



СИСТЕМНАЯ СЕТЬ «ОБОБЩЕННОЕ РАСШИРЕННОЕ МУЛЬТИКОЛЬЦО» В СРАВНЕНИИ С СЕТЬЮ «СПЛЮЩЕННАЯ БАБОЧКА»

В.С. Подлазов

Предложена системная сеть суперкомпьютеров с повышенным числом узлов и разных путей между ними, названная обобщенным расширенным мультикольцом. Дано сравнение характеристик предложенной сети и сети «сплющенная бабочка» при одинаковых размерах сетевых узлов и диаметрах сетей.

Ключевые слова: системная сеть, мультикольцо, сплющенная бабочка, обобщенный гиперкуб, коммутационные свойства, размер узла, число абонентов, диаметр сети.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общая задача создания эффективной системной сети с большим числом узлов, позволяющих подсоединять к сети десятки и сотни тысяч процессоров, не получила универсального решения. Общая задача внутренне противоречива, так как требует сочетать малые задержки передачи и малую сложность сетевого оборудования с возможностью объединения большого числа сетевых узлов. Обычно задержки характеризуются диаметром сети, а сложность сетевого оборудования — сложностью сетевых узлов и числом их портов, определяющих число каналов сети. Известные сети, т. е. частные решения, строятся на основе выделения одного или нескольких критериев как основных. Так, в сетях с топологией многомерных торов [1] ведущим критерием считается простота сетевого оборудования благодаря существенному увеличению диаметра сети. Наоборот, в сетях с топологией обобщенных гиперкубов [2] или двумерной иерархии полных графов [3] ведущим критерием служит минимизация диаметра сети путем увеличения сложности сетевого оборудования.

Системная сеть «сплющенная бабочка» (*Flattened Butterfly*) с n шагами (FBn) [4] считается перспективной системной сетью [5] для создания сетей связи в суперкомпьютерах на базе многопортовых коммутаторов-маршрутизаторов типа 64-портового коммутатора *YARC* [6]. Эта сеть получается «сплющиванием» n -каскадной k -ичной бабочки в

плоскую сеть, при котором все коммутаторы с одинаковыми номерами в разных каскадах бабочки объединяются в один расширенный коммутатор, а симплексные каналы между каскадами бабочки объединяются в дуплексные каналы между разными расширенными коммутаторами.

Сеть FBn имеет тот же ведущий критерий что и обобщенный гиперкуб, к которому добавляется требование минимизации числа дорогостоящих сетевых каналов путем некоторого увеличения диаметра. Авторы сети FBn обосновывают использование для сплющивания сети бабочка, а не сети Клоза (зеркально сдвоенной бабочки) сокращением вдвое числа портов расширенного коммутатора и диаметра сети FBn .

Общее число абонентов (процессоров), объединяемых сетью FBn , составляет величину k^n , а ее диаметр (число расширенных коммутаторов на пути между двумя абонентами) $D_n = n$. Сеть FBn состоит из $M_n = N_n/k = k^{n-1}$ расширенных коммутаторов, каждый из которых содержит n коммутаторов $k \times k$ и имеет $m_n = n(k-1) + 1$ дуплексных портов. Из них k портов используются для подсоединения k абонентов и $r_n = (n-1)(k-1)$ сетевых портов — для связи дуплексными каналами с другими расширенными коммутаторами сети. Число сетевых дуплексных каналов в сети FBn составляет величину $R_n = r_n M_n$.

Сеть FBn наследует коммутационные свойства сети n -каскадная k -ичная бабочка и, поэтому, не является ни заблокируемой, ни даже перестраи-

ваемой¹ [4, 7]. Как следствие, она имеет большое число конфликтов на произвольном трафике, приводящее к значительному увеличению задержек передачи. Для преодоления этого недостатка приходится использовать специальные дополнительные алгоритмы маршрутизации, которые приводят к равномерной рандомизации трафика между коммутаторами. Эти алгоритмы снижают пропускную способность сети до двух раз или аналогично повышают ее эффективный диаметр (реальные задержки передачи).

Сеть FBn строилась ее авторами как плоская сеть из многопортовых коммутаторов с высоким отношением числа абонентов к числу сетевых каналов (или портов узлов) и малым диаметром. Для повышения коммутационных возможностей сети FBn в ней допускается прохождение каскадных коммутаторов в расширенных узлах в любой последовательности. В результате оказалось, что сеть FBn изоморфна k -ичному $(n - 1)$ -мерному обобщенному гиперкубу, в котором к каждому узлу подсоединено k абонентов, а не один, как обычно считается для гиперкубов. Подобные сети строятся и без технологии «сплющивания» [2, 8].

