

Топологические резервы «сплюснутых» системных сетей

М.Ф. Каравай, В.С. Подлазов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Рассматривается метод изменения топологии 2-шаговой системной сети «сплюснутая бабочка» (*Flattened Butterfly*), обеспечивающий уменьшение размеров составляющих ее коммутаторов и, как следствие, уменьшение схемной сложности и энергопотребления при сохранении числа абонентов (процессоров), диаметра сети и коммутационных свойств. При сохранении размеров коммутаторов предлагаемый метод позволяет существенно увеличить число абонентов при сохранении диаметра сети.

1. Введение

Сеть *Flattened Butterfly* с n шагами (FBn) [1] считается перспективной [2] для создания плоских (однокаскадных) системных сетей на базе больших многопортовых коммутаторов-маршрутизаторов. 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 из расширенных коммутаторов FBn , а симплексные каналы между каскадами бабочки становятся дуплексными каналами между разными расширенными коммутаторами.

Общее число абонентов (процессоров), объединяемых FBn , составляет величину $N=k^n$, а ее диаметр (число скачков по сети между абонентами) – величину $D=n$. Сеть FBn состоит из $M=N/k=k^{n-1}$ расширенных коммутаторов, каждый из которых состоит из n коммутаторов $k \times k$ и имеет $m=n(k-1)+1$ дуплексных портов. Из них k портов используются для подсоединения k абонентов и $(n-1)(k-1)$ порт – для связи прямыми дуплексными каналами с другими коммутаторами сети. Поэтому число сетевых дуплексных каналов в FBn составляет величину $R=(n-1)(k-1)N/k$.

Принято считать, что сложность s и энергопотребление w коммутатора пропорциональны квадрату числа портов, поэтому сложность и энергопотребление расширенного коммутатора составляет величины $s=b[n(n-1)+1]k^2$ и $w=c[n(n-1)+1]k^2$. Тогда сложность S сети FBn задается как $S=b[n(n-1)+1]k^2N/k=b[n(n-1)+1]k^{n+1}=b[n(n-1)+1]N^{(n+1)/n}$. Аналогично, для энергопотребления – $W=c b[n(n-1)+1]N^{(n+1)/n}$.

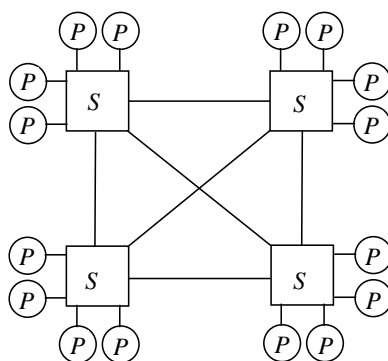


Рис.1. Исходная сеть $FB2$ при $k=4$ ($N=16$ и $m=7$).

Обратим внимание на то, что сеть $FB2$ имеет топологию полного графа (рис. 1). В ней величины S и задаются как $S=b3k^2N/k=3bk^3$ и $W=3ck^3$, т.е. величинами пропорциональными кубу числа портов отдельного коммутатора. Поэтому уменьшение числа портов коммутаторов (даже при некотором увеличении их числа) может понизить сложность и энергопотребление сети $FB2$.

В результате мы приходим к следующей постановке задачи для сети *FB2*, как сети с наименьшим диаметром. Практически не изменяя число абонентов сети *N*, число каналов *R* и диаметр *D* требуется уменьшить сложность *S* и энергопотребление *W* сети за счет изменения ее топологии, при котором имеет место уменьшение числа портов отдельных коммутаторов.

Возможность такой постановки задачи открывает разработка [3, 4] сетей с прямыми каналами, имеющих топологию квазиполных графов и орграфов, которые позволяют эффективно заменять в топологии сети полный граф с числом узлов $N=k$ на квазиполный граф с числом узлов $N^*=k^*(k^*-1)/\sigma+1$ (где σ – число независимых прямых каналов между любыми двумя узлами) или квазиполный орграф с $N^*=(k^*)^2$ (только с одним прямым каналом $\sigma=1$). В случае $N=N^*$ это приводит к уменьшению степени узлов от k до $k^* \approx (\sigma n)^{1/2}$. При схемной реализации степень узла задает число его портов.

