



Методы и средства сетевого синхронного взаимодействия компьютеров с доступом к данным на основе характерных признаков и выполнения распределенных ассоциативных операций

Геннадий Георгиевич **Стецюра** 

Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

 gstetsura@mail.ru

Аннотация. Для распределенной группы активных, синхронно взаимодействующих компьютеров (далее объектов) предложены способы и средства, ускоряющие взаимодействие связанных локальной сетью объектов при замене адресов объектов и данных характерными для них признаками.

В предлагаемые способы и средства входят: структуры синхронных сетевых связей; распределенные ассоциативные синхронные операции; децентрализованный способ входа объектов в режим синхронного взаимодействия; способы управления синхронными действиями объектов; синхронные интерфейсные карты (ИК). Сетевые технические средства состоят только из ИК и ретрансляторов (RT) сигналов объектов, передаваемых между ИК и RT по беспроводным оптическим каналам связи. Объекты-источники выбранные множества данных и задание на их обработку отправляют в RT, где входящие одноименные двоичные разряды данных совмещаются. Созданное в RT общее множество данных RT без задержки пересылает всем объектам-приемникам, которые завершат выполнение распределенных ассоциативных операций.

В результате применяемая в сетях транспортировка данных в синхронных сетях совмещена с распределенными вычислениями над данными без замедления их передачи, что ускоряет выполнение задач с элементами неопределенности и эвристики.

Ключевые слова и фразы: распределенная синхронная сеть компьютеров, одноканальная синхронизация, ассоциативное взаимодействие объектов, распределенные синхронные ассоциативные операции над множествами данных

Для цитирования: **Стецюра Г.Г.** *Методы и средства сетевого синхронного взаимодействия компьютеров с доступом к данным на основе характерных признаков и выполнения распределенных ассоциативных операций* // Программные системы: теория и приложения. 2026. Т. 17. № 3(72). С. 415–438. https://psta.psis.ru/read/psta2026_3_415-438.pdf

Введение

В статье рассмотрены распределенные цифровые системы с группой активных компьютеров, объединенных предлагаемой локальной сетью нового вида – синхронной сетью (далее объектов). Активным здесь считается объект, который для взаимодействия в сети с другими объектами группы должен получить разрешение только от них, без привлечения внешнего центра управления. Активные объекты взаимодействуют в сети синхронно посредством специальных синхронных интерфейсных карт (ИК).

Синхронными далее считаются распределенные цифровые системы, в которых средства взаимодействия групп источников позволяют послать сообщения группе приемников так, что приемники получают сообщения в одном из двух видов без задержки в каких-либо промежуточных сетевых средствах. В первом виде общее сообщение состоит из последовательности сообщений источников, во втором виде одноименные разряды принятых сообщений объединяются в единое короткое сообщение. Указанные результаты дают системе показанные в статье принципиально новые возможности.

Статья использует результаты двух предшествующих статей автора [1, 2]. Из первой статьи взят разработанный в Институте проблем управления РАН способ перехода группы объектов к совместному синхронному взаимодействию в результате передачи и приема ими единственного синхронизирующего сигнала. Из второй статьи взяты структуры связи и способы взаимодействия объектов, необходимые для быстрой перестройки структуры связей и синхронного сетевого взаимодействия объектов через ИК.

Результаты статьи должны в распределенных системах ускорить выполнение двух видов задач. Первый вид – задачи, в которых неэффективно или невозможно применять обращение по адресам. Второй вид – задачи, состоящие из интенсивно взаимодействующих частей, которые выполняются параллельно на группе объектов, связанных локальной сетью и при этом требуют быстрой реакции на возникающие события. Часто необходимо взаимодействие решений этих задач, поэтому в статье они объединены в единый комплекс.

Основным средством организации взаимодействия объектов и обработки данных в них служат распределенные ассоциативные синхронные операции (РАСО), которые потребуются во всей статье. Но до разбора деталей РАСО уточним примененный в статье термин «ассоциативная операция», общий для ассоциативной вычислительной техники. Этот термин появился в 60-е годы прошлого века, и смысл его в следующем.

Предполагалось, что известен общий набор характерных признаков и конкретные носители этого набора помещаются в специальное ассоциативное запоминающее устройство (АЗУ). Каждый носитель помещается в АЗУ в виде записи в отдельную строку АЗУ. Задается критерий поиска в АЗУ записей, полностью совпадающих с критерием поиска, частично совпадающих или полностью несовпадающих. Адреса записей не используются. Выполняется поиск. Если требуемая запись в АЗУ единственная, то она извлекается за короткий интервал времени, не зависящий от количества хранимых в АЗУ записей. При наличии более одной записи действуют способы ускорения выборки записей из их группы. Такие операции получили название ассоциативных операций (АО).

В те же годы в АН СССР (1960, 1961 г.) и в IBM (1962 г.) был предложен ассоциативный процессор (АП) для выполнения нескольких ассоциативных операций (АО), не только выполняющих указанный выше поиск, но одновременно дополнительно обрабатывающих множество записей в АЗУ. Использовалось маскирование, которое исключало часть двоичных разрядов в записях из поиска и обработки. Операции с одновременной обработкой множества записей в АЗУ также получили название ассоциативных операций.

В десятилетие, начиная с 1960 года, появилось много десятков научных публикаций в основном в США. О публикациях в СССР показано в разделе 6.3.

В 90-е годы АЗУ были названы ТСАМ – Ternary Content Addressable Memory (Троичная ассоциативная память), чтобы подчеркнуть – выборка записей выполняется не по адресам записей, а по их содержимому. Троичность подчеркивала применение масок для выделения части разрядов в записях.

Ассоциативные операции впервые начали использовать в 1971 году в известном ассоциативном суперкомпьютере STARAN, управляющим движением рейсовых самолетов над аэропортом им. Дж. Кеннеди в Нью-Йорке. Он содержал ТСАМ с объемом до нескольких мегабит и ассоциативный процессор, выполняющий ассоциативные операции, взаимодействуя с ТСАМ.

В настоящее время безадресная связь широко востребована в системах коммутации цифровой телефонии для быстрого соединения при множестве одновременных запросов на связь. Признаки вместо адресов частично начали применять в меньшем масштабе в новых областях: компьютерах с Dataflow, потоковых компьютерах [3].

Позднее были предложены распределенные ассоциативные операции (РАО), в которых задание на ассоциативный поиск передавалось по сети всем его исполнителям, обычно содержащим ТСАМ и компьютер, который выполняет обработку полученных от ТСАМ данных. Таким образом, выполнялся вариант распределенной параллельной обработки данных. Если требовалось полученные результаты использовать совместно, то они доставлялись по сети обычным способом.

Новизна и особенность предлагаемых в статье РАСО в том, что ассоциативная часть РАСО полностью выполняется средствами синхронной сети при взаимодействии объектов в ИК объектов и в простом, не содержащем логические элементы устройстве – ретрансляторе сигналов *RT*.

В целом РАСО состоит из двух этапов – локального и ассоциативного, которые в пределах одной РАСО могут выполняться однократно или в несколько шагов.

