

УДК 621.391.832.42

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

Исследование помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок синхронизации по задержке

Г. Н. Мальцев^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-6755-5700, georgy_maltsev@mail.ru

А. В. Евтеев^а, канд. техн. наук, научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-4994-9220

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

Введение: потенциальная помехоустойчивость радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе псевдослучайных последовательностей достигается при точном слежении за задержкой принимаемого сигнала в корреляционном приемнике. При работе с подвижными объектами задержка принимаемого сигнала непрерывно изменяется, и качество приема шумоподобных фазоманипулированных сигналов в значительной степени зависит от функционирования системы синхронизации и точности оценки задержки принимаемого сигнала следящей системой. Для достижения требуемого качества приема сигналов необходим обоснованный выбор параметров следящей системы с учетом влияния ее параметров – случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой – на выбранный показатель помехоустойчивости. **Цель:** анализ влияния ошибок слежения за задержкой принимаемого фазоманипулированного сигнала на основе псевдослучайной последовательности системой синхронизации радиотехнической системы передачи информации на вероятность ошибочного приема информационного символа. **Результаты:** расчетным методом получены семейства зависимостей вероятности ошибочного приема информационного символа от отношения сигнал/шум, величины случайной и систематической составляющих ошибок слежения за задержкой, нормированных к полосе захвата корреляционного приемника. Показано, что при фиксированном отношении сигнал/шум определяющее влияние на вероятность ошибочного приема информационного символа оказывают величины случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой. Во всех рассмотренных случаях, для всех зависимостей характерно медленное изменение вероятности ошибочного приема информационного символа при фиксированных значениях ошибок синхронизации в области малых значений отношения сигнал/шум, а при дальнейшем увеличении отношения сигнал/шум начинается более резкое уменьшение вероятности ошибочного приема информационного символа. Исходя из полученных результатов, для обеспечения заданного качества приема сигналов и достоверности выделения информационных символов и сообщений в радиотехнической системе передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами для ее системы синхронизации необходим совместный выбор параметров системы слежения за задержкой с учетом ограничений, накладываемых условиями функционирования и особенностями технической реализации радиотехнической системы. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при анализе помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами в широком диапазоне условий связи и при обосновании технических решений системы синхронизации, обеспечивающих требуемое качество приема сигналов.

Ключевые слова — радиотехнические системы передачи информации, шумоподобные фазоманипулированные сигналы, помехоустойчивость, синхронизация.

Для цитирования: 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. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

For citation: Maltsev G. N., Evteev A. V. Studying noise immunity of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals and synchronization delay errors. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 105–113 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

Введение

В радиотехнических системах (РТС) передачи информации различного назначения широкое распространение получает использование шумоподобных фазоманипулированных сигналов на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП) [1–3]. Особенностью оптимального корреляционного приема таких сигналов является узкая полоса захвата дискриминатора системы слежения за задержкой принимаемого сигнала, ширина которой определяется длительностью символа модулирующей ПСП. Поэтому при работе с подвиж-

ными объектами качество приема шумоподобных фазоманипулированных сигналов на основе ПСП в значительной степени зависит от функционирования системы синхронизации и определяется точностью оценки задержки принимаемого сигнала. При этом функция системы синхронизации состоит в том, чтобы обеспечить решающую схему информацией о моментах начала и окончания каждого из принимаемых входных символов для реализации оптимального приема и их различения. Если синхронизация символов по задержке осуществляется неточно, то качество работы решающего устройства ухудшается по сравнению

с идеальной синхронизацией, и помехоустойчивость РТС передачи информации снижается.

Существенное влияние точности синхронизации по задержке на качество приема сигналов характерно, например, для РТС передачи информации, работающих с воздушными и космическими объектами, вследствие непрерывного измерения в широких пределах задержки принимаемых сигналов. В то же время шумоподобные фазоманипулированные сигналы на основе ПСП получают широкое распространение в РТС отечественных и зарубежных космических систем [4–7] и представлены в рекомендациях международного Консультативного комитета по системам передачи космических данных (CCSDS) [8, 9]. В настоящей статье показаны результаты исследования помехоустойчивости РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП при наличии ошибок слежения за задержкой модулирующей ПСП системой синхронизации. В качестве показателя помехоустойчивости рассматривается вероятность ошибочного приема информационного символа. Данный показатель широко используется при анализе помехоустойчивости РТС передачи информации и является исходным для определения вероятности ошибочного приема сообщения с учетом используемых методов кодирования.

Основные соотношения для расчета вероятности ошибочного приема информационного символа при наличии систематических и случайных ошибок синхронизации по задержке принимаемого сигнала

При наиболее распространенном в РТС передаче информации различного назначения с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП методе передачи информации инвертированием одного или нескольких периодов модулирующей ПСП [5, 6, 10, 11] вероятность ошибочного приема информационного символа при когерентном приеме сигналов в условиях аддитивного белого гауссова шума определяется выражением [2, 3]

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi(\sqrt{2q}) \right], \quad (1)$$

где $q = E_c/N_0$ — отношение сигнал/шум (ОСШ), E_c — энергия сигнала, приходящаяся на информационный символ, N_0 — спектральная плотность мощности шума; $\Phi(y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ — функция Крампа (одна из форм записи гауссова интеграла ошибок).

