

УДК 621.391, 004.021

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.006)

Исследование вероятностных характеристик методов синхронизации ПСП: мажоритарного метода обработки синхронизирующей информации в МАС протоколах множественного доступа и метода последовательной оценки Уорда

В.В. Подольцев¹, И.М. Ажмухамедов²

¹Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация

²Астраханский государственный университет
Астрахань, Российская Федерация

Резюме: Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки методики выбора оптимальной длины синхропоследовательности при мажоритарной обработке сегмента псевдослучайной последовательности (ПСП), которая позволит снизить время синхронизации в условиях возрастания ошибок. В связи с этим, данная статья направлена на исследование вероятностных характеристик сравниваемых методов синхронизации ПСП и разработку методики выбора оптимальной длины синхропоследовательности. Ведущим методом к исследованию данной проблемы является метод последовательной оценки Уорда, позволяющий при малом отношении сигнал/помеха в полосе принимаемого сигнала ($H^2 < 1$) войти в синхронизм в течение одного периода. В статье представлены результаты имитационного моделирования для метода на основе мажоритарных проверок и метода Уорда. Построены зависимости битовой ошибки декодирования P_m от длины обрабатываемого сегмента N , зависимости символьной ошибки декодирования $P_{симв}$ от длины обрабатываемого сегмента N , зависимости среднего времени поиска ПСП от длины обрабатываемого сегмента N . Проведен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования для метода Уорда и метода на основе мажоритарного декодирования. На основании проведенных исследований разработана методика выбора оптимальной длины синхропоследовательности при мажоритарной обработке сегмента ПСП. Материалы статьи представляют практическую ценность для научных работников, докторантов, аспирантов, преподавателей, специалистов-практиков, работающих и обучающихся в области информационной безопасности.

Ключевые слова: вероятность деструктивной ошибки, битовая ошибка декодирования, среднее время поиска ПСП, длина обрабатываемого сегмента, метод мажоритарной обработки информации, метод Уорда.

Для цитирования: Подольцев В.В., Ажмухамедов И.М. Исследование вероятностных характеристик методов синхронизации ПСП: мажоритарного метода обработки синхронизирующей информации в МАС протоколах множественного доступа и метода последовательной оценки Уорда. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/PodoltsevAzhmukhamedov_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.006

Study of the probabilistic characteristics of PSP synchronization methods: a majority method for processing synchronizing information in MAS protocols for multiple access and Ward's sequential estimation method

V.V. Podoltsev¹, I.M. Azhmukhamedov²

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

²Astrakhan State University, Astrakhan, Russian Federation

Abstract: The relevance of the study is due to the need to develop a methodology for choosing the optimal sync sequence length during majority processing of a pseudo-random sequence segment (PRS), which will reduce the synchronization time in the face of increasing errors. In this regard, this article is aimed at studying the probabilistic characteristics of the compared PRS synchronization methods and developing a methodology for choosing the optimal sync sequence length. The leading method to study this problem is the Ward sequential estimation method, which allows for a small signal / noise ratio in the band of the received signal ($H^2 < 1$) to enter synchronism within one period. The article presents the results of simulation for the method based on majority checks and the Ward method. The dependences of the decoding bit error P_m on the length of the processed segment N , the dependencies of the symbolic decoding error $P_{сумм}$ on the length of the processed segment N , and the dependence of the average search time on the PRS on the length of the processed segment N are constructed. A comparative analysis of the simulation results for the Ward method and the method based on majority decoding is performed. Based on the studies, a methodology was developed for choosing the optimal length of the synchronization sequence during majority processing of the PRS segment. The materials of the article are of practical value for scientists, doctoral students, graduate students, teachers, practitioners working and studying in the field of information security.

Keywords: probability of destructive error, decoding bit error, average memory bandwidth search time, length of the processed segment, majority information processing method, Ward method.

For citation: Podoltsev V.V., Azhmukhamedov I.M. Study of the probabilistic characteristics of PSP synchronization methods: a majority method for processing synchronizing information in MAS protocols for multiple access and Ward's sequential estimation method. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(3). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/PodoltsevAzhmukhamedov_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.006 (In Russ).

Введение

Целью работы является исследование вероятностных характеристик методов синхронизации ПСП: мажоритарного метода обработки синхронизирующей информации в МАС протоколах множественного доступа [1, 2] и метода последовательной оценки Уорда [3], а также подтверждение корректности полученных результатов теоретического анализа, проведенного в [4], путем проведения имитационного моделирования.

Исследование вероятностных характеристик методов синхронизации ПСП позволит разработать методику выбора оптимальной длины синхропоследовательности.

Материалы и методы

Исследование, проведенное с помощью компьютерного моделирования, предназначено для проверки полученных ранее аналитических результатов [4], а также реализации другого подхода к решению задачи анализа вероятностных характеристик. Основные параметры системы, использованные при моделировании, представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры системы
 Table 1 – System parameters

Параметр	Величина
Образующий полином	$k = 10$
	$k = 29$
Длительность сэмпла	16e-5/2/1
Тип выходных данных	Double

Блок генератора ПСП формирует выходную последовательность согласно образуемому полиному и подает ее на вход блока биномиальных деструктивных ошибок, где в соответствии с заданной вероятностью ошибки происходит искажение передаваемого сигнала. После этого сигнал с блока деструктивных ошибок ПСП подается на вход мажоритарного декодера, где он записывается в регистр сдвига. Таким образом, на каждом такте генератора ПСП в регистре сдвига декодера формируется соответствующая фаза сигнала, которая обрабатывается в соответствии с предложенным алгоритмом. По мере накопления на выходе декодера формируется декодированная начальная фаза ПСП, которая сравнивается с переданной последовательностью. Все результаты измерений отображаются в командном окне Matlab.

