

14. Filist S. A., Tomakova R. A., Rudenko V. V. Nechetkaya setevaya model morfologicheskogo operatora dlya formirovaniya granits segmentov [Fuzzy network model of a morphological operator for forming segment boundaries]. *Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika* [Scientific Sheets of BelSU. Series. History. Political Science. Economy. Informatics], 2011, no. 1 (96), pp. 188–195.
15. Filist S. A., Tomakova R. A., Durakov I. V. Programmnoe obespechenie avtomaticheskoy klassifikatsii rentgenogramm grudnoy kletki na osnove gibridnykh klassifikatorov [Hybrid Classification Chest Radiography Software]. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology], 2018, no. 36, pp. 59–66.
16. Filist S. A., Kudryavtsev P. S., Kuzmin A. A. Razvitie metodologii bustinga dlya klassifikatsii flyuorogramm grudnoy kletki [Development of a boosting methodology for the classification of chest fluorograms]. *Biomeditsinskaya radioelektronika* [Biomedical Radioelectronics], 2016, no. 9, pp. 10–15.
17. Filist S. A., Tomakova R. A., Brezhneva A. N., Malyutina I. A., Alekseev V. A. Kletochnye protsessory v klassifikatorakh mnogokanalnykh izobrazheniy [Cellular Processors in Multichannel Image Classifiers]. *Radiopromyshlennost* [Radio Industry], 2019, vol. 29, no. 1, pp. 45–52.
18. Chernova N. I. *Matematicheskaya statistika* [Math statistics]. Novosibirsk, 2007. 148 p.
19. *Mammographic Image Analysis Society (MIAS)*. – Available at: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/250394> (accessed 16.04.2019).
20. *The mini-MIAS database of mammograms*. – Available at: <http://peipa.essex.ac.uk/info/mias.html> (accessed 16.04.2019).

УДК 621.391 + 004.021

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ СИНХРОННОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В MAC-ПРОТОКОЛАХ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Статья поступила в редакцию 27.10.2019, в окончательном варианте – 12.11.2019.

Подольцев Виктор Владимирович, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, аспирант, e-mail: pvv_001@mail.ru

В статье рассмотрены основные области применения псевдослучайных последовательностей (ПСП), сформулированы основные критерии оценки методов синхронной обработки информации в ПСП-ориентированных MAC (media access control)-протоколах множественного доступа, проведен системный анализ известных методов синхронизации ПСП. Целью данной работы является обоснование необходимости повышения точности обработки синхронизирующей информации в ПСП-ориентированных MAC-протоколах систем управления и обработки информации, использующих на подуровне доступа ПСП. Показано, что рассмотренные методы, как правило, разрабатываются для реализации на физическом уровне и фактически сложны или нереализуемы на подуровне доступа к среде передачи MAC, где протоколы множественного доступа оперируют с уже принятыми и декодированными битовыми последовательностями. Рассмотрена синхронизация ПСП по методу Уорда и его модификациям, которые можно реализовать на подуровне доступа к среде передачи MAC. При синхронизации ПСП предложен метод мажоритарного декодирования m -последовательности. Его использование повышает вероятность синхронизации ПСП и требует меньших аппаратных затрат. Данный метод может быть легко реализован в системах обработки информации с ПСП-ориентированными протоколами множественного доступа.

Ключевые слова: синфазная обработка информации, среднее время поиска, вероятность правильной синхронизации, вероятность ложной синхронизации, методы синхронизации ПСП, метод мажоритарной обработки информации, метод Уорда

SYSTEM ANALYSIS OF METHODS OF SYNCHRONOUS PROCESSING OF INFORMATION IN MAC PROTOCOLS OF MULTIPLE ACCESS USING PSEUDORANDOM SEQUENCES

The article was received by the editorial board 27.10.2019, in the final version – 12.11.2019.

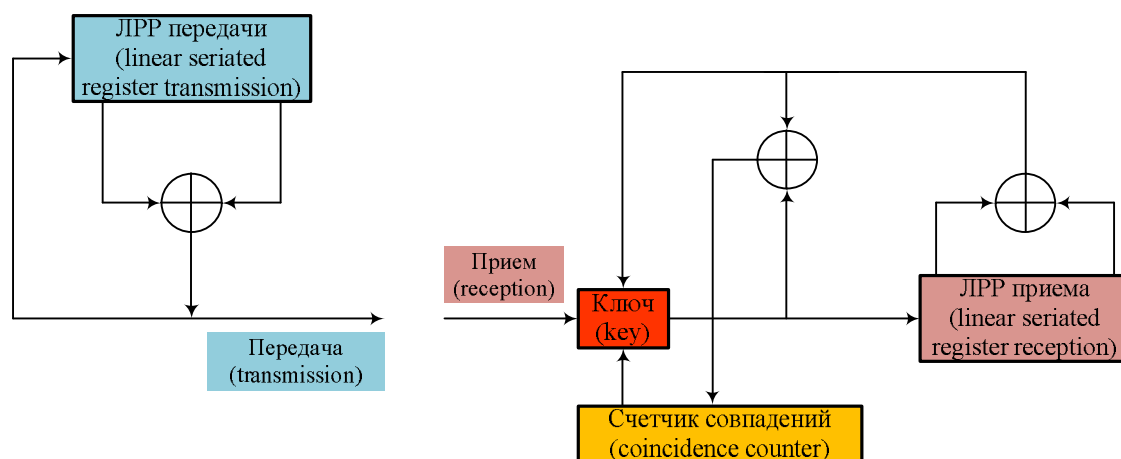
Podoltsev Viktor V., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, post-graduate student, e-mail: pvv_001@mail.ru

The article considers the main areas of application of pseudorandom sequences (PSP), formulates the main criteria for evaluating methods of synchronous information processing in PSP-oriented MAC (media access control) multiple access protocols, and carries out a system analysis of known methods for synchronizing PSP. The aim of this

work is to substantiate the need to improve the accuracy of processing synchronizing information in the PSP-oriented MAS protocols of control and information processing systems that use the PSP at the access level. It is shown that the considered methods are usually developed for implementation at the physical level and are actually complex or unrealizable at the sub-level of access to the MAC transmission medium, where the multiple access protocols operate with already received and decoded bit sequences. The synchronization of the PSP by the Ward method and its modifications, which can be implemented at the sub-level of access to the transmission medium of the MAC. When synchronizing memory bandwidth, a method for majority decoding of the m-sequence is proposed, the use of which increases the likelihood of synchronizing the memory bandwidth and requires less hardware. This method can be easily implemented in information processing systems with PSP-oriented multiple access protocols.