Выражение (1) характеризует потенциальную помехоустойчивость передачи информации при оптимальном приеме противоположных сигналов в отсутствие ошибок синхронизации. При корреляционном приеме ошибки синхронизации приводят к отклонению обработки принимаемых сигналов от оптимальной вследствие расстройки опорного сигнала. При наличии расстройки корреляционного приемника, обусловленной ошибкой слежения за задержкой принимаемого сигнала $\Delta\tau$, вероятность ошибочного приема информационного символа определяется выражением [2]

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{2q}) - \frac{1}{2} \Phi\left(\sqrt{2q\left(1 - 2\frac{|\Delta\tau|}{\Delta t}\right)}\right) \right], \quad (2)$$

где Δt — длительность символа модулирующей ПСП. Если ввести нормированную ошибку синхронизации $\Delta x = \Delta\tau/\Delta t$, то выражение для вероятности ошибочного приема информационного символа (2) приобретает следующий вид:

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{2q}) - \frac{1}{2} \Phi\left(\sqrt{2q(1 - 2|\Delta x|)}\right) \right]. \quad (3)$$

При проведении аналитических расчетов удобно использовать параметры системы слежения за задержкой, нормированные к полуширине дискриминационной характеристики. Для корреляционного приемника с шириной дискриминационной характеристики $\Delta = 2\Delta t$ нормированная ошибка синхронизации составляет $\Delta x = 2\Delta\tau/\Delta$. При этом диапазон значений нормированной ошибки слежения за задержкой Δx , учитываемых выражениями (2) и (3), составляет $-0,5 < \Delta x < 0,5$, поскольку за пределами этого диапазона аргумент второй функции Крампа становится отрицательным. Однако значения $|\Delta x| > 0,5$ соответствуют низкому качеству синхронизации, и при слежении за задержкой модулирующей ПСП принимаемого шумоподобного фазоманипулированного сигнала в реальных РТС передачи информации условие $|\Delta x| < 0,5$, как правило, выполняется, а при $|\Delta x| > 0,5$ задержку нужно относить к предыдущему или последующему символу ПСП. Поэтому при анализе величины p_0 в условиях ошибок синхронизации использовалось выражение (3) с соответствующим заданием нормированной ошибки слежения за задержкой Δx в диапазоне $|\Delta x| < 0,5$.

Выражения (2) и (3) соответствуют конкретному значению ошибки слежения за задержкой $\Delta\tau$, которая может рассматриваться как систематическая ошибка $\delta\tau = \Delta\tau$ при отсутствии случайных ошибок синхронизации, и описанию ошибок слежения за задержкой плотностью распределения типа δ -функции $w(\Delta\tau) = \delta(\Delta\tau - \delta\tau)$. В реальных

условиях имеют место как систематическая, так и случайная составляющие ошибки синхронизации, и необходимо усреднять выражения (2) и (3) по плотности распределения $w(\Delta\tau)$ ошибок слежения за задержкой $\Delta\tau$. Известны достаточно сложные аналитические описания законов распределения ошибок слежения в системах синхронизации, учитывающие параметры контура слежения (порядок астатизма, форму характеристики дискриминатора, вид действующих помех), в том числе достаточно сложные [12–15]. В то же время в качестве аппроксимации закона распределения ошибок слежения за задержкой в системах синхронизации достаточно часто [4, 8, 16] используется нормальный закон распределения

$$w(\Delta\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\tau} \exp\left[-\frac{(\Delta\tau - \delta\tau)^2}{2\sigma_\tau^2}\right], \quad (4)$$

где σ_τ — среднеквадратическое отклонение ошибки слежения за задержкой (случайная составляющая ошибки); $\delta\tau$ — математическое ожидание ошибки слежения за задержкой (систематическая составляющая ошибки).

Зависимость параметров σ_τ и $\delta\tau$ закона распределения (4) от характеристик системы синхронизации уточняется для конкретной технической реализации и условий функционирования радиотехнической системы передачи информации. Кроме того, точность слежения за задержкой может быть повышена за счет использования адаптивной фильтрации и совместной фильтрации нескольких параметров принимаемого сигнала (фазовой или частотной «поддержки» слежения за задержкой) в так называемых гибридных системах синхронизации радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами [17–20].

Для проведения расчетов и анализа влияния ошибок слежения за задержкой на вероятность ошибочного приема информационного символа в широком диапазоне условий приема сигналов введем обозначения: Δ — ширина полосы захвата дискриминатора системы слежения за задержкой; $\Delta x = 2\Delta\tau/\Delta$ — 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 $\Delta\tau$ плотность распределения нормированной ошибки слежения за задержкой Δx имеет вид

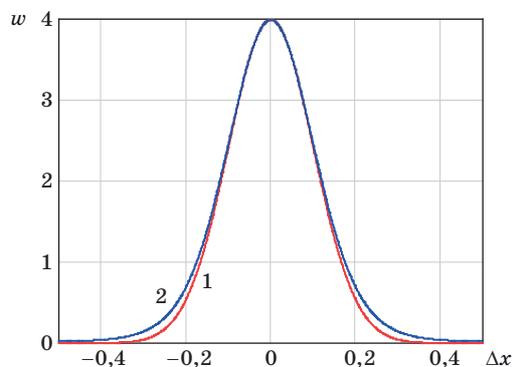
$$w(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\Delta x - \delta x)^2}{2\sigma_x^2}\right]. \quad (5)$$

В общем случае гауссово приближение является хорошей аппроксимацией более точных описаний плотности распределения ошибки слежения за задержкой, например, закона распределения Тихонова [7]

$$w(\Delta x) = \frac{\exp\left[\cos(2\pi\Delta x)/(2\pi\sigma_x)^2\right]}{I_0\left[1/(2\pi\sigma_x)^2\right]}, \quad (6)$$

где $I(\cdot)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; Δ_x и σ_x соответствуют введенным параметрам нормированной ошибки слежения за задержкой и среднеквадратического отклонения нормированной ошибки слежения за задержкой соответственно, при этом полагается, что систематическая ошибка слежения отсутствует ($\delta x = \delta\tau = 0$).