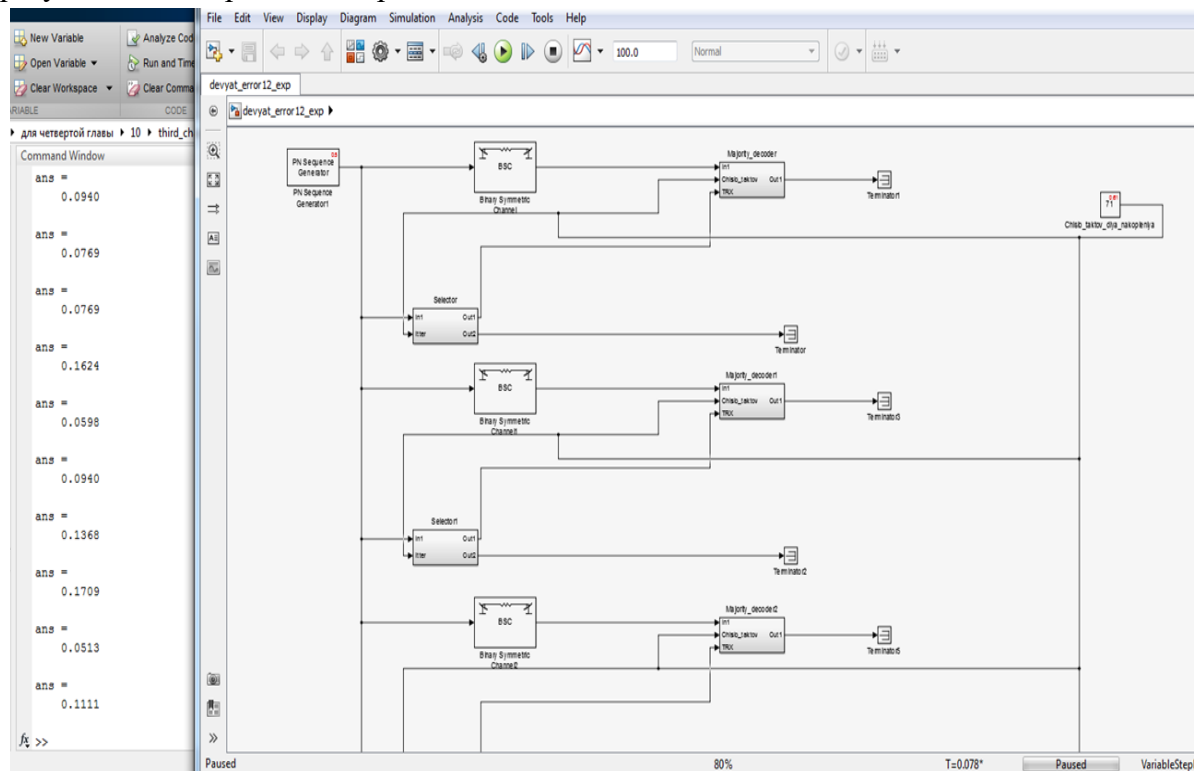


Рисунок 1 – Экранная форма, демонстрирующая работу имитационной модели
 Figure 1 – Screen form showing the simulation model

В процессе моделирования, главным образом, измерялось значение скорости ошибок BER (bit error rate, частота появления ошибочных битов) и SER (symbol error rate, частота появления символьных ошибок). Для этого проводилось 10 опытов с измерением средних BER и SER при приеме 100 различных фаз ПСП при постоянной вероятности деструктивной ошибки. В каждом опыте было задано различное начальное состояние блока деструктивных ошибок, то есть менялось значение поля «initial seed». Так задавались следующие значения: 71, 5, 17, 100, 321, 91, 1000, 56, 9999, 554. Это позволило получить адекватные данные о средней вероятности битовой ошибки. Экранная форма, демонстрирующая работу модели, представлена на Рисунке 1.

Исследование проводилось для различных параметров системы. Для метода на основе мажоритарного декодирования результаты представлены в Таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования для метода на основе мажоритарных проверок ($k = 10$)

Table 2 – Simulation results for a majority audit method ($k = 10$)

