

# МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Г.Г. Стецюра**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [stetsura@ipu.ru](mailto:stetsura@ipu.ru)

**Ключевые слова:** распределенные цифровые системы управления, распределенные вычисления, синхронизация, мобильные роботы, кластеры компьютеров

**Аннотация:** Приведены результаты исследований по ускорению взаимодействия в группах активных объектов, входящих в состав распределенных вычислительных и управляющих систем. Ускорение достигается за счет быстрого выполнения следующих распределенных операций: синхронизации, барьерной синхронизации, устранения конфликтов при обмене сообщениями, выполнения непосредственно сетевыми средствами распределенных вычислений, одновременной реконфигурации всех связей системы. Эти возможности рассмотрены для групп мобильных объектов, например, мобильных роботов и сложных стационарных систем (кластеров компьютеров, суперкомпьютеров).

## 1. Введение

В докладе приведены последние результаты проводимых в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) исследований по ускорению взаимодействия в группах активных объектов (далее объектов) распределенных вычислительных и управляющих систем – объектов, которые могут непосредственно влиять на действия системы. Полученные решения существенно повышают скорость выполнения ряда распределенных операций и повышают реактивность систем, работающих в режиме жесткого реального времени (ЖРВ) за счет расширения функций средств взаимодействия (сетевых средств) объектов.

Современные сетевые средства в основном выполняют передачу сообщений, содержащих только данные. Это типично как для мобильных систем [1, 2], так и для стационарных систем, включая крупномасштабные сети передачи данных. Однако, в крупномасштабных сетях начала широко применяться также передача в сообщениях команд, воздействующих на организацию сетевых средств. Так действуют предложенные в 90-е годы XX века активные сети [3] и позднее программно конфигурируемые сети (SDN) [4]. В них команды воспринимаются программными средствами узлов сети, которые организуют промежуточные вычисления над данными в сообщениях и корректируют конфигурацию сети. Это позволяет более эффективно использовать сетевые средства, гибко управлять ими и адаптировать их под требования конкретных задач.

Ускорение распределенных операций, требуемое управляющим и вычислительным системам в режиме ЖРВ, в задачи этих сетей не входит.

Для работы в режиме ЖРВ в ИПУ РАН в 80-е годы проводились работы, по расширению функций средств связи промышленных систем управления [5]. Для этого над сообщениями выполнялись вычисления без обращения к программам узлов сети, и без задержки на проведение вычисления. Применялись групповые команды, которые поступали в сообщениях к объектам, соединенным общим каналом связи. Объекты, не задерживая команду, своими сетевыми средствами выполняли вычисления над данными, находящимися непосредственно в сообщении-команде. Измененная команда, дополненная данными предыдущих объектов, поступала к следующему объекту, и т.д., обходя все объекты. Преобразование содержимого сообщений сетевыми средствами существенно повышало быстродействие системы и скорость реакции на события.

Полученные в этих ранних исследованиях результаты были расширены, перенесены на другие виды систем, в 2017, 2018 г.г. на системы мобильных роботов, компьютерные кластеры и суперкомпьютеры [6-8]. Эти результаты положены в основу доклада.

В разделе 2 доклада кратко рассмотрены структура связей мобильной системы, операции управления взаимодействием объектов. В разделе 3 – распределенные вычисления, выполняемые сетевыми средствами системы. В разделе 4 – сетевое взаимодействие в стационарных системах. Детали содержатся в [6-8].

## 2. Сетевое взаимодействие в системе мобильных объектов

### 2.1. Структура связей, создание системы

Система объектов на рис. 1 состоит из группы мобильных объектов  $O_i$  и мобильного модуля связи ( $MS$ ).

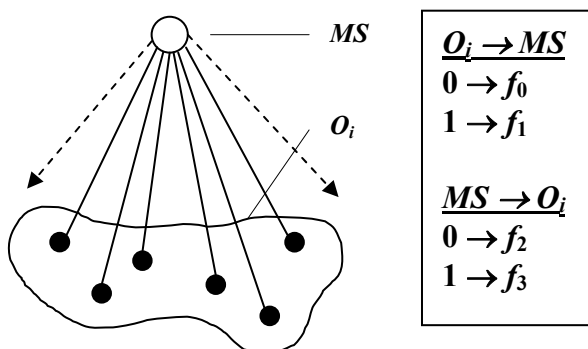


Рис. 1. Связи в системе мобильных объектов.

Объекты посылают в  $MS$  радио или оптические двоичные сигналы 0 и 1 на частотах  $f_0$  и  $f_1$ ,  $MS$  возвращает эти сигналы широкоэмиттерно всем объектам, но на других частотах  $f_2$  и  $f_3$  соответственно. Объекты принимают только сигналы  $f_2$  и  $f_3$  поэтому для них единственным источником сигналов служит  $MS$ .

