

УДК 621.391 + 004.021

## ОСОБЕННОСТИ синхронизации генераторов АПЕРИОДИЧЕСКИХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ И CDMA-СИСТЕМАХ СВЯЗИ

*Статья поступила в редакцией 20.10.2019, в окончательной варианте – 25.11.2019.*

**Ажмухамедов Искандар Маратович**, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности,  
e-mail: iskander\_agm@mail.ru

**Мельников Евгений Викторович**, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,  
аспирант, e-mail: melnikov@magnit.ru

**Подольцев Виктор Владимирович**, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,  
аспирант, e-mail: pvv\_001@mail.ru

В статье обоснованы объективные предпосылки активного развития широкополосных систем связи и систем связи, использующих множественный доступ с кодовым разделением (Code Division Multiple Access, CDMA), в Российской Федерации и за рубежом; место этих систем в сфере телекоммуникаций. Указаны основные преимущества таких систем при наличии мощных помех естественной природы или искусственно созданных; перспективы распространения таких систем по всему миру. Указаны методы формирования в широкополосных системах связи и CDMA шумоподобных сигналов на базе использования аperiodических псевдослучайных последовательностей, с помощью которых расширяется полоса частот для передачи информационных посылок сигнала. Подробно проанализированы особенности синхронизации генераторов аperiodических псевдослучайных последовательностей в таких системах в условиях естественных и организованных помех. Показано, что существующие аналитические оценки синхронизации аperiodических псевдослучайных последовательностей в первую очередь были разработаны для каналов достаточно хорошего и удовлетворительного качества и поэтому не могут быть в полной мере использованы в широкополосных системах связи и CDMA, которые предназначены для работы на каналах низкого качества. Указаны основные параметры для оценки эффективности синхронизации датчиков аperiodических псевдослучайных последовательностей в широкополосных системах связи и CDMA.

**Ключевые слова:** аperiodическая псевдослучайная последовательность, широкополосная связь, шумоподобный сигнал, синхронизация, организованные помехи, мультимедийный доступ с кодовым разделением каналов, система связи CDMA

### Графическая аннотация (Graphical annotation)



## FEATURES OF SYNCHRONIZATION OF GENERATORS OF ACERIODIC PSEUDORANDOM SEQUENCES IN WIDEBAND AND CDMA COMMUNICATION SYSTEMS

*The article was received by the editorial board on 20.10.2019, in the final version – 24.11.2019.*

**Azhmukhamedov Iskandar M.**, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Information Security, e-mail: iskander\_agm@mail.ru

**Melnikov Evgeny V.**, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

graduate student, e-mail: melnikov@magnit.ru

**Podoltsev Viktor V.**, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

graduate student, e-mail: pvv\_001@mail.ru

The article substantiates the objective prerequisites for the active development of broadband communication systems and communication systems using Code Division Multiple Access (CDMA) in the Russian Federation and abroad, the place of these systems in the telecommunications sector. The main advantages of such systems in the presence of powerful interference from a natural and organized structure and the prospects for their distribution around the world are indicated. Methods of generating noise-like signals in the broadband communication systems and CDMA are indicated based on the use of aperiodic pseudorandom sequences, with the help of which the frequency band is expanded for transmitting signal information packets. The features of synchronization of aperiodic pseudorandom sequence generators in such systems under natural and organized interference are analyzed in detail. It is shown that the existing analytical estimates of aperiodic pseudorandom sequence synchronization were primarily developed for channels of good enough and satisfactory quality and therefore can not be fully used in broadband communication systems and CDMA systems, which are designed to work on low quality channels. The main parameters for evaluating the efficiency of synchronization of aperiodic pseudorandom sequence sensors in communication systems of broadband communication systems and CDMA are indicated.

**Key words:** aperiodic pseudorandom sequence, broadband communication, noise-like signal, synchronization, organized interference, code division multiple access, CDMA communication system

**Введение.** В условиях усиливающейся информатизации, активного внедрения новых технологий и перехода к «цифровой экономике» резко обостряются проблемы защиты информации от злоумышленных кибератак при хранении и передаче, в том числе путем постановки организованных помех со стороны конкурирующих фирм и компаний, а также защиты объектов, представляющих интерес для злоумышленников, от несанкционированного проникновения в систему обработки информации и управления для съема конфиденциальной информации (это может осуществляться квалифицированными ИТ-специалистами – хакерами). Кроме того, большой вред системам обработки информации и управления создают так называемые «крэкеры» – компьютерные взломщики программного обеспечения.