Обоснованность такой постановки подтверждается тем, что сеть с топологией квазиполного графа или орграфа является неблокируемой при самомаршрутизации пакетов каждым источником. Это означает, что она равносильна сети с топологией полного графа на произвольных перестановках пакетов и близка к ней на случайном равномерном трафике между абонентами [5]. Последний вид трафика и имеет место между коммутаторами в *FB2*.

Дело в том, что сеть *FBn* наследует коммутационные свойства сети *n*-каскадная *k*-ичная бабочка. Поэтому сеть *FBn* не является ни неблокируемой ни даже перестраиваемой и имеет только один путь между любыми двумя процессорами. Для преодоления этого недостатка приходится использовать специальные алгоритмы маршрутизации, которые и 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) [1].

2. Квазиполные графы и орграфы

Квазиполный граф $QFG(M^*, k^*, \sigma^*)$ – это однородный двудольный граф, каждую долю которого составляют M^* узлов степени k^* . Значение k^* выбирается минимальным, при котором любые два узла в одной доле связаны $\sigma^* \leq k^*$ прямыми путями длины 2 через разные узлы в другой доле. Если такой граф существует, то его параметры связаны соотношением $M^*=k^*(k^*-1)/\sigma^*+1$. На рис. 2 представлена сеть с топологией квазиполного графа $QFG(7, 4, 2)$, т.е. с двумя путями между узлами одной доли.

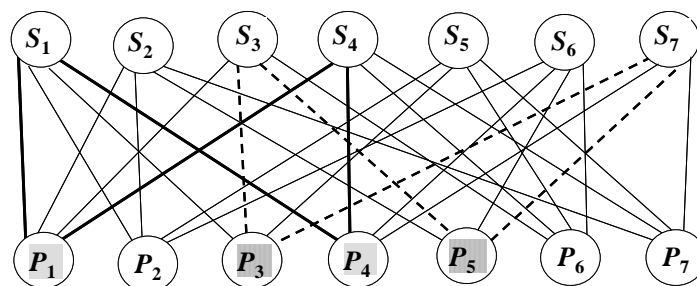


Рис. 2. Сеть с топологией квазиполного графа $QFG(7, 4, 2)$.

Квазиполные графы изоморфны симметричным блок-схемам, исследуемым в комбинаторике [3, 4]. Их построение сводится к построению соответствующих блок-схем, и осуществляется обычно комбинаторными методами, которые являются NP-сложными по k^* .

При схемной реализации узлы одной доли – это абоненты с k^* дуплексными портами, а узлы другой доли – это полные коммутаторы $k^* \times k^*$ с k^* дуплексными портами. Таблицей инцидентности квазиполного графа является симметричная блок-схема $B(M^*, k^*, \sigma^*)$, которая представлена в табл. 1 для графа $QFG(7, 4, 2)$.

Эта таблица задает схему межсоединений узлов разных долей в сети. Первая колонка в ней задает коммутаторы, а строки – подсоединенных к ним абонентов, задаваемых номерами в ячейках.

Нахождение прямого пути между любыми двумя абонентами сводится к нахождению номеров выходных портов абонентов и коммутаторов, однозначно задающих этот путь. А

прокладка прямого канала – это просто передача короткого пакета-зонда по выбранному пути с подтверждением его приема.

Таблица 1. Межсоединения в $QFG(7, 4, 2)$

Блоки 4×4	$B(7, 4, 2)$ $QFG(7, 4, 2)$			
	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	1	2	5	7
3	1	3	5	6
4	1	4	6	7
5	2	3	6	7
6	2	4	5	6
7	3	4	5	7

Основные коммутационные свойства сети с топологией квазиполного графа состоят в следующем [3, 4]. Во-первых, это сеть с прямыми каналами. Во-вторых, эти каналы находятся и строятся путем самомаршрутизации. В-третьих, эта сеть является неблокируемой, т.е. обеспечивает бесконфликтную реализацию любой перестановки пакетов данных между абонентами, т.е. равносильна сети с топологией полного графа. В-четвертых, эта сеть является (σ^*-1) -отказоустойчивой по каналам, т.е. отказ (σ^*-1) -го канала у любых абонентов сохраняет первые три свойства. Более того, они сохраняются и при отказе любых (σ^*-1) -го коммутаторов.

