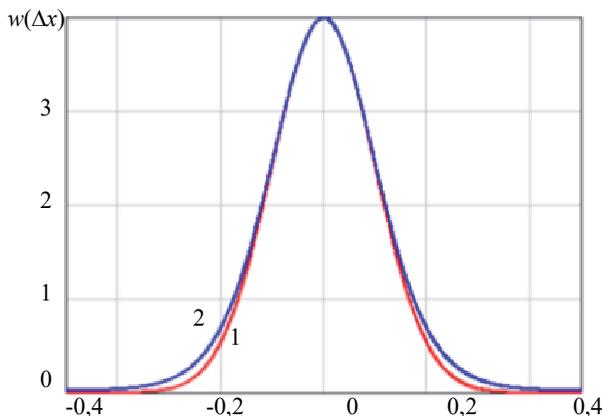


Рис. 3. Плотности нормального закона распределения и закона распределения Тихонова для нормированной ошибки слежения за задержкой

Близость к нормальному закону распределения ошибки слежения за задержкой подтверждается результатами

моделирования гибридной системы фазовой и тактовой синхронизаций фазоманипулированных сигналов с расширением спектра [17]. Закон распределения ошибки слежения за задержкой также стремится к нормальному закону и при цифровой реализации схемы слежения за задержкой и большом числе уровней квантования сигнала [32]. Поэтому в исследовании вероятности срыва слежения за задержкой при приеме фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП в условиях ошибок синхронизации использовался нормальный закон распределения (2) для нормированной ошибки слежения за задержкой.

Значения параметров σ_τ и $\delta\tau$ могут быть связаны с параметрами схемы слежения за задержкой и условиями приема сигналов, в частности с динамикой изменения задержки принимаемого сигнала, отношением сигнал/шум на входе приемника, видом и характеристиками дискриминатора (когерентный или некогерентный) и следящего фильтра (порядок фильтра) [6, 12, 13, 33-35]. При этом конкретные значения параметров схемы слежения за задержкой σ_τ и $\delta\tau$ и их сочетания могут в различных условиях приема сигналов обеспечиваться при использовании следящих фильтров и дискриминаторов с различными характеристиками.

При задании параметров σ_τ и $\delta\tau$ также должно учитываться то обстоятельство, что при приеме фазоманипулированных сигналов на основе ПСП в системе синхронизации происходит слежение как за задержкой, так и за частотой и фазой принимаемых сигналов, что находит отражение в использовании комбинированных систем синхронизации, состоящих из нескольких подсистем [6, 19, 33, 35]. Ошибка слежения за задержкой и параметры σ_τ и $\delta\tau$ в общем случае зависят от параметров, совместно функционирующих со схемой слежения за задержкой систем частотной и фазовой автоподстройки. Так, снижение ошибки слежения за задержкой принимаемых сигналов может быть обеспечено применением комплексной системы слежения, осуществляющей оптимальную оценку задержки принимаемого сигнала на основе совместного (комплексного) использования информации, содержащейся в его огибающей и фазе высокочастотного колебания [27,29].

В рамках используемого подхода для статистического описания ошибок слежения за задержкой в соответствии с выражением (2) может быть проведен анализ вероятности срыва слежения P_C в схеме слежения за задержкой в выбранном диапазоне изменения нормированных параметров σ_x и δx для заданных характеристик точности слежения за задержкой – случайной σ_τ и

систематической $\delta\tau$ составляющих ошибки слежения. Это позволяет аналитически исследовать влияние характеристик схемы слежения за задержкой принимаемого сигнала на вероятность срыва слежения P_C и определить условия ее минимизации или достижения требуемых значений, определяющих устойчивость системы синхронизации и помехоустойчивость передачи информации в РЭС с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП. Очевидно, что при этом не учитывается возможность срыва слежения по другим параметрам сигнала, и для определения вероятности срыва слежения в комбинированной системе синхронизации необходимо провести аналогичные исследования для всех входящих в ее состав подсистем.

Выбранный показатель устойчивости слежения за задержкой – вероятность срыва слежения – определяется вероятностью выхода ошибки слежения $\Delta\tau$ за пределы рабочего участка $[-\Delta/2, \Delta/2]$ дискриминационной характеристики дискриминатора следящего фильтра: $P_C = P(\Delta\tau < -\Delta/2) + P(\Delta\tau > \Delta/2)$. Для гауссовской плотности распределения ошибки слежения за задержкой получаем:

$$P_C = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\tau} \int_{-\infty}^{-\Delta/2} \exp\left[-\frac{(\Delta\tau - \delta\tau)^2}{2\sigma_\tau^2}\right] d\Delta\tau + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\tau} \int_{\Delta/2}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\Delta\tau - \delta\tau)^2}{2\sigma_\tau^2}\right] d\Delta\tau, \quad (4)$$

где Δ – ширина дискриминационной характеристики дискриминатора следящего фильтра, осуществляющего слежение за задержкой принимаемого сигнала при ее изменении в диапазоне $-\Delta/2 < \Delta\tau < \Delta/2$.

Величина вероятности срыва слежения P_C , определяемая выражением (4), может быть выражена через гауссов интеграл ошибок:

$$P_C = 1 - \left[\Phi_0\left(\frac{\Delta - 2\delta\tau}{2\sigma_\tau}\right) - \Phi_0\left(\frac{-\Delta - 2\delta\tau}{2\sigma_\tau}\right) \right], \quad (5)$$

где $\Phi_0(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) d\mu$. В отсутствии систематической составляющей ошибки слежения за задержкой ($\delta\tau=0$) выражение (5)

сводится к виду $P_C = 1 - 2\Phi_0\left(\frac{\Delta}{2\sigma_\tau}\right)$, а в
отсутствии случайной составляющей ошибки слежения за
задержкой ($\sigma_\tau = 0$) – к виду $P_C = \begin{cases} 0, & |\delta\tau| < \Delta/2, \\ 1, & |\delta\tau| \geq \Delta/2. \end{cases}$

При переходе к нормированной ошибке слежения за задержкой Δx выражение (5) для вероятности срыва слежения приводится к виду:

$$P_C = 1 - \left[\Phi_0\left(\frac{1-\delta x}{\sigma_x}\right) - \Phi_0\left(\frac{-1-\delta x}{\sigma_x}\right) \right]. \quad (6)$$

В отсутствии систематической составляющей ошибки слежения за задержкой ($\delta\tau=0$) выражение (6) сводится к виду $P_C = 1 - 2\Phi_0(1/\sigma_x)$, а в отсутствии случайной составляющей ошибки слежения за задержкой ($\sigma_\tau=0$) – к виду $P_C = \begin{cases} 0, & |\delta x| < 1, \\ 1, & |\delta x| \geq 1. \end{cases}$

Выражение (6) позволяет произвести анализ зависимости вероятности срыва слежения P_C от параметров схемы слежения за задержкой принимаемого сигнала при различных соотношениях между систематической $\delta\tau$ и случайной σ_τ составляющими ошибки слежения и шириной дискриминационной характеристики дискриминатора следящего фильтра Δ , характеризуемых нормированными параметрами δx и σ_x . Кроме того, может быть проанализировано влияние на вероятность срыва слежения среднеквадратической ошибки слежения $\varepsilon_\tau = \sqrt{\delta\tau^2 + \sigma_\tau^2}$ или нормированной среднеквадратической ошибки слежения $\varepsilon_x = \sqrt{\delta x^2 + \sigma_x^2}$, которые рассматриваются в работах [18, 20] в качестве интегральных характеристик ошибок слежения за параметрами принимаемых сигналов и минимизируются в обобщенном фильтре, оптимальном по критерию минимума квадрата средней ошибки фильтрации [36, 37].

