


УДК 004.272.45

 10.25209/2079-3316-2023-14-4-3-23

Организация взаимодействия активных объектов однородных цифровых структур

Геннадий Георгиевич **Стецюра**[✉]

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

[✉] gstetsura@mail.ru

Аннотация. В статье расширены возможности взаимодействия активных устройств (объектов) однородных цифровых систем. Система состоит из объектов, которые расположены в пределах не более нескольких десятков метров и организуют свое взаимодействие только собственными средствами. Объекты могут быть стационарными и мобильными с произвольным и изменяемым во времени взаимным расположением объектов. Однородность системы означает отсутствие внешнего управления и равные возможности объектов в организации их взаимодействия. Связи между объектами беспроводные с использованием оптических или радиосигналов. Сигналы любого объекта-источника непосредственно поступают ко всем объектам-приемникам. Объект получает право передачи сигналов детерминировано в соответствии со значением его приоритета, задаваемым динамически или статически. Предложенные структура и способы взаимодействия позволяют объектам кроме обычного для распределенных систем обмена сообщениями выполнять распределенные групповые (ассоциативные) операции. В них объекты одновременно устраняют группу конфликтов доступа к общему каналу обмена данными, определяют состояние всех объектов системы и синхронно выполняют совместные действия объектов, реагируя на непредвиденно изменяющиеся внешние условия. Группа одновременно участвующих в групповой операции объектов выбирается с указанием набора критериев, которым должны обладать объекты. Однородность системы существенно упрощает ее техническую реализацию, но включение в систему неоднородности при усложнении системы ускоряет выполнение групповых операций. Поэтому однородную систему предлагается использовать в основном для связи между активными периферийными устройствами и связи этих устройств с более сложными компьютерами кластера.

Ключевые слова и фразы: компьютерные кластеры, децентрализованное управление, быстрая синхронизация цифровых объектов, внутрисетевые вычисления, распределенные групповые (ассоциативные) операции

Для цитирования: Стецюра Г.Г. *Организация взаимодействия активных объектов однородных цифровых структур* // Программные системы: теория и приложения. 2023. Т. 14. № 4(59). С. 3–23. https://psta.psir.ru/read/psta2023_4_3-23.pdf

Введение

Статья рассматривает организацию взаимодействия компьютеров и других содержащих цифровые средства активных устройств, например, периферийных устройств компьютеров, объединенных в однородную структуру. Далее всех активных участников структуры назовем объектами. Активность объектов означает, что они способны по собственной инициативе взаимодействовать между всеми объектами системы. Однородность структуры подразумевает равные возможности объектов при взаимодействии и отсутствие внешнего устройства управления взаимодействием. В состав объектов могут входить также цифровые устройства, взаимодействующие с внешней средой.

Объекты могут быть стационарными и мобильными. В обоих вариантах каналы связи между объектами беспроводные с обменом по ним оптическими или радиосигналами.

Сигналы любого объекта-источника непосредственно поступают ко всем объектам-приемникам. Управление передачей сигналов детерминировано. Объект-источник получает право передачи сигналов с учетом значения его динамического или статического приоритета.

Использование беспроводного канала связи не только в мобильных, но и в стационарных системах объясняется расширением функций предлагаемых средств взаимодействия объектов по сравнению с функциями известных средств связи.

Сейчас задача сетевых средств компьютерных систем устройств состоит в доставке сообщений источников приемникам. Но от средств доставки сообщений можно перейти к средствам *взаимодействия*, выполняющим дополнительно управление совместными действиями объектов и распределенные вычисления. В статье с ориентацией на однородные системы показано, что ряд таких практически широко востребованных функций реализуется простыми средствами и дает существенное их ускорение за счет одновременной доставки сообщений группы источников группе приемников.

Автор настоящей статьи в 2022 г. в статье [1] показал возможность создания средств взаимодействия с указанными выше расширенными возможностями для сложных суперкомпьютерных систем. Особенность их в том, что в дополнение к передаче сообщений группа объектов системы с высокой точностью *одновременно* получает и обрабатывает одноименные разряды сообщений других групп объектов без использования компьютеров. Время выполнения таких распределенных операций не

зависит от количества участвующих в них объектов или зависит логарифмически. Показано, что эти возможности существенно ускоряют ряд важных операций распределенного управления совместными действиями компьютеров распределенных систем и распределенных вычислений. В результате средства передачи сообщений дополнительно действуют как средства управления и вычислений. Для этого систему потребовалось сделать *неоднородной*, ввести дополнительно группу не имеющих вычислительных средств ретрансляторов сигналов, в которых и выполняется распределенная обработка данных, находящихся в сообщениях.

Такой результат получен в результате точного измерения удаленности группы объектов системы от ретранслятора. Высокую точность измерений дает применение разработанного в CERN высокоточного способа измерения [2], стандартизованного IEEE в 2019 г. [3].

Взаимодействие в статье [1] включает управление порядком обмена сообщениями и ряд операций по децентрализованной распределенной обработке данных непосредственно средствами взаимодействия объектов. Объекты выбирают поочередную передачу сообщений или передачу с учетом приоритетов источников. Средства взаимодействия детерминировано устраняют конфликты при одновременной попытке передать сообщения, восстанавливают управляемость системой при отключении ряда объектов. Кроме этого, они выполняют ряд видов распределенной обработки данных. Синхронизация действий объектов выполняется непосредственно объектами.

