

Раздел IV. Машинное обучение и обработка данных

УДК 004.272.2

DOI 10.18522/2311-3103-2025-3-119-134

И.И. Левин, Д.С. Буряков**РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

В задачах цифровой обработки сигналов, предполагающих когерентную обработку данных от фазированной антенной решетки, важно обеспечить согласованное поступление оцифрованных данных от антенных элементов в узлы обработки. С ростом числа каналов передачи данных в комплексах ЦОС существенно возрастает вероятность возникновения ошибок в каналах передачи данных, что выдвигает повышенные требования к обеспечению работоспособности программного комплекса изохронной передачи данных. В статье представлены результаты разработки и реализации методов, повышающих работоспособность изохронной передачи данных. Предложен комбинированный метод изохронной передачи данных, отличающийся применением служебных промежутков при передаче массивов операндов и динамической компенсацией задержек в каналах данных. Выделены наиболее вероятные ошибки, возникающие при передаче данных и предложены способы их парирования. Описан программный комплекс, реализующий комбинированный метод. Используя атрибутивную модель работоспособности, проведен анализ работоспособности программного комплекса. Анализ показал, что использование комбинированного метода позволит в четыре раза увеличить количество каналов передачи данных в комплексе ЦОС при заданном уровне работоспособности и фиксированном времени доверительной работы по сравнению с базовым методом. При значительном увеличении количества каналов передачи данных возникает необходимость сохранения заданного уровня работоспособности. В этой связи предложен модернизированный метод изохронной передачи данных, в котором были усовершенствованы алгоритмы проверки целостности данных, проверки допустимого диапазона рассогласования задержек в каналах данных и добавлен алгоритм переключения опорных каналов. Оценка работоспособности реализации модернизированного метода показала его способность обеспечить двукратное увеличение числа каналов данных по сравнению с комбинированным методом.

Программируемая логическая интегральная схема; цифровая обработка сигналов; работоспособность; фазированная антенная решетка; когерентная обработка данных.

I.I. Levin, D.S. Buryakov**REALIZATION OF METHODS FOR SYNCHRONIZATION OF DATA FLOWS IN DIGITAL SIGNAL PROCESSING SYSTEMS**

In digital signal processing applications involving coherent processing of data from a phased antenna array, it is important to ensure the coordinated arrival of digitized data from antenna elements to processing units. As the number of data transmission channels in DSP complexes grows, the probability of errors in the data transmission channels increases significantly, which puts forward increased requirements to the assurance of the program complex of isochronous data transmission. The paper presents the results of the development and realization of methods that increase the assurance of isochronous data transmission. A combined method of isochronous data transmission is proposed, characterized by the use of service gaps in the transmission of operand arrays and dynamic compensation of delays in data channels. The most probable errors occurring during data transmission are singled out and methods of their parrying are proposed. A program complex realizing the combined method is described. Using the attribute model of dependability, the dependability of the program complex is analyzed. The analysis has shown that the use of the combined method will quadruple the number of data transmission channels in the DSP complex at a given level of dependability and fixed time of reliable operation in comparison with the basic method. With a significant increase in the number of data channels, there is a need to maintain a given

level of dependability. In this regard, a modernized method of isochronous data transmission is proposed, in which the algorithms for checking data integrity, checking the acceptable range of delay mismatch in the data channels and the algorithm for switching the reference channels were improved. An evaluation of the implementation dependability of the modernized method showed its ability to provide twice the number of data channels compared to the combined method.

Field programmable gate array; digital signal processing; dependability; phased array antenna; coherent data processing.

Введение. Ряд задач цифровой обработки сигналов (ЦОС) требует когерентной обработки, предполагающей согласование данных от множества каналов, полученных в один момент времени. Известным примером когерентной обработки является формирование диаграммы направленности ФАР [1], требующей согласованно обработать информацию, полученную от всех без исключения антенных элементов ФАР и соответствующую одному моменту физического времени [2]. Передачу данных, гарантирующую поступление операндов, соответствующих одному моменту физического времени, от множества передающих блоков (узлов) в узел цифровой обработки сигналов в дальнейшем, будем называть изохронной.

Синхронизация функционирования узлов изохронной передачи данных – сложная задача, требующая согласованной работы всех источников и приемников информации. Один из эффективных способов синхронизации данных – использование системы единого времени [3], которая включает в себя первичные (ведущие) часы и вторичные (ведомые) часы в блоках, что позволяет установить единое и точное время во всех блоках.

Наиболее важным параметром систем единого времени является точность установки времени в различных узлах. Наиболее перспективным среди существующих технологий единого времени считается протокол РТР (Precision Time Protocol) [4], который может обеспечить установку времени в различных узлах с точностью 100 нс. Однако типовая частота оцифровки данных от элементов ФАР в системах когерентной обработки сигналов составляет около 100 МГц. Для точной привязки времени к данным требуется, чтобы точность привязки времени соответствовала одному такту оцифровки, следовательно, дискрета шкалы времени должна быть не более 10 нс, что обеспечит необходимую точность установки времени в различных узлах. В этой связи точность РТР для систем когерентной обработки информации от ФАР является недостаточной.

Различные блоки, как правило, имеют свои собственные тактовые генераторы, которые не могут быть идентичными, поэтому временные метки, полученные от ведущих часов, могут быть захвачены различными фазами тактового сигнала в разных устройствах. Кроме того, существует дрейф частоты тактовых генераторов в различных устройствах, который также влияет на точность установки времени. Указанные процессы могут привести к расхождению времени в различных блоках в интервалах между обновлениями времени от ведущего устройства. Это требует разработки новых методов синхронизации времени в разных узлах комплекса ЦОС.

Для обеспечения требуемой точности установки времени предлагается применить локальную систему единого времени, распространяющую сигналы единого машинного времени и опорную тактовую частоту из единого центра во все узлы по множеству каналов с одинаковой задержкой [5]. Каждый узел комплекса когерентной обработки сигналов имеет собственную систему машинного времени. В узле имеется свой счетчик текущего времени, который работает от опорной тактовой частоты и периодически обновляется значениями времени от источника единого машинного времени.

Для передачи сигналов единого машинного времени, как правило, используется линейный самосинхронизирующийся код Манчестер-II [6]. Этот код является улучшенной версией классического кода Манчестера и обеспечивает дополнительную стабильность при передаче данных.

Предлагаемые решения обеспечат синхронизацию времени в различных блоках с точностью до нескольких наносекунд.

Средства когерентной обработки данных. Для выполнения задач когерентной обработки информации от антенных элементов ФАР используются высокопроизводительные вычислительные устройства, построенные на различной элементной базе: на интегральных схемах специального назначения (ASIC), универсальных процессорах или программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС).

Универсальные процессоры удобны для программирования, но имеют существенные ограничения при их применении для обработки информации в реальном масштабе времени. Основная проблема – недостаточная вычислительная мощность процессоров, что критично, учитывая сложность математических операций и большие объемы обрабатываемых данных [7]. Ограниченная параллельная обработка и сложность интеграции с аппаратными компонентами систем с ФАР также являются существенными минусами.

