

УДК 681.323

## О НЕКОТОРЫХ СТРУКТУРАХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И АЛГОРИТМАХ МАРШРУТИЗАЦИИ В НИХ

В.И. Жиратков

### Введение

Распределенная обработка информации является одним из основных направлений, развивающихся в настоящее время в области вычислительной техники. Особое развитие она получила в связи с появлением дешевых, но логически достаточно мощных микро-ЭВМ. Объединение определенного количества микро-ЭВМ в систему позволяет получить мощное вычислительное средство при сравнительно небольших дополнительных затратах [1]. Одним из классов систем, которые могут быть построены на базе микро-ЭВМ и программно совместимых с ними мини-ЭВМ, являются распределенные вычислительные системы [2]. Распределенной вычислительной системой будем называть коллектив вычислителей, объединенных физически и логически с помощью программно-управляемой сети связи в единую систему, в которой общее управление осуществляется распределенной (децентрализованной) управляющей системой. Управляющая программа руководит всеми физическими и логическими ресурсами, но ее основная логическая структура и структура данных повторяются во всех ЭМ системы (ЭМ - элементарная машина - вычислительный модуль, включающий в себя собственно ЭВМ и системное устройство [1]). Эти копии основных структур являются отдельными модулями, которые действуют одновременно, асинхронно для образования единого целого.

В работе рассматриваются некоторые вопросы, связанные с выбором структуры управляющих распределенных вычислительных систем и для некоторых структур приведены алгоритмы маршрутизации.

## Распределенные вычислительные системы

Данное во введении определение распределенных вычислительных систем является не совсем точным, поскольку оно охватывает широкий класс вычислительных систем, в частности, и сосредоточенные ВС. Для уточнения отметим, что в распределенных ВС обмен информации между ЭМ осуществляется, как правило, последовательным кодом, в то время как в сосредоточенных ВС такой обмен осуществляется в параллельном виде.

Мы не накладываем никаких ограничений на расстояние между ЭМ в распределенных ВС, отметим только, что его величина влияет на набор функций, выполняемых управляющей системой, и организацию функционирования ВС.

В настоящее время широким фронтом ведутся исследования по проектированию так называемых локальных вычислительных систем и сетей. В таких системах ЭМ расположены в ограниченном пространстве, что приводит к незначительным длинам каналов связи между машинами. Такие системы устанавливаются в учреждениях, научных лабораториях и институтах, в цехах предприятий и т.д. [3]. В большинстве своем они являются распределенными вычислительными системами.

Особый интерес представляют распределенные ВС для управления рассредоточенными объектами в реальном масштабе времени. Для вычислительных систем реального времени важнейшими характеристиками являются время реакции на некоторое событие, надежность и живучесть, простота управления, способность к расширению. Важным свойством управляющих распределенных ВС является то, что ее вычислительные модули (ЭМ) могут быть расположены в непосредственной близости от источников информации. Поскольку в распределенных ВС одним из режимов является режим параллельной обработки, то такие системы могут достаточно гибко реагировать на ситуации, когда на отдельных управляемых объектах появляется необходимость в резком увеличении мощности вычислительных средств. Параллельные взаимодействующие процессы, протекающие в различных ЭМ, синхронизируются путем обмена сообщениями.

Так как ЭМ системы связаны между собой программно-управляемой сетью связи, то, в зависимости от обстоятельств, система легко может быть реконфигурируема.

Основные характеристики распределенной ВС в значительной степени зависят от ее структуры, т.е. топологии связей между ЭМ. Ниже рассматриваются некоторые вопросы, связанные с системами кольцевой структуры с дополнительными связями.

## Распределенные ВС кольцевой структуры с дополнительными связями

Под структурой системы понимается граф  $G$ , вершинам которого сопоставлены элементарные машины, а ребрам - каналы связи между ними. Структура системы влияет на механизмы, обеспечивающие организацию межмашинных (межпроцессорных) взаимодействий, и, следовательно, на сложность программных и аппаратных средств взаимодействия ЭМ и процессоров. При выборе структуры распределенной ВС необходимо учитывать, что каналы связи не являются абсолютно надежными, т.е. сообщения могут искажаться или теряться; каналы связи могут отказывать полностью или частично, задержка передачи сообщений может изменяться; ЭМ могут отказаться в любое время; ЭМ могут включаться в работу в любое время.

Простые кольцевые структуры обладают рядом достоинств перед другими структурами [3], однако наличие только одного одно- или двунаправленного канала связи между ЭМ приводит к ухудшению ряда важных характеристик (живучести, надежности, задержки).

