

УДК 004.272.45

 10.25209/2079-3316-2024-15-4-3-26

Синхронное взаимодействие распределенных неупорядоченных цифровых объектов

Геннадий Георгиевич **Стецюра**[✉]

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

✉ gstetsura@mail.ru

Аннотация. Предложены методы быстрой синхронизации взаимодействия неупорядоченных активных распределенных цифровых объектов, объединенных в группы. Неупорядоченные объекты (не использующие адреса или другие индивидуальные признаки) заменяют обращение к отдельным объектам по адресам наборов признаков. Любому количеству объектов доступен одновременный обмен сигналами и сообщениями с любым количеством объектов. Перевод объектов в синхронное состояние выполняется однократно, посылкой объектами единственного сигнала синхронизации, и затем поддерживается в течение заданного времени. Основной вид связей между объектами – беспроводные каналы, с передачей по ним оптических или радиосигналов. Нарушение синхронизации объекты восстанавливают собственными действиями. Объекты могут быть стационарными и мобильными. Основные особенности структуры связей объектов – одновременная видимость состояния всех объектов любым объектом группы и одновременная доставка на вход любого объекта сообщений группы объектов с побитной синхронизацией.

Ключевые слова и фразы: реактивность, однократная синхронизация, распределенное управление, распределенная обратная связь, неупорядоченные цифровые объекты, безадресные операции, ассоциативное взаимодействие

Для цитирования: Стецюра Г. Г. *Синхронное взаимодействие распределенных неупорядоченных цифровых объектов* // Программные системы: теория и приложения. 2024. Т. 15. № 4(63). С. 3–26. https://psta.psisras.ru/read/psta2024_4_3-26.pdf

Введение

В статье рассмотрено взаимодействие объединенных в группы цифровых объектов. Объекты неупорядоченные (не используют адреса) и взаимодействуют с указанием признаков, характерных для объекта или кластера объектов; требуют быстрой реакции на незапланированные события с одновременным совместным синхронным ответом на них всей группы объектов.

Такие характеристики востребованы в распределенных управляющих системах и тех вычислительных системах, где по характеру задачи отдельная операция выполняется с одновременным обращением к множеству объектов, выделяемому по их состоянию в текущий момент – частично для задач типа Dataflow, задач ассоциативного взаимодействия и многих других задач, применяющих эвристику. Отказ от применения адресов естественен также для взаимодействия простых устройств – датчиков, исполнительных механизмов, если их состав переменный и требуется получать сведения не о состоянии устройства, а о состоянии неизвестного в текущий момент места его расположения. Характерная для указанных выше задач непредвиденность очередных шагов процесса обработки данных и недопустимость его задержки – основные их отличия от чисто вычислительных задач, и в статье учтена внесением существенных изменений в структуры взаимодействия объектов и в способы управления взаимодействием объектов.

В статье рассмотрены два вида синхронизации – одноканальная синхронизация (ОС) и периодическая синхронизация (ПС). В ОС перевод объектов в синхронное состояние выполняется однократно, посылкой объектами единственного сигнала синхронизации, что существенно ускоряет переход группы асинхронных объектов в синхронное состояние.

Выполнение ОС запускает ПС, которая поддерживается в интервале времени, достаточном для выполнения небольших фрагментов задачи с последующим перезапуском ПС с помощью ОС. Сочетание двух видов синхронизации позволяет объектам уменьшить затраты времени на переход в синхронное состояние, сохранять синхронность и не нарушать ее при входе новых объектов в действующую систему.

В статье также приведены способы выполнения в системе распределенных групповых операций, позволяющих неупорядоченным объектам одновременно оценить и изменить состояние всей группы объектов (в указанных выше областях часто требуется взаимодействовать не с отдельными объектами, а с группой в целом).

Ранее автором в статьях [1, 2] были предложены методы быстрой синхронизации взаимодействия в группах объектов, но в них объекты в отличие от новой статьи упорядочены. В [1] структура связей объектов

неоднородна – добавлены специальные объекты-ретрансляторы сигналов, через которые обмениваются сигналами объекты группы. Для достижения высокой точности синхронизации объекты стационарные.

В [2] объекты упорядочены, как и в [1], но структура связей однородна – объекты обмениваются сигналами по прямым связям между собой без ретрансляторов. Структура связей намного проще, объекты могут быть мобильными, но точность синхронизации ниже.

В предлагаемой статье решения статей [1, 2] взяты за основу, но область применения решений расширена включением неупорядоченных объектов, что потребовало изменить способы взаимодействия объектов. Из [1] взята приведенная ниже на рисунке 1 структура связей, в которой каждый объект одновременно взаимодействует со всеми объектами, и во время передачи сообщений их содержание обрабатывается без задержки в простых средствах взаимодействия объектов без привлечения компьютеров. Время такой обработки для приведенных ниже операций не зависит от количества участвующих в ней объектов (см. раздел 6). Участие сетевых средств в обработке данных – основная причина желательного ограничения расстояний между объектами.

Предыдущий абзац объясняет, почему в статье вместо обычного термина «связь» используется «взаимодействие» – в процессе передачи сообщений данные в них обрабатываются.

В основной структуре связей (см. рисунок 1) гибко повышена отказоустойчивость – для устранения одновременных m отказов в каналах связи между любыми объектами достаточно в любом месте структуры иметь только m резервных каналов, так как структура позволяет в микросекундном диапазоне изменить все связи объектов.

Требуемые в статье технические средства известны, взяты из авторитетных публикаций в Интернете, подтверждены в них экспериментально, возможность получения высокой точности синхронизации подтверждает международный стандарт [6, 8]. Несколько необычно, что требуемые в статье технические средства используются во многих областях, но не обнаружено их применение в области компьютеринга.

В разделе 1 статьи приведена структура связей в группе объектов и процесс одноканальной синхронизации объектов; в разделе 2 приведены способы расширения набора средств синхронизации объектов; в разделе 3 – формирование команд управления группой объектов; в разделе 4 – периодическая синхронизация; в разделе 5 – синхронизация воздействия объектов на внешнюю среду, синхронизация объектов в однородных системах, синхронное взаимодействие простых неупорядоченных объектов; в разделе 6 рассмотрены распределенные групповые операции; в разделе 7 дан пример многоэтапного взаимодействия неупорядоченных

объектов; в разделе 8 рассмотрено отрицательное влияние закона Амдала на выполнение безадресного взаимодействия объектов и его уменьшение применением разработанных в статье способов взаимодействия объектов.