Специализированные микросхемы ASIC обеспечивают наиболее высокую производительность, но требуют значительных затрат на разработку и производство [8]. Использование ASIC оправдано для устройств, выпускаемых серийно, но они неэффективны для устройств обработки данных от ФАР, т.к. каждая система с ФАР может потребовать реализовать особые алгоритмы обработки.

В этом случае ПЛИС представляют собой разумный компромисс. Их главное преимущество – гибкость конфигурации, позволяющая адаптировать структуру под меняющиеся требования без изменения аппаратной части [9]. Богатый набор ресурсов для цифровой обработки сигналов и разнообразные интерфейсы обеспечивают эффективную многопоточную обработку данных [10]. Важное достоинство ПЛИС – минимальная задержка при обработке, благодаря прямой работе с аппаратными ресурсами, что крайне важно для многоканальных систем реального времени [11]. Большой объем вычислительных ресурсов и развитая периферия ПЛИС упрощают их интеграцию в системы ЦОС с ФАР.

Комбинированный метод изохронной передачи данных. Для передачи данных от узлов приёма к узлам обработки предлагается использовать оптические каналы [12] из-за их стабильности и минимального дрейфа характеристик. В разных каналах данных порой возникают задержки из-за преобразования сигнала, и эти задержки могут значительно различаться, поэтому для изохронной передачи данных важно обеспечить выравнивание потоков операндов. Для передачи привязанных ко времени данных обычно используют различные протоколы сетевых технологий [13], так как классическая пакетная передача не подходит для обеспечения потока данных в режиме реального времени – она допускает высокие, порой недопустимые задержки и может даже нарушить порядок следования пакетов данных, что недопустимо для когерентной обработки.

Тривиальным решением для передачи данных, привязанных ко времени, является сопровождение каждого операнда временной меткой. Временная диаграмма показана на рис. 1.

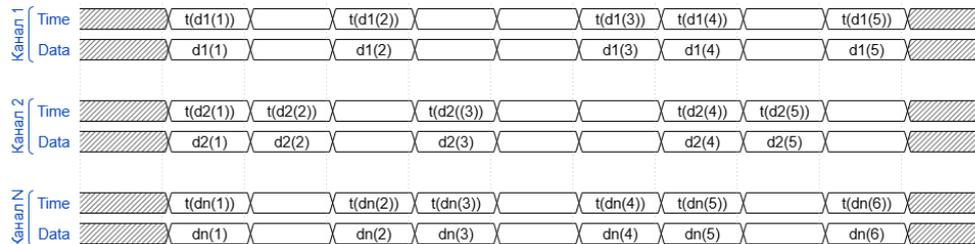


Рис. 1. Временная диаграмма привязки каждого операнда ко времени

Операнд в данном контексте – это отдельное данное, привязанное ко времени и используемое для обработки в узлах когерентной цифровой обработки сигналов. Данный метод обеспечивает передачу привязанных ко времени операндов, но имеет ряд существенных недостатков: значительное снижение пропускной способности канала из-за выделения части канала под временную метку и усложнение процедуры выравнивания операндов, требующее сложных алгоритмов анализа и буферизации на стороне приёмника.

Можно усовершенствовать протокол, сформировав непрерывный синхронный поток операндов, как показано на рис. 2. В этом случае метка времени $t(d1(1))$ будет передана только для первого операнда в массиве. Поскольку операнды массива передаются синхронно, временную метку можно определить для любого операнда в потоке, добавив к временной метке порядковый номер элемента массива, уменьшенный на единицу.



Рис. 2. Временная диаграмма привязки массива операндов ко времени

Такой протокол передачи данных избавляет от сложных алгоритмов выравнивания потоков данных в различных каналах, но сокращение пропускной способности из-за выделения отдельных каналов для передачи временной метки по-прежнему сохраняется.

Существует актуальный протокол, применяемый в современных устройствах когерентной цифровой обработки сигналов, который для удобства дальнейшего изложения обозначим как базовый. Он отличается размещением временной метки непосредственно в потоке операндов, что позволяет значительно повысить пропускную способность. Временная диаграмма показана на рис. 3

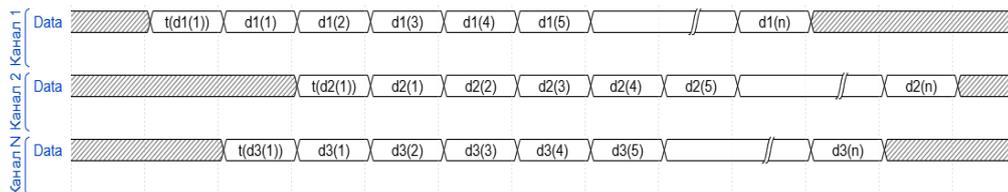


Рис. 3. Временная диаграмма размещения метки времени в потоке операндов

Для того чтобы устранить различия в задержках между каналами, используется следующий прием: во время инициализации подсистемы передачи данных производится измерение задержек для каждого канала. Полученные данные поступают в буферные элементы, которые настраиваются таким образом, чтобы на выходе задержки между каналами были устранены.

Недостатком этого метода является вычисление задержек только на этапе инициализации. Вычисленные значения задержек фиксируются и не изменяются в процессе работы системы. Метод не учитывает динамическое изменение задержек в различных каналах, однако на практике возможно изменение задержек между каналами в процессе работы. Например, при потере соединения и его последующего восстановления задержка может отличаться от той, что была рассчитана ранее, тем самым изохронная передача данных будет нарушена. В этом случае потребуется повторить процедуру вычисления новых значений задержек.

Для устранения описанных выше недостатков предлагается использовать новый метод обеспечения изохронной передачи данных, отличающийся от предыдущего применением служебных промежутков при передаче массивов операндов. Временная диаграмма показана на рис. 4.

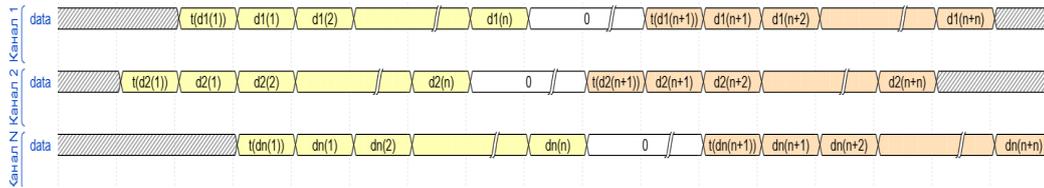


Рис. 4. Временная диаграмма передачи массивов операндов со служебными промежутками

Из передающего устройства оцифрованные данные подаются массивом операндов. Суть метода заключается в том, чтобы разделить входной массив операндов на группы одинаковой длины, которые дополняются сервисной информацией и передаются на более высокой частоте со служебными промежутками. В служебном промежутке перед началом массива операндов необходимо поместить заголовок с временной меткой, соответствующей времени получения первого операнда массива, тем самым осуществив его привязку ко времени. Кроме того, необходимо выполнить подсчет контрольной суммы заголовка и массива и разместить ее в служебном промежутке после массива операндов.

