

СИНХРОНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (НА БАЗЕ IEEE 1588 – PTP И WHITE RABBIT)

Стецюра Г. Г.¹

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Предложен децентрализованно выполняемый способ синхронного запуска действий группы физических объектов – участников управляемого эксперимента. В нем объекты обнаруживают появление событий, требующих совместных действий всех объектов, и без участия управляющего центра создают общую команду для начала выполнения действий объектов одновременно или с заданными для каждого объекта дополнительными задержками. Для этого объекты обмениваются сообщениями через не содержащий вычислительных средств ретранслятор сигналов, формируют в нем общую команду и выполняют вспомогательные вычисления. Обеспечен необходимый для этих действий одновременный приход в ретранслятор сообщений объектов с совмещением их одноименных двоичных разрядов. В целом, в способе группа объектов функционирует как распределенная управляющая система, с минимальными задержками корректирующая выполнение эксперимента в ответ на появление непредвиденных или ожидаемых в неизвестные моменты времени событий.

Ключевые слова: синхронизация, распределенный управляемый эксперимент, Precision Time Protocol, White Rabbit, групповые операции.

1. Введение

Предложения статьи относятся к синхронизации действий объектов физического эксперимента, имеющего следующие особенности.

1. В эксперименте участвует группа взаимодействующих между собой взаимно удаленных стационарных или мобильных физических объектов.

2. Эксперимент управляемый, может быть многоэтапным. На разных этапах участники могут быть одними и теми же, частично совпадающими или различными. Объекты разделены на источники сообщений и команд и приемники (исполнители) со-

¹ Геннадий Георгиевич Стецюра, д.т.н., профессор (gstetsura@mail.ru).

общений и команд. Переход к следующему этапу выполняется после выполнения всех команд исполнителями предыдущего этапа.

3. Объекты на любом этапе могут обнаружить незапланированные события, на которые потребуется реакция других объектов. Требуется также реагировать как можно быстрее на ожидаемые события с неизвестным моментом появления.

Для экспериментов с такими особенностями статья предлагает организовать следующее взаимодействие объектов.

Будем считать, что объектам из п. 3 требуется помощь других объектов для реакции на событие. Каждый обнаруживший событие объект должен информировать все объекты группы о необходимости совместных действий объектов. Потенциальные участники этих действий должны их согласовать между собой, совместно сформировать групповую команду и передать команду объектам – исполнителям команды. Исполнители одновременно или с заданными для каждого объекта дополнительными задержками выполняют команду. Интервал времени от обнаружения необходимости совместных действий до их начала должен быть как можно меньше.

Предполагается, что каждый объект содержит компьютер, достаточно быстрый для управления локальными действиями объекта. Но для быстрого управления совместными действиями требуется также предоставить этим компьютерам возможность работать как единая система с быстрым обменом данными и управляющими командами.

Изложенное означает, что группа участвующих в эксперименте объектов должна действовать как распределенная система управления, собственными средствами быстро корректирующая процесс выполнения эксперимента.

В статье показан такой способ действий в эксперименте как в высокоскоростной системе управления. Он основан на разработанных в Институте проблем управления РАН (ИПУ РАН) способах получения быстрой реакции на события в распределенных системах управления. Эти способы имеют следующие основные возможности. Взаимодействие объектов системы выполняется без участия управляющего центра. Объекты, чтобы

сообщить одновременно всем объектам о возникших событиях, создают общее сообщение, каждый двоичный разряд которого создан синхронным совмещением одноименных разрядов сообщений группы объектов. Таким образом, последовательная передача многих сообщений заменена передачей одного общего короткого сообщения. Подобное совмещение выполняется при создании общей, групповой команды, совместно формируемой группой объектов для одновременного исполнения другими объектами группы.

Для синхронного совмещения разрядов предложена структура взаимодействия объектов с заменой группы источников сообщений единственным ретранслятором сигналов. Ему источники синхронно передают свои сообщения, создавая направляемое приемникам общее сообщение. Ретранслятор – устройство простое, не содержащее логические элементы, но, благодаря специальному представлению ретранслируемых данных, в ретрансляторе выполняются логические и арифметические распределенные операции над данными в сообщениях. Создаются групповые команды для управления взаимодействием объектов. Например, при попытке группы источников поочередно передать сообщения конфликт устраняется одновременно для всей группы.