Существенно подчеркнуть отличие задач, решенных в CERN, от синхронизации взаимодействия объектов в статье. В CERN измерения точно согласовывают показания часов группы объектов без обращения к внешнему эталону времени. После этого одно из устройств задает группе момент времени для начала совместных действий объектов. Но синхронизация часов не решает другую очень востребованную задачу. Совместные действия группы *однородных* объектов должны начинаться с возможно меньшей задержкой после возникновения событий, потребовавших выполнения действий объектов. Это основное требование для любых средств управления и основная функция обратной связи.

Приведенное решение легко перенести на компьютерный кластер простым сведением группы ретрансляторов к единственному ретранслятору. Однако для взаимодействия простых объектов и компьютеров с простыми объектами требуется дополнение – система взаимодействующих объектов должна быть однородной, не содержать ретрансляторы, и быть технически просто реализуемой. Требование однородности особенно существенно

для взаимодействия стационарных объектов с мобильными объектами и мобильных объектов между собой, так как для них существенно усложняется использование выделенных ретрансляторов, обрабатывающих данные.

В предлагаемой статье получена существенно более простая реализация по сравнению с решениями [1], устранены неоднородные компоненты систем. При этом скорость передачи данных практически не уменьшается, но распределенные вычисления выполняются существенно медленнее, что для областей применения однородных решений допустимо.

Таким образом, в статье [1] и настоящей статье рассмотрены цифровые системы, существенно различающиеся по сложности и точности синхронизации.

В статье предполагается, что операции взаимодействия будут выполняться без вмешательства во внутреннюю структуру объединяемых устройств, например, средствами интерфейсных (сетевых) карт объектов. Несмотря на основную ориентацию статьи на взаимодействие с простыми распределенными объектами, в ней показана возможность применения групповых операций для связей в пределах отдельного чипа, печатной платы.

Сделаем несколько замечаний. Для связи персональных компьютеров самым распространенным средством взаимодействия служит Ethernet. Он не может применяться для выполнения требующих синхронизации распределенных операций, так как использует случайный способ доступа, причем доступ предоставляется одновременно не группе, а единственному источнику. Известен и широко применяется детерминированный способ взаимодействия объектов – приборный интерфейс I^2C и его развитие I^3C фирмы Philips. Фирма позиционирует I^2C как интерфейс для средств автоматизации, но он по своей структуре мог бы использоваться для взаимодействия компьютерных объектов. Например, подобный интерфейс был разработан и опубликован как «Децентрализованное приоритетное управление (ДПУ)» в Институте проблем управления РАН в 1970 г. за 12 лет до I^2C и применялся в АСУ ТП для выполнения распределенных вычислений (см. раздел 2.3 статьи). Но в ДПУ множество объектов было упорядочено – объекты соединялись проводным каналом в цепочку. В рассматриваемой статье и в [1] требовалось множество объектов не упорядочивать в пространстве, что было получено, но существенно усложнило оборудование.

Для связи объектов вычислительной техники применяются многие средства, известный пример – InfiniBand, но они не ориентированы

на одновременную синхронную доставку сообщений группы источников каждому приемнику из группы приемников, требуемую в настоящей статье.

Результаты статьи распределены следующим образом. В разделе 1 рассмотрена структура связей в однородной системе. В разделе 2 показан переход от асинхронной к синхронной системе взаимодействия объектов. Указаны все компоненты выполнения этого перехода. Раздел 3 рассматривает специальное представление данных – логические шкалы. В разделе 4 показано применение ассоциативного управления. Раздел 5 посвящен системам с малыми расстояниями между объектами – системам, размещенным на плате и на чипе.

1. Организация связей в однородной системе объектов

Так как предполагается, что объекты могут быть не только стационарными, но и мобильными, то основным способом обмена сообщениями между объектами будет обмен оптическими или радиосигналами по беспроводным каналам связи.

Система связей объектов имеет очень простую структуру (рисунок 1).

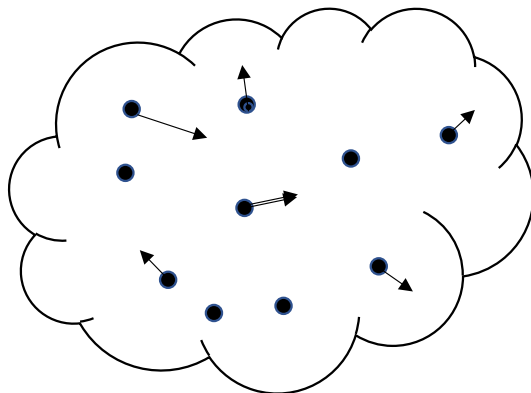


Рисунок 1. Однородная структура связей объектов

Здесь показана система взаимодействующих объектов – компьютеров кластера и (или) активных периферийных устройств. Допускается взаимодействие групп таких устройств в любых сочетаниях. Произвольная часть группы объектов стационарная, другие объекты могут перемещаться в произвольных направлениях с разными скоростями в пределах заданных границ системы.

Для взаимодействия объект должен иметь специализированное средство связи – сетевую карту, приспособленную для управления обменом сообщениями в соответствии с предлагаемыми в статье правилами. Предполагается, что сетевая карта имеет источник сигналов объектов и их приемник. Периферийные устройства активны и по своей инициативе обращаются к компьютерам кластера и другим периферийным устройствам. Отсутствие внешних посредников означает, что сигнал любого источника начнет поступать к любому приемнику объекта через интервал времени не больше времени переноса сигнала между наиболее взаимно удаленными объектами $T = L/c$. Здесь L – расстояние между этими объектами, c – скорость света.

В однородной структуре невозможно создать разброс начала реакции объектов на поступающие сообщения меньше T . Для многих применений – это приемлемое значение. Например, при $L = 30$ м, $T \approx 100$ нс. Но для распределенных систем, от компьютеров которых требуется предельно точная и быстрая синхронизация совместных операций, сравнимая с достижимой в сосредоточенных системах, требуется организация, приведенная в [1].