На рис. 1 приведены результаты расчетов плотности распределения ошибки слежения за задержкой в соответствии с выражениями (5) и (6) при $\sigma_x = 0,1$ и $\delta x = 0$. Кривая 1 соответствует нормальному закону распределения, кривая 2 — закону распределения Тихонова. В области существенных значений ошибки слежения за задержкой оба закона распределения практически совпадают. Близость к нормальному закону распределения ошибки слежения за задержкой подтверждается также результатами моделирования гибридной системы фазовой и тактовой синхронизации шумоподобных фазоманипулированных сигналов [21]. Поэтому при исследовании вероятности ошибочного приема информационного символа в РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП в условиях ошибок синхронизации по задержке использовался нормальный закон распределения (5) для нормированной ошиб-



■ Рис. 1. Плотности распределения нормального закона распределения 1 и закона распределения Тихонова 2 для нормированной ошибки слежения за задержкой

■ Fig. 1. Distribution density of normal distribution law 1 and the Tikhonov distribution law 2 for normalized error of tracking delay

ки слежения за задержкой. Значения параметров σ_x и δx могут быть связаны с параметрами системы слежения за задержкой и условиями приема сигналов [6, 12, 13, 22]. Это позволяет аналитически исследовать влияние характеристик системы синхронизации по задержке на вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 и определить условия достижения требуемых значений p_0 , обуславливающих помехоустойчивость РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП.

С учетом введенных обозначений вероятность ошибочного приема информационного символа при наличии как систематических, так и случайных ошибок синхронизации по задержке рассчитывается в соответствии с выражением

$$p_0 = \frac{1}{2} \int_{-0,5}^{0,5} w(\Delta x) \times \left[1 - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{2q}) - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{2q(1-2|\Delta x|)}) \right] d\Delta x, \quad (7)$$

где $w(\Delta x)$ — плотность распределения нормированных ошибок слежения за задержкой. Интегрирование по Δx в выражении (7) осуществляется в пределах, соответствующих учитываемому диапазону значений задержки $-0,5\Delta t < \Delta t < 0,5\Delta t$.

В рассматриваемом случае при $\Delta = 2\Delta t$ максимальное учитываемое значение ошибки слежения за задержкой составляет половину от полуширины дискриминационной характеристики $\Delta/2 = \Delta t$. Отметим, что если бы рассматривался корреляционный приемник с шириной дискриминационной характеристики $\Delta = \Delta t$, то максимальное учитываемое значение ошибки слежения за задержкой составляло бы полуширину дискриминационной характеристики $\Delta/2 = \Delta t/2$. В обоих случаях учитываемый диапазон значений ошибок слежения за задержкой Δt лежит в пределах ширины дискриминационной характеристики Δ системы слежения за задержкой. Это, с одной стороны, формально соответствует отсутствию срыва слежения, с другой стороны, исключает учет при расчете величины p_0 ошибок слежения за задержкой Δt , выходящих за пределы дискриминационной характеристики системы слежения за задержкой и приводящих к срыву слежения, когда передача информации не осуществляется.

Учету ошибок слежения за задержкой принимаемого сигнала, лежащих в диапазоне $0,5\Delta t < \Delta t < 0,5\Delta t$, соответствует переход от плотности нормального закона распределения $w(\Delta x)$ нормированных ошибок слежения за задержкой (5) к плотности распределения усеченного нормального закона распределения

$$w(\Delta x) = \frac{1}{j\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\Delta x - \delta x)^2}{2\sigma_x^2}\right], \quad -0,5 < \Delta x < 0,5, \quad (8)$$

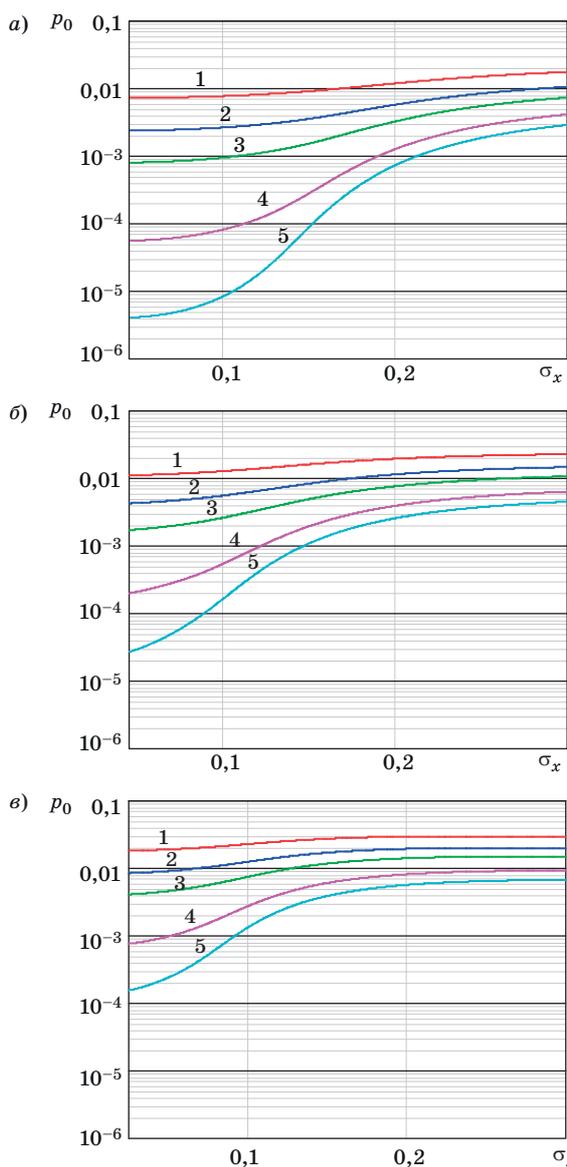
где $j = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{-0,5}^{0,5} \exp\left[-\frac{(\Delta x - \delta x)^2}{2\sigma_x^2}\right] d\Delta x$ — норми-

ровочный коэффициент усеченного нормального закона распределения и δx и σ_x — те же параметры, что и при использовании нормального закона распределения (5). Отметим, что в работе [17] также применялось выражение вида (7) для вероятности ошибочного приема информационного символа, однако диапазон значений задержки не ограничивался полушириной дискриминационной характеристики, и учитывалась только случайная составляющая ошибки слежения, а в работе [23] учет случайной составляющей ошибки слежения за задержкой приближенно учитывался сложением величины вероятности ошибки, определяемой выражением вида (1) со слагаемым, зависящим от σ_x .