4. Результаты исследования вероятности срыва слежения при приеме фазоманипулированных сигналов с расширением спектра при наличии ошибок слежения за задержкой. В соответствии с выражением (7) были рассчитаны зависимости вероятности срыва слежения P_C при слежении за задержкой при

приеме фазоманипулированного сигнала с расширением спектра от значений нормированных параметров схемы слежения за задержкой δx , σ_x и ε_x . В результате проведенных расчетов получены приведенные на рисунках 4–7 семейства зависимостей вероятности срыва слежения P_C от параметров δx , σ_x и ε_x при их различных сочетаниях.

На рисунке 4 приведены графики расчетных зависимостей P_C от нормированной случайной ошибки слежения σ_x при различных значениях нормированной систематической ошибки слежения δx в широком диапазоне значений вероятности срыва слежения $P_C < 0,5$ (а) и в области малых значений вероятности срыва слежения $P_C < 0,1$ (б). Кривая 1 соответствует $\delta x = 0$, кривая 2 – $\delta x = 0,2$, кривая 3 – $\delta x = 0,4$, кривая 4 – $\delta x = 0,6$, кривая 5 – $\delta x = 0,8$, кривая 6 – $\delta x = 1$. С увеличением σ_x вероятность срыва слежения P_C увеличивается, а при фиксированной величине σ_x на величину P_C существенно влияет изменение величины δx . На всех зависимостях имеется область малых значений σ_x , в которой при $\delta x = \text{const}$ вероятность срыва слежения P_C близка к 0, а при дальнейшем увеличении величины σ_x начинается монотонное увеличение вероятности срыва слежения P_C . Так, при $\delta x \leq 0,4$ вероятность срыва слежения близка к 0 в диапазоне значений $\sigma_x = 0 \dots 0,2$. В наихудшем случае при $\delta x = 1$ во всем диапазоне изменения σ_x величина P_C существенно не меняется и близка к 0,5.

На рисунке 5 приведены графики расчетных зависимостей P_C от нормированной систематической ошибки слежения δx при различных значениях нормированной случайной ошибки слежения σ_x в широком диапазоне значений вероятности срыва слежения $P_C < 0,5$ (а) и в области малых значений вероятности срыва слежения $P_C < 0,1$ (б). Кривая 1 соответствуют $\sigma_x = 0$, кривая 2 – $\sigma_x = 0,2$, кривая 3 – $\sigma_x = 0,4$, кривая 4 – $\sigma_x = 0,6$, кривая 5 – $\sigma_x = 0,8$, кривая 6 – $\sigma_x = 1$. С увеличением δx вероятность срыва слежения P_C увеличивается, а при фиксированной величине δx определяющее влияние на величину P_C оказывает изменение величины σ_x . На всех зависимостях имеется область малых значений δx , в которой при $\sigma_x = \text{const}$ имеет место медленное увеличение вероятности срыва слежения P_C , а при дальнейшем увеличении величины δx начинается более резкое увеличение вероятности срыва слежения P_C . Так, при $\sigma_x \leq 0,4$ вероятность срыва слежения медленно изменяется с увеличением δx в диапазоне значений $\sigma_x = 0 \dots 0,4$. В предельном случае при $\sigma_x = 0$ увеличение нормированной систематической ошибки слежения в диапазоне $0 \leq \delta x < 1$ не приводит к срыву слежения ($P_C = 0$), а при $\delta x \geq 1$ с вероятностью 1 происходит срыв слежения ($P_C = 1$).

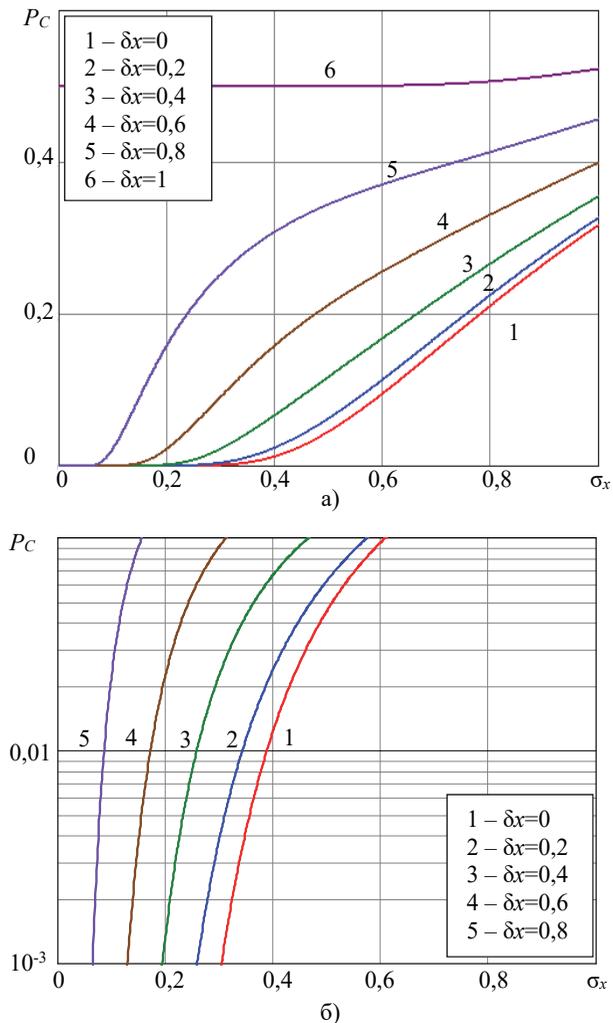


Рис. 4. Вероятность срыва слежения в зависимости от среднеквадратического отклонения нормированной ошибки слежения за задержкой: а) $P_c < 0,5$; б) $P_c < 0,1$