На локальном этапе объект, учитывая результат выполняемых им действий, состояние объекта и изменения внешней среды, формирует свое локальное задание для ассоциативной части РАСО. После получения от последней окончательного или промежуточного результата объект локально его завершает или создает данные для дальнейшего выполнения шагов ассоциативной части РАСО.

Выделим ряд основных деталей в статье, которые существенно повышают скорость реакции объектов на обнаруженные ими и требующие совместных действий события.

- 1) Используемые структуры связи объектов позволяют всем объектам одновременно получать данные, которыми обмениваются другие объекты; межсоединения всех объектов могут одновременно быть изменены с задержкой, требуемой только для переноса сигнала в пределах системы. Любой объект может следить за действиями любых объектов системы.
- 2) Объекты переходят из асинхронного состояния в синхронное посылкой объектами в общий канал по единственному синхросигналу с их совмещением (однотактная синхронизация).
- 3) Способ взаимодействия в сети посредством синхронных ИК и связь ИК с компьютером объекта, как одного из его скоростных процессоров позволяет всей группе распределенных объектов действовать подобно единому распределенному компьютеру, имеющему быстрый доступ к любым ресурсам отдельных компьютеров.
- 4) Соединение групп объектов в *RT*, внешне похожее на соединение шинами, принципиально отличается от него и стало основой для всех видов РАСО и замены асинхронных средств передачи данных на синхронные средства взаимодействия объектов, совмещающие процессы одновременной передачи и обработки передачу данных без замедления передачи и ускорения обработки массивов.

В завершение отметим, что техническая реализация предложенных решений не требует разработки принципиально новых видов устройств. Достаточны технические решения, полученные в других областях. К ним относятся:

- ретрансляторы сигналов на базе ретрорефлекторов [4–6];

- быстрые и точные средства измерения расстояний между объектами [7, 8];
- скоростные пространственные модуляторы оптических сигналов [19,10];
- источники аналоговых сигналов с высокой стабильностью энергии [11].

Разделы статьи содержат следующие сведения. В разделе §1 показаны варианты структур связи объектов. В разделе §2 – введены логическая шкала и распределенные ассоциативные операции. В разделе §3 – принцип децентрализации распределенного управления одноканальной синхронизацией и способ завершения распределенных асинхронных операций. В разделе §4 – метод синхронизации сообщений объектов в ретрансляторе. В разделе §5 – ассоциативные операции над распределенными множествами данных. В разделе §6 – организация синхронной интерфейсной карты, детали взаимодействия блоков ИК. В разделе §7 – пример применения решений статьи.

§1. Структуры связи объектов

Структура связи из раздела 1.1 ориентирована на простые системы с единственным ретранслятором (RT) сигналов, посылаемых объектами. Объекты-источники посылают в RT сигналы на разных частотах, если они имеют разное назначение. RT передаст эти сигналы всем объектам-приемникам, изменив их частоту, чтобы исключить помехи в приемниках от сигналов источников.

В структуре из раздела 1.2 количество RT не ограничивается и каждый объект имеет коммутатор, направляющий световой сигнал в требуемый объекту RT .

1.1. Простая структура связи объектов

Простая структура показана на рисунке 1. Здесь приведена группа

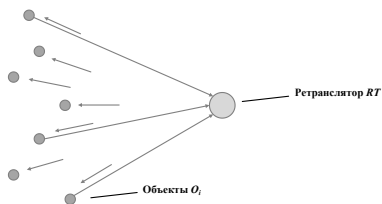


Рисунок 1. Простая структура связи объектов

объектов, три из них источники сообщений, все – приемники сообщений. Источники посылают оптические сигналы на RT , от которого их получит каждый приемник.

При этом источник передает двоичный сигнал — единицу на частоте f_1 и ноль на частоте f_0 . Ретранслятор передает эти сигналы приемникам соответственно на других частотах $*f_1$ и $*f_0$, чтобы на приемники не действовали сигналы источников как помехи. Такой способ заменил группу источников на единственный вторичный источник — ретранслятор.

Приведенную структуру связи целесообразно применить для связи простых объектов, например, персональных компьютеров с целью более гибкого общего использования их ресурсов. Также структура применима для связи активной периферии, обращающейся по собственной инициативе к обслуживающим компьютерам. Несколько ретрансляторов могут одновременно использовать разные объекты на наборах частот, подобных f_1 и f_0 и $*f_1$ и $*f_0$.

Важное дополнение: в структуре можно мощность источников сделать независимой от количества принимающих сигнал приемников. Для этого RT должен иметь следующие компоненты: фотоприемник сигналов, посылаемых источниками на частотах f_1 и f_0 , и ретрорефлектор Rf , на который поступают непрерывные сигналы приемников на частотах $*f_1$ и $*f_0$. На пути сигналов $*f_1$ и $*f_0$ находятся модуляторы этих сигналов.

Источники передают в RT значения битов 1 и 0 сообщения соответственно сигналами частот f_1 и f_0 . Приемники для приема битов 1 и 0 сообщений источников посылают в RT непрерывные сигналы частот $*f_1$ и $*f_0$ соответственно. Передачу и прием сообщений объекты выполняют, следуя [4–6]. Сигналы f_1 и f_0 источника принимает фотоприемник в RT и, применяя модулятор, отправляет сообщение приемникам, модулируя их сигналы $*f_1$ и $*f_0$. В результате энергия сигналов источников затрачивается только на управление единственным модулятором сигналов, посылаемых в RT всеми приемниками, и каждый приемник затрачивает энергию только для послыки непрерывного сигнала в RT и приема его модулированным сигналами одного или группы источников. Подробнее применение ретрорефлектора рассмотрено в [2].

1.2. Перестраиваемая структура связи объектов

Структура на рисунке 2 отличается от показанной на рисунке 1 включением группы большого количества ретрансляторов RT и дополнением каждого объекта коммутатором оптических сигналов для выбора, требуемого объекту RT .

Здесь связь между объектами и ретрансляторами RT выполняется с помощью имеющегося в интерфейсной карте (ИК) или непосредственно с ней связанного коммутатора оптического сигнала. К любому RT одновременно может быть подключено любое количество ИК. Коммутатор может изменить соединение любой ИК с любым RT за интервал времени T переноса сигнала между объектом и RT : $T = L/c$, где скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, L — расстояние между объектом и RT . Например, при $L = 300$ м $T \approx 1$ мкс.

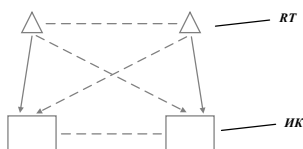


Рисунок 2. Перестраиваемая структура связи объектов

В результате структура связи объектов переключается не от задачи к задаче, а быстрее, от команды к команде.

Появилась также новая возможность – отсутствие линий связи позволяет быстро заменять отказавшие *RT*. Например, добавка в систему трех *RT* и такого же количества переключателей оптического сигнала в каждой *ИК* быстро заменит три *RT*, одновременно отказавшие в любых местах системы.

