

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

DOI: 10.24143/2072-9502-2020-1-64-72

УДК 681.327.8

## ВЕРХНЯЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ ПРИЕМА АПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ОРГАНИЗОВАННЫХ ПОМЕХ

*И. М. Ажмухамедов, Е. В. Мельников*

*Астраханский государственный университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

Впервые получены оценки верхних границ для вероятности неприема синхронизирующей последовательности при фазировании датчиков аperiodических псевдослучайных последовательностей (АПСП) широкополосных систем связи в каналах низкого качества при мощных помехах естественной и организованной структуры. Полученные результаты позволяют проектировать системы синхронизации псевдослучайных последовательностей для наихудшего случая, что гарантирует их надежное функционирование в каналах низкого качества, а также, в отличие от известных методов, оценка синхронизации датчиков АПСП не будет зависеть от распределения ошибок в канале связи и периода АПСП. Указанные отличия упрощают оценку синхронизации в процессе эксплуатации широкополосных систем связи в каналах низкого качества.

**Ключевые слова:** аperiodическая псевдослучайная последовательность, широкополосные системы связи, организованные помехи, зачетный отрезок, синхронизация, неравенство Бернштейна.

**Для цитирования:** *Ажмухамедов И. М., Мельников Е. В.* Верхняя оценка вероятности ошибки приема аperiodической псевдослучайной последовательности в условиях организованных помех // *Вестник Астраханского государственного технического университета.* Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 1. С. 64–72. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-1-64-72.

### Введение

В широкополосных системах связи невосприимчивость к случайным и преднамеренно поставленным помехам обычно обеспечивается с помощью использования сложных сигналов, изменение структуры которых происходит по закону аperiodической псевдослучайной последовательности (АПСП) [1–8]. Для декодирования подобных сигналов необходимо наличие на принимающей стороне АПСП, идентичной использованной при отправке [1, 2]. Только при выполнении этого условия можно обеспечить надежное функционирование широкополосных систем связи в условиях организованных помех [9]. Это выдвигает задачу синхронизации датчиков АПСП широкополосных систем связи в важную самостоятельную область исследования.

Научная проработка вопросов синхронизации датчиков АПСП в каналах низкого качества позволит повысить эффективность функционирования проектируемых систем широкополосной связи в условиях организованных помех [9].

Вопросам исследования проблемы синхронизации датчиков псевдослучайных последовательностей (ПСП) было посвящено достаточно большое количество работ разных авторов: Б. И. Баженова, Л. А. Вайнштейна, Е. Б. Бродской, Б. П. Калмыкова, А. Ф. Козлова, Р. С. Рачкаускаса, В. С. Скворцова, В. В. Лосева, В. И. Коржика, Е. М. Мартынова, Дж. Дж. Стиффлера, Э. Р. Кейна, В. Линдсней и др. [10, 11]. В этих работах процесс синхронизации рассматривается с точки зрения решения задачи поиска сигнала в определенный момент времени и определения величины его задержки относительно тактового сигнала локального генератора.

Известные математические оценки синхронизации ПСП получены, как правило, для биномиальных каналов достаточно хорошего качества при умеренных ошибках в канале и небольших периодах ПСП [10, 11].

В известных работах оценка синхронизации ПСП по методу зачетного отрезка (ЗОТ) для небольших периодов на каналах низкого качества находится в предположении, что ЗОТ, образованные делением интервала анализа  $L$  на длину ЗОТ отрезка, не перекрывают друг друга (рис. 1).