Результаты исследования помехоустойчивости РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок синхронизации по задержке

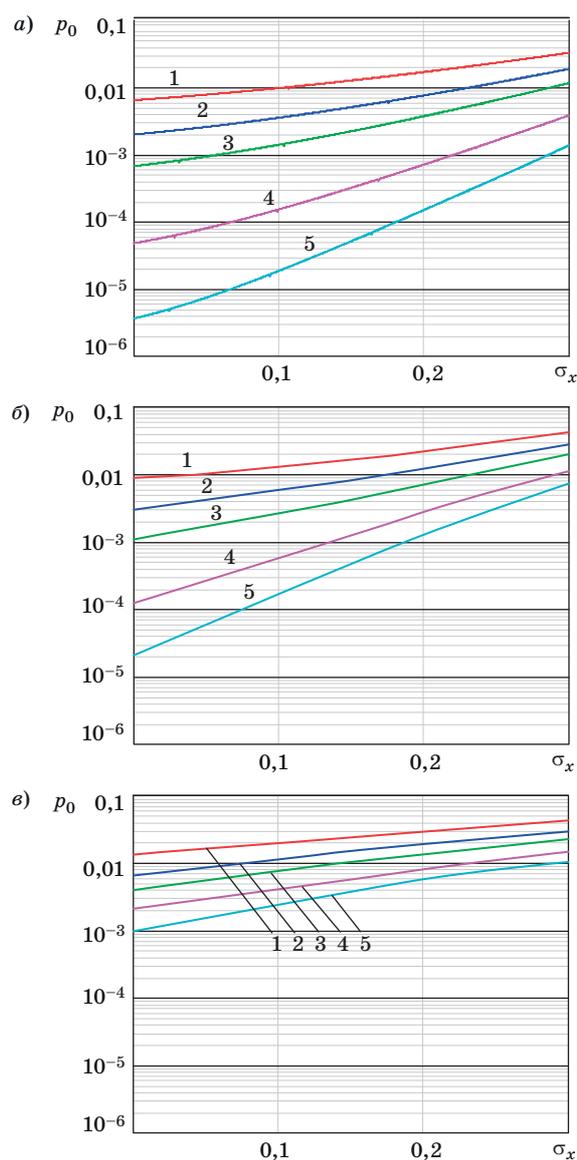
В соответствии с выражением (7) для вероятности ошибочного приема информационного символа p_0 в условиях ошибок слежения за задержкой с использованием плотности распределения нормированных ошибок слежения за задержкой $w(\Delta x)$, определяемой выражением (8), на ЭВМ были рассчитаны семейства зависимостей вероятности ошибочного приема информационного символа p_0 от ОСШ q и параметров следящей системы σ_x и δx . Результаты расчетов для широкого диапазона значений параметров σ_x , δx и q при наличии и отсутствии ошибок слежения за задержкой приведены на рис. 2–5.

На рис. 2, а–в представлены графики расчетных зависимостей p_0 от нормированной случайной составляющей ошибки слежения за задержкой σ_x для различных значений ОСШ q при нормированной систематической ошибке слежения за задержкой. Вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 уменьшается с увеличением q и с уменьшением σ_x , а при фиксированной величине $\sigma_x = \text{const}$ определяющее влияние на величину p_0 оказывают изменение ОСШ q и нормированная систематическая ошибка слежения за задержкой δx . Для всех зависимостей характерно резкое увеличение вероятности



■ **Рис. 2.** Зависимость вероятности ошибочного приема информационного символа от нормированной случайной ошибки слежения за задержкой $\delta x = 0$ (а); $\delta x = 0,1$ (б); $\delta x = 0,2$ (в): 1 — $q = 6$; 2 — $q = 8$; 3 — $q = 10$; 4 — $q = 15$; 5 — $q = 20$

■ **Fig. 2.** Dependences of probability of erroneous reception of information symbol on normalized random error tracking delay $\delta x = 0$ (a); $\delta x = 0,1$ (б); $\delta x = 0,2$ (в): 1 — $q = 6$; 2 — $q = 8$; 3 — $q = 10$; 4 — $q = 15$; 5 — $q = 20$



■ **Рис. 3.** Зависимость вероятности ошибочного приема информационного символа от нормированной систематической ошибки слежения за задержкой $\delta x = 0$ (а); $\delta x = 0,1$ (б); $\delta x = 0,2$ (в): 1 — $q = 6$; 2 — $q = 8$; 3 — $q = 10$; 4 — $q = 15$; 5 — $q = 20$

■ **Fig. 3.** Dependences of probability of erroneous reception of information symbol on normalized systematic error of tracking delay $\delta x = 0$ (a); $\delta x = 0,1$ (б); $\delta x = 0,2$ (в): 1 — $q = 6$; 2 — $q = 8$; 3 — $q = 10$; 4 — $q = 15$; 5 — $q = 20$