Заметим, при отсутствии прямой видимости объектов потребуется обычным способом транслировать сигналы, делая их доступными для удаленных объектов.

2. Переход от асинхронных к синхронно взаимодействующим объектам

Для перехода группы объектов к упорядоченному взаимодействию объекты вначале должны синхронизовать совместные действия по выбору способа взаимодействия, рассмотренного в следующем разделе. После этого начинается взаимодействие по команде, созданной одним из объектов или одновременно группой объектов.

2.1. Процесс начала синхронизации

Раздел основан на результатах статьи [4]. Будем считать, что задан интервал времени $*T$, длительности не менее T – времени переноса сигнала в пределах всей системы объектов, предполагаемый неизвестным. Если в течение $*T$ объект не получает сигналы от других объектов, то в системе нет обмена сообщениями и объекты могут начать процесс синхронизации для выполнения сеанса обмена сообщениями.

Таким образом, система начинает синхронизацию полностью децентрализованно с задержкой $*T$. Для начала синхронизации объект, *не получив сигналы* объектов в течение интервала $*T$, посылает сигнал S длительности $*T$ и ожидает появления сигнала $*S$ момента завершения сигнала S . Выполнение ограничения $*T \geq T$ обеспечивает при совмещении во времени сигналов S , поступающих от группы объектов, единственность сигналов S и $*S$. Момент завершения объектом сигнала S (т.е. сигнал $*S$), разрешает объектам приступить к следующим шагам по организации взаимодействия объектов, приведенным в разделе 2.2.

2.2. Выбор способа обмена сообщениями

При обычной сетевой связи передаваемые источниками сообщения часто не коррелированы, и выбор действий источников по упорядочению передачи сообщений диктует система связи. Например, система решает будут объекты передавать сообщения поочередно или с учетом динамических приоритетов.

В рассматриваемых средствах взаимодействия, напротив, есть большая зависимость в передаваемых объектами сообщениях, так как они часто решают общую задачу. Поэтому полезно предоставить объектам быстрый способ коллективного выбора характера взаимодействия.

Для этого рассмотрим процедуру коллективного выбора объектами между некоторыми альтернативными действиями A_0 и A_1 . Но вначале рассмотрим действия объектов при получении сигнала $*S$, иллюстрируемого рисунком 2.

В разделе 2.2 и следующих разделах потребуется, чтобы во времени пересекались только сигналы, имеющие одинаковую смысловую нагрузку (например, одноименные двоичные разряды сообщений). Необходимые для этого условия иллюстрирует рисунок 2.

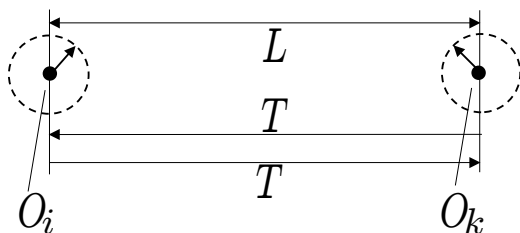


Рисунок 2. Общее условие корректной передачи сигналов

Здесь показаны два объекта-источника – O_i и O_k , наиболее взаимно удаленных в системе. Расстояние между ними равно L ; время переноса

сигнала $T = L/c$, где c – скорость света. Объекты посылают ненаправленные сигналы длительности $\leq T$.

Пусть в системе появляется условие (в частности, появление сигнала $*S$), разрешающее объекту O_i передачу сигнала. Посланный O_i сигнал поступит к объекту O_k через интервал времени T , к любому другому объекту системы через интервал $*T \leq T$. Так как длительность посылаемых объектами сигналов выбрана $\leq T$, то сигнал объекта O_i выйдет за пределы системы (исчезнет) не позже интервала $2T$ после его отправки объектом. К объекту O_k сигнал от O_i поступит через интервал T и исчезнет еще через интервал $*T \leq T$. Объект O_k также может послать свой сигнал при приходе $*S$. Это произойдет через интервал T после передачи сигнала объектом O_i . По отношению к моменту получения $*S$ в O_i сигнал от O_k исчезнет через интервал $3T$. Поэтому, если требуется, чтобы сигналы от O_i и O_k гарантировано пересекались во времени, объекты должны их посылать при получении $*S$.

Сигналы любых других пар объектов также будут пересекаться и исчезнут в пределах $3T$. Если T неизвестен, то замена его на $*T \geq T$ не изменит результат, полученный для T .

Чтобы сигналы объектов не пересекались, объекты должны передавать их в разных интервалах $3T$ (или $3*T$).

Теперь перейдем к коллективному выбору объектов между альтернативными действиями A_0 и A_1 .

Для участия в выборе объекты используют беспроводные сигналы частоты f_0 для информирования всех объектов о предпочтении выбора A_0 и f_1 о предпочтении выбора A_1 . Для передачи одного сигнала, как отмечалось, объекты используют два интервала, каждый длительности $*T$ или T , если последний известен. Любой объект при получении $*$ начнет передачу сигнала длительностью $\leq *T$. Не позднее следующего интервала $*T$ сигнал исчезнет, а все объекты получают сигналы объектов, информирующие о предпочтении их выбора на данном шаге. Для выбора объекты должны учесть инструкцию системы по выбору, которая определяет решение в соответствии с полученными объектами сигналами f_0 и f_1 . Перед выбором инструкция должна быть известна объектам.