Общее замечание по применению ретрорефлекторов в разделах 1.1 и 1.2. В разделе 1.1 при единственном *RT* новые разработки не требуются, так как все компоненты доступны. Для раздела 1.2 требуются решетки модулируемых лазеров на квантовых точках. Такие решетки существуют, широко используются в средствах связи и доступны. Скорость модуляции порядка 50 Гбит/с на канал. Для ориентации лучей на фиксированные направления лучей в разные *RT* достаточно на путях лучей разместить средства для фиксированных ориентаций луча.

§2. Логическая шкала и распределенные ассоциативные операции

В разделе 2.1 вводится «логическая шкала» – основная форма представления данных во всех используемых в статье ассоциативных операциях. В разделе 2.2 уточнен вид распределенных ассоциативных операций РАСО, используемых во всех разделах данной статьи.

2.1. Форма распределенных управляющих данных – логическая шкала

Логическая шкала (ЛШ) – последовательность разрядов с фиксированной структурой – количеством и назначением отдельных разрядов или групп разрядов, известных объектам исходно, в начале конкретной операции.

В ЛШ, хранящейся у объекта, будут, в зависимости от задачи, применяться двоичные разряды со значениями 1 и 0, и троичные, представленные в ЛШ группой из двух двоичных разрядов: 10 – единица; 01 – ноль; 00 – маска, которая применяется только в командах поиска в объектах. Маска, как обычно, применяется при поиске для выделения в искомым записях частей, которые надо игнорировать.

При передаче сигналами через RT единице в ЛШ соответствует входящий в RT сигнал f_1 , выходящий от $RT - *f_1$; нолю в ЛШ соответствуют сигналы f_0 , и $*f_0$.

В предлагаемой статье ЛШ – основа представления данных при сетевом синхронном управлении взаимодействием объектов с участием РАСО.

Программы могут использовать ЛШ разными способами: программа применяет единый вид ЛШ во всех применениях или при каждом применении программе задают требуемый в ней вид ЛШ.

2.2. Распределенные ассоциативные операции

РАСО – операция групповая, выполняется с одновременным участием в ней множества распределенных объектов и находящихся в них данных. В РАСО могут быть указаны адреса объектов и данных. Однако, как показано во введении, имеется много приложений, где использовать адреса невозможно, и они должны быть заменены на наборы признаков, характеризующих объекты и данные. При такой замене сигналы f_1 и f_0 одноименных разрядов сообщений группы объектов в RT совмещаются во времени в RT , в результате замены объекты-приемники получают сигнал $*f_1$, $*f_0$, или одновременно $*f_1$ и $*f_0$. В результате время выполнения РАСО не будет зависеть от количества участвующих в ней объектов. Подробно о РАСО в разделе 5.2.

§3. Принцип децентрализации распределенного управления однократной синхронизацией.

Завершение асинхронных операций

3.1. Однократная синхронизация

Принцип децентрализации синхронизует взаимодействие распределенных объектов посылкой ими единственного синхросигнала [1]. Покажем его действие на примере рисунка 3.



Рисунок 3. Демонстрация принципа однократной синхронизации

Пусть группе объектов требуется синхронизировать свои действия. Объекты следят за состоянием RT и если RT свободен в течение интервала времени T , равного переносу оптического сигнала между RT и наиболее

удаленными от него объектами, то запускается одноканальная синхронизация. В ней все объекты в пределах интервала не менее T посылают в RT по единственному сигналу $s_k, \dots, s_m, \dots, s_n$, которые RT объединяет в общий сигнал S и отправляет всем объектам. Завершение сигнала S будет воспринято объектами как сигнал $*S$ — сигнал входа в синхронное состояние.

Замечание к разделу 3.1. Общее замечание к процессу одноканальной синхронизации. Для входа в синхронизацию в общем случае RT не требуется. Достаточно, чтобы каждый приемник получил сигналы s от источников, совместил их в S и обнаружил по появлению $*S$, что каждый источник завершил свои действия по входу в синхронизацию.

Однако такой способ без наличия RT полезен только при взаимодействии медленных объектов, которые считают одновременными события, если интервал времени между их появлением не превышает времени переноса сигнала в пределах распределенной системы.

Такой интервал возможен, так как $*S$ может одновременно появиться у группы объектов в разных местах системы, что и станет причиной указанной неоднозначности.

Объектов с такой синхронизацией много, но в данной статье они не рассматриваются. В разделе §4 и далее будет рассмотрена только скоростная синхронизация, использующая RT .

3.2. Завершение асинхронных операций

Такие действия во многом похожи на одноканальную синхронизацию. Каждый объект, начиная асинхронную операцию, посылает в RT на отдельной несущей по одному сигналу $u_k, \dots, u_m, \dots, u_n$, которые RT объединяет в общий сигнал U и отправляет всем объектам. Каждый источник, завершив свою работу, прекращает передачу сигнала. При завершении всех асинхронных операций сигнал U исчезнет, что будет принято объектами как сигнал $*U$ — завершения всех асинхронных операций. До его появления объекты могут выполнять локальные действия, но не действия в сети.

§4. Метод синхронизации сообщений объектов в ретрансляторе

Обратимся к рисунку 4. Здесь в центре рисунка находится ретранслятор RT , на разных расстояниях R_i от него ($R_1, R_2, \dots, R_k$) находятся объекты O_i , на расстоянии $R_{\max}$ находится граница, которую не пересекает ни один объект группы. Размещение RT в центре круга по отношению к положению всех объектов системы определяется физическими ограничениями. Удаленность объекта от RT снижает уровень сигнала и размещение объектов в пределах $R_{\max}$ должно гарантировать качество связи при соблюдении дополнительных ограничений, указанных для системы.

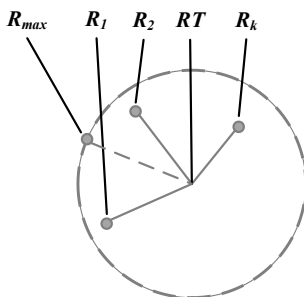


Рисунок 4. Метод синхронизации сообщений в ретрансляторе

Возможна синхронизация двух видов. Первый вид – группа сообщений поступит в RT и к приемникам как одно сообщение с совмещением одноименных разрядов всех сообщений. Второй вид – сообщения поступают одно за другим непрерывно как единое сообщение, в котором все сообщения взаимно синхронизованы.

Рассмотрим первый вид. Пусть одноименные двоичные разряды сообщений всех объектов совместились в RT . После RT каждый объект-приемник получит совмещенное сообщение всех объектов-источников, которое ему предоставит выполненная в RT ассоциативная часть операции РАСО (раздел 5).

Покажем, как совместить одноименные разряды сообщений. Пусть каждый объект O_i предварительно определил свое расстояние R_i до RT с помощью метода CERN [7] или логически ему эквивалентного стандарта IEEE 1588 редакции 2019 года [8]. Также объектам известна граница $R_{\max}$ расстояния объектов от RT , которую ни один объект не должен пересекать. Точное значение $R_{\max}$ объектам не требуется, но увеличение выше требуемого значения увеличит инертность системы. Точный способ определения $R_{\max}$ дан в разделе 5.2 и сводится к определению с помощью РАСО максимального из значений расстояний всех объектов от RT , т. е. $R_{\max}$. Аналогично при необходимости определяется $R_{\min}$.

