

УДК 621.396

UDC 621.396

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДА
СИНХРОНИЗАЦИИ ПСП ДЛЯ СИСТЕМ
СВЯЗИ ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО
НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ MC-DS-CDMA**

**THE STUDY OF THE TEMPORAL
CHARACTERISTICS OF THE SRP
SYNCHRONIZATION METHOD FOR
COMMUNICATION SYSTEMS FOR MILITARY
AND CIVIL PURPOSES ON THE BASIS OF MC-
DS-CDMA**

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

Loyko Valeriy Ivanovich
Honored 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

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

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

Целью данной работы является исследование временных характеристик алгоритма синхронизации псевдослучайной последовательности 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 разработанная математическая модель алгоритма. Полученные результаты показывают целесообразность оптимизации сигналов MC-DS-CDMA для повышения эффективности системы синхронизации. Полученные результаты могут быть применены при разработке систем связи на базе MC-DS-CDMA

The goal of the study is to research time characteristics of 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 mathematical model of algorithm. The achieved results show suitability of MC-DS-CDMA-signals optimization for pseudo-noise sequence acquisition efficiency increase. The achieved results can be applied in MC-DS-CDMA communication systems development

Ключевые слова: СИНХРОНИЗАЦИЯ;
ПСЕВДОСЛУЧАЙНАЯ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ; ВРЕМЕННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ; MC-DS-CDMA; СИСТЕМЫ
СВЯЗИ

Keywords: ACQUISITION; PSEUDO-NOISE
SEQUENCE; TIME CHARACTERISTICS; MC-DS-
CDMA; COMMUNICATION SYSTEMS

Введение

В современных войнах практически ни одна боевая операция не начинается без поддержки сил радиоэлектронной борьбы (РЭБ), обеспечивающей информационное противодействие и подавление систем

и вооружения противника. Задача достижения информационного превосходства над противником привела к разработке так называемой концепции «Сетецентрической войны», идеологами которой являются вице-адмирал ВМФ США Артур Цебровский и эксперт Министерства обороны США Джон Гарстка [1, с. 1]. Концепция предусматривает создание единого информационно-коммуникативного пространства (ЕИКП) с целью повышения эффективности управления войсками [1, с. 1]. Очевидно, что информационного превосходства над противником можно достичь только при наличии современных высокопроизводительных телекоммуникационных технологий, устойчивых к разного рода воздействиям со стороны противника.

На данный момент в странах НАТО активно разрабатываются и внедряются в практику войск системы связи военного назначения на основе концепции «Когнитивного радио» CR (Cognitive radio), неотъемлемой частью которой является концепция «Программно-определяемого радио» SDR (Software-Defined Radio) [2, с. 248; 3, с. 13]. Принцип, положенный в основу CR-концепции - это наделение радиосистем интеллектуальными способностями, позволяющими ей адаптироваться к изменяющемуся состоянию канала и обучаться [4, с. 16]. Теоретически такие технологии имеют высокий потенциал в деле достижения информационного превосходства над противником и при правильной их реализации могут способствовать созданию очень надежных и устойчивых к воздействию помех (инвариантных) систем связи.

Подобные системы поддерживают различные технологии физического и канального уровней, к которым относятся и многочастотные методы модуляции и множественного доступа OFDM и MC-DS-CDMA [5, с. 12]. При использовании для формирования сигналов MC-DS-CDMA аperiodических псевдослучайных последовательностей

(ПСП) возникает потребность в обеспечении надежной синхронизации ПСП. В работах [6, с. 1; 7, с. 36; 8, с. 54] был предложен метод синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами MC-DS-CDMA, эффективный на каналах низкого качества, который помимо систем специальной связи может применяться и в системах связи общего пользования. В данной работе проводится исследование временных характеристик предложенного метода синхронизации ПСП с использованием модифицированной математической модели [7, с. 38; 8, с. 56].

Алгоритм синхронизации ПСП для систем связи с MC-DS-CDMA

Если m -последовательность рассматривать как циклический код ($2^k - 1$, k), то для каждого символа последовательности можно составить систему проверочных уравнений и соответствующую проверочную матрицу, которая в силу своей цикличности может быть преобразована к виду [9, с. 52]:

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

где I -единичная подматрица.