Рассмотрим пример. Пусть объектам требуется выбрать между поочередной передачей объектами сообщений (выбор A_0) и передачей сообщений источников в соответствии с текущими значениями приоритетов (выбор A_1). Объектам инструкция системы известна.

Допустим, система предлагает приоритетный выбор при единогласном выборе объектов на приоритетный доступ, иначе должен быть поочередный

доступ. Пусть объекты получили сигнал $*$ и сообщают о своем решении посылкой сигнала f_0 (выбор A_0) или f_1 (выбор A_1). Тогда, при наличии только f_1 все объекты работают по приоритетам, при наличии только f_0 или f_1 и f_0 выполняется поочередный доступ. Таким образом, инструкция системы должна предложить выбор, который учитывает неизвестные ей заранее предпочтения объектов. При начальном запуске инструкция системы задана, но в процессе работы объект, получивший право передавать сообщения может предложить свою инструкцию или цепочку инструкций с учетом задаваемой объектам цепочкой операций.

2.3. Детали выполнения поочередной и приоритетной передачи сообщений

Поочередная передача сообщений. Предполагается, что всем объектам предварительно присвоены порядковые номера (адреса), и объект завершает сообщение распознаваемым всеми объектами стоп-признаком, характерным для объекта (именем или порядковым номером объекта).

Первый по порядку объект при получении $*S$ передает сообщение на высокой скорости, ограниченной только техническими возможностями объектов, и завершает его стоп-признаком, так как длительность сообщений объектов не унифицирована. Каждый следующий объект передает сообщение после обнаружения стоп-признака с номером непосредственного предшественника. Если каждый объект работоспособен и обязательно передает сообщение, то сканирование объектов завершено.

Пусть теперь произвольным объектам разрешено не передавать сообщения. Первый объект без каких-либо условий передает сообщение. Каждый следующий после первого объект с порядковым номером k ожидает завершения передачи $k - 1$ сообщения и затем передает сообщение. Если при этом объект обнаруживает отсутствие сигналов в течение интервалов длительности $3T$, то объект считает каждый такой пустой интервал сообщением источника с очередным порядковым номером. Так как количество объектов известно, передача будет завершена после передачи всех ожидаемых сообщений. Дополнительно при этом процесс определяет номера не передающих сигналы объектов.

Передача сообщений с учетом приоритетов. В современных протоколах *USB 13C^{URI}* и *MIP1 13C^{URI}* используются давно известные способы учета приоритета [5]. Объекты, претендующие на обмен сообщениями, одновременно побитно передают двоичные коды своих приоритетов. Вначале все объекты передадут общее сообщение, содержащее старший бит кода приоритета и проверят значение принятых сигналов. Если приняты

только сигналы, представляющие двоичную единицу или одновременно единицу и ноль, то считается, что получена единица и только объекты, пославшие единицу, передадут сообщение, содержащее следующий бит адреса и т.д. После передачи всех битов адреса сообщение передаст единственный объект со старшим значением приоритета.

Код приоритета объекта может быть представлен числом, состоящим из двух групп разрядов. В группе старших разрядов указано текущее значение приоритета, в группе младших разрядов порядковый номер объекта. Такое решение более гибко выбирает реакцию объектов на события.

2.4. Два вида формирования общего сообщения группой объектов

Пусть объекты при получении специального сообщения-команды могут выбрать один из двух видов передачи сообщений – передачу сообщений одного за другим или с пересечением одноименных двоичных разрядов сообщений. Первый вариант использован в вариантах раздела 2.3

Во втором варианте специальное сообщение разрешает заранее выбранной группе объектов передавать свои сообщения в едином для группы сообщении, посылая в пределах времени $3T$ одновременно очередной одноименный разряд своих сообщений. В результате устраняется зависимость длины сообщения от количества объектов в группе. Второй вид передачи сообщений основной для операций следующих разделов статьи.

Подведем итог раздела 2. Раздел дает быстрое детерминированное управление передачей сообщений объектами. В разделе 2.1 объекты асинхронной посылкой общего сигнала S получают право передавать сообщения. В разделах 2.2 и 2.3 детально рассмотрена поочередная передача сообщений и передача с учетом приоритетов. В разделе 2.4 представлены два вида передачи группой объектов сообщений в едином для группы сообщении. В нем объекты размещают свои сообщения одно за другим или в виде только одного сообщения с совмещением в нем одноименных разрядов сообщений объектов. Этим завершено изложение всех базовых механизмов, обеспечивающих быстрое полностью децентрализованное управление взаимодействием цифровых объектов.

3. Специальный формат данных – логические шкалы

Логические шкалы и ассоциативные операции следующего раздела применялись автором в неоднородных системах, например, в [1]. В этой статье показано их применение в однородных системах.

Структура логической шкалы. В статье логическая шкала (для краткости – шкала), это формат данных, используемый объектами для одновременной обработки данных в распределенных операциях. Шкалы, посылаемые одновременно несколькими объектами в общей распределенной операции, содержат равное количество разрядов. Каждый разряд шкалы приписан одному из известных всем объектам признаков (критериев), характеризующих шкалой.

В статье шкала, это часть связки – шкалы и групповой операции, синхронно обрабатывающей группу поставляемых объектами шкал. Синхронность обработки объединяет группу шкал в одну групповую операцию или синхронную последовательность групповых операций. В разделе 2 уже применялся вариант такой синхронной последовательности при выделении объекта с максимальным значением кода приоритета. В нем каждая шкала – двоичный разряд значения приоритета, а вся групповая операция состояла из синхронной последовательной обработки всех разрядов кода как единого целого. Конечный результат применения связки состоит в повышении скорости реакции группы объектов на возникающие события.