Квазиполный орграф определяется только при $\sigma^*=1$ и для направленных дуг. Квазиполный орграф $QFDG(M^*, k^*)$ – это однородный двудольный граф, каждую долю которого составляют M^* узлов степени k^* . Значение k^* выбирается минимальным, при котором любые два узла в одной доле связаны прямыми путями длины 2 через разные узлы в другой доле.

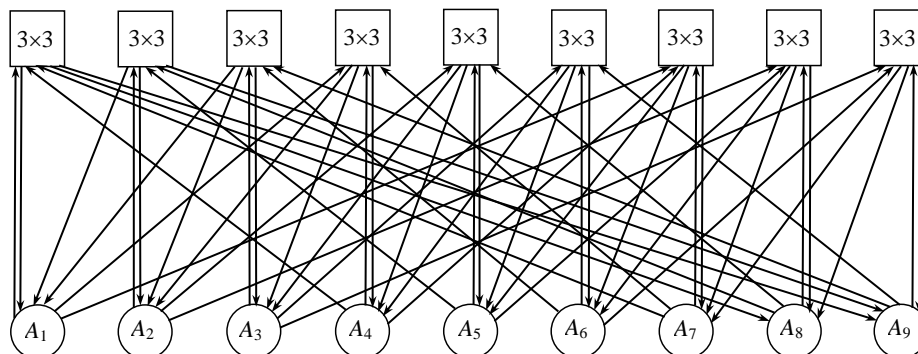


Рис. 3. Квазиполный орграф $QFDG(9, 3)$, полученный из 2-мерного 3-ичного мультикольца [4].

Такой орграф всегда существует, и его параметры связаны соотношением $M^*=(k^*)^2$. На рис. 3 и 4 примеры разных квазиполных орграфов $QFDG(9, 3)$. В этих орграфах схемы межсоединений задаются табл. 2 и 3 соответственно.

В общем случае при произвольном k^* на пересечении i -ой строки ($1 \leq i \leq M^*$) и j -го столбца ($1 \leq j \leq k^*$) в левой части таблицы содержится номер $(i-j) \bmod (M^*+1)$, а в правой – номер $[i+(j-1)k^*] \bmod (M^*+1)$.

При произвольном k^* на пересечении i -й строки ($1 \leq i \leq M^*$) и j -о столбца ($1 \leq j \leq k^*$) в левой части таблицы содержится номер $\lfloor i/k^* \rfloor k^* + j$, а в правой – номер $(i) \bmod (k^*+1) + (j-1)k^*$.

Заметим специально, что при схемной реализации квазиполного орграфа встречные пути между каждой парой абонентов на участке абонент-коммутатор задаются парой встречных симплексных каналов, которые могут быть подсоединены к разным коммутаторам и могут не образовывать дуплексных каналов. Поэтому далее в работе связи между абонентами и коммутаторами для квазиполного графа подсчитываются в числе дуплексных каналов, а для квазиполного орграфа – в числе пар встречных симплексных каналов.

Таблица 2. Таблица межсоединений в квазиполном орграфе по рис. 3

Коммутаторы 3×3	Дуги от абонентов			Дуги к абонентам		
	1	2	3	1	2	3
1	1	9	8	1	4	7
2	2	1	9	2	5	8
3	3	2	1	3	6	9
4	4	3	2	4	7	1
5	5	4	3	5	8	2
6	6	5	4	6	9	3
7	7	6	5	7	1	4
8	8	7	6	8	2	5
9	9	8	7	9	3	6