Инциденты типа кибератак представляют большую опасность и часто приводят не только к репутационным, но и прямым финансовым потерям организаций. Скомпрометированные учетные записи могут, например, использоваться злоумышленниками для рассылки спама и/или вредоносного контента. Взлом электронного почтового ящика часто дает возможность злоумышленникам получить доступ к строго конфиденциальной информации, в том числе такой, которая может быть использована для доступа к банковским или иным счетам (в частности, такая информация часто содержится в письмах, которые пользователь получает при регистрации в тех или иных платежных системах, онлайн-сервисах, интернет-магазинах и т.п.).

Одной из возможных целей злоумышленных атак на сайты может быть полное прекращение нормальной работы веб-ресурса, провоцирование ситуации «отказ в обслуживании» с целью истребования денег за прекращение атаки или перехват конфиденциальной информации конкурента для причинения ему финансового ущерба.

Особую опасность для компаний представляют так называемые целевые атаки. В отличие от массовых атак они направлены на сети конкретных компаний, в том числе на их каналы связи. Для этого могут быть созданы мощные целенаправленные организованные помехи, нарушающие функционирование автоматизированных систем управления организацией, в том числе систем с дистанционным доступом к базам данных по каналам связи.

Целевые атаки чаще всего направлены на компании, хранящие или обрабатывающие информацию, используя которую преступники могут получить незаконную прибыль. Это могут быть, в частности, следующие типы компаний:

- банки (цель злоумышленников – получить доступ к данным и осуществить незаконный перевод средств с банковских счетов пользователей);
- биллинговые системы компаний-операторов связи, через которые можно получить доступ к учетным записям пользователей или украсть ценную информацию.

С каждым годом число кибератак растет, с их помощью конкуренты и киберпреступники могут быстро обеспечить себе незаконный доход. При этом набор приемов, используемых злоумышленниками, пополняется едва ли не каждый месяц. В частности, угрозы существуют для радиоканалов, по которым осуществляется передача коммерческой информации между корпоративными сетями подразделений и объектов компании, находящимися на большом удалении от них. При таких условиях важно переходить к широкополосным системам связи и протоколам множественного доступа с кодовым разделением (Code Division Multiple Access, CDMA), которые толерантны к организованным помехам злоумышленников и тем самым обеспечивают эффективную защиту от различных видов кибератак.

В настоящее время радиосвязь играет важнейшую роль в тех местностях, где создание кабельных каналов связи технически трудно реализуемо или является экономически не выгодным. Также радиосвязь важна для обеспечения работы организаций с мобильными пользователями.

Особенно широко применяется радиосвязь для управления бизнесом и филиалами компании, территориально разнесенными на большие расстояния, в том числе находящимися и за пределами государства. Обычно радиосвязь, в силу присущих ей свойств, легко доступна для радиовоздействий конкурентов или злоумышленников, которые могут специально «ставить» организованные помехи большой интенсивности. Кроме того, информацию, передаваемую по радиоканалам, значительно легче перехватить, чем в случае использования кабельных каналов связи.

При переходе к широкополосным системам связи и протоколам CDMA повышается надежность управления территориально разнесенными объектами компании и обеспечивается непрерывность и устойчивость управления, эффективная защита от организованных помех.

В таких системах связи в большинстве случаев устойчивость по отношению к случайным и преднамеренно сгенерированным помехам обеспечивается путем использования сигналов, имеющих сложную внутреннюю структуру, кодирование которой реализуется с помощью аperiodических псевдослучайных последовательностей (АПСП). Для декодирования и выделения полезного сигнала на принимающей стороне должна быть сгенерирована такая же АПСП, которая была использована при отправке.

Только при выполнении этого условия можно обеспечить надежное функционирование широкополосных и CDMA-систем связи. Это выдвигает задачу обработки синхронизирующей информации (СИ) при фазировании датчиков АПСП таких систем связи в важную и самостоятельную область исследования. Без научной проработки вопросов обработки синхронизирующей информации в каналах низкого качества практически сложно обеспечить эффективное функционирование коммерческих широкополосных и CDMA-систем связи, инвариантных к организованным помехам в условиях целенаправленных злоумышленных атак конкурирующей стороны или киберпреступников.