Рассмотрим задачу дальнейшего увеличения отношения числа абонентов к числу каналов, которую будем решать путем увеличения числа абонентов при сохранении неизменными числа портов узлов, числа сетевых каналов и диаметра сети.

Принято считать, что сложность s полного коммутатора пропорциональны квадрату числа портов. Поэтому сложность расширенного узла сети FBn составляет величину $s_n \approx b[n(n - 1) + 1]k^2$ [1], где b — размерный коэффициент пропорциональности. Тогда сложность всей сети FBn задается как $S_n = s_n M_n$.

Задача увеличения числа абонентов в сплющенной сети уже решалась автором [7] путем «сплющивания» двухкаскадной обобщенной сети Клоза, в которой межкаскадные соединения имеют топологию квазиполного графа или орграфа [9—12]. В данной работе рассматривается возможность увеличения числа узлов благодаря замене обобщенного гиперкуба на обобщенное расширенное мультикольцо. В расширенном мультикольце [13] длины шагов составляющих его колец находятся переборным образом при максимизации числа узлов и/или числа разных путей между узлами.

¹ В неблокируемой сети возможна бесконфликтная реализация произвольной перестановки пакетов по прямым каналам без их промежуточной буферизации, без предварительной маршрутизации пакетов. Перестраиваемая сеть имеет те же возможности, но только по предварительно составленным маршрутам для каждой перестановки.

В данной работе этот оригинальный метод применяется для построения обобщенных расширенных мультиколец третьего и четвертого измерений.

1. МУЛЬТИКОЛЬЦА И ИХ СВОЙСТВА

Мультикольцом мы называем набор r коммутируемых симплексных колец с разными шагами. По определению [14], мультикольцо объединяет N узлов степени r и состоит из набора r колец с разными шагами ${}^1S = 1, {}^2S, \dots, {}^rS$, где ${}^iS \neq {}^jS$. По определению это означает, что из каждого узла выходят r дуг с «длинами» ${}^1S = 1, \dots, {}^rS$, где длина дуги определяется разницей по $\text{mod } N$ номеров инцидентных ей узлов. Длины этих дуг и задают длины шагов колец. Дуги колец с шагами ${}^iS > 1$ образуют хорды в кольце с шагом ${}^1S = 1$. Будем характеризовать мультикольцо набором длин шагов колец $C_r = ({}^1S, \dots, {}^rS)_r$ и задавать его парой $\{N, C_r\}$.

Полным k -ичным t -мерным мультикольцом Mrt мы называем мультикольцо, в котором $r_t = (k - 1)t$, $N_t = k^t$ и набор C_r состоит из колец с шагами $m + l - 1 S = mk^{l-1}$, $1 \leq m \leq k - 1$, $1 \leq l \leq t$, т. е. из t наборов колец, в которых l -й набор содержит кольца с шагами $\{k^{l-1}, 2k^{l-1}, \dots, (k - 1)k^{l-1}\}$, представляемых значениям разрядов в k -ичной системе счисления.

В полном мультикольце любой маршрут состоит не более чем из t дуг разных колец — не более одной из каждого кольца. Поэтому диаметр полного мультикольца, измеряемый в числе проходимых коммутаторов, определяется как $D_t = t + 1$.

Здесь предполагается, что в сети с топологией полного мультикольца к каждому узлу подсоединен один абонент (процессор), т. е. каждый узел содержит $r + 1$ дуплексных портов. Если подсоединить к каждому узлу k абонентов, то мы получим обобщенное мультикольцо $GMRt$, представляющее собой точный аналог сети FBn при $t = n - 1$. Это означает, что сеть $GMRt$ содержит $N_t = k^{t+1}$ абонентов и $M_t = k^t$ узлов с $m_t = (k - 1)t + k$ дуплексными портами, из которых $r_t = (k - 1)t$ являются сетевыми, имеет узловую сложность $s_t \approx b[t(t + 1) + 1]k^2$ и диаметр $D_t = t + 1$.

В общем случае полное k -ичное мультикольцо (как и k -ичный обобщенный гиперкуб) не является ни неблокируемой, ни перестраиваемой сетью. Однако добавление к каждому кольцу встречного кольца переводит такое сдвоенное полное k -ичное мультикольцо в разряд $k - k$ -перестраиваемых сетей [15]. Это означает, что для него существуют



расписания, которые позволяют бесконфликтно и параллельно осуществлять сразу k разных перестановок пакетов между узлами. Правда, для каждой k -перестановки (набора из k разных перестановок) необходимо строить отдельное бесконфликтное расписание. Построение последнего имеет вычислительную сложность $O(kN)$.