Изложенное выше направлено на ускорение выполнения двух задач, которые могут потребоваться в скоростном многокомпонентном физическом эксперименте. Первая задача связана с тем, что любой эксперимент, по определению, может действовать незапланированно, и выполняющая его система должна с высокой скоростью реагировать на отклонения от планируемых действий. Вторая задача характерна для многоэтапных экспериментов. В них выполнение каждого следующего этапа требуется начать выполнять как можно быстрее после завершения предыдущего этапа, однако точно указать момент завершения очередного этапа эксперимента нельзя, но задержка начала следующего этапа недопустима.

Для высокой реактивности способу требуется точное измерение времени переноса сигналов между объектами и ретранслятором. Из известных способов таких измерений наибольшую

точность обеспечивает стандарт IEEE 1588-2019 High Accuracy Default PTP Profile (PTP (HA)) [4, 7–9, 16], созданный в результате объединения результатов предыдущего промышленного стандарта IEEE 1588-2008 Precise Time Protocol (PTP) и проекта White Rabbit (WR) [10–13, 15, 18, 19], созданного для выполнения точных физических экспериментов в ЦЕРН (CERN). Измерения в PTP использованы для синхронизации показаний часов объектов и обеспечивали ошибку в показаниях не более нескольких наносекунд. В WR и PTP (HA) для такой же задачи получена ошибка около пикосекунды.

В PTP для взаимодействия объектов использована схема «ведущий – ведомый». Ведущий объект (общий центр) посылает ведомому сигнал и показание своих часов. Ведомый посылает ответный сигнал ведущему и устанавливает на своих часах показания часов ведущего. Получив сигнал ведомого, ведущий вычисляет занятый этим процессом интервал времени и посылает полученное значение ведомому для корректировки показания его часов. В WR и PTP (HA) использована такая же схема. Высокая точность измерения получена за счет использования цифрового варианта способа биений. Детали способа изложены в [10–13, 15, 18, 19]. Эти способы использованы в статье без изменений, но для уменьшения времени измерений все объекты проводят необходимые измерения без применения ведущего.

Синхронизация показаний часов объектов позволяет решать важную задачу – управляющий центр может запустить очередной этап распределенного эксперимента в точно заданный момент времени. Но в нем отсутствуют средства запуска очередного этапа в неизвестный момент времени, ближайший к моменту завершения предыдущего этапа или непосредственно после появления непредвиденного события. Для этого предлагаются решения настоящей статьи, в которой эксперимент функционирует как распределенная система управления с полностью децентрализованным управлением взаимодействием объектов.

Материал статьи распределен между ее разделами следующим образом. В разделе 2 приведена структура связей, используемая далее для синхронизации действий источников и прием-

ников команд. В разделе 3 приведен способ распределенного управления взаимодействием источников. В разделе 4 дан способ выполнения приемниками команд источников одновременно или с заданными в команде для каждого приемника задержками времени. В разделе 5 дана краткая сводка групповых операций. В разделе 6 даны примеры способов технической реализации устройств, необходимых для скоростной синхронизации действий объектов.

2. Структура связей между объектами

Основная структура связей, использованная в статье для обмена сигналами и сообщениями между объектами, показана на рис. 1.

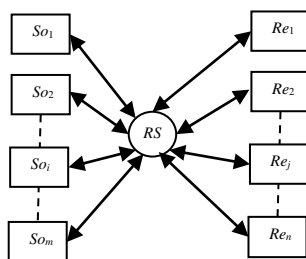


Рис. 1. Связи между объектами – источниками и приёмниками сигналов и сообщений

Группа объектов состоит из группы So источников команд $\{So_i\}$, группы Re приемников команд $\{Re_j\}$ и ретранслятора RS сигналов, поступающих от источников и приемников. В общем случае любой объект может выполнять функции So_i , Re_j или RS и в динамике изменять функцию. Сигналы объектов принимает только ретранслятор RS , и только его сигналы принимают объекты. Объекты посылают в сообщениях двоичные значения единица и ноль сигналами с частотами f_1 и f_0 соответственно. RS ретранслирует их сигналами других частот *f_1 и *f_0 . Каналы связи могут быть беспроводными и проводными, направленными

и ненаправленными. Далее предполагается, что по ним передаются оптические или радиосигналы. До раздела 4 будем считать, что имеется единственный ретранслятор. Как будет показано, ретранслятор играет центральную роль в ускорении синхронизации действий объектов.