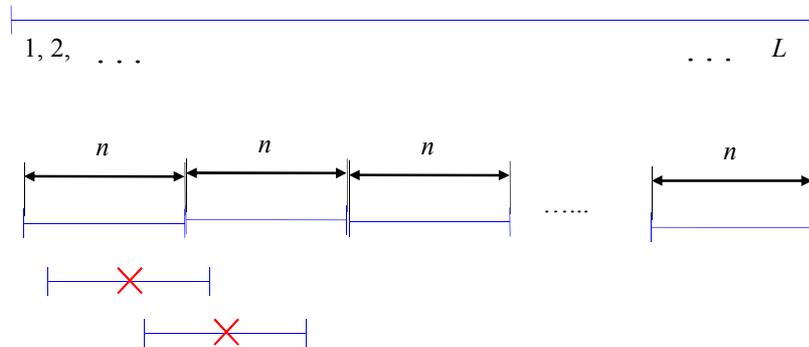


Рис. 1. Метод разбиения интервала анализа  $L$  на независимые ЗОТ длины  $n$

Однако при таком методе ЗОТ, появляющиеся на стыках смежных ЗОТ, не учитываются, что приводит к существенным погрешностям при оценке вероятностей ошибочного и правильного приема ЗОТ АПСР на каналах низкого качества с использованием известных оценок. Поэтому возникает задача оценки синхронизации датчика АПСР по методу ЗОТ при учете всех ЗОТ на интервале анализа  $L$ . При этом известные точные оценки приводят при расчетах к неразрешимым трансцендентным уравнениям и становятся непригодными для расчетов синхронизации АПСР, период которых является бесконечно большим [11]. А приближенные методы расчетов дают большую погрешность и, как следствие, становятся непригодными для оценки параметров синхронизации в условиях мощных организованных помех [10].

В этой связи для проектировщиков широкополосных систем связи наилучшей будет граничная оценка синхронизации датчиков АПСР на каналах низкого качества, которая позволяет проектировать систему синхронизации для наихудшего случая. Рассмотрим решение этой задачи на основе применения граничных оценок Бернштейна.

Найдем верхнюю оценку синхронизации датчиков АПСР в каналах низкого качества по методу ЗОТ с использованием неравенства Бернштейна, которая, в отличие от известных методов, не будет зависеть от распределения ошибок в канале связи и периода АПСР, что упрощает оценку синхронизации при проектировании широкополосных систем связи.

### Постановка задачи

Условия:

*Передаваемый сигнал* – ЗОТ, представляющий собой  $n$  символов АПСР в двоичной кодировке.

*Канал связи* – бинарный, биномиальный, с вероятностью ошибки приема символа, равной  $P$ .

В канале реализована тактовая синхронизация, а цикловая синхронизация отсутствует. В связи с этим неизвестно, каким по счету символам ЗОТ соответствуют принимаемые символы. При этом, однако, априори известно, что обработка на принимающей стороне начинается до того, как принимается первый символ ЗОТ.

*Ограничения устройства обработки* – на каждом такте запоминается не более чем  $n$  из  $L$  принимаемых из канала связи бинарных символов. При этом возможны различные случаи приема:  $n = L$ ,  $n < L$ .

*Необходимо*, приняв  $L$  символов из канала связи, вынести суждение о расположении ЗОТ относительно принятой информации, т. е. найти начало (или конец) ЗОТ.

В качестве критерия качества обработки выступает вероятность правильного приема ЗОТ ( $P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{н}}$ ), где  $P_{\text{н}}$  – вероятность ошибочного приема ЗОТ.

### Формальная постановка задачи

На вход поступило  $L$  бинарных символов  $u_1, u_2, \dots, u_L$ , и известна длина ЗОТ из  $n$  бинарных символов  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . Требуется определить положение истинного ЗОТ относительно последовательности  $u_1, u_2, \dots, u_L$ , если известно, что весь ЗОТ входит в последовательность  $u_1, u_2, \dots, u_L$ .

### Обоснование метода решения

Для решения задачи определения вероятности правильной синхронизации необходимо знать функцию вероятности распределения различных положений ЗОТ. Если указанная функция равномерная или ее вид неизвестен, очевидно оптимальным будет метод максимального правдоподобия, при использовании которого для каждого из  $L - n$  возможных сдвигов вычисляется апостериорная вероятность соответствия выбранного сдвига истинному и в качестве решения выбирается сдвиг, вероятность соответствия которого максимальна. То есть в этом случае мы вычисляем вероятность появления при каждом выборе сдвига последовательности  $u_1, u_2, \dots, u_L$  при  $L - n$  различных расстояниях ЗОТ относительно опорного сигнала и выбираем сдвиг с максимальной вероятностью:

$$P(u_1, u_2, \dots, u_L / j) = \prod_{k=1}^{j-1} P^{u_k} (1-P)^{1 \oplus u_k} \cdot \prod_{k=j}^{j+n-1} P^{u_k \oplus S_{k-j+1}} (1-P)^{1 \oplus u_k \oplus S_{k-j+1}}; \quad (1)$$

$$\prod_{k=j+n}^L P^{u_k} (1-u_k)^{1 \oplus u_k},$$

где  $\oplus$  означает сложение по модулю два.