Теперь построим обобщенное сдвоенное мультикольцо $DGMR_t$, в котором к каждому узлу подсоединим k абонентов. Такое обобщенное мультикольцо является 1 — 1-перестраиваемым, т. е. называется перестраиваемой сетью и не нуждается в применении дополнительных алгоритмов маршрутизации.

Как известно, k -ичная сеть Клоза также является перестраиваемой сетью. «Сплюснутая» k -ичная сеть Клоза имеет такие же расширенные узлы (по числу портов), как и обобщенное сдвоенное k -ичное мультикольцо $DGMR_t$, но ее диаметр вдвое больше.

По сравнению с сетью FBn обобщенное мультикольцо $DGMR(t - 1)$ имеет вдвое большее число портов в узлах и формально одинаковый диаметр. Однако последний в сети FBn на практике фактически удваивается из-за необходимости дополнительных алгоритмов рандомизации маршрутов.

2. ДВУМЕРНЫЕ МУЛЬТИКОЛЬЦА И РАСШИРЕННЫЕ МУЛЬТИКОЛЬЦА

Среди многомерных мультиколец особое место занимает двумерное мультикольцо [2, 8, 11, 14], которое оказывается неблокируемой сетью, в которой произвольная перестановка может быть бесконфликтно реализована по прямым каналам без буферизации пакетов в промежуточных узлах. Эти каналы прокладываются узлами независимо друг от друга, т. е. посредством самомаршрутизации. Поэтому двумерное мультикольцо образует распределенный полный коммутатор с эффективным диаметром (по задержкам) $D_2 \approx 1$. В нем пакеты передаются по прямым каналам за один скачок — из источника в приемник без задержки на буферизацию в промежуточном узле.

На рис. 1 приведен пример двумерного троичного коммутируемого мультикольца MR_2 на 9 узлов (и 9 абонентов), состоящего из симплексных колец с шагами 1, 2 (сплошные дуги) и 3, 6 (штриховые дуги).

На рис. 2 приведена принципиальная схема узла двумерного k -ичного мультикольца, которая содержит коммутатор $(k - 1) \times (k - 1)$, мультиплексоры $1 \times 2(k - 1)$, 1×2 и демультиплексоры $2(k - 1) \times 1$, 2×1 . Обозначения входных/выходных

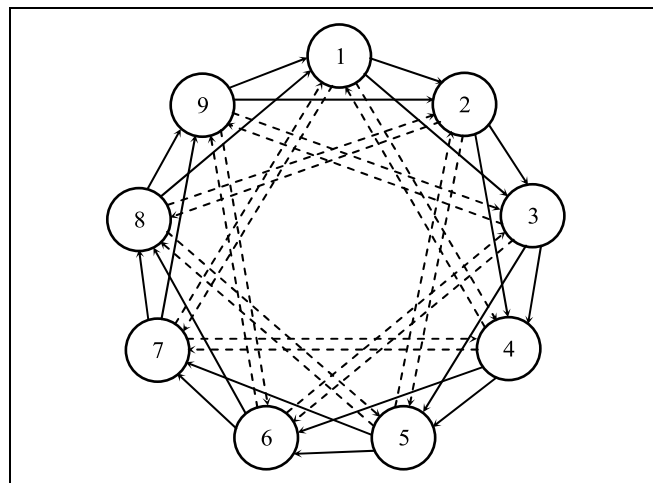


Рис. 1. Двумерное троичное мультикольцо с шагами 1, 2 и 3, 6

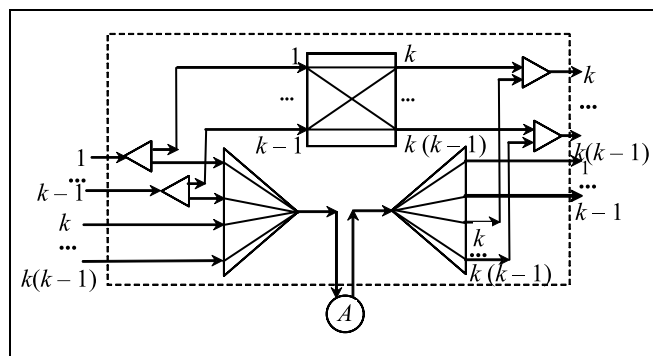


Рис. 2. Схема узла двумерного k -ичного мультикольца: A — абонент

портах задают шаги симплексных колец, в которые включается узел. Приведенная схема рассчитана на передачу пакетов сначала по кольцам с малыми шагами $\{1, \dots, k - 1\}$, что необходимо для обеспечения неблокируемости двумерного мультикольца.