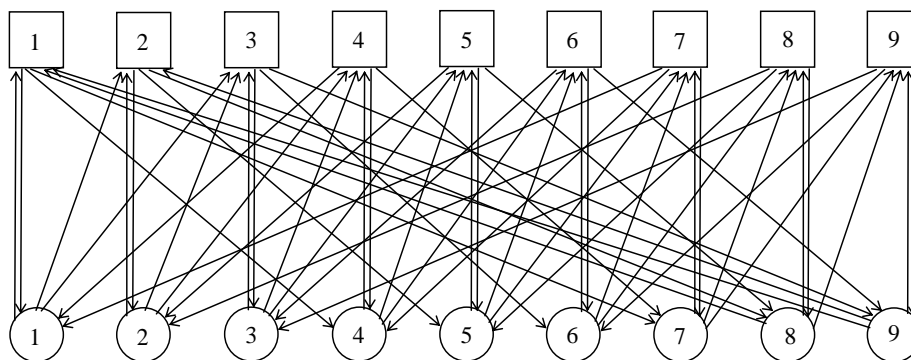


Рис. 4. Квазиполный орграф $QFDG(9, 3)$, полученный из 2-мерного 3-ичного обобщенного гиперкуба.

Таблица 3. Таблица межсоединений в квазиполном орграфе по рис. «

Коммутаторы 3×3	Дуги от абонентов			Дуги к абонентам		
	1	2	3	1	2	3
1	1	2	3	1	4	7
2	1	2	3	2	5	8
3	1	2	3	3	6	9
4	4	5	6	1	4	7
5	4	5	6	2	5	8
6	4	5	6	3	6	9
7	7	8	9	1	4	7
8	7	8	9	2	5	8
9	7	8	9	3	6	9

3. Предлагаемое решение

Сначала рассмотрим вариант изменения топологии для сети $FB2$, сложность и энергопотребление которой составляет величины $S=3bN^{3/2}$ и $W=3cN^{3/2}$. Для этого расширим $FB2$, заменив в ней полный граф на квазиполный граф или орграф, в котором расширенные коммутаторы $FB2$ являются абонентами (рис. 5). Расширенную сеть $FB2$ будем обозначать как $EB2$.

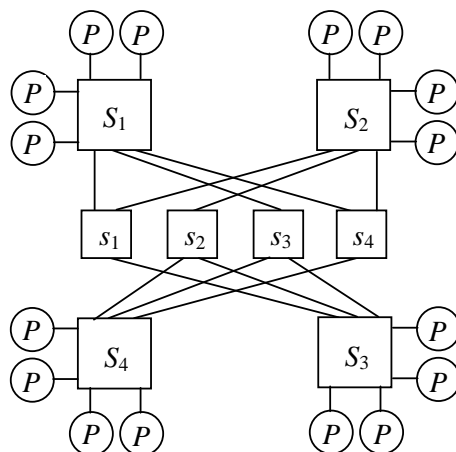


Рис. 5. Сеть EB2 при $k=4$ ($M^*=16$ и $m=7$). S_i и s_i – это составные и вторичные коммутаторы соответственно. Связи между s_i задает $QFG(4, 3, 2)$.

В EB2 к каждому расширенному коммутатору с $m^*=2k^*-1$ дуплексными портами добавляется вторичный коммутатор с k^*-1 портами. Каналы между расширенными и вторичными коммутаторами прокладываются согласно таблицам межсоединений в квазиполном графе или орграфе [4]. На рис. 5 используется квазиполный граф (рис. 2), который обеспечивает два прямых пути между любыми двумя первичными коммутаторами.

Любые два расширенных коммутатора в EB2 связаны через один вторичный коммутатор, поэтому формально диаметр EB2 задается как $D^*=1,5D$. Однако, передачи пакетов через вторичные коммутаторы осуществляются по прямым каналам без их буферизации, и задержки в сетях FB2 и EB2 различаются только на очень малую часть длительности пакетов, т.е с практической точки зрения можно принять, что $D^* \approx D$.

При использовании топологии квазиполного орграфа сеть EB2 будет содержать $M^*=(k^*-1)^2$ расширенных и $M^*=(k^*-1)^2$ вторичных коммутаторов, и объединять $N^*=k^*M^*=k^*(k^*-1)^2$ абонентов и использовать $R^*=M^*(k-1)$ дуплексных каналов.