Имея $R_{\max}$, каждый объект O_i определит задержку $\Delta i = 2(R_{\max} - R_i)/c$, где c – скорость переноса оптического сигнала. Объект задержит передачу своего сообщения на Δi , т. е. на время переноса сигнала между объектом O_i и границей и в обратном направлении. В результате применения задержек Δi всеми объектами одноименные разряды всех сообщений объектов-источников совпадут в RT и результат совмещения получат все объекты-приемники. Так объекты имитируют свое расположение на едином расстоянии $R_{\max}$ от RT . Далее в статье потребуется также интервал времени $T_{\max} = R_{\max}/c$.

Отметим, $R_{\max}$, как радиус окружности или сферы в пространстве, следствие предположения, что для передачи сигналов среда однородна. Иначе потребуются, используя обратную связь, согласовать действия передатчиков и приемников сигналов в систем (или применить связь через объектов-посредников).

Второй, указанный выше вид доступен, если объекты имеют адреса или различные наборы признаков, которые можно упорядочить. Используется PACO «Обнаружение и устранение конфликтов при доступе объектов к RT » из раздела 5.4. В операции применена ЛШ с количеством разрядов, равным количеству упорядоченных объектов. Каждый объект-участник операции заносит в свой разряд единицу, остальные разряды содержат ноль. Получив от RT объединенную шкалу, объекты, внесшие в ЛШ единицу, поочередно передают свои сообщения в RT .

§5. Ассоциативные операции над распределенными множествами данных

Доступны основные виды PACO, рассмотренные в разделах 5.1 – 5.4.

5.1. Ассоциативные поразрядные операции AND, OR, XOR над множествами

Рассмотрим PACO AND, OR, XOR. Ассоциативность их состоит в том, что участники операции обращаются к объектам не по адресам, а по наборам характерных признаков, помещенных в ЛШ. Источники операции предварительно сообщают приемникам вид операции. Ретранслятор выполнит совмещение одноименных разрядов в множестве сообщений источников. Приемники завершат операции.

Выполнение операция поразрядное AND. Участники операции AND выполняют следующее действие. Если в RT одновременно приходят ЛШ только с сигналами f_1 (значение сигнала = 1), то все объекты содержат признак и результат операции AND будем считать равным 1, иначе равным 0.

Выполнение операция поразрядное OR. Если в RT одновременно приходят ЛШ только с сигналами f_0 (значение – 0), все объекты не содержат признак, то результатом операции будет 0, иначе 1.

Выполнение операция поразрядное XOR. Если в RT одновременно приходят ЛШ с сигналами f_1 и f_0 , то результатом операции будет 1, иначе 0.

Таким образом, все три операции фиксируют появление неоднородности хотя бы в одном разряде всего множества анализируемых ЛШ. Естественно, можно использовать маски и исключить из анализа любые группы разрядов ЛШ.

Объектам может быть задано не одно действие, а последовательность действий (сложная программа). В этом случае исполнители должны объявить себя асинхронными, и доступ к их данным будет разрешен только после завершения всех операций.

5.2. Поиск в распределенной группе чисел числа со значением $\max$ или $\min$

Задача следующая. Есть группа объектов – источников и приемников данных. У каждого источника имеется множество различных двоичных чисел разрядности N , среди которых есть число со значением $\max$ или $\min$ во всей группе объектов. Объекты должны среди них найти максимальное и минимальное число во всей группе объектов.

Для ускорения поиска объект, имеющий несколько указанных чисел, предварительно локальными средствами находит среди них одно число, максимальное и минимальное. После этого применение РАСО найдет среди них $\max/\min$ в группе объектов. Числа будут представлены в двоичном коде.

Первая задача – поиск $\max$ в группе источников. Требуется выделить объекты и число в них с максимальным значением. Задача выполняется последовательно. Выделяется множество объектов с максимумом в старшем разряде числа и т.д. После проверки всех разрядов чисел будет найдено подмножество объектов с максимальным значением числа. Каждый объект группы выполняет поиск, действуя одновременно как источник и приемник сигналов.

По шагам поиск $\max$ следующий. Источник, посылает в RT старший разряд проверяемого числа. Этот разряд может быть сигналом f_0 или f_1 . RT объединяет одноименные разряды сигналов источников и поразрядно отправляет всем объектам-приемникам. Любой разряд сообщений группы источников после прохода RT представлен сигналом $*f_1$ или $*f_0$, или одновременно парой сигналов $*f_1$ и $*f_0$.

Одновременно все объекты-приемники, применяя приведенное ниже правило 1, сравнят разряд своего числа на $\max$ с полученным от RT . Между моментом отправки источником через RT сигнала приемнику и получением от него ответа в источнике проходит значительное время, и ИК или объекты должны его учитывать при передаче следующего разряда числа. Поэтому между сигналами должен быть интервал не меньше $2T_{\max}$, где $T_{\max}$ – интервал времени, требуемый для переноса сигнала между RT и самым удаленным от него объектом, т.е. размещенном на расстоянии $R_{\max}$ от RT . (раздел 4). К $2T_{\max}$ надо добавить время анализа пришедшего разряда числа в приемнике, но им часто можно пренебречь. Например, при $R_{\max} = 1$ м интервал $T_{\max} = 3,3$ нс, что много больше времени анализа в приемнике.

Время $*T_{\max}$, необходимое для поиска $\max$ среди N -разрядных чисел при их количестве M , зависит только от N и $*T_{\max} \approx 2NT_{\max}$, где $T_{\max} = R_{\max}/c$. Зависимости от M нет поскольку при выполнении передачи сигналов через RT сообщения от M объектов объединяются в одно. Результат следует из предположения, что для передачи сигналов среда однородна (раздел 4).

Правило 1. Приемник, имеющий единицу в старшем разряде, не должен проверять ожидаемый от RT старший разряд в множестве чисел источников. Он остается претендентом на $\max$ и готов к анализу следующего по старшинству разряда от RT .

Приемник с нулем в старшем разряде будет проверять старший разряд чисел источников, и если от RT поступит только $*f_0$, то приемник остается претендентом на $\max$ – среди поступившего от RT множества сигналов нет $*f_1$. Если приемник с нулем получил $*f_1$, то он не содержит максимальное число и прекращает поиск $\max$.

После аналогичного анализа остальных разрядов выделяется множество объектов, содержащее максимальное число.

Вторая задача – поиск $\min$: среди группы объектов найти группу объектов, имеющих число с минимальным значением.

Задача подобна предыдущей и выполняется последовательно. Каждый источник посылает в RT разряды своего проверяемого числа. Действия над ними подобны действиям при поиске $\max$. Применяется правило 2.