Максимальный путь от абонента-источника к абоненту-приемнику проходит через разные схемы в трех узлах — мультиплексор в узле-источнике, коммутатор в промежуточном узле и демультиплексор в узле-приемнике. Поэтому диаметр, измеряемый числом проходимых узлов, здесь $D_2 = 3$.

Так называемое расширенное двумерное мультикольцо ER_2 [13] состоит из узлов с $p_2 = 2(k - 1)$ сетевыми дуплексными портами, как и двумерное k -ичное мультикольцо. Однако в нем шаги колец подобраны таким образом, чтобы обеспечить максимальное число узлов P_2 и иметь не менее σ разных путей между любыми двумя узлами. Диаметр расширенного двумерного мультикольца $D_2 = 3$.

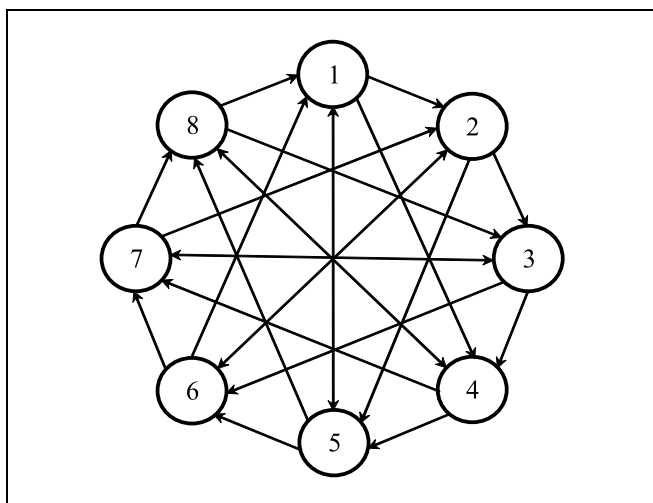


Рис. 3. Расширенное мультикольцо ER2 на 9 узлов с шагами колец (1, 3, 4)

На рис. 3 приведен пример расширенного двумерного мультикольца с $P_2 = 9$ узлами и $\sigma = 1$, состоящего из трех колец (сравните с рис. 1).

Будем задавать расширенное двумерное мультикольцо тройкой $\{P_2, \sigma, C_p\}$, где C_p — это шаги набора p_2 симплексных колец, составляющих мультикольцо. В частности, мультикольцо (см. рис. 3) задается тройкой $\{9, 1, (1, 3, 4)_3\}$.

Можно привести еще пример мультикольца $\{35, 1, (1, 6, 7, 10, 28, 29, 34)_8\}$. Нетрудно видеть, что приведенный набор восьми симплексных колец является также набором четырех дуплексных колец с шагами $(\pm 1, \pm 6, \pm 7, \pm 10)$. Для четных p_2 существуют также мультикольца с несколькими разными путями между узлами. Это, например, мультикольца $\{42, 2, (\pm 3, \pm 6, \pm 7, \pm 12, \pm 14)_{10}\}$ и $\{37, 3, (\pm 1, \pm 3, \pm 4, \pm 9, \pm 11, \pm 17)_{12}\}$.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики двумерных расширенного и обычного мультиколец, где $c_1 = P_2/N_2$. Расширенное мультиколь-

цо построено переборным методом [11]. По табл. 1 можно сделать вывод, что при $\sigma = 1$ для больших четных k значение P_2 можно оценивать снизу эмпирической формулой $P_2 \approx c_1 k^2$, где $c_1 = 1,33$.

В табл. 2 приводятся характеристики расширенных мультиколец с числом путей $\sigma > 1$. По табл. 2 можно сделать вывод, что при $\sigma = 2$ для больших четных k значение P_2 можно оценивать эмпирической формулой $P_2 \approx c_2 k^2$, где $c_2 = 1,1$, а при $\sigma = 3$ — формулой $P_2 \approx c_3 (k-1)^2$, $c_3 = 1,0$. Этими формулами мы будем в дальнейшем пользоваться для оценки числа абонентов для тех k , для которых еще не построены расширенные мультикольца.

Отметим, что при $\sigma > 1$ можно повысить быстродействие расширенного мультикольца почти в σ раз, если разбивать каждый пакет на σ частей и передавать их параллельно по разным сетевым путям. Для этого требуется увеличение числа портов абонента в σ раз и применение в сетевом узле мультиплексора $\sigma \times 2(k-1)$ и демультимплексора $2(k-1) \times \sigma$. Однако в данной статье изменение числа портов абонентов и узлов не допускается.