Сложность каждой спарки расширенного и вторичного коммутаторов составляет величину $s^*=3b(k^*)^2+b(k^*-1)^2 \approx 4b(k^*)^2$, а сложность всей сети – величину $S^*=N^*s^*/k^* \approx 4b(N^*)^{4/3}$. По постановке задачи $N \approx N^*$, поэтому имеет место оценка $S/S^* \approx 3(N)^{1/6}/4$. При $N^*=10^3 \approx N=1024$ имеет место оценка $S/S^* \approx 2,4$, а при $N=32K$ и $N^*=33K$ ($K=1024$) – оценка $S/S^* \approx 4,3$. Аналогично для энергопотребления.

В сети EB2 с топологией квазиполного орграфа для $N^*=1100$ имеем $k^*=11$ и $W^*=c10^2(3 \cdot 11^2+10^2)$. В сети FB2 для $N=1024$ имеем $k=32$ и $W=3c32^3$. Поэтому при $N^* \approx N$ имеем $W/W^* \approx 2,4$.

Вариант сети FB2 при $N \approx 32K$ в настоящее время технически нереализуем, т.к. требует составных коммутаторов с 363 портами, тогда как самой большой однокристалльный коммутатор YARC [6] имеет только 64 дуплексных портов. В этом случае придется использовать сеть FBn с $n > 2$.

Сравним характеристики сетей EB2 и FB3 при $N^*=33K$ и $N=32K$ ($K=1024$). Для EB2 имеем: $k^*=33$, $M^*=(k^*-1)^2=K$, $R^*=(k^*-1)^3=32K$ и $W^*=cK(3 \cdot 33^2+32^2)$. Для FB3 имеем $k=32$, $M=k^2=K$, $R=2M(k-1)=62K$ и $W=7cK32^2$. Теперь $W/W^* \approx 1,8$ при $R/R^*=1,94$ и $D/D^*=1,5$, здесь более высокое энергопотребление сопровождается еще увеличением числа каналов и задержек передачи.

В случае использования топологии квазиполного графа появляется возможность иметь несколько прямых каналов через разные вторичные коммутаторы. В частности, для EFB2 при $\sigma=2$ можно выбрать $k^*=13$ и получить $M^*=1027$ и $W^*=c12^2(3 \cdot 13^2+12^2)$, т.е. иметь $W/W^* \approx 1,3$ при $N=1024$. При $\sigma=2$ также можно реализовать вариант с $k^*=32$ и $M^*=16401$. Правда, необходимые для этого $QFG(79, 13, 2)$ и $QFG(513, 32, 2)$ еще необходимо построить [7, 8].

4. Сплющивание обобщенной сети

Обобщенными мы называем сложенные многокаскадные сети, в которых межкаскадные соединения имеют топологию квазиполного графа или орграфа [9]. В частности, 2-каскадная обобщенная сеть получается из квазиполного графа или орграфа по рис. 2–4 заменой каждого абонента на дуплексный коммутатор $k^* \times k^*$ (коммутатор ВВ), каждого узла другой доли – на коммутатор $k^* \times k^*$ (коммутатор хребта), а ребра – на дуплексные каналы для графа или пары симплексных каналов для орграфа. Такая сеть объединяет $N^* = k^* [k^* (k^* - 1) / \sigma + 1]$ абонентов, если она получена из квазиполного графа, и $N^* = (k^*)^3$ абонентов, если она получена из квазиполного орграфа.

При сплющивании 2-каскадной обобщенной сети одноименные коммутаторы ВВ и хребта объединяются в один расширенный коммутатор с $m^* = 2k^* - 1$ дуплексными портами. Такая сплющенная сеть состоит из $M^* = N^* / k^*$ расширенных коммутаторов, любые два из которых связаны $2(k^* - 1)$ парами симплексных каналов, использует $R^* = 2M^* (k^* - 1)$ таких пар каналов и имеет диаметр $D^* = 3$. Обозначим такую сплющенную обобщенную сеть как *FG2*.

При использовании топологии квазиполного орграфа сложность сети *FG2* задается выражением $S^* = 4b(k^*)^4 = 4b(N^*)^{4/3}$. *FG2*, как и сеть *FB2*, не является перестраиваемой и имеет только один путь между любыми двумя абонентами. Отношение сложностей *FB2* и *FG2* при $N \approx N^*$ задается выражением $S/S^* = 3bN^{1/6}/4$, т.е. таким же соотношением как и для *FB2* и *EB2* в предыдущем параграфе. Число сетевых портов составного коммутатора в *FB2* задается величиной $r = k - 1 = N^{1/2} - 1$, а в *FG2* – величиной $r^* = 2(k^* - 1) = 2(N^{1/3} - 1)$.