Временная диаграмма примера преобразования в формат массивов данных, разделенных служебными промежутками, представлена на рис. 5.

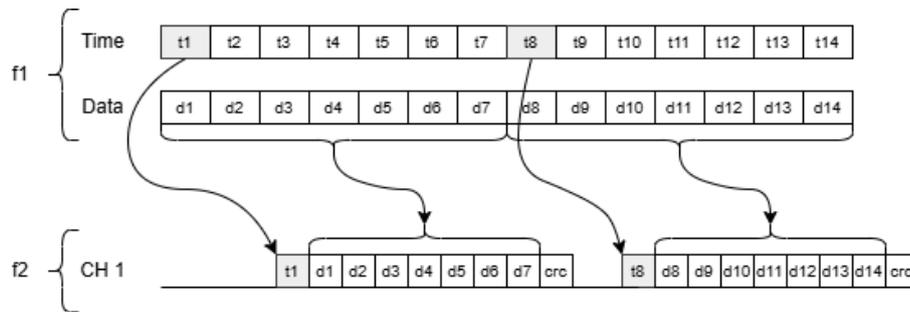


Рис. 5. Временная диаграмма преобразования непрерывного потока операндов

В процессе передачи данных в узел приема между различными каналами неизбежно возникнут рассогласования, выравнивание которых и будет произведено в узле приема. В каждом из входных каналов задействована буферная память. Запись в память массивов операндов происходит независимо по каждому каналу при их поступлении, а команда чтения подается на все блоки буферной памяти одновременно, обеспечивая выравнивание задержек между каналами, таким образом обеспечивается динамическое выравнивание задержек, возникающих при передаче массивов операндов, и происходит восстановление первоначального непрерывного изохронного потока данных, необходимого для алгоритмов когерентной цифровой обработки сигналов.

Реализация комбинированного метода изохронной передачи данных. Комбинированный метод изохронной передачи данных был применен для создания программного комплекса обеспечения изохронной передачи данных в комплексе когерентной обработки информации от антенных элементов ФАР. Комплекс когерентной обработки построен на основе группы ПЛИС Xilinx Virtex-7 XC7VX485T. На вход каждой ПЛИС поступает 24 канала разрядностью 33 бита (32 бита данных и 1 бит строб) на частоте $F_1 = 255$ МГц. Данные поступают массивами операндов, разделенными служебными промежутками. Длина массива операндов составляет 64 слова, длина служебного промежутка – четыре слова. В служебный промежуток перед началом массива операндов вставлено два слова, соответствующих метке времени первого данного массива операндов. В конце массива размещено одно слово контрольной суммы, посчитанной для всех операндов массива и для метки времени. Структура входных данных для одного канала представлена на рис. 6.

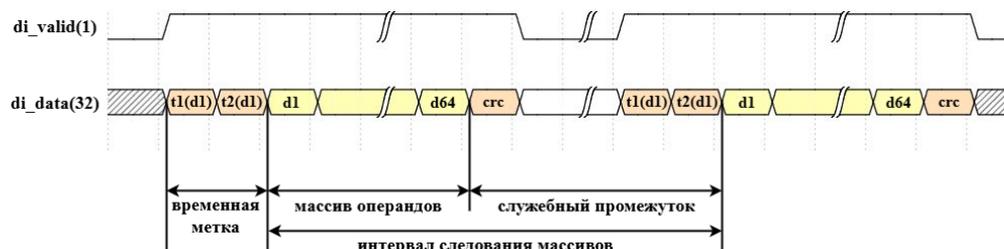


Рис. 6. Структура входных данных

Программа, реализованная в ПЛИС, выдает 24 непрерывных потока операндов разрядностью 32 бита на частоте 240 МГц. Все потоки операндов сопровождаются одним стробом и меткой времени первого операнда массива.

Программа, реализующая комбинированный метод изохронной передачи данных, состоит из программных блоков, реализованных независимо для каждого канала (B1 – B24), и общего блока (A), управляющего работой всех каналов. Общий блок для всех каналов A включает в себя: блок управления (БУПР) и блок синхронизации времени (БСВ).

Блок управления (БУПР) – выполняет несколько функций, которые определяют работу всех остальных программных блоков, среди которых: поиск и задание опорного канала, установка допустимого диапазона рассогласования, запуск процесса одновременного считывания данных из памяти.

При передаче информации в каналах данных неизбежно возникают задержки, которые в каждом канале могут быть разными. Программа выравнивает задержки во всех каналах в пределах одной ПЛИС. Однако предельные значения допустимых задержек целесообразно ограничить, поскольку большие задержки приведут к увеличению латентности данных на выходе программы и необходимости использовать больший объем памяти. Слишком большие задержки могут свидетельствовать о неполадках канала данных, таких как нарушение синхронизации узла, передающего данные с системой единого машинного времени или с генератором опорной частоты, в результате чего данные в передающих узлах формируются в неправильный момент времени.

Использование таких данных недопустимо, так как это нарушает принципы изохронной передачи. Необходимо обнаруживать подобные ситуации и не пропускать данные такого канала на выход программы. Для того чтобы обнаружить недопустимые задержки в каналах данных, необходимо установить допустимый диапазон отклонений относительно одного из каналов, который будем называть опорным. Для выбора опорного канала в блоке управления разработан алгоритм, определяющий величину задержек в каждом канале и вычисляющий их среднее арифметическое значение. Опорным выбирается канал, задержка которого наиболее близка к среднему арифметическому значению.

После выбора опорного канала нужно сформировать диапазон допустимого рассогласования относительно первого данного этого канала. Допустимое рассогласование задается параметром PS_{max} . Диапазон измеряется в тактах частоты поступления данных и должен быть установлен за PS_{max} тактов до первого данного опорного канала и закончиться через $PS_{max} - 1$ тактов после. При поступлении массивов операндов в каждом канале проверяется, попадают ли их задержки в допустимый диапазон. Если задержка выходит за пределы диапазона, данные в массивах заменяются на массивы с нулевой информацией для минимизации негативного влияния на результат обработки.

В состав блока обработки потока данных (Bn) одного канала входят блоки: интерфейс трансивера (ИТ), блок приема данных (БПД), блок расчета контрольных сумм (БРКС), блок обработки ошибок целостности данных (БОУЦД), буферная память FIFO, блок управления записью (БУЗ), блок управления чтением (БУЧ).