Поэтому расширенное мультикольцо с числом путей $\sigma > 1$ имеет только $(\sigma - 1)$ -отказоустойчивость по кольцам и допускает σ -кратную рандомизацию маршрутов с целью выравнивания загрузки колец. Здесь под $(\sigma - 1)$ -отказоустойчивостью понимается сохранение работоспособности и функциональности сети (диаметра и задержек) при отказе $\sigma - 1$ кольца. Сохранение работоспособности возможно и при адаптивной маршрутизации, но благодаря увеличению диаметра сети и задержек в ней.

Подсоединение каждому узлу не одного, а $k > 1$ абонентов порождает обобщенные двумерные сети — k -ичное мультикольцо GMR2 или расширенное мультикольцо GER2. Для этого в первом из них мультиплексор $1 \times 2(k-1)$ и демультимплексор $2(k-1) \times 1$ в каждом узле заменяются на коммутаторы $k \times 2(k-1)$ и $2(k-1) \times k$ соответственно.

Таблица 1

Характеристики расширенных мультиколец $\{P_2, 1, C_p\}$ и k -ичных мультиколец $\{N_2, C_p\}$, в которых $N_2 = k^2$ и $r = 2(k-1) = p_2$ при $P_2 \geq 1,3N_2$

P_2	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18
k	3	3	4	4	5	5	6	7	8	9	10
P_2	13	17	21	30	35	43	51	67	85	108	133
N_2	9	12	16	20	25	39	36	49	64	81	100
c_1	1,44	1,42	1,31	1,50	1,40	1,43	1,42	1,37	1,33	1,33	1,33

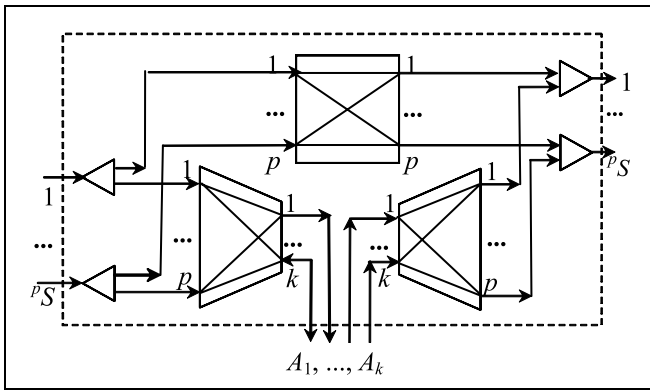


Рис. 4. Схема узла сети GER2: $p = p_2$

Это порождает узел сложности $s_2^* = b(k - 1)^2 + 4bk(k - 1)$ и обобщенное двумерное мультикольцо с числом узлов $N_2^* = k^3$ и диаметром $D^* = 3$ (по числу проходимых узлов). Узел имеет $r_2^* = 2(k - 1)$ сетевых дуплексных портов.

Отметим, что сложность узла s_2^* сети GMR2 оказывается меньше сложности s_3 расширенного узла сети FB3, имеющих одинаковые число абонентов, число портов и диаметры. Это объясняется тем, что в сети GMR2 предопределен порядок прохождения колец — сначала проходятся кольца с меньшими шагами.

В узле обобщенного расширенного мультикольца GER2 (рис. 4) вместо коммутатора $(k - 1) \times (k - 1)$ необходимо использовать коммутатор $p_2 \times p_2$, где $p_2 = 2(k - 1)$. Это порождает узел сложности $s_2^* = 4b(k - 1)^2 + 4bk(k - 1)$ и обобщенное двумерное расширенное мультикольцо с числом узлов $P_2^* = P_2 k = c_\sigma k^3$ и тем же диаметром $D_2^* = 3$. Узел имеет $p_2^* = 2(k - 1)$ сетевых дуплексных портов и в целом $m_2^* = 2(k - 1) + k$ портов. Сложность узла сети GER2 сопоставима со сложностью $s_3 = 7bk^2$ расширенного узла сети FB3. При этом сеть GER2 объединяет больше абонентов.

Теперь сравним сети FB3 и GER2 при одинаковых размерах узлов и диаметрах. В табл. 3 они сравниваются по числу абонентов. В строках с $p_2^* > 18$ приведены расчетные данные по эмпирической формуле $P_2^* \approx c_\sigma k^3$, так как соответствующие расширенные кольца еще не построены [13]. Видно, что при $\sigma = 1$ число абонентов в сети GER2 более чем на 30 % больше, чем в сети FB3.