1. Структура связей в группе неупорядоченных объектов, процесс одноканальной синхронизации

1.1. Структура связей в группе объектов

В качестве основной структуры связей выбрана дающая наиболее точную синхронизацию неоднородная структура связей в группе объектов, показанная на рисунке 1.

В структуре каждый объект может одновременно получить двоичные сообщения о состоянии любого набора включенных в структуру объектов с побитной синхронизацией сообщений. Объекты объединяются через ретрансляторы сигналов, не содержащие логические элементы. Каждый ретранслятор одновременно объединяет произвольное количество объектов источников и приемников сообщений.

Для получения наибольшей точности синхронизации и, как следствие, повышения скорости взаимодействия объектов неоднородная структура содержит только стационарные объекты, и ретрансляторы, обменивающиеся оптическими сигналами. В отличие от объектов ретрансляторы упорядочены.

Для взаимодействия объекты посылают сигналы ретранслятору и получают от него сигналы, отличающиеся по частоте от отправленных к ретранслятору. Количество ретрансляторов может отличаться от количества объектов.

На рисунке 1 каждый объект O это компьютер или физический объект, содержащий компьютер. Здесь O_i и O_k два произвольных объекта

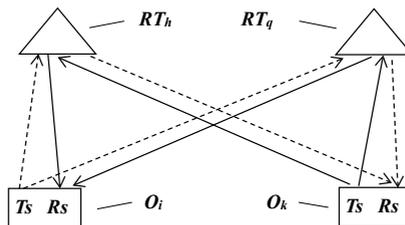


Рисунок 1. Структура взаимодействия объектов в сети ЖРВ

из N объектов структуры, RT_h и RT_q – произвольные ретрансляторы из группы ретрансляторов RT . (Далее, по возможности, будем опускать нижние индексы в обозначении ретранслятора из группы RT .)

Каждый объект может выполнять совместно функции объекта-источника (Os) и объекта-приемника (Or) оптических сигналов. В Os и Or имеются передатчик Ts и приемник Rs оптических сигналов. Если объект действует как Os , то его Ts передает в RT сигналы сообщения. Необязательно, но допускается возврат сигналов из RT в Rs данного Os . Если объект действует как Or , то его Ts передает в RT непрерывный сигнал, который RT возвратит в Rs модулированным сигналами источника, пославшего сообщение в RT .

Функции взаимодействия объектов достаточно просты, чтобы их выполняли интерфейсные карты (КИ). В каждой КИ вместе с Ts и Rs находится коммутатор сигналов, связывающий источник и приемник объекта с любыми ретрансляторами из группы RT . Коммутаторы кратко описаны ниже.

Рассмотрим детали функционирования ретранслятора. Ретранслятор содержит ретрорефлектор (катафот), который поступающий в него сигнал от любого объекта возвращает этому объекту. Входящий сигнал ориентирован на ретрорефлектор ретранслятора. Для приема сообщения приемник должен послать в ретрорефлектор выбранного им ретранслятора непрерывный сигнал на частоте $*f_1$ для приема единицы и $*f_0$ для приема нуля. Источник в этот ретранслятор посылает сообщение двоичными сигналами: единицу объект-источник передает оптическим сигналом на частоте f_1 , ноль – на частоте f_0 .

Ретранслятор принимает эти сигналы источника, переводит их в электрические сигналы и модулирует ими соответственно непрерывные сигналы $*f_1$, и $*f_0$, отправляя этим сообщение приемнику. Одновременно через ретранслятор может взаимодействовать группа источников и приемников. Разница в частотах f и $*f$ позволяет объектам Or принимать сигналы только от ретрансляторов без помех от источников Or .

Замена группы источников сигналов единственным вторичным источником – RT позволяет точно синхронизовать одновременный обмен сигналами между группой источников и группой приемников сигналов. Если одноименные разряды сообщений, посылаемых группой объектов-источников группы, поступят в RT одновременно, то так объединенное сообщение из RT поступит во все объекты-приемники как единое сообщение. Будет показано, что точность синхронизации разрядов объединяемых сообщений, не зависит от расположения объектов и RT и позволит создать ряд быстрых распределенных групповых операций.

Коммутаторы под управлением объектов выбирают ретрансляторы, в которые объекты в текущий момент должны передать сообщения и от которых приемники примут сообщения. При наличии нескольких Ts и Rs в объекте он может одновременно обмениваться сообщениями с группой RT .

Показанная в статье на рисунке 1 структура относится только к наиболее быстродействующим системам. Менее быстрые системы могут быть однородными и их объекты будут взаимодействовать без ретрансляторов. Необходимые в структуре оптические ретрансляторы с ретрорефлекторами и коммутаторы применяют в ряде областей, например, в средствах связи [3, 4], но не применяют в компьютерах. Поэтому кратко изложим принцип работы этих устройств.

Основное свойство ретрорефлектора – отражать входящий световой сигнал к его источнику. Широко используются два вида ретрорефлекторов – на основе отражающей свет призмы и шаровой линзы («кошачий глаз»). Принцип работы ретранслятора с ретрорефлектором, содержащим отражатель-призму, иллюстрирует рисунок 2. На рисунке 2а объект-



(а) применяемый в системах связи (б) модификация, требуемая в статье

Рисунок 2. Ретранслятор

источник, от которого объект-приемник должен получить сообщение содержит ретрорефлектор с призмой (2), возвращающей приходящие в нее от приемника непрерывный оптический сигнал опроса (1) к приемнику. Объект-источник электрическим сигналом (4) посылает сообщение на управляемый сигналом (4) светофильтр (3), покрывающий задние стенки призмы. Фильтр отражает сигнал приемника только при приходе на фильтр сигнала (4), соответствующего двоичной единице в возвращаемом ретрорефлектором приемнику сообщении.

На рисунке 2б обычной конструкции добавлены только позиции 5 и 6. Здесь от произвольного приемника света R_s поступают два непрерывных сигнала на частотах f_1 и f_0 для приема в сообщениях источника единицы и нуля соответственно. Но теперь ретранслятор – отдельное устройство, не связанное с объектом-источником. Источник расположен удаленно от ретранслятора и передает сообщение, в котором двоичная единица и ноль передаются оптическими сигналами на частотах f_1 и f_0 (позиция 5). Эти сигналы ретрорефлектор ретранслятора направит в фотоприемник (6), преобразующий их в электрические сигналы (4),

направленные на фильтр (3). Последний модулирует ими непрерывные сигналы приемника, превращая их в сообщении.