Записав H' в развернутом виде, легко заметить, что последняя строка матрицы задает соотношение, связывающее различные фазы ПСП с начальной фазой φ_0 . Тогда алгоритм декодирования ПСП можно представить, как декодирование начальной фазы φ_0 с решением по большинству, то есть мажоритарный алгоритм [9, с. 53]:

$$\varphi_0 = \varphi_l [\alpha^{-l} \alpha^{-l+1} \dots \alpha^{-l+k-1}], \quad (2)$$

где: α^{-l+i} - вектор столбца матрицы.

На основе рассмотренного алгоритма декодирования ПСП был разработан способ синхронизации ПСП для систем связи MC-DS-CDMA, реализация которого представлена на рисунке 1.

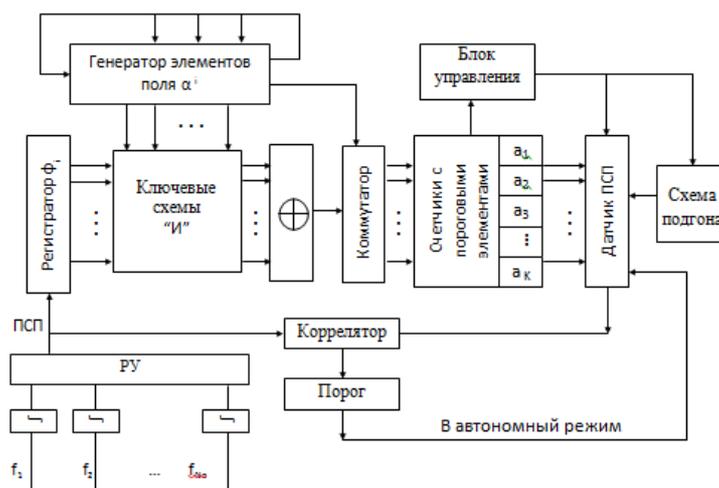


Рис. 1. Способ синхронизации ПСП для систем MC-DS-CDMA

Базовыми элементами схемы (рисунок 1) являются подсистема мажоритарного декодера и блок решающего устройства (РУ). За один такт работы приемного регистра φ_1 генератор поля α должен проработать "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 .

Блок РУ работает также по мажоритарному алгоритму, принимая решение по большинству принятых элементов ПСП на каждой поднесущей, так как в системах с MC-DS-CDMA для расширения спектра сигнала на каждой поднесущей используется одна и та же ПСП [10, с. 694]. 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.

Оптимизация среднего времени синхронизации ПСП

В работах [7, с. 38; 8, с. 56] была разработана математическая модель, позволяющая оценить помехоустойчивость метода синхронизации для систем MC-DS-CDMA. Так вероятность неприема можно рассчитать по следующей формуле [7, с. 39; 8, с. 56]:

$$P_{out}(k) = 1 - \left[1 - F \left(\frac{\sum_{i=1}^k W_i \cdot J_i \cdot N \cdot (2P_i - 1)}{2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^k W_i^2 P_i (1 - P_i) J_i N (2^k - 1)}} \right) \right]^k, \quad (3)$$

где $W_i = \lg((1 - P_i)/P_i)$ - вес проверки размерности i [11]; $J_i = C_{k-1}^{i-1}$ - число проверок размерности i в одном периоде ПСП; N - длина сегмента ПСП; $P_i = [1 - (1 - 2P_{cp})^i] / 2$ - вероятность ошибки в проверке размерности i [11]; k - длина линейного рекуррентного регистра; $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ - интеграл вероятности [12, с. 112].

Схема приема ПСП работает по мажоритарному алгоритму, поэтому, допуская, что вероятность ошибки на каждой поднесущей одинакова, среднюю вероятность ошибки P_{cp} , согласно [13, с. 361], можно рассчитать по формуле:

$$P_{cp} = \sum_{k=\frac{N_c+1}{2}}^{N_c} C_{N_c}^k P^k (1 - P)^{N_c - k} \quad (4)$$

где P - вероятность ошибки на одной поднесущей, N_c - количество поднесущих.

Системы связи с множественным доступом MC-DS-CDMA могут быть реализованы как на основе применения полосовых фильтров, так и на базе OFDM [14, с. 94]. В данной работе рассматривается система связи MC-DS-CDMA, в которой групповой сигнал формируется с применением OFDM.

В OFDM длительность символа по условию ортогональности поднесущих [15, с. 173] определяется следующим соотношением:

$$T_s = \frac{N_c}{\Delta F}, \quad (5)$$

где N_c - количество поднесущих, ΔF - ширина спектра OFDM-символа или ширина канала.