Key words: common-mode information processing, average search time, probability of correct synchronization, probability of false synchronization, PSP synchronization methods, majority information processing method, Ward method

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Проблема синхронизации псевдослучайных последовательностей (ПСП) неотъемлемо связана с развитием технологий распределенного спектра (spread spectrum) [19]. Не углубляясь в историю развития теории, отметим, что «возраст» научных изысканий в этой области составляет уже более шестидесяти лет [16]. Несмотря на достаточно солидный срок, проблема синхронизации ПСП до сих пор остается актуальной. Во-первых, это связано с широкой коммерциализацией технологий распределенного спектра, начатой еще в конце 70-х гг. [16] с внедрения систем мобильной телефонной связи, и продолжающимся их развитием с целью повышения эффективности. Во-вторых, актуальность проблемы можно связать с появлением передовых методов множественного доступа, значительно повышающих производительность МАС-протоколов за счет применения ПСП.

Целью данной работы является обоснование необходимости повышения точности обработки синхронизирующей информации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах систем управления и обработки информации, использующих на подуровне доступа ПСП.

Общая характеристика проблематики статьи. В настоящее время важную роль в развитии государства играют информационные технологии, представляющие собой большой класс активных сложных технических систем обработки информации и управления, эффективность функционирования которых зависит от их устойчивости к внешним злонамеренным воздействиям и точности обработки циркулирующей в них информации.

При этом одним из наиболее перспективных направлений развития информационных технологий при переходе к цифровой экономике является использование в информационных системах обработки информации ПСП-ориентированных МАС-протоколов.

За последние несколько десятилетий использование информационных технологий шагнуло далеко вперед. Повсеместное внедрение широкополосного доступа (ШПД) в интернет стало обыденным и уже не кажется чем-то далеким и недоступным для рядового пользователя. На смену только недавно развернутым в России сетям четвертого поколения (4G) скоро придут сети пятого поколения (5G). Данный факт говорит о том, что потребность в высокоскоростных технологиях ШПД с каждым годом только увеличивается, и обычному пользователю уже недостаточно той пропускной способности, которой обладали сети третьего и четвертого поколений. Таким образом, уже сейчас требуется повышение надежности и пропускной способности сетей ШПД для обработки растущих потоков информации.

Это подталкивает исследователей и разработчиков к увеличению производительности сетей за счет применения продвинутых технологий множественного доступа к среде передачи и обработки информации на основе использования ПСП, так называемых МАС-протоколов множественного доступа.

Некоторые из высокопроизводительных МАС-протоколов базируются на идее применения числовых последовательностей для защиты и контроля доступа к среде передачи и обработки информации. В таких протоколах используются как случайные числовые последовательности, так и псевдослучайные на основе генераторов m -последовательностей.

Известно, что при использовании в системах обработки информации и управления псевдослучайных последовательностей возникает потребность в обеспечении их надежной синхронизации. К настоящему времени синхронизации ПСП посвящено множество работ. Уже разработано множество различных способов синхронизации ПСП. Как правило, разработанные методы ориентированы на синхронизацию ПСП на физическом уровне, и их реализация на подуровне доступа к среде обработки информации нецелесообразна или невозможна из-за повышения вычислительной сложности и использования специфических методов обработки информации, характерных для физического уровня. Среда обработки информации при передаче оперирует дискретной бинарной последовательностью, называемой кадром (frame). Для синхронизации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах могут применяться традиционные методы, например, метод последовательной оценки Уорда, но, несмотря на простоту реализации, данный метод может быть недостаточно эффективен при синхронизации, например, апериодических ПСП.

Методы обеспечения синфазной обработки информации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах множественного доступа. Базовыми методами расширения спектра являются метод расширения прямой последовательностью DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) и метод расширения скачкообразной перестройкой частоты FHSS (Frequency Hop Spread Spectrum) [16, 8]. Помимо DSSS и FHSS есть и менее распространенные методы: метод расширения спектра с переключением временных интервалов THSS (Time Hop Spread Spectrum) и смешанные методы [8]. В системах расширенного спектра для успешного приема сигнала приемник должен обладать синхронизированной копией расширяющего или кодового сигнала [8]. Обычно процесс синхронизации ПСП реализуется в виде двух последовательных этапов [16]: поиском кода (acquisition) и слежением (tracking). На первом этапе производится грубое измерение необходимых параметров и обеспечивается предварительная оценка. На втором этапе выполняются точные частотно-временные оценки, которые в дальнейшем используются местным опорным генератором для согласования сжимающего сигнала с принятым расширяющим кодом.

Как уже было сказано выше, проблема синхронизации актуальна для некоторых ПСП-ориентированных МАС-протоколов. Например, протоколы SYN-MAC [25] и MFMAC [21] используют числовые последовательности для обеспечения механизма контроля доступа к среде обработки информации.

Основой протокола SYN-MAC [25] является так называемый «бинарный обратный отсчет», когда доступ к среде обработки или высший приоритет получает та станция, которая имеет наибольшее присвоенное ей (например, менеджером сети) двоичное число. Такой подход обеспечивает значительное повышение производительности МАС (более 90 %).

Протокол MFMAC [21] использует апериодическую m -последовательность для контроля доступа к среде обработки, распределение фаз которой обеспечивает требуемые показатели QoS (quality of service). Механизм доступа, в отличие от протокола SYN-MAC, реализуется за счет рекуррентных свойств m -последовательности, когда доступ получает та станция, МАС-адрес (фаза m -последовательности, выделенная станции) которой совпадает с текущей фазой локального генератора ПСП, синхронизированного с другими станциями сети (маркерное широкополосное резервирование [21]). Данный протокол ориентирован на применение в перспективных АТМ-подобных (asynchronous transfer mode – режим асинхронной передачи) [22], гибридных, мультисервисных сетях [25] с полностью распределенной архитектурой [22], предназначенных для труднодоступных, удаленных и малонаселенных территорий.