Ретранслятор будет полностью пассивным устройством, если приемники пошлют дополнительно световой сигнал для снабжения ретранслятора энергией.

В объектах можно применять два вида коммутаторов оптических сигналов с разным временем переключения направления передаваемых объектами сигналов.

Первый вид коммутатора применяет распространенные микроэлектромеханические системы (MEMS), содержащие большие группы микрозеркал. Каждое зеркало электрически управляемо, переходит в новое положение и сохраняет его до получения нового сигнала управления. В типичном MEMS зеркала имеют два положения, активное и пассивное. Световые сигналы от источника поступают на коммутатор, в нем активное зеркало направит сигналы на соответствующий ему ретранслятор, который, как показано выше, обеспечивает связь с приемниками сигналов.

Аналогично действуя, коммутатор приемника направит его непрерывный сигнал в RT . Принятый коммутатором приемника от RT сигнал поступает в фотоприемник сигнала.

В основном, в разных реализациях переключение зеркал выполняется за интервал времени порядка микросекунды.

Второй вид коммутатора использует группы оптических микролазеров, сигналы каждого из них направляются в *фиксированном направлении* к требуемому ретранслятору. В коммутаторе также каждому ретранслятору соответствует фотоприемник. Выбор объектом требуемого ретранслятора выполняется в наносекундном диапазоне [5].

Описание структуры, связывающей скоростные объекты, завершено. Подчеркнем, структура позволяет любому объекту одновременно получать на свой единственный вход (возможно многозарядный) данные от группы объектов. Результаты следующих разделов 1.2 и 1.3 позволяют побитно синхронизовать приходящие сообщения.

Отметим наиболее важные особенности, приведенной в разделе структуры связей. Структура позволяет объекту одновременно и побитно синхронно получать сообщения от многих объектов. Структура связей может быть в микросекундном диапазоне полностью перестроена посылкой команды одновременно группе объектов. Объект-источник непосредственно не посылает сообщение объекту-приемнику – оба объекта в динамике выбирают ретранслятор для связи. Это позволяет экономно повышать отказоустойчивость системы: при наличии m одновременных отказов в произвольных каналах связи достаточно иметь только m произвольно расположенных резервных ретрансляторов. Отсутствие непосредственной

связи источников с приемниками необходимо, как будет показано, для быстрого сбора данных о состоянии совокупности объектов. Это существенно для распределенных многокомпонентных систем управления и систем с большой неопределенностью в продвижении обработки данных, например, при ассоциативном поиске, во многих задачах с эвристикой, при заранее неизвестном месте и времени получения промежуточных результатов вычисления. Детали приведены далее в статье.

Кратко рассмотрим процесс однократной синхронизации взаимодействия объектов.

1.2. Запуск процесса однократной синхронизации

Изложение следует статье [1], термин – однократная синхронизация (ОС) применен по следующей причине. Каждому объекту из п. 1.1 для синхронного взаимодействия через общий ретранслятор с другими объектами группы достаточно послать *единственный сигнал* s , длительности не менее T – времени переноса сигналов s между наиболее удаленными от RT объектами группы и RT , выбранным для взаимодействия объектов. Передача сигнала s разрешена, если объект не получает от других объектов группы любые сигналы в течение интервала времени T . Действия объектов иллюстрирует рисунок 3.

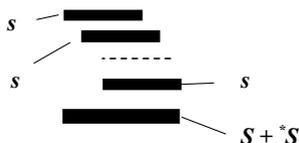


Рисунок 3. Формирование сигналов S и $*S$

Здесь группа из n объектов посылает в ретранслятор в разные моменты времени в пределах T импульсные сигналы s одинаковой длительности $T_0 \geq T$. Частично совмещаясь во времени, эти сигналы создают единственный общий сигнал S . Момент завершения импульсного сигнала S воспринимается объектами как сигнал $*S$ начала синхронных действий объектов. При выполнении условия $T_0 \geq T$ любые два сигнала s поступят к любому объекту, хотя бы частично совмещаясь во времени, и сигналы S и $*S$ будут единственными.

Каждый объект интервал времени от обнаружения начала сигнала S до его завершения $*S$ использует для подготовки к следующим действиям.

Получение сигнала $*S$ объекты в следующем разделе используют как общий сигнал перехода к синхронному выполнению совместных действий.

1.3. Завершение входа объектов в синхронное состояние

Получив сигнал $*S$, объекты должны определить удаленность от RT , что позволит им синхронизовать передачу сигналов так, чтобы сигналы, соответствующие одноименным двоичным разрядам сообщений, поступали в RT в точно контролируемые моменты времени. Удаленность от RT объекты могут определить с ошибкой менее пикосекунды, применяя новые известные методы измерения расстояний. Эти методы были разработаны усилиями многих коллективов для точной синхронизации физических экспериментов в ЦЕРН (CERN) и в 2019 оформлены в виде международного стандарта. Методы подробно изложены в статьях [6–8], и далее используются без изменений.

В стандарте [6–8] удаленность объектов определяется поочередно вне процесса выполнения текущей задачи. Объекты при отсутствии адресов будут выбирать очередной объект по его отличительным признакам операцией \max или \min (см. раздел 3.1), добавляя к признаку случайные числа при неоднозначном результате выбора. Определив удаленность от RT объект определяет момент начала передачи сообщения в RT .

Вводится единственный фиктивный объект O^* , расположенный от RT дальше любого объекта системы. Для согласования отправки своих сигналов в RT любой объект O_i посылает сообщение или одиночный сигнал с задержкой $D = 2(T^* - T_i) + \alpha$, где

- T – интервал времени доставки сигнала в RT от объекта O^* ,
- T_i – интервал времени доставки сигнала в RT от любого объекта O_i ,
- α – произвольный сдвиг времени.

Вначале положим $\alpha = 0$. Задержка $D = 2(T^* - T_i)$ учитывает время, требуемое сигналам любых объектов поступить в RT одновременно – группой объектов в RT будет создано одно короткое сообщение с наложением сигналов от одноименных разрядов в сообщениях объектов.