Данное соотношение справедливо в тех случаях, когда несимметричность канала связи невелика (например, при использовании амплитудной модуляции).

Однако соотношение в случаях, когда канал связи существенно несимметричен, помехи (шум) в дискретном канале не являются аддитивными, т. е., строго говоря, нельзя принять  $u_i = S_i \oplus e_i$ , где  $e_i$  – помеха в канале связи,  $P(e_i = 0) = 1 - P$ ,  $P(e_i = 1) = P$ . Как следствие, соотношение (1) перестает работать.

Рассмотрим последовательность  $u_1, u_2, \dots, u_j \oplus S_1, u_{j+1} \oplus S_2, \dots, u_{j+n-1} \oplus S_n, u_{j+n}, \dots, u_L$ .

Обозначим число единиц в данной последовательности через  $d_j$ .

Тогда соотношение (1) примет вид

$$P(u_1, u_2, \dots, u_L / j) = P^{d_j} (1 - P)^{L-d_j}. \quad (2)$$

При  $P \leq 1/2$  правая часть выражения (2) с увеличением  $d_j$  монотонно убывает. Следовательно, для реализации метода максимального правдоподобия достаточно, исходя из принятой последовательности  $u_1, u_2, \dots, u_L$ , сформировать различные последовательности:

$$u_1, u_2, \dots, u_{j-1}, u_j \oplus S_1, u_{j+1} \oplus S_2, \dots, u_{j+n-1} \oplus S_n, u_{j+n}, u_{j+n+1}, \dots, u_L, j = 0, 1, \dots, n - L + 1.$$

Решением задачи нахождения истинного сдвига в этом случае будет величина сдвига, которой соответствует последовательность, содержащая наименьшее количество единиц.

Если при передаче сигнала применены частотная или фазовая модуляции, соотношение (1) перестает быть справедливо, т. к. там, где нет прямого кода, с равной вероятностью могут оказаться как нули, так и единицы, поскольку действует предположение, что при отсутствии сигнала в канал поступает помеха в виде белого гауссовского шума. При частотной или фазовой модуляции соотношение (1) принимает вид

$$P(u_1, u_2, \dots, u_L / j) = \prod_{k=1}^{n+j-1} P^{u_k \oplus S_k} (1 - P)^{u_k \oplus S_k + 1}. \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что для определения наиболее вероятного значения сдвига необходимо сравнить лишь произведения. Данное сравнение, в свою очередь, может быть сведено к выбору такого  $j$ , для которого в последовательности  $u_j \oplus S_1, u_{j+1} \oplus S_2, \dots, u_{j+n-1} \oplus S_n$  число единиц будет минимальным.

Таким образом, будем использовать правило, когда вычисляется текущая взаимно-корреляционная функция, которая сравнивается с пороговым значением:

$$\sum_{i=1}^n u_{i+j} \cdot S_i \begin{matrix} < \\ > \end{matrix} u_0.$$

При этом для уменьшения вероятности ложного обнаружения ЗОТ (что особенно критично при редких запусках датчиков) целесообразно использовать критерий Неймана – Пирсона. В этом случае вычисляется сумма вероятностей (2) для различных величин сдвигов, и эта величина сравнивается с заданным пороговым значением. Если найденная величина меньше порогового значения, делается вывод об отсутствии ЗОТ.

Для того чтобы ускорить процесс принятия решения, необходимо производить сравнение с пороговым значением на каждом шаге, а в случае превышения порогового значения сразу принимать решение об успешном принятии ЗОТ.

При хорошем соотношении параметров появление двух и более превышений порога маловероятно, и такой метод будет близок к оптимальному.

### Вывод формулы для верхней оценки вероятности ошибки приема синхронизирующей последовательности

Исходя из вышеизложенного, найдем вероятность неприема ЗОТ с использованием граничных оценок Бернштейна, вывод которых для централизованной случайной величины описан ниже.

Преимущество использования границ Бернштейна состоит в том, что вероятность превышения порога взаимно-корреляционной функции экспоненциально зависит от числа слагаемых  $n$  или, другими словами, от длины ЗОТ. Кроме того, для применения этих границ требуется малая априорная информация. Нет необходимости знать законы распределения, а достаточно знать лишь дисперсию и среднее значение случайной величины (СВ). Применим неравенство Бернштейна для определения вероятности ошибки приема ЗОТ в биномиальных каналах низкого качества.