На рисунке 1 изображено концептуальное представление сети с полностью распределенной архитектурой.

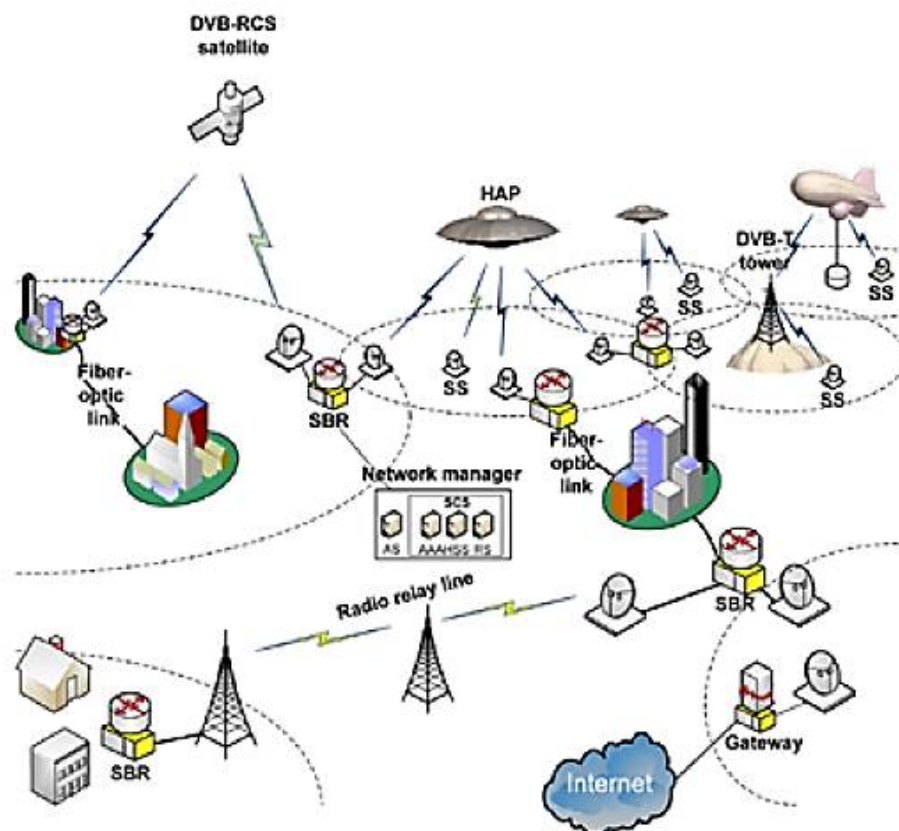


Рисунок 1 – Концептуальное представление сети с распределенной архитектурой [8]

В ее состав входит следующее:

- транспарентный (прозрачный) ретранслятор, устанавливаемый или на спутник, или на воздушную платформу HAP [14];
- мост-маршрутизаторы (броутеры – SBR) с функцией селекции данных;
- шлюз (gateway);
- серверы управления (network manager).

Сеть одновременно выполняет функции сети доступа и транспортной сети. Такая архитектура предусматривает объединение различного рода беспроводных и проводных сетей на базе единого протокола доступа к среде MAC. Очевидно, что для того чтобы такая сеть могла эффективно работать, требуется надежная синхронизация локальных генераторов m -последовательности.

Отметим, что не зря был сделан акцент на технологии построения сетей с распределенной архитектурой, так как потенциально такие сети могут стать дешевой альтернативой четвертому (4G) и пятому (5G) поколениям беспроводных сетей на малонаселенных и труднодоступных территориях [22]. Но для этого требуется исследование и решение некоторых актуальных задач, в частности повышение точности синхронизации.

Существуют различные методы поиска (синхронизации) ПСП и каждый из них имеет свои особенности:

- сложность реализации;
- помехозащищенность;
- время вхождения в синхронизм.

Все особенности зависят от области применения метода и условий его работы. Так, любая синхронизация ПСП подвергается воздействию различного рода деструктивных помех, ухудшающих точность обработки синхронизирующей информации. В результате при начальном вхождении системы в синхронизм на приемной стороне в синхросигнале возникают ошибки, которые, как правило, повышают время синхронизации. К тому же, зачастую в системах управления используются аperiodические m -последовательности, синхронизация которых чувствительна к воздействию помех из-за большой длины линейного рекуррентного регистра (ЛРР) [16].

Таким образом, область применения системы обработки информации и управления определяет требования к устройствам синхронизации, которые должны формулироваться исходя из

наихудшего случая [7]. Рассмотрим основные критерии оценки методов синхронизации и требования, предъявляемые к синхронизации ПСП.

Основные требования и критерии оценки методов синхронной обработки информации в ПСП-ориентированных МАС-протоколах множественного доступа. Базовыми критериями оценки методов синхронизации ПСП являются [11, 16]:

- среднее время поиска;
- вероятность правильной синхронизации;
- аппаратная или вычислительная сложность;
- вероятность ложной синхронизации.

Основным требованием [14], предъявляемым к системам синхронизации, в частности к системам, использующим длинные ПСП, является требование *быстрого вхождения в синхронизм*. Время вхождения системы в синхронизм обычно оценивается через *среднее время поиска* T_{cp} [8, 12]. Данный параметр зависит от самого алгоритма синхронизации, а также от вероятности правильного приема и обработки синхросигнала.

Для систем обработки информации с последовательным поиском, особенности которого будут рассмотрены чуть позже, и расширением спектра прямой последовательностью среднее время поиска, согласно [8], можно рассчитать по формуле:

$$T_{cp} = \frac{(2 - P_D)(1 + KP_{ЛС})}{P_D} (M_c \lambda T_c), \quad (1)$$

где λT_c – интервал поиска; P_D – вероятность правильного детектирования; M_c – количество элементарных сигналов; $P_{ЛС}$ – вероятность ложной синхронизации; $K \gg 1$.