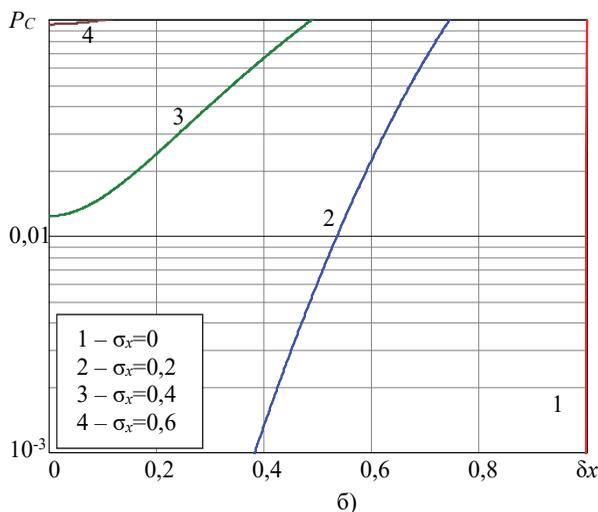
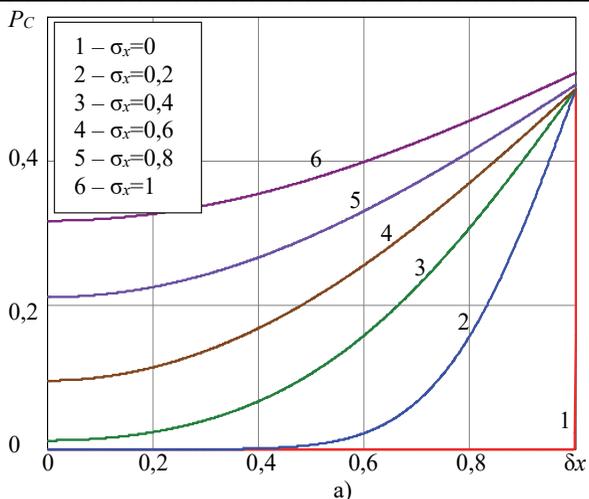


Рис. 5. Вероятность срыва слежения в зависимости от нормированной систематической ошибки слежения за задержкой: а) $P_C < 0,5$; б) $P_C < 0,1$

На рисунке 6 приведены графики расчетных зависимостей P_C от среднеквадратической нормированной ошибки слежения за задержкой ε_x при различных значениях систематической ошибки слежения δx . Значения случайной ошибки слежения σ_x задавались таким образом, чтобы при заданных значениях ε_x и δx выполнялось $\varepsilon_x = \sqrt{\delta x^2 + \sigma_x^2}$.

Кривая 1 соответствует $\delta x=0$, кривая 2 – $\delta x=0,2$, кривая 3 – $\delta x=0,4$, кривая 4 – $\delta x=0,6$, кривая 5 – $\delta x=0,8$. С увеличением ε_x и δx вероятность срыва слежения P_C увеличивается во всем диапазоне изменения ε_x . Для всех зависимостей характерно резкое увеличение вероятности срыва слежения, начиная с некоторого значения ε_x . Во всех случаях вероятность срыва слежения близка к 0 при $\varepsilon_x < 0,3$. Значение величины ε_x , начиная с которого начинается резкое увеличение вероятности срыва слежения, уменьшается с уменьшением величины δx . При $\varepsilon_x = \text{const}$ это соответствует увеличению σ_x , поэтому приведенные зависимости свидетельствуют о доминирующем влиянии в рассмотренных условиях случайной составляющей σ_x среднеквадратической нормированной ошибки слежения за задержкой ε_x на вероятность срыва слежения P_C .

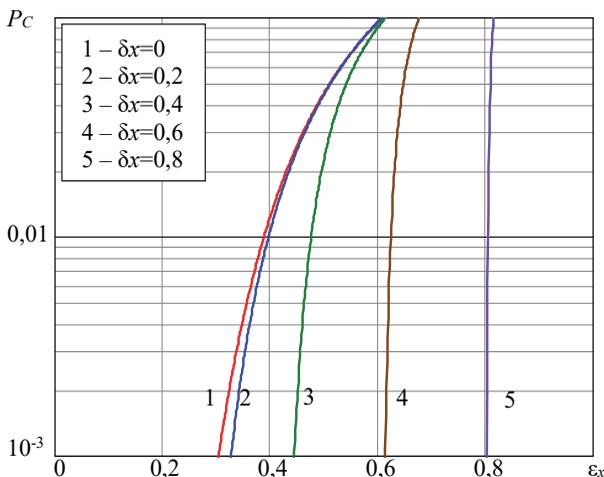


Рис. 6. Вероятность срыва слежения в зависимости от среднеквадратической нормированной ошибки слежения за задержкой

На рисунке 7 приведены графики расчетных зависимостей P_C от среднеквадратической нормированной ошибки слежения за задержкой ε_x при различных значениях случайной ошибки слежения σ_x . Значения систематической ошибки слежения δx задавались таким образом, чтобы при заданных значениях ε_x и σ_x выполнялось $\varepsilon_x = \sqrt{\delta x^2 + \sigma_x^2}$. Кривая 1 соответствует $\sigma_x=0$, кривая 2 – $\sigma_x=0,2$, кривая 3 – $\sigma_x=0,4$, кривая 4 – $\sigma_x=0,6$, кривая 5 – $\sigma_x=0,8$. С увеличением ε_x и σ_x вероятность срыва слежения P_C увеличивается на всем диапазоне изменения ε_x . Как и в

предыдущем случае, для всех зависимостей характерно резкое увеличение вероятности срыва слежения, начиная с некоторого значения ε_x , и вероятность срыва слежения близка к 0 при $\varepsilon_x < 0,3$. Значение величины ε_x , с которого начинается резкое увеличение вероятности срыва слежения, уменьшается с увеличением величины σ_x . При $\varepsilon_x = \text{const}$ это соответствует уменьшению величины δx , поэтому приведенные зависимости подтверждают вывод о доминирующем влиянии в рассмотренных условиях случайной составляющей σ_x среднеквадратической нормированной ошибки слежения за задержкой ε_x на вероятность срыва слежения P_C . При этом в области значений $0,3 \leq \varepsilon_x \leq 0,6$ возможно более сложное влияние составляющих δx и σ_x среднеквадратической нормированной ошибки слежения ε_x на величину вероятности срыва слежения P_C . В предельном случае при $\sigma_x = 0$ увеличение среднеквадратической нормированной ошибки слежения $0 \leq \varepsilon_x < 1$ не приводит к срыву слежения ($P_C = 0$), а при $\varepsilon_x \geq 1$ с вероятностью 1 происходит срыв слежения ($P_C = 1$).