В такой постановке задача обработки синхронизирующей информации при принудительном запуске АПСП решается впервые. Известные методы обработки СИ при запуске датчиков псевдослучайных последовательностей (ПСП) разрабатывались, как правило, для каналов достаточно хорошего качества с биномиальным распределением ошибок для получения простых математических выражений, пригодных для инженерных расчетов.

Однако моделирование процесса синхронизации АПСП в нестационарных дискретных каналах низкого качества, подверженных организованным помехам, сильно усложняется из-за сложности получения математических оценок обработки СИ при неизвестных законах распределения организованных помех. Поэтому задача оценки методов обработки СИ и параметров фазирования АПСП в условиях организованных помех является актуальной, обладает новизной и имеет свою специфику решения, не позволяющую напрямую применить известные методы. Рассмотрим специфику использования шумоподобных сигналов (ШПС).

Шумоподобные сигналы (называемые иногда сложными сигналами) часто используются в широкополосных и CDMA-системах связи. При этом их база изменяется согласно закону изменения АПСП [3–12]. Для декодирования и отфильтровывания таких сигналов необходимо обеспечить синхронизацию датчиков АПСП на передающей и приемной сторонах. То есть перед началом связи в таких системах связи возникает проблема синхронизации АПСП [3, 9, 10], которая должна осуществляться применительно к специфике функционирования указанных систем связи, которая подробно рассмотрена ниже.

Шумоподобные сигналы имеют ряд преимуществ перед обычными сигналами, а именно: обладают высокой помехоустойчивостью, скрытностью, инвариантностью к мощным помехам естественной и организованной структуры, уменьшают мощность передатчиков, увеличивают даль-

ность связи, а также обладают возможностями кодового разделения абонентов или, другими словами, обеспечивают многоадресность системы связи [7, 10]. Имея набор шумоподобных сигналов с хорошими корреляционными свойствами, можно построить эффективную систему связи, в которой осуществляется прием сигналов в целом (один из наиболее помехоустойчивых методов приема) [7, 10–12].

ШПС классифицируются следующим образом:

- частотно-модулированные (ЧМ) сигналы;
- фазоманипулированные (ФМ) сигналы;
- многочастотные (МЧ) сигналы;
- дискретные частотные (ДЧ) сигналы;
- дискретные составные частотные (ДСЧ) сигналы [4, 6].

Наибольшее распространение в ШСС и CDMA получили ФМ сигналы, которые широко применяются в космической связи и сотовых системах по стандарту CDMA [3, 7]. Остановимся на краткой характеристике ШСС и CDMA-систем связи.

**Широкополосные системы связи.** Широкополосные системы активно используются в космической связи. За последние годы средства космической и спутниковой системы связи начали активно развиваться в связи с тем, что в стране отсутствуют в достаточном количестве наземные сети передачи данных. Это связано с дороговизной прокладки кабельных и волоконно-оптических линий связи [3, 10]. Преимущества спутниковых систем связи заключается в том, что их можно оперативно организовать в любом удаленном районе, без больших затрат по сравнению с наземными кабельными сетями связи. Практически спутниковые широкополосные системы связи становятся единственным доступным средством управления удаленными объектами в бизнесе [3, 10]. В настоящее время космическая широкополосная связь активно развивается и за рубежом, в частности в Европе [3]. Ведущие европейские компании, такие как Hughes, Spaceway Lockheed Martin, Alenia Spazio, активно продвигают широкополосные системы связи для организации управления крупнейшими мировыми компаниями не только в Европе, но и в Азии [3].

Таким образом, широкополосные системы космической связи из-за своих преимуществ активно начали распространяться по всему миру и проникли даже в такие отдаленные государства, как Афганистан [3]. Кроме обычных широкополосных систем связи с появлением мобильной связи бурно начали развиваться системы стандарта CDMA, которые являются инновационными и перспективными в мировой системе телекоммуникаций [9, 18]. Рассмотрим принцип организации связи по стандарту CDMA.