В шкале объекту для представления значения двоичного разряда можно использовать четыре варианта сигналов: ноль передается сигналом f_0 , единица сигналом f_1 , при отсутствии активности объект не передает в разряд сигналы (сигнал Z), Наличие в разряде f_0 и f_1 – сигнал W . В зависимости от конкретной операции смысл сигналов Z и W может быть разным. Например, сигнал Z – отсутствие сигналов покажет, что объект не может приписать значение признаку. Сигнал W полезен при задании действия группе объектов и разрешит участвовать в операции объектам при любом значении указанного в W разряда шкалы (маска разряда).

В частности, шкалы ускоряют работу с числами, представленными в системе с произвольным основанием. В такой шкале каждая цифра числа задается шкалой с количеством двоичных разрядов, соответствующим основанию системы. Шкала содержит только одну единицу в разряде, соответствующим значению цифры. Например, цифре 7 в десятичной системе соответствует шкала 00100000. Такое представление цифр полезно, например, для поиска максимального и минимального значения числа. Если при совмещении шкал десятичных цифр появится шкала 001001101, то из шкалы следует, что в совмещении участвовали максимальная цифра 7 и минимальная цифра 1.

В следующем разделе рассмотрено применение логических шкал в распределенных групповых (ассоциативных) операциях.

4. Ассоциативные операции управления действиями объектов однородных систем

В задачах обработки данных ассоциативные операции впервые появились в ассоциативных запоминающих устройствах для одновременного поиска в массиве данных. Ассоциативными операции названы потому, что обращение к данным выполняется не по их адресам, а по характерным признакам. В соответствии с предыдущим текстом ассоциативные операции могут быть названы и групповыми.

Для выделения отличий известных ассоциативных устройств и операций от предлагаемых в статье для однородных систем сопоставим новые решения с первыми структурами сосредоточенных ассоциативных устройств, обеспечивающих переход от ассоциативной памяти к ассоциативным процессорам [6, 7]. На рисунке 3 показана структура, представленная в [7] и ряде других последующих публикаций. Она наиболее соответствует содержанию раздела 4.

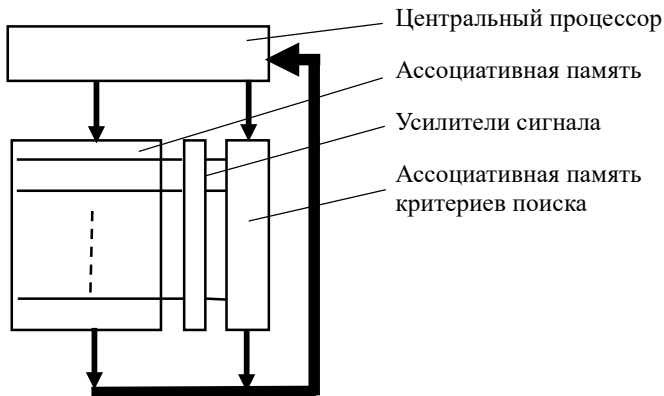


РИСУНОК 3. Ассоциативная память / вычислительное устройство

Здесь строки ассоциативной памяти содержат логические шкалы, приведенные в разделе 3. Каждый разряд шкалы состоит из двух битов, заполняемых любым сочетанием единиц и нулей, показанным в разделе 3. Запись в разряде комбинации 10 интерпретируется как логическая единица, запись 01 – логический ноль. Таким образом нули активные – передаются наличием сигнала. Часть разрядов в поиске можно игнорировать (маскировать), используя запись W. Ассоциативная память критериев поиска состоит из одного или группы столбцов.

Устройство работает следующим образом. Центральный процессор структуры посылает одновременно на все разряды строк массива ассоциативной памяти слово поиска строк (слов) в массиве, соответствующих слову поиска. Найденные строки через усилители одновременно посылают сигнал в выбранный процессором столбец ассоциативной памяти критериев поиска. В результате в столбце будет отмечена группа строк, соответствующих условию поиска. На общем выходе всех строк массива ассоциативной памяти появится строка суммарного состояния столбцов массива, которая поступает в процессор. Затем процессор выполняет новые поиски с записями в другие столбцы памяти критериев. Новые поиски используют сформированные ранее разряды строк памяти критериев как часть нового слова поиска.

Как в разделе 3 цифры чисел можно задавать в системе с основанием, отличным от двоичного, и представлять соответствующими логическими шкалами, выполняя с ними логические операции, поиск максимума / минимума, поиск чисел, расположенных в заданном интервале.

Затем появились значительно более сложные операции в ассоциативных процессорах и компьютерах. Они одновременно обращались к расположенным в разных частях системы данным, и находили данные, соответствующие условиям поиска или близкие к ним. Все приведенные системы были сосредоточенными.

Можно создать распределенные компьютерные системы, конкурирующие по производительности с сосредоточенными системами при доступности высокой точности синхронизации взаимодействия компонентов этих систем [1]. В работе [1] и нескольких предыдущих публикациях автора распределенные системы содержат непосредственно (без посредников) доступные **всем** объектам ретрансляторы сигналов, каждый из которых собирает синхронизованные побитно или поочередно сообщения группы объектов в одну точку-ретранслятор. Затем ретрансляторы, как единственные источники, выполняют групповую обработку данных и рассылают общее сообщение групп всем объектам – приемникам сообщений группы. Это позволяет синхронизовать объекты и избавиться от медленной индивидуальной рассылки сообщений. В ряде важных операций получена независимость длительности операции от количества участвующих в ней объектов. Каждая выполняемая в распределенной системе ассоциативная операция одновременно обрабатывает большое количество данных, но в общем случае из-за разной сложности решаемых объектами задач вся система объектов или ее отдельные группы действуют асинхронно. Это выдвигает две решаемые в [1] задачи.

