

О ПАРАЛЛЕЛИЗМЕ НЕОДНОРОДНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМНЫХ СЕТЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

М.Ф. Каравай

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

А.М. Михайлов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

1. Введение

В докладе рассмотрены проблемы одной из важнейших составляющих практически любой УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ (особенно Бортовых Вычислительных Управляющих Систем -- БВУС) в таких областях техники как космонавтика, авионика, автономные мобильные аппараты, робототехника, управление оружием, многоядерные микропроцессоры. Это не отдельный прибор или устройство, это «системная сеть», т.е. своеобразный «хребет» БВСУ, информационно объединяющий множество датчиков, преобразователей, вычислителей, управляющих и исполнительных устройств. Отказ «системной сети» приводит к отказу всего объекта. Естественно, на всех упомянутых объектах уже существуют их «системные сети», причём в подавляющем большинстве случаев архитектура этих сетей была разработана 40÷30 лет назад, когда требования к динамике (быстродействия принятия решений) и надёжности работы системной сети удовлетворяли техническим условиям того времени. Требования к БВУС по надёжности и производительности постоянно растут. Авионика современных космических аппаратов должна выполнять свои функции в течение 10 - 15 лет без обслуживания, т.е. быть «надёжной» и «отказоустойчивой». Такие же требования пора предъявлять к авионике беспилотных, военных и гражданских самолётов. Вычислительное ядро БВУС нового поколения должно быть высокопроизводительным для решения ряда наукоёмких задач реального времени, например, таких как управление оружием, противостояние рою беспилотных аппаратов или обработка данных от датчиков двигателей для установления их текущего состояния. Отказоустойчивость систем должна базироваться на возможностях реконфигурации архитектуры сети и свободного её масштабирования, т.е. добавление или удаление абонентов без изменения архитектуры сети и её программного обеспечения.

2. В каком направлении ищутся решения для системных сетей нового поколения?

Современные системные сети, продолжают базироваться на архитектурах типа ГОСТ Р 52070-2003 (МКИО) и отечественных аналогов комплекса сетей ф. ARINC (например, в авиации для МС-21). Все они – шинные или многошинные. Владеет шиной «мастер» или «контроллер». Поэтому доступ к шине для передачи информации

– последовательный. Если контроллер единственный, то он определяет, кому из абонентов и когда выходить на шину. Захват шины при нескольких активных устройствах (Ethernet) - разрешается в соответствии с различными протоколами. Все эти сети – **последовательные** по работе **активных абонентов**. Отсюда их простота и наименьшая производительность. В подобных случаях магистральным путём повышения производительности таких сетей становится многошинность. Для достижения новых выдвигаемых требований используют всё более высокие частоты в микропроцессорах, системах памяти, интерфейсах и в самих шинных системных сетях. Но тут есть предел. В авионике уже работают на $2 \div 4$ ГГц. Это экстенсивный путь развития. Далее возникают большие трудности.

Решение перечисленных задач следует искать в рамках параллельных сетей нового поколения, производительность которых растёт не за счёт использования сверхвысоких частот, достигающих уже в авионике $2 \div 4$ ГГц, а за счёт параллельной работы микропроцессоров вычислительного ядра сети и сетевых интерфейсов умеренного частотного диапазона в $20 \div 600$ МГц. Это тоже «магистральный» путь повышения производительности на основе сетей подобного класса. Альтернатива - только параллелизм. Суперкомпьютеры это убедительно демонстрируют. В этих сетях одновременно активными (передающими) могут быть более одного абонента (микропроцессора), вплоть до всех. В этом частотном диапазоне меньше энергопотребление и уровень излучаемых помех, меньше чувствительность к внешним помехам и большая радиационная стойкость.

Если коротко сформулировать, какими функциональными свойствами должны обладать сети нового поколения, то это следующие.

- 1) Возможность автономной бесконфликтной параллельной работы абонентов вычислительного ядра для достижения максимальной производительности.
- 2) Бесконфликтная **параллельная** информационная передача **от любого абонента ядра** к любому абоненту сети.
- 3) Бесконфликтная самомаршрутизация любого абонента ядра.

Подобных управляющих системных сетей пока не существует.