Так, для однонаправленной кольцевой структуры выход из строя одного канала в однонаправленном кольце выводит из строя всю систему. В кольцевой структуре с двунаправленными каналами связи выход из строя одного канала (или узла) не приводит к полному разрушению системы, однако ведет к увеличению времени обмена между узлами (к увеличению задержки передачи информации между ЭМ). Как известно [1], структурная задержка определяется диаметром структуры  $d$ , которая для простых кольцевых структур с двунаправленными связями равна  $d = N/2$ , где  $N$  - число узлов.

Введение дополнительных связей улучшает указанные характеристики, однако приводит к усложнению программного обеспечения, так как появляется необходимость в введении процедуры маршрутизации.

Рассмотрим два типа кольцевых структур с дополнительными связями: четырехсвязные (рис.1) и трехсвязные структуры или хордовые структуры (рис.2) [4-7]. Эти структуры характеризуются общим числом узлов  $N$ , длиной дополнительных связей  $r$  (под длиной дополнительной связи понимается число ребер основной структуры, которые покрывает эта связь, диаметром  $d$  и средним диаметром  $d^*$ .  $d = \max_{i,j \in G} \{d_{ij}\}$ , где  $d_{ij}$  - минимальное число ребер, образующих путь из узла  $i$  в узел  $j$  [1].

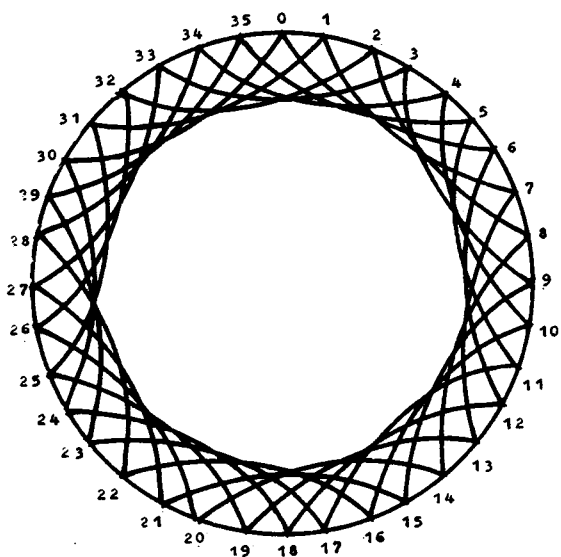


Рис. I

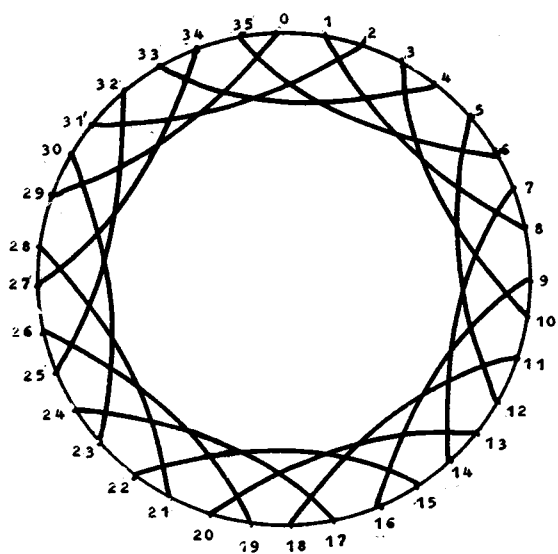


Рис. 2

Средний диаметр в силу регулярности структуры определяется как

$$d^* = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} d_{ij} \right].$$

Для описываемых структур  $d$  близко к величине  $\sqrt{N}$ . Длина  $g$  дополнительных связей выбирается равной  $\lceil \sqrt{N} \rceil$ , где  $\lceil x \rceil$  - ближайшее целое число, большее  $x$ . Отметим, что для оптимальных структур, с точки зрения минимального диаметра, значение  $g$  может отличаться от приведенного выше.

### Маршрутизация в кольцевых структурах с дополнительными связями

Введение дополнительных связей для повышения пропускной способности системы надежности и живучести приводит к необходимости использования алгоритмов маршрутизации для передачи информации из узла  $i$  в узел  $j$ .

Н	Х	К	$\bar{K}$
---	---	---	-----------

Рис.3

	Н	Х	К	$\bar{K}$
0	0	2	0	0
1	0	2	0	1
2	0	2	0	2
	.	.	.	.
9	0	0	3	0
10	0	0	2	0
11	0	0	1	0
	.	.	.	.
19	1	1	1	0
20	1	1	3	0
21	1	1	3	0
	.	.	.	.
27	1	2	3	0
28	1	2	4	0
	.	.	.	.
33	1	2	0	3
34	1	2	0	2
35	0	2	1	