Для систем обработки информации с синхронизацией по методу Уорда [14] среднее время поиска можно оценить через среднее время возвращения серии успехов [10]:

$$T_{cp} = \frac{1 - q^k}{Pq^n U}, \quad (2)$$

где k – число успехов (длина «зачетного отрезка»); U – скорость передачи, P – вероятность деструктивной ошибки, $q = 1 - P$ – вероятность правильного приема одного чипа.

Важным требованием, предъявляемым к системе синхронизации, является ее *помехоустойчивость*. Критерием оценки помехоустойчивости системы синхронизации является *вероятность правильного приема* $P_{пп}$ или *вероятность правильной синхронизации*. Чем выше эта вероятность, тем выше производительность системы, тем быстрее она войдет в синхронизм в условиях повышения вероятности деструктивных ошибок из-за воздействия помех естественной или организованной структуры. Вероятность правильной синхронизации $P_{пр}$, как правило, зави-

сит от применяемых сигналов и метода приема. Не углубляясь в описание методов приема, отметим, что в некоторых системах синхронизации ПСП помимо традиционных схем используются схемы с «мягким» принятием решений (RSSE – Recursive Soft Sequential Estimation) [24] и прием с нелинейной фильтрацией псевдослучайного сигнала, позволяющие значительно повысить вероятность правильного приема ПСП.

В системах обработки информации и управления с шумоподобными сигналами очень часто используются длинные m -последовательности. Эти же последовательности используются в некоторых МАС-протоколах. Длинные m -последовательности оказываются наиболее чувствительны к деструктивным ошибкам, что естественно, так как с увеличением длины принимаемой последовательности повышается вероятность появления или возникновения ошибки с течением времени. При вхождении же в синхронизм, например, по методу Уорда [14] требуется принять k символов ПСП, где k – длина линейного рекуррентного регистра [7]. Соответственно, при одной и той же вероятности деструктивной ошибки увеличение длины ЛРР повышает вероятность неприема ПСП в сравнении с системой синхронизации, где длина ЛРР меньше.

Немаловажным требованием к системе синхронизации является *простота реализации*, критерием оценки которой является *аппаратная или вычислительная сложность*. Так существуют методы синхронизации ПСП, использующие многоканальный корреляционный приемник, в котором на каждом канале в качестве опорного сигнала используются все фазовые сдвиги синхропоследовательности [19]. Известны также оптимальные методы приема [19], которые на сегодняшний день широко используются в спутниковых системах для синхронизации коротких ПСП. Для повышения вероятности приема ПСП в таких системах производится прием всего периода последовательности. Очевидно, что в первом и во втором случае аппаратная сложность резко возрастает

при синхронизации длинных ПСП. В первом случае значительно увеличивается количество корреляторов, а во втором – количество ячеек памяти.

Вероятность ложной синхронизации P_{λ} является еще одним критерием оценки методов синхронизации. Ложная синхронизация возникает тогда, когда система переходит в режим автономной работы в случае приема синхросигнала с ошибкой и, по сути, является вероятностью ошибочного приема ПСП.

Помимо вероятности ложной синхронизации используется еще одна вероятностная оценка, не представленная выше – вероятность пропуска синхропоследовательности (СП) P_{np} . Пропуск СП может произойти в том случае, когда СП была принята правильно, загружена в генератор ПСП и при генерации следующей фазы ПСП не совпала с фазой, поступающей ПСП. Тогда схема обработки информации принимает решение об ошибке и продолжает поиск синхропоследовательности.

Очевидно, что эти вероятности составляют полную группу событий [11]:

$$P_{nn} + P_{np} + P_{\lambda} = 1. \quad (3)$$

Эти вероятности зависят как от заданных величин (длина ЛРР), так и от случайных (распределение ошибок). Для количественной оценки цикловой синхронизации достаточно использовать только два параметра: среднее время вхождения в синхронизм T_{cp} и вероятность правильного приема P_{nn} [11].

Теперь, зная критерии оценки, можно перейти к рассмотрению известных на сегодняшний день методов синхронизации ПСП, а также оценить возможность их применения в системах обработки информации с ПСП-ориентированными МАС-протоколами множественного доступа.

Системный анализ известных методов синхронизации ПСП. Наиболее известные методы синхронизации можно разделить на следующие группы [16, 11, 24, 19]:

- последовательный поиск;
- полихотомический поиск;
- беспоисковая синхронизация;
- методы, основанные на алгебраических особенностях синхросигналов.

Методы *последовательного поиска* фазы принятого сигнала или последовательности скачков частоты позволяют снизить сложность, размер и стоимость разрабатываемой системы обработки информации. Для реализации данных методов синхронизации достаточно иметь единичный коррелятор или согласованный фильтр [11]. При последовательном поиске в каждый момент времени анализируется только одна точка области неопределенности, т.е. вычисляется единственная корреляция наблюдения и локальной сигнальной копии, характеризующейся некоторыми конкретными значениями сдвига по времени и частоте. Затем величина корреляции анализируется с целью принятия решения об истинности или ложности ячейки [16]. На рисунке 2 изображена блок-схема процесса последовательного поиска для системы с расширением спектра прямой последовательностью DSSS.

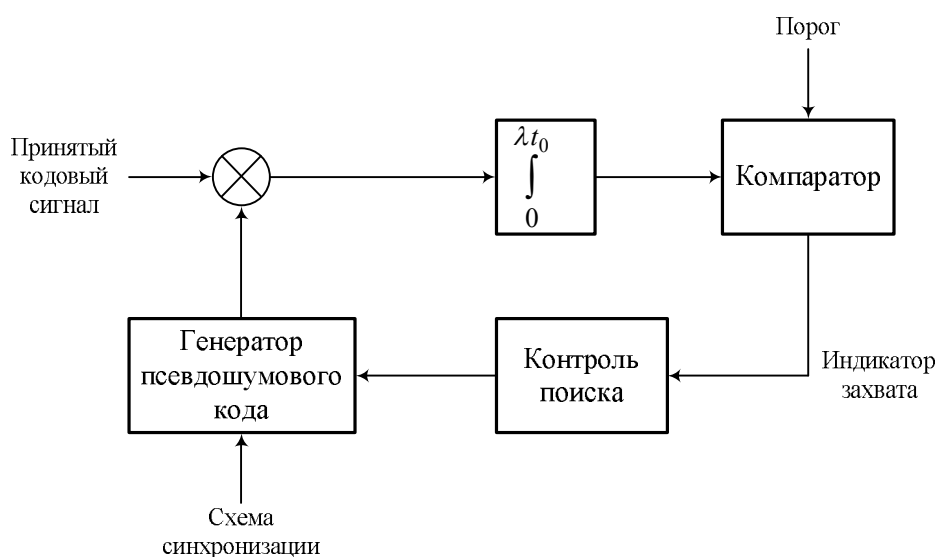


Рисунок 2 – Блок-схема процесса последовательного поиска для DSSS [8]

