

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

Предложены некоторые методы обеспечения когерентной обработки данных в системах радиолокации и связи, включающих фазированные антенные решетки (ФАР). Разработан подход для сбора оцифрованных данных от антенных элементов ФАР и передачи информации между распределенными узлами, которые выполняют цифровую обработку сигналов. Для обеспечения когерентной обработки и передачи данных предлагается использовать сигнал опорной тактовой частоты и единое машинное время, которые генерируются в центральном узле и распространяются по каналам с одинаковой задержкой. Все управляющие воздействия в узлах обработки основаны на данных сигнала. Для передачи оцифрованных данных от антенных элементов ФАР в работе предлагается использовать передачу фрагментами операндов с контролем целостности информации и привязкой ко времени оцифрованных данных. Проведенные эксперименты на реальном устройстве формирования диаграммы направленности подтвердили эффективность данного метода и его пригодность для практического использования. Развитие систем цифровой обработки сигналов (ЦОС) с ФАР постоянно движется вперед, требуется создание новых радиолокационных систем с высокой разрешающей способностью и достаточной чувствительностью. Обычно для повышения разрешающей способности увеличивают количество антенных элементов ФАР. Однако это приводит к увеличению размеров антенны и, следовательно, длины линий связи. При увеличении длины линии связи могут возникать различия в путях распространения сигнала из-за разброса характеристик оптических линий связи и воздействия внешних факторов на сигнал при его передаче через более длинные линии. Это может привести к неоднородности в задержках между каналами синхронизации и нарушению работы системы когерентной обработки. В связи с этим в работе предложен новый метод динамической компенсации задержек в каналах системы единого машинного времени для корректной работы с большими длинами линий связи.

Фазированная антенная решетка; программируемая логическая интегральная схема; когерентная обработка данных; система единого времени; компенсация задержек.

I.I. Levin, D.S. Buryakov**SOME METHODS FOR DATA FLOW SYNCHRONIZATION IN DIGITAL SIGNAL
PROCESSING SYSTEMS**

The paper proposes some methods of providing coherent data processing in radar and communication systems that include phased arrays. An approach is developed to collect digitized data from the antenna elements of phased array and transfer information between distributed nodes that perform digital signal processing. To ensure coherent data processing and transmission, it is proposed to use a reference clock frequency signal and a common machine time, which are generated in the central node and distributed through the channels with the same delay. All control actions in the processing nodes are based on these signals. For the transmission of digitized data from the antenna elements of the phased array in the work it is proposed to use the transmission by fragments of operands with information integrity control and time reference of the digitized data. The experiments conducted on a real directional pattern formation device confirmed the effectiveness of this method and its suitability for practical use. The development of digital signal processing systems with phased array is constantly moving forward, and new radar systems with high resolution and sufficient sensitivity are required. Usually, to increase the resolution, the number of antenna elements is increased. However, this leads to an increase in the size of the antenna and hence the length of the links. As the length of the link increases, differences in signal propagation paths may occur due to the variation in the characteristics of optical links and the influence of external factors on the signal as it is transmitted through longer links. This can lead to inhomogeneity in delays between synchronization channels and disruption of the coherent processing system. In this regard, a new method of dynamic compensation of delays in the channels of the common machine time system for correct operation with long communication lines is proposed in this paper.

Phased array antenna; field programmable gate array; coherent data processing; common time system; delay compensation.

Введение. Когерентная обработка данных применяется в задачах, предполагающих совместную, согласованную обработку информации, поступающей из различных источников со скоростью, сопоставимой с темпом поступления данных. На сегодняшний день подобная обработка сигналов получила широкое распространение и используется в различных областях электроники и радиотехники, включая такие важные области, как радиосвязь и радиолокация.

Одним из ключевых применений когерентной обработки является обработка данных, поступающих от фазированных антенных решеток. В сочетании с высокопроизводительными вычислительными устройствами ФАР позволяет формировать несколько независимо управляемых диаграмм направленности, обеспечивая точную локализацию объектов и эффективную работу радиосвязи. Кроме того, адаптивное формирование диаграмм направленности ФАР способствует снижению уровня помех, включая интерференцию от других источников, что особенно важно в условиях высоких электромагнитных помех, характерных для городской среды. Другим преимуществом ФАР является их способность работать при частичной деградации системы, например, при отказе отдельных антенных элементов [1].

Суть формирования диаграммы направленности в определенном направлении заключается в том, чтобы компенсировать временные задержки и суммировать сигналы от отдельных антенных элементов синфазно, то есть когерентно. Можно рассматривать диаграмму направленности как пространственный фильтр, который усиливает сигналы из заданного направления и подавляет сигналы из других направлений [2].

Основными параметрами диаграммы направленности фазированной антенной решетки являются ширина основного лепестка диаграммы направленности, уровень боковых лепестков, а также их пространственное направление относительно полотна антенной решетки. Данные параметры обеспечиваются за счёт необходимого фазового распределения по апертуре ФАР [3].

