

УДК 621.396

UDC 621.396

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА
СИНХРОНИЗАЦИИ ПСП ДЛЯ СИСТЕМ
СВЯЗИ С МНОГОЧАСТОТНЫМИ
СИГНАЛАМИ С ПОМОЩЬЮ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**PSEUDO-NOISE SEQUENCE ACQUISITION
ALGORITHM FOR MULTI-CARRIER
COMMUNICATION SYSTEMS RESEARCH
USING COMPUTER MODELING**

Лойко Валерий Иванович
Заслуженный деятель науки РФ, доктор
технических наук, профессор
*Кубанский государственный аграрный
университет, Краснодар, Россия*

Loyko Valeriy Ivanovich
Honoured science worker of the Russian Federation
Dr.Sci.Tech., professor
Kuban state agrarian university, Krasnodar, Russia

Хисамов Франгиз Гильфанетдинович
доктор технических наук, профессор
*Краснодарское высшее военное училище,
Краснодар, Россия*

Khisamov Frangiz Gilfanetdinovich
Dr.Sci.Tech., professor
Krasnodar high military academy, Krasnodar, Russia

Милованов Максим Викторович
оператор научной роты
*Краснодарское высшее военное училище,
Краснодар, Россия*

Milovanov Maksim Viktorovich
Operator of scientific department
Krasnodar high military academy, Krasnodar, Russia

Золотуев Андрей Дмитриевич
оператор научной роты
*Краснодарское высшее военное училище,
Краснодар, Россия*

Zolotuev Andrey Dmitrievich
Operator of scientific department
Krasnodar high military academy, Krasnodar, Russia

Целью данной работы является экспериментальное исследование алгоритма синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами MC-DS-CDMA, не требующего больших аппаратных затрат и способного эффективно работать на каналах низкого качества. Для этого используется специально разработанная в Simulink компьютерная модель алгоритма. Полученные результаты показывают высокую эффективность рассматриваемого способа синхронизации в сравнении с методом «зачетного отрезка». Предложенный алгоритм может найти применение в беспроводных сетях связи общего пользования и в системах специальной связи для синхронизации аperiodических псевдослучайных последовательностей

The goal of the study is to research experimentally a pseudo-noise sequence acquisition method for multicarrier communication systems of MC-DS-CDMA, that allows low hardware requirements and able to operate in low quality channels. The way of achieving this lies in using a specially developed computer model of algorithm in Simulink. The achieved results have shown high efficiency of the considered acquisition method in contrast to sequential search method. The proposed algorithm can be used in multicarrier systems for acquisition of aperiodic pseudo-noise sequences in wireless public networks and in military communication networks

Ключевые слова: СИНХРОНИЗАЦИЯ,
ПСЕВДОСЛУЧАЙНАЯ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, SIMULINK, MC-DS-
CDMA, СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ СВЯЗИ

Keywords: ACQUISITION, PSEUDO-NOISE
SEQUENCE, SIMULINK, MC-DS-CDMA,
MILITARY COMMUNICATION NETWORKS

Введение

Появление несколько десятилетий назад технологий множественного доступа на основе многочастотного мультиплексирования OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) [1, с. 29; 2, с. 173] и

многочастотного кодового разделения MC-CDMA/MC-DS-CDMA (multi-carrier direct sequence code division multiple access) [1, с. 29; 2, с. 173] заложило фундамент для развития сетей следующего поколения. В основе методов лежит принцип передачи данных на многих ортогональных (OFDM) или неортогональных поднесущих. Преимуществами технологий являются высокая спектральная эффективность и устойчивость к многолучевому распространению [1, с. 34], отчего технологии помимо сетей связи общего пользования нашли применение и в системах специальной связи [3, с. 1], в частности в военных SDR-ориентированных системах [4, с. 248; 5, с.12]. Но переход от передачи данных на одной несущей (single-carrier) к передаче на многих поднесущих (multi-carrier) неизбежно привел к увеличению аппаратной сложности приемопередающих устройств и алгоритмов обработки сигналов. Данная особенность отразилась и на методах синхронизации псевдослучайных последовательностей (ПСП), применяемых для расширения спектра в системах связи семейства MC-CDMA. В работе проводится экспериментальное исследование подоптимального способа синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами MC-DS-CDMA на основе разработанной компьютерной модели. Особенностью алгоритма является малая аппаратная сложность и эффективность на каналах низкого качества.

