

# МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ГАРАНТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КОМПЛЕКСАХ ЦОС

**Д.С. Буряков**

*ООО «Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров»*

Россия, 347900, Таганрог, Итальянский пер., 106

E-mail: dburiakov@sfedu.ru

**Ключевые слова:** программируемая логическая интегральная схема, передача данных, обнаружение ошибок, парирование аварийных ситуаций.

**Аннотация:** В данных тезисах предлагаются методы обеспечения гарантоспособности при когерентной (согласованной) передаче и обработке данных в многоканальных системах цифровой обработки сигналов (ЦОС), блоки которых реализованы на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [1]. Рассмотрены наиболее вероятные сценарии аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в системе передачи данных, и предложены соответствующие методы их детектирования, парирования, а также минимизации воздействия ошибок на процесс формирования конечного результата. Система передачи данных, построенная на основе предложенных в статье принципов, успешно прошла тестирование на реальном устройстве ЦОС. Предложенные решения не только обеспечивают когерентную передачу данных между распределенными узлами комплекса ЦОС, но также предоставляют эффективные механизмы для обнаружения и парирования наиболее вероятных аварийных сценариев. Эти подходы способствуют повышению надежности и устойчивости системы в условиях воздействия различных факторов, способных вызвать нештатные ситуации в процессе передачи данных.

## 1. Введение

Когерентная цифровая обработка сигналов применяется в задачах, где необходима эффективная обработка данных от множества высокоскоростных каналов в темпе поступления информации.

Одним из значимых применений когерентной передачи данных является ее использование в системах обработки данных, полученных от антенных элементов (АЭ) фазированных антенных решеток (ФАР). В сочетании с высокопроизводительными вычислительными устройствами ФАР открывают широкий спектр новых возможностей в области обработки радиосигналов [2].

Системы когерентной передачи данных в системах с ФАР обладают рядом характерных особенностей. Прежде всего, отметим необходимость синхронной обработки информации, поступающей в реальном времени от большого количества АЭ. Этот процесс требует синхронной оцифровки сигналов во всех АЭ ФАР, а также их последующей синхронной обработки для формирования одного отчета результата. Следующей важной особенностью для когерентной цифровой обработки сигналов является обеспечение минимальной латентности как в каналах передачи данных, так и в блоках цифровой обработки сигналов. Латентность в данном контексте означает временную задержку между моментом поступления сигнала и моментом, когда

обработанный результат становится доступным для использования. Важность низкой латентности особенно проявляется в системах радиолокации, где необходимо оперативно изменять диаграмму направленности в соответствии с быстроизменяющейся радиолокационной обстановкой, в том числе для быстрого и эффективного реагирования на потенциальные источники помех и интерференции.

В некоторых комплексах количество АЭ может достигать десятков тысяч, а общая протяженность линий связи между АЭ ФАР и блоками обработки может составлять сотни метров [3]. В процессе передачи данных существует вероятность возникновения ошибок, которые требуется выявлять и принимать меры по их минимизации для предотвращения негативного влияния на результат. С целью обнаружения и устранения наиболее вероятных аварийных ситуаций были разработаны методы повышения гарантированности системы передачи данных, учитывающие особенности систем когерентной цифровой обработки сигналов от ФАР.

## 2. Система когерентной передачи данных

Рассмотрим структуру комплекса ЦОС с обработкой информации от ФАР показанную на рис. 1.

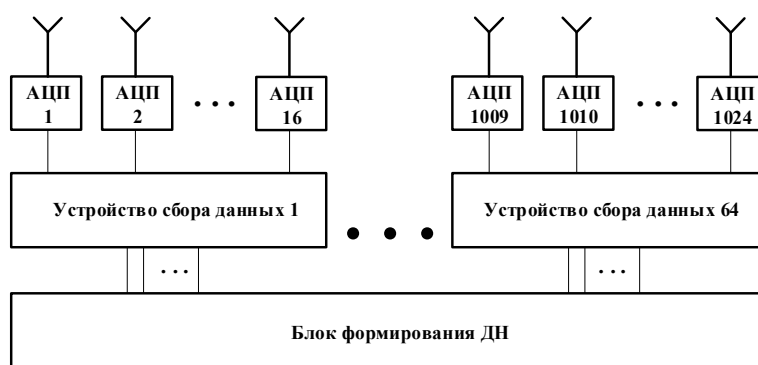


Рис. 1. Устройство формирования диаграмм направленности.

Система передачи данных реализуется в каждом узле системы. В качестве примера рассмотрим процесс передачи данных от модулей аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) к устройству сбора данных.

Синхронизация узлов осуществляется путем использования системы единого машинного времени и общего источника опорной тактовой частоты. Сигналы опорной тактовой частоты и единого машинного времени распространяются во все узлы из общего генератора опорных сигналов по специальным каналам с одинаковой задержкой. Это обеспечивает координацию множества одновременных событий в рамках всего комплекса, таких как, например, запуск процесса оцифровки данных от всех АЭ ФАР, запуск процесса формирования диаграммы направленности.

