

УДК 004.272.45

 10.25209/2079-3316-2025-16-2-81-109


Скоростные ассоциативные операции и алгоритмы управления и обработки данных для распределенных цифровых систем, действующих в условиях неопределенности

 Геннадий Георгиевич **Стецюра**[✉]

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

[✉]gstetsura@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены ассоциативные операции и использующие их алгоритмы для скоростной сетевой обработки данных и управления в распределенных цифровых системах с непредвиденными действиями объектов системы, с неизвестными временем и местом появления в системе результатов или отказов, с неожиданным воздействием внешней среды. Эти операции и алгоритмы позволили создать излагаемые в статье способы ассоциативного взаимодействия объектов (по качественным признакам, без использования адресов объектов и данных) и распределенные ассоциативные операции с одновременным участием в каждой операции группы объектов. Выполнение операций не увеличивает время передачи данных. Для ускорения реакции системы на непредвиденные воздействия предложены три вида адаптивных структур связей объектов с разной скоростью реакции на воздействия. Все связи перестраиваются одновременно.

Ключевые слова и фразы: ассоциативное взаимодействие, безадресные операции, одноканальная синхронизация, распределенные цифровые системы, распределенная обратная связь, активные объекты, адаптивные структуры

Для цитирования: Стецюра Г. Г. *Скоростные ассоциативные операции и алгоритмы управления и обработки данных для распределенных цифровых систем, действующих в условиях неопределенности* // Программные системы: теория и приложения. 2025. Т. 16. № 2(65). С. 81–109. https://psta.psiras.ru/read/psta2025_2_81-109.pdf

Введение

В предлагаемой статье рассмотрены скоростные ассоциативные операции, алгоритмы обработки данных и управления, предназначенные для использования в распределенных цифровых системах. Предполагается, что эти системы состоят из активных цифровых объектов – групп компьютеров, активных компонент таких компьютеров или физических устройств, использующих встроенные компьютеры.

Активный объект разрешает собственные проблемы без обращения к другим объектам. Однако при участии объектов в решении совместных задач каждый активный объект должен интенсивно взаимодействовать с другими объектами для оценки состояния последних и выработки совместных действий. Это повышает интенсивность взаимодействия объектов через средства связи, замедляя этим в известных системах скорость реакции на события. Объекты действуют в условиях неопределенности, которая создается заранее неизвестными внутренними или внешними событиями, появляющимися в неизвестное время в неизвестных местах. Как следствие, программные средства должны в динамике отслеживать состояние всех объектов системы и с возможно меньшей задержкой реагировать на возникающие события.

Неопределенность усложняет или не допускает обращение к объектам по статическим адресам, что снижает реактивность систем, особенно систем, работающих в режиме жесткого реального времени (ЖРВ).

Для ускорения реактивности статья позволяет заменять адреса наборами признаков, характеризующих объекты и данные в них, и применять работающие с признаками распределенные ассоциативные операции. Каждая ассоциативная операция при выполнении управления и вычислений одновременно обрабатывает множество признаков-аргументов операции, обычно не требуя дополнительного времени на обработку. Чтобы подчеркнуть одновременное участие в ассоциативной операции множества данных, в ряде мест будем такие операции называть групповыми. Неопределенность в действиях активных объектов требует, чтобы структура связей между ними быстро изменялась в ответ на возникающие события. Иначе говоря, система должна быть адаптивной, с переменной структурой, что обеспечивается в статье. Технические детали структур таких систем подробно изложены в статье [1], ориентированной на разработчиков технических средств.

Новая статья основана на результатах этой статьи, но она ориентирована на создателей алгоритмов и программ, используемых в условиях неопределенности. Технические детали в ней сведены к минимуму и ограничены §2, иллюстрирующим реализацию предлагаемых операций в быстро перестраиваемой структуре связей объектов.

Приведенные в статье решения имеют следующие основные особенности.

- (1) Применена группа способов взаимодействия активных объектов в стационарных и мобильных системах, позволяющая объектам быстро реагировать на непредвиденные события.
- (2) Управление взаимодействием объектов полностью децентрализовано с переходом из асинхронного состояния в синхронное посылкой указанными объектами единственного синхросигнала (однотактная синхронизация).
- (3) Средства сетевого взаимодействия либо полностью расположены в объектах, либо вне объектов состоят из регрансляторов сигналов, не содержащих логические элементы.
- (4) Применены распределенные ассоциативные операции, которые без внешнего вмешательства инициируют объединение автономных объектов в синхронно действующую систему объектов. Каждая операция одновременно обрабатывает множество данных, поступающих от участвующих в операции объектов.

В совокупности §1–§4 решают общую задачу: переводят распределенные асинхронно действующие цифровые объекты в единую синхронную сетевую структуру со скоростью реакции на непредвиденные события близкой к скорости реакции в сосредоточенных системах.

Для оценки новизны предлагаемых решений интеллектуальный поиск публикаций в Интернете выделил за последние 5 лет 16 публикаций, которые можно разделить на две группы.

В статьях [2, 3, 12, 14] приведены решения, влияющие на организацию технических средств системы. Из них общий интерес представляют работы [2, 3], использующие FPGA, которые позволяют перестраивать структуру связей в системе при переходе от одной решаемой задачи к другой. Известно много других публикаций с применением FPGA для тех же целей. Отметим, что в предлагаемой статье перестройка возможна в ходе решения конкретной задачи выполнением единственной команды.

В остальных найденных ссылках [4–7, 9–11, 13] рассмотрены алгоритмические и программные решения как для конкретных распределенных систем, так и для класса распределенных систем в целом.

Отметим распределенные системы с участием ИИ [5, 6]. Здесь выполняется взаимодействие центральной базы данных ИИ с удаленными распределенными потребителями ИИ. Со временем, с расширением технических возможностей удаленных потребителей такая связь дополнится связью между распределенными системами ИИ. В [4] дан обзор обеспечения отказоустойчивости распределенных систем. В [7, 9, 13] рассмотрено общее текущее состояние разработок распределенных систем и будущие тенденции.

В [8] рассмотрено применение DataFlow для связи удаленных Edge-систем со средствами облачных вычислений. Статьи [10, 11] выделяются среди остальных статей тем, что рассматривают распределенные системы управления, как правило, требующие соблюдения требований жесткого реального времени. Статья [13] рассматривают состояние исследований в области киберфизических систем широкого вида. В [10] рассмотрены исследования сверхбольших систем управления.

Основное отличие предлагаемой статьи от приведенных в обзоре состоит в разработке широкого набора средств низкого уровня:

- трех структур взаимодействия объектов,
- скоростных операций и необходимого распределенных ассоциативных операций,
- необходимого для них специального представления данных (логических шкал).

В статье показана эффективность этих средств на конкретных частных примерах. Их полезность на реальных больших задачах нуждается в отдельных оценках. Не рассмотрено создание на основе приведенных базовых ассоциативных операций новых макроопераций, ориентированных на конкретные области приложений.

В новой статье по сравнению со статьей [1] материал по скоростным ассоциативным операциям и алгоритмам обработки данных и управления частично переработан, добавлены новые решения, удалены второстепенные. Удалены технические подробности, не представляющие интерес для разработчиков приложений. Разделы §1, §7–§9 полностью содержат новый материал. Переработано введение.

Состав статьи следующий. В §1 представлены требования к взаимодействию распределенных объектов и области их применения. В §2 приведены три вида структур взаимодействующих объектов с разной скоростью реакции на события. В §3 описан децентрализованный переход объектов в синхронное состояние, а в §4 – синхронизация действий группы объектов-приемников. В §5 показан запуск периодической синхронизации однотактной синхронизацией. Приведенные в §6 логические шкалы и распределенные групповые операции работают одновременно с множеством объектов данных. Управлению взаимодействием объектов, находящихся в разных кластерах посвящен §7. В §8 рассмотрено применение сетевых карт для синхронного скоростного взаимодействия объектов, а в §9 – влияние безадресных операций на свойства распределенных алгоритмов.