**Системы связи стандарта CDMA.** Системы CDMA (Code Division Multiple Access) самые новые перспективные системы связи. Они позволяют обеспечить многостанционный доступ с кодовым разделением каналов [1]. В них, как и в широкополосных системах связи, используются шумоподобные сигналы. Известен постулат, что все новое – это хорошо забытое старое. Многостанционный доступ с кодовым разделением каналов, который используется в CDMA-системах, впервые был опубликован под названием «Основы теории линейной селекции» в 1935 г. в СССР. Автором статьи являлся Дмитрий Васильевич Агеев [1].

В послевоенные годы технологию CDMA начали применять в военных системах связи у нас в стране и за рубежом [1, 13, 15–17]. В системах CDMA спектр сигнала расширяется за счет скачков по частоте или манипулировании прямой последовательности по закону апериодической псевдослучайной последовательности. Манипуляция прямым методом (или DS – Direct Sequence) находит более широко применение в системах CDMA [17, 19]. Это позволяет надежно защититься от естественных и организованных помех, то есть работать при соотношении сигнал – помеха меньше единицы и малых мощностях передаваемого сигнала [9], а также обеспечить передачу в одном частотном диапазоне сигналов многих абонентов.

Популярно передачу по стандарту CDMA можно объяснить следующим образом.

Представим курортный город, в кафе которого одновременно разговаривают попарно много людей. Люди говорят на разных языках. При этом они слышат и понимают друг друга, в то время как разговоры других воспринимают как фон, который не мешает их общению. Язык, на котором они говорят, как раз и является кодом, если провести аналогию с CDMA. Если продолжать аналогию по отношению к рассмотренным выше широкополосным системам связи, то эти попарно разговаривающие люди будут сидеть в отдельных комнатах и слышать только свой разговор и соответственно их язык подразумевает только один код. Технология CDMA активно продвигается в сторону инновационного развития систем связи III поколения [7, 9].

Учитывая, что в системах ШСС и CDMA используются широкополосные сигналы, для свертки которых необходимо на приемной стороне иметь синфазную АПСЦ, способы синхронизации датчиков АПСЦ в этих системах будут происходить с учетом специфики их функционирования,

которая имеет некоторые общие черты и существенные различия. При этом критерии оценки эффективности синхронизации АПСП в каналах низкого качества для указанных систем связи будут практически одинаковыми. Например, в ШСС синхронизация будет осуществляться по принципу «точка – точка», а в CDMA – с учетом использования прямого или обратного канала с базовой станцией (БС) [7–9].

Исходя из этого, с целью выработки критериев оценки эффективности синхронизации генераторов АПСП в условиях организованных помех в системах ШСС и CDMA рассмотрим особенности синхронизации АПСП в каналах низкого качества [14].

На основании проведенного анализа и рассмотренных особенностей синхронизации АПСП в ШСС и CDMA разработаем критерии для оценки эффективности фазирования генераторов АПСП в каналах низкого качества.

**Анализ особенностей синхронизации датчиков АПСП в каналах низкого качества.** Канальные методы обработки СИ при запуске псевдослучайных последовательностей применяются достаточно длительное время для систем связи, предназначенных для работы на каналах достаточно хорошего качества с биномиальным распределением ошибок. Биномиальное распределение ошибок позволяет получить простые математические оценки, пригодные для инженерных расчетов. Однако известные точные и приближенные оценки были получены для сравнительно коротких ПСП. Поэтому использование известных моделей для оценки фазирования АПСП приводило к возникновению трансцендентных уравнений, решение которых становилось невозможным даже при использовании современных ЭВМ, а приближенные оценки давали достаточно большие погрешности и поэтому не могли быть использованы для оценки принудительной синхронизации датчиков АПСП широкополосных систем связи.

Известные математические модели фазирования псевдослучайных последовательностей (ПСП) получены лишь для каналов достаточно хорошего качества с вероятностью ошибки не более чем  $P < 10^{-3}$ . Для разработки математических моделей синхронизации датчиков АПСП систем ШСС и CDMA рассмотрим специфику их применения в каналах низкого качества [19].

В отличие от известных методов в системах ШСС и CDMA скорость выработки аperiodической ПСП должна быть выше скорости передаваемой информации на величину, кратную базе [7, 9, 10]. В связи с тем, что для синхронизации используются информационные посылки основного сигнала, возникает необходимость одновременного переключения датчиков АПСП после окончания фазирования на канальную скорость работы, которая выше информационной скорости в канале на величину, пропорциональную базе. Технически это решается увеличением тактовой частоты генераторов АПСП, которая должна осуществляться одновременно на передающей и приемной сторонах связи. Эта специфика синхронизации датчиков АПСП будет одинаковой для ШСС и CDMA.