Из (4) видно, что увеличение количества поднесущих, уменьшает вероятность ошибки. Очевидно, что мы не можем бесконечно увеличивать число поднесущих, так как это, во-первых усложняет аппаратную реализацию, а во-вторых, как видно из (5), при фиксированной ширине канала ΔF автоматически приводит к увеличению длительности символа (расширение по времени), что в свою очередь увеличивает время синхронизации ПСП. Тогда можно решить задачу оптимизации среднего времени синхронизации ПСП следующего вида:

$$t_c(N_c) \rightarrow \min, \quad N_c \in S \quad (6)$$

где t_c - время синхронизации, N_c – количество поднесущих, S - множество поднесущих.

Для расчета математического ожидания времени синхронизации можно воспользоваться формулой для среднего времени возвращения серии успехов [16, с. 325]:

$$\bar{t} = \frac{1 - q^k}{P_{\text{out}} q^k}, \quad (7)$$

где k - число успехов или в нашем случае длина линейного рекуррентного регистра; $P_{ош} = 1 - q$ - вероятность ошибки декодирования одного символа ПСП.

В системах специальной связи, как правило, используются аperiodические ПСП, поэтому процесс синхронизации в таких системах реализуется по сегменту ПСП. В исследуемом алгоритме синхронизации для декодирования синхросигнала необходимо принять N символов последовательности или N фаз, при этом первые k символов сегмента будут составлять начальную фазу φ_0 . Из (3) видно, что увеличение длины обрабатываемого сегмента N повышает вероятность правильного приема. Каждый новый принятый элемент обрабатываемого сегмента ПСП порождает в декодере ПСП k новых проверок элементов начальной фазы φ_0 . Тогда увеличение длины сегмента N можно рассматривать эквивалентным увеличению длительности канального символа в N/k раз. Фактически такой подход можно рассматривать как переход от схемы приема N символов ПСП с длительностью символа T_s к схеме приема k символов ПСП с длительностью символа:

$$T_s' = \frac{N_c}{\Delta F} \frac{N}{k}, \quad (8)$$

Тогда выигрыш в помехоустойчивости в эквивалентной схеме объясняется увеличением энергии сигнала.

С учетом (8) выражение (7) можно переписать:

$$\bar{t}_c = N_c \frac{1 - q^k}{P q^k \Delta F} \frac{N}{k} \quad (9)$$

где $N \geq k$.

Вероятность ошибки декодирования одного символа ПСП можно рассчитать по следующей формуле [1, 2]:

$$P_{ош}(1) = F \left(\frac{\sum_{i=1}^k W_i \cdot J_i \cdot N \cdot (2P_i - 1)}{2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^k W_i^2 P_i (1 - P_i) J_i N (2^k - 1)}} \right), \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) рассчитаем зависимость среднего времени синхронизации от количества поднесущих. В расчетах не будем учитывать время, затрачиваемое на подгон фазы, которое в сравнении с временем декодирования начальной фазы при достаточно большом сегменте ПСП N и соответствующей высокоскоростной цифровой обработке может быть пренебрежительно мало. На рисунке 2 представлены результаты расчета для параметров системы $k=20$, $\Delta F = 10\text{МГц}$, $N=127$ и разных значений вероятности ошибки на одной поднесущей. Из графика видно, что кривая среднего времени синхронизации имеет явный минимум, так на каналах низкого качества при ошибке на одной поднесущей $P=0.15$ экстремум находится в точке для трех поднесущих ($N_c=3$), при увеличении же вероятности ошибки P до 0.2 - в точке для пяти поднесущих ($N_c=5$). Таким образом, оптимизация среднего времени синхронизации за счет изменения структуры сигнала позволяет системе связи быстрее войти в синхронизм.

На рисунке 3 представлены зависимости среднего времени синхронизации от длины обрабатываемого сегмента при оптимальном выборе структуры сигнала для параметров системы $k=20$, $\Delta F = 10\text{МГц}$. Из графиков видно, что время синхронизации при определенном N имеет некоторое минимальное значение. Это объясняется увеличением вероятности правильного приема при увеличении длины обрабатываемого сегмента ПСП.

На рисунке 4 представлены зависимости среднего времени синхронизации для параметров системы $k=20$, $\Delta F = 10\text{МГц}$, $P=0.2$ и неоптимальном выборе числа поднесущих. Из графиков видно, что неоптимальный выбор структуры сигнала значительно ухудшает

характеристики системы синхронизации. Фактически, представленные на рисунках 3 и 4 графики, являются решением задачи оптимизации по длине обрабатываемого сегмента N .