Методы синхронизации ПСП в многочастотных системах связи MC-DS-CDMA

Базовыми методами синхронизации ПСП являются: последовательный поиск, полихотомический поиск, беспойсковая синхронизация и методы, основанные на алгебраических особенностях синхросигналов [6, с. 18; 7, с. 10]. Фактически «многочастотность»

методов модуляции или методов множественного доступа MC-CDMA/MC-DS-CDMA определила особенности синхронизации ПСП в таких системах. Так синхронизацию в них можно рассматривать как комбинацию базовых методов. Например, в работах [8, с. G6; 9, с. 1503] предложена разновидность полихотомического метода с параллельной обработкой на каждой поднесущей, то есть с чертами беспойскового метода. Схема синхронизации построена на основе согласованных фильтров с малым числом ортогональных поднесущих. В работе [10, с. 692] рассматривается способ синхронизации ПСП для многочастотных систем с последовательным поиском, основными элементами схемы синхронизации которого являются блоки некогерентных корреляторов и блок линейного суммирования сигналов равной мощности. Общим недостатком методов в рассмотренных работах является высокая аппаратная сложность устройства синхронизации. Отметим также, что большинство известных работ посвящены исследованию синхронизации ПСП в системах связи общего пользования, работающим в отсутствие преднамеренных источников помех. В данной же работе рассматривается мажоритарный метод синхронизации, ориентированный на системы специальной связи с многочастотными сигналами, имеющий малую аппаратную сложность [11, с. 50].

Описание мажоритарного алгоритма синхронизации ПСП

Если рассматривать последовательность максимальной длины (m -последовательность), как циклический код $(2^k-1, k)$, то для каждого принятого символа последовательности можно составить систему проверочных уравнений и соответствующую проверочную матрицу, которая в силу своей цикличности может быть преобразована к виду [11, с. 52]:

$$H'=[IP^T], \quad (1)$$

"к" тактов, при этом последовательно будут формироваться символы a_1, a_2, \dots, a_k . Действительно, если для первых "к" символов состояние генератора поля принять α^0 , то сдвигая его вправо получим последовательно состояния $\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^{k-1}$, которые, включая α^0 дадут на выходе сумматора соответственно: a_1, a_2, \dots, a_k . При приеме очередного символа состояние генератора поля будет соответствовать α^{-1} , что даст на выходе сумматора символ a_1 и при последовательных сдвигах генератора вправо получим a_2, \dots, a_k . В пороговых схемах будут накапливаться значения a_i и при превышении заданного порога параллельно выдается решение о значении фазы φ_0 (рис. 1).

В системах с MC-DS-CDMA на каждой поднесущей для расширения спектра сигнала используется одна и та же ПСП [10, с. 694], поэтому в процессе синхронизации, учитывая, что в OFDM каждая поднесущая обрабатывается отдельно, целесообразно прием ПСП реализовать по мажоритарному алгоритму. Таким образом, РУ в схеме рис. 1 также как и декодирование ПСП в предлагаемом устройстве работает по мажоритарному алгоритму, принимая решение по большинству принятых элементов ПСП на каждой поднесущей.

Синхронизация ПСП обеспечивается подгоном на величину задержки равной времени вынесения решения относительно фазы принятого отрезка, которое всегда известно на приеме, и последующей проверкой корреляционным методом правильности синхронизации.