Правило 2. Приемник, имеющий ноль в старшем разряде, без анализа готов к проверке следующего разряда числа. Приемник с единицей в разряде, получивший от RT только сигнал $*f_1$, также не имеет конкурентов и готов к проверке следующего разряда числа. Если приемник с единицей получит $*f_0$, то он не содержит минимальное число и прекращает поиск $\min$.

После аналогичного анализа остальных разрядов выделяется множество объектов, содержащее минимальное число.

5.3. Распределенное аналого-цифровое сложение двоичных чисел

Ставится следующая задача. Есть группа объектов-источников и группа объектов-приемников, передающих и принимающих целые неотрицательные двоичные числа. Связь между группами выполняется синхронно через RT , как во всех разделах статьи. Все источники передают числа RT одновременно всем приемникам. Требуется вычислить сумму всех таких чисел без зависимости времени вычисления от количества участников операции.

Типичная область применения – оценка состояния объектов, внешней среды, а также вычисления в эвристических задачах, не требующих высокой точности.

Рассмотрим выполнение аналого-цифрового сложения. Пусть объекты передают суммируемые двоичные числа оптическими сигналами на частотах f_1 и f_0 для единицы и нуля соответственно. В числе «ноль» все разряды содержат ноли и источник их передает сигналами f_0 . Каждый сигнал имеет одинаковую энергию. Все объекты-источники посылают в RT двоичные суммируемые числа в виде сообщений, синхронно объединяемых в RT с совмещением одноименных двоичных разрядов в общее сообщение. В числе «ноль» все разряды содержат ноли и источник их передает сигналами f_0 .

Общее сообщение из RT в предыдущих разделах поступало к приемникам с заменой в RT частот f_1 на $*f_1$, и f_0 на $*f_0$. Возникали также совмещенные пары $*f_1$ и $*f_0$. Пока это обычные для всех разделов действия.

Но теперь RT дополнительно содержит $*АЦП$ – измененный вариант обычного аналого-цифрового преобразователя АЦП, который только уровень энергии аналогового сигнала частоты f_1 преобразует в двоичное число. Сигнал, полученный в RT от источников, теперь поступает на вход $*АЦП$. Цифровой результат, полученный в $*АЦП$, побитно поступает на выходной блок RT , который передаст их, как и без $*АЦП$, частотами $*f_1$ и $*f_0$, объектам-приемникам в соответствии с [разделами 2.1 и 2.2](#). Скорости передачи сигналов источниками и $*АЦП$, естественно должны быть согласованы.

Время выполнения операции не зависит от количества участников операции в пределах гарантированной точности вычисления. Требуемую стабильность уровня сигналов обеспечивают лазеры [11]. Отметим, что в задачах, приведенных в статье, поддерживать стабильность лазеров надо доли секунды, а лазерные источники гарантируют их стабильность в течение часов.

О выполнении вычитания с применением РАСО. Учтем, что АЦП работает только с положительными числами. В распределенных системах вычитание выполняется в следующем виде. Источники двух групп A и B содержат множества чисел и суммируются числа из A и сохраняют сумму как A_1 . Аналогично требуется поступить с B , получая сумму B_1 . Затем вычитается значение второй суммы из первой.

Наиболее быстрое решение – получить показанным выше распределенным способом обе суммы. В начале операции приемникам указывается в каких приемниках будут формироваться обе суммы A_1 и B_1 и разность. Затем каждый приемник, получив от RT распределенно созданные в RT две суммы, обычным вычитанием получают разность.

Частный вариант сложения – операция СЧЕТ. Типичное применение счета – использование АЦП в RT для создания гистограммы. Счет отличается от сложения только одним – объекты в RT посылают не числа, а ЛШ произвольной разрядности. Каждая ЛШ содержит набор качественных признаков, характерных для объекта или данного в нем. Разряд в ЛШ соответствует одному из признаков и равен единице, если признак присутствует, иначе – ноль.

Источники посылают в RT такие шкалы одинаковой разрядности. Подобно выполнению сложения АЦП подсчитает количество сигналов f_1 , которое теперь показывает количество объектов, для которых характерен данный признак.

5.4. Обнаружение и устранение конфликтов при доступе объектов к RT

Объект – претендент на обращение к RT для обнаружения и устранения конфликтов доступа посылает ЛШ в RT . Количество разрядов в ЛШ равно общему количеству объектов, и каждому объекту выделен разряд, в который объект, требующий доступ к RT , внесет единицу, остальные ноли.

В RT создается общая ЛШ с совмещением одноименных разрядов. В общей ЛШ каждому объекту выделен разряд, в который объект, требующий доступ к RT , внес единицу. ЛШ с набором единиц поступает от RT к объектам, и объекты, внесшие в ЛШ единицы, устраняют конфликт по очереди.

Отметим, подобно указанному устранению конфликтов ЛШ подобным способом может быть применена для упорядоченного действия с другими особенностями объектов. Например, упорядочим в ЛШ набор признаков по их значимости в конкретной задаче и используем ЛШ для порядка действий с такими объектами.

§6. Синхронная интерфейсная карта и ее организация

6.1. Основные требования к предлагаемой синхронной интерфейсной карте

- Каждый отдельный объект должен иметь доступ к ресурсам других объектов с малыми задержками, в основном определяемыми временем переноса оптических сигналов по беспроводным связям между ИК объектов.
- Взаимодействие ИК должно быть адресным и (или) по характерным признакам. Должны выполняться РАСО – основное средство ускорения взаимодействия распределенных объектов.
- ИК воспринимается компьютером объекта, как один из специализированных процессоров, и скорость взаимодействия ИК с компьютером не должна быть ниже скорости взаимодействия между собой других процессоров компьютера.
- Следует стремиться с наименьшим усложнением ИК освобождать как можно быстрее общий ресурс – RT . Для этого ИК должна иметь группу активных блоков слежения, непрерывно следящих за поступающими от RT сигналами.

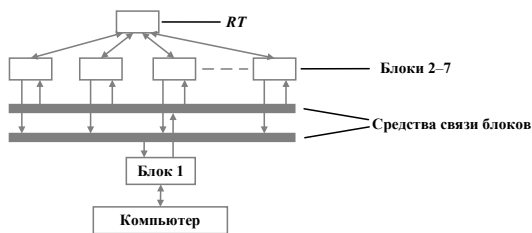


Рисунок 5. Структура интерфейсной карты

6.2. Структура и взаимодействие блоков интерфейсной карты

Связь блоков ИК с *RT* и объектом показан на рисунке 5.

Группа составляющих ИК блоков состоит из блока 1 управления и исполнительных блоков 2–7.

Блок 1 связывает объект с исполнительными блоками 2–7.

Связь ИК с *RT* выполняется только через блоки 2–7.

Таким образом, функции блока 1 разделены на две взаимодействующие в пределах блока части – раздающую задания блокам 2–7 и собирающую результат взаимодействия интерфейсных карт в сети.

Структура каналов, объединяющих блоки 2–7 с блоком 1, зависит от требования к скорости реакции на события в совокупности объектов.

В простейшем варианте для связи достаточны две шины, одна для ввода сигналов из блока 1 в блоки 2–7, вторая – для приема их сигналов в блок 1.