Кроме того, в условиях организованных помех фазирование датчиков АПСП может сопровождаться наличием [14]:

- 1) естественных помех в канале передачи данных (при этом мощность сигнала может быть как больше, так и меньше мощности помехи);
- 2) специально организованных помех (мощность помех обычно в этом случае превышает мощность сигнала в канале связи).

Первая ситуация обычно имеет место при первоначальном запуске процесса синхронизации, когда специально организованные помехи еще отсутствуют.

Вторая ситуация возникает при повторной синхронизации и является более опасной, поскольку при повторной синхронизации злоумышленник уже обладает информацией о параметрах сигнала и местонахождении станций и может более эффективно организовать постановку помех. Иногда такой эффект возникает из-за взаимного «подавления» сигналов от одновременно работающих станций [3].

Исходя из этого, становится очевидным, что в условиях организованных помех ситуация, связанная с неудавшейся синхронизацией гораздо опаснее, чем ситуация полного незапуска процесса [3, 9, 10, 17, 19], так как для определения факта неудавшейся синхронизации необходимо большее количество времени, чем для обнаружения факта незапуска данного процесса. Повторный пуск уже будет осуществляться в условиях мощных помех организованной структуры, что затруднит синхронизацию.

Если такая ситуация имеет место быть в однонаправленной системе, то часть синхропосылки (СП), передача которой осуществлялась в течение времени от начала пуска до включения детектора модема, не будет использована (будет утеряна). При этом оставшейся части синхропосылки может не хватить для обеспечения синхронизации.

Если неудачный запуск произойдет в системе с обратной связью, то после подтверждения с момента пуска на другую сторону по обратному каналу будет передаваться СП. При этом по прямому каналу ожидается подтверждение о фазировании. Однако такое подтверждение не сможет быть сформировано из-за различия в АПСП, подаваемых на модемы приема и передачи. Из-за этого на противоположную станцию по обратному каналу начнут поступать «запросы» на синхронизацию.

Отсутствие сигнала в прямом канале система может интерпретировать как следствие действий злоумышленника и перейти в специальный (предусмотренный для этой ситуации) режим и только тогда обнаружить проблему. Таким образом, и в системах с обратной связью процесс детектирования ложности пуска занимает определенное время, в течение которого противоборствующая сторона может создать организованные помехи повторным запуском процесса синхронизации.

Поэтому систему синхронизации датчиков АПСП в ШСС и CDMA необходимо выбирать исходя из условия минимизации количества неудачных запусков при заданной вероятности верной синхронизации.

Кроме рассмотренных выше особенностей синхронизации генераторов АПСП, необходимо остановиться на ситуации перехода системы с ПС-сигналами в режим замедления. Возникающие при этом проблемы могут потребовать ввода определенных ограничений на тактовую частоту синхронизации [2]. Исследования показали, что при значениях стабильности задающих генераторов  $K_c \geq 10^{-6}$  цикловая синхронизация датчиков АПСП не успевает нарушиться при скоростях в канале передачи данных вплоть до 3 МГбод. Кроме того, для соблюдения требований к надежности тактовой синхронизации в системах ШСС имеется возможность восстанавливать нарушение цикловой синхронизации путем «осаживания» или «подгона» АПСП без повторного запуска процедуры фазирования. Это в условиях организованных помех позволяет быстро восстановить связь.

**Параметры оценки качества систем синхронизации АПСП.** В широкополосных системах связи и системах связи по стандарту CDMA используются шумоподобные сигналы, манипулированные по закону АПСП и, как правило, по закону прямой последовательности. Следовательно, с учетом рассмотренной специфики систему синхронизации генераторов АПСП в таких системах связи целесообразно оценивать по надежности удержания синхронизма, интервалу времени, необходимому для вхождения в синхронизм, а также величине, характеризующей помехоустойчивость.