Initial seed	71	5	17	100	321	91	1000	56	9999	554	Ср. ариф.	СКО	ДИ
P	P _M (BER)												
	k=10, N=34 (m=24)												
0.01	0	9.90 *10 ⁻⁴	0	9.90 *10 ⁻⁴	0	9.90 *10 ⁻⁴	9.9 *10 ⁻⁴	0.0030	0	9.90 *10 ⁻⁴	0,0012 95	2.6642 *10 ⁻⁴	6.0210 *10 ⁻⁴
0.1	0.0972	0.0787	0.0815	0.0611	0.0722	0.0685	0.0685	0.0898	0.0694	0.0880	0,0774 9	0.0033	0.0074
0.15	0.1779	0.1516	0.1467	0.1336	0.1402	0.1197	0.1197	0.1705	0.1287	0.1434	0,1432	0.0056	0.0127
	P _{СИМВ} (SER)												
0.01	0	0.0099	0	0	0	0.0297	0.0099	0.0198	0.0099	0.0099	0.0099	0.0030	0.0067
0.1	0.4175	0.5340	0.4369	0.4272	0.4466	0.4466	0.4660	0.4757	0.4466	0.3786	0.4476	0.0116	0.0262
0.15	0.6765	0.7059	0.6765	0.6667	0.5980	0.7157	0.6569	0.6471	0.6275	0.6569	0.6628	0.0099	0.0224

Таблица 3 – Результаты имитационного моделирования для метода на основе мажоритарных проверок ($k = 29$)

Table 3 – Simulation results for a majority audit method ($k = 29$)

Initial seed	71	5	17	100	321	91	1000	56	9999	554	Ср. ариф.	СКО	ДИ
P	P _M (BER)												
	k=29, N=53 (m=24)												
0.01	0.0166	0.0148	0.0145	0.0159	0.0138	0.0114	0.0166	0.0103	0.0128	0.0169	0.0144	7.2314 *10 ⁻⁴	0.0016
0.1	0.1342	0.1256	0.1273	0.1308	0.1386	0.1372	0.1304	0.1277	0.1280	0.1332	0.1313	0.0013	0.0028
0.15	0.1883	0.1869	0.1855	0.1855	0.1921	0.1917	0.1883	0.1828	0.1776	0.2000	0.1879	0.0017	0.0039
	P _{СИМВ} (SER)												
0.01	0.2900	0.2300	0.2600	0.2900	0.2700	0.1800	0.2600	0.1800	0.2300	0.3000	0.2490	0.0124	0.0280
0.1	0.9500	0.9000	0.9400	0.9500	0.9800	0.9600	0.9300	0.9300	0.9200	0.9100	0.9370	0.0069	0.0156
0.15	0.9900	0.9800	0.9900	0.9900	0.9800	0.9900	0.9900	0.9700	0.9800	0.9700	0.9830	0.0024	0.0053

В Таблицах 4 и 5 представлены результаты моделирования для метода Уорда (по зачетному отрезку (ЗОТ)) для тех же параметров системы. Доверительный интервал (ДИ) при обработке экспериментальных результатов рассчитывался для доверительной вероятности $\alpha = 0.95$ через среднеквадратическую ошибку (СКО).

Таблица 4 – Результаты имитационного моделирования для метода Уорда (ЗОТ) ($k = 10$)
Table 4 – Simulation results for the Ward method (ZOT) ($k = 10$)

Initial seed	71	5	17	100	321	91	1000	56	9999	554	Ср. ариф.	СКО	ДИ
P	P_M (BER)												
	k=10												
0.01	0.0110	0.0098	0.0106	0.0101	0.0099	0.0100	0.0094	0.0104	0.0094	0.01	0.0101	$1.4351 \cdot 10^{-4}$	$3.2433 \cdot 10^{-4}$
0.1	0.1073	0.0877	0.0843	0.0903	0.0925	0.1090	0.1039	0.1210	0.1061	0.0957	0.0998	0.0033	0.0074
0.15	0.1487	0.1404	0.1233	0.1616	0.1375	0.1572	0.1462	0.1661	0.1531	0.1601	0.1494	0.0037	0.0084
P	$P_{\text{симв}}$ (SER)												
	k=10												
0.01	0.1047	0.0938	0.1011	0.0965	0.0947	0.0956	0.0901	0.0993	0.0901	0.0956	0.0961	0.0013	0.0030
0.1	0.6786	0.6006	0.5855	0.6119	0.6212	0.6847	0.6661	0.7246	0.6742	0.6343	0.6482	0.0126	0.0285
0.15	0.8001	0.7797	0.7318	0.8284	0.7722	0.8192	0.7941	0.8374	0.8102	0.8253	0.7998	0.0091	0.0207

Таблица 5 – Результаты имитационного моделирования для метода Уорда (ЗОТ) ($k = 29$)
Table 5 – Simulation results for the Ward method (ZOT) ($k = 29$)

Initial seed	71	5	17	100	321	91	1000	56	9999	554	Ср. ариф.	СКО	ДИ
P	P_M (BER)												
	k=29												
0.01	0.0134	0.0103	0.0092	0.0103	0.0096	0.0055	0.0087	0.0047	0.0079	0.0139	0.0094	$8.4190 \cdot 10^{-4}$	0.0019
0.1	0.1117	0.0904	0.0805	0.0954	0.0991	0.0978	0.1009	0.1130	0.1038	0.0956	0.0988	0.0027	0.0062
0.15	0.1518	0.1387	0.1364	0.1529	0.1490	0.1437	0.1417	0.1522	0.1530	0.1607	0.1480	0.0022	0.0049
P	$P_{\text{симв}}$ (SER)												
	k=29												
0.01	0.3238	0.2594	0.2351	0.2594	0.2440	0.1478	0.2238	0.1277	0.2055	0.3336	0.2360	0.0188	0.0425
0.1	0.9678	0.9359	0.9123	0.9454	0.9515	0.9494	0.9542	0.9691	0.9583	0.9457	0.9490	0.0047	0.0106
0.15	0.9916	0.9868	0.9858	0.9919	0.9907	0.9889	0.9881	0.9917	0.9919	0.9938	0.9901	$7.3951 \cdot 10^{-4}$	0.0017

На Рисунке 2 представлен график зависимости вероятности битовой ошибки P_M от длины обрабатываемого сегмента N , отражающий результаты моделирования и теоретического расчета для линейного рекуррентного регистра (ЛРР) длиной $k = 10$ и вероятности битовой деструктивной ошибки $P = 0.1$.