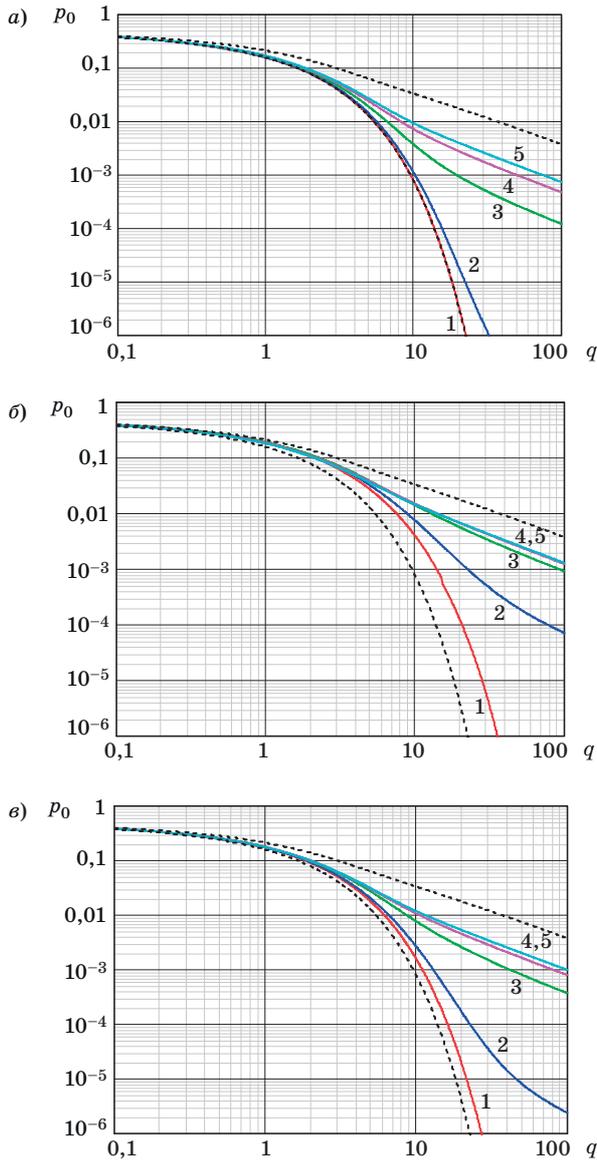
ошибочного приема информационного символа p_0 , начиная с некоторого значения σ_x , а при дальнейшем увеличении σ_x при $\delta x = \text{const}$ начинается более медленное увеличение величины p_0 . В рассмотренных условиях величина p_0 имеет максимальную динамику изменения в интервале значений нормированной случайной составляющей ошибки слежения за задержкой $0,05 \leq \sigma_x \leq 0,15$. При этом диапазон изменения величины p_0 существенно образом зависит от величины q .

На рис. 3, а–в приведены графики расчетных зависимостей p_0 от нормированной систематической составляющей ошибки слежения за задержкой δx для различных значений ОСШ q при нормированной случайной ошибке слежения за задержкой. Вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 уменьшается с увеличением q и с уменьшением δx , а при фиксированной величине $\delta x = \text{const}$ определяющее влияние на величину p_0 оказывают изменение ОСШ

q и среднее квадратическое отклонение нормированной ошибки слежения за задержкой σ_x . На всех зависимостях имеет место близкое к монотонному уменьшение вероятности ошибочного приема информационного символа p_0 при уменьшении δx .

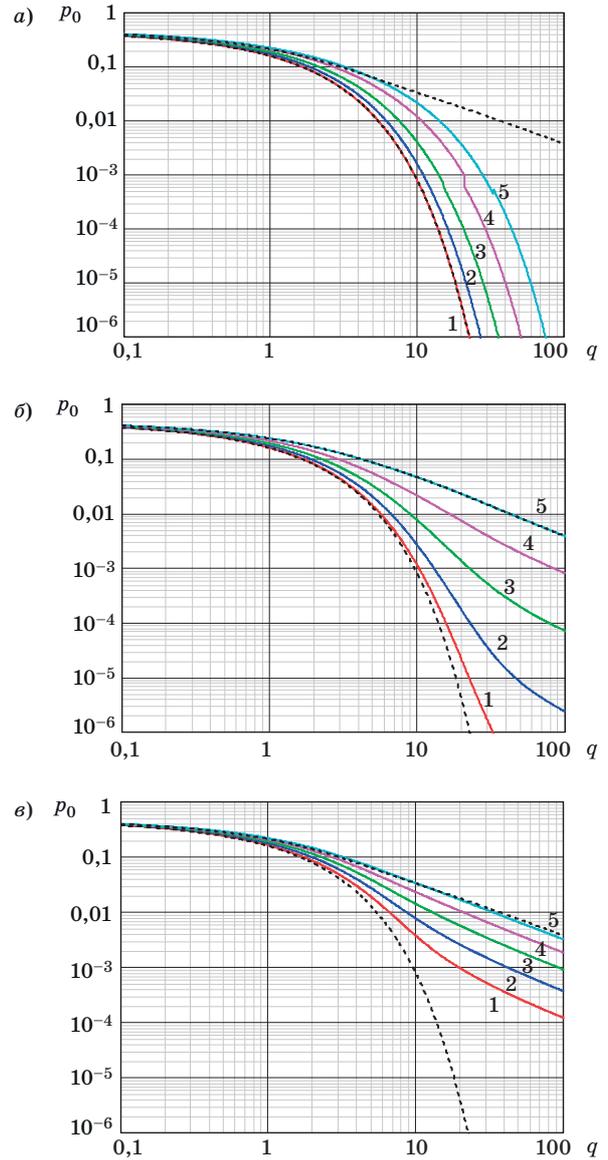
На рис. 4, а-в приведены графики расчетных зависимостей p_0 от ОСШ q при различных значе-

ниях нормированной случайной составляющей ошибки слежения за задержкой σ_x . Вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 уменьшается с увеличением q , а при фиксированной величине $q = \text{const}$ величина p_0 уменьшается с уменьшением σ_x и δx . На всех зависимостях имеется область малых значений ОСШ q , в которой при $\sigma_x = \text{const}$ имеет место медленное