Структура программного блока, обеспечивающего работу одного канала, представлена на рис. 7

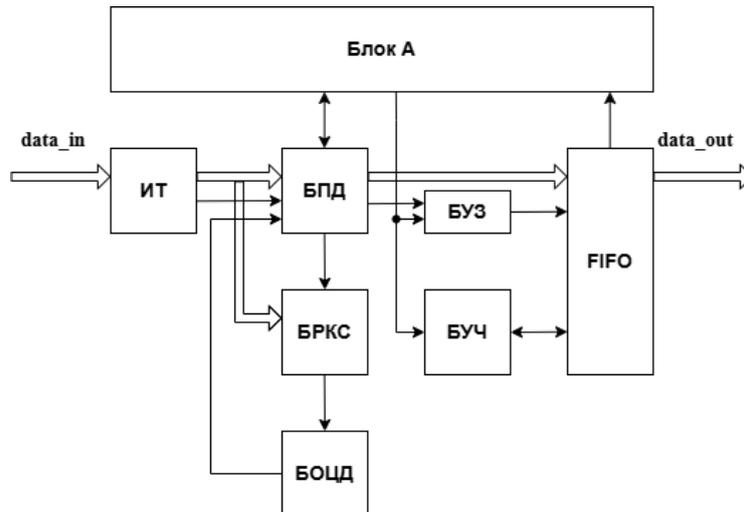


Рис. 7. Структура программного блока одного канала

Интерфейс трансивера (ИТ) – программный блок, управляющий работой аппаратного MGT трансивера (Multigigabit Transceiver), обеспечивает настройку параметров трансивера и проведение тренировки канала. На выходе блока интерфейса выставляются данные на шину `di_data` разрядностью 32 бита, в сопровождении строба `di_valid`. До приема данных после успешного завершения тренировки выставляется флаг готовности канала к работе `rx_on`, свидетельствующий о том, что канал активен и готов к работе.

Блок приема данных (БПД) – получает данные `di_data` со стробом `di_valid` от интерфейса трансивера, выделяет из заголовка временную метку `time_mark` и формирует следующие флаги: `ch_data_sop` – флаг начала массива данных; `ch_data_eop` – флаг конца массива данных; `pkg_reach`, `pkg_reach_lth` – флаг устанавливаемый, если задержка канала входит в допустимый диапазон рассогласования; `pkg_miss` – флаг, устанавливаемый, если задержка канала больше допустимого диапазона рассогласования.

Блок расчета контрольных сумм (БРКС) – подсчитывает контрольную сумму для принятых данных. Блок получает данные `di_data` со стробом `di_valid` от блока интерфейса трансивера. При поступлении строба `di_valid` запускается счетчик принятых данных `data_counter` и производится расчет контрольной суммы принимаемых данных. Для расчета контрольных сумм был применен известный алгоритм CRC-16 Modbus [14]. После достижения счетчиком значения, заданного параметром длины массива, расчет контрольной суммы прекращается и производится сравнение принятой и рассчитанной контрольных сумм. При совпадении устанавливается флаг `crc_pass`, длительностью один такт, иначе выставляется флаг `crc_fail`.

Блок обработки ошибок целостности данных (БООЦД) – отслеживает количество ошибок в канале. Если число ошибок (`err_cntn`) превышает заданное значение (`err_to_offline`), то канал отключается (флаг `ch_offline` взводится). Для восстановления работы канала необходимо определенное количество безошибочно принятых массивов подряд. Их количество отслеживает счётчик `good_cntn`. Когда `good_cntn` достигает заданного значения (`good_to_online`), флаг `ch_offline` сбрасывается, и канал снова включается. Этот алгоритм позволяет ограничить количество ошибок за период времени и определить интервал, в течение которого отсутствие ошибок восстановит работу канала.

Буферная память FIFO – это двухпортовая блочная память (Dual-port Block RAM) [15], сконфигурированная в режиме FIFO (first in, first out). Блочная память является аппаратным ресурсом ПЛИС, она позволяет одновременно проводить операции чтения и записи, а также обеспечивает безопасную передачу данных между разными тактовыми доменами.

Блок управления записью (БУЗ) - управляет записью данных в память FIFO. Он получает флаги начала (`ch_data_sop`) и конца массива данных (`ch_data_eop`), а также флаг разрешения записи (`allow_window_flag`) от блока управления. Если флаг начала массива поступает при активном флаге разрешения записи, формируется флаг записи в FIFO. Запись прекращается при поступлении флага конца массива. Блок записывает в память только те массивы, начало которых попадает в допустимый интервал рассогласования.

Блок управления чтением (БУЧ) - осуществляет управление чтением данных из памяти FIFO. Алгоритм позволяет начать считывание данных в каждом канале из всех FIFO одновременно, если массивы данных прошли проверку на попадание в допустимый интервал рассогласования в блоке приёма данных. Если канал по каким-либо причинам отключится, данные из FIFO отключённого канала будут считываться до полного опустошения. При восстановлении работы канала данные из FIFO начнут считываться в момент времени, соответствующий интервалу следования массивов (длина массива и размер служебного промежутка), чтобы сохранить согласованный поток данных.

Ресурс, занимаемый конфигурационным файлом ПЛИС, составил не более 5%. Программа была протестирована в составе устройства когерентной цифровой обработки информации от антенных элементов ФАР. В контрольных проверках было передано $3,38 \cdot 10^{16}$ байт информации в течение 48 часов. В процессе тестирования постоянно фиксировались рассогласования каналов. Программа корректно выравнивала возникающие задержки в каналах. В процессе работы были симулированы различные аварийные ситуации, включая недопустимые задержки рассогласования и нарушение целостности данных. На все воздействия программа реагировала корректно, парируя аварийные ситуации.

Анализ гарантоспособности программного комплекса изохронной передачи данных. Под гарантоспособностью понимается комплексное свойство системы (программного комплекса) предоставлять требуемые услуги, которым можно оправданно доверять [16].

Для количественной оценки гарантоспособности обычно используют атрибутивную модель [17]. Она описывает общие характеристики системы с помощью атрибутов и метрик. Атрибут объединяет различные свойства программного комплекса, а метрика представляет численное значение определённого параметра атрибута, характеризуя лишь одно из его свойств.

Рассматриваемый программный комплекс входит в состав программно-аппаратных средств, осуществляющих когерентную обработку данных. Поскольку программный комплекс предназначен исключительно для обеспечения изохронной передачи данных от множества каналов данных и не рассматривает функциональное преобразование данных, будем оценивать только те атрибуты, которые непосредственно влияют на его работу.

Наиболее важными атрибутами для программного комплекса изохронной передачи данных от множества каналов являются:

- ◆ целостность, которая для рассматриваемого программного комплекса понимается как целостность передаваемых данных;
- ◆ готовность, которая подразумевает доступность каналов передачи данных;
- ◆ живучесть, которая понимается как способность сохранять работоспособность в приемлемых пределах при превышении допустимых значений ошибок.

В соответствии с атрибутивной моделью оценки гарантоспособности определены метрики для каждого атрибута, причём каждый показатель должен характеризовать только одно свойство атрибута. Учитывая, что процессы имеют вероятностно-недетерминированный характер, в качестве метрик использованы вероятности возникновения возможных причин.

Целостность данных может нарушиться из-за битовых ошибок или нарушения формата передаваемых данных, поэтому для оценки этого атрибута использованы вероятность возникновения битовых ошибок в канале и вероятность нарушения формата данных.

Готовность каналов может быть нарушена из-за отключения канала вследствие неисправности или из-за ошибок в коммутации, вызванных действиями оператора или обслуживающего персонала. Для оценки готовности будем использовать вероятность отключения канала и вероятность ошибки оператора.