К методам последовательного поиска можно отнести: поиск с задержанным решением, методы последовательного анализа и методы многоэтапных процедур поиска. В работе [23] рассматривается разновидность последовательного поиска с двойным задержанным решением на базе цифрового согласованного фильтра DMF (digital Matched-filter), дающая некоторый выигрыш во времени синхронизации при возрастании деструктивных ошибок.

Как известно, изменение порога решающей схемы в системах с задержанным решением позволяет скорректировать среднее время синхронизации с целью его минимизации [23]. Данная проблема рассматривается в работе [15], в которой предлагается метод последовательного поиска с автоматическим управлением величиной порога. Таким образом, достигается минимум среднего времени синхронизации ПСП.

Однако, как показано в работах [7, 11], последовательный поиск эффективен при достаточно высоком отношении сигнал/шум.

Полихотомический метод – метод синхронизации, в процессе которого область неопределенности делится на части, и точки области неопределенности исследуются индивидуально. Определив, в какой части области неопределенности предположительно находится точка синхронизации, предполагаемая область опять делится на части. Полихотомический метод является естественным обобщением принципа дихотомии при делении области неопределенности на q частей [16]. Процедура дихотомии же сводится к разделению зоны неопределенности на две равные половины. Для дихотомии могут использоваться последовательности быстрого захвата Стиффлера, которые наилучшим образом согласуются с этой процедурой [16]. Численные оценки показывают, что выигрыш во времени поиска, сопровождающий использование данных кодов, может составить более сотни раз [16]. Опять же, отметим, что при возрастании деструктивных ошибок полихотомический метод проигрывает методам, основанным на алгебраических особенностях синхросигналов [11].

Метод беспойсковой синхронизации реализуется с помощью многоканального корреляционного приемника, в котором в качестве опорного сигнала используются все фазовые сдвиги синхропоследовательности [11]. Время поиска при этом методе равно периоду СП. Недостатком метода является сложность реализации многоканального коррелятора при увеличении длины последовательности N .

В зарубежной литературе для беспойсковой синхронизации широко используется термин «параллельный поиск». Существуют гибридные методы поиска, которые представляют собой комбинацию схем параллельного и последовательного поиска. Так, ускорение поиска можно осуществить за счет применения нескольких параллельных корреляторов, каждый из которых работает автономно и сканирует отдельную часть области неопределенности. В этом случае исходная область неопределенности просто разбивается на несколько подобластей, каждая из которых исследуется отдельным коррелятором [16]. Соответственно, время последовательного поиска уменьшается во столько раз, сколько используется параллельных корреляторов. При увеличении числа параллельных корреляторов до числа всех сдвигов фаз, параллельно-последовательный поиск становится полностью параллельным. Данная возможность находит широкое применение в реальном оборудовании и особенно эффективна при использовании дискретных компонентов, которые обязательно присутствуют в приемнике, но, с другой стороны, обычно свободны во время процедуры поиска [16]. В работе [24], а также в других работах, методы параллельного поиска рассматриваются для применения в системах обработки информации с многочастотными сигналами MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access).

Методы, основанные на алгебраических особенностях синхросигналов, базируются на декодировании кода, словами которого являются все циклические перестановки исходной последовательности. Среди данных методов можно выделить неполные алгоритмы, которые позволяют восстановить кодовое слово по правильно принятым отдельным кодовым символам или отрезку СП [14]. Например, при приеме M -последовательности, генерируемой k -разрядным LPP, для синхронизации системы достаточно безошибочно принять сегмент последовательности из k символов и использовать его в качестве начального заполнения местного опорного генератора. Отрезок из $k+m$ -символов обычно называют «зачетным отрезком», где m – порог переключения приемного датчика ПСП в автономный режим работы, соответственно, метод синхронизации – синхронизацией по «зачетному отрезку» (ЗОТ). Более известное название метода, в частности в зарубежной литературе, – метод Уорда [14]. Чтобы увеличить вероятность синхронизации, используются так называемые мажоритарные способы синхронизации, обеспечивающие исправление ошибок в зачетном отрезке. Алгебраические методы синхронизации при умеренных шумах могут сократить время поиска по сравнению с шаговым методом.

Синхронизация ПСП по методу Уорда (ЗОТ) изображена на рисунке 3.

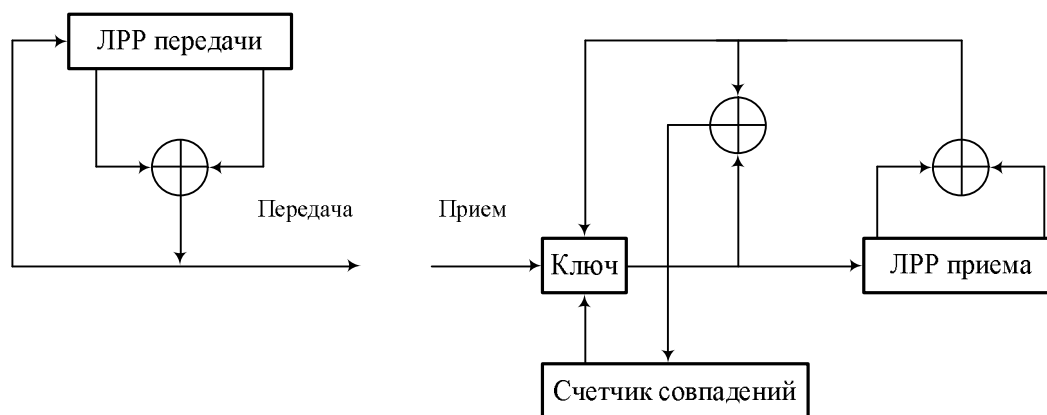


Рисунок 3 – Синхронизация по методу Уорда (ЗОТ) [11]

На схеме представлены ЛРР передачи, генерирующий ПСП в канал и ЛРР приема с разомкнутой петлей обратной связи, которая замыкается после того, как счетчик совпадений насчитает подряд $\langle m \rangle$ совпадений. Как правило, порог переключения системы в автономный режим работы $\langle m \rangle$ выбирается не более величины $\langle k \rangle$ – старшей степени порождающего полинома [11].