Пусть имеем независимые СВ  $\xi_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  с конечным математическим ожиданием  $M(\xi_i) = a_i$  и дисперсией  $D(\xi_i) = b_i$ .

Введем новую СВ как  $\eta_i = \xi_i - a_i$  и найдем математическое ожидание и дисперсию суммы от единицы до  $n$  для новой СВ, т. е. получаем:  $M(\eta_i) = \sum_{i=1}^n \eta_i = S_n$ ;  $D(\eta_i) = \sum_{i=1}^n b_i = B_n$ .

Пусть имеет место неравенство

$$M(\eta_i) \leq \frac{b_i}{2} H^{k-2} \cdot k!,$$

где  $k \geq 2$ ;  $H > 0$ ;  $0 < t < \frac{B_n}{2H}$ .

Тогда для СВ будут справедливы следующие неравенства Бернштейна:

$$P\{S_n \geq 2t\sqrt{B_n}\} < e^{-t^2};$$

$$P\{S_n \leq -2t\sqrt{B_n}\} < e^{-t^2};$$

$$P\{|S_n| \geq 2t\sqrt{B_n}\} < 2e^{-t^2}.$$

Рассмотрим частный случай СВ с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями:  $a_i = 0$ ,  $b_i = \sigma^2$ . В этом случае неравенства Бернштейна принимают вид

$$P\left\{\sum_{i=1}^n \xi_i \geq 2t\sigma\sqrt{n}\right\} < e^{-t^2};$$

$$P\left\{\sum_{i=1}^n \xi_i \leq -2t\sigma\sqrt{n}\right\} < e^{-t^2};$$

$$P\left\{\left|\sum_{i=1}^n \xi_i\right| \geq 2t\sigma\sqrt{n}\right\} < 2e^{-t^2},$$

где  $0 < t < \frac{\sigma\sqrt{n}}{2H}$ .

При  $H > 0$  будет справедливо  $M\{\xi_i^k\} \leq \frac{\sigma^2}{2} H^{k-2} \cdot k!$ ,  $k = 2, 3, \dots$ .

Неравенства Бернштейна справедливы для любых случайных величин  $\xi_i$ , если для них математическое ожидание  $M\left\{e^{\gamma\xi_i}\right\} < \infty$ , и  $|\gamma| < \frac{1}{2H}$ :

$$\begin{aligned} P\left\{\sum_{i=1}^n \xi_i \geq 2t\sigma\sqrt{n}\right\} &< e^{-t^2}; \\ P\left\{\sum_{i=1}^n \xi_i \leq -2t\sigma\sqrt{n}\right\} &< e^{-t^2}; \\ P\left\{\left|\sum_{i=1}^n \xi_i\right| \geq 2t\sigma\sqrt{n}\right\} &< 2e^{-t^2}, \end{aligned}$$

где  $0 < t < \frac{\sigma\sqrt{n}}{2H}$ ;  $H > 0$ , для которого справедливо  $M\{\xi_i^k\} \leq \frac{\sigma^2}{2} H^{k-2} \cdot k!$ ,  $k = 2, 3, \dots$ .

Из полученных неравенств видно, что, если СВ ограничены  $|\xi_i| < C - \text{const}$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , неравенство Бернштейна можно использовать для любых  $t$ . Большинство физических величин всегда ограничены, и даже если для них используются модели неограниченных величин (гауссовское распределение), то для самих случайных величин, а не моделей, неравенства Бернштейна будут справедливы.

Если математическое ожидание СВ  $M\left\{e^{\frac{c\xi_i}{i}}\right\} < \infty$  является ограниченной величиной, то неравенства Бернштейна можно привести к более удобному виду для практического использования. Для этого представим параметр  $t$  в следующем виде:  $t = \frac{A\sqrt{n}}{2\sigma}$ , тогда неравенства Бернштейна можно записать как

$$\begin{aligned} P\left\{\sum_{i=1}^n \xi_i \geq An\right\} &< e^{-\frac{A^2n}{4\sigma^2}}; \\ P\left\{\sum_{i=1}^n \xi_i \leq -An\right\} &< e^{-\frac{A^2n}{4\sigma^2}}; \\ P\left\{\left|\sum_{i=1}^n \xi_i\right| \geq An\right\} &< 2e^{-\frac{A^2n}{4\sigma^2}}. \end{aligned}$$

Данные неравенства можно применять к суммам взаимно независимых случайных величин с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями для любого параметра  $A > 0$ , если экспоненциальные моменты этих случайных величин ограничены, что всегда выполняется, когда сами СВ ограничены.