Варьируя α , объект при необходимости вносит дополнительный сдвиг прихода сигнала в RT . В результате в RT будет создано общее сообщение, состоящее из упорядоченных во времени сообщений объектов. Порядок передачи сообщений определяют объекты. Приемники сигналов RT определяют свою удаленность во времени от RT , вычисляя D^* подобно D , что позволяет им, получив сообщение источников, выполнять требуемые действия одновременно. Если объекты-приемники должны инициировать действия других объектов, то приемники действуют как источники и пошлют свои сообщения другим объектам-приемникам и т.д.

Однотактная синхронизация (ОС) выполнена с точностью синхронизации, не зависящей от T . В однородных системах, не имеющих RT , разброс во времени начала синхронизации объектами достигает $T = L/c$, где

L – максимальное расстояние между объектами,
 c – скорость света.

Отметим, что группа источников имеет возможность одновременно синхронно послать сообщение группе приемников, только используя RT – единственный источник-посредник.

1.4. Области применения однократной синхронизации

Наиболее широко применяемый в многих областях вид синхронизации состоит в многократных малых взаимных воздействиях, завершающихся переходом объектов в длительно поддерживаемое синхронное состояние. Но в разделе 1.2 ОС запускается единственным сигналом, созданным без внешней поддержки множеством синхронизируемых объектов. Основная задача ОС – *однократный* запуск во всей группе объектов известного объектам однократного действия, не требующего длительного сохранения объектами периодической синхронизации (ПС). ОС используется для разных применений во всех разделах статьи. Синхронно выполнить группой объектов однократное действие требуется очень часто, в том числе в областях далеких от техники. В статье ОС достигается достаточно простыми средствами, что делает ее доступной и вне техники. В качестве примера приведем очень известную задачу синхронизации цепи стрелков [9].

Это вариант модели одновременного запуска всех частей самоорганизующейся системы, например, группы биологических объектов. Командир посылает в цепь стрелков одному из стрелков (граничному в цепи) команду всем выстрелить одновременно. Стрелок передает команду непосредственному соседу и т.д., т.е. здесь все объекты – вариант клеточных автоматов с близкими связями. В известных решениях после нескольких волн передачи команды по цепи (не меньше 9) объекты синхронизованы и одновременно стреляют. Опубликовано много вариантов решения этой актуальной для биологии задачи.

Применение ОС расширяет задачу и ускоряет ее решение: командира нет, стрелки расположены произвольно. Некоторые стрелки, обнаружив цель, посылают всем стрелкам, без посредников, приведенные выше сигналы s длительности, не меньшей T . Сигналы объединяются в общий сигнал S . В момент его завершения $*S$ стрелки стреляют. Затрачено время не больше $2T$. В однородной системе (без RT) возможен разброс в выстрелах не больше T , в неоднородной системе разброса нет.

Таким образом, не требующую вычислений ОС выполняют очень простые объекты.

В разделе 4 статьи показано применение ОС для часто востребованного запуска ПС, поддерживаемой в небольшом интервале времени, достаточном для выполнения сложных операций в скоростных системах. Как видно, ОС может быть использована широко.

2. Расширение набора средств синхронизации объектов

2.1. Создание сигнала о завершении объектами асинхронных действий

Синхронизация необходима не только в начале совместных действий объектов посылкой сигналов S и $*S$, но и для быстрого оповещения о завершении объектами совместной синхронной или асинхронной работы. Для этого используем модифицированный вариант формирования сигналов S и $*S$, показанный на рисунке 4.



РИСУНОК 4. Завершение асинхронных действий группой объектов

Объекты используют дополнительный канал и выполняют следующие два шага.

Шаг 1. Каждый объект, начиная совместные с другими объектами действия, посылает всем объектам сигнал U , подобный сигналу S . Передача его будет выполняться в отдельном канале (например, на выделенной частоте) и длится до завершения объектом его части совместных действий.

Будем считать, что, подобно сигналу S длительность U не может быть меньше T . Это обеспечивает, как и для S , единственность сигнала U . Завершив свою часть совместных действий, объект переходит к шагу 2.

Шаг 2. Объект прекращает передачу своего сигнала U и ожидает появления сигнала $*U$ – момента завершения сигналов U , посланных всеми источниками. Подобно сигналу $*S$ сигнал $*U$ единственный. Получив $*U$, объекты синхронно фиксируют завершение этапа совместных действий.

2.2. О выборе объектами каналов взаимодействия

В разделах 1.2 и 2.1 группы объектов в двух *известных заранее* каналах применили сигналы $*S$ и $*U$ для децентрализованной реакции на заранее не планируемые асинхронные действия объектов – синхронизацию действий источников сообщений и определение момента завершения асинхронных операций. Аналогично можно реагировать на другие виды непредвиденных событий при организации исходной структуры связей или в пределах выполняемого алгоритма.

Но в общем случае следует предоставить объектам возможность управлять выбором каналов взаимодействия – источнику для связи

с объектами-приемниками требуется посылать сообщения в регранслятор, за которым следят приемники. Для этого при *исходном формировании системы* всем объектам сообщается адрес *системного RT*, за которым они должны следить, постоянно или в заданном интервале времени. При создании нового кластера объектов адрес кластерного *RT*, подобного адресу системного *RT*, объекты получают от системного *RT*, куда его направит объект, создающий кластер. Далее, при работе в пределах кластера общую для кластера информацию объекты получают от кластерного *RT*. Так как системный *RT* должен быть доступен всем объектам, то его сигналы для упрощения коммутаторов объектов могут быть ненаправленными.

Замечание к разделу 2.2. Если объекты не упорядочены, а позиции расположения *RT* нумерованы, то *RT*, связанный с кластером или отдельным объектом может во многих случаях служить их адресом.

2.3. Способ упорядочения действий объектов

Для объектов, имеющих порядковые номера (адреса) в [1, 2] применяются логические шкалы (или просто шкалы) – последовательности двоичных разрядов, каждый из которых соответствует одному из нумерованных объектов. Если объектам требуется передать сообщения в *RT* одно за другим, то вначале они синхронно с совмещением одноименных разрядов передают в *RT* свои шкалы, содержащие нули и только в одном разряде, соответствующем объекту, единицу. От *RT* объекты получают общую шкалу с группой единиц и, учитывая только единицы, упорядочат передачу сообщений.

При отсутствии адреса он заменяется набором из признака объекта с добавлением случайного числа с обработкой набора операцией \max/\min (см. раздел 1.3).

3. Формирование команд управления группой объектов

В разделе рассмотрены идентификация объектов посредством шкал с набором признаков объекта и формирование команд управления группой объектов кластера.