§1. Требования к взаимодействию распределенных объектов, области их применения

1.1. Современные требования к взаимодействию распределенных управляющих и вычислительных цифровых средств

- (1) Существенно расширяется область задач, решаемых системами взаимодействующих активных объектов, для которых получение решения задачи позже заданного граничного момента времени недопустимо (режим ЖРВ) или существенно ухудшает возможности системы. Объекты должны быть стационарными и мобильными.
- (2) Группам объектов из п. 1 приходится реагировать на непредвиденные события с заранее неизвестными местом, временем появления, спецификой событий и общей для всей группы, реакцией на события, формируемой в динамике. Отсюда, граничный момент и длительность процесса совместного решения исходно неизвестны и определяются в динамике.
- (3) Реагировать на события вся система и входящие в нее группы объектов должны как на единое целое, выполнять и завершать совместные действия одновременно или с заданными временными задержками между объектами. Так как в п. 2 неизвестны адреса обнаруживших событие объектов, то объектам необходимо взаимодействовать ассоциативно, используя только характерные для объектов наборы признаков.
- (4) Для ускорения реакции на события сведения о событии, обнаруженном любым объектом, должны как можно быстрее быть доставлены всем объектам. Сформированная группой объектов реакция на события также должна быть быстро доставлена всем объектам-исполнителям реакции.
- (5) Для обеспечения быстрой реакции на события в условиях пп. 1–4 необходимо организовать синхронное взаимодействие объектов, идентифицируя группу не перечислением адресов объектов группы, а в целом, совокупностью признаков, выделяющих конкретную группу среди других групп. Поэтому необходимо в отдельных действиях оперировать с множествами объектов как с единичными объектами. Как отмечено выше, операции поиска и обработки данных с одновременным синхронным участием в операции множеств распределенных в системе объектов и данных далее будем называть групповыми или ассоциативными операциями, подчеркивая, что в операции одновременно участвует группа объектов, характеризующаяся не их расположением (адресами), а совокупностью признаков-ассоциаций.
- (6) Одновременное и быстрое манипулирование множествами сообщений, посылаемых группами распределенных объектов, увеличивает нагрузку на связывающие объекты сетевые средства и выдвигает к ним новое требование: на вход любого объекта должны одновременно

поступать сообщения, синхронно посылаемые произвольной группой объектов.

Для этого поступающие сообщения должны быть объединены в единое сообщение, содержащее сообщения групп объектов поочередно или как одно короткое сообщение с совмещением одноименных разрядов группы сообщений. Для ускорения взаимодействия групп объектов желательно совмещать передачу сообщений с обработкой данных в сообщениях непосредственно сетевыми средствами, без задержки процесса передачи.

Требования 1–6 характерны для многих видов задач, решаемых в ЖРВ, и многих видов задач, не имеющих жестких временных ограничений, но с большой неопределенностью в выборе последовательности шагов решения. Соответствующие примеры даны в 1.2.

1.2. Основные области, предъявляющие требования из 1.1

Перечисленные в 1.1 требования характерны прежде всего для работающих в ЖРВ распределенных систем управления и систем информирования о состоянии внешней среды. В этих системах, требующих быстрой реакции, каждый следующий шаг действий объекта во многих случаях зависит не только от его состояния, но и от неизвестного для него состояния других объектов. В других областях применения цифровых систем временные ограничения менее значимы, но потребность в решении задач без обращения к адресам объектов или местам хранения данных, также востребована широко.

Среди областей, где полезны ассоциативные решения, отметим многие задачи с применением эвристики, любые задачи с взаимодействием переменного состава объектов или данных, в которых выбор очередного шага решения зависит от событий, возникающих на текущем и предыдущих шагах. Использование адресов существенно замедляет работу системы или даже практически невозможно в задачах с быстро изменяемым и заранее неизвестным составом участников. Ассоциативные взаимодействия ускоряют определение места и времени получения ожидаемых промежуточных результатов вычислений в задачах DataFlow.

Следует особо подчеркнуть отличие предложенных в статье распределенных ассоциативных систем от известных сосредоточенных систем, например, ассоциативного суперкомпьютера STARAN, который выпускался в США в разных модификациях, начиная с 1970 года до конца века [15] и оперативно управлял сложными системами. Распределенным ассоциативным системам приходится интенсивно использовать сетевые средства взаимодействия объектов, которые существенно ограничивают параллельное взаимодействие объектов. Уменьшению сетевого ограничения посвящена значительная часть статьи.

В следующих параграфах приведены основные архитектурные и структурные решения, ориентированные на удовлетворение требований 1.1 с ориентацией на области из 1.2

§2. Структуры синхронного взаимодействия распределенных объектов

В §2 рассматриваются три вида структур, позволяющих всем объектам синхронно получать сообщения от всех объектов и выполнять их ассоциативную обработку. Виды структур имеют разную точность синхронизации, пропускную способность, скорость перестройки всех связей в системе, сложность реализации. Как следствие, эти структуры ориентированы на использование в системах, существенно отличающихся в требованиях к приведенным параметрам. Все представленные виды структур применимы для систем, к которым можно обращаться ассоциативно. В 2.1 рассматривается структура взаимодействия с наиболее высокими требованиями к скорости взаимодействия объектов.

2.1. Неоднородная структура взаимодействия с группой ретрансляторов

Организация структуры дана на рисунке 1. Структура ориентирована

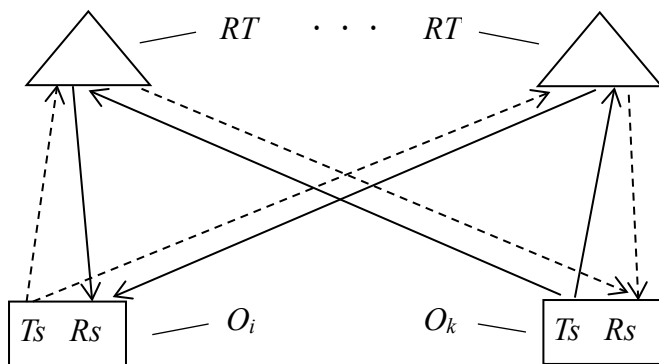


РИСУНОК 1. Структура с максимальными требованиями к параметрам взаимодействия

на связи объектов, компьютеры которых работают в жестких временных ограничениях и выполняют задачи с большим уровнем неопределенности. Объекты обмениваются оптическими сигналами по беспроводным каналам, оптоволоконным и смешанным. Структура неоднородная: объекты взаимодействуют через ретрансляторы сигналов. Все устройства структуры стационарны. На рисунке 1 O_i и O_k два произвольных объекта из N

объектов структуры, RT – группа ретрансляторов оптических сигналов, посылаемых объектами.

Каждый объект может выполнять совместно функции источника и приемника сообщений, передаваемых оптическими сигналами. Объекты имеют передатчик Ts и приемник Rs оптических сигналов. Если объект действует как источник, то его Ts передает в RT сигналы сообщения. Если объект действует как приемник, то его Ts передает в RT непрерывный сигнал, который RT возвратит в Rs модулированным сигналами источника, пославшего сообщение в RT .

В каждом объекте есть коммутатор сигналов, переключающий связи источника и приемника объекта с любыми ретрансляторами из группы RT . Для выполнения указанных действий ретранслятор содержит ретрорефлектор (катафот), который поступающий в него сигнал от любого объекта возвращает этому объекту. Для связи группа источников и приемников направляет сигналы в выбранный ими ретранслятор по очереди или совмещая одноименные разряды.