При цифровой обработке сигналов, поступающих от элементов ФАР, источником фазовых ошибок является разница фаз вследствие неодновременности оцифровки и обработки. Данная ошибка может возникать по двум основным причинам, первая из которых заключается в том, что отсчеты, полученные от различных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) данных от антенных элементов в один и тот же момент физического времени могут быть маркированы разными временными метками. Вторая причина связана с рассогласованием потоков данных во время их передачи к узлам обработки [4].

Для когерентной обработки данных критически важно обеспечить одновременное поступление данных, соответствующих одному моменту физического времени от всех без исключения антенных элементов ФАР. Далее по тексту такую передачу данных будем называть изохронной.

Аппаратные средства когерентной обработки информационных потоков. Обеспечение когерентной обработки данных может быть достигнуто с помощью специальных методов и средств обработки данных, а также более эффективных алгоритмов синхронизации работы всех узлов системы, которые будут рассмотрены в данной статье.

Вычислительные устройства высокой производительности для решения задач когерентной обработки информации от антенных элементов ФАР могут быть реализованы на различной элементной базе: на универсальных и специальных процессорах, специализированных интегральных схемах (ASIC) или программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС).

Вычислители на основе универсальных процессоров являются гибкими и удобными средствами программирования. Однако, в контексте систем с обработкой информации от фазированных антенных решеток, они имеют несколько существенных недостатков, первым и наиболее значимым из которых является ограниченная вычислительная мощность универсальных процессоров. Алгоритмы обработки информации от ФАР часто требуют больших вычислительных затрат, т.к. включают в себя сложные и трудоемкие математические операции, расчеты и обработку больших объемов данных. В данном случае про-

производительность процессоров может оказаться недостаточной для эффективной реализации подобных алгоритмов в режиме реального времени, что в дальнейшем может привести к высоким задержкам [5].

Вторым недостатком является недостаточная шина памяти. Для процессоров с общей шиной памяти доступ к памяти может быть узким местом при одновременном обращении нескольких потоков, что может снизить производительность системы.

Другим существенным недостатком является ограниченная параллельная обработка. В задачах обработки информации от фазированных антенных решеток требуется обработка больших объемов данных в режиме реального времени, что может быть трудно реализуемо на процессорах ввиду их ограниченной способности к параллельной обработке. Для эффективного использования ресурсов процессора требуется рациональное планирование и управление потоками. В случае многоканальной обработки данных могут возникать трудности в реализации в виду того, что процессору необходимо эффективно распределять ресурсы между несколькими потоками, что может вызывать задержки и увеличивать накладные расходы на организацию вычислительного процесса [6].

Наконец, еще одним недостатком универсальных процессоров является сложность их интеграции с аппаратными компонентами систем с ФАР. В системах с обработкой информации от ФАР часто требуется наличие развитой периферии для обеспечения множества быстрых каналов передачи когерентных данных между распределенными компонентами систем с ФАР, а также средств синхронизации для обеспечения когерентной обработки.

Альтернативой системам на основе универсальных процессоров в настоящее время являются системы, построенные на основе заказных интегральных схем специального назначения (ASIC). Главным недостатком использования заказных микросхем является их узкая направленность. Интегральные схемы специального назначения проектируются под конкретную прикладную задачу. Изготовление данных микросхем является трудоемким процессом: полный цикл разработки занимает от 12 до 18 месяцев. При изменении алгоритма решения задачи или в случае нахождения ошибок в схеме применять уже созданные микросхемы и специализированные устройства не представляется возможным, а для создания новых микросхем необходимо проводить все этапы разработки заново [7].

В связи с вышесказанным микросхемы ASIC целесообразно применять для создания изделий массового потребления. Специализированные вычислители, обрабатывающие информацию от ФАР, не являются массовым продуктом, поэтому применение заказных микросхем повлечет за собой существенное удорожание продукции.

В ряде работ [8, 9] описано применение реконфигурируемых вычислительных систем на основе ПЛИС в составе устройств, ориентированных на многоканальную высокопроизводительную обработку сигналов.

ПЛИС, подобно ASIC, проектируется под конкретную задачу, однако ПЛИС позволяют вносить корректировки алгоритмов работы, что обеспечивает гибкость устройств, построенных на их основе. Благодаря этой гибкости, можно быстро адаптировать систему к изменяющимся требованиям без необходимости переработки аппаратных средств. Наличие в ПЛИС большого числа ресурсов для построения различных алгоритмов цифровой обработки сигналов и множества внешних интерфейсов дает возможность организовать в системах ЦОС многопоточную когерентную обработку огромного количества данных. Также в ПЛИС возможно обеспечить минимальную задержку при обработке данных благодаря оптимизации логики и прямого доступа к аппаратным ресурсам. Это особенно критично для многоканальных систем в реальном времени, где даже небольшие задержки могут быть неприемлемы [10].