В работе [11] показано, что среди всех рассмотренных групп, только методы, основанные на алгебраических особенностях синхросигналов, в частности метод ЗОТ, позволяют при малом отношении сигнал/шум в полосе принимаемого сигнала ($H^2 < 1$) войти в синхронизм в течение одного периода. Другие методы, даже при небольших вероятностях деструктивных ошибок ($H^2 = 2$), для вхождения в синхронизм требуют более десятка периодов СП.

Существуют различные модификации метода Уорда. Разновидность метода последовательной оценки Уорда [22], которая может применяться в одночастотных и многочастотных (MC-CDMA) системах обработки информации, представлена на рисунке 4.

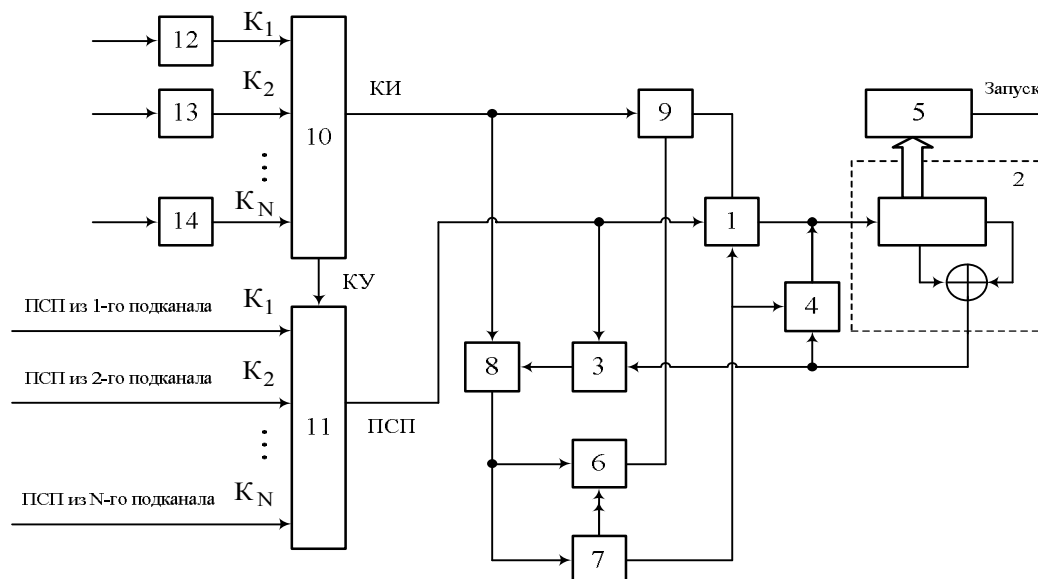


Рисунок 4 – Структурная схема устройства синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами

Метод, реализованный в качестве устройства синхронизации, предотвращает вероятность преждевременного перехода устройства в режим приема синхропосылки при возрастании организованных помех в системах обработки информации с многочастотными сигналами, обеспечивает защиту от ложной синхронизации ПСП при возрастании деструктивных ошибок и позволяет повысить точность определения факта потери синхронизации ПСП. Устройство разработано для применения на физическом уровне.

В работе [24] для улучшения эффективности последовательного поиска при возрастании деструктивных ошибок предлагается использовать схемы с «мягким» принятием решений RSSE

(Recursive Soft Sequential Estimation). Предложенный метод синхронизации дает определенный выигрыш в сравнении с традиционными схемами синхронизации.

В работе [11] рассмотрен метод последовательной оценки (ЗОТ) на основе модели много-связной цепи Маркова и реализован алгоритм нелинейной фильтрации псевдослучайного сигнала. Эффективность данного метода зависит от сложности устройства, и при высоких требованиях к системе синхронизации сложность возрастает. К тому же, метод ориентирован на реализацию системы синхронизации на физическом уровне, в то время как непригоден для подуровня МАС.

В работе [24] предлагается внутрипериодное накопление сигналов для повышения вероятности приема ПСП.

Рассмотренные методы, как правило, разрабатывались для реализации на физическом уровне и достаточно сложны или нереализуемы на подуровне доступа к среде передачи МАС, где протоколы множественного доступа оперируют с уже принятыми и декодированными битовыми последовательностями.

Существуют другие модификации метода Уорда, которые можно реализовать на подуровне доступа к среде передачи МАС. В работе [23] предложен мажоритарный метод синхронизации ПСП, использование которого повышает вероятность синхронизации ПСП. Недостатком этого метода является значительное повышение вычислительной сложности с увеличением длины линейного рекуррентного регистра. Данный недостаток был решен в работе [21], в которой рассматривается метод мажоритарного декодирования m -последовательности, требующий меньших аппаратных затрат. В работе [11] на базе данного метода декодирования был предложен метод синхронизации ПСП. Преимуществами метода являются:

- высокая помехоустойчивость;
- низкая аппаратная сложность;
- возможность применения его в системах обработки информации с ПСП-ориентированными протоколами множественного доступа.

Поэтому данный метод может быть легко реализован в подобных системах обработки информации.

Выводы. В работе проведен системный анализ и обоснование необходимости повышения точности синхронизации ПСП в системах обработки информации, использующих на подуровне доступа к среде передачи МАС псевдослучайные последовательности.

В частности, сделано следующее.