Источник посылает сообщение, передавая единицу сигналом на частоте f_1 , ноль – на частоте f_0 . Приемник для приема сообщения источника посылает в ретранслятор непрерывный сигнал на частоте $*f_1$ для приема единицы и $*f_0$ для приема ноля. Ретранслятор принимает сигналы источника, переводит их в электрические сигналы и модулирует ими соответственно непрерывные сигналы приемника $*f_1$, и $*f_0$, отправляя этим сообщение приемнику. Разница в частотах f и $*f$ позволяет объектам принимать сигналы только от ретрансляторов. Энергии сигналов источника должно быть достаточно только для приема их ретранслятором, приемники получают сигналы, затрачивая свою энергию. Если энергия источника достаточна для действий модулятора в ретрансляторе, то последний может быть пассивным устройством.

Важные функциональные возможности:

- (1) Произвольные группы объектов-источников могут синхронно см. §3 послать отдельные сигналы и сообщения в ретранслятор RT – вторичный источник для всех приемников, следящих за данным RT . Точность синхронизации зависит только от ошибки технических средств, измеряющих расстояние между объектом, наилучший результат с ошибкой порядка пикосекунды предоставлен в [16, 17].
- (2) Синхронизация сообщений не зависит от расположения объектов и RT и позволяет создать ряд быстрых распределенных групповых операций, которые выполняются группой объектов за время, не зависящее от количества участвующих в операции объектов.
- (3) Синхронная сборка сообщений группы объектов в общий RT , объединенная с приведенными ниже групповыми операциями,

существенно ускоряет поиск данных в больших массивах и их обработку.

- (4) Структура позволяет экономно бороться с отказами ретрансляторов RT – единственных расположенных вне объектов сетевых объектов. Для замены m одновременно отказавших произвольных RT достаточно иметь только m резервных RT .
- (5) Соединения в структуре на рисунке 1 (и структурах из 2.2 и 2.3) позволяют на разных участках использовать беспроводные и волоконно-оптические связи. Такая реализация позволяет располагать беспроводные каналы в наиболее благоприятных условиях. В компьютерных центрах беспроводная исполнительная часть структуры на рисунке 1 может располагаться в одном или нескольких герметичных центрах коммутации (содержащих коммутаторы, источники, приемники сигналов и ретрансляторы). Управляющая средствами коммутации часть средств будет при этом находиться в объектах и соединяться с коммутирующей частью волоконно-оптическими каналами связи.
- (6) Отметим, в структуре оптические ретрансляторы с ретрорефлекторами и коммутаторы применяют в ряде областей, например, в средствах связи [18, 19], но не применяют в компьютерах. Далее используются и другие известные технические средства, также отсутствующие в компьютерах. Технические детали даны в [1].

2.2. Простая неоднородная структура с одним ретранслятором

По сравнению со структурой 2.1 структура на рисунке 2 предназначена для групп объектов, которым достаточна пропускная способность одного

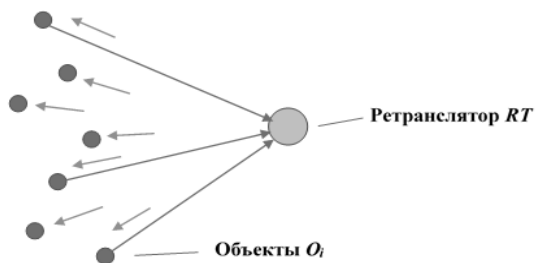


Рисунок 2. Неоднородная структура с одним ретранслятором

RT . Для обмена сообщениями могут использоваться оптические и радиосигналы. Наличие одного RT привело к удалению коммутаторов, необходимых в структуре на рисунке 1.

При обмене оптическими сигналами RT может использовать ретрорефлектор, но доступно и обычное сочетание: RT принимает сигналы

объекта-источника, переводит их в электросигналы, которые действуют на генератор оптических или радиосигналов, направляемых объектам-приемникам.

Как и на рисунке 1 частоты сигналов объектов-источников и приемников различны для устранения помех приемникам от сигналов передатчиков. Наличие единственного ретранслятора позволяет источникам использовать ненаправленные сигналы для одновременной рассылки сообщений группе объектов-приемников.

2.3. Однородная структура взаимодействия объектов без ретрансляторов

В однородной системе ретранслятор отсутствует и объекты взаимодействуют непосредственно, могут быть стационарными и мобильными. Здесь существенно изменилось понятие одновременности событий по сравнению с неоднородными структурами.

В разделах 2.1 и 2.2 события считаются одновременными, если современные технологии не позволяют различить момент их появления, что означает ошибку порядка пикосекунды [17]. Для однородных систем события одновременны, если они появляются в пределах интервала времени T , равного времени переноса сигнала между наиболее взаимно удаленными взаимодействующими объектами. Разброс во времени начала синхронизации объектами достигает $T = L/c$, где L – максимальное расстояние между объектами, c – скорость света. Такая неопределенность мало влияет на обычный обмен длинными сообщениями, но значительно замедляет выполнение коротких распределенных операций в скоростных системах.

Однако при уменьшении размеров системы однородная структура взаимодействия в многих приложениях заменяет структуры из 2.1 и 2.2. Общий итог §2: в приведенных трех структурах передаваемая между любыми объектами информация одновременно поступает к группе объектов, непосредственно или через ретранслятор. Сообщения, посылаемые по конкретным адресам, видны всем объектам и ассоциативно могут вызвать незапланированные, но необходимые действия групп объектов. Сообщения могут быть безадресными, направленными объектам, имеющим только характерные наборы признаков.

§3. Децентрализация входа объектов-источников в синхронное состояние

В разделе §3 децентрализация исключает привлечение внешнего или внутреннего центра управления к выполнению перехода группы объектов в синхронное состояние.

3.1. Начальный синхронный вход объектов в структуру связи

Вход в процесс синхронизации одинаков для всех структур из §2.

Объекты, не передающие в текущий момент сигналы в структуру взаимодействия, для получения права синхронного доступа к структуре выполняют следующие действия, которые иллюстрирует рисунок 3.

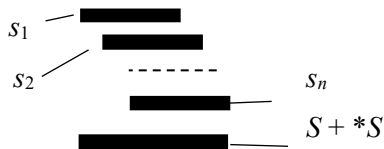


Рисунок 3. Принцип децентрализованного входа в синхронизм

- (1) На рисунке 3 три произвольных объекта из группы n объектов ожидают момент отсутствия сигналов в сети (паузу) и посылают в сеть сигнал s заявки на вход в синхронизм. Сигнал s поступает в сеть любым из доступных в сети способов. Длительность сигнала s выбирается не меньше времени T перемещения сигнала между наиболее взаимно удаленными взаимодействующими объектами. В неоднородной сети сигнал отправляется в RT , в однородной сети непосредственно всем объектам. При наличии RT интервал T может быть заменен на интервал Trt времени перемещения сигнала между RT и наиболее удаленными от него объектами.
- (2) Сигналы s объектов в неоднородных и однородных системах объединятся с частичным совмещением в общий единственный (при выполнении указанного условия для длительности T) сигнал S , поступающий ко всем объектам. Момент завершения в объекте сигнала S формирует сигнал $*S$, который служит для объекта сигналом начала входа в синхронизм. Приход к объекту сигнала $*S$ начинает в нем процесс однократной синхронизации, как показано в 3.2

3.2. Синхронизация действий группы объектов-источников

Раздел 3.2 состоит из трех разделов. В разделе 3.2.1 рассмотрены варианты определения удаленности объектов-источников от RT . В разделе 3.2.2 – синхронная доставка сообщений группы объектов-источников в RT . В разделе 3.2.3 – корректировка источниками группы передаваемых ими сообщений.

3.2.1. Определение удаленности объектов от RT

Рисунок 4 иллюстрирует цель процесса синхронизации действий

объектов O_1 – O_3 относительно ретранслятора RT .