■ **Рис. 4.** Зависимость вероятности ошибочного приема информационного символа от ОСШ при нормированной случайной составляющей ошибки слежения за задержкой $\delta x = 0$ (а); $\delta x = 0,1$ (б); $\delta x = 0,2$ (в): 1 — $\sigma_x = 0$; 2 — $\sigma_x = 0,1$; 3 — $\sigma_x = 0,2$; 4 — $\sigma_x = 0,3$; 5 — $\sigma_x = 0,4$

■ **Fig. 4.** Dependences of probability of erroneous reception of information symbol on signal-to-noise ratio for different values of normalized random component of delay tracking error $\delta x = 0$ (a); $\delta x = 0,1$ (б); $\delta x = 0,2$ (в): 1 — $\sigma_x = 0$; 2 — $\sigma_x = 0,1$; 3 — $\sigma_x = 0,2$; 4 — $\sigma_x = 0,3$; 5 — $\sigma_x = 0,4$



■ **Рис. 5.** Зависимости вероятности ошибочного приема информационного символа от ОСШ при нормированной систематической составляющей ошибки слежения за задержкой $\delta x = 0$ (а); $\delta x = 0,1$ (б); $\delta x = 0,2$ (в): 1 — $\sigma_x = 0$; 2 — $\sigma_x = 0,1$; 3 — $\sigma_x = 0,2$; 4 — $\sigma_x = 0,3$; 5 — $\sigma_x = 0,4$

■ **Fig. 5.** Dependence of probability of erroneous reception of information symbol from signal-to-noise ratio for different values of normalized systematic component of delay tracking error $\delta x = 0$ (a); $\delta x = 0,1$ (б); $\delta x = 0,2$ (в): 1 — $\sigma_x = 0$; 2 — $\sigma_x = 0,1$; 3 — $\sigma_x = 0,2$; 4 — $\sigma_x = 0,3$; 5 — $\sigma_x = 0,4$

уменьшение вероятности ошибочного приема информационного символа p_0 , а при дальнейшем увеличении q начинается более резкое уменьшение величины p_0 .

На рис. 5, а–в приведены графики расчетных зависимостей p_0 от ОСШ q при различных значениях нормированной систематической составляющей ошибки слежения за задержкой δx . Вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 уменьшается с увеличением q , а при фиксированной величине $q = \text{const}$ величина p_0 уменьшается с уменьшением σ_x и δx . Как и в предыдущем случае, для всех зависимостей характерно медленное изменение величины p_0 при $\delta x = \text{const}$ в области малых значений ОСШ q , а при дальнейшем увеличении q начинается более резкое уменьшение величины p_0 .

Показаны асимптоты зависимостей вероятности ошибочного приема информационного символа p_0 от ОСШ q (см. рис. 4 и 5). Нижняя асимптота соответствует отсутствию ошибок слежения за задержкой, когда $\delta x = 0$ и $\sigma_x = 0$, при этом плотность распределения нормированных ошибок слежения за задержкой (5) сводится к δ -функции $w(\Delta x) = \delta(\Delta x)$ и вероятность ошибочного приема информационного символа определяется выражением (1). Верхняя асимптота соответствует равномерному распределению ошибок слежения за задержкой в диапазоне $-0,5\Delta t < \Delta t < 0,5\Delta t$ с плотностью распределения нормированной ошибки синхронизации

$$w(\Delta x) = \begin{cases} 1, & -0,5 < \Delta x < 0,5; \\ 0, & \Delta x < -0,5, \Delta x > 0,5. \end{cases} \quad (9)$$

Семейства зависимостей, представленные на рис. 2–5, позволяют проанализировать влияние параметров системы слежения за задержкой σ_x , δt и q на вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 и сформулировать требования к указанным параметрам. В рассмотренных диапазонах значений нормированных параметров σ_x и δx , связанных с параметрами системы слежения за задержкой σ_t и δt , могут быть определены области, в которых имеет место слабое или существенное влияние ошибок синхронизации на помехоустойчивость РТС пе-

редачи информации. Во всех случаях диапазон изменения величины p_0 существенным образом зависит от величины ОСШ q , а при наличии ошибок синхронизации для достижения требуемой величины p_0 необходимо увеличение q . При этом с увеличением ошибок слежения за задержкой увеличение ОСШ q , требуемое для компенсации влияния ошибок синхронизации, существенно увеличивается.

При проведении расчетов использовались аналитические выражения, соответствующие приему сигналов в условиях белого гауссова шума, для которого определяется ОСШ q . Вместе с тем с учетом возможностей пересчета мощностей действующих шумовых (коррелированных) помех к эквивалентной мощности шумовой (некоррелированной) помехи [2, 3], а также декорреляции помех при цифровой обработке сигналов [24] полученные результаты могут быть приведены к различным условиям приема сигналов, характеризующимся воздействием как шумовых, так и нешумовых помех.

Заключение

Проведенные исследования характеризуют влияние точности синхронизации по задержке на вероятность ошибочного приема информационного символа в РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП. Учитывая высокие требования к помехоустойчивости современных РТС передачи информации, работающих с воздушными и космическими объектами, и широкое использование в них шумоподобных фазоманипулированных сигналов на основе ПСП, полученные результаты могут быть использованы при анализе помехоустойчивости таких систем в широком диапазоне условий связи. В общем случае для обеспечения заданной вероятности ошибочного приема информационного символа в РТС передачи информации для ее системы синхронизации необходим совместный выбор параметров системы слежения за задержкой с учетом ограничений, накладываемых условиями функционирования РТС 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 А. Е., Шестопалов В. И. *Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью* / под ред. В. И. Борисова. М., РадиоСофт, 2011. 548 с.