Живучесть программного комплекса отражает его способность сохранять работоспособность при превышении допустимого уровня ошибок. Программный комплекс изохронной передачи данных может парировать ошибки рассогласования задержек между каналами в определённых пределах. Однако могут возникнуть ситуации, когда значение рассогласования превышает допустимый уровень. Кроме того, существует вероятность того, что ошибка рассогласования будет замаскирована, если её значение совпадет с периодом следования массивов. Для оценки живучести будем использовать вероятность превышения допустимого значения рассогласования задержки канала и вероятность совпадения задержки с периодом следования массивов данных.

Атрибуты и метрики, применяемые для оценки гарантоспособности программного комплекса изохронной передачи данных, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Атрибуты и метрики

№	Атрибут	Вес атрибута	Метрика	Вес метрики	Границы
1	Целостность	0,98	Коэффициент битовых ошибок	0,98	0..1
			Вероятность нарушения целостности формата данных	0,96	0..1
2	Готовность	0,96	Вероятность отключения канала	0,97	0..1
			Вероятность ошибки оператора	0,94	0..1
3	Живучесть	0,99	Вероятность превышения допустимого значения рассогласования задержки канала	0,99	0..1
			Вероятность совпадения задержки с периодом следования массивов данных	0,9	0..1

Весовые коэффициенты атрибутов и метрик установлены по результатам экспертных оценок, которые в свою очередь опирались на экспериментальные данные.

Очевидно, что гарантоспособность программного комплекса изохронной передачи данных существенно зависит требуемого времени доверительной (безошибочной) работы и количества каналов передачи данных. На практике принимают уровень гарантоспособности для сложных программных комплексов систем с ФАР, равным 0,95, а время доверительной работы системы – не менее шести часов.

Вероятность каждого типа ошибок в зависимости от количества каналов P_m^N комплекса рассчитывается по формуле

$$P_m^N = (1 - (1 - P_m)^N) \cdot W_m, \quad (1)$$

где P_m – вероятность ошибки в одном канале;

N – количество каналов;

W_m – весовой коэффициент метрики.

Общая вероятность для каждого атрибута P_a определяется по формуле

$$P_a = (1 - (1 - P_{m1}^N) \cdot (1 - P_{m2}^N)) \cdot W_a, \quad (2)$$

где W_a – весовой коэффициент атрибута.

Общий уровень гарантоспособности оценивается по формуле

$$G = 1 - (1 - (1 - P_{a1}) \cdot (1 - P_{a2}) \cdot (1 - P_{a3})). \quad (3)$$

Был проведен расчет гарантоспособности для базового метода. Анализ показал, что заданный уровень гарантоспособности 0,95 обеспечивается при числе каналов данных в системе не более 10900.

Для оценки гарантоспособности программной реализации комбинированного метода изохронной передачи данных необходимо ввести коэффициенты парирования ошибок, поскольку в реализации комбинированного метода, в отличие от базового метода, используются средства обнаружения и парирования неисправностей.

В программе, реализующей комбинированный метод, применены средства парирования наиболее вероятных типов ошибок, связанных с отключением канала, нарушением целостности данных и превышением допустимого диапазона рассогласования. Остальные типы ошибок не обнаруживаются и не парируются данным методом, так как их вероятность крайне низкая и на заданном времени доверительной работы и фиксированном числе каналов практически не повлияет на общий уровень гарантоспособности. Добавление средств обнаружения и парирования наименее вероятных типов ошибок увеличит занимаемый ресурс в ПЛИС и не даст заметного прироста общего уровня гарантоспособности.

Коэффициенты парирования наиболее вероятных ошибок для реализации комбинированного метода изохронной передачи данных приведены в табл. 2. Коэффициент парирования устанавливается экспертными методами в диапазоне от 0 до 1, где 0 – отсутствие парирования ошибки.

Таблица 2

Коэффициенты парирования для реализации комбинированного метода

№	Тип ошибки	Коэффициент парирования
1	Коэффициент битовых ошибок	0,55
2	Вероятность нарушения целостности формата данных	0,4
3	Вероятность отключения канала	0,77
4	Вероятность ошибки оператора	0,6
5	Вероятность превышения допустимого значения рассогласования задержки канала	0,85
6	Вероятность совпадения задержки с периодом следования массивов данных	0

Добавим коэффициент парирования ошибок K_p в формулу (3) и получим следующее выражение:

$$P_m^N = (1 - (1 - P_m)^N) \cdot W_m \cdot K_p. \quad (4)$$

Расчет гарантоспособности выполним по той же методике, что и для базового метода. Зависимость гарантоспособности от количества каналов показана на рис. 8.

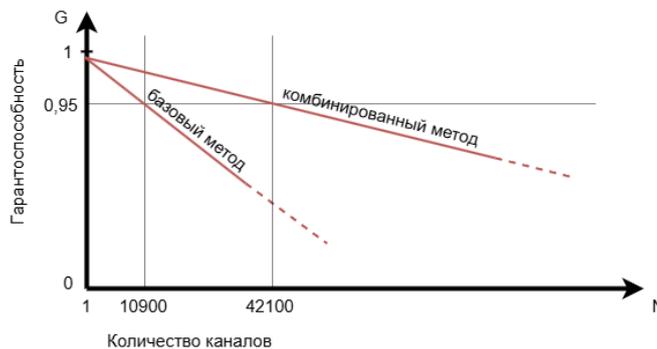


Рис. 8. Зависимость уровня гарантоспособности от количества каналов

Из графика видно, что заданный уровень гарантоспособности 0,95, а программа, реализующая комбинированный метод, обеспечивает уровень при числе каналов 42500.

Можно сделать вывод, что использование комбинированного метода изохронной передачи данных в совокупности со средствами обнаружения и парирования наиболее вероятных аварийных ситуаций сможет обеспечить в четыре раза большее количество каналов данных по сравнению с известным базовым методом при заданном уровне гарантоспособности.

Модернизированный метод изохронной передачи данных. Системы с ФАР постоянно развиваются, возникают новые трудоемкие научно-технические задачи, например, оперативное обнаружение космического мусора, увеличение количества которого в последние годы стало серьезной угрозой безопасности космических полетов [18, 19]. На сегодняшний день отмечается необходимость обнаружения космических объектов меньшего размера в отличие от тех, которые на данный момент могут быть обнаружены современными радиолокационными станциями (РЛС).

Чтобы улучшить разрешающую способность радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой, обычно увеличивают количество её антенных элементов [20]. Это даёт возможность создать более сфокусированный луч благодаря уменьшению ширины основного лепестка диаграммы направленности. Это дает возможность предоставлять более детальную информацию о местоположении и перемещении целей в зоне действия РЛС. Исходя из этого, требуются новые перспективные РЛС, содержащие большее число антенных элементов, а следовательно, и каналов данных. При значительном увеличении количества каналов представленный комбинированный метод изохронной передачи данных уже не сможет обеспечить заданный уровень гарантоспособности.