Описание модели алгоритма в среде Simulink

Для экспериментальной оценки предложенного алгоритма в Simulink была разработана модель, реализующая систему синхронизации с передачей ПСП на параллельных поднесущих. Модель позволяет экспериментально оценить вероятностные характеристики разработанной

системы синхронизации и фактически эквивалентна системам связи с MS-DS-CDMA. Блок-схема модели представлена на рисунке 2. Основными элементами модели являются: генератор ПСП, блок *repeat* (С/П), производящий последовательно-параллельное преобразование сигнала, в соответствии с количеством поднесущих, на которых передается ПСП; мажоритарный приемник, блок биномиального канала и мажоритарный декодер, блок-схема которого представлена на рисунке 3.

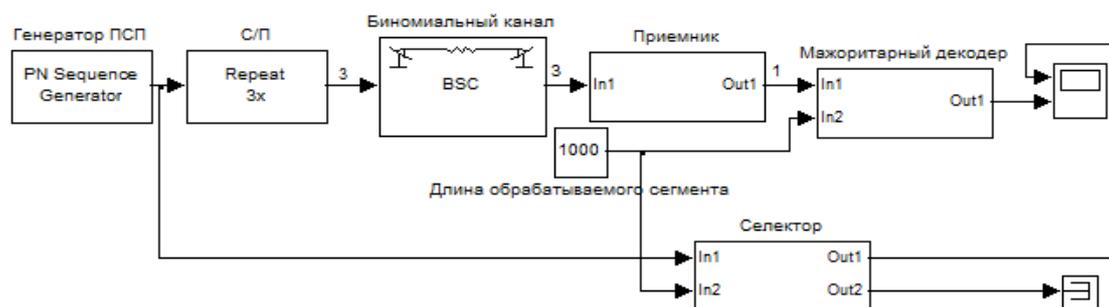


Рисунок 2 – Блок-схема модели мажоритарного алгоритма

Отметим, что основные трудности при разработке модели возникли с сохранением начальных параметров системы и промежуточных результатов. Так для упрощения процесса разработки сначала предполагалось использовать для сохранения этих данных встроенные в библиотеку Simulink блоки записи и чтения памяти *Data store memory*, но при запуске модели происходили неконтролируемые процессы «записи» и «чтения» памяти, которые приводили к неадекватным результатам. Поэтому было решено использовать блоки памяти *Memory* [12, с. 87] (см. рисунок 3), и в итоге модель усложнилась из-за необходимости дополнения ее новыми блоками, необходимыми для правильной работы системы. Данный подход обеспечил правильную работу декодера. Также из-за особенностей обработки разработанными подсистемами и встроенными в библиотеку Simulink блоками для контроля заполнения регистров сдвига *Discrete shift register* (см. рисунок 3), заполнения

счетчиков решающего устройства, контроля длины обрабатываемого сегмента и др. в разработанную схему потребовалось включить достаточно большое количество счетчиков (см. рисунок 3).