3.1. Идентификация объекта логической шкалой с набором признаков

Рассмотрим взаимодействие группы объектов, в которой вместо адреса объекта используется набор характеризующих объект признаков. Набор признаков будет представлен логической шкалой (для краткости шкалой), частный случай которой введен в разделе 2.3. Шкала состоит из последовательности двоичных разрядов, каждому разряду поставлен в соответствие один из признаков, характеризующих объект, его текущее состояние или

состояние окружающей объект среды. Для взаимодействующих объектов признаки в разряде их шкал имеют одинаковое значение. В разряде шкалы объект отмечает наличие и отсутствие соответствующего разряду признака двоичной единицей и нулем и передается в структуре связи сигналом частоты f_1 и f_0 соответственно.

Требуется выделять из общей группы объектов отдельные объекты или их кластеры с идентичными запросу шкалами, что достигается следующим вариантом не требующей вычислений распределенной операции \max из [1, 2]. Объекты передают свои шкалы признаков в RT синхронно побитно, начиная со старшего разряда. Каждый следующий разряд шкалы передают только объекты или объект, пославший единицу в предыдущем разряде. В результате будет выделен кластер объектов с одинаковым набором признаков. Аналогично, с заменой единицы на ноль выполняется операция \min . Приведенная операция входит в состав распределенных групповых операций из раздела 6. При использовании адресов аналогично выделяются максимальный и минимальный адреса (см. раздел 1.3).

Таким образом, здесь адресный обмен сообщениями заменяется безадресным обменом, который в разделе 3.2 применен для создания безадресных команд управления объектами.

3.2. Формирование безадресных команд управления группой объектов кластера

При выработке *группой* источников общей команды для задания действий *группе* приемников потребуются источникам предварительно, взаимодействуя между собой, сформировать такую команду, состоящую из трех блоков. В блоке (B_1) объектами будет указана наиболее значимая из команд. Во втором блоке (B_2) объекты указывают набор признаков объектов, которым направляется команда. В третьем блоке (B_3) подобно (B_2) формируется набор признаков коллектива источников сообщения.

Быстрое решение для создания первого блока (B_1) следующее. Имеется упорядоченный по уменьшению значимости согласованный список команд. Порядковые номера в списке возрастают. Цифры номеров, заданные в системе счисления с произвольным основанием, представлены шкалами. Каждый объект выбирает порядковый номер рекомендуемой им команды и синхронно с остальными объектами передает выбранный номер, выполняя при передаче операцию \min (раздел 3.1). Тогда в B_1 будет объектами выбрана наиболее значимая команда.

(Увеличение основания системы счисления сокращает количество необходимых обменов сообщениями между объектами, а значит время наиболее затратной части операции \min .) Итак, первый блок (B_1) содержит код выбранной из списка команды. Считаем известными до отправки

команды объектам наборы признаков коллектива объектов, которому направляется команда. Этот набор помещается во втором блоке (B_2). В третьем блоке (B_3) подобно (B_2) формируется набор признаков коллектива источников сообщения. В результате совместного применения трех частей каждый объект-приемник в кластере выполнит реакцию на поступающую команду. В блоках B_2 и B_3 вместе с набором признаков, могут указываться адреса ретрансляторов.

Таким образом, в разделе 3.2 объекты заменили команды с неизвестными им адресами объектов командами с признаками и адресами ретрансляторов.

4. Периодическая синхронизация (ПС)

4.1. ПС с постоянным составом объектов и задач в цикле синхронизации

В этом разделе ПС выполняется для систем, имеющих RT . ПС запускается выполнением ОС и сохраняет синхронность взаимодействия объектов в течение заданного интервала времени, достаточного для выполнения последовательности операций, обычно небольшой.

Находящиеся в ПС объекты посылают другим объектам синхросигналы с эталонным циклом Θ длительности обычно значительно больше T ; имеют внутренний механизм поддержки синхронизации – таймер. Запуск ПС объекты выполняют в связке: действует ОС, которая запускает ПС, длящуюся в течение цикла Θ или до получения команды выхода из ПС. Находящийся в ПС объект передает синхросигнал в конце цикла Θ и для продолжения ПС запускает ОС.

Считается, что в пределах Θ таймеры сохраняют синхронность, действия объектов полностью согласованы, и объекты в пределах Θ взаимодействуют синхронно.

Возможен вариант, при котором в цикле Θ объекты выполняют асинхронную работу и должны передать другим объектам результат синхронно по битам в заданном интервале $\Delta\Theta$ перед завершением Θ . Результат может быть получен раньше этого интервала, но объекты-приемники, которые ожидают результат, должны его получить от RT с указанной синхронностью. Источники определяют момент получения результата самостоятельно, используя сигналы U из раздела 2, или посылая сигналы в заранее известный момент времени завершения объектами всех ожидаемых асинхронных работ.

Выше предполагалось, что в пределах цикла Θ состав объектов и задач не изменяется. Сделаем исключение для критического события, требующего срочной реакции объектов.

В этом случае выполнение объектами в ПС задачи немедленно прекращается, состояние объектов сохраняется, и начинается новый цикл Θ выполнения объектами поступившей новой задачи. После завершения внеочередной задачи прерванная задача продолжается. При большой разнице между T и Θ ускорение существенное.

4.2. ПС с переменным составом объектов и задач в цикле синхронизации

Предположим, что в пределах Θ может быть синхронно выполнено несколько задач с разным составом объектов. Для такой ситуации разделим цикл Θ на этапы Ψ меньшей длительности, известной участникам цикла заранее. Тогда объекты в пределах одного этапа Ψ будут действовать подобно их действиям в цикле Θ , но для перехода к следующему этапу Ψ не требуется выполнять ОС.

Подобно действиям в цикле объекты-приемники получают результаты от RT синхронно до завершения этапа Ψ . Этот момент источники определяют по показаниям таймера. Затем начнется новый этап Ψ , будет сформирована новая группа участников, действующая подобно действиям объектов на предыдущем этапе, Отсутствие ОС ускорило смену Ψ .

Замечание к разделу 4. Рассмотренная в разделе периодическая синхронизация может рассматриваться как вариант только однотактной синхронизации с включением в объекты таймеров. Таймерам задается ритм, поддерживаемый в небольшом интервале времени. Таймеры в объектах запускают сигналы s , которые объединяются в сигнал S и сигнал $*S$ запускает ОС, т.е. объектам дается разрешение взаимодействовать с учетом точности их средств синхронизации. Затем возникает пауза и новый цикл ОС.