Применение ПЛИС для систем когерентной обработки информации от антенных элементов ФАР может сократить время и затраты на разработку за счет использования высокоуровневых языков программирования, более быстрой отладки и модификации функционала. Это делает разработку подобных систем на основе ПЛИС более эффективной и экономически целесообразной, в отличие от систем на основе универсальных процессоров или специализированных интегральных схем.

Подсистема синхронизации информационных потоков. Линии связи для передачи данных и сигналов синхронизации должны обладать низкими фазовыми шумами, высокой пропускной способностью, устойчивостью при работе в условиях воздействия электромагнитных помех [11]. В указанных условиях реализации линий связи для каналов синхронизации и передачи данных в комплексе ЦОС с ФАР наилучшим образом подходят оптические линии.

Как отмечалось ранее, одним из ключевых условий выполнения требований по обработке информации от ФАР является обеспечение изохронной передачи данных из различных распределенных источников для когерентной обработки в узлах формирования диаграмм направленности. Для этого необходимо обеспечить ряд согласованных событий по всем узлам системы, таких как одновременный запуск процесса оцифровки данных, временная привязка полученных цифровых данных, синхронизация вычислительных процессов формирования диаграмм направленности и другие.

Существует два подхода для обеспечения множества согласованных событий. Первый подход включает в себя создание всех необходимых сигналов для согласованной обработки в центральном узле и их распределение по всем узлам устройства формирования диаграмм направленности. Данный метод применим только в случае систем с небольшим количеством управляющих сигналов и узлов. Второй подход предполагает создание и распределение ограниченного числа опорных сигналов из центрального узла, а все необходимые сигналы для конкретного узла формируются внутри него (рис. 1). Для реализации второго подхода достаточно только двух сигналов: опорной тактовой частоты (ОТЧ) и сигнала единого машинного времени (ЕМВ). Этот метод более предпочтителен, т.к. позволяет значительно сократить количество каналов передачи данных с одинаковой задержкой в системе [12].

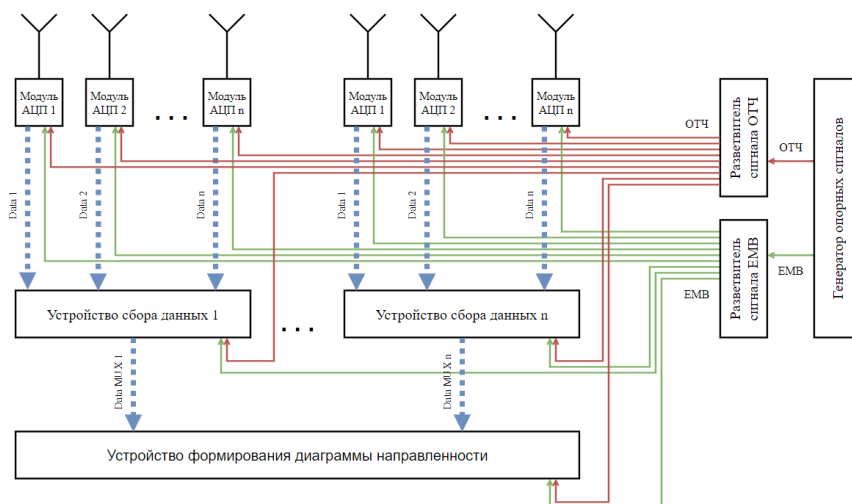


Рис. 1. Структура системы ЦОС с обработкой информации от ФАР

Единое машинное время и опорная тактовая частота распространяются по всем узлам из общего генератора опорных сигналов через линии связи одинаковой длины. Система машинного времени реализуется в каждом узле. У каждого узла есть счетчик текущего времени, который работает от опорной тактовой частоты и периодически обновляется значениями времени из источника единого машинного времени. Например, для запуска оцифровки данных требуется записать в модули АЦП время начала оцифровки. Когда время, указанное в счетчиках машинного времени, достигнуто, все модули АЦП одновременно начинают выполнение задачи. Аналогично запускаются все остальные процессы и генерируются управляющие сигналы, необходимые для когерентной обработки информации во всех узлах устройства формирования диаграмм направленности.

Использование единой опорной тактовой частоты для работы различных устройств обеспечивает синхронизацию их внутренних частотных схем. Это предотвращает «разбегание» внутренних частот устройств, вызванного различиями в характеристиках синтезаторов частот. Такой подход обеспечивает стабильность работы системы и предотвращает проблемы, связанные с различиями в работе внутренних синтезаторов частот [13].