Энергопотребление сетей *FB2* и *FG2* при одинаковом числе абонентов $N = 1024 \approx N^* = 1000$ имеем $k = 32$, $k^* = 10$ и $W/W^* \approx 2,5$. При этом в сети *FB2* используется $R = k(k - 1) = 992$ дуплексных каналов (1984 симплексных каналов). В сети *FG2* используется $R^* = 2(k^*)^2(k^* - 1) = 1800$ пар симплексных каналов, т.е. почти в два раза больше, чем в сетях *FB2* и *EB2*. При этом каждый составной коммутатор в *FB2* имеет $r = 31$ сетевых портов, а в *FG2* – только $r^* = 20$ сетевых портов.

В табл. 4 сравниваются характеристики сетей *FB2* и *FG2* при одинаковых размерах расширенных коммутаторов. Видно, что *FG2* имеет в несколько раз большее число абонентов при меньшей удельной схемной сложности.

Таблица 4. Сравнительные характеристики сетей *FB2* и *FG2* для квазиполного орграфа ($K = 1024$)

<i>FB2</i>	m	k	N	M	R/N	S/N
<i>FG2</i>	m^*	k^*	N^*	M^*	R^*/N^*	S^*/N^*
<i>FB2</i>	31	16	$K/4$	16	0,94	$48b$
<i>FG2</i>		11	$1,3K$	121	1,82	$44b$
<i>FB2</i>	47	24	$0,56K$	24	0,96	$72b$
<i>FG2</i>		16	$4K$	256	1,88	$64b$
<i>FB2</i>	63	32	K	32	0,97	$96b$
<i>FG2</i>		22	$10,4K$	484	1,81	$88b$

В случае использования топологии квазиполного графа в сети появляется возможность иметь несколько прямых каналов через разные вторичные коммутаторы. Для этого в абоненты одного расширенного коммутатора должны связываться с друг другом только через другие расширенные коммутаторы. При этом $s = 3bk^2$. В частности, для *FB2* с $N = 1024$ в *FG2* с $\sigma^* = 2$ можно выбрать $k^* = 13$ и получить $M^* = 79$, $N^* = 1027$ и $W^* = c3M^*13^2$. Поэтому $W/W^* \approx 2,4$ и $R^* = 2M^*(k^* - 1) = 1896$ пар симплексных каналов, т.е. $R^* \approx 1,91R$. Здесь опять в *FB2* $r = 31$, а в *FG2* только $r^* = 24$.

В табл. 5 сравниваются характеристики сетей *FB2* и *FG2* при одинаковых размерах расширенных коммутаторов. Видно, что *FG2* имеет в несколько раз большее число абонентов, в полтора раза меньшую удельную сложность и повышенную канальную отказоустойчивость и/или пропускную способность.

Таблица 5. Сравнительные характеристики сетей FB2 и FG2 для топологии квазиполного графа (K=1024)

σ	m^*	k^*	N^* (N)	M^*	R^*/N^*	S^*/N^* (S/N)
2	31	11	616 (K/4)	56	1,82	33b (48b)
3			407 (K/4)	37		
2	47	16	1936 (0,56K)	121	1,88	48b (72b)
3			1296 (0,56K)	81		
2	63	22	5104 (K)	232	1,91	66b (96b)
3			3410 (K)	155		

Для топологии квазиполного графа отдельным случаем является вариант с $\sigma^*=k^*/2$, при котором обобщенная сеть становится 2-каскадной сложенной неблокируемой сетью [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Для этого достаточно использовать дуплексные коммутаторы ВВ $(k^*/2) \times k^*$ с $1,5k^*$ дуплексными портами и хребтовые коммутаторы $k^* \times k^*$ с k^* дуплексными портами. Сложность и тех и других задается как $b(k^*)^2$. Число таких коммутаторов задается как $M^*=2k^*-1$.