3. Создание источниками общей групповой команды для группы приемников команд

В статье часть объектов обнаруживает появление событий, на которые все объекты должны синхронно реагировать. Для этого каждый обнаруживший событие объект должен информировать все объекты группы о необходимости совместных действий объектов. Потенциальные участники этих действий должны их согласовать между собой, совместно сформировать групповую команду и передать ее объектам – исполнителям команды. последние одновременно или с заданными для каждого объекта дополнительными задержками выполняют команду с как можно меньшей задержкой после момента обнаружения событий.

Групповая команда позволит источникам организовать их совместные действия без участия управляющего центра, при этом максимально быстро. Приемникам команд также часто потребуется сообщать о своем состоянии, действуя как источники. Для выполнения групповой команды источники должны определить свою удаленность от RS [1, 2].

3.1. ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДАЛЕННОСТИ ИСТОЧНИКОВ ОТ RS

Каждый источник So_i из группы So должен независимо (без центра управления) в порядке очередности измерить удаленность от RS [1, 2]. Очередность определяют порядковые номера j , присвоенные источникам So_i заранее. Измерения удаленности источники будут выполнять в выделенном для этого отдельном канале, чтобы не задерживать передачу сообщений и групповых команд. Управлять измерением удаленности от RS источники будут с помощью специального синхросигнала S , который

будет поступать в RS и возвращаться им к объектам на другой частоте, как сигнал S^* .

Для начала измерения каждый источник So_i следит за поступлением синхросигнала S^* и при его отсутствии в течение интервала T – наибольшего интервала времени переноса сигнала между любыми объектами посылает широкополосно сигнал S . Значение $T = L/c$, где L – наибольшее расстояние между объектами, c – скорость света. Длительность сигнала S должна быть не меньше T . При выполнении этого условия, если несколько So_i пошлют сигналы S , то сигналы хотя бы частично совместятся в RS и будут восприняты источниками как единственный сигнал S^* . Спад этого сигнала поступит к любому So_i не позже момента T после завершения S^* в RS и послужит для So_i разрешением начать процесс измерений. Как указано выше, для повышения скорости реакции объектов на возникающие события источники будут проводить измерения одновременно с передачей сообщений, используя для сигналов S и S^* отдельные частотные каналы.

Источники So_i поочередно в соответствии с их порядковыми номерами измеряют T_i – время переноса сигнала до RS (их удаленность от RS). На каждое измерение отводится интервал времени $2T$. За это время посланный RS сигнал S^* покинет систему измерения. Высокую точность измерения дает использование стандарта IEEE 1588-2019 PTP (НА) [4, 7–9, 16], включающего способ WR [10–13, 15, 18, 19].

3.2. ДОСТАВКА СООБЩЕНИЙ И КОМАНД В RS УСТРАНЕНИЕ КОНФЛИКТОВ

После выполнения раздела 3.1 объекты готовы к доставке сообщений в RS двумя способами – в виде единого сообщения, содержащего поочередно сообщения объектов без пауз между ними, и в виде единого сообщения, в каждом разряде которого совмещены с наложением одноименные разряды всех передаваемых сообщений. Источники посылают сообщения, чтобы сообщить всем объектам о возникших событиях и выявить среди них союзников в формировании групповой команды, затем

участвовать в отправке этой команды объектам-исполнителям команды.

Итак, будем считать, что каждый источник So_i определил T_i , удаленность от RS , и для взаимодействия источников в RS выделен отдельный частотный канал.

Источники So_i выполняют следующие действия.

1. Источники формируют задержки $d_i = T - T_i$.

2. Источники формируют логическую шкалу – двоичную последовательность, в которой каждому источнику выделен разряд, соответствующий его порядковому номеру. Источники, которым в текущий момент требуется передать сообщение в RS , заносят в свой разряд единицу, остальные разряды содержат нули.