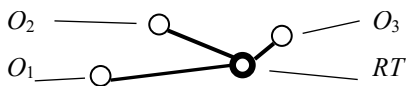


Рисунок 4. Синхронизация объектов-источников

Здесь объекты O_i расположены произвольно относительно RT , и требуется определить их удаленность от RT , которая позволит объектам посылать сигналы в RT одновременно или с заданным относительным сдвигом во времени. Наиболее точная синхронизация достигается при применении стационарных объектов, RT и поочередного измерения удаленности каждого объекта от RT . Наибольшую точность дает измерение удаленности с применением средств измерения стандарта IEEE 1588-2019 [16]. Измерения достаточно выполнять редко, только с учетом изменения влияния внешней среды на скорость переноса сигналов.

Поочередное измерение предполагает наличие упорядоченности объектов. При наличии адресов объекты упорядочат действия с учетом старшинства значений адресов (6.2). При отсутствии адресов объекты используют наборы качественных признаков, характерных для текущего состояния объекта. В этом случае может не выделиться единственный объект и действия продолжатся не с отдельным объектом, а с множеством объектов. Добавка к набору признаков случайного числа (вместо адреса) позволит выделить один объект.

ЗАМЕЧАНИЕ 1. Ретрансляторы, используемые объектами для взаимодействия, в отличие от объектов, не имеют индивидуальных отличительных наборов признаков, но порядковые номера им присвоить можно. Поэтому во многих случаях поиск группы взаимодействующих объектов можно существенно ускорить, сведя его к поиску используемого объектами общего RT (см. 6.3).

ЗАМЕЧАНИЕ 2. В статье объекты и RT не используют часы с одинаковыми показаниями, установленными внешними средствами. Пусть такая возможность есть, объекты неподвижны и RT , отправляя сигнал S начала синхронизации, сопровождает его значением своего значения отсчета времени. Тогда при получении сигнала все объекты, вычитая из своего отсчета времени отсчет, полученный от RT , одновременно определяют свою удаленность от RT .

3.2.2. Синхронная доставка сообщений группы объектов в RT

Имея значение удаленности от RT , объекты-источники для синхронизации пошлют свои сообщения одно за другим в виде единого сообщения или в виде короткого сообщения, полученного совмещением одноименных разрядов группы сообщений. Для этого каждый объект O_i в момент получения сигнала $*S$ от RT посылает в RT сообщение с задержкой D_i , где $D_i = 2(T^* - T_i) + \alpha$, T^* интервал времени, не меньше времени доставки сигнала в RT самым удаленным от RT объектам, T_i – время передачи сигнала от O_i к RT . Эти действия превращают произвольно отстоящие от RT объекты в равноудаленные. Варьируя α , объект при необходимости вносит дополнительный сдвиг прихода сигнала в RT . В результате объекты примут одно сообщение RT , состоящее из упорядоченных во времени сообщений объектов, или при $\alpha = 0$ примут одно короткое сообщение с совмещением одноименных разрядов в сообщениях объектов.

3.2.3. Корректировка объектами одновременно передаваемых сообщений

Применение α позволяет объектам также вносить изменения в сообщения других объектов, которые передаются синхронно в виде единого сообщения. Пусть до начала единого сообщения участвующим в его создании объектам известна структура сообщений объектов. Каждому объекту также известны позиции в едином сообщении, в которые объекту разрешено бесконфликтно вносить изменения. При выполнении всех указанных условий объекты смогут изменять общее сообщение, причем объекты, наблюдающие за ретранслирующим сообщением RT , получают информацию о всех групповых изменениях. Результат: объекты сэкономят время группового изменения, за счет исключения формирования группы адресных сообщений объектами. К способам перехода в синхронное состояние относится также оповещение системы объектов о завершении группы асинхронных действий (см. 3.2.4).

3.2.4. Оповещение о завершении группой объектов асинхронных действий

Пусть группа Oa объектов выполняет действия, завершаемые объектами в неизвестные заранее моменты времени, и требуется как можно быстрее оповестить все объекты о моменте завершения действий всеми объектами. Для этого каждый объект-источник из Oa , начиная действие, посылает в RT приемников сигнал u , подобно сигналу s (см. 3.1), и снимает его в момент завершения действия. Сигналы u поступают к объектам-приемникам в виде совмещенного сигнала U , подобного S .

В момент снятия последнего сигнала u появляется сигнал $*U$, аналогичный $*S$, который информирует объекты о завершении всех асинхронных действий. Приведенные действия наиболее существенны при решении задач 1.2, имеющих большую неопределенность в моменте получения решения. Действия выполняются быстро, так как не требуют привлечения центра управления, и задержка в поступлении ко всем объектам сигнала $*U$ равна T или $2Trt$. Оповещение в 3.2.4 действует в распределенных структурах из §3 как старт-стопный режим взаимодействия объектов, подобный барьерной синхронизации: приход к объекту сигнала U – старт режима, приход сигнала $*U$ – его завершение.

Дополнение. Из троек вида «группа объектов – RT – группа объектов» могут создаваться цепочки, по которым будут перемещаться результаты обработки сообщений. Все перемещения могут выполняться через равные промежутки времени. Это неэкономно, если разные объекты выполняют свою часть обработки за разные интервалы времени. Применение сигналов $*U$ учтет реальные задержки.

§4. Синхронизация действий группы объектов-приемников

Приемники сигналов RT определяют свою удаленность во времени от RT , вычисляя D_i^* аналогично D_i , что позволяет им, получив сообщение источников, выполнять требуемые действия одновременно.

Каждый приемник с номером i предварительно определяет задержку $D_i = 2(T^* - T_i) + \alpha$. Получив в сообщении команду, каждый приемник O_i группы сделает задержку D_i^* и выполнит команду при $\alpha = 0$ одновременно или с разными задержками при задании объектам разных значений α .

Выполнение команды может заключаться в непосредственном воздействии на исполнительное устройство или в запуске через любой RT системы очередного синхронного этапа решения задачи. Здесь этап представляет собой не продвижение по обычному конвейеру с заранее известным путем обработки «изделия»: система быстро перестраивается, объекты могут ожидать установления новых связей (см. 6.3), и на следующем этапе обработка данных будет выполняться неизвестными заранее объектами.

§5. Запуск периодической синхронизации однократной синхронизацией

Однократная синхронизация (ОтС) позволяла не взаимодействующим между собой в некотором промежутке времени объектам перейти в режим

синхронного взаимодействия при получении сигнала $*S$ или $*U$ и, в частности, может инициировать запуск или внесение изменений в периодическую синхронизацию (ПС) действий объектов.

Взаимодействие ОтС и ПС полезно, если ПС достаточно поддерживать в течение короткого промежутка времени, от долей секунды до нескольких минут. При участии во взаимодействии компьютеров за такие интервалы может выполняться большое количество операций. По этой причине и при большой неопределенности в событиях часто не требуется длительная поддержка ПС, и достаточно использовать следующие действия ОтС.

Если объекты не синхронизированы, то, получив сигнал $*S$ или $*U$, готовые к синхронной работе объекты немедленно начнут синхронное взаимодействие. Их генераторы синхросигналов включатся синхронно по фазе и будут действовать до завершения заданного интервала выполнения ПС. Если есть объекты, не готовые к ПС, то они должны создать сигналы типа U и $*U$, что начнет переход всех объектов в ПС.

Если в системе есть объекты, находящиеся в режиме ПС, то они могут своими сигналами U задержать вход новых объектов в ПС. Альтернатива: при высоком приоритете запроса на вход в ПС он будет разрешен, если находящиеся в ПС объекты могут приостановить свои текущие действия.

Дополнительно к показанному действия объектов в интервале ПС могут быть дополнительно ускорены следующим образом. Интервал действия ПС разделяется на фрагменты, и перед переходом в следующий фрагмент один или несколько объектов (при предварительной согласованности в выполняемой программе) немедленно, без сигнала $*U$ имеют право выполнить вне очереди свои действия.

