

СИНХРОНИЗАЦИЯ В ГРУППАХ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Г.Г. Стецюра

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: gstetsura@mail.ru

Ключевые слова: реактивность, скоростная синхронизация, распределенное управление, распределенная обратная связь, неупорядоченные цифровые объекты.

Аннотация: Рассмотрены действия технических активных распределенных объектов, объединенных в системы с большим и переменным количеством неупорядоченных объектов. Предложены два вида синхронизации действий объектов: однократная и периодическая. В первом виде поступивший от внешнего события единственный сигнал или сигнал, формируемый группой объектов, заставляет объекты отреагировать на поступивший сигнал с минимальной задержкой, аналогично обратной связи на событие, но при этом действия всех объектов должны быть согласованы во времени. Во втором виде объекты должны длительно сохранять цикличность действий и переходить в цикличность также посылкой объектами единственного сигнала. Показаны способы управления неупорядоченными объектами и формирования ими данных о текущем состоянии системы.

1. Введение

Предлагаемый доклад существенно использует результаты первого доклада [1], представленного автором на настоящей конференции, и расширяет его результаты на системы, объединяющие группы стационарных или мобильных *неупорядоченных* объектов. Для выполнения совместных действий объекты применяют два вида синхронизации действий – однократную и периодическую.

Понятия однократной (*ОС*) и периодической (*ПС*) синхронизации означают следующее. Обычно применяется синхронизация, в которой объекты многократно обмениваются малыми воздействиями, приводящими в итоге группу объектов в синхронное состояние. В *ОС* объекты переходят в синхронное состояние, обмениваясь единственным сигналом. В *ПС* группа объектов самостоятельно поддерживает в течение длительного времени цикличность действий в каждом цикле *ПС*.

Отказ от упорядоченности объектов позволил включить в область исследования очень простые технические объекты (например, датчики и исполнительные механизмы), не имеющие средств работы с именами или адресами и объединенные в группы с большим количеством и переменным составом объектов. Будет показана доступность для них некоторых из распределенных операций, которые в [1] выполнялись упорядоченными объектами. Аналогично могут действовать и некоторые объекты природы.

В разделах 2 и 3 доклада рассмотрены соответственно процессы однократной и периодической синхронизации. В разделе 4 показана возможность обмена данными и их распределенной обработки в системах неупорядоченных объектов.

2. Однотактная синхронизация неупорядоченных объектов

Объединение однотактной синхронизацией группы объектов в синхронную систему не отличается от действий в [1] для перевода группы объектов из асинхронного в синхронное состояние. Инициатором перевода могут быть сигналы, посылаемые внешним событием, или сигналы к взаимодействию, формируемые объектами группы со случайным сдвигом во времени. Для этого объекты, не обнаружив наличие сигналов других объектов, посылают сигнал. Эти сигналы, частично совмещаясь во времени, объединяются в общий сигнал S , момент завершения которого служит сигналом общей синхронизации $*S$. Для единственности сигнала требуется, чтобы длительность S превышала T – максимальное время переноса сигнала между любыми объектами группы.

Получив $*S$, все объекты начнут синхронно (с разбросом не больше T) выполнять требуемые действия.

Таким образом, совместное формирование объектами единственного сигнала S и, как следствие, сигнала $*S$ однотактно переводит группу объектов в синхронное состояние. Применим S и $*S$ для выполнения более сложной периодической синхронизации.

3. Действия объектов при периодической синхронизации

В разделе будут рассмотрены три вида взаимодействия объектов, находящихся в $ОС$ и $ПС$: **вид I** – поддержка синхронности $ПС$ объектами, находящимися в $ПС$ (внешние запросы на взаимодействие с объектами, находящимися в $ПС$, отсутствуют); **вид II** – вход внешнего объекта в $ПС$ с ожиданием взаимодействия в начале очередного цикла синхронизации $ПС$; **вид III** – вход объекта не нарушает цикл $ПС$, но обслуживание срочной заявки внешнего объекта в $ПС$ начинается в пределах короткого интервала T .