3. Источники посылают в RS сигнал S . Спад возвращенного от RS объектам сигнала S^* служит началом синхронизации.

4. Обнаружив спад S^* , источники So_i с задержками $2d_i$ посылают в RS шкалы. При задержке $2d_i$ одноименные разряды шкал источников приходят в RS одновременно с задержкой $2T$ после завершения передачи шкалы ретранслятором [1]. Единица и ноль в разряде передаются RS сигналами с частотами *f_1 и *f_0 соответственно. Объединенную шкалу RS возвращает источникам. Каждый источник определяет свое место в порядке передач источниками сообщений по количеству предшествующих в шкале разрядов с единицами. При этом в разрядах шкалы одновременное наличие сигналов с частотами *f_1 и *f_0 воспринимаются как единица.

5. Затем каждый запросивший передачу источник So_i передает в RS сообщение всем другим источникам. Для формирования групповой команды сообщение может содержать описание обнаруженного So_i события и предложение по реакции на него. Если одновременно несколько источников требуют создать групповую команду, то сообщения этих источников передаются в едином сообщении с совмещением одноименных разрядов, как при передаче шкал, или в указанном в разрядах шкалы порядке. В п. 5 предполагается, что объекты – приемники команд готовы к приему команд.

6. Может потребоваться несколько подобных обменов сообщениями, завершающихся согласованным сообщением – групповой командой, адресованной для исполнения группе приемников.

Этим завершено описание действий источников, объединенных в структуру в соответствии с разделом 2. В результате группа источников указанным способом создает общую команду группы источников, которая затем направляется группе приемников-исполнителей команды.

4. Взаимодействие приемников-исполнителей команды с ее источниками

В разделе показаны децентрализованные процессы измерения удаленности приемников от RS и синхронного запуска их действий групповой командой.

4.1. ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДАЛЕННОСТИ ПРИЕМНИКОВ ОТ RS

Измерение удаленности от RS не отличается от таких же действий источников. Приемники Re_j из Re также должны без центра управления поочередно измерить удаленность от RS . Приемникам Re_j заранее присвоены порядковые номера i . Затем до начала измерения приемник Re_j следит за поступлением специального синхросигнала S , и при его отсутствии посылает широкоэмитально такой же сигнал S . Сигнал S посылается через RS . Длительность сигнала S не меньше T – наибольшего интервала времени переноса сигнала между любыми объектами. Если несколько Re_j , пошлют сигналы S , то они хотя бы частично совместятся и будут восприняты приемниками как единственный сигнал. Спад этого сигнала поступит к любому Re_j не позже момента T после завершения S и служит началом процесса измерений. Затем приемники Re_j измеряют их удаленности T_j от RS .

Измерения Re_j также выполняют поочередно в соответствии с их порядковыми номерами, используя способ РТР (НА) или WR. На каждое измерение по РТР (НА) отводится интервал

времени $2T$. За это время посланный Re_j сигнал покинет систему измерения.

4.2. СИНХРОННОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ГРУППОВОЙ КОМАНДЫ ПРИЕМНИКАМИ

Приемники начинают подготовку к выполнению общих действий, получив через RS групповую команду источника. При этом приемники, несмотря на разные расстояния от RS , должны выполнить его команду одновременно. Для этого каждый приемник выполняет следующие действия.

1. Приемник Re_j до получения команды, имея T и T_j , вычисляет задержку $d_j = T - T_j$.

2. Источник через RS посылает всем приемникам требующую их одновременного действия команду.

3. Получив команду, каждый Re_j выдерживает задержку d_j и после этого выполняет требуемое командой действие. В результате все действия объекты выполняют одновременно, с задержкой T после завершения передачи команды от RS .

Действительно, команда после выхода из RS поступает в Re_j через интервал времени T_j . Следовательно, при задержке d_j любой Re_j выполнит действия в момент времени $\tau = T_j + T - T_j = T$. Все Re_j выполняют команду одновременно в момент T после выхода команды из RS , что и требовалось. Задержка d_j учла разницу в удаленности приемников от RS .

Если требуется выполнить сдвиги во времени выполнения команды приемниками, то к d_j приемника Re_j должна быть добавлена требуемая задержка a_j .

4.3. МНОГОСЛОЙНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ДЕЙСТВИЙ ПРИЕМНИКОВ

Многослойная структура ориентирована на эксперименты, состоящие из поочередно выполняемых этапов. Выполнение каждого следующего этапа требуется начать выполнять как можно быстрее после завершения предыдущего этапа.

Потребность в таком взаимодействии возникает, когда нельзя точно указать момент завершения очередного этапа экс-

перимента, но задержка начала следующего этапа недопустима. Многослойная структура представлена на рис. 2.

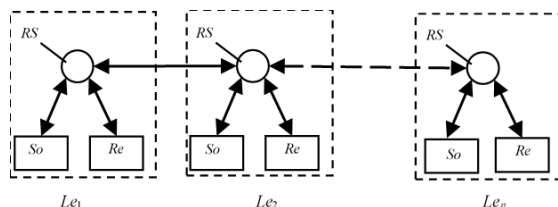


Рис. 2. Многослойная структура приемников

По сравнению с разделом 2 здесь вся группа объектов разделена на несколько слоев Le_1, Le_2, \dots, Le_n , каждый из которых имеет группы своих источников и приемников и снабжен ретранслятором. Сигналы объектов любого слоя Le_i доступны только RS_i того же слоя, который может передавать их из слоя RS_i в RS_{i+1} следующего по порядку слоя и в RS_{i-1} предшествующего слоя. В пределах слоя объекты действуют в соответствии с разделами 2, 4.1, 4.2. Процесс синхронизации начинается в слое Le_1 и последовательно перемещается к конечному слою. Приемники слоя выполняют требуемые действия с минимальной задержкой, подобно действиям в однослойной структуре. Слой Le_n , действуя аналогично, с минимальной задержкой информирует предыдущие слои о завершении синхронизации. Промежуточные слои, в частности, могут быть обычной сетью и будет получена удаленная синхронизация группы объектов, ограниченная во времени задержкой в средствах сети.

5. Групповые операции в управлении экспериментом

В предыдущих разделах применены групповые операции управления, в которых в пределах одной операции одновременно участвует группа объектов. К ним относятся следующие операции.

1. Операция одновременного запуска действий объектов формированием сигнала S .

2. Операции создания и применения логической шкалы. Шкала создается в пределах одной операции группой объектов и позволяет упорядочить одновременные или поочередные действия группы объектов.

3. Операции, одновременно посылаемые асинхронно действующими приемниками для сообщения о готовности к совместным действиям (конец раздела 4.2).

4. Синхронное выполнение задания групповой команды группой приемников команды. Эти операции использованы для управления *порядком действий* объектов.

Разработаны и другие, вычислительные групповые операции для быстрого сбора информации о текущем состоянии всех объектов – участников эксперимента. Ниже приведены примеры групповых операций, выполняющих распределенные вычисления в *RS*.

5.1. ГРУППОВОЕ ПОРАЗРЯДНОЕ ЛОГИЧЕСКОЕ СЛОЖЕНИЕ И УМНОЖЕНИЕ

Пусть имеется набор признаков, характеризующих состояние любых объектов в эксперименте. Представим последовательность этих признаков логической шкалой. В ее двоичный разряд, соответствующий признаку, будет внесена единица при наличии признака у объекта и ноль при его отсутствии. Требуется одновременно для всей совокупности объектов получить два вида сведений: найти признаки, имеющиеся хотя бы у одного объекта, и найти признаки, имеющиеся у всех объектов.

Для первой задачи используем операцию поразрядное ИЛИ. Объекты, используя приведенные выше задержки, посылают свои шкалы в *RS* так, чтобы их одноименные разряды совпали. Значения разрядов шкал «единица» и «ноль» представлены соответственно сигналами частот f_1 и f_0 . Объекты получают от *RS* объединенную шкалу и получение в ее разряде сигнала f_1 или одновременно f_1 и f_0 , воспринимаемые как «единица», иначе значение равно «нулю». Так будут выделены признаки, имеющиеся хотя бы у одного объекта.