3. Sklar B. *Digital Communication. Fundamentals and Application*. Prentice Hall PTR, 2001. 1079 p.
4. Карутин С. Н., Власов И. Б., Дворкин В. В. *Дифференциальная коррекция и мониторинг глобальных навигационных спутниковых систем*. М., Изд-во МГУ, 2014. 464 с.
5. Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф. *Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами*. М., Радио и связь, 2008. 288 с.

- ми. М., Изд-во Московского государственного университета леса, 2003. 200 с.
6. **Бакитко Р. В., Болденков Е. Н., Булавский Н. Т.** и др. *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования*/ под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М., Радиотехника, 2005. 688 с.
 7. *Handbook on Space Research Communication*. Geneva, Radiocommunication Bureau ITU, 2014. 30 p.
 8. *TC Synchronization and Channel Coding. Recommended Standard CCSDS 230.1-G-2*. Iss. 2. Green Book, Washington, DC, 2012. <http://mirperekodov.org/article/perevod-ucheniyh-stepeney> (дата обращения: 04.03.2019).
 9. *Pseudo-Noise Ranging Systems. Informational Report CCSDS 414.0-G-2*. Iss. 2. Green Book, Washington, DC, 2014. <http://mirperekodov.org/article/perevod-ucheniyh-stepeney> (дата обращения: 04.03.2019)
 10. **Alim A.** Spread spectrum modem for voice and data transmission. *Journal of Advances Information Technology*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 115–119.
 11. **Yixin Y., Xiaolei L., Xiaobing Z.** Design of spread-spectrum communication system based on FPGA. *Sensors & Transducers*, 2013, vol. 23, special issue, pp. 49–53.
 12. **Шахтарин Б. И.** *Анализ систем синхронизации при наличии помех*. М., ИПРЖР, 1996. 252 с.
 13. **Млечин В. В.** *Теория радиоэлектронного преодоления. Анализ воздействия помех на радиотехнические системы и устройства*. М., Радиотехника, 2009. 976 с.
 14. **Gang F., Ting Y., Guoxiang G.** Research on tracking of spread spectrum PN code signal. *Advances in Engineering*, 2017, vol. 126, pp. 506–509.
 15. **Mironov V. A., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ershov A. Y.** Nonlinear methods of statistical analysis of dynamics of the tracking systems in radio receivers. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2018, vol. 11, no. 5, pp. 627–633.
 16. **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.
 17. **Ковальчук А. А.** Срыв синхронизации в системе слежения за задержкой псевдощумового сигнала. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана*, 2012, № 12, с. 477–486. <http://mirperekodov.org/article/perevod-ucheniyh-stepeney> (дата обращения: 04.03.2019).
 18. **Болденков Е. Н.** Совместное слежение за задержкой и за несущей сигнала методами оптимальной траекторной фильтрации. *Радиотехника*, 2013, № 10, с. 103–106.
 19. **Шахтарин Б. И., Кульков И. А.** Анализ гибридной системы фазовой и тактовой синхронизации. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение»*, 2013, № 1, с. 40–50.
 20. **Rani L., Kikan S.** Adaptive synchronization and linear channel parameter estimation using adaptive filtering. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2013, vol. 2, no. 7, pp. 2875–2881.
 21. **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.
 22. **Михайлов Н. В., Чистяков В. В.** *Приемники спутниковой навигации космического базирования: архитектура и первичная обработка сигналов*. Воронеж, Научная книга, 2014. 124 с.
 23. **Мирошникова Н. Е.** Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов. *T_Soft*, 2013, № 9, с. 112–114.
 24. **Мальцев Г. Н., Харченко А. В., Гарагуля А. С.** Границы повышения помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации при цифровой обработке сигналов с компенсацией помех. *Информационно-управляющие системы*, 2014, № 4, с. 111–116.

UDC 621.391.832.42

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

Studying noise immunity of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals and synchronization delay errors

G. N. Maltsev^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-6755-5700, georgy_maltsev@mail.ruA. V. Evteev^a, PhD, Tech., Research Fellow, orcid.org/0000-0002-4994-9220^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals based on pseudo-random sequences have potential noise immunity provided by accurately tracking the delay of the received signal in the correlation receiver. When working with moving objects, the delay of the received signal varies continuously, and the reception quality for noise-like phase-shifted signals highly depends on the synchronization system operation and on the accuracy of estimating the received signal delay by the tracking system. To ensure the required signal reception quality, it is necessary to provide an informed choice of tracking system parameters,

taking into account their effects, which are the random and systematic components of the delay tracking error, on the selected noise immunity indicator. **Purpose:** Analyzing how the errors in tracking the delay of a received phase-shift keyed signal based on a pseudo-random sequence by the synchronization system of a radio information transmission system can affect the probability of erroneous reception of an information symbol. **Results:** The calculation method was used to obtain families of dependencies of the probability of erroneous reception of an information symbol on the signal-noise ratio (SNR), and the values of the random and systematic components of the delay tracking error which are normalized to the capture band of the correlation receiver. It has been shown that at a fixed SNR, the values of the random and systematic components of the delay tracking error are critical for the erroneous reception probability. In all the cases discussed, all the dependencies are characterized by a slow change of the erroneous reception probability while the synchronization errors within the area of small SNR have fixed values. As the SNR value grows, the erroneous reception probability rapidly drops. To ensure the specified signal reception quality and the reliability of the selection of information symbols and messages in a radio information transmission system with noise-like phase-manipulated signals, its synchronization system requires a joint selection of the tracking system parameters, taking into account the limitations imposed by the operating conditions and technical implementation features. **Practical relevance:** The obtained results can be used in noise immunity analysis of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals in a wide range of communication conditions, and in providing technical solutions for synchronization systems ensuring the required quality of signal reception.