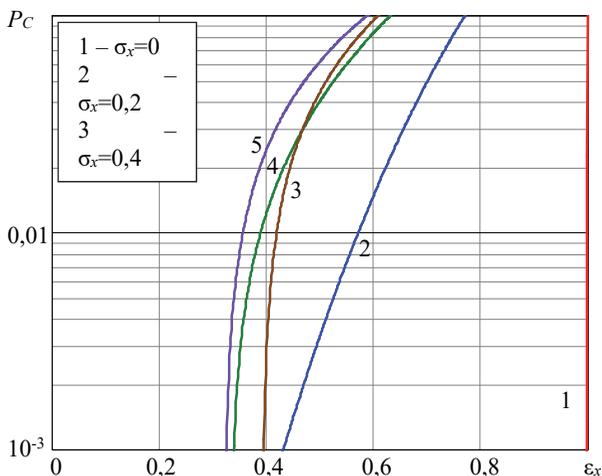


Рис. 7. Вероятность срыва слежения в зависимости от среднеквадратической нормированной ошибки слежения за задержкой

Представленные результаты расчетов иллюстрируют характер зависимости вероятности срыва слежения P_C от величин среднеквадратической σ_x и систематической δx составляющих ошибки слежения за задержкой и свидетельствуют о неоднозначности среднего квадрата нормированной ошибки слежения $\varepsilon_x = \sqrt{\delta x^2 + \sigma_x^2}$ как

оптимизируемого показателя при минимизации вероятности срыва слежения в вероятностном фильтре. В отсутствие систематической ошибки слежения при $\delta x=0$ выполняется $\epsilon_x=\sigma_x$, минимизация параметров ϵ_x и σ_x оказывается эквивалентна и однозначно приводит к минимизации вероятности срыва слежения P_C . В то же время при наличии систематической ошибки ($\delta x \neq 0$) вероятность срыва слежения P_C сложным образом зависит от сочетания параметров δx и σ_x при доминирующем влиянии на ее величину параметра σ_x , характеризующего случайную составляющую нормированной ошибки слежения за задержкой. Такая же неоднозначность будет иметь место и при использовании в качестве интегральной характеристики ошибок слежения за задержкой принимаемого сигнала величины $\chi_\tau=3\sigma_\tau+\delta\tau$, характеризующей диапазон изменения ошибки слежения [38], и соответствующей ей нормированной величины $\chi_x=3\sigma_x+\delta x$.

Отсюда следует необходимость совместного выбора параметров системы слежения за задержкой, определяющих величину случайной и систематической составляющих ошибки слежения, что согласуется с выводами работы [39], хотя в ней рассматривались соотношения между случайной и систематическими составляющими ошибки слежения, при которых доминирующее влияние на вероятность срыва слежения оказывает систематическая (статическая) составляющая.

5. Совместный выбор параметров схемы слежения за задержкой для обеспечения требуемой вероятности срыва слежения. На практике требования к параметрам схемы слежения за задержкой δx и σ_x могут быть различными и зависят от назначения РЭС, использующей фазоманипулированные сигналы с расширением спектра на основе ПСП. В РЭС передачи информации слежение за задержкой и другими параметрами принимаемого сигнала необходимо для реализации оптимального приема и различения сигналов в условиях помех. В работах [2, 22, 40] показано, что в РЭС передачи информации с фазоманипулированными сигналами с расширением спектра на основе ПСП при наличии ошибок слежения за задержкой, характеризующихся значениями нормированных параметров $\sigma_x < 0,1$ и $\delta x < 0,2$, ухудшение помехоустойчивости на уровне вероятности ошибочного приема символа 10^{-5} – 10^{-6} составляет до 5 дБ. В измерительных РЭС от точности слежения за задержкой принимаемого сигнала зависит ошибка измерения дальности. В работах [6, 12] показано, что при приеме фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП в спутниковых радионавигационных системах при типичных для нормальных

условий функционирования отношениях сигнал/шум на входе приемника среднеквадратическая ошибка слежения за задержкой принимаемого сигнала (без учета последующей фильтрации измерений), выраженная в единицах дальности, составляет до 30 м, что при длительности символа ПСП $\Delta t=1$ мкс соответствует ошибкам слежения за задержкой, характеризуемым значениями нормированного параметра $\sigma_x < 0,1$.

При указанных значениях нормированных параметров σ_x и δx , как следует из проведенных расчетов, обеспечивается малая вероятность срыва слежения – $P_C < 10^{-4}$. В то же время приведенные значения параметров σ_x и δx достигаются при благоприятных условиях приема сигналов – при отношениях сигнал/шум на входе приемника 15–20 дБ в РЭС передачи информации и 30–35 дБ в РЭС спутниковой навигации. При уменьшении отношения сигнал/шум на входе приемника составляющие ошибки слежения за задержкой σ_τ и δt и вероятность срыва слежения P_C увеличиваются [28, 39], и возникает необходимость анализа совместного влияния параметров схемы слежения за задержкой σ_x и δx на величину P_C . При этом могут задаваться дополнительные ограничения на выбор параметров σ_x и δx , учитывающие их влияние на вероятности ошибочного приема символов и сообщений в РТС передачи информации и на ошибку измерения дальности в измерительных РТС.

На рисунке 7 приведены зависимости, характеризующие соотношения между нормированными среднеквадратическим отклонением σ_x и систематической ошибкой δx слежения за задержкой, при которых достигается фиксированная вероятность срыва слежения P_C . Кривая 1 соответствует вероятности срыва слежения $P_C=10^{-1}$, кривая 2 – $P_C=10^{-2}$, кривая 3 – $P_C=10^{-3}$, кривая 4 – $P_C=10^{-4}$. Приведенные зависимости позволяют сформулировать требования в отношении допустимых значений случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой и их сочетаний, обеспечивающих требуемую на практике надежность слежения. С увеличением требуемой величины P_C допустимые значения σ_x и δx увеличиваются при доминирующем влиянии на величину P_C величины σ_x . Увеличение величины δx от 0 до 0,2 требует уменьшения величины σ_x на 0,04–0,05 по сравнению со значением σ_x , соответствующим $\delta x=0$. Так, вероятность срыва слежения $P_C=10^{-3}$ обеспечивается при $\delta x=0$ и $\sigma_x=0,3$, при $\delta x=0,2$ и $\sigma_x=0,26$, при $\delta x=0,4$ и $\sigma_x=0,2$. Величина среднеквадратической нормированной ошибки ε_x в этих случаях оказывается различной и составляет 0,3, 0,33 и 0,45 соответственно. Вероятность срыва слежения $P_C=10^{-4}$ обеспечивается при $\delta x=0$ и

$\sigma_x=0,26$, при $\delta x=0,2$ и $\sigma_x=0,22$, при $\delta x=0,4$ и $\sigma_x=0,16$. Величина ε_x в этих случаях составляет 0,26, 0,3 и 0,43 соответственно. Для достижимых в условиях больших отношений сигнал/шум значений $\sigma_x \leq 0,2$ и $\delta x \leq 0,2$ обеспечивается вероятность срыва слежения $P_C < 10^{-4}$. В то же время при увеличении случайной составляющей ошибки слежения при $\sigma_x=0,3$ минимально достижимая (при $\delta x \leq 0$) вероятность срыва слежения составляет $P_C=10^{-3}$, а при $\sigma_x=0,4 - P_C=10^{-2}$.