В качестве линий связи используются оптические каналы. Они отличаются стабильными параметрами и обладают рядом преимуществ по сравнению с другими физическими средами передачи информации [4]. Каналы передачи данных включают в себя оптические линии, преобразователи электрических сигналов и интерфейсные модули, каждый из которых вносит свой вклад в общую задержку передаваемой в канале информации. Например, при проведении тренировки каналов, интерфейсный модуль каждого канала, независимо от других, вставляет такты синхронизации.

В данной системе информация, полученная от антенных элементов фазированной антенной решетки, подвергается непрерывной оцифровке в модулях АЦП. Этот процесс формирует непрерывный поток данных, который в последующем подвергается пакетированию на выходе модулей АЦП (рис. 2). Это необходимо для обеспечения возможности синхронизации потоков данных, поступающих от различных модулей АЦП в устройство сбора данных. Таким образом, достигается синхронное поступление данных, что является ключевым условием для последующей когерентной обработки информации.

В возникшем межпакетном интервале к каждому пакету прикрепляется заголовок, содержащий служебную информацию и отметку времени захвата пакета. Это время используется блоками формирования диаграмм направленности с целью компенсации латентности во всей цепи передачи данных. Кроме того, для каждого пакета вычисляется контрольная сумма.

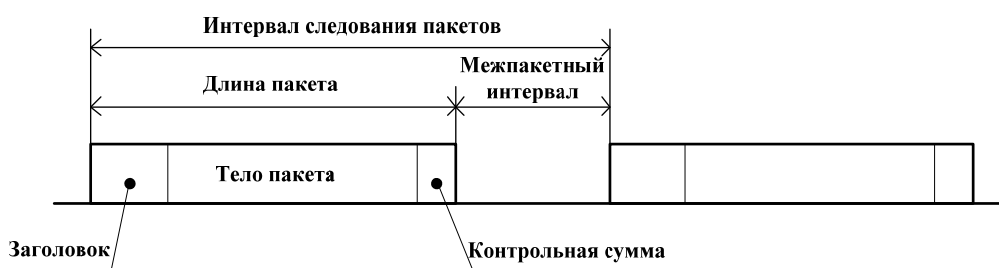
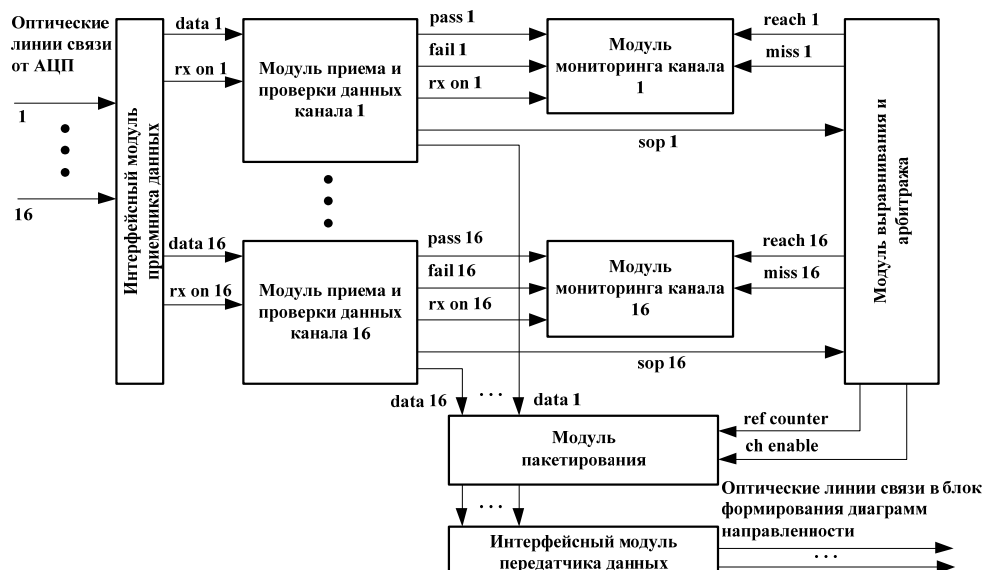


Рис. 2. Передача данных пакетами операндов.

### 3. Обнаружение и парирование аварийных ситуаций

Выделены три основных типа аварийных ситуаций, которые наиболее вероятны для системы передачи данных: полное отсутствие данных в канале, нарушение целостности передаваемой информации и рассогласование времени прихода пакетов в различных каналах. Эти ситуации могут возникнуть из-за выхода из строя источника данных, внешних воздействий на линию связи или других причин. Алгоритмы обнаружения и парирования аварийных ситуаций реализуются в устройстве сбора данных (рис. 3).