С использованием неравенства Бернштейна была получена оценка вероятности неприятия АПСП, приведенная ниже:

$$\overline{P}_H \leq (L - 2n) \left( \frac{-[2P - 1]^2}{e^{4(4P(1-P)+1)}} + \frac{-[(1 - 2P)(n + R(T))]^2}{e^{16P(1-2P)(4d(T)+T)n}} \right), \quad (4)$$

где  $L$  – длина анализируемого участка ПСП;  $n$  – длина ЗОТ;  $R(T)$  – аperiодическая функция взаимной корреляции;  $d(T)$  – число несовпадений пускового и опорного сигналов в одинаковые промежутки времени, вычисляемое как

$$d(T) = \begin{cases} 0 \\ \sum_{i=1}^{n-T} S_i \oplus S_{i+T} \end{cases} .$$

Тогда для вероятности правильного приема ЗОТ будет справедлива оценка

$$P_{\text{пр}} \geq 1 - P_{\text{н}}. \quad (5)$$

Разработанные математические модели (4) и (5) на основе неравенств Бернштейна позволяют, в отличие от известных точных и приближенных методов, получить строгую оценку вероятности синхронизации АПСП при любых сколько угодно больших периодах, используемых в широкополосных системах связи для защиты от организованных помех.

Полученная формула (4) достаточно удобна для расчетов. Результаты расчета в среде Matlab по ней вероятности неприема ЗОТ  $\bar{P}_{\text{н}}$  при различных значениях  $n$  приведены на рис. 2.

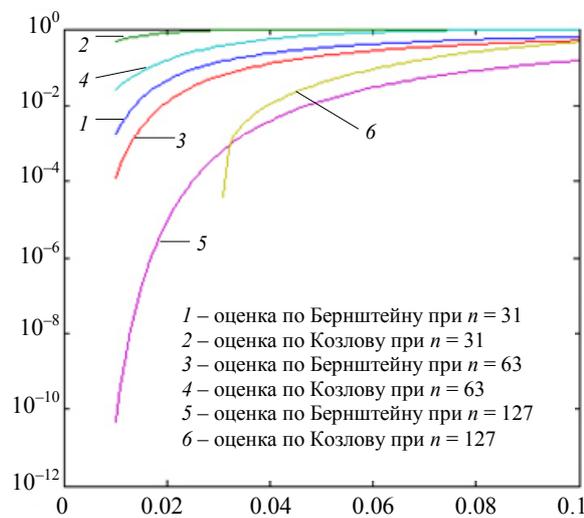


Рис. 2. Вероятность ошибочного приема ЗОТ с использованием неравенства Бернштейна

Здесь же для сравнения приведены аналогичные кривые вероятности неприема ЗОТ, полученные по известной формуле, предложенной в работе [11].

Системный анализ полученных результатов показывает, что при одинаковых параметрах канала и ЗОТ разработанная математическая модель с использованием неравенства Бернштейна дает выигрыш в помехоустойчивости по сравнению известным методом. Так, например, при  $n = 31$  и  $P = 0,1$  соответственно, в первом случае вероятность неприема составила  $\bar{P}_{\text{н}} = 10^{-1}$ , а во втором  $\bar{P}_{\text{н}} = 3 \cdot 10^{-1}$ , и выигрыш будет возрастать при увеличении длины ЗОТ, т. е. разработанная модель по точности более чем на порядок выше известных методов [11].

А при увеличении длины зачетного отрезка  $n = 127$  и вероятности ошибки в канале  $P = 0,1$  указанный выигрыш, как видно из рис. 2, достигает трех десятичных порядков. Результаты расчета, приведенного на рис. 2, показывают, что разработанная математическая модель, которая учитывает все ЗОТ, по сравнению с известным приближенным методом оценки синхронизации АПСП [11], позволяет уменьшить вероятность незапуска при увеличении длины ЗОТ в каналах низкого качества. Из рис. 2 видно, что если при  $n = 63$  и вероятности ошибки в канале  $P = 0,2$  вероятность неприема составляет  $\bar{P}_{\text{н}} = 7 \cdot 10^{-2}$ , то при той же вероятности ошибки в канале увеличение длины до  $n = 127$  дает вероятность ошибки приема  $\bar{P}_{\text{н}} = 10^{-3}$ .