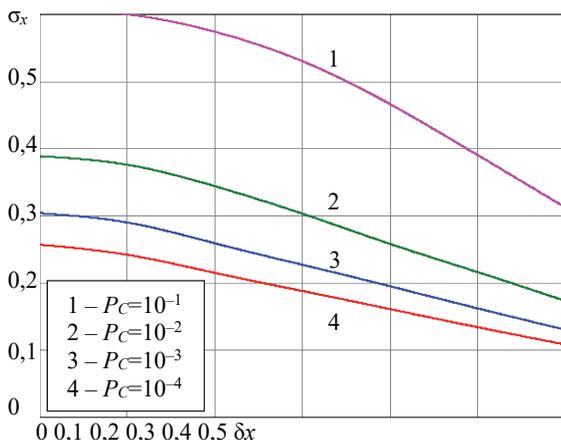


Рис. 7. Соотношения между нормированными среднеквадратическим отклонением и систематической ошибкой слежения за задержкой, при которых достигается фиксированная вероятность срыва слежения

Отметим, что полученные результаты относятся к случаю, когда срыв слежения обусловлен влиянием на работу дискриминатора схемы слежения за задержкой шумов и помех, не являющихся специально организованными уводящими помехами. Определение вероятности срыва слежения в случае воздействия на систему синхронизации уводящих помех имеет особенности, рассмотренные в работе [41].

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем синхронизации широкого класса РТС, использующих рассмотренный тип фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП и предназначенных для работы в условиях, когда параметры принимаемых сигналов, в том числе задержка, изменяются в процессе функционирования РЭС, и система синхронизации необходима для непрерывного слежения за параметрами принимаемых сигналов. К числу подобных прикладных задач может быть отнесена, например, временная синхронизация

функционирования РТС взаимодействующих объектов при реализации дифференциальной и относительной навигации и многостанционного доступа в сетях связи [12, 33, 32-44].

6. Заключение. Устойчивая работа системы синхронизации РТС при приеме фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП возможна при условии высокой точности слежения за задержкой принимаемого сигнала. Неучет влияния ошибок синхронизации может привести к существенным погрешностям в оценках показателей качества функционирования РЭС. Результаты расчетов вероятности срыва слежения по задержкой при приеме фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП показывают, что в общем случае для обеспечения заданной минимально допустимой вероятности срыва слежения за задержкой в системе синхронизации необходим совместный выбор параметров системы слежения, определяющих величину случайной и систематической составляющих ошибки слежения с учетом ограничений, накладываемых условиями функционирования и особенностями технической реализации.

При принятом статистическом описании ошибок слежения за задержкой принимаемых фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП для надежной синхронизации, характеризуемой вероятностью срыва слежения $P_C=10^{-4}$, необходимо, чтобы нормированное среднеквадратическое отклонение и нормированная систематическая ошибка слежения за задержкой составляли $\sigma_x \leq 0,2$ и $\delta x \leq 0,2$. При этом в общем случае имеет место неоднозначность среднего квадрата нормированной ошибки слежения $\epsilon_x = \sqrt{\delta x^2 + \sigma_x^2}$ как критерия оптимизации при минимизации вероятности срыва слежения, поскольку одним и тем же значениям ϵ_x при различных сочетаниях величин σ_x и δx соответствуют различные значения вероятности срыва слежения P_C .

Выполненные исследования были ориентированы на анализ характеристик систем синхронизации, осуществляющих слежение за параметрами принимаемых сигналов в приемном устройстве РТС, использующих фазоманипулированные сигналы с расширением спектра на основе ПСП. Слежение за задержкой принимаемых сигналов, как правило, рассматривается в качестве основной задачи системы синхронизации таких РТС. Представленные результаты расчетов позволяют проанализировать влияние параметров схемы слежения за задержкой на вероятность срыва слежения при приеме фазоманипулированных сигналов на основе ПСП и сформулировать требования к указанным параметрам, обеспечивающие максимально

допустимую вероятность срыва слежения, которая является показателем устойчивости системы синхронизации. Вместе с тем анализ устойчивости слежения за задержкой фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП может рассматриваться как одна из возможных областей применения полученных результатов. Аналогичным образом может быть проанализировано влияние параметров системы синхронизации РТС на вероятность срыва слежения за другими параметрами принимаемых сигналов. При этом в общем случае для обеспечения заданной максимально допустимой вероятности срыва слежения необходим совместный выбор параметров системы слежения с учетом ограничений, накладываемых условиями функционирования и особенностями технической реализации.

Литература

1. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами // М.: Радио и связь. 1985. 384 с.
2. *Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев Е.Е., Шестопалов В.И.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью // М.: РадиоСофт. 2011. 548 с.
3. *Alatabani L.E., Abdalla A.G.E.* FHSS, DSSS and hybrid DS/FH performance evaluation for VSAT // International Journal of Scientific & Technology Research. 2015. vol. 4. no. 9. pp. 58–62.
4. *Prakash D., Amaralingeswara R.* Mobile communication system using VHDL // EPRA International Journal of Multidisciplinary Research. 2018. vol. 4. no. 11. pp. 90–94.
5. *Галантерник Ю.М., Горюш А.В., Калинин А.Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами // М.: МГУЛ. 2003. 200 с.
6. *Бакитько Р.В. и др.* ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования // М.: Радиотехника. 2010. 800 с.
7. *Mon K.M., Tun P.T., Shukla A.P.* Study and analysis on binary offset carrier (BOC) modulation in satellite navigation systems // IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering. 2016. vol. 11. no. 5. pp. 115–123.
8. *Pashintsev V.P. et al.* Formation Algorithms and Properties of Binary Quasi-Orthogonal Code Sequence of Modern Satellite Systems // International Journal of Engineering & Technology. 2018. vol. 7. no. 4.38. pp. 1205–1209.
9. TC Synchronization and Channel Coding. Recommended Standard CCSDS 230.1-G-2. Green Book. Issue 2. Washington. DC: CCSDS. 2012.
10. Pseudo-Noise Ranging Systems. Informational Report CCSDS 414.0-G-2. Green Book. Issue 2. Washington. DC: CCSDS. 2014.
11. *Мишууров А.В., Панько С.П.* Использование международных стандартов при проектировании новых командно-измерительных систем космических аппаратов // Исследования наукограда. 2017. № 1. С. 11–15.
12. *Михайлов Н.В., Чистяков В.В.* Приемники спутниковой навигации космического базирования: архитектура и первичная обработка сигналов // Научная книга. 2014. 124 с.
13. *Тузов Г.И.* Статистическая теория приема сложных сигналов // Сов. Радио. 1977. 400 с.
14. *Журавлев В.И.* Поиск и синхронизация в широкополосных системах // М.: Радио и связь. 1986. 240 с.