Для передачи сигнала единого машинного времени на практике часто используется линейный самосинхронизирующийся код Манчестер-II [14]. Основная идея кода Манчестера заключается в кодировании каждого бита данных с использованием двух состояний сигнала, например, переход с низкого уровня на высокий или с высокого на низкий (рис. 2). Это позволяет обеспечить постоянное изменение состояния сигнала, что улучшает его устойчивость к шумам и помехам, а также обеспечивает синхронизацию. В коде Манчестера-II каждый бит данных кодируется с использованием двух переходов за период тактового сигнала. Таким образом, для передачи одного бита данных используется два тактовых сигнала. Это удвоенная версия оригинального кода Манчестера, которая обеспечивает дополнительную надежность передачи данных.

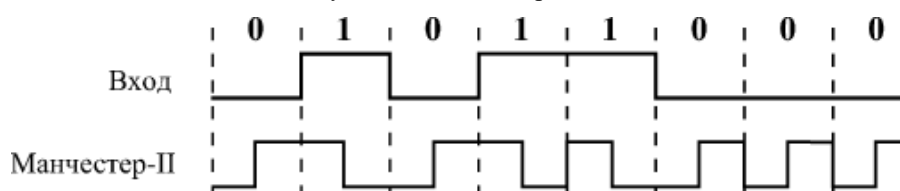


Рис. 2. Временная диаграмма кода Манчестер 2

Кроме того, Манчестерское кодирование не имеет постоянной составляющей, поскольку среднее значение сигнала равно нулю за счет изменения уровней сигнала на каждом такте. Отсутствие постоянной составляющей упрощает процесс декодирования сигнала на приемной стороне и делает сигнал менее чувствительным к постоянным помехам или смещениям уровня сигнала.

Метод обеспечения согласованной передачи данных. Для реализации гарантоспособности когерентной обработки необходимо обеспечить изохронную передачу оцифрованной информации по всем без исключения каналам данных в узлы обработки.

В тоже время, в каналах связи неизбежно возникают рассогласования, поскольку каналы передачи данных – это не только оптическая линия, но и преобразователи электрических сигналов в оптические и обратно, а также интерфейсные модули. Все функционирующие устройства вносят дополнительную задержку, которая в каждом из каналов может быть разной. Например, при проведении тренировки каналов интерфейсный модуль каждого канала, независимо от других, вставляет такты синхронизации. Рассогласование потоков данных между оптическими каналами является недопустимым, поскольку ведет к неправильному их использованию и, как следствие, некорректному результату обработки.

Прежде всего, требуется выровнять потоки данных в разных каналах для их согласованного получения в узлах приема. Кроме того, необходимо осуществить привязку оцифрованных данных к физическому времени.

Самый тривиальный способ передачи данных – применение непрерывного потока данных. Однако в этом случае проблематично выровнять потоки относительно друг друга и обеспечить привязку данных ко времени без существенных увеличений аппаратных затрат.

Классическая пакетная передача также не применима для решения данной задачи, поскольку требуется обеспечить поток данных в режиме реального времени, не допуская большой задержки. При классической пакетной передаче, после передачи каждого пакета, отправитель ожидает подтверждения от получателя. Если после определенного времени ожидания не было подтверждения получения пакета данных, то пакет отправляется снова [15]. Такой протокол создает недопустимые задержки передачи данных и может нарушить порядок следования пакетов данных, что недопустимо при когерентной обработке.

Поэтому был разработан гибридный способ передачи, сочетающий в себе элементы вышеперечисленных методов – передача данных потоком массивов операндов, разделенных служебными промежутками (рис. 3).



Рис. 3. Передача данных массивами операндов

Наличие служебных промежутков позволяет сформировать данные в неразрывные фрагменты, которыми можно легко манипулировать, включая выравнивание задержек между различными каналами передачи данных.

Одним из ключевых преимуществ разработанного подхода является возможность добавления к каждому фрагменту заголовка, содержащего сервисную информацию. Заголовок может содержать информацию о канале передачи, а также другие важные параметры, необходимые для корректной интерпретации и обработки данных на стороне приемника. Также в заголовке можно разместить временную метку, тем самым осуществив привязку ко времени всего массива операндов, но не каждого операнда в отдельности, минимизируя аппаратные и временные затраты. Более того, становится возможным внедрение средств контроля целостности передаваемой информации. Это позволяет обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие в процессе передачи данных, что повышает надежность и точность передачи информации.

Для выравнивания задержек в различных каналах данных на стороне приемника требуется назначить один или несколько каналов в качестве опорных и выравнивать задержки в остальных каналах относительно опорных. Процесс выравнивания задержек всегда осуществляется относительно первого опорного канала, остальные каналы служат резервными на случай отказа текущего опорного канала. Все операции, корректирующие задержки, выполняются в интервале между массивами операндов.

Применение данного метода позволило обеспечить изохронную передачу информации в узлы обработки, а также повысить гарантоспособность подсистемы передачи данных.