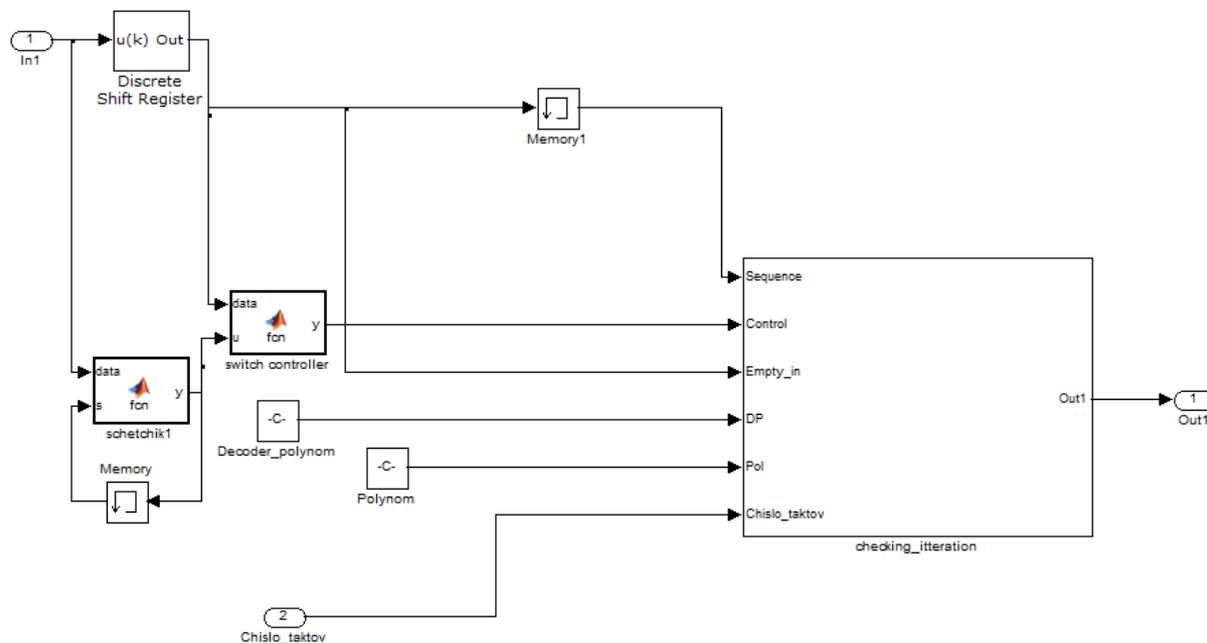


Рисунок 3 – Блок-схема подсистемы мажоритарного декодера

Экспериментальное исследование

Эксперимент по исследованию мажоритарного алгоритма синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами проводился путем измерения средней скорости битовых ошибок BER на выходе мажоритарного декодера для различных параметров системы, которые представлены в таблице 1. Помимо модели мажоритарного алгоритма в Simulink была разработана модель для исследования синхронизации по методу «Зачетного отрезка» (ЗОТ). Блок-схема модели для исследования алгоритма синхронизации по методу «ЗОТ» представлена на рисунке 4.

Таблица 1 – Параметры системы

Параметр	Величина
Образующий полином	$k=20 [20 17 0] (x^{20} + x^{17} + 1)$ $k=29 [29 27 0] (x^{29} + x^{27} + 1)$
Длительность сэмпла	16e-5/2/1
Тип выходных данных	Double
Длина обрабатываемого сегмента ПСП	1) $N=127$ 2) $N=1000$
Количество поднесущих	1) $N_c=3$ 2) $N_c=5$

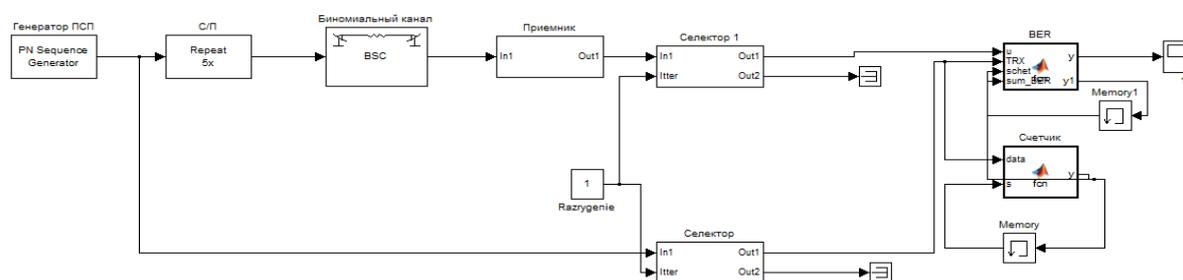


Рисунок 4 – Блок-схема модели алгоритма синхронизации по методу ЗОТ

В таблице 2 представлены результаты измерения скорости битовых ошибок BER для мажоритарного метода и метода ЗОТ, полученные экспериментально. Так увеличение числа поднесущих N_c с 3 до 5 в канале с вероятностью ошибки 0.2 уменьшает вероятность неприема мажоритарной системы синхронизации почти в 5 раз и позволяет войти в синхронизм быстрее (см. таблицу 2), в отличие от метода ЗОТ, где вероятность неприема уменьшается в два раза, но все же остается достаточно высокой ($P_H=5.75*10^{-2}$). Как и ожидалась, увеличение длины линейного рекуррентного регистра k приводит к ухудшению характеристик системы синхронизации. Увеличение же длины обрабатываемого сегмента N наоборот повышает точность синхронизации.