В этой связи требуется модернизировать комбинированный метод, для того чтобы сохранить заданный высокий уровень гарантоспособности при значительном увеличении числа каналов системы. Для этого необходимо улучшить качество парирования ошибок, связанных с отключением канала, нарушением целостности данных и превышением допустимого диапазона рассогласования. В дополнение к этому целесообразно разработать процедуры парирования ошибок, которые ранее не обрабатывались, поскольку при значительном увеличении числа каналов их влияние будет значительным.

Эксперименты на системах с ФАР показали, что на практике наиболее часто встречаются ошибки целостности данных. В реализации комбинированного метода такие ошибки успешно обнаруживаются с помощью контрольных сумм, однако их успешное парирование происходит, только когда число ошибок достигнет установленного порога. Этот подход позволил обеспечить минимальную латентность (задержку) данных, а ошибки, пропущенные до достижения установленного порога количества ошибок, не оказывали существенного влияния на результат обработки. Однако при значительном увеличении числа каналов такой подход не обеспечивает требуемого уровня гарантоспособности, поскольку вырастет общая вероятность возникновения ошибок целостности данных, что может оказать негативное влияние на результат обработки. В этой связи предложено производить предварительную проверку контрольных сумм фрагментов массивов операндов.

В программной реализации комбинированного метода флаг старта одновременного считывания данных из памяти `read_start` формировался в блоке управления при поступлении флага `not_empty` от всех FIFO активных каналов, прошедших контроль на соответствие задержки допустимому диапазону рассогласования.

При реализации модернизированного метода флаг `read_start` формируется в блоке управления после того, как будут проверены контрольные суммы активных каналов, прошедших контроль на соответствие задержки. При этом блок обработки ошибок целостности данных упростится. Он будет устанавливать флаг отключения канала `ch_offline` при получении флага несовпадения контрольных сумм `src_fail`, полученного от блока расчета контрольных сумм и сбрасывать при получении флага `src_pass`, означающего совпадение контрольных сумм.

Применения такого подхода к парированию ошибок целостности данных позволит контролировать целостность данных до того, как массивы операндов будут отправлены на выход, тем самым увеличить процент парирования ошибок, что положительно по-

влияет на общий уровень гарантоспособности. Следует отметить увеличение латентности для модернизированного метода на величину размера массива операндов и объема буферной памяти, которая должна будет вместить в себя весь массив операндов.

Следующими по влиянию являются ошибки, связанные с отключением каналов. Программная реализация комбинированного метода эффективно справляется с их обнаружением и устранением последствий. Однако существует потенциально опасный сценарий: отключение канала, назначенного опорным, относительно которого формируется несколько управляющих сигналов и счетчиков, в том числе диапазон допустимого рассогласования, что может привести к нарушению работы всех обслуживаемых каналов. В такой ситуации для модернизированного метода предусмотрена возможность переключения опорного канала на другой работоспособный. Переключение должно производиться в процессе работы без остановки процесса передачи при обеспечении изохронного потока операндов.

В реализации комбинированного метода главный счетчик `pkg_int_cntr`, находящийся в блоке управления, генерирует управляющие сигналы, среди которых особенно важен флаг `allow_window_flag`, определяющий границы допустимого рассогласования. Счетчик начинает работу на этапе инициализации, как только определен опорный канал. При отключении опорного канала в программной реализации модернизированного метода счетчик `pkg_int_cntr` в блоке управления корректируется, чтобы система правильно работала с новым опорным каналом. Для этого вводятся дополнительные независимые счетчики в каждом канале, которые запускаются с момента начала поступления массивов данных, синхронно с началом массива. При смене опорного канала значение такого вспомогательного счетчика скорректирует параметры основного счетчика `pkg_int_cntr`, обеспечивая синхронизацию всех управляющих сигналов с новым опорным каналом. Использование этого приема позволит сохранить работоспособность системы даже при выходе из строя опорного канала.

Следует отметить, что при определенных условиях рассогласования массива операндов может достичь критического значения, равного интервалу следования массивов. В результате обрабатываемый массив оказывается либо сильно запаздывающим, либо опережающим остальные массивы на один или даже более периодов их следования. Это создает опасную ситуацию, поскольку программа не способна обнаружить подобную ошибку через проверку попадания в допустимый диапазон рассогласования, так как, с точки зрения алгоритма, в программной реализации комбинированного метода нарушения нет. Пропускание данных такого канала на выход программы недопустимо, так как это нарушает принципы изохронной передачи данных и может негативно повлиять в целом на формирование диаграммы направленности ФАР. К тому же, как правило, это - не разовая ошибка, если возникли неисправности в системе синхронизации, которые привели к возникновению рассогласования, то, вероятней всего, это критическое значение задержки сохранится до перезапуска или пересинхронизации комплекса. Это означает, что на протяжении этого времени в канале будут невалидные данные.

Для того чтобы обнаруживать такие ошибки, в передающем узле применяется счетчик массивов, значение которого записывается в служебный промежуток перед массивом операндов перед его отправкой, тем самым позволяя пронумеровать массивы операндов. На стороне приемника данных в блоке приема данных реализован алгоритм проверки значения этого счетчика, и при его несоответствии значению счетчика опорного канала устанавливается флаг `pkg_miss`, свидетельствующий о превышении допустимой задержки рассогласования. Таким образом, будет обнаружена и парирована ошибка рассогласования, совпадающая с периодом следования массивов операндов.

Коэффициенты парирования для модернизированного метода изохронной передачи данных представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты парирования для реализации модернизированного метода

№	Тип ошибки	Коэффициент парирования
1	Коэффициент битовых ошибок	0,98
2	Вероятность нарушения целостности формата данных	0,95
3	Вероятность отключения канала	0,88
4	Вероятность ошибки оператора	0,86
5	Вероятность превышения допустимого значения рассогласования задержки канала	0,85
6	Вероятность совпадения задержки с периодом следования массивов данных	0,95

Используя ту же методику оценки гарантоспособности, что и для комбинированного метода, получили зависимость гарантоспособности от количества каналов для модернизированного метода, показанную на рис. 9.

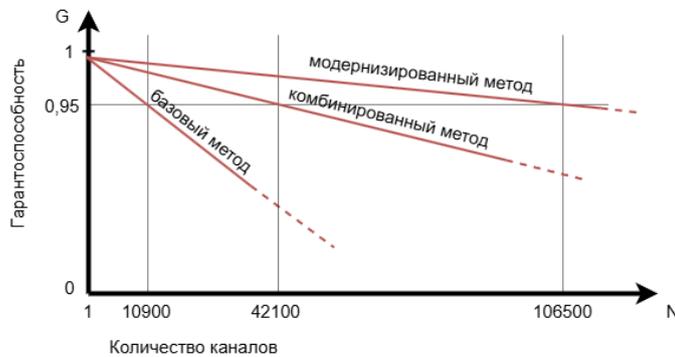


Рис. 9. Зависимость уровня гарантоспособности от количества каналов

Из графика видно, что заданный уровень гарантоспособности – 0,95, программа, реализующая модернизированный метод, обеспечивает уровень при числе каналов 106500.