Все представленные решения были апробированы в реальном устройстве формирования диаграммы направленности. Алгоритм выравнивания парировал возникающие задержки; сбоев в работе системы не отмечалось. Апробация на устройстве формирования диаграммы направленности подтвердила эффективность предложенных решений для практического применения. Согласно оценочным данным, гибридный метод может обеспечить гарантоспособность когерентной обработки для системы ЦОС с ФАР, включающую в себя 30000 антенных элементов с длинами межблочных связей более 100 метров.

Ограничения применения метода. Развитие систем с ФАР не стоит на месте. Возникают новые трудоемкие научно-технические задачи, к числу которых относится решение проблемы космического мусора, увеличение количества которого в последние годы стал серьезной угрозой безопасности космических полетов (рис. 4) [16]. С ростом коммерческих и государственных космических программ увеличивается количество запусков спутников и космических аппаратов. Каждый запуск добавляет новые объекты на орбиту, а отсутствие системы активного удаления мусора приводит к тому, что проблема становится все более острой. Все это создает риск столкновений, которые могут породить каскадный эффект, известный как «Синдром Кesslerа» [17].

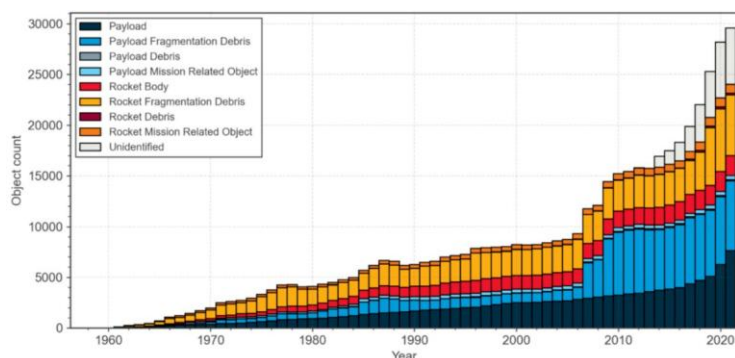


Рис. 4. Динамика увеличения объемов космического мусора на околоземной орбите

С увеличением объемов космического мусора возрастает актуальность и необходимость разработки эффективных средств обнаружения. Кроме того, на сегодняшний день отмечается необходимость обнаружения космических объектов меньшего размера, в отличие от тех, которые на данный момент могут быть обнаружены современными радиолокационными станциями. Как известно, даже малейшие фрагменты космического мусора, движущиеся со значительной скоростью, могут нанести значительный ущерб космическим аппаратам, находящимся на орбите. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых радиолокационных систем с высокой разрешающей способностью и достаточной чувствительностью для обнаружения этих объектов.

Для повышения разрешающей способности, как правило, увеличивают количество антенных элементов ФАР, что позволяет сформировать более узкий луч за счет сужения диаграммы направленности [18]. Это позволит получить более точную информацию о положении и движении объектов в зоне обнаружения.

Следует отметить, что увеличение количества антенных элементов ФАР сопровождается рядом технических проблем, которые требуется решать на этапе разработки подобных систем. Прежде всего, увеличение количества антенных элементов приводит к увеличению апертуры антенны, а значит, и длин линий связи. Возникает проблема обеспечения когерентной обработки и изохронной передачи информации по каналам данных от мест приема в места обработки. При увеличении длины линии связи различия в путях распространения сигнала могут становиться более заметными из-за разброса характеристик различных оптических линий связи и влияния внешних факторов на сигнал при его передаче через более длинные линии [19]. Это может приводить к неоднородности в задержках между каналами, что неизбежно повлечет нарушение работы системы когерентной обработки.

Поэтому для обеспечения надлежащей работы системы с большими длинами линий связи необходимо применять новые подходы построения данных систем с ФАР.

Метод динамической компенсации задержек в каналах системы цифровой обработки сигналов. Основной проблемой при увеличении длины линий связи и возросшим при этом разбросе задержек в каналах данных является сложность в корректной доставке опорных сигналов. Это, в свою очередь, приводит к нарушению корректной работы системы машинного времени и появлению фазовых ошибок из-за обработки данных от АЦП, полученных в разные моменты физического времени.

Новый предлагаемый метод заключается в применении компенсации задержек, возникающих в каналах передачи сигналов системы ЕМВ, с целью обеспечения синхронизации и корректной привязки оцифрованных данных к физическому времени.

Прежде всего, необходимо вычислить задержку от передатчика генератора ЕМВ к приемнику ЕМВ каждого узла. На данном этапе между узлами отсутствует синхронизация по времени, поэтому вычислить одностороннюю задержку (OWD – One-Way Delay) невозможно, для ее вычисления требуется одинаковое время в передатчике и приемнике. Поэтому вышеописанный способ передачи, использующий одностороннюю отправку сообщений ЕМВ через разветвители к каждому узлу, не подходит.