Объект и ИК находятся в непосредственной близости. ИК подключена к объекту соединением, обеспечивающим наиболее быстрое взаимодействие с ним. Между каждой ИК и *RT* установлена беспроводная оптическая связь.

6.3. Действия основных блоков ИК и связи между блоками.

Блок 1 – блок управления в ИК, как уже отмечено выше, управляет взаимодействием всех боков ИК, связью ИК с компьютером в объекте, с другими ИК. Связи между блоками проходят в ИК только через блок управления. Блок 1 получает команды и данные от компьютера объекта, сигналы от активных блоков ИК, опрашивает пассивные блоки ИК, передает блокам полученное от объекта задание на взаимодействие с *RT*, передает объекту информацию, собранную всеми объектами ИК от других ИК и от блоков ИК данного объекта. Также блок 1 получает сигнал о начале приема сообщения от *RT* (сигнал **S*) от блока 2 и посылает предупреждение в компьютер объекта, который проанализирует необходимость реакции на это сообщение. Анализ вместо компьютера можно выполнить в ИК, добавив в нее существенно усложняющий ИК блок 7.

Блок 2 – блок управления входом ИК в синхронное состояние. Блок 2 ожидает приход от *RT* сигнала **S* (раздел 3), разрешившего объектам начинать в сети совместные синхронные действия. О приходе **S* блок 2 информирует блок 1, который пошлет сигнал объекту, последний сможет начать в сети синхронные действия.

Блок 3 – выполняет действия ИК, не требующие согласования с другими ИК.

Блок 4 – блок уведомления объекта о выполнении и завершении асинхронной операции, выполнявшейся группой объектов в сети. (раздел 3 статьи).

Блок 5 – блок устранения конфликта доступа объектов к *RT*. Объект, получивший право начать операцию в сети, обнаружив конфликт, включает блок 5 (через блок 1) для устранения конфликта выполнением действий раздела 5.3.

Блок 6 – блок управления передачей сообщения общего вида, для которого получено разрешение на передачу.

Блок 6 последний из минимального набора блоков, позволяющих ускорить взаимодействие ИК с другими ИК. Другие операции, например, распределенные поразрядные AND, OR, XOR, проверку необходимости реакции на обращение от *RT* не по адресу, а по набору признаков, выполнит компьютер объекта. Ускорит такие операции дополнительный блок 7.

6.4. О Блоке 7 – средстве управления ассоциативными операциями

Блок 7 выбирает объекты по признакам (ассоциативный выбор) и управляет выполнением РАСО. Он работает как фильтр, который проверяет поступившие из сети данные, отмеченные в фильтре как значащие для объекта. О поступлении значащего сообщения блок 7 сообщит блоку 1, который оповестит объект.

В частности, признаком может быть адрес ИК-приемника, адреса ИК-источников с указанием границ диапазона их адресов, отличительные признаки ожидаемых в текущий момент сообщений, и т.п. Можно применить широко используемое для подобных задач средство – троичную память – TCAM, где третье состояние – маска отмечает часть сообщения, сведения в которой не учитываются.

В настоящее время TCAM необходим и широко применяется для управления коммутацией в системах цифровой телефонии, где требуется TCAM на несколько десятков и сотен тысяч записей (Cisco Systems, Inc). Но TCAM устройство сложное, энергоемкое и, судя по количеству многих публикаций, идет поиск новых более эффективных алгоритмических и технических решений для его упрощения.

ТСАМ начинает применяться в компьютерах, решающих задачи с большой долей неопределенности – системы типа Dataflow, потоковые [3] и ассоциативные компьютеры. В таких системах от ТСАМ не требуются такие большие объемы памяти, как для цифровой телефонии, но нужна более разнообразная и быстрая реакция на события. Последнее характерно и для систем, предложенных в статье.

В связи с этим для ИК полезна разработка в составе блока 7 специального ассоциативного процессора для освобождения компьютера в объекте от ассоциативных операций фильтрации обращений из сети к объекту. Может быть полезен принцип действия ассоциативного процессора, содержащего небольшую трючную память с маскированием, который был разработан в Лаборатории электро моделирования АН СССР (директор проф. Л.И. Гутенмахер) для ассоциативного процессора информационно-логической ЭВМ ЛЭМ-4 и опубликован в 1960, 1961 годы. Процессор предназначался для многоэтапного анализа данных сложной структуры с уменьшением на каждом этапе размера группы данных предыдущего этапа. Принцип многоэтапного анализа на этом процессоре приведен в [12] на стр. 14. Первые публикации с описанием ассоциативного процессора и многопроцессорной ЭВМ, для которой процессор был разработан, указаны в [13–16].

§7. Пример применения сетевого синхронного взаимодействия

Приведем пример современной области, где полезно применить результаты статьи. Появляются публикации по реализации систем и обзоры по объединению крупномасштабных систем планирования (КМС) и скоростных систем управления внешней средой в задачах следующего вида. КМС составляет глобальный план действий для системы управления, которая в конкретный момент времени обнаружила незапланированные изменения в среде, требующие быстрой реакции. Естественно было бы обратиться к более осведомленной планирующей организации за инструкцией и получить ответ предельно быстро. Сейчас развитие информационно-технологических систем и систем искусственного интеллекта (ИТ- и ИИ-систем) позволяют решать задачу [17–19].

Типичная схема действий такая: отдельный объект управления посылает запрос ИИ-системе, содержащей архив решений систем планирования для близких ситуаций. ИИ-система с малой задержкой предложит решение, возможно согласовав его с КМС; при срочности отправит свое решение непосредственно системе управления или предложит ей перейти на менее эффективный аварийный режим.

Задача существенно усложняется, если исполнитель, ИИ-система и КМС не одиночные, а локально распределенные группы. Участникам потребуется, возможно итерационно, уточнять сведения об исполнителях, их проблемах и создавать общую и отдельные инструкции к действию. Использование результатов статьи ускоряет указанные действия.

При этом области применения результатов потребуют разных модификаций решений статьи при объединении систем ненаправленными, направленными каналами радиосвязи и волоконно-оптическими каналами. Последний вариант приводит к переходу от свободного пространства к одномерной линии связи с упорядоченным фиксированным расположением объектов, что вводит новые ограничения, но дает и новые возможности.

Заключение

- 1) Предложены структурные и управляющие решения, которые сближают скорости взаимодействия объединенных синхронной локальной сетью распределенных компьютеров и их ИК (объектов) и локализованного многопроцессорного компьютера.

Размеры объединяющей объекты синхронной локальной сети могут изменяться от размеров микросхем до сотен метров в зависимости от требований, предъявляемых решаемыми задачами.

- 2) Основные новые свойства предлагаемых структур связи следующие: результат обработки данных в одном или группе объектов поступает ко всем объектам по беспроводным каналам связи. Интервал времени между началом передачи и началом приема множества данных объектами не превышает времени переноса сигнала сообщения в пределах всей группы объектов.

За этот же интервал может быть полностью перестроена структура связей между объектами.