Сплюсывание такой неблокируемой сети порождает неблокируемую сеть объединяющую $N^*=M^*k^*/2=k^*(k^*-1/2)$ абонентов, состоящую из M^* расширенных коммутаторов с $m^*=2,5k^*-1$ дуплексными портами каждый при сложности $s=2b(k^*)^2$.

В табл. 6 сравниваются характеристики сетей FB2 и FN2 при одинаковых размерах расширенных коммутаторов. Видно, что FN2 имеет в примерно в полтора раза меньшее число абонентов и немного большую удельную сложность.

Таблица 6. Сравнительные характеристики сетей FB2 и FG2 для топологии квазиполного орграфа (K=1024)

FB2	m	k	N	M	R/N	S/N
FN2	m^*	k^*	N^*	M^*	R^*/N^*	S^*/N^*
FB2	31	16	K/4	16	0,94	48b
FN2		14	189	27	1,82	46b
FB2	47	24	0,56K	24	0,96	72b
FN2		20	390	39	1,88	80b
FB2	63	32	K	32	0,97	96b
FN2		26	663	51	1,81	104b

Неблокируемая сеть FN2 не требует использования специальных алгоритмов маршрутизации и не испытывает сокращения пропускной способности и увеличения задержек передачи на произвольном равномерном трафике как FB2.

5. Заключение

Предложена модификация сети FB2 в расширенную сеть EFB2, которая состоит в замене топологии полного графа на топологию квазиполного графа или орграфа, осуществляемая за счет введения промежуточного слоя малых коммутаторов. Она может осуществляться без изменения числа абонентов (процессоров), диаметра сети и числа используемых каналов, и обеспечивать более чем трехкратное снижение энергопотребления сети. Эта модификация позволяет многократно увеличить число абонентов при использовании коммутаторов одинакового размера без увеличения удельного энергопотребления.

Предложена новая сплюснутая сеть FG2, полученная из 2-каскадной обобщенной сети, имеющая характеристики сети EFB2. Накладными расходами при этом является двукратное увеличение удельного числа проводов.

Рассмотрен отдельный вариант сети FG2, полученный сплюсыванием нового вида неблокируемой сети – сеть FN2. Она является неблокируемой сетью и имеет примерно равное удельное энергопотребление и меньшие задержки передачи. Сеть FN2 требует дальнейшего исследования.

Литература

1. Kim J., Dally W. J., and Abts D. Flattened Butterfly: A Cost-Efficiently Topology for High-Radix Networks // URL: http://www.cs.berkeley.edu/~kubitron/courses/cs258-S08/handouts/papers/ISCA_FBFLY.pdf.
2. Корж А.А. Инновационная платформа A-Class для создания мультипетафлопсных систем // Международная суперкомпьютерная конференция «Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров». Новороссийск. 2014. Пленарный доклад. Устное сообщение.
3. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Метод инвариантного расширения системных сетей многопроцессорных вычислительных систем. Идеальная системная сеть. // АиТ. 2010. № 10. С. 166–176.
4. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Распределенный полный коммутатор как «идеальная» системная сеть для многопроцессорных вычислительных систем Управление большими системами: сборник трудов (электронный журнал). М.: Учреждение Российской академии наук ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН. 2011. вып. 34. С. 92–116. URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS3405.pdf>.
5. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Расширенный обобщенный гиперкуб как отказоустойчивая системная сеть для многопроцессорных систем // Управление большими системами: сборник трудов (электронный журнал). М.: Учреждение Российской академии наук ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН. 2013. вып. 45. С. 344–371. URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS4515.pdf>.
6. Scott S., Abts D., Kim J., and Dally W. The Black Widow High-radix Clos Network // Proc. 33rd Intern. Symp. Comp. Arch. (ISCA'2006). 2006. URL: <http://cva.stanford.edu/people/jjk12/isca06.pdf>.
7. Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С. Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем) // АиТ. 2009. № 2. С. 153–170.
8. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Расширенные блок-схемы для идеальных системных сетей // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 45–51.
9. Подлазов В.С., Соколов В.В. Обобщенные сети Клоза // АиТ. 2009. № 10. С. 158–170.