Объект, находящийся в текущий момент в $ПС$, должен периодически передавать синхросигналы с требуемой $ПС$ циклическостью. Синхросигналы могут не отличаться от сигналов, несущих информацию или энергию другим объектам, но могут выполнять только управление синхронизацией.

Пока предположим, что объекты, находящиеся в $ПС$ и входящие в $ПС$, принадлежат к единственному виду; имеют одинаковый эталонный цикл Θ генерации посылаемых объектам синхросигналов, не меньший длительности T ; имеют максимально допустимое для данного вида отклонение $\Delta\Theta \ll \Theta$. Цикл Θ , обычно значительно превышающий T , позволяет простым объектам с целью экономии энергии проводить синхронизацию реже, чем в каждом интервале T . Полагаем также, что объекты имеют некоторый внутренний механизм поддержки синхронизации – таймер. Например, в публикации по синхронизации простых объектов природы, вспышек жуков-светлячков [2], таймером служит устройство равномерного накопления энергии, периодически выдающее сигнал при достижении заданного уровня энергии.

Синхронизацией объекта, находящегося в $ПС$, управляют сигналы таймера объекта. В первый раз таймер запускается в момент перехода объекта в $ПС$. При отказе таймера объект не может находиться в состоянии $ПС$. Рассмотрим выполнение видов I–III.

Вид I. Требуется сохранить синхронность $ПС$ действиями объектов, находящихся в $ПС$. Для поддержки значения Θ все объекты выполняют следующий процесс. Будем считать, что объектам задана нижняя и верхняя границы цикла Θ . Если объект пытается

послать сигнал синхронизации раньше нижней границы цикла Θ , то объект применит нижнюю границу и к ней добавит случайную задержку $\delta\Theta < \Delta\Theta$, что не позволит ни одному из объектов монополизировать запуск циклов $ПС$. Если объект достигает верхней границы, то он посылает сигнал. При следующей коррекции объект ускоряет начало Θ на $\delta\Theta$. При выполнении указанных условий объект посылает сигнал S , возникает сигнал $*S$ и выполняется $ОС$ как часть $ПС$. Таким образом, за счет внутренних средств синхронизации, ограничения $\Delta\Theta$ и внесения случайности в момент начала передачи сигнала S объекты выполняют $ПС$ с вариацией Θ в пределах $\pm \Delta\Theta$. Минимальное значение $\Delta\Theta$ не может быть меньше T . Поддержка цикла Θ силами объектов, находящихся в $ПС$, завершена.

Вид II. Предполагается, что таймер любого входящего в $ПС$ объекта может отследить интервалы времени Θ , $\Delta\Theta$ и I_1 , превышающего Θ . Входящие в $ПС$ объекты выполняют следующие шаги.

Шаг 1. Если таймер объекта достиг значения I_1 , не получив сигнал S , то не существует объектов, находящихся в состоянии $ПС$. Тогда объект посылает сигнал S и в момент получения $*S$ входит в $ПС$. Если объект раньше достижения I_1 получает сигнал S , от находящихся в $ПС$ объектов, то объект входит в $ПС$, не нарушая Θ . Для этого объект переходит к шагам 2 и 3, готовясь к работе в следующих циклах Θ .

Шаг 2. Появившийся сигнал $*S$ в момент завершения на первом шаге сигнала S сбрасывает таймер входящего в $ПС$ объекта в ноль, перезапуская этим таймер, и объект переходит к шагу 3.

Шаг 3. Объект формирует случайное значение $\delta\Theta$, и при достижении таймером значения известной ему нижней границы Θ дополнительно вносит задержку $\delta\Theta$. При достижении момента задержки объект посылает сигнал S .

В результате все объекты, выполнившие шаги 1 – 3, при получении сигнала $*S$ перейдут в состояние $ПС$. Входящие в $ПС$ объекты пропускают один цикл Θ и входят в цикл $ПС$ одновременно с объектами, находящимися в $ПС$. Обслуживание его заявки в системе происходит синхронно с объектами, находящимися в $ПС$.