- 3) Основной способ ускорения – выполнение объектами распределенных ассоциативных операций (РАСО), которые в качестве операндов используют распределенные между объектами множества данных, поступающие к ним в виде единого сообщения. Время выполнения РАСО не зависит от количества участвующих в операции объектов.
- 4) Основной вид доставки значений операндов в РАСО выполняется не по адресам, а по набору признаков, характерных для требуемого объекта или (и) данного.
- 5) За время выполнения единственной РАСО определяется общее состояние группы объектов, представленное наборами их характерных признаков. Для этого не требуется поочередный выбор объектов.
- 6) Результаты пп. 1–5 позволяют для многих новых видов приложений создавать алгоритмы, которые не избегают, как обычно, обмен данными через сеть, а стремятся количество и размеры обменов увеличить и этим ускорить решение задач.
- 7) Предложенная интерфейсная карта позволяет синхронно выполнять в сети пп. 1–6.

Список использованных источников

- [1] Стецюра Г. Г. *Децентрализованная автономная синхронизация процессов взаимодействия мобильных объектов* // Проблемы управления.– 2020.– № 6.– С. 46–56.  [↑](#)^{416, 422}
- [2] Стецюра Г. Г. *Синхронное выполнение групповых операций в распределенных компонентах суперкомпьютеров и компьютерных кластерах* // Программные системы: теория и приложения.– 2022.– Т. 13.– № 4 (55).– С. 3–24.    [↑](#)⁴¹⁶
- [3] Змеев Д. Н., Левченко Н. Н., Окунев А. С., Стемповский А. Л. *Принципы организации системы ввода/вывода параллельной потоковой вычислительной системы* // Программные системы: теория и приложения.– 2015.– Т. 6.– № 4 (27).– С. 3–28.   [↑](#)^{417, 432}
- [4] Rabinovich W. S., Mahon R., Ferraro M. *Free space quantum key distribution using modulating retro-reflectors* // Optics express.– 2018.– Vol. 26.– No. 9.– Pp. 11331–11351.  [↑](#)^{418, 420}
- [5] Rabinovich W. S., Goetz P. G., Meehan T. J., Katzer D. S., Binari S. C., Gilbreath G., Mahon R., Swingen L., Rende J., Waluschka E., Lepore G., Phan A. *Free space optical data links using cat's eye modulating retro-reflectors*.  [↑](#)^{418, 420}
- [6] Rabinovich W. S., Goetz P. G., Mahon R., Swingen L. A., Murphy J. L., Ferraro M., Burris H. R., Moore Ch. I., Suite M. R., Gilbreath G. Ch., Binari S. C., Klotzkin D. J. *45-Mbit/s cat's-eye modulating retroreflectors* // Optical Engineering.– 2007.– Vol. 46.– No. 10.– id. 104001.– 8 pp.  [↑](#)^{418, 420}
- [7] Moreira P., Alvarez P., Serrano J., Darwezeh I., Wlostowski T. *Digital dual mixer time difference for sub-nanosecond time synchronization in Ethernet*.– 5 pp.  [↑](#)⁴¹⁹
- [8] Scarbro A. *Sub-nanosecond network synchronization*, An introduction to White Rabbit, ISSUE2.docx.– ARMMS.– 2022.– 50 pp.  [↑](#)^{419, 424}
- [9] Петров В. М., Шамрай А. В., Ильичев И. В., Аггужов П. М., Лебедев В. В., Герасименко В. С. *Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций* // Фотоника.– 2020.– Т. 14.– № 5.– С. 414–422.    [↑](#)
- [10] Horst Y., Moor D., Chelladurai D., Blatter T., Fernandes S., Kulmer L., Baumann M., Ibili H., Funck Ch., Keller K., Destraz M., Heni W., L. Chérix, Liu Y., Wang H., Koepfli S. M., Leuthold J. *Ultra-wideband MHz to THz plasmonic EO modulator* // Optica.– 2025.– Vol. 12.– No. 3.– Pp. 325–328.  [↑](#)
- [11] Bosiljevac M., Downing J., D. Babić *Reaching <100 ppm/K output intensity temperature stability with single-color light-emitting diodes* // Applied Optics.– 2016.– Vol. 55.– No. 32.– Pp. 9060–9066.  [↑](#)^{419, 428}
- [12] Стецюра Г. Г. *Организация взаимодействия активных объектов однородных цифровых структур* // Программные системы: теория и приложения.– 2023.– Т. 14.– № 4.– С. 3–23.   [↑](#)⁴³²
- [13] Стецюра Г. Г. *Новый принцип построения запоминающих устройств* // ДАН СССР.– 1960.– Т. 132.– № 6.– С. 1291–1294.  [↑](#)⁴³²
- [14] Клейнерман Г. И., Косарев А. А., Нисневич Л. Б., Стецюра Г. Г. *К вопросу о построении универсальных цифровых машин со многими решающими устройствами*, Доклады Конференции по обработке информации, машинному переводу и автоматическому чтению текста.– т. 9, М.: ВИНТИ.– 1961. [↑](#)⁴³²

- [15] Стецюра Г. Г. *Автоматическое поисковое устройство с обратной связью*, Доклады Конференции по обработке информации, машинному переводу и автоматическому чтению текста.– т. 4, М.: ВИНТИ.– 1961.– 10 с. [↑432](#)
- [16] Стецюра Г. Г. *Решающее устройство для переводческих задач*, Доклады Конференции по обработке информации, машинному переводу и автоматическому чтению текста.– т. 8, М.: ВИНТИ.– 1961.– 10 с. [↑432](#)
- [17] Митяков Е. С. *Цифровые двойники как объект и инструмент информационной безопасности* // Информационные технологии и телекоммуникация.– 2024.– Т. 12.– № 4.– С. 1–12. [doi](#) [URL](#) [↑432](#)
- [18] Ghassemian M., Valenzuela A. M., Armada A. G., Vukobratovic D., Chatzimisios P., Althoefer K., Prasad R. R. V. *6G empowering future robotics: a vision for next-generation autonomous systems*.– 2026.– 7 pp. arXiv:2602.12246 [doi](#) [↑432](#)
- [19] Kolb S., Madden A., N. Kröger, Mehmeti F., Jurosch F., Bernhard L., Kellerer W., Wilhelm D. *6G in medical robotics: development of network allocation strategies for a telerobotic examination system* // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery.– 2025.– Vol. 20.– Pp. 167–178. [doi](#) [↑432](#)

Поступила в редакцию

01.10.2025;

одобрена после рецензирования

06.04.2026;

принята к публикации

09.07.2026;

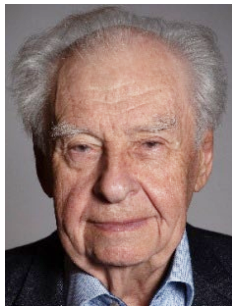
опубликована онлайн

04.10.2026.

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. С. М. Абрамов

Информация об авторе:



Геннадий Георгиевич Стецюра

д. т. н., профессор, гл. н. с. ИПУ РАН. Область интересов: информатика, computing. Основные работы в области распределенных многокомпонентных цифровых систем. Более 150 публикаций и более 20 патентов и авторских свидетельств на изобретения.