Такая структура создается без внешней команды по следующей схеме [6]. Пусть части объектов требуется взаимодействие с другими объектами. В ней выделяется лидер, который назначает  $MS$ . Объектам присвоены номера, и лидером становится объект с наибольшим номером [6]. Лидер требует от объектов определить их удаленность от  $MS$ . Объекты также определяют максимальную удаленность объектов от  $MS$ . После этих действий система создана.

Таким образом, на рис. 1 функции  $MS$  может выполнять любой объект, и система состоит из однородных объектов, в ней быстро выполняется реконфигурация связей, переключаящая объекты на новый модуль  $MS$ .

## 2.2. Синхронизация доступа объектов к $MS$

Задача синхронизации – доставка сообщений объектов в  $MS$  с совпадением одноименных разрядов или одного за другим, как единого сообщения [6-8]. Возможна синхронизация по специальной команде, устранение конфликта доступа к  $MS$  и барьерная синхронизация. В первом варианте синхронизации один из объектов посылает через  $MS$  всем объектам команду синхронизации, получив ее, объекты посылают сообщения в  $MS$  с задержкой, учитывающей расстояние объекта от  $MS$ . Во втором варианте при отсутствии сигналов  $MS$  объекты начинают передавать сообщения, обнаруживают конфликт в  $MS$ , посылают в  $MS$  двоичную шкалу, с количеством разрядов равным количеству объектов и единицами в разрядах объектов, которым требуется передать сообщение. Получив от  $MS$  эту шкалу, объекты упорядоченно передают сообщения. Конфликт устранен, причем одновременно для всех объектов. При асинхронной барьерной синхронизации участвующие в ней объекты посылают в  $MS$  сигналы на частоте  $f_4$ , который возвращает объектам сигнал на частоте  $f_5$ . Завершив работу, объект снимает сигнал  $f_4$ . Прекращение прихода к объектам  $f_5$  – момент синхронизации. Длительность всех видов синхронизации зависит в основном от времени перемещения сигналов между объектами системы.

## 3. Распределенные вычисления в $MS$

### 3.1. Поразрядные логические операции

#### *И, ИЛИ, операции $max$ , $min$*

Объекты синхронно поразрядно передают аргументы операции в  $MS$ . Если в операции **И** объекты от  $MS$  в результате наложения аргументов получают в любом разряде только сигнал 1, для этого разряда результат операции равен 1, иначе 0. Если в операции **ИЛИ** объекты получают от  $MS$  только сигнал 0, для этого разряда результат операции равен 0, иначе 1. Эти операции выполнены в сетевом средстве –  $MS$  без задержки сигналов, время вычисления не зависит от количества участников операции.

Для вычисления  **$max$ ,  $min$**  введем следующее представление чисел. Цифры чисел в  $p$ -ичной системе представлены двоичными шкалами. Количество битов в шкале равно  $p$ . Только один бит, соответствующий значению цифры, равен 1, остальные 0. Например, для  $p = 10$  и цифры 7 шкала имеет вид 001000000.

Для вычисления  **$max$**  объекты передают в  $MS$  старшую цифру своего числа и при получении от  $MS$  шкалы с несколькими единицами определяют наибольшее значение цифры. Следующую цифру передают объекты, передавшие наибольшую старшую цифру. После передачи всех цифр получен  **$MAX$** . Для  **$MIN$**  находят наименьшие значения переданных цифр. Увеличение основания  $p$  ускоряет операцию, т.к. уменьшается количество обменов сообщениями.

### 3.2. Аналого-цифровые вычисления

Для этих вычислений в  $MS$  добавляется аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Объекты поочередно посылают в  $MS$  двоичные разряды шкал цифр своего числа, как указано в п.3.1. АЦП модуля связи формирует частичные суммы энергии сигналов раз-

рядов шкалы и отправляет их объектам. Каждый объект из частичных сумм формирует общую сумму. Время такого суммирования не зависит от числа участников операции. Частный случай суммирования – счет: объекты передают двоичные шкалы произвольной длины, разряды которых (1, 0, отсутствие сигнала) соответствуют признакам некоторых ситуаций. Суммирование во всех разрядах шкалы фактически создает гистограмму, оценивающую ситуацию в целом. Вычисления раздела 3 могут использоваться как быстрые распределенные ассоциативные операции [7].

#### 4. Сетевое взаимодействие в стационарных системах

Сетевые решения, предложенные для мобильных систем, существенно отличаются от решений для стационарных систем. Стационарность объектов позволила одновременно применить количество  $MS$ , равное и превышающее количество объектов [7, 8]. Используются стационарные направленные беспроводные оптические связи, и каждый объект может направить сигналы в любой  $MS$ . При этом  $MS$  содержит ретрорефлектор, возвращающий объекту его сигналы. Объект посылает сигналы сообщения  $S_1$  и непрерывный сигнал приема  $S_2$ . Сигнал  $S_1$  любого источника, поступивший в  $MS$ , модулирует сигналы  $S_2$  всех связанных с этим  $MS$  объектов одновременно, и все объекты получают посланное в  $MS$  сообщение.