Под надежностью удержания синхронизма предполагается сохранение синфазности АПСП при кратковременных сбоях в результате подавления сигнала или замирания сигнала на входе в приемник. Время удержания  $t_{yo}$  полностью определяется стабильностью тактовых генераторов частоты [2]. Как правило, значение этого параметра можно обеспечить еще на этапе проектирования системы синхронизации АПСП путем выбора генераторов тактовой частоты с коэффициентом стабильности  $K_c \geq 10^{-6}$ .

Время вхождения в синхронизм обуславливается оперативно-тактическими соображениями, например, вхождение в синхронизм до постановки помех злоумышленником или необходимостью установки синхронизации при низком качестве канала связи, когда неискаженные блоки появляются сравнительно редко. Эта величина зависит как от заранее известных факторов (например, длина СП), так и от случайных, например, от наличия организованных помех. Для оценки времени вхождения в синхронизм целесообразно ввести параметр – среднее время синхронизации  $\bar{t}_c$ .

Еще одним показателем качества синхронизации является помехоустойчивость системы в условиях воздействия злоумышленника. Для ее оценки введем следующие обозначения вероятностей:

- вероятность правильного приема синхропосылки –  $P_{nn}$ ;
- вероятность ложного запуска –  $P_l$ ;
- вероятность пропуска СП –  $P_{np}$ .

Совокупность этих вероятностей составляет полную группу событий. Исходя из этого, можно записать:

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

Так же, как и  $\bar{t}_c$ , указанные параметры зависят как от заранее известных величин (длина СП), так и от случайных факторов, например от распределения ошибок в канале связи.

Вследствие этого для различных каналов значения этих параметров будут разными, и их, как и  $\bar{t}_c$ , необходимо рассчитывать каждый раз отдельно, с учетом свойств конкретного канала связи.

Учитывая, что события с вероятностями  $P_{np}$  и  $P_l$  приводят к неприему СП, введем один обобщенный параметр  $P_n$ , характеризующий вероятность неприёма СП:

$$P_n = P_l + P_{np}. \quad (2)$$

Тогда:

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

**Выводы.** Таким образом, для оценки качества цикловой синхронизации генераторов АПСП в условиях организованных помех в системах ШСС и CDMA достаточно двух параметров: среднего времени синхронизации  $\bar{t}_c$  и вероятности правильной синхронизации  $P_{nn}$ . Эти параметры будут достаточно полно характеризовать качество цикловой синхронизации АПСП. При этом параметр  $P_n$  однозначно определяется из (3). А зная значение  $P_n$ , можно найти  $P_l$  и охарактеризовать помехоустойчивость канала связи по всем трем параметрам.