1. Рассмотрены существующие методы синхронизации ПСП. Показано, что практически все существующие методы ориентированы главным образом на использование на физическом уровне, в то время как их реализация на подуровне доступа к среде обработки информации практически невозможна, либо требует больших вычислительных мощностей. К тому же, некоторые из рассмотренных методов неэффективны при низком отношении сигнал/шум.

2. Показано, что эффективными методами являются методы, основанные на использовании алгебраических особенностей синхросигналов, в частности метод Уорда (метод ЗОТ). Одной из его разновидностей является метод на основе мажоритарного декодирования ПСП, который позволяет значительно повысить помехоустойчивость системы синхронизации. К тому же, он может быть легко реализован на подуровне доступа к среде передачи.

3. Эффективность метода на основе мажоритарного декодирования зависит от длины сегмента ПСП, который принимается приемником. В известных методах мажоритарного приема не исследованы характеристики синхронизации на коротких сегментах ПСП. Хотя именно анализ и исследование вероятностно-временных характеристик (ВВХ) позволит улучшить метод для повышения его эффективности при возрастании вероятностей деструктивных ошибок. Поэтому дальнейшие исследования в этом направлении будут посвящены рассмотрению ВВХ метода.

Библиографический список

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – Москва : Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Золотуев А. Д. Исследование временных характеристик подоптимального метода синхронизации для ПСП-ориентированных протоколов множественного доступа / А. Д. Золотуев, Ф. Г. Хисамов, Ю. В. Чернуха, А. В. Крупенин, А. С. Зеленков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 87–92.
3. Золотуев А. Д. Широкополосный доступ через высотные ретрансляторы для малонаселенных и труднодоступных территорий Сибири, Урала и Дальнего Востока / А. Д. Золотуев // Инфосфера. – 2012. – № 56. – С. 19–20.
4. Крук Б. И. Телекоммуникационные системы и сети : учебное пособие для студентов вузов связи и колледжей : в 3 т. / Б. И. Крук, В. Н. Попантопуло, В. П. Шувалов ; под ред. В. П. Шувалов. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2013. – 620 с.
5. Новиков И. А. К вопросу о мажоритарном декодировании M -последовательностей / И. А. Новиков,

- В. Н. Номоконов, А. А. Шебанов и др. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. – 1976. – Вып. 5. – С. 50–55.
6. Патент РФ № 2604345. Устройство синхронизации псевдослучайной последовательности для систем связи с многочастотными сигналами / Ф. Г. Хисамов, Д. Ф. Хисамов, Д. М. Собачкин, А. Д. Золотуев, М. В. Милованов // Бюл. – 2016. – № 34.
7. Прозоров Д. Е. Разработка алгоритмов и устройств поиска нескольких шумоподобных сигналов в системах передачи информации : дис. ... канд. техн. наук / Д. Е. Прозоров. – Киров : Вятский государственный университет, 2001. – 168 с.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – Изд. 2-е, испр. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
9. Уорд Р. Различение псевдослучайных сигналов методом последовательной оценки / Р. Уорд // Зарубежная радиоэлектроника. – 1966. – № 8. – С. 20–37.
10. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения : в 2 т. / В. Феллер. – Москва : Мир, 1984.
11. Хисамов Д. Ф. Моделирование процесса синхронизации датчиков псевдослучайных последовательностей в подавляемых системах радиосвязи : дис. ... канд. техн. наук / Д. Ф. Хисамов. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2005. – 154 с.
12. Шахтарин Б. И. Анализ среднего времени поиска шумоподобных сигналов для систем с одним поглощающим состоянием / Б. И. Шахтарин, А. В. Черныш // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2009. – № 3. – С. 114–123.
13. Aragon-Zavala A. High-Altitude Platforms for Wireless Communications / A. Aragon-Zavala, J. L. Cuevas-Ruiz, J. A. Delgado-Penin. – England : John Wiley and Sons Ltd, Wiley-Blackwell, 2008.
14. Chugg K. M. A new approach to rapid PN code acquisition using iterative message passing techniques / K. M. Chugg, M. Zhu // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2005. – Vol. 23, issue 5. – P. 884–897.
15. Chung S. A new serial search acquisition approach with automatic decision threshold control / S. Chung // IEEE 45th Vehicular Technology Conference. – 1995. – July. – P. 530–536.
16. Ipatov V. Spread Spectrum and CDMA Principles and Applications / V. Ipatov. – University of Turku and Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», John Wiley & Son, 2005. – 400 p.
17. Wang J. A Rapid Code Acquisition Scheme for DS/SS Systems / J. Wang, X. Hu, Y. Zhang, and Q. Dai // Wireless Personal Communications. – June, 2006. – Vol. 39, № 4. – P. 503–514.
18. Fazel K. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX / K. Fazel, S. Kaiser. – 2nd ed. – Wiley, 2008. – 360 p.
19. Katz M. Code acquisition in advanced CDMA networks : PHD dissertation / M. Katz. – Finland, Oulu : University of Oulu, 2002. – P. 85.
20. Kilgus C. Pseudonoise code acquisition majority logic decoding / C. Kilgus // IEEE Trans. on Communication. COM-21. – 1973. – № 6. – P. 772–774.
21. Markhasin A. Ubiquitous and Multifunctional Mobile Satellite all-IP over DVB-S Networking Technology 4G with Radically Distributed Architecture for RRD Regions / A. Markhasin // International Workshop on Satellite and Space Communications – IWSSC'07, Salzburg, Austria, 13–15 September, 2007. – P. 99–103.
22. Markhasin A. Satellite-Based Fully Distributed Mesh Hybrid Networking Technology DVB-S2/RCS-WiMAX for RRD Areas / A. Markhasin // ASMS/SPSC 2010: 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal processing for space Communications Workshop. Cagliari, Italy, September 13–15, 2010. – P. 294–300.
23. Tan X-H. Performance of acquisition in a digital matched-filter for DSSS / X-H. Tan // 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings. – 2005. – P. 927–931.
24. Yang L-L. Acquisition of m-sequences using recursive soft sequential estimation / L-L. Yang, L. Hanzo // Wireless Communications and Networking. – 2003. – Vol. 1. – P. 683–687.
25. Wu H. SYN-MAC: A distributed medium access control protocol for synchronized wireless networks / H. Wu, A. Utgikar, N-F. Tzeng // Mobile networks and applications. – 2005. – Vol. 10. – P. 627–637.