Первая задача – продвижение распределенной асинхронной обработки данных по мере их готовности в разных объектах. Вторая задача – доставка требуемых данных **одновременно** всем потребителям данных. Эти две задачи существенны для вычислительных задач типа dataflow, а также для многих эвристических задач и задач реального времени.

В однородных системах этой статьи ассоциативные операции по организации и способам применения мало отличаются от операций в неоднородных системах, но реализуются проще. Существенное отличие только во времени исполнения – группа объектов передает одноименный двоичный разряд сообщений в пределах интервала длительности $3T$. Ниже кратко рассмотрим каждую из ассоциативных операций и опишем типовую схему из применения.

Рассмотрим следующие распределенные групповые (ассоциативные) операции, одновременно использующие группу аргументов: групповые поразрядные операции *логическое И*, *логическое ИЛИ*; групповой поиск *max* или *min*; групповые арифметические *сложение* и *вычитание*. Операции в качестве аргументов используют логические шкалы.

В групповой операции *поразрядное логическое И* объекты считают общим значением всех принятых в пределах интервала T битов данных единицу, если среди битов не было нулей (сигналов f_0). Соответственно значение операции *поразрядное логическое ИЛИ* равно нулю, если среди битов не было единиц (сигналов f_1).

В групповом поиске *max* или *min* объекты действуют с двоичными числами подобно доступу по приоритетам (раздел 2.3) и с числами в системе с произвольным значением основания подобно разделу 3. Вначале все объекты передадут общее сообщение, содержащее в пределах T старшую цифру числа, и выделяют объекты, передавшие наибольшую цифру. После передачи всех цифр чисел будет выделено максимальное значение числа. Подобным способом объекты находят минимум.

Выполнение групповых арифметических операций *сложение* и *вычитание*. В операциях применим представление чисел шкалами в соответствии с разделом 3. Используем десятичную систему счисления. Каждая цифра числа задается шкалой с количеством двоичных разрядов, соответствующим основанию системы, и содержит только одну единицу в разряде, соответствующим значению цифры. Над шкалами, представляющими цифры выполним аналого-цифровые операции. Добавим в интерфейсные карты объектов элемент аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Пусть цифры передаются в виде указанных выше шкал и посылаемые объектами сигналы имеют равную энергию. Тогда АЦП при совмещении

в ретрансляторе одноименных разрядов шкалы сформирует численное значение суммарной энергии сигналов в каждом разряде, и одновременно все объекты выполняют суммирование.

Приведем пример: на АЦП поступает от группы объектов общая шкала 0(3)00(4)00(6)0. Здесь в скобках указаны значения, которые АЦП сформирует для объекта. Цифра 3 в восьмом разряде шкалы появилась при одновременном поступлении в АЦП этом разряде трех сигналов f_1 от объектов. Такой же смысл имеют цифры 4 и 6 в пятом и втором разрядах шкалы. Получив от АЦП такие значения, все объекты вычисляют: $(8 \times 3) + (5 \times 4) + (2 \times 6) = 56$. Здесь нет зависимости времени исполнения от количества участников операции.

Операции с АЦП требуют высокой стабильности мощности посылаемых объектами сигналов. В [8] приведен простой светодиодный источник со стабильностью выходной мощности лучше $50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Это достаточно для одновременного суммирования сигналов нескольких тысяч источников, что существенно превышает требования задач настоящей статьи.

Следующее важное действие – слежение за завершением асинхронных работ объектов. Подготовка к ассоциативной операции, выполнение операции, а также дополнительных, индивидуальных для объекта операций может требовать разное время. Поэтому каждый объект должен оповещать все объекты о завершении локальных действий. Наиболее быстро сообщить о завершении работ позволяет следующий вариант барьерной синхронизации. Каждый объект, начав локальные действия, посылает непрерывный сигнал Br всем объектам и снимает его по завершению локальной работы. Завершение Br всеми объектами они воспринимают как новый сигнал $*Br$ завершения всех работ. На сигнал $*Br$ объекты реагируют, как на $*S$, и начинают без обращения к центру совместное выполнение очередной команды.

В системе могут быть объекты-исполнители, непосредственно воздействующие на внешнюю среду. Логические шкалы, при соответствующей интерпретации значения их разрядов, исполнители воспримут как команды, которые требуется выполнять одновременно. Как показано выше, в однородной системе разброс считающихся одновременными действий объектов не превышает T . От однородной системы не требуется очень высокая точность синхронизации, поэтому объекты, включая исполнителей могут незначительно менять расположение.

Кроме применений шкал в групповых операциях они полезны в рассмотренных в предыдущих разделах операциях управления действиями объектов.

Пример такой операции – групповое устранение конфликтов объектов с учетом прав передачи сообщений. Задается шкала с количеством разрядов, равным количеству объектов. Каждый претендующий на передачу сообщения объект в своей части общего сообщения объектов в выделенный ему двоичный разряд шкалы заносит единицу. Объекты принимают последовательность шкал и изложенными выше способами формируют общую шкалу объектов. После этого объекты упорядоченно передают сообщения с учетом единиц в разрядах шкалы.

В заключение раздела вернемся к рисункам 1 и 3. Распределенная ассоциативная структура не отличается от распределенной структуры на рисунке 1. Структура связей сохранена, добавлен ряд ассоциативных операций. Отличие от сосредоточенной ассоциативной структуры существенное – каждый распределенный объект содержит собственный компьютер с обычной памятью или с ассоциативной памятью, подобной памяти на рисунке 3.