Способ входа в $ПС$ не нарушает внутренний ритм $ПС$, но существенно замедляет вплоть до интервала Θ реакцию на непредвиденные события.

Вид III. Цикл находящихся в $ПС$ объектов сохраняется, но заявка входящих в $ПС$ объектов обслуживается немедленно. При большой разнице между T и Θ ускорение существенное. Этот вид взаимодействия инициирует команда объектов или переход системы в соответствующее состояние. См. раздел 4.

Отметим ряд примеров использования $ПС$ в технических системах: поддержка синхронности, как единственной задачи объектов; оценка состояния среды в месте нахождения объекта; создание групп объектов с учетом текущего значения их внутренних свойств; организация структуры связей между созданными выше группами и т.п.

Представляет интерес работа $ПС$ в больших группах неупорядоченных простых объектов природы на примере синхронизации светлячков (fireflies, далее ff) [2-5].

Модели поведения ff рассматриваются во многих публикациях, в частности в [2-4], которые содержат много ссылок. В [2, 3] изучается поведение ff без учета объектами внутренних причин генерации вспышек. Например, в недавно созданной математической модели синхронизации ff каждый ff действует как осциллятор, который равномерно накапливает заряд энергии и по достижении заданного значения не только выполняет вспышку, но и случайно меняет уровень заряда других объектов [2]. Повторяя этот процесс, ff постепенно объединяются в кластеры, состоящие из синхронно вспыхивающих объектов. В группе ff нет управляющего центра. В [4, 5] учтены более сложные формы взаимодействия ff .

Смоделируем действия ff иначе, используя полученные выше результаты раздела 3. Пусть все ff находятся в режиме $ПС$. В литературе отмечается, что вспышки ff происходят с частотой порядка 1 с, расстояние между объектами группы ff может достигать 3 км. Тогда время переноса сигнала между наиболее взаимно удаленными объектами $T \approx 10^{-5}$ с. Для синхронизации потребуется лишь 10^{-3} % цикла Θ и, посылая единственный сигнал $ОС$, объекты сохранят значение Θ . Обслуживание новых объектов в $ПС$ для вида III в отличие от вида II может быть выполнено в пределах $T < \Theta$.

Учтем также, что при наступлении темноты ff начинают вспышки не одновременно. В зависимости от расположения объектов на них различно действует освещенность и, возможно, вспышки соседей. Для учета случайных сдвигов введем датчик генерируемых в случайные моменты времени сигналов и счетчик, реагирующий на эти сигналы и срабатывающий через несколько циклов Θ . С ростом освещенности датчик ускоряет генерацию сигналов. При достижении счетчиком порога срабатывания объект входит в $ПС$, как изложено выше, и начинает синхронно посылать вспышки. Приведенную группу датчика и счетчика (или подобную ей) легко реализовать программой или в виде искусственного физического объекта.

К последнему результату можно добавить следующее. В [2-4] дано много ссылок на публикации, исследующие синхронное поведение ff . В [2] отмечаются другие области синхронизации, где может быть полезна созданная авторами модель для ff . Маловероятно, что предложенная в докладе модель с включением $ОС$, полезная в технике, имеет отношение к поведению объектов в природе. Однако, не удалось найти описания достаточно точных экспериментов, которые позволили бы обнаружить короткие сигналы $ОС$ (они могут быть даже более короткими, чем приведены в ограниченном объеме доклада). Но возможность создать искусственные объекты, внешне действующие подобно природным, может инициировать новые эксперименты и породить близкие модели в далеких областях. Например, интересно выяснить, может ли сочетание $ОС$ и $ПС$ быть доступно для стаи, косяка рыб и т.п. и ускорить их действия.

4. Способы «общения» неупорядоченных объектов

Обмен данными между распределенными объектами без использования адресов приемников и источников данных применяется в двух известных областях обработки данных – при взаимодействии объектов с применением операций Dataflow (Df) и ассоциативных операций ($Ао$). Здесь не исключается применение адресов, но часто приходится обращаться к группам объектов, указывая только набор признаков, которыми в текущий момент обладает группа. Df ориентирован на хорошо структурированные задачи, где задан граф связей между вершинами графа, по которым перемещаются промежуточные результаты вычислений и команды.