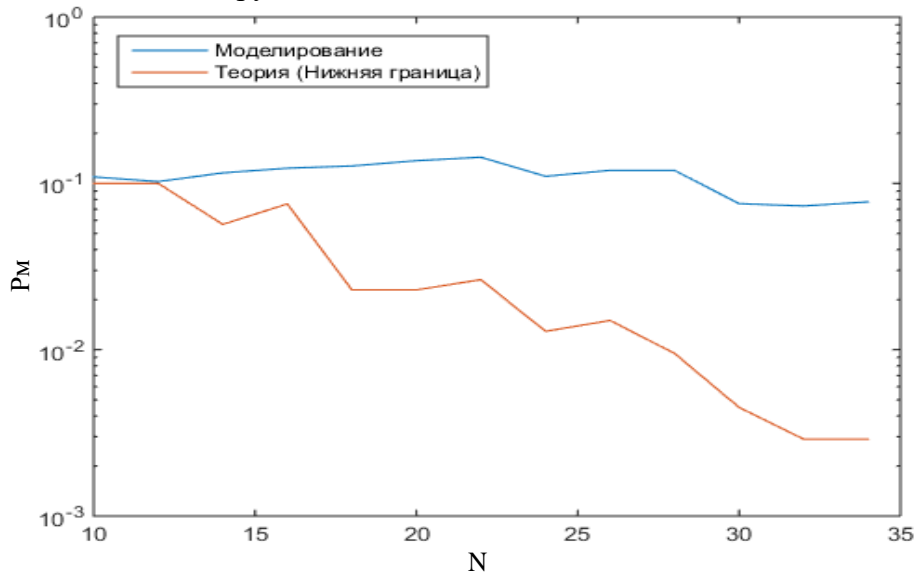


Рисунок 2 – Зависимость битовой ошибки декодирования P_M от длины обрабатываемого сегмента N

Figure 2 – The dependence of the bit error decoding P_M on the length of the processed segment N

Из графика видно, что теоретический расчет из-за сделанных допущений дает нижнюю границу вероятности битовой ошибки декодирования, но характер зависимости при больших N схож с зависимостью, полученной с помощью моделирования.

Так при $N = 22$ локальные максимумы совпадают, а при $N = 24$ - локальные минимумы, и такая тенденция сохраняется с увеличением N , что говорит об адекватности полученных результатов. Но для аппаратной реализации метода синхронизации на базе мажоритарных проверок необходимо пользоваться статистическими результатами, полученными с помощью имитационного моделирования. Теоретический расчет же более точных характеристик нецелесообразен, так как потребует значительных вычислительных мощностей, особенно при расчетах длинных ПСП.

На Рисунке 3 представлен график зависимости символьной ошибки декодирования для вероятности деструктивной ошибки $P = 0.1$.

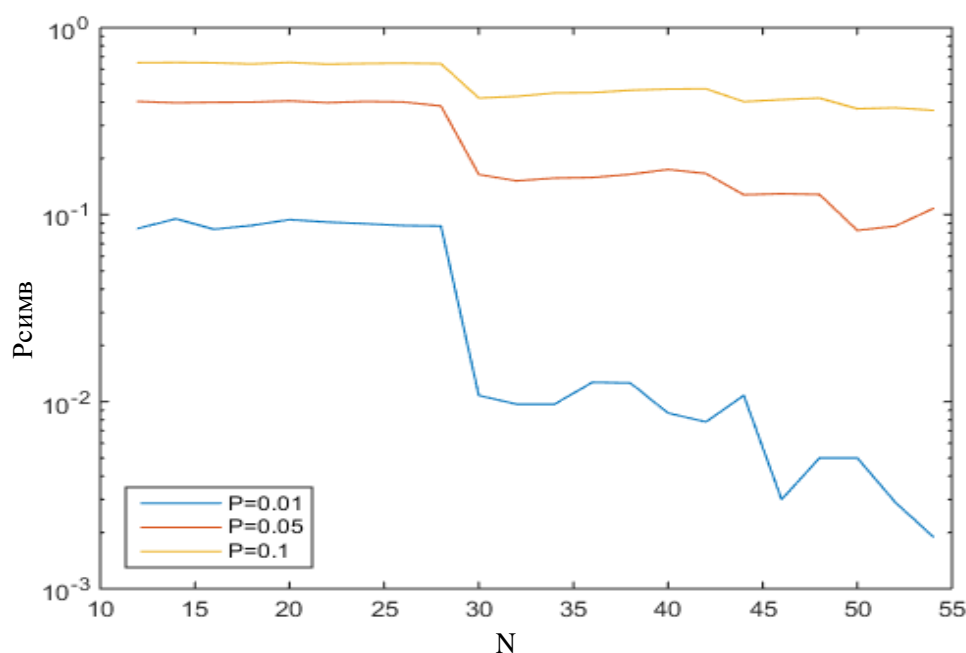


Рисунок 3 – Зависимость символьной ошибки декодирования $P_{симв}$ от длины обрабатываемого сегмента N ($k = 10$)