15. *Khaing W.K. et al.* Implementation of code and carrier tracking loops for software GPS receivers // International Journal of Scientific & Technology Research. 2015. vol. 4. no. 6. pp. 353–359.
16. *Sudani S., Upadhyay D., Patidar P.* Implementation of acquisition and tracking algorithms of spread spectrum signals in high dynamic scenario // International Journal of Current Advanced Research. 2016. vol 5. no. 3. pp. 643–648.
17. *Шахтарин Б.И., Сидоркина Ю.А., Кульков И.А.* Моделирование гибридной системы фазовой и тактовой синхронизации ФМ-сигналов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2014. № 4. С. 123–134.
18. *Salido-Monzu D. et al.* Delay tracking of spread-spectrum signals for indoor optical ranging // Sensors. 2014. vol. 14. pp. 23176–23204.
19. *Коровин А.В., Миронов В.А., Новиков А.А., Червань Д.А.* Синтез дискриминатора схемы совместного слежения за задержкой перспективных навигационных сигналов ГЛОНАСС // Антенны. 2017. № 7. С. 40–68.
20. *Gang F., Ting Y., Guoxiang G.* Research on tracking of spread spectrum PN code signal // Proceedings of the 5th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2017). Beijing: Atlantis Press. 2017. pp. 506–509.
21. *Abboud I.K., Kunbar L.A. Hassan A.S.* Synchronization in DSSS system // International Review of Applied Sciences and Engineering. 2020. vol. 11. no. 2. pp. 88–94.
22. *Мальцев Г.Н., Евтеев А.В.* Исследование помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок синхронизации по задержке // Информационно-управляющие системы. 2019. № 3. С. 105–113.
23. *Ботов В.А., Казаков Л.Н., Селянская Е.А., Соловьев Д.М.* Экспериментальные исследования предельно достижимых параметров скрытого радиоканала управления подвижными объектами в условиях многолучевого распространения // Вестник СибГУТИ. 2016. № 3. С. 57–65.
24. *Li A. et al* Code synchronization algorithm based on segment correlation in spread spectrum communication // Algorithms. 2015. vol. 4. no. 4. pp. 870–894.
25. *Mintas Parveen C.M.* Code selection with application to spread spectrum systems based on correlation properties // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2015. vol. 4. no. 6. pp. 348–351.
26. *Zhang Z., Lei J.* A detecting algorithm of DSSS signal based on auto-correlation estimation // IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Chongqing. 2017. pp. 137–141.
27. *Шахтарин Б.И.* Анализ систем синхронизации при наличии помех // М.: Горячая линия–Телеком. 2016. 360 с.
28. *Млечин В.В.* Теория радиоэлектронного преодоления. Анализ воздействия помех на радиотехнические системы и устройства // М.: Радиотехника. 2009. 976 с.
29. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем // М.: Радио и связь. 1991. 608 с.
30. *Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г.* Статистическая динамика фазовой автоподстройки второго порядка при воздействии комбинированных помех // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 5. С. 1–10.
31. *Ganesavadivu S., Veancy B.J., Yogesh P.* Synchronization error suppression and precoder design in OFDM channel // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. vol. 10. no. 7. pp. 3251–3255.
32. *Sheen W.-H., Chang M.-J., Wu C.-S.* Performance analysis of noncoherent digital delay locked loops for direct sequence spread spectrum systems with Doppler shift and quantized adaptation // IEEE Transactions on wireless Communications. 2004. vol. 3. no. 6. pp. 2108–2118.

33. *Жодзицкий М.И., Курьин П.В.* Исследование свойств систем раздельной и совместной фазовой синхронизации и оценки позиции и скорости движения приемников ГНСС // Т-Сопн: Телекоммуникации и транспорт. 2017. № 1. С. 45–50.
34. *Перов А.И.* Алгоритмы контроля режима слежения за задержкой в аппаратуре спутниковой навигации // Радионавигационные технологии // М.: Радиотехника. 2019. Вып. 8. С. 25–30.
35. *Бурков В.Д., Гинкул Д.И.* Процесс синхронизации синхронной радиолинии командно-измерительной системы // Лесной вестник. 2015. № 1. С. 89–96.
36. *Кириллов С.Н., Бузыкканов С.Н.* Методы многокритериального синтеза алгоритмов цифровой обработки сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 1. С. 3–7.
37. *Sun X., Qin H., Niu J.* Comparison and analysis of GNSS signal tracking performance based on Kalman filter and traditional loop // WSEAS Transactions on Signal Processing. 2013. vol. 9. pp. 99–108.
38. *Shaoshuai W., Zebo Z., Gang F.* Tracking technology on phase of PN code in spread spectrum communication // Advances in Engineering Research. Vol. 67. Proceedings of the 3th Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control (ICMEMTC-2016). 2016. pp. 546–549.
39. *Баулин П.З., Кобелев М.А., Курьянов А.И.* К оценке помехозащищенности радиосистем с широкополосными сигналами // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. № 1. С. 42–46.
40. *Deshmukha S., Bhosleb U.* Performance evaluation of spread spectrum system using different modulation schemes // Procedia Computer Science Vol. 85. International Conference on Computational Modelling and Security (CMS-2016). 2016. pp. 176–182.
41. *Лукьянчиков В.Д., Ливенцев В.В., Сергиенко А.И.* Помехоустойчивость когерентного приема фазоманипулированных широкополосных сигналов с поляризационным кодированием при неидеальной временной и фазовой синхронизации // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2013. № 3. С. 3–10.
42. *Белов С.П., Жиялков Е.Г., Белов А.С., Рачинский С.А.* Об одном способе цикловой синхронизации широкополосных сигналов / Научные ведомости. Серия «Экономика. Информатика» // БелГУ. 2015. С. 187–190.
43. *Pinto L. R., Almeida L.* A robust approach to TDMA synchronization in aerial networks // Sensors. 2018. vol. 18. no. 12. pp. 1–18.
44. *Abdulhamid M., Omar H.* Code tracking of DSSS signal over AWGN channel // Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty. 2019. vol. 18. no. 1. pp. 13–17.

Мальцев Георгий Николаевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, кафедра космических радиотехнических систем, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: космические радиотехнические системы и комплексы, системы сбора и передачи информации, обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных системах. Число научных публикаций – 300. vka@mil.ru; ул. Ждановская, 13, 197082, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812) 347-95-32; факс: +7(812) 237-12-49.

Евтеев Андрей Владимирович – канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: космические радиотехнические системы и комплексы, системы передачи информации, обработка сигналов в радиотехнических системах. Число научных публикаций – 25. evtееv30@mil.ru; ул. Ждановская, 13, 197082, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812) 347-95-32; факс: +7(812) 237-12-49.