Таблица 2 – Результаты эксперимента

P	P_H	Метод «ЗОТ»	Мажоритарный
$N_c=3, N=127, k=29$			
0.01		0.001	0
0.1		$3.36 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
0.2		$11.04 \cdot 10^{-2}$	$5.24 \cdot 10^{-2}$
$N_c=5, N=127, k=29$			
0.01		0	0
0.1		0.01	0
0.2		$5.75 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$
$N_c=5, N=127, k=20$			
0.01		0	0
0.1		$0.1 \cdot 10^{-2}$	0
0.2		$5.62 \cdot 10^{-2}$	$0.85 \cdot 10^{-2}$

На рисунке 5 представлена зависимость $BER(P)$, полученная экспериментальным путем для мажоритарного метода и метода ЗОТ для параметров системы: $N_c=3, N=127, k=29$.

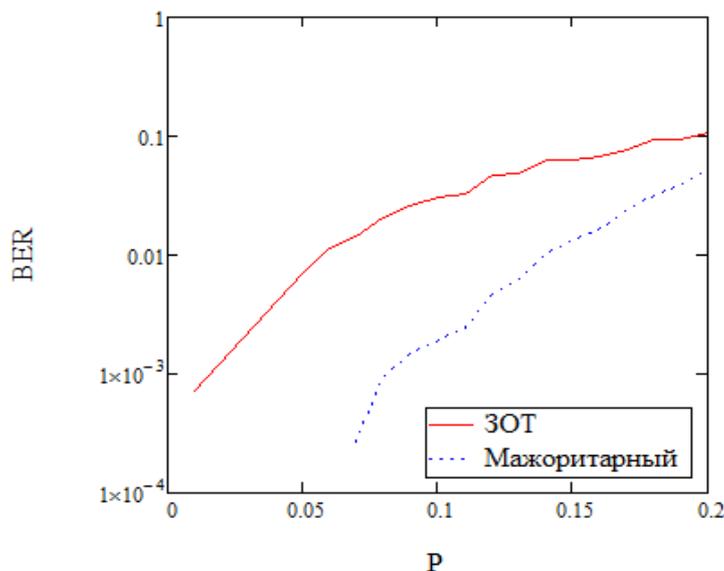


Рисунок 5 – Зависимость BER от вероятности ошибки на одной поднесущей

Полученные результаты позволяют утверждать, что подоптимальные методы синхронизации эффективны на каналах низкого качества и в отличие от метода ЗОТ позволяют войти в синхронизм быстрее.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование мажоритарного способа синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами. Исследования проводились с помощью разработанной в среде Simulink компьютерной модели алгоритма синхронизации. Ключевыми элементами модели являются мажоритарный декодер и мажоритарный приемник. Полученные результаты, показывают, что мажоритарный способ синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами может эффективно применяться на каналах низкого качества, в частности в системах специальной связи на основе программно-определяемого радио SDR военного назначения.