**Библиографический список**

1. Быховский М. А. Пионеры информационного века. История развития теории связи / М. А. Быховский. – Москва : Техносфера, 2006. – 376 с.
2. Давыдкин П. Н. Тактовая сетевая синхронизация / П. Н. Давыдкин, А. В. Рыжков, М. Н. Колтунов ; под ред. М. Н. Колтунова. – Москва : Эко-Трендз, 2004. – 208 с.
3. Дорнан Энди. Широкополосная связь из космоса / Дорнан Энди // Журнал сетевых решений/LAN. – 2002. – № 02 – С. 14–25. – Режим доступа: <https://www.osp.ru/lan>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 31.08.2019).
4. Зачиняев Ю. В. Анализ и классификация формирователей линейно-частотно-модулированных радиосигналов с точки зрения уменьшения длительности формируемых сигналов / Ю. В. Зачиняев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 42–56.
5. Зинчук В. М. Адаптивная цифровая фильтрация шумоподобных сигналов в радиотехнических системах / В. М. Зинчук, Ю. Г. Сосулин, А. Е. Лимарев, Н. П. Мухин // Цифровая обработка сигналов. – 2000. – № 1. – С. 4–18.
6. Иммореев И. Я. Сверхширокополосные радиосистемы. Обзор состояния и пути развития / И. Я. Иммореев // USUIRCA 2005. – Режим доступа: <http://uwbgroup.ru/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 31.08.2019).
7. История внедрения стандарта связи CDMA. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5153386/page:2/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 26.08.2019).
8. Кузьминов С. Система сотовой подвижной связи CDMA / С. Кузьминов. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/mobile/sys-cdma.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 26.08.2019).
9. Кунегин С. В. Сотовые сети стандарта CDMA / С. В. Кунегин. – Режим доступа: <http://kunegin.com>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 27.08.2019).
10. Малыгин И. Широкополосные системы связи / И. Малыгин. – Москва : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 200 с.
11. Одинский А. Л. Мобильные широкополосные системы передачи цифровой информации – компании MOTOROLA / А. Л. Одинский // Евразия Вести. – VII 2008. – Режим доступа: <http://www.eav.ru/publs.php?number=2008-07>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 29.08.2019).
12. Ericsson Mobility Report. – June 2016. – Режим доступа: <http://www.ericsson.com/res/docs.2016/ericsson-report-2016.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 29.08.2019).
13. 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.
14. Fortinet: прогноз состояния киберугроз в ближайшем будущем. – 20.12.2018. – Режим доступа: <https://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID=206001>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 29.08.2019).
15. Ilavarasi T. MC-CDMA based SDR for Next Generation Wireless Communications / T. Ilavarasi, N. Kumarathan, K. Rasadurai // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 73, № 13. – P. 12–19.
16. Jain S. Evolution from SDR to Cognitive Radio / S. Jain, N. Taneja // Indian Journal of Applied Research. – 2014. – № 4, issue 8. – P. 248–253.
17. Regazzoni C. Course acquisition and tracking in DS/SS systems / C. Regazzoni // ISIP40. – Режим доступа: [http://www.isip40.it/resources/Dispense/Radio/05\\_PN\\_ACQUISITION.pdf](http://www.isip40.it/resources/Dispense/Radio/05_PN_ACQUISITION.pdf), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 29.08.2019).
18. Wang H. Coordinated jamming and communications in an MC-CDMA system. Hoboken / H. Wang, Y-D. Yao, R. Wang, L. Shen – Режим доступа: <http://www.personal.stevens.edu/~hwang38/paper/CJamCom.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 29.08.2019).
19. Yang L-L. Serial acquisition performance of single-carrier and multi-carrier DS-SS over Nakagami-m fading channels / L-L. Yang, L. Hanzo // IEEE Transactions on wireless communications. – 2002. – Vol. 1, № 4. – P. 692–702.

**References**

1. Bykhovskiy M. A. *Pionery informatsionnogo veka. Istoriya razvitiya teorii svyazi* [Pioneers of the information age. The history of the development of communication theory]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 376 p.
2. Davydkin P. N., Ryzhkov A. V., Koltunov M. N. *Taktovaya setevaya sinkhronizatsiya* [Clock network synchronization]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2004. 208 p.
3. Dornan Endi. *Shirokopolosnaya svyaz iz kosmosa* [Broadband from space]. *Zhurnal setevykh resheniy/LAN* [Journal of Network Solutions/LAN], 2002, no. 02, pp. 14–25. Available at: <https://www.osp.ru/lan> (accessed 08.31.2019).
4. Zachinyayev Yu. V. *Analiz i klassifikatsiya formirovateley lineynno-chastotno-modulirovannykh radiosignalov s tochki zreniya umensheniya dlitelnosti formiruemykh signalov* [Analysis and classification of shapers of linear-frequency-modulated radio signals from the point of view of reducing the duration of the generated signals]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2012, no. 5, pp. 42–56.
5. Zinchuk V. M., Sosulin Yu. G., Limarev A. Ye., Mukhin N. P. *Adaptivnaya tsifrovaya filtratsiya shumopodobnykh signalov v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Adaptive digital filtering of noise-like signals in radio engineering systems]. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], 2000, no. 1, pp. 4–18.