Предлагается для системы ЕМВ использовать двунаправленные каналы для передачи сигнала ЕМВ из центрального узла к каждому устройству. Таким образом, становится возможным произвести вычисления круговой задержки (RTT – Round-Trip Time). Круговая задержка представляет собой время, затраченное на передачу данных от отправителя к получателю (OWD) и время, затраченное на передачу подтверждения получения данных обратно от получателя к отправителю [20].

Задачу вычисления и компенсации задержек в каналах ЕМВ предлагается осуществлять в генераторе сигналов ЕМВ, который является ключевым элементом в процессе обеспечения согласованности времени в системе. Такой подход обеспечивает централизованное управление процессом синхронизации и компенсации задержек, что упрощает управление и контроль, а также и повышает гарантоспособность системы синхронизации.

Предлагается реализовать два основных режима работы системы единого машинного времени для эффективной коррекции временных задержек. В первом режиме производится вычисление временных задержек для каждого канала передачи данных. Это позволяет установить точное значение задержки, которое затем используется для компенсации временных различий между различными каналами передачи. Во втором режиме работы системы происходит активное распространение времени с учетом ранее вычисленных временных задержек, что позволяет уравнивать неоднородность в задержках линий связи. Структура системы ЕМВ, использующая данный метод представлена на рис. 5.

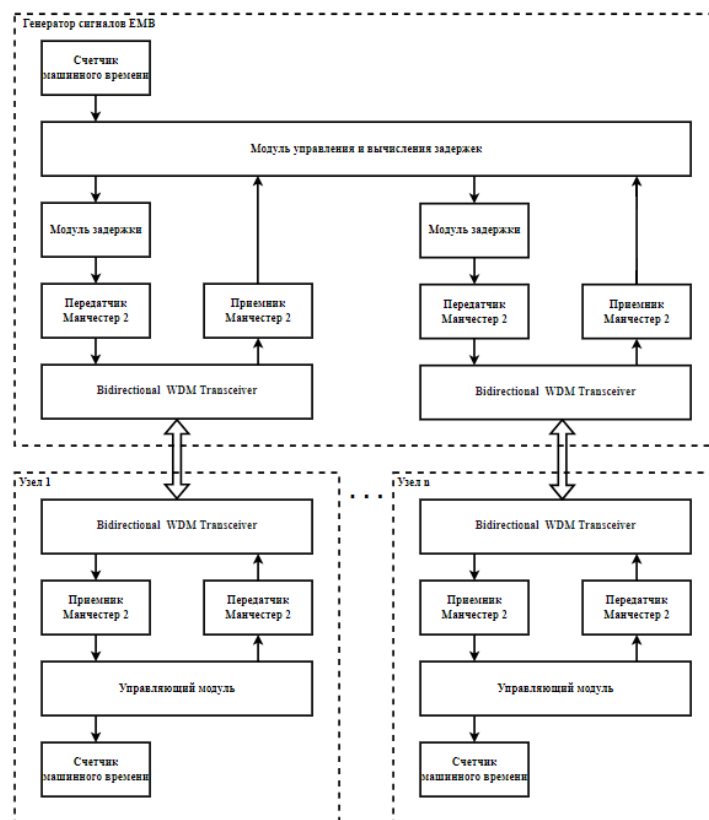


Рис. 5. Структура системы единого машинного времени

Рассмотрим подробнее процесс функционирования системы ЕМВ (рис. 6).

В режиме вычисления временных задержек производится расчет круговой задержки (RTT). Для этого генератором сигналов ЕМВ подается сигнал начала калибровки (start_calib) одновременно во все узлы, который заставляет приемники сигналов ЕМВ узлов перейти в режим вычисления задержек. Далее генератор сигналов ЕМВ отправляет

тестовый сигнал (*test_signal*), запуская при этом счетчики задержек для каждого канала в модуле управления и вычисления задержек. Каждый узел по получению тестового сигнала (*test_signal*) от генератора ЕМВ отправляет его обратно (*test_echo*). После получения сигнала *test_echo* модуль управления и вычислений задержек генератора ЕМВ останавливает соответствующие счетчики задержек по каждому каналу. Полученные значения передаются в модуль задержек, после чего генератор сигналов ЕМВ переключается в режим активного распространения времени. Модуль управления и вычисления задержек генератора сигналов ЕМВ отправляет сигнал сброса (*reset*), а затем передает значения машинного времени (*machine_time*) во все узлы с учетом вычисленных задержек.