Список литературы

1. Fazel K., Kaiser S. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. – second edition. – Wiley, 2008. – 360 p.
2. Вишнеvский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G: Учебное пособие. - М.: Техносфера, 2009. - 471 с.
3. Wang H. Coordinated jamming and communications in an MC-CDMA system / H. Wang, Y-D. Yao, R. Wang, L. Shen, Stevens Institute of Technology [Электронный ресурс]. – Hoboken. – Режим доступа : <http://www.personal.stevens.edu/~hwang38/paper/CJamCom.pdf>
4. Jain S., Taneja N., Evolution from SDR to Cognitive Radio // Indian journal of applied research. – 2014. - № 4, Issue 8. - С. 248-253.
5. Иавараси Т., Kumarathan N., Rasadurai K., MC-CDMA based SDR for Next Generation Wireless Communications // International Journal of Computer Applications. – 2013. - V. 73, №. 13. - С. 12-19.
6. Regazzoni C., Course acquisition and tracking in DS/SS systems [Электронный ресурс]. – ISIP40. - Режим доступа : http://www.isip40.it/resources/Dispense/Radio/05_PN_ACQUISITION.pdf
7. Свириденко С. С. Основы синхронизации при приеме дискретных сигналов. – М.: Связь, 1974. С. 143.
8. Moon J., Lee Y-H., Parallel acquisition of PN sequences in Rayleigh fading channel and the application to the multi-carrier CDMA systems // 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. - 2001, № 2. - С. G6-G10.
9. Schafer P., Nakagawa M., Direct-Sequence Multi-Carrier CDMA Parallel Acquisition in a Multipath Fading Channel //1996 IEEE International Conference on Communications. – 1996. - С. 1503-1507
10. 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. - V. 1, № 4. - 2002. – С. 692-702

11. Новиков И. А., Номоконов В. Н., Шебанов А. А. и др., К вопросу о мажоритарном декодировании M-последовательностей / Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. - 1976. вып. 5. – С. 50-55.

12. Солонина А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink: Учебное пособие. - СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – С. 432.

References

1. Fazel K., Kaiser S. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. – second edition. – Wiley, 2008. – 360 p.
2. Vishnevskiy V. M., Portnoy S. L., Shakhnovich I. V. Jenciklopedija WiMAX. Put' k 4G: Uchebnoe posobie. - M.: Tekhnosfera, 2009. - 471 s.
3. Wang H. Coordinated jamming and communications in an MC-CDMA system / H. Wang, Y-D. Yao, R. Wang, L. Shen, Stevens Institute of Technology [Jelektronnyj resurs]. – Hoboken. – Rezhim dostupa: <http://www.personal.stevens.edu/~hwang38/paper/CJamCom.pdf>
4. Jain S., Taneja N., Evolution from SDR to Cognitive Radio // Indian journal of applied research. – 2014. - № 4, Issue 8. - P. 248-253.
5. Ilavarasi T., Kumarathan N., Rasadurai K., MC-CDMA based SDR for Next Generation Wireless Communications // International Journal of Computer Applications. – 2013. - V. 73, №. 13. - P. 12-19.
6. Regazzoni C., Course acquisition and tracking in DS/SS systems [Jelektronnyj resurs]. – ISIP40. – Rezhim dostupa: http://www.isip40.it/resources/Dispense/Radio/05_PN_ACQUISITION.pdf
7. Sviridenko S. S. Osnovy sinhronizacii pri prieme diskrennyh signalov. – M.: Svjaz', 1974. S. 143.
8. Moon J., Lee Y-H., Parallel acquisition of PN sequences in Rayleigh fading channel and the application to the multi-carrier CDMA systems // 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. - 2001, № 2. - С. G6-G10.
9. Schafer P., Nakagawa M., Direct-Sequence Multi-Carrier CDMA Parallel Acquisition in a Multipath Fading Channel //1996 IEEE International Conference on Communications. – 1996. - P. 1503-1507
10. 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. - V. 1, № 4. - 2002. – P. 692-702
11. Novikov I. A., Nomokonov V. N., Shebanov A. A. i dr., K voprosu o mazhoritarnom dekodirovanii M-posledovatel'nostej / Voprosy radiojelektroniki. Ser. OT. - 1976. vyp. 5. – S. 50-55.
12. Solonina A. I. Cifrovaja obrabotka signalov. Modelirovanie v Simulink: Uchebnoe posobie. - SPb.: BHV-Peterburg, 2012. – S. 432.