## Выводы

Таким образом, расчеты показывают, что разработанная математическая модель на основе неравенств Бернштейна позволяет, в отличие от известных приближенных методов, получить строгую оценку вероятности синхронизации АПСП для любых сколько угодно больших периодов, используемых в коммерческих широкополосных системах связи для защиты от организованных помех. В связи с этим разработанная математическая модель позволит за счет эффективных методов оценки синхронизации АПСП в каналах низкого качества ( $P \geq 0,1$ ) повысить эксплуатационную надежность проектируемых коммерческих широкополосных систем связи, что имеет важное значение для повышения надежности их функционирования в условиях организованных помех при управлении удаленными корпоративными сетями компаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малыгин И. Широкополосные системы связи. М.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 200 с.
2. Дорнан Э. Широкополосная связь из космоса // Журнал сетевых решений/LAN. 2002. № 2. С. 14–25.
3. Томаси У. Электронные системы связи. М.: Техносфера, 2007. 1360 с.
4. Филатов В. И. Широкополосная система радиосвязи повышенной скорости передачи информации // Связь. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57889> (дата обращения: 15.08.2019).
5. Бычков В., Дмитриев Ю., Хвостов Д. Широкополосные линии связи в России в ближайшей перспективе глазами кабельщиков. URL: [http://lib.broadcasting.ru/articles2/econandmen/shirokopolosn\\_lin\\_svyazi\\_ros\\_blich\\_perspekt\\_glaz\\_kabelsc](http://lib.broadcasting.ru/articles2/econandmen/shirokopolosn_lin_svyazi_ros_blich_perspekt_glaz_kabelsc) (дата обращения: 15.08.2019).
6. Ericsson Mobility Report, June 2016, ericsson.com. URL: [https://www.abc.es/gestordocumental/uploads/internacional/EMR\\_June\\_2016\\_D5%201.pdf](https://www.abc.es/gestordocumental/uploads/internacional/EMR_June_2016_D5%201.pdf) (дата обращения: 29.08.2019).
7. Одинский А. Л. Мобильные широкополосные системы передачи цифровой информации – компании MOTOROLA // Евразия. Вести. 2008. № 7. URL: <http://www.eav.ru/publs.php?number=2008-07> (дата обращения: 29.08.2019).
8. Yang L-L., Hanzo L. Serial acquisition performance of single-carrier and multi-carrier DS-CDMA over Nakagami-m fading channels // IEEE Transactions on wireless communications. 2002. V. 1, № 4. P. 692–702.
9. Fortinet: прогноз состояния киберугроз в ближайшем будущем 20.12.2018. URL: <https://www.itweek.ru/security/article/detail.php?ID=204793> (дата обращения: 29.08.2019).
10. Ксенофонтов В., Хисамов Д., Милованов М., Золотуев А. Способ аналоговой синхронизации псевдослучайных последовательностей в условиях мощных помех организованной структуры // Информационные ресурсы России. 2015. № 2. С. 38–39.
11. Хисамов Ф. Г., Подольцев В. В. Повышение точности синхронизации при обработке коротких сегментов ПСП в системах MC-CDMA // Информатика и безопасность современного общества. 2018. № 3 (5). С. 26–35.

Статья поступила в редакцию 03.09.2019

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ажмухамедов Искандар Маратович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный университет; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой информационной безопасности; iskander\_agm@mail.ru.

**Мельников Евгений Викторович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный университет; соискатель кафедры информационной безопасности; melnikov@magnit.ru.



## UPPER BOUND OF PROBABILITY OF RECEIVING ERROR OF APERIODIC PSEUDO-RANDOM SEQUENCE AT JAMMING

*I. M. Azhmukhamedov, E. V. Melnikov*

*Astrakhan State University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The article discusses the obtained estimate of the upper bounds for the probable receiving error of the synchronizing sequence during sensor phasing of aperiodic pseudo-random sequences (CRR) in broadband communication systems in the channels of low quality with strong disturbances of natural and organized structure. The obtained results allow to design synchronization systems of pseudo-random sequences for the worst case, which guarantees their reliable operation in low-quality channels, and, unlike the well-known methods, the estimation of synchronization of aperiodic pseudo-random sequence sensors doesn't depend on the error distribution in the communication channel and the period of sequence. The appointed differences simplify the evaluation of synchronization in the operation of broadband communication systems in low-quality channels.