Для второй задачи используем операцию поразрядное И. Объекты действуют аналогично действиям в первой задаче, но

интерпретируют полученные сигналы иначе. Получение в ее разряде сигнала f_0 или одновременно f_1 и f_0 воспринимается как «ноль», иначе значение равно «единице». Выделены признаки, имеющиеся у всех объектов.

В обоих случаях сообщения объектов поступают в RS одновременно, на операцию затрачено минимальное время, не зависящее от количества участвующих в ней объектов.

5.2. ПОИСК ОБЪЕКТАМИ MAX И MIN

Здесь требуется, чтобы от объектов в RS одновременно поступали по одному числу и все объекты, получив от RS результат наложения сигналов, определили наибольшее или наименьшее значение указанных чисел.

Цифры чисел будем представлять в виде логических шкал следующего вида. В выбранной системе счисления шкала содержит количество двоичных разрядов, соответствующее значению основания системы счисления. Далее для определенности возьмем десятичную систему. Шкала будет иметь 9 разрядов, причем только один разряд, равный значению цифры, содержит единицу, остальные нули. Например, цифра 8 представлена шкалой 010000000, цифра 1 представлена шкалой 000000001, цифра 0 представлена шкалой 000000000. Объекты представляют многоразрядное число последовательностью шкал цифр. Операция определения *max* выполняется в виде следующих действий.

1. Каждый объект из своей указанной выше шкалы берет старшую десятичную цифру своего числа и посылает в RS . Все объекты действуют синхронно с совмещением в RS сообщений.

2. Совмещенная в RS шкала группы объектов поступает к объектам. В шкале теперь может быть несколько единиц, и каждый объект выясняет, послал ли он наибольшую из старших цифр.

3. Только объекты, передавшие наибольшую цифру, передают следующую цифру числа и т.д.

4. Получив последнюю цифру числа, объекты определяют максимальное значение среди переданных чисел.

Минимум находится, как и максимум, но на каждом шаге определяется наименьшая из передаваемых объектами цифр.

Таким образом, время выполнения операции не зависит от количества ее участников. Время обработки разрядов цифры в шкале можно уменьшать, повышая частоту передаваемых сигналов. Но шкала, соответствующая следующей цифре, будет, подобно передаче отдельного сигнала, задержана на удвоенное время доставки ее в *RS* от наиболее удаленного объекта. Поэтому для уменьшения общего времени выполнения операции следует уменьшать число пересылок шкал, выбирая возможно большее основание системы счисления.

Следует подчеркнуть, что приведенные в разделе 5 простые групповые операции являются базовыми, необходимыми для быстрого выполнения всех приведенных в статье действий по взаимодействию объектов. Они разработаны в ИПУ РАН и их аналоги в литературе не найдены.

Завершая раздел 5, обратим внимание на сходство групповых операций с ассоциативными операциями ассоциативных процессоров. В обеих операциях одновременно участвует группа объектов. Но групповые операции, в отличие от ассоциативных операций, полностью децентрализованы и распределены. Групповые операции могут выполнить все ассоциативные операции, но не наоборот.

6. О технической реализации предлагаемого способа

Статья использует два вида устройств, имеющих основное значение. Это измеритель времени переноса сигнала и ретранслятор. Как указано выше, возможности измерителя прошли тщательную проверку, стандартизованы и широко применяются. В статье не потребовалось внести в измерители какие-либо изменения, ссылки на эти работы содержатся в [10–13, 15, 18, 19].

Ретранслятор, преобразующий входной сигнал, – также устройство, распространенное для оптических и радиосигналов. Полезно остановиться только на двух его беспроводных вариантах. Первый из них использует ненаправленные оптические

сигналы, создаваемые объектами и ретранслятором [6]. Ретранслятор помещается в произвольном месте закрытого помещения, в пределах прямого доступа находятся группы источников и приемников сообщений. Скорость передачи – порядка пикосекунд. Второй вариант использует оптические направленные сигналы для связи одного источника сообщений и одного приемника [5, 14, 20]. В способе приемник посылает направленный непрерывный сигнал источнику. В последнем сигнал приемника проходит через управляемый источником модулятор в ретрорефлектор, возвращающий сообщение источника только пославшему непрерывный сигнал приемнику. Таким образом, в приемник поступит его сигнал, модулированный данными источника. Передача сообщения выполнена за счет энергии приемника. Связь применялась в морских условиях на расстоянии до 7 км, при наличии помех. В задачах данной статьи способ достаточно просто модифицировать для взаимодействия групп источников и приемников. Достаточно ретранслятору принимать сигналы группы источников, превращать в электрический сигнал и действовать им на модулятор.