5. Дополнительные виды взаимодействия объектов

5.1. Синхронизация воздействий объектов на внешнюю среду

Если система объектов действует как система управления, то от нее требуется быстрая реакция на непредвиденные внешние события, возможно с воздействием объектов-исполнителей на среду и источники событий. Исполнители часто не отличаются от рассмотренных выше обычных приемников сообщений и команд и применяют обратную связь с источниками для коррекции последовательности своих воздействий на среду.

Однако при взаимно удаленных группах объектов источников и исполнителей команды допустима форма связи источников команд с воздействующими на среду исполнителями.

Пусть первая из групп подключена к ретранслятору RT_1 , вторая – к RT_2 , удаленному от RT_1 и соединенному с RT_1 линией связи. Источники посылают в RT_1 команду для удаленных исполнителей. При удалении на произвольное расстояние исполнители, *не уменьшая точность взаимной синхронизации*, выполняют команды источников.

5.2. Синхронное взаимодействие объектов в однородных системах

В однородных системах ретранслятор отсутствует, и это снижает точность синхронизации объектов и скорость выполнения распределенных операций с одновременным участием в операции группы объектов. Замедление весьма существенное: интервал времени при передаче соседних битов *в операндах объектов-участников распределенной операции* не должен быть меньше $T = L/c$, где L – максимальное расстояние между объектами, c – скорость света. В остальных случаях отличия незначительные. Например, при обычной передаче сообщения после выделения источника сообщения он передает сообщение со скоростью, ограниченной только технологическими возможностями оборудования.

Устранить замедление в $T = L/c$ и при этом не использовать сложную неоднородную структуру из раздела 1 позволяет следующая упрощенная неоднородная структура. В ней применен единственный ретранслятор, который вместо ретрорефлектора содержит приемник и источник ненаправленных сигналов. Источники объектов посылают приемнику ретранслятора единицы и нули сообщений ненаправленными сигналами частот f_1 и f_0 , а ретранслятор передает без задержки эти сообщения всем объектам также ненаправленными сигналами частот $*f_1$ и $*f_0$. Разные диапазоны частот f и $*f$ исключают в объектах помехи принимаемым сигналам от передаваемых объектами сигналов.

Пропускная способность по сравнению с приведенной выше неоднородной системой много ниже, но распределенные операции выполняются без задержки, возникающей в полностью однородных системах. В рассмотренной упрощенной системе может применяться и единственный ретранслятор с ретрорефлектором, а источники и приемники сообщений будут обмениваться с ретрорефлектором ненаправленными сигналами.

5.3. Особенности взаимодействия простых неупорядоченных объектов

Простыми будем считать объекты с очень ограниченными вычислительными или управляющими средствами, например, датчики и исполнительные механизмы. Простые объекты часто объединены в группы большого, переменного и неизвестного заранее состава. Обращаться к группам таким объектам быстрее по набору параметров объектов, чем перечисляя их адреса.

Часто важны не адрес или текущее состояние параметров объекта, а параметры места его расположения. Также часто требуется определять количество объектов с идентичным набором параметров и имеющих предельные отклонения в этих параметрах. Решения статьи позволяют взаимодействовать объектам, указанным выше.

6. Распределенные групповые операции

В разделе приведены распределенные групповые операции, примененные ранее автором в [1, 2]. Основная их особенность состоит в одновременной, синхронной по разрядам обработке обрабатываемых операцией данных, поступающих от группы объектов. Приведены следующие операции: поразрядные логические операции, выделение в группе чисел с максимальным и минимальным значением, аналого-цифровые сложение и вычитание. Вся распределенная часть операций выполняется в *RT*, не содержащем логические элементы.

Поразрядные логические операции AND, OR, XOR, логическое «НЕ». Каждый объект-участник этих операций использует шкалу набора признаков. Разряды шкалы соответствуют логическим признакам, характеризующим состояние объекта. Если признак у объекта присутствует, то объект заносит в разряд шкалы единицу, иначе – ноль. Шкалы объекты синхронно по разрядам направляют в *RT*, представляя единицу сигналом частоты f_1 и ноль – сигналом f_0 . В *RT* одноименные двоичные сигналы смешиваются и направляются связанным с *RT* объектам. Если в группе поступающих в *RT* одноименных разрядов шкал присутствуют нули и единицы, то приемники в этом разряде получают от *RT* смесь сигналов f_1 и f_0 – третье состояние.

Над общей шкалой каждый объект-приемник выполнит логические групповую операцию. Если объект выполняет поразрядную операцию *AND*, то для конкретного разряда ее 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. Значение логического «НЕ» при поступлении f_1 равно нулю, при f_0 – единице, при поступлении f_1 и f_0 не определено.

Поиск в массиве чисел максимального и минимального числа. Введем шкалами 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 нули 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. Такое представление цифр ускоряет поиск \max и \min по сравнению с поиском в двоичной системе: потребуются пересылать меньшее количество более длинных шкал. Именно количество шкал, а не их разрядность в распределенной группе объектов замедляет операции. Каждую цифру-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 .

Операции суммирования/вычитания многих чисел обычно требуют выполнить поочередно цепочку двухкомпонентных операций. Такие действия можно выполнить в структуре рисунок 1, формируя необходимую цепочку связей для объектов-участников операции. Небольшое ускорение дает при этом передача шкал для чисел, представленных в системе счисления с основанием больше двух. Однако во многих задачах распределенного управления и задачах с эвристикой операции суммирования/вычитания выполняются быстрее и проще при существенном ограничении: современные технологии позволяют одновременно участвовать в операции не более 10^4 объектам.

При допустимости указанного ограничения применим аналого-цифровые операции суммирования и вычитания к цифрам чисел, представленных шкалами [1, 2]. Для этого добавим в RT аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Он переведет уровень энергии одновременно приходящих в RT сигналов в число. Способ создания требуемых выше стабильных по энергии сигналов показан в [10].