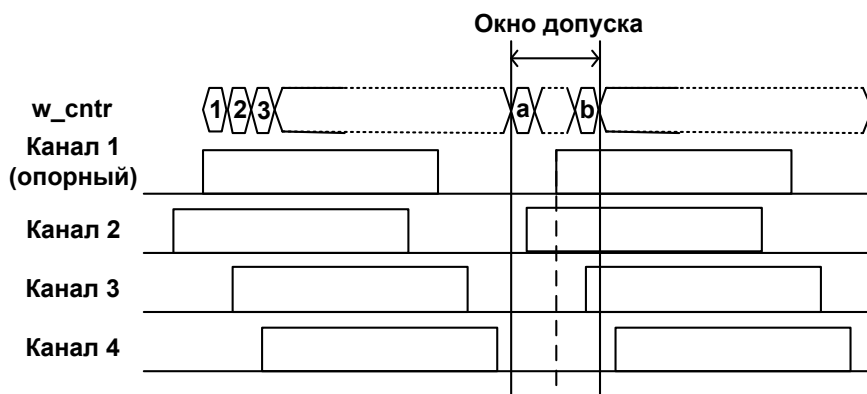


**Рис. 3.** Структура логических модулей в устройстве сбора данных.

Для обработки аварийных ситуаций первого типа, связанных с потерей данных вследствие прерывания оптического соединения, применяется алгоритм мониторинга состояния канала. Данный алгоритм осуществляет анализ статуса соединения, полученного от интерфейсного модуля мультигигабитного трансивера (MGT) в ПЛИС. При отсутствии соединения данные в выходном интерфейсе канала подменяются пакетами с нулевой информацией. Это минимизирует воздействие вышедшего из строя канала на результаты обработки данных. После отключения канала интерфейсный модуль продолжает отслеживать состояние канала. Если в течение определенного временного интервала фиксируется безошибочное получение данных, канал восстанавливается. Восстановленный канал подвергается проверке на соответствие допустимым задержкам, и в случае успешного прохождения проверки он активируется.

Контроль целостности передаваемых данных обеспечивается с помощью контрольных сумм CRC [5]. Этот механизм эффективен для обнаружения ошибок и может также обнаружить аварийную ситуацию полного пропадания пакетов при наличии оптического соединения, вызванную рассогласованием машинного времени в разных узлах, проблемами в канале управления или другими неисправностями передатчика и приемника.

Рассогласование во времени прихода пакетов в различных каналах может произойти из-за нарушений синхронизации передатчика с источником машинного времени или опорной тактовой частоты. Для обработки данной аварийной ситуации предварительно назначается группа опорных каналов. Затем относительно одного из этих опорных каналов устанавливается допустимый диапазон рассогласования времени прихода пакетов от остальных каналов (окно допуска). Если начало пакета данных одного из каналов поступает за пределами окна допуска, то информация в пакетах канала подменяются пакетами с нулевой информацией.



**Рис. 4.** Определение недопустимых задержек.

На рис. 4 первый канал выбран в качестве опорного, на границе интервала следования пакетов опорного канала сформировано окно допуска, попадание в которое проверяется по всем остальным каналам. Начала пакетов каналов 2 и 3 попадают в окно допуска рассогласований, поэтому они будут выравнены и приведены к началу пакета опорного канала, и отправлены дальше по системе. Начало пакета канала 4 не попадает

в окно, поэтому дальше в систему обработки будет сформирован и отправлен пакет, синхронный опорному с нулевой информацией.

В случае сбоя опорного канала алгоритм автоматически выбирает следующий канал из группы опорных каналов. Переключение на новый опорный канал осуществляется в межпакетном интервале, что предотвращает нарушение структуры передаваемого пакета. При отказе всех опорных каналов модуль переключается на так называемый, «виртуальный» опорный канал, который повторяет параметры последнего активного опорного канала. Таким образом, сохраняется работоспособность системы до восстановления одного из опорных каналов.

Для предотвращения отрицательного воздействия нестабильных каналов на результат обработки был внедрен механизм мониторинга. В ходе работы этот механизм собирает статистику сбоев для каждого канала. Если количество сбоев превышает установленный порог за определенный временной интервал, канал автоматически переключается на выдачу пакетов с нулевой информацией. В общем случае можно настраивать программно определенный период времени, в течение которого наличие или отсутствие ошибок становится критерием для отключения или восстановления работоспособности канала.

## 4. Заключение

Предложенные методы выявления и устранения аварийных ситуаций в системе передачи данных успешно прошли тестирование на реальном устройстве, используемом для формирования диаграмм направленности с обработкой информации от ФАР. В контрольных проверках было передано  $152 \cdot 10^{15}$  байт информации на скоростях  $7,2 \cdot 10^9$  бит/с в течение 48 часов. В процессе тестирования также были имитированы различные аварийные ситуации. Система передачи данных успешно реагировала на все воздействия, эффективно парируя внесенные аварийные ситуации.

## Список литературы

1. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы для цифровой обработки сигналов // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск: XII – 1. Москва. 2010 г. С. 13–18. 6 с.
2. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках: монография. М.: Радиотехника, 2010. 144 с.
3. Дзюба А.П. Перспективы развития фазированных антенных решеток // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2013. № 3.
4. Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. Теория и технология волоконно-оптических линий связи // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 4 (4).
5. Клименко С.В., Яковлев В.В., Благовещенская Е.А. Исследование реализаций алгоритмов контрольной суммы CRC32 // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. № 3. 471-477.