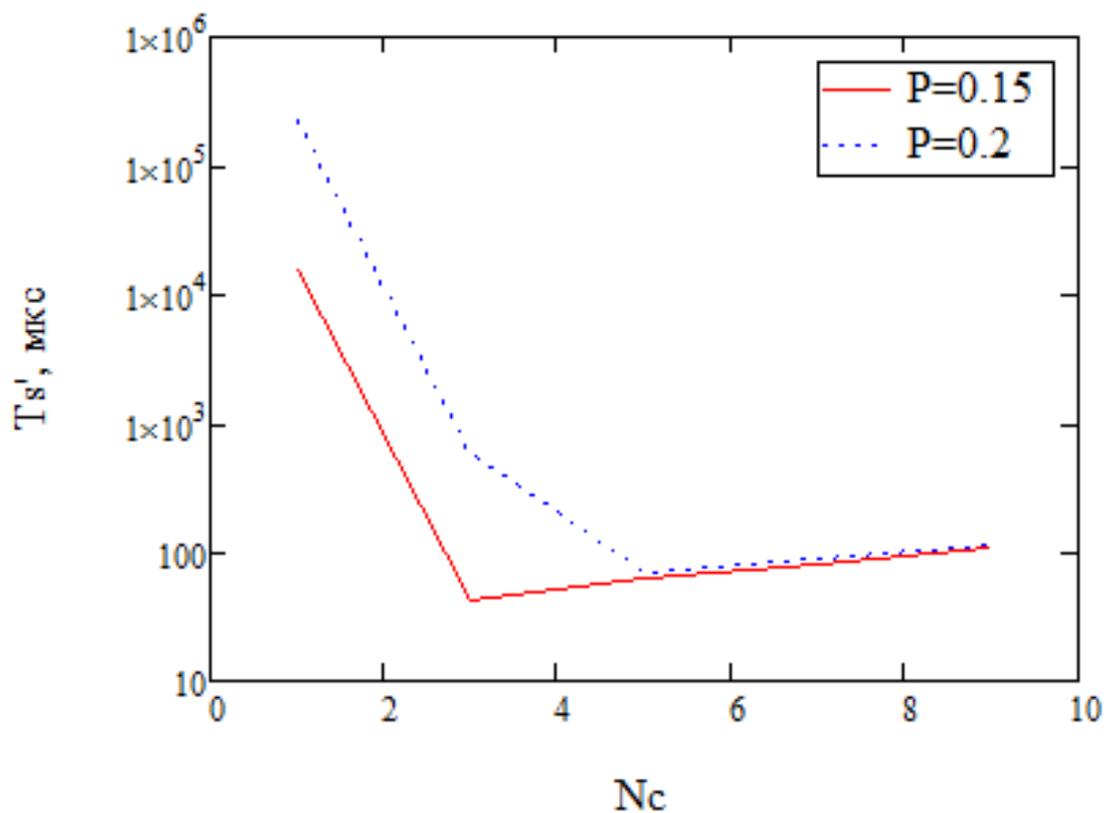


Рис. 2. Среднее время синхронизации от количества поднесущих

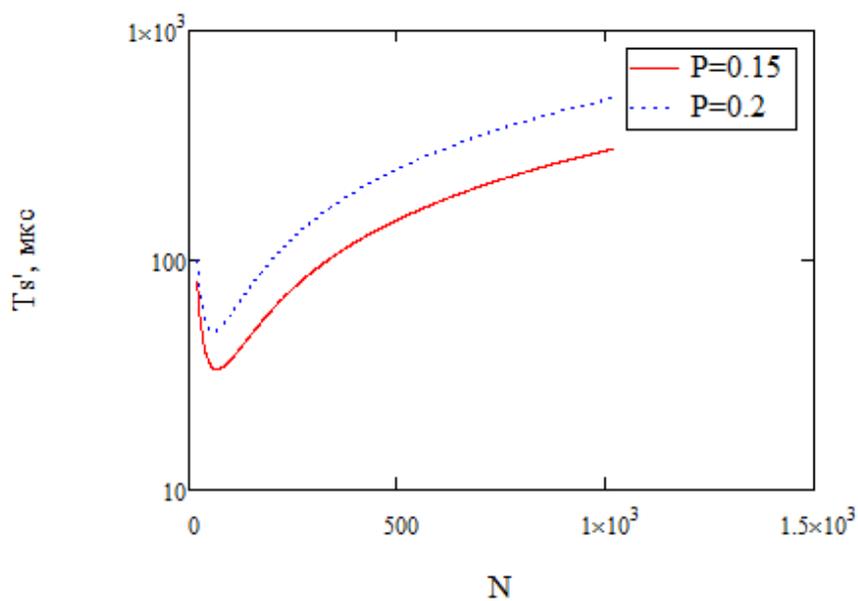


Рис. 3. Среднее время синхронизации от длины сегмента ПСП при оптимальном выборе структуры сигнала