Заключение. Разработан комбинированный метод, включающий алгоритмы для обнаружения и парирования потенциальных аварийных ситуаций в системе передачи данных. Внедрение комбинированного метода позволило добиться четырёхкратного роста гарантоспособности программного комплекса по сравнению с традиционными решениями, обеспечивая заданный уровень гарантоспособности 0,95 при 42100 каналов.

В связи с развитием систем с ФАР возникла потребность в обработке ещё большего количества каналов, что потребовало дальнейшей модернизации метода. В модернизированном методе были усовершенствованы алгоритмы обнаружения и парирования аварийных ситуаций и добавлены новые алгоритмы для обработки типов ошибок, которые становились критичными при масштабировании системы. После модернизации метод продемонстрировал способность обеспечить уровень гарантоспособности 0,95 с доверительным интервалом шесть часов при работе с 106500 каналов. Это позволит создать более совершенные системы с ФАР, отвечающие современным требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.О., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д.И. Воскресенского. – 2-е, изд. доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
2. Фомин А.Н., Тяпкин В.Н., Дмитриев Д.Д. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга: учебник / под ред. Ищук И.Н. – Красноярск: СФУ, 2016. – 292 с.

3. Савочкин И.А., Тройников Г.М., Тройникова Н.С., Турлаков П.В. Система единого времени для высокоточной синхронизации разнесённых радиолокационных постов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2014. – № 2. – С. 49-53.
4. Страшун Ю.П. Протокол точного времени Ptp для обеспечения работы АСУТП в режиме жесткого реального времени // ГИАБ. – 2014. – №S. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protokol-tochnogo-vremeni-rtt-dlya-obespecheniya-raboty-asutp-v-rezhime-zhestkogo-realnogo-vremeni-2> (дата обращения: 31.03.2025).
5. Сухман С.М., Бернов А.В., Шевкопляс Б.В. Синхронизация в телекоммуникационных системах: Анализ инженерных решений. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 268 с.
6. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 672 с.
7. Горобец А.В., Суков С.А., Триас Ф.Х. Проблемы использования современных суперкомпьютеров при численном моделировании в гидродинамике и аэроакустике // Ученые записки ЦАГИ. – 2010. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-ispolzovaniya-sovremennyh-superkompyuterov-pri-chislennom-modelirovanii-v-gidrodinamike-i-aeroakustike> (дата обращения: 25.10.2024).
8. Хаханов В.И., Обризан В.И., Мельникова О.В. Обзор международного рынка электронных технологий // Вестник НТУ ХПИ. – 2004. – № 46. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-mezhdunarodnogo-rynka-elektronnyh-tehnologiy> (дата обращения: 25.10.2024).
9. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы для цифровой обработки сигналов // Тр. Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. – 2010. – Вып. XII – 1. – С. 13-18.
10. Чкан А.В. Повышение реальной производительности РВС при решении задач цифровой обработки изображений с использованием быстрого преобразования Фурье // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 7 (217). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-realnoy-proizvoditelnosti-rvs-pri-reshenii-zadach-tsifrovoy-obrabotki-izobrazheniy-s-ispolzovaniem-bystrogo> (дата обращения: 25.10.2024).
11. Дордопуло А.И., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Высокопроизводительные много-процессорные системы с реконфигурируемой архитектурой для цифровой обработки сигналов // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». – 2011. – № 2 (6). – С. 88-104.
12. Куан И.А., Азимбаев Д.Ж., Щербаченя А.Н., Гербер А.С. Волоконно-оптические линии связи // Вестник науки. – 2018. – № 5 (5). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/volokonno-opticheskie-linii-svyazi> (дата обращения: 25.10.2024).
13. Пятибратов А.П., Гудыно Л.П., Кириченко А.А. П99 Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. А.П. Пятибратова. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 512 с.
14. Клименко С.В., Яковлев В.В., Благовещенская Е.А. Исследование реализаций алгоритмов контрольной суммы CRC32 // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2018. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-realizatsiy-algoritmov-kontrolnoy-summy-crc32> (дата обращения: 31.03.2025).
15. Соловьев В.В. Архитектуры ПЛИС фирмы Xilinx: CPLD и FPGA 7-й серии. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 392 с.
16. Avizienis A., Laprie J., Randell B., Landwehr C. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. – 2004. – No. 1. – P. 11-33.
17. Муха Ар А. Количественная оценка уровня гарантоспособности компьютерных систем // ММС. – 2019. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kolichestvennaya-otsenka-urovnya-garantospobnosti-kompyuternyh-sistem> (дата обращения: 31.03.2025).
18. Вениаминов С.С. Космический мусор угрожает планете // Воздушно-космическая сфера. – 2016. – № 1 (86). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kosmicheskii-musor-ugrozhaet-planete> (дата обращения: 24.07.2024).
19. Клюшников В.Ю. Синдром Кесслера: будет ли закрыта дорога в космос? // ВКС. – 2021. – № 4 (109). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sindrom-kesslera-budet-li-zakryta-doroga-v-kosmos> (дата обращения: 25.10.2024).
20. Дзюба А.П. Перспективы развития фазированных антенных решеток // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2013. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-fazirovannyh-antennyh-reshetok> (дата обращения: 25.10.2024).