В такие моменты объекты, не затрачивая зависящее от размеров системы время на однократную синхронизацию, проводят совместные действия, например, групповую операцию.

Дальнейшее управление действиями объектов в синхронном состоянии требует использовать логические шкалы, рассмотренные в §6.

§6. Логические шкалы и распределенные групповые операции

6.1. Структура логической шкалы

Логическая шкала (далее для краткости – шкала) это конструкция, определяющая состояние объекта или находящейся у объекта группы данных и имеющая следующие особенности.

- (1) Шкала представляет собой последовательность двоичных разрядов, количество которых зависит от требований конкретной операции над сообщениями объектов.

- (2) При передаче шкал между объектами единица и ноль представлены активными сигналами разных частот. Будем единицу передавать сигналом с частотой f_1 , ноль – сигналом с частотой f_0 . При одновременной передаче нуля и единицы появляется смесь сигналов f_1 и f_0 . При необходимости сохранения объектом такой смеси активные единица и ноль кодируются парой битов 10 и 01 соответственно. Иначе будет сохранен один бит с единицей только для f_1 .
- (3) Разряды шкалы разделяются на блоки из различного, заранее известного количества разрядов. Семантика таких блоков также известна заранее. В простейшем случае каждый блок состоит из одного двоичного разряда, выделанного одному из логических параметров, характерных для сообщения. В этот разряд заносится единица, если параметр присутствует в сообщении и заносится ноль в противном случае.

Параметры также могут иметь численное значение. Каждой цифре числа в шкале выделяется блок с количеством двоичных разрядов, соответствующим основанию используемой системы счисления. Каждая такая шкала содержит единицу только в разряде, соответствующем значению цифры, остальные ноли. Например, цифра семь в десятичной системе счисления будет представлена шкалой 001000000.

- (4) Из п. 3 следует, что в зависимости от конкретной области применения шкал в них может быть внесена дополнительная информация, оперативно воздействующая на объект или сообщающая о его состоянии.

Покажем использование шкал в распределенных вычислительных и управляющих групповых операциях, используя результаты [1].

6.2. Распределенные групповые вычислительные операции

Пусть разряды шкалы соответствуют логическим признакам, характеризующим состояние объектов. Если признак есть в объекте, то в соответствующий ему разряд вносится единица, иначе – ноль. Шкалы объектов синхронно поступают в RT . Общая шкала из RT поступает к приемникам, которые выполняют над ней логические групповые операции.

Если объект выполняет поразрядную операцию AND, то для конкретного разряда общей шкалы его значение равно единице только если разряд содержит f_1 и не содержит f_0 , иначе результат – ноль; для OR значение операции равно нулю, если разряд содержит только f_0 , иначе – единица; для XOR значение операции равно единице, если разряд содержит f_1 и f_0 , иначе – ноль.

Для поиска в массиве чисел максимального и минимального числа введем представление цифр в системе счисления с основанием больше двух: цифру представим шкалой с количеством двоичных разрядов, равным основанию системы. В ней содержится единица в разряде, равном значению цифры, и ноли в остальных разрядах. Например, в десятичной системе совмещение шкал для цифр 7, 5, 4, 2 даст шкалу 001011010. Из нее видно, что в совмещении участвовали наибольшая цифра 7 и наименьшая 2. Это ускоряет поиск $\max$ и $\min$ по сравнению с поиском для цифр в двоичной системе, так как потребуются пересылать меньшее количество шкал.

Именно количество шкал, а не их разрядность замедляет операции. Каждую шкалу можно передать на высокой скорости, но до начала передачи следующей цифры чисел объекты должны получить общую шкалу для предыдущей цифры и определить, будут ли они участвовать в процессе дальнейшего определения $\max$ или $\min$.

Рассмотрим операции суммирования, требующие одновременного суммирования большого количества цифр чисел [1]. Применим аналого-цифровые операции суммирования и вычитания к цифрам чисел, представленных шкалами. Добавим в RT аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Он переведет уровень энергии одновременно приходящих в RT сигналов в число. Способы создания стабильных по энергии сигналов известны [20].

Рассмотрим пример:

ПРИМЕР 1. В RT приходит шкала группы цифр одного из разрядов десятичных чисел, принятых от объектов – 010110010. Шкала показывает наличие цифр 8, 6, 5, 2 в разряде. АЦП преобразует шкалу, например, в 030920070. Здесь цифры показывают: АЦП получил 3 сигнала для значения цифры 8, 9 сигналов для цифры 6, 2 для 5 и 7 для 2. Каждый объект одновременно выполнит подсчет $3 \times 8 + 9 \times 6 + 2 \times 5 + 7 \times 2 = 102$. Действуя аналогично с другими разрядами, объект вычислит сумму полученных чисел.

Дополнение: выполнение двух примеров вычислительных операций.

ПРИМЕР 2. Создание гистограмм для определения частоты встречаемости отдельных признаков в наборах признаков группы объектов. Действуя локально объекты определяют количество появлений заданных признаков во всех шкалах объекта (или заданной их части). Затем объекты посылают в RT с совмещением одноименных разрядов полученные шкалы, содержащие оценки количества признаков. RT

содержит АЦП и, как показано на примере выше, преобразует уровень общих сигналов в цифры, позволяющие оценить появление конкретных признаков в группе объектов.

ПРИМЕР 3. Сжатие и расшифровка данных, передаваемых через RT. На рисунке 5 показана передача в RT трех шкал с совмещением одноименных разрядов. Здесь шкалы, передаваемые тремя объектами, объединяются в RT и передаются всем приемникам в виде общей шкалы, которая в приемниках, выполняющих групповые поразрядные операции, расшифровывается различно в зависимости от вида операции AND, OR, XOR.

1	1	0	0	0	...	0	1	0	– шкала первого объекта
1	0	0	1	0	...	0	1	0	– второго объекта
1	1	0	1	0	...	0	1	0	– третьего объекта
1	1/0	0	1/0	0	...	0	1	0	– общая шкала
=====									
1	0	0	0	0	...	0	1	0	результат для группового поразрядного AND
1	1	0	1	0	...	0	1	0	результат для группового поразрядного OR
0	1	0	1	0	...	0	0	0	результат для группового поразрядного XOR

Рисунок 5. Сжатие и расшифровка групповых логических операций

Приведенные два вида операций не используются в компьютерах, ориентированных на решение классических вычислительных задач, но существенно ускоряют решение новых задач с включением эвристики. Возможно, эти примеры инициируют создание новых групповых операций.

6.3. Распределенные групповые операции управления действиями объектов

Операции управления в основном подобны вычислительным операциям, но содержимое шкал содержит информацию, необходимую для быстрого управления перестройкой структуры связей в системе и процессами взаимодействия объектов.

Примером типичной операции управления служит операция устранения конфликтов доступа при обмене сообщениями объектов, имеющих порядковые номера.

Претендующий на передачу сообщения объект, получив сигнал *S начала синхронизации, создает шкалу с количеством двоичных разрядов, равным количеству взаимодействующих объектов. В шкале в разряд, соответствующий номеру объекта, последний внесет единицу, остальные –

ноли. Шкалы всех претендентов синхронно, с совмещением одноименных разрядов, поступают в RT . Теперь совмещенная, общая для претендентов шкала содержит единицы в разрядах претендентов. Заявки объектов удовлетворяются поочередно с учетом старшинства разрядов, содержащих единицы.

Показанный способ устранения конфликтов позволил посылкой одного сообщения со шкалой упорядочить разрешение конфликтов в группе объектов, имеющих адреса. Но его можно применять более широко, позволяя без адресов любому набору признаков или произвольному сообщению выполнять функции устранения конфликтов, подобно приведенному выше.