Рис. 4

Для достижения узла назначения при обмене информацией между узлом  $i$  и узлом  $j$  сообщения передаются по кольцу и по дополнительным связям в двух направлениях - по или против часовой стрелки. При этом для каждого минимального пути задается начальное направление движения по кольцу. Каждый узел содержит таблицу минимальных путей к другим узлам системы. Строка такой таблицы представляет собой, по существу, адрес соответствующего узла назначения и содержит четыре поля (рис.3). Поле  $H$  указывает направление передачи информации от источника  $i$  к потребителю  $j$  по кольцу:  $H = 1$  - движение осуществляется по часовой стрелке,  $H = 0$  - против часовой стрелки. Поле  $K$  определяет, какое число ребер по кольцу нужно пройти для достижения узла  $j$  по направлению, указанному  $H$ . Поле  $\bar{K}$  определяет то же, что и поле  $K$ , только в направлении, противоположном  $H$ . Поле  $X$  указывает, сколько дополнительных связей

необходимо пройти для достижения узла  $j$ . На рис. 4 приведена таблица маршрутизации для 12-го узла четырехсвязной структуры (рис. 1).

Аналогичные таблицы составляются и для трехсвязной структуры.

Для адреса назначения  $A_H$  и адреса источника  $A_I$  справедливы следующие соотношения: при движении по часовой стрелке  $A_H^1 = (A_I + Xg + K - \bar{K}) \bmod N$ ; при движении против часовой стрелки  $A_H^0 = (A_I - Xg + K - \bar{K}) \bmod N$ .

Для структуры, представленной на рис. 1,  $g = 6$ .

Рассмотрим алгоритмы маршрутизации для структуры, показанной на рис. 1, для двух случаев: 1) неисправностей в системе нет; 2) неисправен либо один канал, либо один узел. Следует отметить, что влияние неисправности канала связи или узла одинаково действует на алгоритм маршрутизации, поэтому при описании алгоритмов не будем их различать.

АЛГОРИТМ 1. Неисправности в системе отсутствуют, все каналы двунаправленные.

1. Анализ  $H$ . Если  $H = 0$ , то II, иначе
2. Анализ поля  $\bar{K}$ . Если  $\bar{K} = 0$ , то 9, иначе
3. Анализ поля  $K$ . Если  $K \neq 0$ , то 7, иначе
4. Анализ поля  $X$ . Если  $X = 0$ , то 20, иначе
5. Увеличение текущего адреса  $A_T$  на  $g$ ,  $A_T + g$ .
6.  $X := X - 1$ , переход к шагу 4.
7.  $A_T := A_T + 1$ .
8.  $K := K - 1$ , переход к шагу 3.
9.  $A_T := A_T - 1$ .
10.  $K := K + 1$ , переход к шагу 2.

II-19. Эти шаги алгоритма аналогичны шагам 2-10, только начало движения осуществляется в противоположном направлении и все операции суммирования заменяются на операции вычитания и наоборот.

20. Конец.

АЛГОРИТМ 2. Неисправен один из каналов связи (узлов), находящийся на пути из узла  $i$  в узел  $j$ .

1. Анализ  $H$ . Если  $H = 0$ , то 34, иначе
2. Анализ поля  $\bar{K}$ . Если  $\bar{K} \neq 0$ , то 25, иначе
3. Анализ поля  $K$ . Если  $K \neq 0$ , то 13, иначе
4. Анализ поля  $X$ . Если  $X = 0$ , то 66, иначе
5. Проверка условия: достигим ли соседний узел. Если нет, то 8, иначе

6.  $A_T := A_T + r$ .
7.  $X := X - 1$ , переход к шагу 4.
8.  $A_T := A_T + 1$ .
9.  $A_T := A_T + r$ .
10.  $X := X - 1$ .
11. Анализ поля X. Если  $X \neq 0$ , то 9, иначе
12.  $A_T := A_T - 1$ . Переход к шагу 66.
13. Проверка условия: достигим ли соседний узел. Если нет, то
- 16, иначе
14.  $A_T := A_T + 1$ .
15.  $K := K - 1$ , переход к шагу 3.
16. Анализ поля X. Если  $X \neq 0$ , то 20, иначе
17.  $A_T := A_T + r$ .
18.  $X := X - 1$ .
19. Анализ поля X. Если  $X = 0$ , то 3, в противном случае 17.
20.  $A_T := A_T + r$ .
21. Проверка условия  $A_T = A_H$ . Если да, то 66, иначе
22. Проверка условия  $(A_H - A_T) > 0$ . Если да, то 24, иначе
23.  $A_T := A_T + 1$ , переход к 21.
24.  $A_T := A_T - 1$ , переход к 21.
25. Проверка условия: достигим ли соседний узел. Если нет, то
- 28, иначе
26.  $A_T := A_T - 1$ .
27.  $K := K - 1$ , переход к шагу 2.
28. Анализ поля K. Если  $K = 0$ , то 31, иначе
29.  $A_T := A_T + 1$ .
30.  $K := K - 1$ , переход к шагу 28.
31. Анализ поля X. Если  $X = 0$ , то 2, иначе
32.  $A_T := A_T + r$ .
33.  $X := X + 1$ , переход к шагу 31.
- 34-65. Эти шаги алгоритма аналогичны шагам 2-33, при движении в противоположном направлении. При этом в соответствующих операторах "+" заменяется на "-" и наоборот.
66. Конец.