Наличие многих  $MS$  позволило запускать одновременно большое количество потоков передачи сообщений и вычислений. В каждом потоке пары объект –  $MS$  объединяются в цепочку, на которой синхронно выполняются конвейерные вычисления без затрат дополнительного времени по сравнению со временем передачи сообщения. Возможны вычисления, выполняемые в конвейере асинхронно с регулированием их продвижения с помощью быстрой барьерной синхронизации. Отметим, что в мобильных системах, несмотря на наличие только одного  $MS$ , также возможны конвейерные вычисления, промежуточные результаты которых передаются в едином для всех объектов сообщении, что и дает ускорение.

#### 5. Заключение

Приведем сводку результатов рассмотренных в докладе исследований.

Общий результат – повышены быстродействие и реактивность распределенных управляющих и вычислительных систем за счет быстрой синхронизации действий объектов системы и выполнения распределенных вычислений непосредственно ее сетевыми средствами.

Этот результат базируется на совокупности следующих частных решений.

1) В исходном состоянии система создается из совокупности не связанных между собой объектов децентрализованно и автономно без необходимости вмешательства внешнего центра управления.

2) Обмены сообщениями между объектами выполняются через простые объекты-модули связи, в которых во многих случаях не требуется наличие логических элементов.

На пути между источником и приемником сообщения всегда находится только один модуль связи.

3) Реконфигурация связей между объектами системы в зависимости от расстояния между ними выполняется в микросекундном и субмикросекундном диапазоне. Все свя-

зи системы одновременно перестраиваются одной командой, посылаемой любым объектом системы остальным объектам.

Структура связей адаптируется не только под конкретную задачу в целом, но и под текущие требования алгоритма ее решения.

4) Конфликт при передаче сообщений устраняется одновременно для всех конфликтующих объектов, после чего объекты в едином общем сообщении передают свои сообщения.

5) Предложена синхронизация действий объектов, позволяющая всем объектам доставить адресатам сообщения одновременно, с совмещением одноименных разрядов сообщений у адресата.

Это позволяет сетевым средствам системы выполнять распределенные вычисления с участием сообщений всех источников за время, требуемое для передачи только одного сообщения: логические операции *И*, *ИЛИ*, определение *max*, *min*, суммирование, вычитание. Выполняются конвейерные вычисления. Ускоряются распределенные ассоциативные операции.

6) Быстрые сетевые взаимодействия упрощают вычислительные средства объектов, распределяя необходимые локальные вычисления между объектами системы.

7) При отказах объектов группа оставшихся работоспособных объектов формирует новую систему с приведенными выше функциональными возможностями.

Отметим, что системы, приведенные в докладе, допускают способы решения задач, которые обычно считаются неэффективными. В частности увеличение количества обращений к сетевым средствам не замедляет, как обычно, а ускоряет вычисления, приведенные в п.5 заключения.

Для получения высоких уровней быстродействия и реактивности расстояние между объектами рассмотренных в докладе систем ограничено. Это ограничение можно частично снять подключением системы к любой другой распределенной на большие расстояния сети, узлы которой способны формировать приведенные в докладе локальные сетевые системы. Каждый такой узел сформирует в своей окрестности быструю распределенную систему и передаст результаты ее работы в другие удаленные узлы сети.

## Список литературы

1. Yan Z., Jouandea N., Ali Cherif A.A Survey and Analysis of Multi-Robot Coordination // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10. P. 1–18. <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.5772/57313>
2. Dorigo M. Swarm robotics // Scholarpedia. 2014. 9(1):1463. doi:10.4249/scholarpedia.1463
3. Tennenhouse D. et.al. A Survey of Active Network Research // IEEE Communications Magazine. 1997. Vol. 35, No. 1. P. 80-86. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2288938>
4. Kreutz D., Ramos F.M.V., Verissimo P., et.al. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. 2014. P. 61. <https://arxiv.org/pdf/1406.0440.pdf>
5. Прангишвили И.В., Подлазов В.С., Стецюра Г.Г. Локальные микропроцессорные вычислительные сети. М.: Наука, 1984. 176 с.
6. Стецюра Г.Г. Сетевая информационно-вычислительная поддержка взаимодействия подвижных роботов // Проблемы управления. 2018. № 5. С. 47-56. [http://pu.mtas.ru/archive/Stetsyura\\_518.pdf](http://pu.mtas.ru/archive/Stetsyura_518.pdf)
7. Stetsyura G. Means for Fast Performance of the Distributed Associative Operations in Supercomputers // Труды международной конференции Russian Supercomputing Days 2017. RussianSCDays.org. 2017. P. 199-210. <http://2017.russianscdays.org/files/pdf17/199.pdf>
8. Стецюра Г.Г. Компьютерная сеть с быстрой распределенной перестройкой своей структуры и обработкой данных в процессе их передачи // Проблемы управления 2017. № 1. С. 47–56. [http://pu.mtas.ru/archive/Stetsyura\\_117.pdf](http://pu.mtas.ru/archive/Stetsyura_117.pdf) Также опубликовано как <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0005117918040124> (Engl.)