При этом нет гарантии выбора единственного объекта и придется перейти к взаимодействию множеств объектов. Уменьшение размеров этого множества может быть достигнуто уточнением набора признаков объектов, возможно с добавкой к ним случайных чисел см. 3.2.1 и затем выбором объекта операциями $\max$ или $\min$ из оставшихся идентичных объектов.

§7. Управление взаимодействием объектов, находящихся в разных кластерах

Рассмотрим следующие виды взаимодействия в неоднородной структуре 2.1.

- (1) Объекты объединены в единственный кластер и решают общую для объектов задачу с учетом диктуемых задач ограничений на взаимодействие. Особого внимания требуют ограничения по изменению общей структуры связей. Кластер имеет центр управления кластером (ЦУК) для разрешения возможных сложных конфликтов при взаимодействии объектов в кластере. Объекты в кластере создают доступ к ЦУК, используя сигналы S и $*S$ (см. §3). ЦУК упорядочит взаимодействие объектов, послав им команду.
- (2) Объекты распределены на группе кластеров и решают общую задачу с взаимодействием объектов из разных кластеров. Система имеет центр управления системой (ЦУС), разрешающий конфликты при взаимодействии объектов в разных кластерах. ЦУК и ЦУС можно заменять в динамике.

Рассмотрим действия объектов с обращением к ЦУС.

Находящийся в одном из кластеров объект для организации взаимодействия с объектами в других кластерах обращается к ЦУК своего кластера, который обратится к ЦУС и последний посылкой команды

упорядочит взаимодействие объектов из разных кластеров. Детали организации взаимодействия могут существенно различаться в зависимости от выполняемой объектами задачи.

Отметим, в соответствии с принципом формирования структуры 2.1 ЦУК и ЦУС – могут быть не монолитным устройством, а связкой из RT и объектов.

Доставляемая от ЦУС объектам команда для регулировки их взаимодействия, будет включать: адреса RT , адреса используемых источником и приемником, набор признаков источника и приемника, имя канала барьерной синхронизации и другую служебную информацию. Команда поступит к объектам в разных кластерах. Теперь объекты могут связываться через помещенные в команде адреса RT , предоставленные центром управления.

Рассмотрим безадресное взаимодействие объектов в сложных системах. Практически во всех разделах статьи рассматриваются действия объектов, у которых адреса не используются или отсутствуют. Адреса заменяются наборами признаков, выделяющих объект или группу объектов с применением ассоциативного поиска. Поиск данных по наборам признаков вместо сканирования адресов существенно ускоряет не только сам поиск, но и обработку данных ассоциативными операциями, выполняемыми за время, не зависящее от количества участников операции (весь §6). Ассоциативные операции в сочетании с быстрой перестройкой структуры связей позволяют создавать графы произвольных связей между объектами и перестраивать их с каждой новой командой обработки данных.

Центры управления ЦУК и ЦУС, используя наборы признаков распределенных объектов и данных в них, отбирают данные для совместной обработки. Рассмотрим пример.

ПРИМЕР 4. Пусть объекту A требуется установить взаимодействие с неизвестными ему объектами B из других кластеров. От объектов B объект A требует, чтобы B содержали требуемые A совпадающие наборы признаков или имеющие отличия в них. Кроме этого, A необходимо выяснить, с какими объектами C одновременно взаимодействовали объекты B , т.е. указать те RT , которые B и C используют совместно. Это один из вариантов поиска общности в объектах и данных для дальнейшего их использования в новых сочетаниях. Так как объекты B находятся в разных кластерах, то установить с ними связь непосредственно, без центра управления объект не может. Кроме того, искомые объекты могли изменять используемые ими RT . Поэтому объект A обратится к центру управления. Центр управления по признакам найдет искомые объекты, определит используемые ими

RT, примет решение о предоставлении А доступа к RT и сообщит адреса RT объекту А. Далее выявлять детали А будет самостоятельно или с участием ЦУС.

Приведенный пример характерен для многих применений ассоциативных операций поиска и обработки данных в распределенных системах.

§8. Требования к сетевым картам при синхронном взаимодействии объектов

Современные компьютеры активно используют интерфейсные (сетевые) карты. В подавляющем большинстве это карты Ethernet, которые действуют как внешние по отношению к компьютеру устройства. В объектах систем, рассмотренных в статье, также желательно иметь сетевые карты, не влияющие на структуру объекта. Для обеспечения указанных в §1 новых требований к взаимодействию объектов распределенных цифровых систем предъявляемые к картам требования должны входить следующие.

- (1) Протоколы, регулирующие взаимодействие карт между собой, должны быть детерминированными.
- (2) В передаваемые между картами сообщения должны входить короткие сообщения, типичные для обменов в пределах компьютера.
- (3) Скорость взаимодействия объектов должна быть близка к внутренней скорости взаимодействия в компьютерах объединяемых объектов — несмотря на распределенность система должна действовать как единый компьютер.
- (4) Должны поддерживаться распределенные ассоциативные операции.
- (5) Сетевая карта должна восприниматься компьютером, как один из специализированных процессоров, и скорость ее взаимодействия с компьютером не должна быть ниже скорости взаимодействия между собой других процессоров компьютера.
- (6) При многоэтапной обработке данных каждый следующий этап должен начинаться как можно быстрее после завершения действий текущего этапа. В 3.2.4 для этого каждый объект, начав действия на текущем этапе, посылает в отдельный канал непрерывный сигнал U , выключаемый в момент завершения объектом работы (фиксируется объектами как сигнал $*U$). Получив сигнал $*U$, объекты могут начинать следующий этап. Если объекты могут для всех этапов указать одинаковую длительность их выполнения, не потребуются использовать сигналы U и $*U$.

Все указанные действия должна отслеживать сетевая карта и посылать в компьютер объекта сигнал о возможности начала следующего этапа.

При наличии в карте памяти, объект ускорит действия, предварительно загрузив в память данные для следующего этапа, которые карта передаст самостоятельно.

В общем случае для очередного этапа данные в любой ретранслятор поставляет не отдельный объект, а группа объектов-источников и получает группа объектов-приемников.

- (7) Пункты 1–6 относятся к взаимодействию объектов, расположенных близко между собой. Но есть потребность наиболее быстро по выделенным каналам объединять объекты, расположенные в пределах здания, между вычислительным центром и организациями, потребителями его услуг. В этих структурах связей допустимо иметь меньшую скорость реакции на события, но более быструю, чем обеспечивает Интернет. Одно из возможных решений – взаимодействие также осуществляют сетевые карты, сохраняя логику близкой связи, но, используя отдельные каналы, позволяющие не замедлять локальные связи.

§9. Влияние безадресных операций на свойства распределенных алгоритмов

Все результаты статьи имеют конечную цель: предложить разработчикам алгоритмов и программ архитектурные и структурные решения в области компьютерных систем, ускоряющие решение новых распределенных задач, приведенных в 1.1. Выделим результаты, наиболее соответствующие этой цели.

- (1) Достигнута высокая скорость реакции систем на непредвиденные события – основная цель действий в режиме ЖРВ. В других системах из 1.1, работающих безадресно, быстроедействие также повышается.
- (2) Распределенные объекты активны и работают синхронно: каждый объект имеет право влиять на работу других активных объектов, включая совместный переход в синхронное состояние. Синхронное состояние исключает многие временные задержки, в частности, при устранении конфликтов между объектами.
- (3) В статье структуры связи отличаются от известных возможностью одновременно подключать каналы группы объектов-источников сообщений к одному общему входу приемника сообщений, что необходимо для выполнения распределенных безадресных ассоциативных операций как основы борьбы с неопределенностью.