References

1. Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1985. – 384 p.
2. Zolotuev A. D., Khisamov F. G., Chernukha Yu. V., Krupenin A. V., Zelenkov A. S. Issledovanie vremennykh kharakteristik podoptimalnogo metoda sinkhronizatsii dlya PSP-orientirovannykh protokolov mnozhestvennogo dostupa [Investigation of the temporal characteristics of a suboptimal synchronization method for PSP-oriented multiple access protocols]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Advances in Modern Radio Electronics], 2016, no. 11, pp. 87–92.
3. Zolotuev A. D. Shirokopolosnyy dostup cherez vysotnye retranslyatory dlya malonaseleennykh i trudnodostupnykh territoriy Sibiri, Urala i Dalnego Vostoka [Broadband access through high-altitude repeaters for sparsely populated and inaccessible territories of Siberia, the Urals and the Far East]. *Infosfera* [Infosphere], 2012, no. 56, pp. 19–20.
4. Kruk B. I. Popantonopulo V. N., Shuvalov V. P., Telekommunikatsionnye sistemy i seti : uchebnoe posobie dlya studentov vuzov svyazi i kolledzhey [Telecommunication systems and networks: a manual for students of communication universities and colleges], in 3 vol. 4th ed., rev. and add. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2013. 620 p.
5. Novikov I. A., Nomokonov V. N., Shebanov A. A. et al. K voprosu o mazhoritarnom dekodirovanii

M-posledovatel'nostey [On the question of majority decoding of M-sequences]. *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radioelectronics]. Ser. OT, 1976, issue 5, pp. 50–55.

6. Khisamov F. G., Khisamov D. F., Sobachkin D. M., Zolotuev A. D., Milovanov M. V. Patent RF № 2604345. Ustroystvo sinkhronizatsii psevdosluchaynoy posledovatel'nosti dlya sistem svyazi s mnogochastotnymi signalami [Pseudorandom sequence synchronization device for communication systems with multi-frequency signals]. *Byulleten* [Bulletin], 2016, no. 34.

7. Prozorov D. E. *Razrabotka algoritmov i ustroystv poiska neskol'kikh shumopodobnykh signalov v sistemakh peredachi informatsii* [Development of algorithms and search devices for several noise-like signals in information transmission systems]. Kirov, Vyatka State University, 2001. 168 p.

8. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. 2nd ed., rev. Moscow, Publishing House "Vilyams", 2003. 1104 p.

9. Uord R. Razlicheniye psevdosluchaynykh signalov metodom posledovatel'noy otsenki [Distinguishing pseudorandom signals by the sequential estimation method]. *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign Radio Electronics], 1966, no. 8, pp. 20–37.

10. Feller V. *Vvedeniye v teoriyu veroyatnostey i ee prilozheniya* [Introduction to probability theory and its applications], in 2 vol. Moscow, Mir Publ., 1984.

11. Khisamov D. F. *Modelirovaniye protsessa sinkhronizatsii datchikov psevdosluchaynykh posledovatel'nostey v podavlyaemykh sistemakh radiosvyazi* [Modeling the process of synchronizing pseudorandom sequence sensors in suppressed radio communication systems]. Voronezh, 2005. 154 p.

12. Shakhtarin B. I., Chernysh A. V. Analiz srednego vremeni poiska shumopodobnykh signalov dlya sistem s odnim pogloschayushchim sostoyaniem [Analysis of the average time to search for noise-like signals for systems with one absorbing state]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana Seriya «Priborostroeniye»* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrumentation"], 2009, no. 3, pp. 114–123.

13. Aragon-Zavala A., Cuevas-Ruiz J. L., Delgado-Penín J. A. *High-Altitude Platforms for Wireless Communications*. England, Ed. John Wiley and Sons Ltd, Wiley-Blackwell, 2008.

14. Chugg K.M., Zhu M. A new approach to rapid PN code acquisition using iterative message passing techniques. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, vol. 23, issue 5, pp. 884–897.

15. Chung S. A new serial search acquisition approach with automatic decision threshold control. *IEEE 45th Vehicular Technology Conference*, 1995, July, pp. 530–536.

16. Ipatov V. *Spread Spectrum and CDMA Principles and Applications*. University of Turku and Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», John Wiley & Son, 2005. 400 p.

17. Wang J., Hu X., Zhang Y. and Dai Q. A Rapid Code Acquisition Scheme for DS/SS Systems. *Wireless Personal Communications*, Jun. 2006, vol. 39, no. 4, pp. 503–514.

18. Fazel K., Kaiser S. *Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. 2nd ed. Wiley, 2008. 360 p.

19. Katz M. *Code acquisition in advanced CDMA networks, PHD dissertation*. Finland, Oulu, University of Oulu, 2002. p. 85.

20. Kilgus C. Pseudonoise code acquisition majority logic decoding. *IEEE Trans. on Communication*. COM-21, 1973, no. 6, pp. 772–774.

21. Markhasin A. Ubiquitous and Multifunctional Mobile Satellite all-IP over DVB-S Networking Technology 4G with Radically Distributed Architecture for RRD Regions. *International Workshop on Satellite and Space Communications – IWSSC'07*, Salzburg, Austria, 13–15 September, 2007. pp. 99–103.

22. Markhasin A. Satellite-Based Fully Distributed Mesh Hybrid Networking Technology DVB-S2/RCS-WiMAX for RRD Areas. *ASMS/SPSC 2010: 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal processing for space Communications Workshop*, Cagliari, Italy, September 13–15, 2010, pp. 294–300.

23. Tan X-H. Performance of acquisition in a digital matched-filter for DSSS. *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings*, 2005, pp. 927–931.

24. Yang L-L., Hanzo L. Acquisition of m-sequences using recursive soft sequential estimation. *Wireless Communications and Networking*, 2003, vol. 1, pp. 683–687.

25. Wu H., Utgikar A., Tzeng N-F. SYN-MAC: A distributed medium access control protocol for synchronized wireless networks. *Mobile networks and applications*, 2005, vol. 10, pp. 627–637.