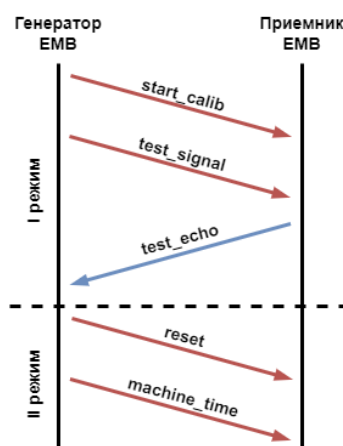


Рис. 6. Работа системы единого машинного времени

Отметим, что разработанный метод позволит нивелировать задержки между каналами в передаче сигнала ЕМВ, которые возникают из-за различия характеристик разных оптических линий с увеличением их протяженности. Таким образом будет обеспечена более точная синхронизация всех узлов системы, что позволит повысить гарантированность когерентной обработки. По предварительному анализу новый метод сможет обеспечить когерентную обработку информации от ФАР, состоящей из 100000 антенных элементов с длинами межблочных связей более 350 метров.

Заключение. В работе предложен и описан новый метод компенсации задержек, возникающих в каналах передачи сигналов системы единого машинного времени, с целью обеспечения синхронизации и корректной привязки оцифрованных данных к физическому времени.

Использование нового метода компенсации задержек позволит устранить неоднородности в задержках между каналами, вызванными разбросом параметров различных оптических линий при увеличении их длины. Это, в свою очередь, позволит создавать более точные и чувствительные комплексы радиолокационных станций с ФАР, удовлетворяющие современным требованиям к радиолокационным системам в различных областях применения, в том числе для систем мониторинга околоземного космического пространства.

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. Ишук И.Н. – Краснояр: СФУ, 2016. – 292 с.
3. Тепликова В.И., Сенцов А.А., Ненашев В.А., Поляков В.Б. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки // Тр. МАИ. – 2022. – № 125. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-diagrammy-napravlenности-ploskoy-mnogoelementnoy-aktivnoy-fazirovannoy-antennoy-reshetki> (дата обращения: 25.10.2024).

4. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках: монография. – М.: Радиотехника, 2010. – 144 с.
5. Женетль С.Н., Куштанок С.А. Современное развитие архитектур микропроцессоров // Новые технологии. – 2009. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-razvitie-arhitektur-mikroprotsessorov> (дата обращения: 25.10.2024).
6. 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).
7. 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).
8. 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.
9. Дордопуло А.И., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Высокопроизводительные многопроцессорные системы с реконфигурируемой архитектурой для цифровой обработки сигналов // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». – 2011. – № 2 (6). – С. 88-104.
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. 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).
12. 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.
13. Сухман С.М., Бернов А.В., Шевкопляс Б.В. Синхронизация в телекоммуникационных системах: Анализ инженерных решений. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 268 с.
14. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 672 с.
15. Пятибратов А.П., Гудыно Л.П., Кириченко А.А. и др. 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.
16. 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).
17. Ключников 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).
18. 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).
19. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАПарт, 2005. – 208 с.
20. Алешин В.С., Догаев С.Г. Задержки распространения сигналов в сетях спутниковой связи // T-Comm. – 2019. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaderzhki-rasprostraneniya-signalov-v-setyah-sputnikovoy-svyazi> (дата обращения: 27.10.2024).

REFERENCES

1. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.O., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. Ustroystva SVCh i anteny [UHF 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 basis of radar and special monitoring: textbook], ed. by Ishchuk I.N. Krasnoyarsk: SFU, 2016, 292 p.