6. Immoreev I. Ya. Sverkhshirokopolosnye radiosistemy. Obzor sostoyaniya i puti razvitiya [Ultra-wideband radio systems. Overview of the state and development paths]. *USUIRKA 2005* [USUIRCA 2005]. Available at: <http://uwbgroup.ru/> (accessed 08/31/2019).
7. *Istoriya vnedreniya standarta svyazi CDMA* [History of the implementation of the CDMA communication standard]. Available at: <https://studfiles.net/preview/5153386/page:2/> (accessed 08.26.2019).
8. Kuzminov S. *Sistema sotovoy podvizhnoy svyazi CDMA* [Cellular mobile communication system CDMA]. Available at: <https://www.ixbt.com/mobile/sys-cdma.html> (accessed 08/26/2019).
9. Kunegin S. V. *Sotovye seti standarta CDMA* [CDMA standard cellular networks]. Available at: <http://kunegin.com> (accessed 08.28.2019).
10. Malygin I. *Shirokopolosnye sistemy svyazi* [Broadband communication systems]. Moscow, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 200 p.
11. Odinskiy A. L. Mobilnye shirokopolosnye sistemy peredachi tsifrovoy informatsii kompanii MOTOROLA [Mobile broadband digital information transmission systems – MOTOROLA companies]. *Yevraziya Vesti* [Eurasia Vesti], VII 2008. Available at: <http://www.eav.ru/pubs.php?number=2008-07> (accessed 08.29.2019).
12. *Ericsson Mobility Report*, June 2016. Available at: <http://www.ericsson.com/res/docs.2016/ericsson-report-2016.pdf> (accessed 29.08.2019).
13. 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.
14. *Fortinet: prognoz sostoyaniya kiberugroz v blizhayshe budushchem* [Fortinet: a prognosis of the status of cyber threats in the near future]. 20.12.2018. Available at: <https://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID=206001> (accessed 29.08.2019).
15. Ilavarasi T., Kumaratharan N., Rasadurai K. MC-CDMA based SDR for Next Generation Wireless Communications. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 73, no. 13, pp. 12–19.
16. Jain S., Taneja N. Evolution from SDR to Cognitive Radio. *Indian Journal of Applied Research*, 2014, no. 4, issue 8, pp. 248–253.
17. Regazzoni C. Course acquisition and tracking in DS/SS systems. *ISIP40*. Available at: [http://www.isip40.it/resources/Dispense/Radio/05\\_PN\\_ACQUISITION.pdf](http://www.isip40.it/resources/Dispense/Radio/05_PN_ACQUISITION.pdf) (accessed 29.08.2019).
18. Wang H., Yao Y-D., Wang R., Shen L. *Coordinated jamming and communications in an MC-CDMA system*. Hoboken. Available at: <http://www.personal.stevens.edu/~hwang38/paper/CJamCom.pdf> (accessed 29.08.2019).
19. Yang L-L., Hanzo L. Serial acquisition performance of single-carrier and multi-carrier DS-SS over Nakagami-m fading channels. *IEEE Transactions on wireless communications*, 2002, vol. 1, no. 4, pp. 692–702.

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.042-051

УДК 004:89

## РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЕЁ ГИБРИДИЗАЦИИ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ ДУЭЛЕЙ

*Статья поступила в редакцию 17.11.2019, в окончательном варианте – 25.11.2019.*

**Частикова Вера Аркадьевна**, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2  
кандидат технических наук, доцент, e-mail: [chastikova\\_va@mail.ru](mailto:chastikova_va@mail.ru)

**Митюгов Алексей Игоревич**, Кубанский государственный технологический университет, 350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2  
студент, e-mail: [mitugov\\_alexey@mail.ru](mailto:mitugov_alexey@mail.ru)

В данной статье представлены результаты разработки гибридной искусственной иммунной системы. Осуществлён анализ существующих алгоритмов искусственных иммунных систем и нового, разработанного на предыдущих этапах исследования и показавшего свою эффективность эвристического алгоритма – модифицированного генетического алгоритма дуэлей. Рассмотрены потенциальные способы комбинации искусственных иммунных систем и модифицированного генетического алгоритма дуэлей для повышения эффективности первых. Проведена оценка эффективности полученных гибридов в разрезе классической задачи оптимизации на примере поиска экстремумов таких целевых функций: функции Михалевича, Растригина, Де Джонга, Янга, кубической, Швифеля и Розенброка. В качестве критериев эффективности были приняты скорость и точность поиска глобального оптимума целевых функций. В результате исследования был найден наиболее эффективный способ гибридизации алгоритмов, заключающийся во включении стадий модифицированного генетического алгоритма дуэлей от этапа предварительной квалификации и до шага ликвидации в классический алгоритм клонального отбора искусственной иммунной системы после созревания аффинности. На базе выбранной эффективной архитектуры гибридной искусственной иммунной системы предложена модель системы обнаружения вторжений.

**Ключевые слова:** искусственная иммунная система, модифицированный генетический алгоритм дуэлей, глобальная оптимизация, система обнаружения вторжений