Figure 3 – The dependence of the symbol error of decoding $P_{симв}$ on the length of the processed segment N ($k = 10$)

На графике видно резкое изменение вероятности ошибки на длине сегмента $N = 30$. Помимо этого анализ графиков показывает, что вероятность деструктивной ошибки P не влияет на характер вероятности ошибки декодирования символа. Таким образом, можно сделать вывод, что характер изменения вероятности ошибки декодирования зависит только от распределения проверок.

В Таблице 6 представлены сводные результаты сравнительного анализа теоретического исследования и результатов моделирования для метода Уорда (ЗОТ) и метода на основе мажоритарных проверок.

Таблица 6 – Результаты сравнительного анализа для $k = 10$ и $N = 20$ ($m = 10$)
 Table 6 – Benchmark results for $k = 10$ и $N = 20$ ($m = 10$)

P _н	Метод Уорда (ЗОТ)			Метод на основе мажоритарного декодирования		
	Теория	Моделирование	ДИ	Теория	Моделирование	ДИ
	N=20					
0.01	0.01	0.0101	0.0039	2.6489*10 ⁻⁷	0,01304	0.0073
0.1	0.1	0.0998	0.0898	0.0229	0,13699	0.0898
0.15	0.15	0.1494	0.1017	0.0783	0,1933	0.1527

Анализ результатов показывает, что увеличение числа проверок на коротких сегментах ПСП может приводить к увеличению вероятности ошибки в сравнении с вероятностью битовой деструктивной ошибки. Так при разных вероятностях деструктивной ошибки метод на основе мажоритарных проверок при $N = 20$ во всех случаях дает большую вероятность битовой ошибки декодирования. Это объясняется наличием корреляции между проверками, а также разной вероятностью ошибки P_i при увеличении размерности проверки [5]:

$$P_i = 0.5 - 0.5(1 - 2P)^i, \quad (1)$$

где: P – вероятность деструктивной ошибки;
 i – вес (размерность) проверки.

Теоретический же результат дает нижнюю границу вероятности ошибки.

С использованием формулы:

$$T_c = \frac{N - k + 1}{1 - P_{\text{симв}}} + (k - 1) \quad (2)$$

и полученных результатов с помощью имитационного моделирования для $P = 0.1$ и $k = 10$ рассчитаем зависимость среднего времени поиска ПСП T_c для метода на основе мажоритарных проверок от длины обрабатываемого сегмента N и сравним его с методом Уорда (метод ЗОТ).

На Рисунке 4 представлены результаты расчета.

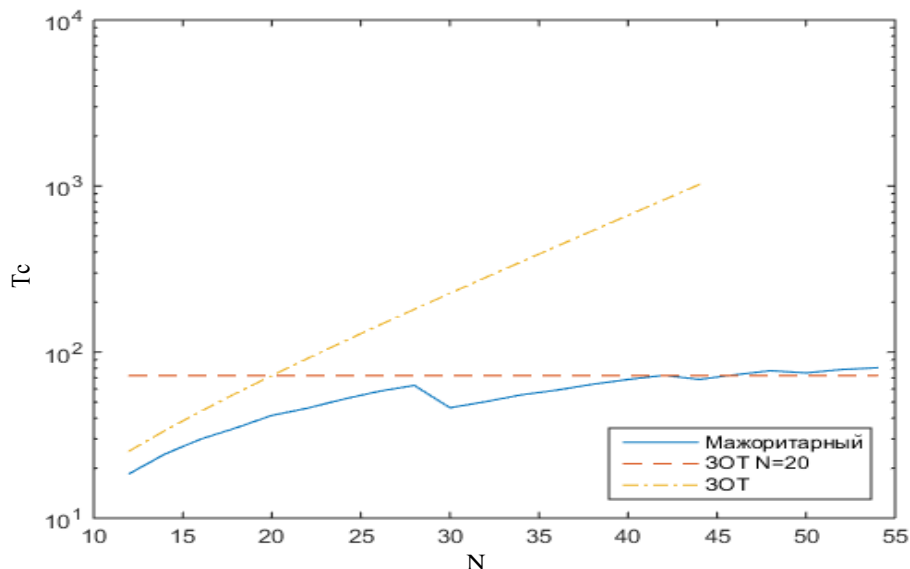


Рисунок 4 – Зависимость среднего времени поиска от длины обрабатываемого сегмента N для $k = 10$

Figure 4 – The dependence of the average search time on the length of the processed segment N for $k = 10$

Анализ зависимостей показывает, что при длине $N = 20$ метод Уорда (ЗОТ) дает худшие характеристики в сравнении с методом на основе мажоритарных проверок. Так при $N = 20$ среднее время поиска для метода на основе мажоритарной обработки