- (4) Доступны быстрая оценка состояния всей совокупности объектов системы и перевод ее в новое состояние. Обработка данных выполняется распределенной ассоциативной операцией без задержки передачи данных.
- (5) Достижима перестройка всей структуры связей между объектами в пределах одной ассоциативной операции. Перестройка выполняется в микросекундном и наносекундном диапазоне, в зависимости от взаимной удаленности объектов системы.
- (6) Совмещение обычной передачи данных с синхронной обработкой данных, выполняемой распределенной ассоциативной операцией и быстрой перестройкой структуры связей коренным образом повышают для новых задач пропускную способность средств взаимодействия объектов по сравнению с обычными системными сетями (как следует из закона Амдала).
- (7) В совокупности результаты статьи превращают обычную системную сетевую структуру объединения компьютеров в распределенный компьютер с быстрыми безадресными ассоциативными операциями, одновременно обрабатывающими множество данных, поступающих от множества объектов.

Ключевые для п.п. 1–7 решения статьи:

- адаптивные структуры со скоростной реорганизацией;
- передача парафазных сигналов при взаимодействии объектов;
- распределенные ассоциативные операции, одновременно работающие с множествами объектов и данных в них;
- логические шкалы для представления данных, обрабатываемых ассоциативными операциями.

Предложенные решения могут быть полезны для ускорения решения известных прикладных задач и для новых задач, порождаемых появлением адаптивных распределенных цифровых систем, требующих быстрой реакции на непредвиденные события.

Заключение

Результаты статьи позволяют выполнять быстрые ассоциативные поиск и обработку данных, размещенных в распределенных цифровых объектах.

Рассмотрены три вида структур взаимодействия объектов с различными требованиями к скорости реакции объектов на возникающие события, точности синхронизации совместных действий объектов и сложности реализации (см. §3).

Первая из трех структур, позволяет перестроить все связи между объектами системы посылкой объектам единственной команды. Перестройка выполняется в пределах микросекундного и субмикросекундного интервалов времени в зависимости от взаимной удаленности объектов.

Системы могут управляться полностью децентрализованно, согласованием между объектами совместных действий.

Приведены быстрые ассоциативные операции, каждая из которых обрабатывает множество данных, поступающих одновременно от распределенных объектов.

Значительная часть видов обработки данных выполняется непосредственно в сетевых средствах системы, не задерживая передачу данных между объектами.

Предлагаемые решения могут оказать влияние на конструкции алгоритмов, ориентированных на ассоциативную обработку данных, так как в решениях статьи в процессе передачи сообщений без задержки передачи выполняется параллельная обработка данных в одновременно посылаемых многими источниками сообщениях, что существенно ограничивает отрицательное влияние закона Амдала.

Допускается в пределах системы разделение объектов системы на кластеры, каждый из них решает свою часть общей задачи асинхронно, но в неизвестные заранее моменты времени кластеры взаимодействуют для продвижения в совместном решении.

Для такого взаимодействия кластеров использовано два вида центров управления: центра управления кластером объектов (ЦУК) и центра управления системой кластеров (ЦУС). Кластеры для выполнения взаимодействия обращаются к своим ЦУК, которые обращаются к ЦУС. Последний согласует действия ЦУК, согласующих действия объектов кластера. После этого несколько кластеров взаимодействуют между собой до момента нового обращения к ЦУС или вмешательства ЦУС.

Во многих применениях можно получить указанные результаты, не вмешиваясь в структуру компьютера, только на уровне специальных средств распределенного взаимодействия, например, сетевых карт.

Список использованных источников

- [1] Стецюра Г. Г. *Синхронное взаимодействие распределенных неупорядоченных цифровых объектов* // Программные системы: теория и приложения. – 2024. – Т. 15. – № 4 (63). – С. 3–26.   [↑82, 84, 89, 96, 97](#)
- [2] Johnson H., Fang T., Perez-Vicente A., Saniie J. *Reconfigurable distributed FPGA cluster design for deep learning accelerators*. – 2023. – 5 pp. arXiv:  2305.18332 [↑83](#)

- [3] Maidan M., Melnyk A. *Organization of FPGA-based devices in distributed systems* // International Journal of Computing.– 2023.– Vol. **22**.– No. 3.– Pp. 352–359. ↑⁸³
- [4] Hussein A. A., AL-zebari A., Omar N., Merceedi K. J., Ahmed A. J., Salim N. O. M., Hasan Sh. S., Kak Sh. F., Ibrahim I. M., Yasin H. M., Salih A. A. *State of art survey for fault tolerance feasibility in distributed systems* // Asian Journal of Research in Computer Science.– 2021.– Vol. **11**.– No. 4.– Pp. 19–34. ↑⁸³
- [5] Wei W., Liu L. *Trustworthy distributed AI systems: Robustness, privacy, and governance* // ACM Comput. Surv.– 2025.– Vol. **57**.– No. 6.– id. 143.– 42 pp. ↑⁸³
- [6] Gill S., Xu M., Ottaviani C., Patros P., Bahsoon R., Shaghaghi A., M. Golec, V. Stankovski, H. Wu, A. Abraham, M. Singh, H. Mehta, S. K. Ghosh, T. Baker, A. K. Parlikad, H. Lutfiyya, S. S. Kanhere, R. Sakellariou, S. Dustdar, O. Rana, I. Brandic, S. Uhlig *AI for next generation computing: Emerging trends and future directions* // Internet of Things.– 2022.– Vol. **19**.– id. 100514.– 43 pp. 2203.04159 ↑⁸³
- [7] Dai F., Hossain Md A., Wang Y. *State of the Art in Parallel and Distributed Systems: Emerging Trends and Challenges* // Electronics.– 2025.– Vol. **14**.– No. 4.– id. 677.– 39 pp. ↑⁸³
- [8] Chini F., De Martini L., Margara A., Cugola G. *FlowUnits: Extending dataflow for the edge-to-cloud computing continuum*.– 2025.– 6 pp. 2504.11400 ↑⁸⁴
- [9] Lindsay D., Gill S., Smirnova D., Garraghan P. *The evolution of distributed computing systems: from fundamental to new frontiers* // Computing.– 2021.– Vol. **103**.– No. 8.– Pp. 1859–1878. ↑⁸³
- [10] Pedrosoa L., Batistab P., Heemelsa W. P. M. H. *Distributed design of ultra large-scale control systems: Progress, Challenges, and Prospects* // Annual Reviews in Control.– 2025.– Vol. **59**.– id. 100987.– 22 pp. 2503.23416 ↑^{83, 84}
- [11] Hamzah M. M., Islam M. M., Hassan S., Akhtar M. N., Ferdous M. J., Jasser M. B., Mohamed A. W. *Distributed control of cyber physical system on various domains: A critical review* // Systems.– 2023.– Vol. **11**.– No. 4.– id. 208.– 31 pp. ↑^{83, 84}
- [12] Park T., Choi I., Lee M. *Distributed associative memory network with memory refreshing loss* // Neural Networks.– 2021.– Vol. **144**.– Pp. 33–48. 2007.10637 ↑⁸³
- [13] Ismail S., Shah K., Reza H., Marsh R., Grant E. *Toward management of uncertainty in self-adaptive software systems: IoT case study* // Computers.– 2021.– Vol. **10**.– No. 3.– id. 27.– 19 pp. ↑^{83, 84}
- [14] Dhillswararao P., Boppu S., Manikandan M. S., Cenkeramaddi L. R. *Efficient hardware architectures for accelerating deep neural networks: Survey* // IEEE Access.– 2022.– Vol. **10**.– Pp. 131788–131828. ↑⁸³
- [15] Фостер К. *Ассоциативные параллельные процессоры*.– М.: Энергоиздат.– 1981.– 240 с.; Foster C. C. *Content Addressable Parallel Processors*.– Van Nostrand Reinhold.– 1976.– ISBN 978-0442224332.– 233 pp. ↑⁸⁶
- [16] *IEEE 1588-2019 IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*.– IEEE Instrumentation and Measurement Society.– 2020. ↑^{88, 92}