Специально отметим, что сеть GER2 при $\sigma > 1$ обладает $(\sigma - 1)$ -отказоустойчивостью по кольцам и допускает σ -кратную рандомизацию маршрутов.

3. ОБОБЩЕННЫЕ РАСШИРЕННЫЕ МУЛЬТИКОЛЬЦА ЧЕТНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Теперь возьмем мультикольцо MRt произвольной четной размерности $t = 2l, l = 1, 2, \dots$, и будем использовать кольца измерений $l - 1$ и l так же, как в сети ER2, т. е. как в расширенном мультикольце. Кольца 1-го и 2-го измерений имеют длины шагов сети ER2, т. е. $^1S = 1, \dots, ^{p_2}S$. Кольца

Таблица 2

Характеристики расширенных мультиколец $\{P_2, \sigma, C_p\}$

σ	p_2	4	6	8	10	12	14	16	18
2	P_2	7	16	27	42	53	69	89	114
	N_2	9	16	25	36	49	64	81	100
3	P_2	6	13	19	29	37	49	61	78
	N_2	4	9	16	25	36	49	64	81

Таблица 3

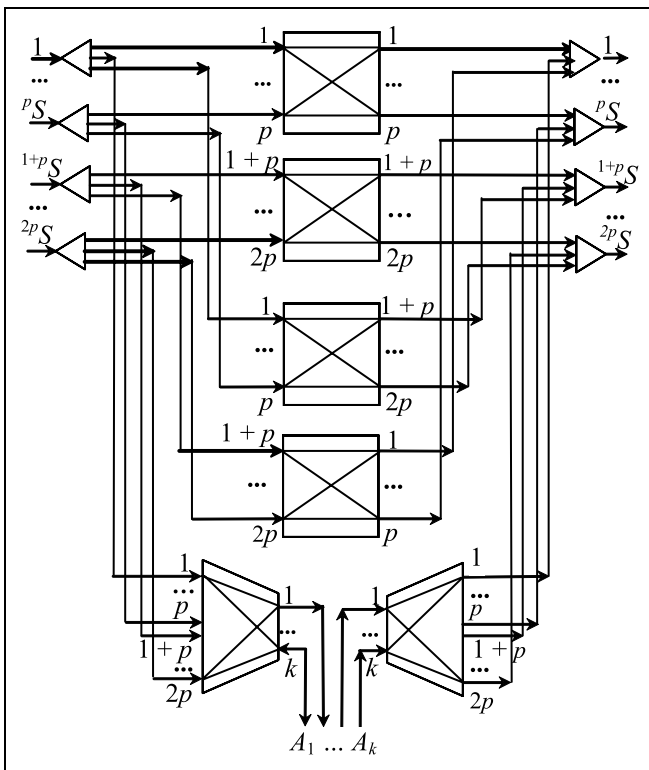
Число абонентов в сетях FB3 и GER2 при $m_3 = m_2^*$ и $D_3 = D_2^* = 3$

FB3			GER2 $\sigma = 1$	GER2 $\sigma = 2$	GER2 $\sigma = 3$
k	m_3	N_3	P_2^*	P_2^*	P_2^*
6	16	216	10	306	252
8	22	512	14	688	552
10	28	1000	18	1330	1100
12	34	1728	22	~2240	~1900
14	40	2744	26	~3560	~3010

Таблица 4

Число абонентов в сетях FB5 и GER4 при одинаковом диаметре 5 и узлах равного размера

FB5			GER4 $\sigma = 1$	GER4 $\sigma = 2$	GER4 $\sigma = 3$
k	m_5	N_3	P_4^*	P_4^*	P_4^*
6	26	7776	10	15 606	10 584
8	36	32 768	14	57 800	38 088
10	46	100 000	18	176 890	129 960
12	56	248 832	22	~420 000	~300 000
14	66	537 824	26	~910 000	~650 000


 Рис. 5. Схема узла сети GER4: $p = p_2$

l -го и $(l + 1)$ -го измерений имеют длины шагов сети ER2, увеличенные в P_2^l раз, т. е. $^{1+p_2}S = P_2^l, \dots, ^{2p_2}S = P_2^l P_2^l$. Таким образом мы построим сеть ER t , которая имеет узлы с тем же числом портов и тот же диаметр $D_t = t + 1$, что и сеть MR t , но объединяет $P_t = P_2^l$ узлов.