Наличие в объекте компьютера позволяет расширить набор ассоциативных операций, на программном уровне комбинируя приведенные выше операции или создавая совершенно новые.

В структуре рисунка 1 объекты в динамике выбирают текущего лидера. В результате в однородной системе в каждый момент времени объекты формируют новую распределенную древовидную структуру. В ней каждый объект подобен строке ассоциативной памяти на рисунке 3, но строке с собственными вычислительными средствами и гибким набором операций.

Автор полагает, что ассоциативные операции могут быть полезны в эвристических задачах и задачах с элементами dataflow, требующими одновременное общение групп объектов без использования адресов и имен комплексов данных, лишь удовлетворяющих набору соответствующих требований. В системах реального времени применение ассоциативных операций ускоряет реакцию на возникающие события.

5. Системы с малыми расстояниями между объектами

Несмотря на то, что статья рассматривает распределенные на значительные расстояния однородные системы, важно отметить полезный вариант систем, объединяющих возможности неоднородных и однородных способов взаимодействия. Это системы с малыми расстояниями между объектами, имеющие при однородности точность, близкую к получаемой в неоднородных системах.

Пусть, например, имеется однородная система с модулями (чипами), расположенными на печатной плате с максимальным расстоянием 30 см между ними, и требуется организовать взаимодействие модулей. Сигнал переместится в таких пределах за время T , равное 1 нс. Для чипа с расстояниями порядка 3 см время переноса сигнала составит 0,1 нс. Эти времена достаточно малы и позволяют создать для многих приложений однородные по управлению структуры, способные по скорости реакции конкурировать с более сложными неоднородными системами.

Приведем пример существенного упрощения. В статье [1] рассмотрена структура суперкомпьютера с неоднородной структурой и ориентированными оптическими связями, объединяющими его активные компоненты. Возможности этой структуры отмечены во введении к настоящей статье. Структура имеет группу специализированных коммутаторов, которые позволяют при обращении приемников к коммутатору доставлять приемникам сообщение источников *за счет энергии сигналов* приемников. Структура позволяет выполнить одновременную перестройку всех связей между объектами с наносекундными задержками, что позволяет выполнять перестройку связей в пределах текущей задачи за время перехода от одной операции к следующей. Быстрая перестройка потребовала высокой точности измерений расстояний между объектами в соответствии с решениями CERN, вошедшими в международный стандарт [3].

При малых расстояниях между объектами можно создать подобные системы упрощенно, отказом от измерений расстояний. При этом структура взаимодействия сохраняется, скорость и гибкость реорганизации связей сохраняются, но неизбежно уменьшение точности синхронизации по сравнению с [1] с замедлением групповых операций, в значительной степени компенсируемое малым временем переноса сигналов. Здесь, как и в [1], допустимы два вида реализации.

Первый вид использует ретрансляторы с ретрорефлектором, который принимает сигналы группы источников и отправляет их группе приемников. За счет энергии приемников в ретрансляторах модуляторы данными в сигналах источников модулируют сигналы приемников. Структуры с единственным ретранслятором известны и применялись на практике (см. ссылки в [1]). Публикации по структурам с многими ретрансляторами не обнаружены. Также нет данных о использовании в таких структурах быстрых переключателей, выбирающих направление оптического сигнала источника на требуемый ретранслятор из группы ретрансляторов. Эти вопросы требуют дальнейшей проработки.

Вторая известная, более простая реализация требует наличия в источниках генераторов сигналов с набором частот, соответствующим

количеству ретрансляторов. Каждый из ретрансляторов принимает сигналы своей частоты и ретранслирует их на другой, также характерной только для него частоте. Здесь все сигналы ненаправленные и не требуется иметь переключатели направления сигналов объектов. Такая структура реализуема при небольшом количестве ретрансляторов.

6. Заключение

В рассмотренном взаимодействии активных устройств (объектов) однородных цифровых систем получены следующие результаты. Система состоит из объектов, которые организуют свое взаимодействие без привлечения внешних управляющих средств.

Предполагается ограниченная взаимная удаленность объектов в пределах нескольких десятков метров. Отсутствие внешнего управления сохраняет работоспособность системы при отключении любых ее объектов. Также произвольная группа указанных объектов совместными действиями объединяется в однородную систему. Объекты могут быть стационарными и мобильными. В последнем случае взаимодействие должно выполняться оптическими или радиосигналами.

Указанные возможности достигаются простыми в реализации техническими средствами, но ценой следующего ограничения в точности синхронизации действий объектов. Происходящие в разных объектах системы события считаются одновременными, если они удалены не более чем на интервал времени $T = L/c$, где L – максимальное расстояние между объектами, c – скорость света.

Один из видов реализации требуемых средств – создание интерфейсных карт, объединяющих в единую систему персональные компьютеры или компьютеры кластеров.

Предполагаемая основная область использования – управление взаимодействием объектов с выбором их не по адресам, а по требуемой текущей совокупности свойств. В частности, такая задача характерна для ряда эвристических задач, ряда задач dataflow и для систем, работающих в реальном времени. Кроме этого предложения статьи могут быть полезны в области периферийных вычислений (edge computing) для выполнения распределенных задач управления и вычислений вне компьютеров.