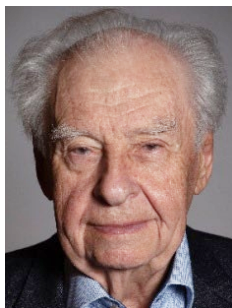
- [17] Dierikx E. F., Wallin A. E., Fordell T., Myyry J., Koponen P., Merimaa M., Pinkert T. J., Koelemeij J. C. J., Peek H. Z. *White Rabbit Precision Time Protocol on Long-Distance Fiber Links* // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2016. – Vol. **63**. – No. 7. – Pp. 945–952.  ^{↑88, 90}
- [18] Rabinovich W. S., Goetz P. G., Mahon R., Swingen L. A., Murphy J. L., M. Ferraro, H. R. Burris, Ch. I. Moore, M. R. Suite, G. C. Gilbreath, S. C. Binari, D. J. Klotzkin *45-Mbit/s cat's-eye modulating retroreflectors* // Optical Engineering. – 2007. – Vol. **46**. – No. 10. – Pp. 104001–1004008.  ^{↑89}
- [19] Zhu Y., Wang G. *Research on retro-reflecting modulation in space optical communication system* // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. **108**. – No. 3. – id. 032060. – 8 pp.  ^{↑89}
- [20] Bosiljevac M., Downing J., Babic D. *<100 ppm/K output intensity temperature stability with single-color light-emitting diodes* // Applied Optics. – 2016. – Vol. **55**. – No. 3. – Pp. 9060–9066.  ^{↑97}

Поступила в редакцию 08.02.2025;
 одобрена после рецензирования 02.04.2025;
 принята к публикации 12.04.2025;
 опубликована онлайн 18.06.2025.

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. Н. Н. Непейвода

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.*



High-speed associative interaction of distributed digital objects operating under uncertainty

Gennady Georgievich **Stetsyura**

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

 gstetsyura@mail.ru

Abstract. Associative operations and algorithms utilizing them are considered for high-speed network data processing and management in distributed digital systems with unpredictable actions of system objects, unknown time and location of result appearance within the system, system failures, and unexpected external environment influences. These operations and algorithms enabled the creation of interaction methods (based on qualitative features without using object addresses and data) and distributed associative operations involving a group of objects simultaneously in each operation. The execution of these operations does not increase data transmission time. To accelerate the system's response to unexpected influences, three types of adaptive connection structures with different reaction speeds to external effects are proposed. All connections are restructured simultaneously. (*In Russian*).

Key words and phrases: associative interaction, address-free operations, single-cycle synchronization, distributed digital systems, distributed feedback, active objects, adaptive structures

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

For citation: Gennady G. Stetsyura. *High-speed associative interaction of distributed digital objects operating under uncertainty*. Program Systems: Theory and Applications, 2025, **16**:2(65), pp. 81–109. (*In Russ.*).

https://psta.psiras.ru/read/psta2025_2_81-109.pdf

References

- [1] G. G. Stetsyura. “Synchronous interaction of distributed disordered digital objects”, *Program Systems: Theory and Applications*, **15**:4 (63) (2024), pp. 3–26 (in Russian).  
- [2] H. Johnson, T. Fang, A. Perez-Vicente, J. Saniie. *Reconfigurable distributed FPGA cluster design for deep learning accelerators*, 2023, 5 pp. [arXiv:2305.18332](#) 
- [3] M. Maidan, A. Melnyk. “Organization of FPGA-based devices in distributed systems”, *International Journal of Computing*, **22**:3 (2023), pp. 352–359. 
- [4] A. A. Hussein, A. AL-zebari, N. Omar, K. J. Merceedi, A. J. Ahmed, N. O. M. Salim, Sh. S. Hasan, Sh. F. Kak, I. M. Ibrahim, H. M. Yasin, A. A. Salih. “State of art survey for fault tolerance feasibility in distributed systems”, *Asian Journal of Research in Computer Science*, **11**:4 (2021), pp. 19–34.  
- [5] W. Wei, L. Liu. “Trustworthy distributed AI systems: Robustness, privacy, and governance”, *ACM Comput. Surv.*, **57**:6 (2025), id. 143, 42 pp. 
- [6] S. Gill, M. Xu, C. Ottaviani, P. Patros, R. Bahsoon, A. Shaghghi M. Golec, V. Stankovski, H. Wu, A. Abraham, M. Singh, H. Mehta, S. K. Ghosh, T. Baker, A. K. Parlikad, H. Lutfiyya, S. S. Kanhere, R. Sakellariou, S. Dustdar, O. Rana, I. Brandic, S. Uhlig. “AI for next generation computing: Emerging trends and future directions”, *Internet of Things*, **19** (2022), id. 100514, 43 pp.  [arXiv:2203.04159](#) 
- [7] F. Dai, Hossain Md A., Y. Wang. “State of the Art in Parallel and Distributed Systems: Emerging Trends and Challenges”, *Electronics*, **14**:4 (2025), id. 677, 39 pp. 
- [8] F. Chini, De Martini L., A. Margara, G. Cugola. *FlowUnits: Extending dataflow for the edge-to-cloud computing continuum*, 2025, 6 pp. [arXiv:2504.11400](#) 
- [9] D. Lindsay, S. Gill, D. Smirnova, P. Garraghan. “The evolution of distributed computing systems: from fundamental to new frontiers”, *Computing*, **103**:8 (2021), pp. 1859–1878. 
- [10] L. Pedrosoa, P. Batistab, W. P. M. H. Heemelsa. “Distributed design of ultra large-scale control systems: Progress, Challenges, and Prospects”, *Annual Reviews in Control*, **59** (2025), id. 100987, 22 pp.  [arXiv:2503.23416](#) 
- [11] M. M. Hamzah, M. M. Islam, S. Hassan, M. N. Akhtar, M. J. Ferdous, M. B. Jasser, A. W. Mohamed. “Distributed control of cyber physical system on various domains: A critical review”, *Systems*, **11**:4 (2023), id. 208, 31 pp. 
- [12] T. Park, I. Choi, M. Lee. “Distributed associative memory network with memory refreshing loss”, *Neural Networks*, **144** (2021), pp. 33–48.  [arXiv:2007.10637](#) 
- [13] S. Ismail, K. Shah, H. Reza, R. Marsh, E. Grant. “Toward management of uncertainty in self-adaptive software systems: IoT case study”, *Computers*, **10**:3 (2021), id. 27, 19 pp. 

- [14] P. Dhilleswararao, S. Boppu, M. S. Manikandan, L. R. Cenkeramaddi. “Efficient hardware architectures for accelerating deep neural networks: Survey”, *IEEE Access*, **10** (2022), pp. 131788–131828. 
- [15] K. Foster. *Associativnye parallel'nye processory*, Energoizdat, M., 1981, 240 pp.; C. C. Foster. *Content Addressable Parallel Processors*, Van Nostrand Reinhold, 1976, ISBN 978-0442224332, 233 pp.
- [16] *IEEE 1588-2019 IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2020. 
- [17] E. F. Dierikx, A. E. Wallin, T. Fordell, J. Myyry, P. Koponen, M. Merimaa, T. J. Pinkert, J. C. J. Koelemeij, Peek H. Z.. “White Rabbit Precision Time Protocol on Long-Distance Fiber Links”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **63**:7 (2016), pp. 945–952. 
- [18] 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. C. Gilbreath, S. C. Binari, D. J. Klotzkin. “45-Mbit/s cat’s-eye modulating retroreflectors”, *Optical Engineering*, **46**:10 (2007), pp. 104001–1004008. 
- [19] Y. Zhu, G. Wang. “Research on retro-reflecting modulation in space optical communication system”, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **108**:3 (2018), id. 032060, 8 pp. 
- [20] M. Bosiljevac, J. Downing, D. Babic. “<100 ppm/K output intensity temperature stability with single-color light-emitting diodes”, *Applied Optics*, **55**:3 (2016), pp. 9060–9066. 