Если в сети ER t к каждому узлу подсоединить не одного абонента, а k абонентов, то получится сеть в виде обобщенного расширенного мультикольца GER t . Каждый ее узел содержит $m_t^* = 2(k - 1)l + k = (t + 1)(k - 1) + 1$ дуплексных портов. Это означает, что сети GER t и FB n при одинаковых k и $n = t + 1$ имеют одинаковое число портов в узлах и в расширенных узлах соответственно. Сеть FB n имеет диаметр $D_n = n$, а сеть GER t — $D_t = t + 1$, т. е. их диаметры одинаковы. Однако сеть GER t может объединять большее число абонентов $P_t^* = kP_t^* \approx c_\sigma^l k^{t+1}$ при $\sigma = 1, 2$ или иметь большие пропускную способность и быстрдействие при $\sigma = 2, 3$.

Сравним сети FB5 и GER4 по числу абонентов при одинаковом числе портов в узлах. Результаты сравнения представлены в табл. 4. Видно, что при

$\sigma = 1$ число абонентов в сети GER4 почти на 70 % больше, чем в сети FB5, а при $\sigma = 2$ больше на 20 %. Заметим, что по числу абонентов сеть GER4 покрывает потребности современных суперкомпьютеров.

Схема узла сети GER4 представлена на рис. 5. Он состоит из четырех коммутаторов $p_2 \times p_2$, входного коммутатора $k \times 2p_2$ и выходного коммутатора $2p_2 \times k$. Сложность такой схемы составляет $s_4^* \approx 4p_2^2 + 4kp_2 = 16(k - 1)^2 + 8(k - 1)k$ по сравнению с $s_5 \approx 21k^2$ в сети FB5. Сложность узла сети GER4 можно понизить до $s_4^* \approx 3p_2^2 + 4kp_2 = 12(k - 1)^2 + 8(k - 1)k$, если проходить измерения в порядке номеров измерений.

Схема допускает возможность прохождения колец на маршруте в любой последовательности. При $\sigma > 1$ эта возможность означает наличие в сети GER4 σ^2 разных маршрутов между любой парой узлов. Таким образом, сеть GER4 обладает $(\sigma^2 - 1)$ -отказоустойчивостью по кольцам и имеется возможность выравнивания загрузки колец благодаря σ^2 -кратной рандомизации маршрутов. Последняя возможность позволяет отказаться от дополнительной маршрутизации с целью выравнивания трафика и поэтому сократить почти вдвое задержки передачи по сравнению с сетью FB5.

4. ОБОБЩЕННЫЕ РАСШИРЕННЫЕ МУЛЬТИКОЛЬЦА НЕЧЕТНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Обобщенное расширенное мультикольцо GER t с нечетной размерностью $t = 2l + 1$, $l = 1, 2, \dots$, строится на основе сети GER $_{2l}$. Мультикольцо GER t содержит $r_t^* = lp_2^* + k$ симплексных колец, из которых lp_2^* колец принадлежат сети GER $_{2l}$.

Таблица 5

Число абонентов в сетях FB4 и GER3
при $m_4 = m_3^*$, $D_4 = D_3^* = 3$

FB4			GER3 $\sigma = 1$	GER3 $\sigma = 2$	GER3 $\sigma = 3$
k	m_4	N_4	P_2^*	P_3^*	P_3^*
6	21	1296	10	1836	1044
8	29	4096	14	5504	3136
10	37	10 000	18	13 300	7700
12	45	20 736	22	~26 800	~16 500
14	53	38 416	26	~49 800	~33 100



Кольца $(2l + 1)$ -й размерности имеют длины шагов $(P_{2l}, 2P_{2l}, \dots, (k - 1)P_{2l})$. Мультикольцо $GERt$ объединяет $P_t^* = kP_{2l}^* = k^2P_2^l$ абонентов, имеет узлы с $m_t^* = (2l + 2)(k - 1) + 1$ дуплексными портами и диаметр $D_t^* = t + 1$.

У сетей $FB4$ и $GER3$ одинаковые по числу портов узлы и одинаковые диаметры. Сравним их по числу абонентов (табл. 5). Видно, что здесь у сети $GER3$ тот же фактор преимущества над сетью $FB4$, что и у сети $GER2$ над сетью $FB3$, и меньший фактор преимущества, чем у сетей $GER4$ над $FB5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая плоская системная сеть с узлами в виде составных многопортовых коммутаторов-маршрутизаторов, аналогичная сети сплюснутая бабочка. Рассмотрена модификация сети многомерное мультикольцо, которая по своим коммутационным возможностям и характеристикам совпадает с сетью многомерный обобщенный гиперкуб, топологию которого имеет сеть сплюснутая бабочка.