В докладе рассматривается новый подход к проектированию гетерогенных параллельных управляющих системных сетей, т.е. содержащих (достаточно много) пассивных абонентов сети и активное вычислительно-управляющее ядро, объём которого определяется требуемой максимальной производительностью. Ядро может содержать от 2-х до 4-6-10 и более микропроцессоров, частично или полностью работающих в синхронном режиме для решения наиболее ответственных задач, или работать автономно и независимо, решая параллельные задачи и бесконфликтно управляя «пассивными» абонентами. Различные аспекты этого подхода нашли отражение в приведённых публикациях. Они отражают уже определившийся на ближайшие десятилетия магистральным путём развития электроники - это параллелизм и реконфигурация. Эти два направления на самом деле тесно связаны, поскольку должны базироваться на одной специальной (минимальной!) топологии, которая в логическом смысле эквивалентна полному графу. Такая минимальная статическая топология в виде неполных симметричных уравновешенных «блок-схем» (block-designs) $B(N, s, \sigma)$, эквивалентных двудольным графам специальной топологии, была найдена в алгебраической комбинаторике [1]. Здесь N – число блоков (абонентов) блок-схемы, s – степень (валентность) блоков, σ – число различных (прямых) маршрутов между любой парой блоков. Они были названы квазиполными графами [2]. В этой статической топологии динамически реализуются бесконфликтные **параллельные** связи как в полном графе. В ИПУ РАН последние годы разрабатывается теория структурного

параллелизма. На этой базе предлагается строить локальные системные сети для высокопроизводительных БВУС [3-5].

3. Основные топологические функционалы сети

Надо понимать, что «сами по себе» новые топологии ничего не решают, но они открывают для ПО принципиальную возможность достижения оптимальных основных функциональных характеристик сети:

- наивысшей возможной производительности сети при автономной параллельной работе ядра. Синхронность работы для наивысшей достоверности. Работа в любых частичных соотношениях синхронность-достоверность;
- полнота **параллельного** прямого (т.е. без «захода» в другие абоненты) доступа **между активными абонентами** сети как между собой, так и между всеми остальными абонентами;
- отсутствие конфликтов при параллельной маршрутизации;
- возможность параллельной независимой самомаршрутизации;
- возможности динамической реконфигурации для отказоустойчивости;
- наличие в сети альтернативных маршрутов доступа;
- возможность масштабирования (в заданных рамках).

Каждая из этих проблем по существу характеризует соответствующий функционал системной сети. И новые разработки управляющих системных сетей уже не могут базироваться на постепенных улучшениях уже существующих разработок – шинных и мультишинных сетях, поскольку последние за прошедшие 40-30 лет «вылизаны» до предела. Принципиально новыми должны быть сети, в которых указанные функционалы были бы **оптимальными** в совокупности. Ещё в конце XX века в одном специальном американском журнале подобные «гипотетические» сети были названы идеальными (*ideal system networks*) [6]. Было ясно к чему надо стремиться, но оставалось неизвестным как это реализовать. Нам это определение понравилось, и мы ввели его в обиход.

Но! Параллелизм таил в себе несколько серьёзных трудностей. Первая: а можно ли в принципе построить многопроцессорную сеть для подобных задач?

Все проблемы, по сути, сводятся к одной математической: можно ли в сети из N абонентов реализовать любую алгебраическую перестановку $N \leftrightarrow N$ (каждый - одному). И таких различных пересылок N -факториал ($N!$). Их очень много, но ведь это сигналы управления, они фактически не предсказуемы, а конфликтовать не имеют права. Решение этих проблем было найдено на базе квазиполных графов [2]. В локальных управляющих сетях принято разделять абоненты на активные и пассивные. Первые выполняют роль вычислительного или управляющего ядра сети, и им требуется **полный доступ** ко всем абонентам сети. Вторые – в значительной мере более пассивны (например, силовые исполнительные регистры) и им, за редким исключением, требуется доступ только к абонентам **вычислительного ядра** сети. В частности, они не требуют доступа к другим пассивным абонентам. Последнее позволяет существенно упростить структуру сети, сохранив при этом бесконфликтность передачи параллельных пакетов, самомаршрутизацию абонентов ядра и полную параллельную доступность любого абонента любым абонентом ядра. Это будет проиллюстрировано в докладе.