Рассмотрим пример: в RT приходят шкалы группы цифр одного из разрядов десятичных чисел, принятых от объектов. Каждая шкала содержит только одну единицу, остальные – нули, и в RT создается общая шкала, например, 010110010. Шкала показывает наличие цифр 8, 6, 5, 2 в разряде. Пусть поступило три экземпляра цифры 8, девять – цифры шесть, два – цифры 5 и семь – цифры 2. АЦП преобразует шкалу в последовательность цифр 030920070. Здесь цифры показывают: АЦП получил 3 сигнала для значения цифры 8, 9 сигналов для цифры 6, 2 для 5 и 7 для 2.

Локально каждый объект для суммы цифр в старшем десятичном разряде чисел одновременно выполнит подсчет: $3 \times 8 + 9 \times 6 + 2 \times 5 + 7 \times 2 = 102$. Действуя аналогично с другими цифрами числа, объект вычислит сумму полученных чисел. Передавать разряды чисел в RT объекты могут и в обратном порядке. Для вычитания следует отдельно выполнять в RT суммирование цифр для создания двух операндов и вычитание завершать локально в каждом приемнике.

7. Многоэтапное бездресное взаимодействие объектов (пример)

В разделе приведен пример формирования группой объектов последовательности бездресной обработки данных в системе с ретрансляторами RT . Расположение объектов и RT фиксировано. Ретрансляторам присвоены адреса и коммутаторы их используют, создавая взаимосвязи объектов. На рисунке 5 показана структура, отличающаяся от структуры рисунка 1 тем, что группа ретрансляторов RT и объектов разделена на кластеры с произвольным, изменяемым в субмикросекундном диапазоне времени составом объектов. Здесь RT_a, RT_b, RT_c – три кластера ретрансляторов, O_i, O_j, O_k , – три кластера объектов. Кластеры выделены из единых групп ретрансляторов и объектов, показанных на рисунке 1.

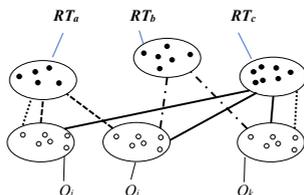


Рисунок 5. Структура многоэтапного бездресного взаимодействия объектов

В полученной структуре любой объект в любом кластере организует синхронную связь с произвольным ретранслятором из любого кластера ретрансляторов. Если коммутатор конкретного объекта позволяет одновременно поддерживать несколько соединений с разными кластерами, то они также реализуются. Всегда поддерживается постоянная связь с системным RT (см. раздел 2.2).

На рисунке 5 ретрансляторы кластера RT_a соединены с кластерами O_i и O_j . Ретрансляторы RT_c соединены с кластерами O_i , O_j и O_k , с O_k установлены два канала. Подобно рисунку 1 в новой структуре все межсоединения объектов могут быть одновременно изменены послышкой объектам общей команды. Взаимодействие объекты выполняют следующими шагами.

- (1) Объекты-источники кластера, создают сигналы S , затем $*S$, разрешая объектам-источникам кластера совместно формировать общую команду, сообщающую другим объектам о RT , выбранных источниками для связи с ними. Сформированная команда будет включать адреса RT для связи с объектами кластера-источника, набор параметров источников, канал барьерной синхронизации и другие служебные функции. Команда поступит к всем объектам во всех кластерах. Теперь приемники могут связываться с объектами кластера-источника через приведенные в команде адреса RT источников. Если адрес RT

источника остается приемнику неизвестным, то приемник выполнит запрос адреса через системный *RT*. Аналогично действуя, сообщает о себе кластеры-приемники.

Такова общая схема информирования объектов системы о способе связи с ними в текущей структуре связей. Она действительна и для структуры рисунок 1.

- (2) Связи, созданные на шаге 1 сохраняются неизменными в течение заданного интервала времени (этапа) и уточняются по этапам без обращения к объектам по адресам. Приведенные действия выполняются без привлечения адресов объектов.
- (3) После завершения в системе решаемой задачи создается приведенным способом новая структура. Структура не может быть создана внешним центром при задании новой задачи, если шаги выполнения задачи не детерминированы, что характерно для задач управления распределенными объектами, задач ассоциативного поиска, эвристических и частично в *Dataflow* при неизвестных в нем моментах времени появления требуемых промежуточных результатов задачи.

8. Уменьшение отрицательного влияния закона Амдала

Закон Амдала оценивает влияние доли последовательных операций (в частности, последовательного обмена через средства связи) на скорость выполнение задач в системах с многими взаимодействующими объектами. Закон выражается формулой $S = 1/(\alpha + (1 - \alpha)/N)$, где

α – доля последовательных (не распараллеливаемых) операций,
 N – количество параллельно обрабатывающих данные процессоров,
 S – ускорение времени обработки данных в зависимости от значений α и N .

Единица в числителе это время выполнения задачи при одном процессоре и отсутствии последовательных операций. В знаменателе $\alpha + (1 - \alpha)/N$ учитывает влияние α и N на величину S .

Если выбрать $\alpha = 0, 1$, то $S = 5, 263$ при $N = 10$; $S = 9, 174$ при $N = 100$ и с ростом N значение S не достигнет 10. С ростом α значение S стремится к единице. Таким образом, на ускорение S в основном влияет α .

Уменьшать α существенно для любых распределенных систем и особенно для распределенных систем управления, в которых для принятия коллективных управляющих решений объекты должны собирать данные о состоянии групп объектов. Для ускорения реакции системы эти данные должен получать каждый объект системы одновременно, что в статье привело к использованию особой структуры связей объектов, быстрых способов управления взаимодействием объектов и к скоростным распределенным групповым операциям.

При отсутствии адресов, как в этой статье, растет неопределенность и, как следствие, нагрузка на средства связи. Поэтому возрастает отрицательное влияние закона Амдала, значительно компенсируемое результатами статьи.

Заключение

В статье предложены структуры связей и методы повышения скорости синхронизации и выполнения ряда видов взаимодействия для распределенных систем, содержащих группы технических объектов, не использующих адреса.

Применение таких структур и методов ориентировано на управляющие и вычислительные системы, решающие задачи управления в жестком реальном времени; задачи ассоциативного поиска; многие задачи с применением эвристики; некоторые задачи типа Dataflow. Второй областью применения методов служат простые датчики и исполнительные механизмы, объединенные в группы большого размера и переменного состава, в том числе с заранее неизвестным количеством объектов.

Предложенные решения во всех разделах применяют однократную синхронизацию, выполняемую посылкой объектами единственного сигнала синхронизации. Однократная синхронизация также запускает переход объектов в периодическую синхронизацию. Для синхронизованных объектов доступен ряд распределенных операций по оценке общего состояния всех объектов системы, которые выполняются в процессе передачи сообщений без его задержки.