Модификация сводится к сдваиванию измерений многомерного мультикольца и замещению наборов колец полученных пар измерений оригинальным двумерным расширенным мультикольцом, которое обеспечивает большее число абонентов и/или большее число разных маршрутов при равном числе портов узлов и равных диаметрах системной сети. Таким образом, построена новая системная сеть обобщенное расширенное мультикольцо.

Рассмотрены сравнительные характеристики сетей обобщенное расширенное мультикольцо и сплюснутая бабочка с минимальными диаметрами, которые требуются для построения системных сетей современных суперкомпьютеров. Показано, что для диаметра в пять узлов обобщенное расширенное мультикольцо обеспечивает на 70% большее число узлов или до двух раз меньшие задержки передачи по сравнению с сетью сплюснутая бабочка, имеющей такие же узлы.

Для практического построения системных сетей с десятками и сотнями тысяч абонентов потребовалось применение симметричных расширенных мультиколец с $20 \div 24$ дуплексными портами в узлах. Возникла практическая необходимость построения указанных мультиколец, которая ранее [13] рассматривалась только как научная потребность. Начато построение таких мультиколец.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alverson R., Roweth D., and Kaplan L. The Gemini System Interconnect // 18th IEEE Symposium on High Performance Interconnects — 2009. — P. 3–87.
2. Alverson R., Roweth D., Kaplan L., and Roweth D. Cray XC® Series Network. — URL: <http://www.cray.com/Assets/PDF/products/xc/CrayXC30Networking.pdf> (дата обращения 29.05.2015).
3. Arimili B., Arimili R., Chung V., et al. The PERCS High-Performance Interconnect // 18th IEEE Symposium on High Performance Interconnects. — 2009. — P. 75–82.
4. Kim J., Dally W.J., and Abts D. Flattened Butterfly: A Cost-Efficient Topology for High-Radix Networks // Proc. of 34th Intern. Symp. Comp. Archit. (ISCA'2007). — 2007. — P. 126–137. — URL: http://www.cs.berkeley.edu/~kubitron/courses/cs258-S08/handouts/papers/ISCA_FBFly.pdf (дата обращения 29.05.2015).
5. Корж А.А. Инновационная платформа A-Class для создания мультипетафлопсных систем // Междунар. суперкомпьютерная конф. «Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров» (пленарный доклад). — Новороссийск, 2014. — См. также Суперкомпьютеры. — № 2. — Т. 18. — С. 16–17.
6. Scott S., Abts D., Kim J., and Dally W. The Black Widow High-radix Clos Network // Proc. of 33rd Intern. Symp. Comp. Arch. (ISCA'2006). — 2006. — URL: <http://cva.stanford.edu/people/jjk12/isca06.pdf> (дата обращения 29.05.2015).
7. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Топологические резервы «сплюснутых» системных сетей // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та / Сер. «Вычислительная математика и информатика». — 2016. — Т. 5. — № 2.
8. Kim J., Dally W.J., Scott S., and Abts D. Technology-driven, highly-scalable dragonfly topology // Proceedings of the 35th annual international symposium on computer architecture — ISCA'2008. — P. 77–88.
9. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Метод инвариантного расширения системных сетей многопроцессорных вычислительных систем. Идеальная системная сеть // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 10. — С. 166–176.
10. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Распределенный полный коммутатор как «идеальная» системная сеть для многопроцессорных вычислительных систем // Управление большими системами. — 2011. — Вып. 34. — С. 92–116. — URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS3405.pdf> (дата обращения 29.05.2015).
11. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Расширенный обобщенный гиперкуб как отказоустойчивая системная сеть для многопроцессорных систем // Управление большими системами. — 2013. — Вып. 45. — С. 344–371. — URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS4515.pdf> (дата обращения 29.05.2015).
12. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Расширенные блок-схемы для идеальных системных сетей // Проблемы управления. — 2012. — № 4. — С. 45–51.
13. Подлазов В.С. Расширенное мультикольцо с диаметром 2 // Проблемы управления. — 2015. — № 4. — С. 35–40.
14. Алленов А.В., Подлазов В.С. Пропускная способность набора кольцевых каналов II. Кольцевые коммутаторы // Автоматика и телемеханика. — 1996. — № 4. — С. 162–172.
15. Подлазов В.С. p - p -перестраиваемость и отказоустойчивость двоярных p -ичных мультиколец и обобщенных гиперкубов // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 7. — С. 138–148.

Статья представлена к публикации членом редсовета ил.-корр. РАН П.П. Пархоменко.

Подлазов Виктор Сергеевич — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ podlazov@ipu.ru.