4. Основные исходные требования

Покажем на примере небольшой гетерогенной системной сети с 21 абонентами как работает предложенный подход. Исходные требования:

1. Спроектировать параллельную бесконфликтную управляющую сеть, содержащую (в качестве примера) $N=21$ абонентов, из которых 4 абонента – это микропроцессоры для управления сетью и резервирования, остальные 17 абонентов – пассивные.
2. Ядро сети – должно быть полносвязным (квазиполносвязным). Любой пассивный абонент должен быть доступен четырём активным абонентам по разным маршрутам.
3. Обосновать минимальность (или избыточность) построенной сети.

5. Решение

В данном материале мы не будем рассматривать собственно проектирование заданной блок-схемы $B(N, s, \sigma)$, поскольку это уже было сделано значительно раньше. Подробности можно найти в библиографии [4-6].

1. На рис. 1 каждая строка и каждый столбец таблицы содержат по 5 отмеченных знаком 1 клеток. Опустим математическое обоснование минимальности таблицы $B(21,5,1)$ и заметим, что она является таблицей инцидентностей требуемой блок-схемы.

Structure of local control network with 4 active nodes (the computing core) and 17 passive nodes [$B(21,5,1)$], Table 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	1	1	1	1																	
2	1				1	1	1	1													
3	1								1	1	1	1									
4	1												1	1	1	1					
5	1																1	1	1	1	
6		1																			1
7		1																			1
8		1																			1
9		1																			1
10		1																			1
11		1																			1
12		1																			1
13		1																			1
14		1																			1
15		1																			1
16		1																			1
17		1																			1
18		1																			1
19		1																			1
20		1																			1
21		1																			1

Рис. 1

2. Исходная таблица без всяких цветных разметок представляет собой таблицу инцидентностей *симметричной неполной блок-схемы (Block-design)* $B(21,5,1)$. В таком виде она изоморфна *минимальному (!)* квазиполному распределённому коммутатору для 21 абонента. Это означает возможность параллельной бесконфликтной передачи информации (*пакетов*) по сети в виде произвольной алгебраической перестановки. При этом строки таблицы интерпретируются как абоненты (*управляющие и исполнительные устройства, например, процессоры, преобразователи, двигатели и др.*), а столбцы – как локальные коммутаторы, реализующие показанные в таблице соединения и, по сути, реализующие распределённый коммутатор сети. Напомним, что каждый

локальный коммутатор представляет собой полный (или квазиполный) коммутатор ($n \times n$), где $n = \lceil \sqrt{N} \rceil$,

3. Выберем 4 произвольных строки в таблице (выделены голубой заливкой). Они представляют 4-х активных абонентов сети. В каждом из них реализуется виртуальная многопортовость для связи с различными локальными коммутаторами. Найдём все столбцы таблицы, пересечения которых с выделенными строками не содержат клеток, отмеченных знаком 1 (столбцы отмечены красной заливкой). Найденные столбцы содержат по пять отмеченных клеток, характеризующих связи только пассивных абонентов между собой, и они будут удалены при синтезе сети.

Список литературы

1. Холл М. Комбинаторика // М.: Мир, 1970. 424 С. Главы 10-12.
2. Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С., Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем) // Автоматика и телемеханика. 2009. № 2. С. 153-170.
3. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Метод инвариантного расширения системных сетей многопроцессорных вычислительных систем. Идеальная системная сеть // Автоматика и телемеханика. 2010. № 12. С. 166-176.
4. Подлазов В.С., Соколов В.В. Однокаскадные коммутаторы большой размерности для многопроцессорных и многомашинных вычислительных систем // Проблемы управления. 2006 № 6. С. 19-24.
5. Karavay M.F., Mikhailov A.M. Design of local heterogeneous system control networks of a new generation with the preservation of the optimality of the main topological functionals of the network // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Vol. 2091. <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/2091/1>.
6. Finn A.M., Decker R.O. A network architecture for radar signal processing // AIAA/IEEE 8th digital avionic systems conference. San Jose, Calif., Oct. 1988. P. 614-621.