По мере готовности данные доставляются группам приемников с указанием набора признаков, характеризующего созданные данные, а также приемники и источник данных. Так как структура графа известна, то достаточен небольшой планировщик, дополнительно корректирующий обмен данными. Вариант с $Ао$ ориентирован на задачи, в которых граф связей частично или полностью не определен и формируется в динамике, что характерно для ряда задач ЖРВ, в эвристических задачах, в задачах поиска. Здесь полезны системы с быстро изменяемой структурой связей, с изменением всей структуры за время, близкое к времени выполнения типичной операции по обработке данных [6]. Настоящий доклад добавляет к таким приложениям взаимодействие простых неупорядоченных объектов. В последних отсутствует гарантированная поочередная передача сообщений, но частично можно использовать

совмещение сообщений объектов с наложением их одноименных двоичных разрядов [1].

Приведем важный пример. Объект в первом разряде сообщения передаст сигнал одной из n частот, соответствующим буквам некоторого алфавита. Сообщения источников поразрядно совместятся и в разряде может появиться до n частот. Следующий разряд передадут объекты, пославшие старшую букву и т.д. Это копия операции *max* из [1]. В результате из передаваемых слов будет послано одно слово, ближайшее к началу словаря. Каждое слово словаря соответствует одному из известных объектам состояний объектов, внешней среды или инструкции, посылаемой объектам. Из последовательности слов создается сообщение. В [4, 5] показана сложность общения реальных *ff*.

Известны простые способы поддержки равенства энергии передаваемых объектами сигналов [7]. Это позволяет на каждом шаге операции *max* учитывать общую энергию сигналов каждой частоты для оценки количества передавших сигнал объектов.

5. Заключение

Основная цель доклада состояла в повышении скорости входа в синхронизм и выполнения ряда распределенных видов взаимодействия для распределенных систем, содержащих группы неупорядоченных технических объектов. Объекты таких систем не должны иметь средства их идентификации по адресу или имени, что желательно для простых датчиков и исполнительных механизмов, объединяемых в группы большого размера и переменного состава.

Решение получено применением однократной синхронизации (*OC*) с посылкой объектами единственного сигнала синхронизации, который также ускорил вход в периодическую синхронизацию (*ПО*) и ее сохранение в течение длительного времени.

Показано, что для таких объектов доступен ряд распределенных операций по оценке общего состояния всех объектов системы.

На примере выполнения вспышек света жуками-светляками показано, что разработанные для технических объектов способы синхронизации доступны простым объектам природы и могут выполнить длительный процесс синхронизации с малыми воздействиями на синхронизацию по единственному синхросигналу.

Список литературы

1. Стецюра Г.Г. Скорость реакции на внешние события объектов двух видов цифровых распределенных систем // Доклад на ВСПУ-2024.
2. O’Keeffe K.P., Kravivsky P.L., Strogatz S.H. Synchronization as Aggregation: Cluster Kinetics of Pulse-Coupled Oscillators // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 115, No. 6. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.064101> (дата обращения 23.01.2024).
3. Строгац С. Ритм Вселенной. МИФ. 2017. 384 с.
4. Ланда С.Б. Коммуникация у светляков // Санкт-Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН. <https://www.zin.ru/ANIMALIA/COLEOPTERA/RUS/firefli1.htm> (дата обращения 23.01.2024).
5. Ланда С.Б. Световая коммуникация жуков-светляков *Luciola mingrelica* (Coleoptera, Lampyridae). Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.б.н. С.Пб., 1997.
6. 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. 3-26. DOI: <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2022-13-4-3-24> (дата обращения 23.01.2024).

7. Bosiljevac M., Babić D., Sipus Z. Reaching <100 ppm/K output intensity temperature stability with single-color light-emitting diodes // Applied Optics. 2016. Vol. 55. No. 3. P. 9060-9066. <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-55-32-9060> (дата обращения 23.01.2024).