REFERENCES

1. *Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.O., Maksimov V.M., Ponomarev L.I.* Ustroystva SVCh i anteny [Microwave devices and antennas], ed. by D.I. Voskresenskogo. 2nd ed. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 376 p.
2. *Fomin A.N., Tyapkin V.N., Dmitriev D.D.* Teoreticheskie i fizicheskie osnovy radiolokatsii i spetsial'nogo monitoringa: uchebnik [Theoretical and physical foundations of radar and special monitoring: textbook], ed. by Ishchuk I.N. Krasnoyarsk: SFU, 2016, 292 p.
3. *Savochkin I.A., Troynikov G.M., Troynikova N.S., Turlakov P.V.* Sistema edinogo vremeni dlya vysokotochnoy sinkhronizatsii raznesennykh radiolokatsionnykh postov [Unified time system for high-precision synchronization of distributed radar posts], *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antey»* [Bulletin of the Almaz-Antey Air and Space Defense Concern], 2014, No. 2, pp. 49-53.
4. *Strashun Yu.P.* Protokol tochnogo vremeni Rtr dlya obespecheniya raboty ASUTP v rezhime zhestkogo real'nogo vremeni [Precise time protocol Rtr for ensuring the operation of automated process control systems in hard real time mode], *GIAB* [Mountain Information and Analytical Bulletin], 2014, No. S. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/protokol-tochnogo-vremeni-rtr-dlya-obespecheniya-raboty-asutp-v-rezhime-zhestkogo-realnogo-vremeni-2> (accessed 31 March 2025).
5. *Sukhman S.M., Bernov A.V., Shevkoplyas B.V.* Sinkhronizatsiya v telekommunikatsionnykh sistemakh: Analiz inzhenernykh resheniy [Synchronization in telecommunication systems: Analysis of engineering solutions]. Moscow: Eko-Trendz, 2002, 268 p.
6. *Olifer V., Olifer N.* Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: uchebnik dlya vuzov [Computer networks. Principles, technologies, protocols: textbook for universities]. 4th ed. Saint. Petersburg: Piter, 2006, 672 p.
7. *Gorobets A.V., Sukov S.A., Trias F.Kh.* Problemy ispol'zovaniya sovremennykh superkomp'yuterov pri chislennom modelirovanii v gidrodinamike i aeroakustike [Problems of using modern supercomputers in numerical modeling in hydrodynamics and aeroacoustics], *Uchenye zapiski TsAGI* [Scientific notes of TsAGI], 2010, No. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-ispolzovaniya-sovremennykh-superkompyuterov-pri-chislennom-modelirovanii-v-gidrodinamike-i-aeroakustike> (accessed 25 October 2024).
8. *Khakhanov V.I., Obrizan V.I., Mel'nikova O.V.* Obzor mezhdunarodnogo rynka elektronnykh tekhnologii [Review of the international market of electronic technologies], *Vestnik NTU KhPI* [Bulletin of NTU KhPI], 2004, No. 46. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-mezhdunarodnogo-rynka-elektronnykh-tehnologii> (accessed 25 October 2024).
9. *Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A.* Vysokoproizvoditel'nye rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy dlya tsifrovoy obrabotki signalov [High-performance reconfigurable computing systems for digital signal processing], *Tr. Rossiyskogo nauchno-tekhnicheskogo obshchestva radiotekhniki, elektroniki i svyazi imeni A.S. Popova. Seriya: Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye* [Proceedings of the Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications named after A.S. Popov. Series: Digital signal processing and its application], 2010, Issue XII – 1, pp. 13-18.
10. *Chkan A.V.* Povyshenie real'noy proizvoditel'nosti RVS pri reshenii zadach tsifrovoy obrabotki izobrazheniy s ispol'zovaniem bystrogo preobrazovaniya Fur'e [Improving the real performance of RCS in solving digital image processing problems using the fast Fourier transform], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 7 (217). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-realnoy-proizvoditelnosti-rvs-pri-reshenii-zadach-tsifrovoy-obrabotki-izobrazheniy-s-ispolzovaniem-bystrogo> (accessed 25 October 2024).
11. *Dordopulo A.I., Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A.* Vysokoproizvoditel'nye mnogoprotsessornye sistemy s rekonfiguriruemoy arkhitekturoy dlya tsifrovoy obrabotki signalov [High-performance multiprocessor systems with reconfigurable architecture for digital signal processing], *Vestnik Kontserna PVO «Almaz-Antey»* [Bulletin of the Almaz-Antey Air Defense Concern], 2011, No. 2 (6), pp. 88-104.
12. *Kuan I.A., Azimbaev D.Zh., Shcherbachenyaya A.N., Gerber A.S.* Volokonno-opticheskie linii svyazi [Fiber-optic communication lines], *Vestnik nauki* [Bulletin of Science], 2018, No. 5 (5). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/volonkonno-opticheskie-linii-svyazi> (accessed 25 October 2024).
13. *Pyatibratov A.P., Gudyno L.P., Kirichenko A.A.* P99 Vychislitel'nye sistemy, seti i telekommunikatsii: uchebnik [P99 Computing systems, networks and telecommunications: textbook]. 2nd ed., ed by A.P. Pyatibratova. Moscow.: Finansy i statistika, 2004, 512 p.
14. *Klimenko S.V., Yakovlev V.V., Blagoveshchenskaya E.A.* Issledovanie realizatsiy algoritmov kontrol'noy summy CRC32 [Study of implementations of CRC32 checksum algorithms], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railway Engineering], 2018, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-realizatsiy-algoritmov-kontrolnoy-summy-crc32> (accessed 31 March 2025).

15. Solov'ev V.V. Arkhitektury PLIS firmy Xilinx: CPLD i FPGA 7-y serii [Xilinx FPGA architectures: CPLD and FPGA 7th series], Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2019, 392 p.
16. Avizienis A., Laprie J., Randell B., Landwehr C. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2004, No. 1, pp. 11-33.
17. Mukha Ar A. Kolichestvennaya otsenka urovnya garantospobnosti komp'yuternykh sistem [Quantitative assessment of the level of guarantee capacity of computer systems], *MMS [MMS]*, 2019, No. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kolichestvennaya-otsenka-urovnya-garantospobnosti-kompyuternykh-sistem> (accessed 31 March 2025).
18. Veniaminov S.S. Kosmicheskii musor ugrozhaet planete [Space debris threatens the planet], *Vozdushno-kosmicheskaya sfera [Air and space sphere]*, 2016, No. 1 (86). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kosmicheskii-musor-ugrozhaet-planete> (accessed 24 July 2024).
19. Klyushnikov V.Yu. Sindrom Kesslera: budet li zakryta doroga v kosmos? [Kessler syndrome: will the road to space be closed?], *VKS [VKS]*, 2021, No. 4 (109). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sindrom-kesslera-budet-li-zakryta-doroga-v-kosmos> (accessed 25 October 2024).
20. Dzyuba A.P. Perspektivy razvitiya fazirovannykh antenykh reshetok [Prospects for the development of phased antenna arrays], *Vestnik DGTU. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of DSTU. Technical sciences]*, 2013, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-fazirovannykh-antenykh-reshetok> (accessed 25 October 2024).

Левин Илья Израилевич – Южный федеральный университет; e-mail: levin@superevm.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634612111; кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Буряков Дмитрий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: dburiakov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79198955502; кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем; аспирант.

Levin Ilya Izrailevich – Southern Federal University; e-mail: levin@superevm.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634612111; the Department of Intelligent and Multiprocessor Systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Buryakov Dmitrii Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: dburiakov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79198955502; the Department of Intelligent and Multiprocessor Systems; postgraduate student.

УДК 004.932.75'1

DOI 10.18522/2311-3103-2025-3-134-144

Д.А. Безуглов, М.С. Мищенко, С.Е. Мищенко

АЛГОРИТМ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ОБУЧЕНИЯ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ БУКВ И СИМВОЛОВ

Точность распознавания текстовых изображений на практике остается ограниченной. Это связано с тем, что в алфавит символов могут входить строчные и прописные буквы со схожим начертанием, а также составные символы, образованные из нескольких более простых символов. Для решения этой проблемы систему распознавания символов дополняют системами семантического или структурного анализа, что существенно усложняет информационную систему для распознавания текста. В настоящее время для распознавания одиночных символов широко применяют сверточные нейронные сети, для обучения которых используют базу данных с изображениями распознаваемых символов. В работе предложен алгоритм, отличающийся тем, что в изображение одиночного символа для обучающей выборки включают фрагменты символов, которые могут быть расположены в строке в непосредственной близости от распознаваемого символа. Формирование изображений для обучающей выборки имитирует процесс сегментации символа по яркости, который обычно используют при выделении символа для дальнейшего распознавания. При этом оценивают размеры символа, дополняют его изображениями соседних символов, а затем оценивают размеры области, изображения, которое будет помещено в обучающую выборку. Полученное изображение масштабируют и обрезают таким образом, чтобы на вход нейронной сети поступали изображения заданного размера. В работе для распознавания алфавита символов, включающего прописные и строчные символы русского и английского алфавитов, цифры, символы