синхронизирующей информации равно 49 битам ПСП, а для метода Уорда 72, то есть выигрыш составляет порядка 30 %. При $N = 30$ среднее время поиска еще меньше – 47 бит ПСП в среднем требуется принять из канала, чтобы войти в синхронизм. В тоже время вероятность правильного декодирования бита ПСП при $N = 30$ составляет 0.07557, а при $N = 20$ составляет 0.13699, что говорит о малой вероятности ложной синхронизации при длине сегмента $N = 30$. Отметим, что вероятность битовой ошибки для метода на основе мажоритарных проверок при $N = 20$ больше, чем вероятность деструктивной ошибки, а значит больше вероятность битовой ошибки для метода Уорда, выигрыш же по времени получается за счет того, что для метода на основе мажоритарной обработки ПСП необходимо правильно принять k бит ПСП, а в случае метода Уорда (ЗОТ) – $N = k + m$ бит. Расчет с использованием Гауссовской аппроксимации дает минимум в точке $N = 23$.

На Рисунке 5 представлены результаты расчета среднего времени поиска ПСП, полученные через вероятность символьной ошибки декодирования, измеренной с помощью имитационного моделирования.

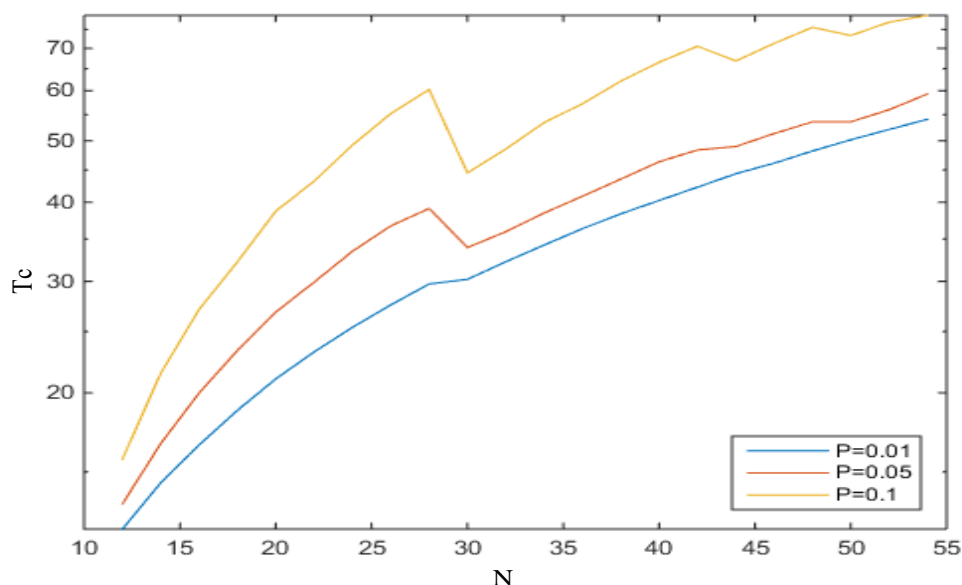


Рисунок 5 – Зависимость среднего времени поиска от длины обрабатываемого сегмента N для разных значений вероятности деструктивных ошибок ($k = 10$)

Figure 5 – The dependence of the average search time on the length of the processed segment N for different values of the probability of destructive errors ($k = 10$)

Из рисунка видно, что минимумы среднего времени поиска фактически не зависят от вероятности деструктивной ошибки P . Это означает то, что при реализации оптимального метода синхронизации ПСП на основе мажоритарных проверок при больших деструктивных ошибках можно использовать одно и то же значение длины обрабатываемого сегмента для различных вероятностей деструктивных ошибок P . При уменьшении деструктивных ошибок ($P = 0.01$) зависимость среднего времени поиска кода приобретает линейный характер, что подтверждает теоретические результаты, полученные во [6].

На Рисунке 6 представлена зависимость среднего времени поиска ПСП T_c от длины обрабатываемого сегмента N для метода синхронизации ПСП на основе мажоритарных проверок для m -последовательности с длиной ЛРР $k = 29$ и вероятности деструктивной ошибки $P = 0.01$ и $P = 0.05$, рассчитанная по результатам имитационного моделирования.