Полезно также иметь средство, поддерживающее стабильность мощности пересылаемых в системе сигналов. Современные технологии позволяют получать точное цифровое значение при одновременном суммировании нескольких тысяч сигналов. В работе [3, 17] приведен простой светодиодный источник со стабильностью выходной мощности лучше $50 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

7. Заключение

Предложен способ ускорить управление распределенными физическими экспериментами, имеющий следующие особенности.

В способе в группе произвольно расположенных участников эксперимента (объектов) некоторые объекты обнаруживают непредвиденное появление событий, требующих совместных действий других объектов группы. Такие объекты-источники информируют об этом другие объекты, и все объекты совместно создают групповую команду, управляющую одновременным

запуском действий группы объектов – исполнителей команды. Объекты исполняют групповую команду с минимальной задержкой после возникновения события.

Все объекты действуют синхронно, взаимодействуя между собой без привлечения управляющего центра.

Быстрая реакция на возникающие события достигнута за счет взаимодействия группы исполнителей команды с группой источников команды через посредника *RS*. Вместо этого приемники взаимодействуют с единственным эквивалентом источников – простым ретранслятором сигналов. Источники синхронно передают свои сообщения в ретранслятор одно за другим в виде единого сообщения или как одно сообщение с совмещением во времени прихода в ретранслятор одноименных двоичных разрядов сообщений.

В целом, способ превращает эксперимент в децентрализованную управляющую распределенную систему, работающую в реальном времени с использованием обратной связи о состоянии объектов и быстрой реакцией на изменения в ходе эксперимента, синхронно выполняемой объектами.

Литература

1. СТЕЦЮРА Г.Г. *Децентрализованная автономная синхронизация процессов взаимодействия мобильных объектов* // Проблемы управления. – 2020. – №6. – С. 47–56. – DOI: <http://doi.org/10.25728/ru.2020.6.5>.
2. СТЕЦЮРА Г.Г. *Синхронное выполнение групповых операций в распределенных компонентах суперкомпьютеров и компьютерных кластерах* // Доклад на НСКФ 2022. – 2022. – URL: https://2022.nscf.ru/TesisAll/02_Apparatura/341_StetsuraGG.pdf
3. BOSILJEVAC M., Babić D., Sipus Z. *Temperature-Stable LEDBased Light Source without Temperature Control*. – URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-55-32-9060>.
4. GIRELA-LÓPEZ F., LÓPEZ-JIMÉNEZ J., JIMÉNEZ-LÓPEZ M., RODRÍGUEZ R., ROS E., DÍAZ J. *IEEE 1588 High Accuracy Default Profile: Applications and Challenges* //

- IEEEAccess. – 2020. – Vol. 8. – P.45211–45220. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.297833.
5. GOETZ P.G., RABINOVICH W.S., MAHON R., MURPHY J. L. *Modulating Retroreflector Lasercom Systems at the Naval Research Laboratory*. 2010. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5680205/>
 6. GOMEZ A., SHI K., QUINTANA C., MAHER R. et al. *Design and Demonstration of a 400 Gb/s Indoor Optical Wireless Communications Link* // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Vol. 34, Iss. 22. – P. 5332–5339.
 7. GUTIÉRREZ-RIVAS J. L., TORRES-GONZÁLEZ F., Ros E. J., Díaz J. *Enhancing Rabbit Synchronization Stability and Scalability Using P2P Transparent and Hybrid Clocks* // IEEE Trans. on Industrial Informatics. – 2021. – Vol. 17, No. 11. – P. 7316-7324. - DOI:10.1109/TII.2021.3054365.
 8. IDREES Z., GRANADOS J., SUN Y., LATIF S., GONG L., ZOU Z., ZHENG L. *IEEE 1588 for Clock Synchronization in Industrial IoT and Related Applications: A Review on Contributing Technologies, Protocols and Enhancement Methodologies* // IEEE Access. – 2020. – Vol 8. – P. 155660–155678. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/8948470/09154372.pdf>.
 9. *IEEE 1588-2019 – IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems* // IEEE Instrumentation and Measurement Society. – 2020. – URL: <https://standards.ieee.org/standard/1588-2019.html>
 10. ARGARIA D., VESCO A. *Trusted GNSS-Based Time Synchronization for Industry 4.0 Applications* // Appl. Sci. – 2021. – Vol. 11. – P. 8288. – URL: <https://doi.org/10.3390/app11188288>.
 11. MOREIRA P., DARWAZEH I. *Digital femtosecond time difference circuit for CERN's timing system*. – 2011. – URL: <https://www.ee.ucl.ac.uk/lcs/previous/LCS2011/LCS1136.pdf>.
 12. MOREIRA P. *Timing Signals and Radio Frequency Distribution Using Ethernet Networks for High Energy Physics Applications* // PhD thesis, 2015.
 13. NEELAM RATHORE H., SHARMA L., ROY A. *Clock Comparison with an ultra-stable optical fibre link utilizing White*