Keywords — radio information transmission systems, noise-like phase-shift keyed signals, noise immunity, synchronization.

For citation: Maltsev G. N., Evteev A. V. Studying noise immunity of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals and synchronization delay errors. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 105–113 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

References

- Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p. (In Russian).
- Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E., Shestopalov V. I. *Pomekhozashchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra pryamoj modulyatsiej psevdosluchajnoj posledovatel'nost'yu* [Immunity of radio communication systems with spreading of the spectrum by direct modulation with a pseudo-random sequence]. Ed. V. I. Borisov. Moscow, Radio-Soft Publ., 2011. 548 p. (In Russian).
- Sklar B. *Digital Communication. Fundamentals and Application*. Prentice Hall PTR, 2001. 1079 p.
- Karutin S. N., Vlasov I. B., Dvorkin V. V. *Differentsial'naya korrektsiya i monitoring global'nykh navigatsionnykh sputnikovyykh sistem* [Differential correction and monitoring of global navigation satellite systems]. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet Publ., 2014. 464 p. (In Russian).
- Galanternik Yu. M., Gorish A. V., Kalinin A. F. *Komandno-izmeritel'nye sistemy i nazemnye kompleksy upravleniya kosmicheskimi apparatami* [Command and measuring systems and ground-based spacecraft control complexes]. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet lesa Publ., 2003. 200 p. (In Russian).
- Bakitko R. V., Boldenkov E. N., Bulavsky N. T., et al. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and operation]. By ed. A. I. Perova, V. N. Harisova. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2005. 688 p. (In Russian).
- Handbook on Space Research Communication*. Geneva, Radiocommunication Bureau ITU, 2014. 30 p.
- TC Synchronization and Channel Coding. Recommended Standard CCSDS 230.1-G-2*. Iss. 2. Green Book, Washington, DC, 2012. Available at: <http://scbist.com/zh-d-stati/2012-statya-osnovnye-formy-poezdnoi-i-tehnicheskoi-dokumentacii.html> (accessed 04 March 2019).
- Pseudo-Noise Ranging Systems. Informational Report CCSDS 414.0-G-2*. Iss. 2. Green Book, Washington, DC, 2014. Available at: <http://scbist.com/zh-d-stati/2012-statya-osnovnye-formy-poezdnoi-i-tehnicheskoi-dokumentacii.html> (accessed 04 March 2019).
- Alim A. Spread spectrum mode for voice and data transmission. *Journal of Advances Information Technology*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 115–119.
- Yixin Y., Xiaolei L., Xiaobing Z. Design of spread-spectrum communication system based on FPGA. *Sensors & Transducers*, 2013, vol. 23, special issue, pp. 49–53.
- Shakhtarin B. I. *Analiz sistem sinkhronizatsii pri nalichii pomekh* [Analysis of synchronization systems in the presence of interference]. Moscow, IPRZHR Publ., 1996. 252 p. (In Russian).
- Mlechin V. V. *Teoriya radioelektronogo preodoleniya. Analiz vozdeystviya pomekh na radiotekhnicheskie sistemy i ustrojstva* [Theory of electronic overcoming. Analysis of the impact of interference on radio systems and devices]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 976 p. (In Russian).
- Gang F., Ting Y., Guoxiang G. Research on tracking of spread spectrum PN code signal. *Advances in Engineering*, 2017, vol. 126, pp. 506–509.
- Mironov V. A., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ershov A. Y. Nonlinear methods of statistical analysis of dynamics of the tracking systems in radio receivers. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2018, vol. 11, no. 5, pp. 627–633.
- Lukyanchikov V. D., Liventsev V. V., Sergienko A. I. Interference immunity of coherent reception of phase-shift keyed broadband signals with polarization coding with non-ideal time and phase synchronization. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2013, no. 3, pp. 3–10 (In Russian).
- Kovalchuk A. A. Disruption of synchronization in the tracking system for pseudo-noise signal delay. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. H. Baumana* [Science & Education: scientific edition of Bauman MSTU], 2012, no. 12, pp. 477–486. Available at: <http://scbist.com/zh-d-stati/2012-statya-osnovnye-formy-poezdnoi-i-tehnicheskoi-dokumentacii.html> (accessed 04 March 2019). (In Russian).
- Boldenkov E. N. Joint tracking of the delay and the carrier signal by methods of optimal trajectory filtering. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2013, no. 10, pp. 103–106 (In Russian).
- Shakhtarin B. I., Kulkov I. A. Analysis of the hybrid system of phase and clock synchronization. *Vestnik MGTU im. N. E. H. Baumana. Seriya "Priborostroenie"* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2013, no. 1, pp. 40–50 (In Russian).
- Rani L., Kikan S. Adaptive synchronization and linear channel parameter estimation using adaptive filtering. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2013, vol. 2, no. 7, pp. 2875–2881.
- Shakhtarin B. I., Sidorkina Yu. A., Kulkov I. A. Simulation of a hybrid system of phase and clock synchronization of FM signals. *Vestnik MGTU im. N. E. H. Baumana. Seriya "Priborostroenie"* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2014, no. 4, pp. 123–134 (In Russian).
- Mikhailov N. V., Chistyakov V. V. *Priemniki sputnikovoy navigatsii kosmicheskogo bazirovaniya: arkhitektura i pervichnaya obrabotka signalov* [Space-based satellite navigation receivers: architecture and primary signal processing]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2014. 124 p. (In Russian).
- Miroshnikova N. E. The impact of timing errors on the reception of digital signals. *T_Comm*, 2013, no. 9, pp. 112–114 (In Russian).
- Maltsev G. N., Harchenko A. V., Garagulya A. S. Limits of radio data transmission noise immunity improvement in digital signal processing with noise compensation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4, pp. 111–116 (In Russian).