3. *Teplikova V.I., Sentsov A.A., Nenashev V.A., Polyakov V.B.* Analiz diagrammy napravlenosti ploskoy mnogoelementnoy aktivnoy fazirovannoy antennoy reshetki [Directional pattern analysis of a planar multi-element active phased array antenna array], *Tr. MAI* [Trudy MAI], 2022, No. 125. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-diagrammy-napravlenosti-ploskoy-mnogoelementnoy-aktivnoy-fazirovannoy-antennoy-reshetki> (accessed 25 October 2024).
4. *Grigor'ev L.N.* TSifrovoye formirovanie diagrammy napravlenosti v fazirovannykh antennoykh reshetkakh: monografiya [Digital directional pattern formation in phased antenna arrays: monograph]. Moscow: Radiotekhnika, 2010, 144 p.
5. *Zhenetl' S.N., Kushtanok S.A.* Sovremennoe razvitie arkhitektur mikroprotsessorov [Modern development of microprocessor architectures], *Novye tekhnologii* [New technologies], 2009, No. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-razvitie-arhitektur-mikroprotsessorov> (accessed 25 October 2024).
6. *Gorobets A.V., Sukov S.A., Trias F.Kh.* Problemy ispol'zovaniya sovremennykh superkomp'yutеров 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-superkompyutеров-pri-chislennom-modelirovanii-v-gidrodinamike-i-aeroakustike> (accessed 25 October 2024).
7. *Khakhanov V.I., Obrizan V.I., Mel'nikova O.V.* Obzor mezhdunarodnogo rynka elektronnykh tekhnologii [An overview of the international market for electronic technologies], *Vestnik NTU KhPI* [Bulletin of the National Technical University Kharkov Polytechnic Institute], 2004, No. 46. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-mezhdunarodnogo-rynka-elektronnykh-tehnologii> (accessed 25 October 2024).
8. *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.
9. *Dordopulo A.I., Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A.* Vysokoproizvoditel'nye mnogo-protsessornye 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.
10. *Chkan A.V.* Povyshenie real'noy proizvoditel'nosti RVS pri reshenii zadach tsifrovoy obra-botki 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. *Kuan I.A., Azimbaev D.Zh., Shcherbachyena 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/volokonno-opticheskie-linii-svyazi> (accessed 25 October 2024).
12. *Savochkin I.A., Troynikov G.M., Troynikova N.S., Turlakov P.V.* Sistema edinogo vremeni dlya vysokotochnoy sinkhronizatsii raznesennykh radiolokatsionnykh postov [A unified time system for high-precision synchronization of distributed radar posts], *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antey»* [Bulletin of the Almaz-Antey Air Defense Concern], 2014, No. 2, pp. 49-53.
13. *Sukhman S.M., Bernov A.V., Shevkopyas B.V.* Sinkhronizatsiya v telekommunikatsionnykh sistemakh: Analiz inzhenernykh resheniy [Synchronization in telecommunication systems: Analysis of engineering solutions]. Moscow: Eko-Trendz, 2002m 268 p.
14. *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.
15. *Pyatibratov A.P., Gudyno L.P., Kirichenko A.A. i dr.* P99 Vychislitel'nye sistemy, seti i telekommunikatsii: uchebnik [Computer systems, networks and telecommunications: textbook]. 2nd ed., ed. by A.P. Pyatibratova. Moscow: Finansy i statistika, 2004, 512 p.
16. *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).

17. *Klyushnikov V.Yu.* Sindrom Kesslera: budet li zakryta doroga v kosmos? [Kessler syndrome: will the road to space be closed?], *VKS [Aerospace sphere]*, 2021, No. 4 (109). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sindrom-kesslera-budet-li-zakryta-doroga-v-kosmos> (accessed 25 October 2024).
18. *Dzyuba A.P.* Perspektivy razvitiya fazirovannykh antennoykh 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-antennoykh-reshetok> (accessed 25 October 2024).
19. *Listvin A.V., Listvin V.N.* Reflektometriya opticheskikh volokon [Reflectometry of optical fibers]. Moscow: LESARart, 2005, 208 p.
20. *Aleshin V.S., Dogaev S.G.* Zaderzhki rasprostraneniya signalov v setyakh sputnikovoy svyazi [Signal propagation delays in satellite communication networks], *T-Comm*, 2019, No. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaderzhki-rasprostraneniya-signalov-v-setyah-sputnikovoy-svyazi> (accessed 27 October 2024).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Турулин.

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

Буряков Дмитрий Сергеевич – e-mail: dburiakov@sfedu.ru; тел.: +79198955502; 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 – e-mail: dburiakov@sfedu.ru; phone: +79198955502; postgraduate student.

УДК 621.396.624

DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-254-260

А.П. Плёткин

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В КВАНТОВЫХ СЕТЯХ

Приводится способ обнаружения оптического сигнала синхронизации для участка сети квантовых коммуникаций. Целью статьи является представление варианта реализации городской квантовой сети. В работе рассматривается решение задачи конфигурации канала синхронизации для систем квантовой связи нестандартной топологии. Описывается обобщенный принцип работы системы квантового распределения ключей с фазовым кодированием. Предлагается алгоритм синхронизации, адаптированный для конфигурации городской квантовой сети, содержащей несколько сегментов. Особенностью предлагаемой схемы является наличие одной приемопередающей станции, с которой взаимодействуют несколько кодирующих станций. В статье приведены результаты анализа энергетической модели предлагаемого способа и расчет усредненных потерь в квантовом канале. В заключении мы рассуждаем о возможных вариантах структуры квантовых сетей и о применимости в них процессов синхронизации. Сети квантовых коммуникаций активно масштабируются и используют различные протоколы квантового распределения ключей, аутентификации и синхронизации. Квантовое распределение ключей (КРК) решает центральную проблему симметричной криптографии и представляет собой безопасную технологию генерации идентичной последовательности бит у двух удаленных пользователей. Теоретически, безопасность (стойкость) такой технологии не зависит от вычислительной мощности взломщиков, которые, например, могут обладать квантовым компьютером. Тем не менее, практическая реализация теоретических моделей все еще показывает техническое несовершенство, что позволяет злоумышленникам находить уязвимости. При исследовании и проектировании различных модификаций систем квантового распределения ключей (СКРК), необходимо уделять внимание не только вопросам стойкости квантовых протоколов, но и компонентам технической реализации аппаратуры.

Квантовые коммуникации; квантовый ключ; фотонный импульс; вероятность обнаружения; доверенные узлы.