- Rabbit Network*. – URSI GASS, 2020. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/347449111>.
14. RABINOVICH W.S., GOETZ P.G., MAHON R. et al. *45-Mbit/s cat's-eye modulating retroreflectors* // *Optical Engineering*. – 2007. – Vol. 46, No. 10. – P. 1–8.
 15. RIZZI M. *Digital Dual Mixer Time Difference: Phase noise & stability*. – CERN, 2017. – P. 38. – URL: https://white-rabbit.web.cern.ch/documents/DDMTD_for_Subns_Synchronization.pdf
 16. RÖSEL K., HELM M., ZIRNGIBL J., STUBBE H. *Current Developments of IEEE 1588 (Precision Time Protocol)*. – DOI: 10.2313/NET-2021-05-1_04.
 17. SLIWCZYNSKI Ł., KREHLIK P., BUCZEK Ł., SCHNATZ H. *Picoseconds-Accurate Fiber-Optic Time Transfer With Relative Stabilization of Lasers Wavelengths* // *Journal of Lightwave Technology*. – 2020. – Vol. 38, No. 18. – P. 5056–5063.
 18. *The White Rabbit Project*. – 2022. – URL: <http://white-rabbit.web.cern.ch/>
 19. WATERMAN E., HELM M., ZIRNGIBL J., STUBBE H. *White Rabbit: High Precision PTP* // Seminar IITM WS 20/21, Network Architectures and Services. – 2021. – DOI: 10.2313/NET-2021-05-1_14.
 20. ZHU Y., WANG G. *Research on Retro-reflecting Modulation in Space Optical Communication System* // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 108, Iss. 3. – P. 1–7. – DOI:10.1088/1755-1315/108/3/032060.

SYNCHRONIZATION OF A DISTRIBUTED EXPERIMENT WITH FEEDBACK (BASED ON IEEE 1588 – PTP AND WHITE RABBIT)

Gennady Stetsyura, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Dr. Sc. (Engg), professor (gstetsura@mail.ru).

Abstract: We propose a method decentralized executed synchronous initiation of actions of a group of physical objects participants of a controlled experiment. Here, the objects detect the occurrence of events, which require joint actions of all objects, and without the participation of the control center create a common command

*Управление техническими системами
и технологическими процессами*

to initiate the actions of the objects simultaneously or with additional delays prescribed for each object. For this purpose, objects exchange messages via a signal repeater that does not contain computational means, form a common command in it, and perform auxiliary calculations. Necessary for these actions the simultaneous arrival in the repeater messages objects with the alignment of their binary digits of the same name is provided. In general, in the method, a group of objects functions as a distributed control system, which corrects the execution of the experiment with minimum delays in response to the appearance of unforeseen or expected at unknown points in time events.

Keywords: synchronization, distributed controlled experiment, Precision Time Protocol, White Rabbit, group operations.

УДК 004.75

ББК 16.292

DOI: 10.25728/ubs.2023.103.7

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.М. Вишневым.*

Поступила в редакцию 20.10.2022.

Опубликована 31.05.2023.