Полученные в статье решения реализуются достаточно просто, что позволяет их применять в технических объектах с ограниченными возможностями.

В целом статья повышает скорость входа в синхронизм и реактивность широкого спектра цифровых систем, состоящих из групп неупорядоченных объектов, расширяя этим результаты статей [1, 2].

Список использованных источников

- [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.   ↑4, 5, 10, 14, 15, 19, 20, 23
- [2] Стецюра Г. Г. *Организация взаимодействия активных объектов однородных цифровых структур* // Программные системы: теория и приложения. – 2023. – Т. 14. – № 4(59). – С. 3–23.   ↑4, 5, 14, 15, 19, 20, 23

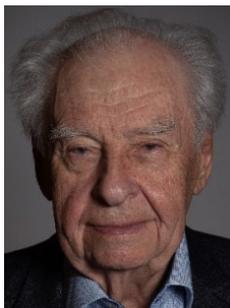
- [3] Rabinovich W. S., Goetz P. G., Mahon R., Swingen L. A., Murphy J. L., Ferraro M., Burris H. R., Moore Ch. I., Suite M. R., Gilbreath G. Ch., Binari S. C., Klotzkin D. J. *45-Mbit/s cat's-eye modulating retroreflectors* // *Optical Engineering*.– 2007.– Vol. **46**.– No. 10.– id. 104001.– 8 pp.  ↑⁸
- [4] Zhu Y., Wang G. *Research on retro-reflecting modulation in space optical communication system*, IOP Conference Series Earth and Environmental Science.– vol. **108**.– No. 3.– 2018.– id. 032060.  ↑⁸
- [5] *Proceedings of the IEEE*.– 2020.– Vol. **108**.– No. 5, Special Issue Active Nanophotonics.– Pp. 613–852.  ↑⁹
- [6] *IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems*, IEEE 1588-2019.– IEEE Instrumentation and Measurement Society.– 2020.  ↑^{5, 11}
- [7] White Rabbit Official CERN website <http://white-rabbit.web.cern.ch/>. ↑¹¹
- [8] Rösel K., Helm M., Zirngibl J., Stubbe H. *Current Developments of IEEE 1588 (Precision Time Protocol)*, Seminar ИТМ WS 20/21, Network Architectures and Services (May 2021).– Pp. 13–17.  ↑^{5, 11}
- [9] Мур Э. *Задача о синхронизации цепи стрелков*, Кибернетический сборник. Новая серия.– т. **1**, М.: Мир.– 1965.– С. 76–77. ↑¹²
- [10] Bosiljevac M., Babić D., Sipus Z. *Temperature-stable LED-based light source without temperature control*, Photonic Instrumentation Engineering III (15 March 2016, San Francisco, CA, USA), Proc. SPIE.– vol. **9754**.– 2016.– id. 975416.– 6 pp.  ↑²⁰

Поступила в редакцию 01.07.2024;
 одобрена после рецензирования 28.07.2024;
 принята к публикации 29.07.2024;
 опубликована онлайн 17.10.2024.

Рекомендовал к публикации

к.т.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.

 0000-0003-4606-4424

e-mail: gstetsura@mail.ru

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



Synchronous interaction of distributed disordered digital objects

Gennady Georgievich **Stetsyura**

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

 gstetsura@mail.ru

Abstract. Methods of fast synchronization of interaction of unordered active distributed digital objects grouped into clusters are proposed. Unordered objects (which do not use addresses or other individual attributes) replace addressing individual objects by addresses with addressing clusters of objects specifying sets of attributes common to such objects. This allows any number of objects to simultaneously exchange signals and messages with any number of objects. Transfer of objects into synchronous state is performed in a single-cycle manner, by sending a single synchronization signal by the objects, and then maintained for a specified time. The main type of communication between objects is wireless channels, with the transmission of optical or radio signals. Violation of synchronization is restored by the objects by their own actions. Objects can be stationary and mobile. The main features of the structure of object connections are simultaneous visibility of the state of all objects by any object of the group and simultaneous delivery of messages from a group of objects to the input of any object with bit synchronization. (*In Russian*).

Key words and phrases: reactivity, single-cycle synchronization, distributed control, distributed feedback, unordered digital objects, addressless operations, associative interaction

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

For citation: Gennady G. Stetsyura. *Synchronous interaction of distributed disordered digital objects*. Program Systems: Theory and Applications, 2024, **15**:4(63), pp. 3–26. (*In Russ.*). https://psta.psiras.ru/read/psta2024_4_3-26.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] G. G. Stetsyura. “The organization of interaction the active objects of homogeneous digital structures”, *Program Systems: Theory and Applications*, **14**:4(59) (2023), pp. 3–23 (In Russ.). 
- [3] W. S. Rabinovich, P. G. Goetz, R. Mahon, L. A. Swingen, J. L. Murphy, M. Ferraro, H. R. Burris, Ch. I. Moore, M. R. Suite, G. Ch. Gilbreath, S. C. Binari, D. J. Klotzkin. “45-Mbit/s cat’s-eye modulating retroreflectors”, *Optical Engineering*, **46**:10 (2007), id. 104001, 8 pp. 
- [4] Y. Zhu, G. Wang. “Research on retro-reflecting modulation in space optical communication system”, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. **108**, 3, 2018, id. 032060. 
- [5] *Proceedings of the IEEE*, **108**:5, Special Issue Active Nanophotonics (2020), pp. 613–852. 
- [6] *IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems*, IEEE 1588-2019, IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2020. 
- [7] White Rabbit Official CERN website <http://white-rabbit.web.cern.ch/>.
- [8] K. Rösel, M. Helm, J. Zirngibl, H. Stubbe. “Current Developments of IEEE 1588 (Precision Time Protocol)”, Seminar IITM WS 20/21, Network Architectures and Services (May 2021), pp. 13–17. 
- [9] E. T. Moore. “The firing squad synchronization problem”, *Sequential Machines*, Addison-Wesley Publ. Co. Inc., Beading. Mass–Palo Alto–London, 1964, pp. 213–214.
- [10] M. Bosiljevac, D. Babić, Z. Sipus. “Temperature-stable LED-based light source without temperature control”, Photonic Instrumentation Engineering III (15 March 2016, San Francisco, CA, USA), *Proc. SPIE*, vol. **9754**, 2016, id. 975416, 6 pp. 