**Key words:** aperiodic pseudo-random sequence, broadband communication systems, jamming, test cut, synchronization, Bernstein inequality.

**For citation:** Azhmukhamedov I. M., Melnikov E. V. Upper bound of probability of receiving error of aperiodic pseudo-random sequence at jamming. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2020;1:64-72. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2020-1-64-72.

### REFERENCES

1. Malygin I. *Shirokopolosnye sistemy svyazi* [Broadband communication systems]. Moscow, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 200 p.
2. Dorman E. Shirokopolosnaia svyaz' iz kosmosa [Broadband from space]. *Zhurnal setevykh reshenii/LAN*, 2002, no. 2, pp. 14-25.
3. Tomasi W. *Electronic communications systems: fundamentals through advanced*. Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall, 1988. 373 p. (Russ. ed.: Tomasi U. *Elektronnye sistemy svyazi*. M.: Tekhnosfera, 2007. 1360 s.).
4. Filatov V. I. Shirokopolosnaia sistema radiosvyazi povyshennoi skorosti peredachi informatsii [Broadband high speed radio communication system]. *Svyaz'*, 2015, no. 81. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57889> (accessed: 15.08.2019).
5. Bychkov V., Dmitriev Iu., Khvostov D. *Shirokopolosnye linii svyazi v Rossii v blizhaishei perspektive glazami kabel'shchikov* [Broadband communication lines in Russia in the near future through the eyes of cable men]. Available at: [http://lib.broadcasting.ru/articles2/econandmen/shirokopolosn\\_lin\\_svyazi\\_ros\\_blich\\_perspekt\\_glaz\\_kabelsc](http://lib.broadcasting.ru/articles2/econandmen/shirokopolosn_lin_svyazi_ros_blich_perspekt_glaz_kabelsc) (accessed: 15.08.2019).
6. Ericsson Mobility Report, June 2016, ericsson.com. Available at: [https://www.abc.es/gestordocumental/uploads/internacional/EMR\\_June\\_2016\\_D5%201.pdf](https://www.abc.es/gestordocumental/uploads/internacional/EMR_June_2016_D5%201.pdf) (accessed: 29.08.2019).
7. Odinskii A. L. Mobil'nye shirokopolosnye sistemy peredachi tsifrovoi informatsii – kompanii MOTOROLA [MOTOROLA mobile broadband digital information systems]. *Evraziia. Vesti*, 2008, no. 7. Available at: <http://www.eav.ru/publs.php?number=2008-07> (accessed: 29.08.2019).
8. Yang L-L., Hanzo L. Serial acquisition performance of single-carrier and multi-carrier DS-SS over Nakagami-m fading channels. *IEEE Transactions on wireless communications*, 2002, vol. 1, no. 4, pp. 692-702.
9. *Fortinet: prognoz sostoiianiia kiberugroz v blizhaishem budushchem 20.12.2018* [Fortinet: forecasting cyber threats in the near future 12/20/2018]. Available at: <https://www.itweek.ru/security/article/detail.php?ID=204793> (accessed: 29.08.2019).
10. Ksenofontov V., Khisamov D., Milovanov M., Zolotuev A. Sposob analogovoi sinkhronizatsii psevdosluchainykh posledovatel'nostei v usloviakh moshchnykh pomekh organizovannoi struktury [Method of analog synchronization of pseudorandom sequences under strong jamming]. *Informatsionnye resursy Rossii*, 2015, no. 2, pp. 38-39.
11. Khisamov F. G., Podol'tsev V. V. Povyshenie tochnosti sinkhronizatsii pri obrabotke korotkikh segmentov PSP v sistemakh MC-CDMA [Improving accuracy of synchronization when processing short segments of memory bandwidth in MC-CDMA systems]. *Informatika i bezopasnost' sovremennogo obshchestva*, 2018, no. 3 (5), pp. 26-35.

The article submitted to the editors 03.09.2019

***INFORMATION ABOUT THE AUTHORS***

***Azhmukhamedov Iskandar Maratovich*** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Information Security; iskander\_agm@mail.ru.

***Melnikov Evgeny Viktorovich*** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State University; Competitor of the Department of Information Security; melnikov@magnit.ru.