G. MALTSEV, A. EVTEEV

**STABILITY OF TRACKING THE DELAY OF PHASE-SHIFT
KEYED SIGNALS WITH SPECTRUM EXPANDING IN
SYNCHRONIZATION SYSTEMS OF RADIO ENGINEERING
SYSTEMS**

Maltsev G., Evteev A. Stability of Tracking the Delay of Phase-shift Keyed Signals with Spectrum Expanding in Synchronization Systems of Radio Engineering Systems.

Abstract. The issues of ensuring the stability of delay tracking in synchronization systems of radio engineering systems when receiving phase-shift keyed signals with spectrum expansion based on pseudorandom sequences are considered. When working with moving objects, the delay of the received signal continuously changes, synchronization errors occur, and the quality of signal reception largely depends on the stability of the tracking scheme for the delay, characterized by the probability of tracking failure. Delay tracking is usually considered as the main task of the synchronization system of the considered radio systems with phase-manipulated signals with spectrum expansion based on pseudo-random sequences.

The effect of synchronization errors when tracking the delay of a received phase-shift keyed signal with a spectrum extension based on pseudorandom sequences on the probability of tracking failure is studied. The calculation method is used to obtain families of dependences of the probability of tracking failure on the values of random and systematic components of the delay tracking error, normalized to the capture band of the time discriminator of the delay tracking scheme for various combinations of these parameters. The areas of weak and strong influence of the value of tracking errors over the delay of the received signal on the probability of tracking failure are determined. The nature of impact of random and systematic components of tracking error on the probability of failure of tracking was analyzed and it was found that in the General case is the ambiguity of normalized mean square of tracking error as the optimization criterion while minimizing the likelihood of tracking loss.

Calculations performed for a wide range of changes in the normalized delay tracking errors show that to ensure a given quality of signal reception in a radio system with phase-shift keyed signals with spectrum expansion based on pseudorandom sequences, a joint choice of parameters of the delay tracking system that determine the value of random and systematic components of the tracking error is necessary. The results obtained can be used to analyze the characteristics of synchronization systems that monitor the parameters of received signals with a spectrum extension, and to justify the technical solutions of the synchronization system that provide the required quality of signal reception in information and measurement of radio-electronic systems.

Keywords: Phase-shift Keyed Signals with Spectrum Extension, Synchronization, Delay Tracking Scheme, Probability of Tracking Failure

References

1. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. M.: Radio i svyaz'. 1985. 384 p. (In Russ.).
2. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Shestopalov V.I. *Pomehozashhishhennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra prjamoj moduljaciej psevdosluchajnoj posledovatel'nost'ju* [Hindrance immunity of radio communication systems with spreading of the spectrum by direct modulation with a pseudo-random sequence]. M.: Radio i svyaz'. 2011. 548 p. (In Russ.).

3. Alatabani L.E., Abdalla A.G.E. FHSS, DSSS and hybrid DS/FH performance evaluation for VSAT. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2015. vol. 4. no. 9. pp. 58–62.
4. Prakash D., Amaralingeswara R. Mobile communication system using VHDL. *EPR International Journal of Multidisciplinary Research*. 2018. vol. 4 no. 11. pp. 90–94.
5. Galanternik Yu.M., Gorish A.V., Kalinin A.F. *Komandno-izmeritel'nye sistemy i nazemnye komplekсы upravlenija kosmichesкими apparatami* [Command and measuring systems and ground-based spacecraft control complexes]. M.: MGUL. 2003. 200 p. (In Russ.).
6. Bakitko R.V., Boldenkov E.N., Bulavsky N.T. i dr. *GLONASS. Principy postroenija i funkcionirovanija* [GLONASS. Principles of construction and operation]. M.: Radiotekhnika. 2010. 800 p. (In Russ.).
7. Mon K.M., Tun P.T., Shukla A.P. Study and analysis on binary offset carrier (BOC) modulation in satellite navigation systems. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*. 2016. vol. 11. no. 5. pp. 115–123.
8. Pashintsev V.P. et al. Formation Algorithms and Properties of Binary Quasi-Orthogonal Code Sequence of Modern Satellite Systems. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. vol. 7. no. 4.38. pp. 1205–1209.
9. TC Synchronization and Channel Coding. Recommended Standard CCSDS 230.1-G-2. Green Book. Issue 2. Washington. DC: CCSDS. 2012.
10. Pseudo-Noise Ranging Systems. Informational Report CCSDS 414.0-G-2. Green Book. Issue 2. Washington. DC: CCSDS. 2014.
11. Mishurov A.V. Panko S.P. [Using of international standards in the design of new command-measuring systems of spacecrafts]. *Issledovaniya naukoхrada – Science-city research*. 2017. vol. 1. pp. 11–15 (In Russ.).
12. Mikhailov N.V., Chistyakov V.V. *Priemniki sputnikovoj navigacii kosmicheskogo bazirovanija: arhitektura i pervichnaja obrabotka signalov* [Space-based satellite navigation receivers: architecture and primary signal processing]. Nauchnaja kniga. 2014. 124 p. (In Russ.).
13. Tuzov G.I. *Ststicheskaja teorja priema slozhnyh signalov* [Statistical theory of reception of complicated signals]. M.: Sov. Radio. 1977. 400 p. (In Russ.).
14. Zhuravlev V.I. *Poisk i sinhronizacija v širokopolosnyh sistemah* [Search and synchronization in broadband systems]. M.: Radio i svyaz'. 1986. 240 p. (In Russ.).
15. Khaing W.K. et al. Implementation of code and carrier tracking loops for software GPS receivers. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2015. vol. 4. no. 6. pp. 353–359.
16. Sudani S., Upadhyay D., Patidar P. Implementation of acquisition and tracking algorithms of spread spectrum signals in high dynamic scenario. *International Journal of Current Advanced Research*. 2016. vol 5. no. 3. pp. 643–648.
17. Shakhtarin B.I., Sidorkina Yu.A., Kulkov I.A. [Modeling of hybrid system of phase and clock synchronization of FM-signals]. *Vestnik MGTU imeni N.E.Baumana. Seriya «Priborostroenie» – Messenger MGTU named after N.E.Baumana. Series «Instrumentation»*. 2014. vol. 4. pp. 123–134 (In Russ.).
18. Salido-Monzu D. et al. Delay tracking of spread-spectrum signals for indoor optical ranging. *Sensors*. 2014. vol. 14. pp. 23176–23204.
19. Korovin A.V., Mironov V.A., Novikov A.A., Chervan D.A. [Synthesis of discriminator of the joint tracking scheme for the delay of perspective GLONASS navigation signals]. *Antenny – Antennas*. 2017. vol. 7. pp. 40–68 (In Russ.).
20. Gang F., Ting Y., Guoxiang G. Research on tracking of spread spectrum PN code signal. Proceedings of the 5th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2017). 2017. pp. 506–509.