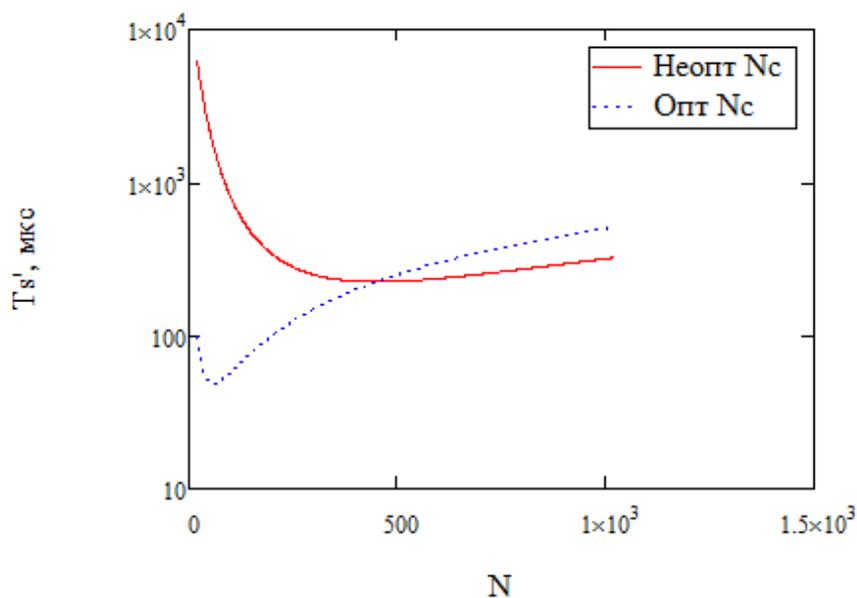


Рис. 4. Среднее время синхронизации от длины сегмента ПСП при неоптимальном выборе структуры сигнала

Как показали исследования, увеличение количества поднесущих за счет расширения спектра OFDM-символа при постоянном отношении сигнал/шум на входе приемника, то есть при одновременном расширении спектра и увеличении мощности сигнала, как и ожидалось, уменьшает время синхронизации. Увеличение же спектра сигнала при постоянной мощности сигнала на выходе передатчика увеличивает время синхронизации.

Заключение

В статье решена задача оптимизации среднего времени синхронизации для предложенного в работах [6, 7, 8] метода синхронизации ПСП для систем связи с MC-DS-CDMA. Получены аналитические соотношения для среднего времени синхронизации и проведены соответствующие расчеты, которые показали, что при

варьировании параметров системы синхронизации и сигнала MC-DS-CDMA-OFDM можно значительно уменьшить время синхронизации ПСП.

Список литературы

1. Концепция «Сетецентрической» войны для армии России: «множитель силы» или «ментальная ловушка?» [Электронный ресурс]. Сайт С. П. Курдюмова. – Режим доступа: <http://spkurdyumov.ru/networks/koncepciya-setecentricheskoj-vojni/>
2. Jain S., Taneja N., Evolution from SDR to Cognitive Radio // Indian journal of applied research. – 2014. - № 4, Issue 8. - С. 248-253.
3. Youngblood G., A Software-Defined Radio for the Masses, Part 1// QEX. - Jul/Aug., 2002. - С. 13-21.
4. Mitola J. An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio: Dissertation Doctor of Technology, Royal institute of Technology, Sweden, May 8, 2000. – 304 с.
5. Плавраси Т., Kumaratharan 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. Лойко В. И. Исследование алгоритма синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами с помощью компьютерного моделирования / В. И. Лойко, Ф. Г. Хисамов, М. В. Милованов, А. Д. Золотуев. // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2015. - №111(07). - Шифр Информрегистра: 0420900012. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/07/pdf/110.pdf>
7. Золотуев А. Д. Мажоритарный алгоритм синхронизации псевдослучайных последовательностей в системах связи с многочастотными сигналами MC-DSSS. Международный союз ученых «Наука. Технологии. Производство» # V (9), 2015 с. 36-39
8. Золотуев А. Д. Подоптимальный метод синхронизации ПСП для когнитивных систем специальной связи, Перспективы развития информационных технологий: сборник мате-риалов XXV Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2015. – с. 54-62
9. 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.
10. Yang L-L., Hanzo L., Serial acquisition performance of single-carrier and multi-carrier DS-SS-SS-SS over Nakagami-m fading channels // IEEE Transactions on wireless communications. - V. 1, № 4. - 2002.–С. 692-702
11. Мессис Д., Пороговое декодирование. – М.: Мир, 1966. – 207 с.
12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учебник для студ. Вузов / Елена Сергеевна Вентцель. – 9-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.
13. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. - М.: Советское радио, 1971. - 408 с.
14. 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.
15. Вишневецкий В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G: Учебное пособие. - М.: Техносфера, 2009. - 471 с.

16. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. тт. 1-2, -М.: Мир, 1984. – 498 с.

References

1. Kontseptsija «Setetsentricheskoy» voyni dlja armii Rossii: «Mnojitel sili» ili «mental'naja lovushka? [Jelektronnyj resurs]. Sayt S. P. Kurdjumova. - Rezhim dostupa: <http://spkurdyumov.ru/networks/koncepciya-setecentricheskoy-voyny/>
2. Jain S., Taneja N., Evolution from SDR to Cognitive Radio // Indian journal of applied research. – 2014. - № 4, Issue 8. - P. 248-253.
3. Youngblood G., A Software-Defined Radio for the Masses, Part 1// QEX. - Jul/Aug., 2002. - C. 13-21.
4. Mitola J. An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio: Dissertation Doctor of Technology, Royal institute of Technology, Sweden, May 8, 2000. – 304 с.
5. Ilavarasi T., Kumarathanan 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. Loyko V. I. Issledovanie algoritma sinkhronizatsii PSP dlja system svjazi s mnogochastotnymi signalami s pomoschju komp'yuternogo modelirovanija / V. I. Loyko, F. G. Khisamov, M. V. Milovanov, A. D. Zolotuev. // Nauchnyy zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. - Krasnodar: KubGAU, 2015. - №111(07). - Shifr Informregistra: 0420900012. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2015/07/pdf/110.pdf>
7. Zolotuev A. D. Mazhoritarniy algoritm sinkhronizatsii psevdosluchaynykh posledovatel'nostey v sistemakh svjazi s mnogochastotnymi signalami MC-DSSS. Mezhdunarodniy sojuz uchjonikh «Nauka. Tekhologii Proizvodstvo» # V (9), 2015 s. 36-39
8. Zolotuev A. D. Podoptimal'niy metod sinkhronizatsii PSP dlya kognitivnykh system spetsial'noy svjazi, Perspektivi razvitija informatsionnykh tekhnologiy: sbornik materialov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / Pod obsch. red. S.S. Chernova. – Novosibirsk: Izdatel'stvo TSRNS, 2015. – s. 54-62
9. Novikov I. A., Nomokonov V. N., Shebanov A. A. i dr., K voprosu o mazhoritarnom dekodirovanii M-posledovatel'nostey / Voprosy radiojelektroniki. Ser. OT. - 1976. vyp. 5. – S. 50-55.
10. Yang L-L., Hanzo L., Serial acquisition performance of single-carrier and multi-carrier DS-SS-SS over Nakagami-m fading channels // IEEE Transactions on wireless communications. - V. 1, № 4. - 2002. – P. 692-702
11. Messi D., Porogovoje dekodirovanije. – M.: Mir, 1966. – 207 s.
12. Ventsel' E. S. Teoriya veroyatnostey: Uchebnik dlja stud. Vuzov / Elena Sergeevna Ventsel'. – 9-e izd., ster. – M.: Izdatel'skiy tsentr «Akademija», 2003. – 576 s.
13. Andronov I. S., Fink L. M. Peredacha diskretnykh soobscheniy po parallel'nim kanalim. - M.: Sovetskoje radio, 1971. - 408 s.
14. 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.
15. Vishnevskiy V. M., Portnoy S. L., Shakhnovich I. V. Jenciklopedija WiMAX. Put' k 4G: Uchebnoe posobie. - M.: Tekhnosfera, 2009. - 471 s.
16. Fell'er V. Vvedenije v teoriju veroyatnostey i ejo prilozhenija. tt. 1-2, -M.: Mir, 1984. – 498 s.