0000-0003-4606-4424

e-mail: gstetsura@mail.ru

Декларация об отсутствии личной заинтересованности: *благополучие автора не зависит от результатов исследования.*



Methods and means for network synchronous interaction of computers with access to data based on characteristic features and the execution of distributed associative operations

Gennady Georgievich Stetsyura

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia

 gstetsyura@mail.ru

Abstract. For a distributed group of active, synchronously interacting computers (hereinafter referred to as objects), methods and means are proposed that accelerate the interaction of objects connected by a local network by replacing object addresses and data with their characteristic attributes.

The proposed methods and means include: synchronous network link structures; distributed associative operations; a decentralized method for entering the synchronous interaction mode of objects; methods for jointly managing their synchronous actions; synchronous interface cards (SI). The network hardware consists only of SI and repeaters (*RT*) of object signals transmitted between the SI and *RT* via wireless optical communication channels. The objects selected from the source objects of the data set are simultaneously sent to the *RT*, where the incoming binary data bits of the same name are combined. The *RT* forwards the common data set created in the *RT* without delay to all receiver objects, which create and execute distributed associative operations.

As a result, the data transport used in networks in the proposed synchronous networks is combined with distributed computing over data without slowing down their transmission, which accelerates the execution of tasks with elements of uncertainty and heuristics. (*In Russian*).

Key words and phrases: distributed synchronous computer network, single-cycle synchronization, associative interaction of objects, distributed synchronous associative operations on data sets

2020 *Mathematics Subject Classification:* 65Y05; 68Q10

For citation: Gennady G. Stetsyura. *Methods and means for network synchronous interaction of computers with access to data based on characteristic features and the execution of distributed associative operations.* Program Systems: Theory and Applications, 2026, **17**:3(72), pp. 415–438. (*In Russ.*). https://psta.psiras.ru/read/psta2026_3_415-438.pdf

References

- [1] G. G. Stecyura. “Decentralized autonomic synchronization of interaction processes of mobile objects”, *Problemy upravleniya*, 2020, no. 6, pp. 46–56 (in Russian).
- [2] G. G. Stetsyura. “Synchronous execution of group operations in distributed supercomputer components and computer clusters”, *Program Systems: Theory and Applications*, **13**:4 (55) (2022), pp. 3–24.
- [3] D. N. Zmeev, N. N. Levchenko, A. S. Okunev, A. L. Stempkovskij. “The principles of organization of the I/O system of the parallel dataflow computing system”, *Program Systems: Theory and Applications*, **6**:4 (27) (2015), pp. 3–28 (in Russian).
- [4] W. S. Rabinovich, R. Mahon, M. Ferraro. “Free space quantum key distribution using modulating retro-reflectors”, *Optics express*, **26**:9 (2018), pp. 11331–11351.
- [5] W. S. Rabinovich, P. G. Goetz, T. J. Meehan, D. S. Katzer, S. C. Binari, G. Gilbreath, R. Mahon, L. Swingen, J. Rende, E. Waluschka, G. Lepore, A. Phan. *Free space optical data links using cat’s eye modulating retro-reflectors*.
- [6] W. S. Rabinovich, P. G. Goetz, R. Mahon, L. A. Swingen, J. L. Murphy, M. Ferraro, H. R. Burris, Ch. I. Moore, M. R. Suite, G. Ch. Gilbreath, S. C. Binari, D. J. Klotzkin. “45-Mbit/s cat’s-eye modulating retroreflectors”, *Optical Engineering*, **46**:10 (2007), id. 104001, 8 pp.
- [7] P. Moreira, P. Alvarez, J. Serrano, I. Darwezeh, T. Wlostowski. *Digital dual mixer time difference for sub-nanosecond time synchronization in Ethernet*, 5 pp.
- [8] A. Scarbro. *Sub-nanosecond network synchronization*, An introduction to White Rabbit, ISSUE2.docx, ARMMS, 2022, 50 pp.
- [9] V. M. Petrov, A. V. Shamraj, I. V. Il’ichev, P. M. Agruzov, V. V. Lebedev, V. S. Gerasimenko. “National microwave integrated optical modulators for quantum communications”, *Photonics Russia*, **14**:5 (2020), pp. 414–422.
- [10] Y. Horst, D. Moor, D. Chelladurai, T. Blatter, S. Fernandes, L. Kulmer, M. Baumann, H. Ibili, Ch. Funck, K. Keller, M. Destraz, W. Heni, Chérice L., Y. Liu, H. Wang, S. M. Koepfli, J. Leuthold. “Ultra-wideband MHz to THz plasmonic EO modulator”, *Optica*, **12**:3 (2025), pp. 325–328.
- [11] M. Bosiljevac, J. Downing, Babić D.. “Reaching <100 ppm/K output intensity temperature stability with single-color light-emitting diodes”, *Applied Optics*, **55**:32 (2016), pp. 9060–9066.
- [12] G. G. Stecyura. “The organization of interaction the active objects of homogeneous digital structures”, *Program Systems: Theory and Applications*, **14**:4 (2023), pp. 3–23 (in Russian).
- [13] G. G. Stecyura. “A new principle for the construction of a memory device”, *DAN SSSR*, **132**:6 (1960), pp. 1291–1294 (in Russian).

- [14] G. I. Klejnerman, A. A. Kosarev, L. B. Nisnevich, G. G. Stecyura. “On the construction of universal digital machines with multiple computing units”, *Doklady Konferencii po obrabotke informacii, mashinnomu perevodu i avtomaticheskomu chteniyu teksta*, vol. **9**, VINITI, M., 1961 (in Russian).
- [15] G. G. Stecyura. “Automatic search device with feedback”, *Doklady Konferencii po obrabotke informacii, mashinnomu perevodu i avtomaticheskomu chteniyu teksta*, vol. **4**, VINITI, M., 1961, 10 pp. (in Russian).
- [16] G. G. Stecyura. “Decision-making device for translation tasks”, *Doklady Konferencii po obrabotke informacii, mashinnomu perevodu i avtomaticheskomu chteniyu teksta*, vol. **8**, VINITI, M., 1961, 10 pp. (in Russian).
- [17] E. S. Mityakov. “Digital twins as an object and tool of information security”, *Informacionnye tekhnologii i telekommunikaciya*, **12**:4 (2024), pp. 1–12 (in Russian).  
- [18] M. Ghassemian, A. M. Valenzuela, A. G. Armada, D. Vukobratovic, P. Chatzimisios, K. Althoefer, R. R. V. Prasad. *6G empowering future robotics: a vision for next-generation autonomous systems*, 2026, 7 pp. arXiv:  2602.12246 
- [19] S. Kolb, A. Madden, Kröger N., F. Mehmeti, F. Jurosch, L. Bernhard, W. Kellerer, D. Wilhelm. “6G in medical robotics: development of network allocation strategies for a telerobotic examination system”, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **20** (2025), pp. 167–178. 