21. Abboud I.K., Kunbar L.A. Hassan A.S. Synchronization in DSSS system. *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 2020. vol. 11. no. 2. pp. 88–94.
22. Maltsev G.N., Evteev A.V. [Investigation of the noise immunity of radio engineering information transmission systems with noise-like phase-shifted signals in the presence of delay synchronization errors]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information management systems*. 2019. vol. 3. pp. 105–113 (In Russ.).
23. Botov V.A. Kazakov L.N. Selyanskaya E.A. Solovyev D.M. [Experimental studies of maximum achievable parameters of secretive radio channel of mobile objects control in conditions of multipath propagation]. *Vestnik SibGUTI – Messenger SibGUTI*. 2016. vol. 3. pp. 57–65 (In Russ.).
24. Li A. et al Code synchronization algorithm based on segment correlation in spread spectrum communication. *Algorithms*. 2015. vol. 4. no. 4. pp. 870–894.
25. Mintas Parveen C.M. Code selection with application to spread spectrum systems based on correlation properties. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. 2015. vol. 4. no. 6. pp. 348–351.
26. Zhang Z., Lei J. A detecting algorithm of DSSS signal based on auto-correlation estimation. *IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*. Chongqing. 2017. pp. 137–141.
27. Shakhtarin B.I. *Analiz sistem sinhronizacii pri nalichii pomeh* [Analysis of synchronization systems in the presence of hindrances]. M.: Gorjachaja linija–Telekom. 2016. 360 p. (In Russ.).
28. Mlechin V.V. *Teoriya radioelektronnoogo preodolenija. Analiz vozdejstviya pomeh na radiotekhnicheskie sistemy i ustrojstva* [Theory of electronic overcoming. Analysis of the impact of interference on radio systems and devices]. M.: Radiotekhnika. 2009. 976 p. (In Russ.).
29. Tihonov V.I., Harisov V.N. *Statisticheskij analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustrojstv i sistem* [Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems]. M.: Radio i svyaz'. 1991. 608 p. (In Russ.).
30. Shakhtarin B.I., Aslanov T.G. [Statistical dynamics of second-order phase-locked loop under the influence of combined hindrances]. *Nauka i obrazovanie: Nauchnoe izdanie MGTU imeni N.E.Baumana – Science and education: scientific publication of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman*. 2012. vol. 5. pp. 1–10 (In Russ.).
31. Ganesavadivu S., Veancy B.J., Yogesh P. Synchronization error suppression and precoder design in OFDM channel. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. vol. 10. no. 7. pp. 3251–3255.
32. Sheen W.-H., Chang M.-J., Wu C.-S. Performance analysis of noncoherent digital delay locked loops for direct sequence spread spectrum systems with Doppler shift and quantized adaptation. *IEEE Transactions on wireless Communications*. 2004. vol. 3. no. 6. pp. 2108–2118.
33. Zhodzishsky M.I., Kuryrin R.V. [Study of properties of systems of single and joint phase synchronization and assessment of position and speed of movement of GNSS receivers]. *T-Comm: Telecommunicatsii i transport – T-Comm: Telecommunications and transport*. 2017. vol. 1. pp. 45–50 (In Russ.).
34. Perov A.I. [Algorithms for monitoring the delay tracking mode in satellite navigation equipment]. *Radionavigacionnye tehnologii – Radio navigation technology*. M.: Radiotekhnika. 2019. vol. 8. pp. 40–68 (In Russ.).
35. Burkov V.D., Ginkul D.I. [Synchronization process of synchronous radio line of command-measuring system]. *Lesnoy vestnik – Forest Bulletin*. 2015. vol. 1. pp. 89–96 (In Russ.).
36. Kirillov S.N., Buzykanov S.N. [Methods of multicriteria synthesis of algorithms of digital signal processing]. *Cifrovaja obrabotka signalov – Digital signal processing*. 2012. vol. 1. pp. 3–7 (In Russ.).

37. Sun X., Qin H., Niu J. Comparison and analysis of GNSS signal tracking performance based on Kalman filter and traditional loop. *WSEAS Transactions on Signal Processing*. 2013. vol. 9. pp. 99–108.
38. Shaoshuai W., Zebo Z., Gang F. Tracking technology on phase of PN code in spread spectrum communication. Proceedings of the 3th Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control (ICMEMTC-2016). 2016. pp. 546–549.
39. Baulin P.Z., Kobelev M.A., Kupriyanov A.I. [To the assessment of the hindrance immunity of radio systems with broadband signals]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnyye sistemy – Rocket and space instrumentation and information systems*. 2015. vol. 1. pp. 42–46 (In Russ.).
40. Deshmukha S., Bhosleb U. Performance evaluation of spread spectrum system using different modulation schemes. International Conference on Computational Modelling and Security (CMS-2016). 2016. pp. 176–182.
41. Lukyanchikov V.D., Liventsev V.V., Sergienko A.I. [Hindrance immunity of coherent reception of phase-shifted broadband signals with polarization coding for non-ideal time and phase synchronization]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelectronira – Proceedings of Russian universities. Radio electronics*. 2013. vol. 3. pp. 3–10 (In Russ.).
42. Belov S.P., Zhilyakov E.G., Belov A.S., Rachinsky S.A. [About one method of frame synchronization of broadband signals]. *Nauchnyye vedomosti. Seriya "Ekonomika. Informatika" – Scientific statements. Series "Economy. Informatics"*. BelGU. 2015. pp. 187–190 (In Russ.).
43. Pinto L. R., Almeida L. A robust approach to TDMA synchronization in aerial networks. *Sensors*. 2018. vol. 18. no. 12. pp. 1–18.
44. Abdulhamid M., Omar H. Code tracking of DSSS signal over AWGN channel // *Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty*. 2019. vol. 18. no. 1. pp. 13–17.

Maltsev Georgy – Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor of the Department, Department of Space Radio Engineering Systems, Military Space Academy of A.F. Mozhaysky (VKA of A.F. Mozhaysky). Research interests: space radio engineering systems and complexes, data collection and transmission systems, signal processing in radio engineering and optoelectronic systems. The number of publications – 300. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya st., 197082, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812) 347-95-32; fax: +7(812) 237-12-49.

Evteev Andrey – Ph.D., Head of the Research Laboratory, Military Space Academy of A.F. Mozhaysky (VKA of A.F. Mozhaysky). Research interests: space radio engineering systems and complexes, information transmission systems, signal processing in radio engineering systems. The number of publications – 25. evteev30@mil.ru; 13, Zhdanovskaya st., 197082, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812) 347-95-32; fax: +7(812) 237-12-49.