ПРИМЕР. Для простоты рассмотрим случай, когда неисправностей в системе нет. Допустим, что нужно передать сообщение из узла 7 в узел 22, т.е. адрес источника  $A_H = 7$ , а адрес назначения  $A_H = 22$ . Текущий адрес  $A_T$  определяется на каждом этапе прохождения сообщения через промежуточный узел. Из таблицы маршрутов, находящейся

в узле 7, извлекается строка, соответствующая узлу 22. Она имеет следующий вид: 

1	2	3	0
---	---	---	---

 .

Последовательность выполнения шагов алгоритма следующая:

1.  $\bar{N} = 1$ .
2.  $\bar{K} = 0$ .
3.  $K \neq 0$ .
7.  $A_T := A_T + 1, (A_T := 8)$ . Переход по кольцу в узел 8.
8.  $K := K - 1, K := 2$
3.  $K \neq 0$
7.  $A_T := A_T + 1, (A_T := 9)$  Переход по кольцу в узел 9.
8.  $K := K - 1, K := 1$
3.  $K \neq 0$
7.  $A_T := A_T + 1, (A_T := 10)$ . Переход по кольцу в узел 10.
8.  $K := K - 1, K := 0$
2.  $K = 0$
4.  $X \neq 0$
5.  $A_T := A_T + r, (A_T := 16)$ . Переход в узел 16.
6.  $X := X - 1, X := 1$
4.  $X \neq 0$
5.  $A_T := A_T + r, (A_T := 22)$ . Переход в узел 22.
6.  $X := X - 1, X := 0$
4.  $X = 0$
20. Конец.

В силу особенностей построения алгоритма (сначала анализируется  $K$ , а потом  $X$ ), сообщение движется по кольцу, а затем по дополнительным связям.

Алгоритмы маршрутизации для структуры, представленной на рис. 2, будут несколько отличаться от описанных выше. Это объясняется тем, что каждый узел  $i$  связан дополнительным ребром только с одним узлом  $j$  ( $i \neq j$ ). При этом для четных узлов ( $i = 0, 2, \dots, 2K$ ) дополнительная связь осуществляется с узлами  $(i-r) \bmod N$ , а для нечетных ( $i = 1, 3, \dots, 2K+1$ ) с узлами  $(i+r) \bmod N$  [5]. Для структуры, приведенной на рис. 2,  $r=7$ .

#### Заключение

Рассмотренные в работе структуры вычислительных систем кольцевого типа с дополнительными связями достаточно просты по своей организации, имеют высокую надежность и не требуют сложных алго-



ритмов маршрутизации. Однако можно предположить, что в случае многоадресных пересылок информации алгоритмы несколько изменят - ся в сторону усложнения.

### Л и т е р а т у р а

1. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Вычислительная система МИКРОС. - Новосибирск, 1983. (Препринт/ИМ СО АН СССР:ОБС-19).

2. ЕВРЕИНОВ Э.В., ЖИРАТКОВ В.И. Распределенные вычислительные системы и особенности их построения. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 63. Теория однородных вычислительных систем. Новосибирск, 1976, с. 109-120.

3. ПРАНГИШВИЛИ И.В., ПОДЛАЗОВ В.С., СТЕЩУРА Г.Г. Локальные микропроцессорные вычислительные сети. - М.: Наука, 1984. - 176 с.

4. RAGNAVENDRA C.S., GERLA M. Optimal loop topologies for distributed systems. - Proceedings of the Seventh Data Communications Symposium, Mexico City, 1981, p.218-223.

5. ARDEN R.W., LEE H. Analysis of Chordal Ring Network. - IEEE Trans.on Comp., 1981, N 4, p.291-295.

6. КОРНЕЕВ В.В. О макроструктуре однородных вычислительных систем. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 60. Вопросы теории и построения вычислительных систем. Новосибирск, 1974, с. 17-34.

7. МОНАХОВ О.Г. Параметрическое описание структур однородных вычислительных систем. - В кн.: Вопросы теории и построения вычислительных систем (Вычислительные системы, вып. 80). Новосибирск, 1979, с. 3-17.

Поступила в ред.-изд.отд.

2 октября 1984 года