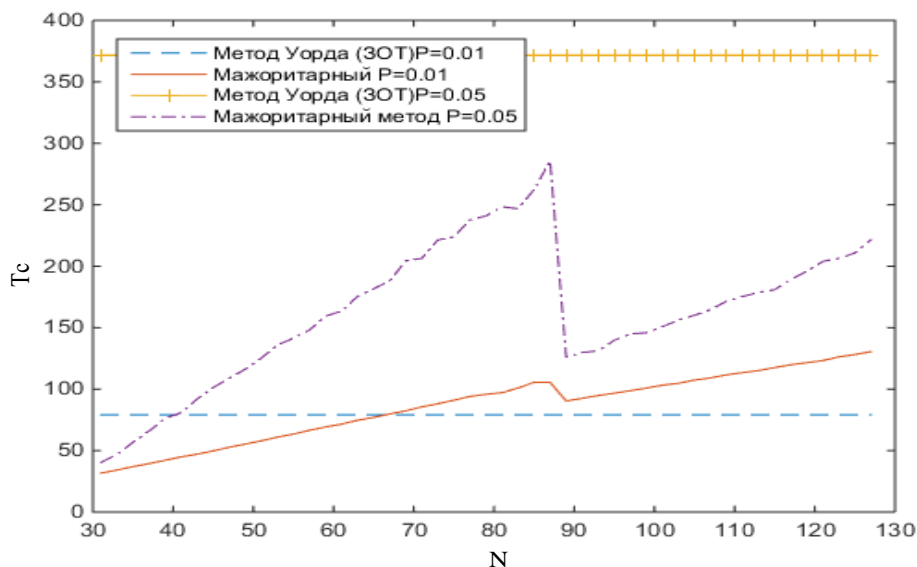


Рисунок 6 – Зависимость среднего времени поиска от длины обрабатываемого сегмента N для разных значений вероятности деструктивных ошибок ($k = 29$)
 Figure 6 – The dependence of the average search time on the length of the processed segment N for different values of the probability of destructive errors ($k = 29$)

Анализ графиков показывает, что при увеличении длины ЛРР характер зависимости не меняется. К тому же при увеличении вероятности деструктивной ошибки метод на основе мажоритарной обработки ПСП имеет значительный выигрыш по сравнению с методом Уорда (ЗОТ) для $N = 2k = 58$.

Анализ графиков, представленных на рисунках 5 и 6, в точках перегибов зависимостей среднего времени поиска показывает, что вероятность ошибки резко уменьшается при приеме числа проверок $m \geq 2k$ битов ПСП. Как показывают исследования с помощью имитационного моделирования, такой же характер зависимости получается при приеме ПСП с длиной ЛРР 53 бита. Это объясняется особенностями решающей схемы. Так при приеме отрезка ПСП с ошибкой проверки дают ошибочный результат до тех пор, пока ошибочные биты ПСП записаны в ячейках регистратора. Чтобы исправить ошибку, анализатор ПСП должен принять как минимум один отрезок ПСП длиной k бит безошибочно, иначе вероятность ошибки распознавания возрастает из-за переменной вероятности ошибки проверок различной размерности P_i (1) ввиду приема по большинству результатов проверок.

Таким образом, при увеличении вероятности деструктивной ошибки число проверочных бит ПСП « m » должно быть не менее $2k$ бит.

Результаты

Таким образом, с помощью имитационного моделирования показано, что полученные в [4] результаты являются корректными. Так моделирование показало, что зависимости вероятности ошибки имеют такой же дискретный характер, как и при теоретическом расчете. К тому же моделирование показало, что вероятность ошибки синхронизации при некоторых длинах обрабатываемого сегмента N при больших деструктивных ошибках может превышать вероятность деструктивной ошибки, что соответственно ухудшает эффективность метода на основе мажоритарных проверок в сравнении с методом последовательной оценки Уорда (метод ЗОТ). Поэтому требуется производить выборку определенных значений N для повышения его эффективности.

В общем, методику выбора длины сегмента N при больших деструктивных ошибках можно сформулировать следующим образом:

1) Так как с увеличением длины обрабатываемого сегмента N , а также длины ЛРР k теоретический расчет значительно усложняется, то для получения оптимальных значений N для длинных (апериодических) m -последовательностей достаточно провести имитационное моделирование и получить статистические оценки зависимости вероятности битовой ошибки $P_M(N)$ для требуемой вероятности деструктивной ошибки P .

2) Используя полученную зависимость $P_{\text{симв}}(N)$, рассчитать по формуле (2):

$$T_C = \frac{N - k + 1}{1 - P_{\text{симв}}} + (k - 1).$$

зависимость среднего времени поиска $T_C(N)$ для метода на основе мажоритарной обработки ПСП.

3) Приняв значение максимальной длины зачетного отрезка N равное $2k$, рассчитать среднее время поиска для метода Уорда. Таким образом, получим график аналогичный графику, представленному на Рисунке 4.

4) Проанализировать локальные минимумы полученной зависимости $T_C(N)$ и выбрать такое значение N , которое дает минимумы на исследуемом участке среднего времени поиска и вероятности ошибки декодирования. Так за верхнюю границу среднего времени поиска можно принять значение для среднего времени поиска по методу Уорда в точке N равной $2k$, тогда длину сегмента ПСП необходимо выбирать в области, где $m > 2k$. За верхнюю границу вероятности ошибки декодирования можно принять вероятность деструктивной ошибки P . Минимизация вероятности битовой ошибки фактически уменьшает вероятность ложной синхронизации.

С учетом предложенной методики для m -последовательности с длиной ЛРР $k = 29$ при высокой вероятности деструктивной ошибки длину обрабатываемого сегмента N необходимо выбрать равной 90 бит (Рисунок 6).

Полученные временные характеристики требуют экспериментального подтверждения, для чего при проведении дальнейших исследований будет разработана имитационная модель для исследования временных характеристик метода синхронизации ПСП на основе мажоритарной обработки ПСП.