Список литературы

- [1] Стецюра Г. Г. *Синхронное выполнение групповых операций в распределенных компонентах суперкомпьютеров и компьютерных кластерах* // Программные

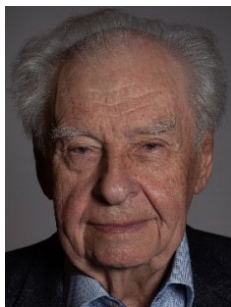
- системы: теория и приложения.– 2022.– Т. 13.– № 4(55).– С. 3–24. [doi](#) ↑4, 5, 6, 8, 12, 15, 19
- [2] Lipinski M., Wlostowski T., Serrano J., Alvarez P. *White Rabbit: a PTP application for robust sub-nanosecond synchronization // 2011 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication* (Munich, Germany, 2011).– Pp. 25–30. [doi](#) [URL](#) ↑5
- [3] Girela-López F., López-Jiménez J., Jiménez-López M., Rodríguez R., Ros E., Díaz J. *IEEE 1588 high accuracy default profile: applications and challenges // IEEE Access.*– 2020.– Vol. 8.– Pp. 45211–45220. [doi](#) ↑5, 19
- [4] Стецюра Г. Г. *Децентрализованная автономная синхронизация процессов взаимодействия мобильных объектов // Проблемы управления.*– 2020.– № 6.– С. 46–56. [doi](#) ↑8
- [5] Прангишвили И. В., Подлазов В. С., Стецюра Г. Г. *Локальные микропроцессорные вычислительные сети.*– М.: Наука.– 1984.– 176 с. ↑11
- [6] Стецюра Г. Г. *Новый способ построения запоминающих устройств // Доклады АН СССР.*– 1960.– Т. 132.– № 6.– С. 1291–1294. [QR](#) ↑14
- [7] Falkoff A. D. *Algorithms for parallel-search memories // Journal of the ACM.*– 1962.– Vol. 9.– No. 4.– Pp. 488–511. [doi](#) ↑14
- [8] Bosiljevac M., Downing J., Babić D. *Reaching <100 ppm/K output intensity temperature stability with single-color light-emitting diodes // Applied Optics.*– 2016.– Vol. 55.– No. 32.– Pp. 9060–9066. [doi](#) ↑17

| | |
|-------------------------------|-------------|
| Поступила в редакцию | 14.06.2023; |
| одобрена после рецензирования | 07.07.2023; |
| принята к публикации | 12.09.2023; |
| опубликована онлайн | 10.10.2023. |

Рекомендовал к публикации

к.ф.-м.н. С. А. Романенко

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.

[ID](#) 0000-0003-4606-4424
e-mail: gstetsura@mail.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



The organization of interaction the active objects of homogeneous digital structures

Gennady Georgievich **Stetsyura**

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

 gstetsura@mail.ru








Abstract. This article extends the possibilities of interaction of active devices (objects) in homogeneous digital systems. The system consists of objects that are located within a few tens of meters and organize their interaction only by their own means. Objects can be stationary and mobile with arbitrary and time-varying mutual arrangement. The homogeneity of the system means the absence of external control and equal opportunities of objects in the organization of their interaction. Communications between objects are wireless using optical or radio signals. Signals from any source object go directly to all receiver objects. The object receives the right to transmit signals deterministically according to its priority value, either dynamically or statically. The proposed structure and interaction methods allow objects to perform distributed group (associative) operations in addition to the usual distributed system message exchange. In them, objects simultaneously eliminate a group of conflicts of access to the common channel of data exchange, determine the state of all objects of the system, and synchronously perform joint actions of objects, reacting to unforeseen changing external conditions. A group of objects simultaneously participating in a group operation is selected by specifying a set of criteria that the objects must possess. The homogeneity of the system greatly simplifies its technical implementation, but the inclusion of heterogeneity in the system will accelerate the performance of group operations when becoming more complex. Therefore, the homogeneous system is proposed to be used mainly for communication between active peripheral devices and those with more complex cluster computers. (*In Russian*).

Key words and phrases: computer clusters, decentralized control, fast synchronization of digital objects, intranet computing, distributed associative operations, edge computing

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

For citation: Gennady G. Stetsyura. *The organization of interaction the active objects of homogeneous digital structures*. Program Systems: Theory and Applications, 2023, **14**:4(59), pp. 3–23. (*In Russ.*). https://psta.psisras.ru/read/psta2023_4_3-23.pdf

References

- [1] 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. 25–46. 
- [2] M. Lipinski, T. Włostowski, J. Serrano, P. Alvarez. “White Rabbit: a PTP application for robust sub-nanosecond synchronization”, *2011 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication* (Munich, Germany, 2011), pp. 25–30.  
- [3] F. Girela-López, J. López-Jiménez, M. Jiménez-López, R. Rodríguez, E. Ros, J. Díaz. “IEEE 1588 high accuracy default profile: applications and challenges”, *IEEE Access*, **8** (2020), pp. 45211–45220. 
- [4] G. G. Stetsyura. “Decentralized autonomic synchronization of interaction processes of mobile objects”, *Control Sciences*, 2020, no. 6, pp. 46–56 (in Russian). 
- [5] I. V. Prangishvili, V. S. Podlazov, G. G. Stetsyura. *Local Microprocessor-Based Computer Networks*, Nauka, M., 1984 (in Russian), 176 pp.
- [6] G. G. Stetsyura. “A new method to build memory devices”, *Proceedings of the Academy of Sciences*, **132**:6 (1960), pp. 1291–1294 (in Russian). 
- [7] A. D. Falkoff. “Algorithms for parallel-search memories”, *Journal of the ACM*, **9**:4 (1962), pp. 488–511. 
- [8] M. Bosiljevac, J. Downing, D. Babić. “Reaching <100 ppm/K output intensity temperature stability with single-color light-emitting diodes”, *Applied Optics*, **55**:32 (2016), pp. 9060–9066. 