Заключение

С целью исследования вероятностных характеристик и проверки, полученных в [4] теоретических результатов, в работе были получены следующие результаты:

1. С использованием разработанных имитационных моделей, проведено исследование вероятностных характеристик и получены следующие результаты:

с увеличением вероятности битовой деструктивной ошибки, вероятность ошибочного декодирования бита ПСП увеличивается;

зависимость вероятности битовой ошибки ПСП на основе мажоритарных проверок $P_M(N)$ действительно имеет дискретный характер и меняется «зигзагообразно» с появлением локальных минимумов и локальных максимумов;

вероятность битовой ошибки ПСП на основе мажоритарных проверок при увеличении числа проверок на коротких сегментах ПСП может превышать вероятность деструктивной ошибки P ;

чтобы уменьшить вероятность битовой ошибки P_M необходимо увеличивать количество проверок.

2. Установлено, что полученные в [4] результаты теоретического исследования вероятностных характеристик достаточно адекватно оценивают вероятность битовой ошибки ПСП, но не применимы для точной оценки среднего времени поиска ПСП из-за сделанных при расчете допущений. Более точные расчеты же требуют больших вычислительных мощностей, поэтому для разработчиков рекомендовано использование статистических результатов, полученных с помощью имитационного моделирования.

3. Установлено, что метод Уорда (метод ЗОТ) при увеличении деструктивной ошибки дает худшие характеристики времени синхронизации в сравнении с методом поиска ПСП на основе мажоритарной обработки ПСП.

4. Показано, что при установленных ограничениях на вероятность ложной синхронизации и максимальном времени поиска можно выбрать такую длину обрабатываемого сегмента ПСП N , при которой среднее время поиска будет минимальным при биномиальном распределении деструктивной ошибки с вероятностью P . Так для m -последовательности с длиной ЛРР $k = 10$ при вероятности деструктивной ошибки $P = 0.1$ длину обрабатываемого сегмента N необходимо выбрать равной 30 бит ($m = 20$). Тогда выигрыш по сравнению с методом Уорда (ЗОТ) будет составлять 35%.

5. С помощью имитационного моделирования получены характеристики вероятности символьной ошибки декодирования $P_{\text{симв}}$ в зависимости от длины обрабатываемого сегмента ПСП N для ПСП с длиной ЛРР $k = 29$. Установлено, что увеличение длины ЛРР не влияет на характер зависимости среднего времени поиска от длины обрабатываемого сегмента.

6. Разработана методика выбора оптимальной длины синхропоследовательности при мажоритарной обработке сегмента ПСП, позволяющая снизить время синхронизации в условиях возрастания ошибок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков И.А., Номоконов В.Н., Шебанов А.А., Яковлев Д.О. К вопросу о мажоритарном декодировании M -последовательностей. *Вопросы радиоэлектроники*. 1976;5:50-55.
2. Kilgus C. Pseudonoise code acquisition majority logic decoding. *IEEE Transactions on Communications*. 1973;21(6):772-774.
3. Уорд Р. Различение псевдослучайных сигналов методом последовательной оценки. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1966;8:20-37.
4. Подольцев В.В. Оценка вероятностных характеристик мажоритарного метода обработки коротких сегментов псевдослучайной последовательности. *Радиопромышленность*. 2020;30(1):8-15.
5. Месси Д. Пороговое декодирование. М.: Мир. 1966:208.
6. Подольцев В.В. Оценка временных характеристик мажоритарной обработки синхронизирующей информации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах множественного доступа. *Радиопромышленность*. 2019;29(3):26-34.

REFERENCES

1. Novikov I.A., Nomokonov V.N., Shebanov A.A., Yakovlev D.O. K voprosu o mazhoritarnom dekodirovanii M -posledovatel'nostej [On the question of majority decoding of M -sequences]. *Voprosy radioelektroniki*. 1976;5:50-55 (in Russian).
2. Kilgus C. Pseudonoise code acquisition majority logic decoding. *IEEE Transactions on Communications*. 1973;21(6):772-774.
3. Uord R. Razlichenie psevdosluchajny`x signalov metodom posledovatel'noj ocenki

- [Distinguishing pseudo-random signals by sequential estimation]. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1966;8:20-37 (in Russian).
4. Podoltsev V.V. Ocenka veroyatnostny`x karakteristik mazhoritarnogo metoda obrabotki korotkix segmentov psevdosluchajnoj posledovatel`nosti [Estimation of the probabilistic characteristics of the majority method for processing short segments of a pseudo-random sequence]. *Radiopromy`shlennost`*. 2020;30(1):8-15 (in Russian).
 5. Messi D. Porogovoe dekodirovanie [Threshold decoding]. M.: Mir. 1966:208 (in Russian).
 6. Podoltsev V.V. Ocenka vremenny`x karakteristik mazhoritarnoj obrabotki sinxroniziruyushhej informacii v PSP-orientirovanny`x MAC-protokolax mnozhestvennogo dostupa [Evaluation of the temporal characteristics of majority processing of synchronization information in the PRS-oriented MAC protocols of multiple access]. *Radiopromy`shlennost`*. 2019;29(3):26-34 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Подольцев Виктор Владимирович, аспирант, Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Российская Федерация.
e-mail: pvv_001@mail.ru

Viktor V. Podoltsev, Graduate Student, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

Ажмухамедов Искандар Маратович, доктор технических наук, профессор, Астраханский государственный университет, Астрахань, Российская Федерация.
e-mail: aim_agtu@mail.ru

Iskandar M. Azhmukhamedov, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation