Оптические коммутаторы на основе волновых фильтров

Такие коммутаторы распределяют входные сигналы разных длин волн из общей оптоволоконной линии по соответствующим направлениям (и обратно). Например, сигнал с длиной волны λ1 передаётся в оптический порт 1, сигнал с длиной волны λ2 — в порт 2 и т. д. По существу, осуществляется коммутация потоков данных на физическом уровне (по длинам волн), в отличие от коммутации или маршрутизации на более высоких уровнях, когда выбор выходного порта осуществляется в результате анализа адресной информации, содержащейся в передаваемом пакете (кадре).

Для разделения сигналов по длинам волн в таких коммутаторах применяются оптические фильтры. К настоящему времени разработаны сотни типов фильтров, различающихся как физической реализацией, так и функциональными возможностями. В последующих примерах построения коммутаторов используются, в основном, наиболее развитые в функциональном отношении волновые фильтры, обладающие периодической характеристикой «длина волны — прозрачность».

1 Волновые фильтры с периодической характеристикой «длина волны — прозрачность»

Фильтры с такой характеристикой широко распространены; существует множество вариантов их реализации [1 — 4]. Эти фильтры, по существу, представляют собой элементарные WDM-коммутаторы (Wavelength Division Multiplexing — уплотнение с разделением по длине волны); на их основе синтезируются более сложные устройства. Для построения этих устройств, вообще говоря, может быть выбран фильтр любой конструкции. Воспользуемся, например, фильтром [1] (Рис. 1).

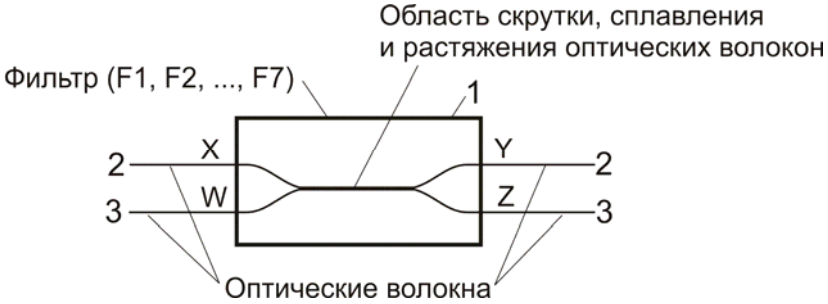

Рис. 1. Упрощённый эскиз конструкции сплавного волнового фильтра

Волновой фильтр 1 [1] предназначен для разделения (сортировки) группы сигналов по длинам волн. Он построен на основе особым образом свитых и сплавленных с одновременным растяжением расплава оптических волокон 2 и 3. Здесь и далее в зависимости от настройки физических параметров фильтра при его изготовлении он имеет обозначения F1, F2, F3, …, F7 (фильтр первого — седьмого типов). При любой настройке фильтр симметричен в том смысле, что пары его выводов X — W, W — X, Y — Z и Z — Y функционально равноценны. Далее такие фильтры именуются «сплавными».

В зависимости от параметров скрутки, плавления и растяжения оптических волокон при изготовлении фильтра он приобретает избирательную прозрачность по отношению к передаче световых сигналов определённых длин волн. Иными словами, фильтр может некоторым образом сортировать входной поток «разноцветных» световых сигналов инфракрасного диапазона, поступающих извне в произвольных сочетаниях на вывод X (на любой из четырёх выводов). Сигналы, как здесь предполагается, имеют длины волн λ1, λ2,…, λ16, равномерно распределённые на горизонтальных числовых осях диаграмм про-

зрачности, показанных на Рис. 2. Соседние длины волн разделены одинаковыми промежутками.

Графики 4 и 5 (Рис. 2, *а*) отображают диаграммы прозрачности каналов X — Y и X — Z фильтра F1. Так как фильтр симметричен, эти же графики отображают соответственно диаграммы прозрачности каналов W — Z и W — Y, а также двух оставшихся каналов, полученных взаимно-обратной заменой символов X, W символами Y, Z. Уровни 0 и 100% соответствуют непрозрачному и полностью прозрачному состояниям канала. Графики для их упрощения представлены двумя противофазными синусоидами, хотя в действительности их форма более сложная и зависит от технологии изготовления фильтра. Из графика 4 следует, что канал X — Y (а также канал W — Z) фильтра F1 прозрачен для света с длинами волн λ1, λ3, λ5,…, λ15 и непрозрачен для света с длинами волн λ2, λ4, λ6,…, λ16. Если канал прозрачен, то свет соответствующих длин волн может передаваться через него в любом или одновременно в обоих направлениях. Непрозрачный канал не пропускает свет соответствующих длин волн ни в одном направлении.

График 5 показывает, что канал X — Z (а также канал W — Y) фильтра F1 прозрачен для света с длинами волн λ2, λ4, λ6,…, λ16 и непрозрачен для света с длинами волн λ1, λ3, λ5,…, λ15.

Графики 6 и 7 (Рис. 2, *б*) отображают диаграммы прозрачности каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F2. Они представлены синусоидами с удвоенными периодами по сравнению с графиками 4 и 5. Из графика 6 следует, что канал X — Y фильтра F2 прозрачен для света с длинами волн λ1, λ5, λ9, λ13 и непрозрачен для света с длинами волн λ3, λ7, λ11, λ15. График 7 противофазен графику 6 и отображает диаграмму прозрачности канала X — Z фильтра F2. Прозрачность каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F2 по отношению к световым сигналам с длинами волн λ2, λ4, λ6,…, λ16 неопределённа, но такие сигналы не поступают на этот фильтр в процессе его работы.

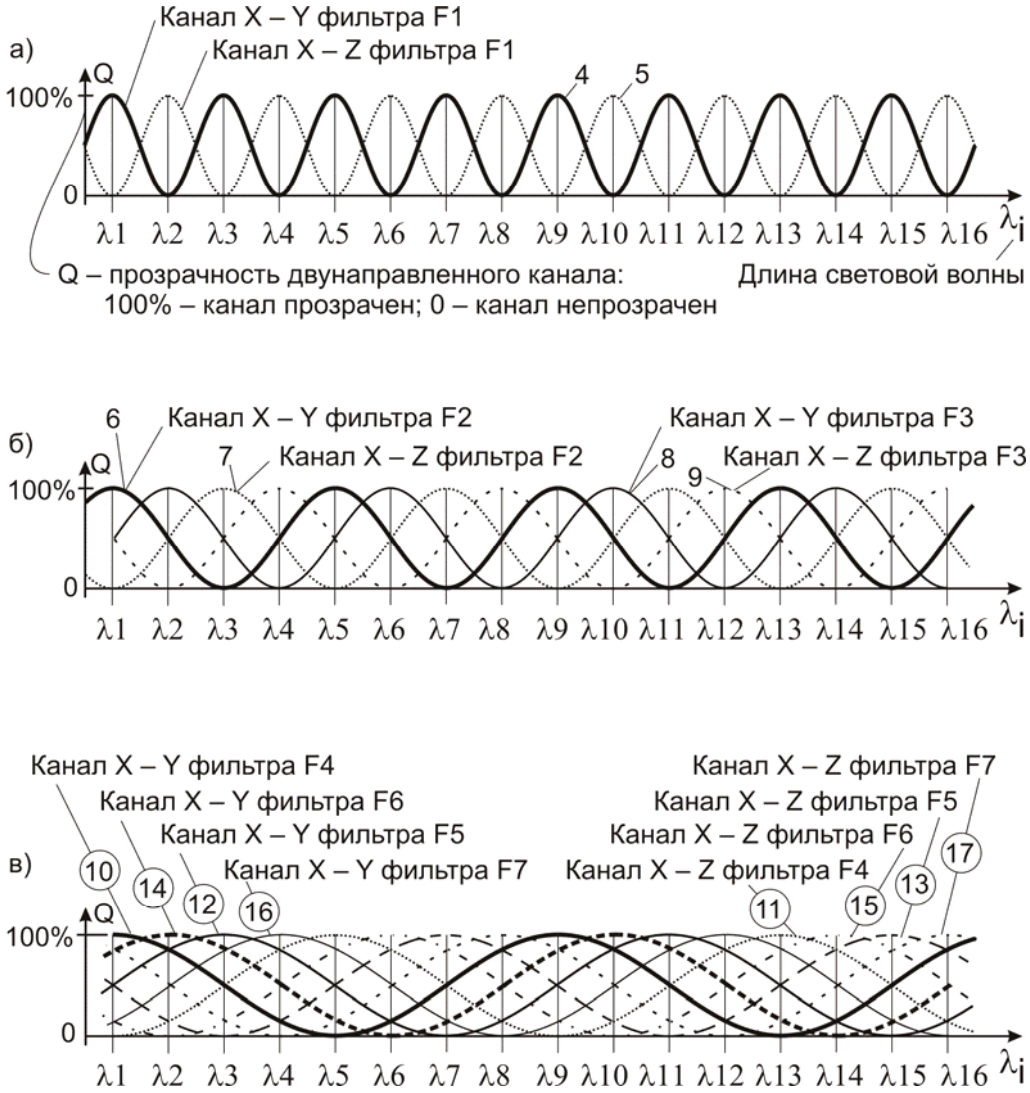

Рис. 2. Диаграммы прозрачности волновых фильтров F1 — F7 первого — седьмого типов

Графики 8 и 9 (Рис. 2, *б*) отображают диаграммы прозрачности каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F3. Они представлены синусоидами той же частоты, что и синусоиды 6 и 7, но сдвинуты относительно них по фазе вправо на четверть периода. Из графика 8 следует, что канал X — Y фильтра F3 прозрачен для света с длинами волн λ2, λ6, λ10, λ14 и непрозрачен для света с длинами волн λ4, λ8, λ12, λ16. График 9 противофазен графику 8 и отображает диаграмму прозрачности канала X — Z фильтра F3. Канал X — Z фильтра F3 прозрачен для света с длинами волн λ4, λ8, λ12, λ16 и непрозрачен для света с длинами волн λ2, λ6, λ10, λ14. Прозрачность каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F3 по отношению к световым сигналам с длинами волн λ1, λ3, λ5,…, λ15 неопределённа, но такие сигналы не поступают на этот фильтр в процессе его работы.

Графики 10 и 11 (Рис. 2, *в*) отображают диаграммы прозрачности каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F4. Они представлены синусоидами с удвоенными периодами по сравнению с графиками 6 — 9. Из графика 10 следует, что канал X — Y фильтра F4 прозрачен для света с длинами волн λ1, λ9 и непрозрачен для света с длинами волн λ5, λ13.

График 11 противофазен графику 10 и отображает диаграмму прозрачности канала X — Z фильтра F4. Этот канал прозрачен для света с длинами волн λ5, λ13 и непрозрачен для света с длинами волн λ1, λ9. Прозрачность каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F4 по отношению к световым сигналам с длинами волн λ2 — λ4, λ6 — λ8,

λ10 — λ12, λ14 — λ16 неопределённа, но такие сигналы не поступают на этот фильтр в процессе его работы.

Графики 12 и 13 (Рис. 2, *в*) отображают диаграммы прозрачности каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F5. Из графика 12 следует, что канал X — Y фильтра F5 прозрачен для света с длинами волн λ3, λ11 и непрозрачен для света с длинами волн λ7, λ15. График 13 противофазен графику 12 и отображает диаграмму прозрачности канала X — Z фильтра F5. Этот канал прозрачен для света с длинами волн λ7, λ15 и непрозрачен для света с длинами волн λ3, λ11. Прозрачность каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F5 по отношению к световым сигналам с длинами волн λ1, λ2, λ4 — λ6, λ8 — λ10, λ12 — λ14, λ16 неопределённа, но такие сигналы не поступают на этот фильтр в процессе его работы.

Графики 14 и 15 (Рис. 2, *в*) отображают диаграммы прозрачности каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F6. Из графика 14 следует, что канал X — Y фильтра F6 прозрачен для света с длинами волн λ2, λ10 и непрозрачен для света с длинами волн λ6, λ14. График 15 противофазен графику 14 и отображает диаграмму прозрачности канала X — Z фильтра F6. Этот канал прозрачен для света с длинами волн λ6, λ14 и непрозрачен для света с длинами волн λ2, λ10. Прозрачность каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F6 по отношению к световым сигналам с длинами волн λ1, λ3 — λ5, λ7 — λ9, λ11 — λ13, λ15, λ16 неопределённа, но такие сигналы не поступают на этот фильтр в процессе его работы.

Графики 16 и 17 (Рис. 2, *в*) отображают диаграммы прозрачности каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F7. Из графика 16 следует, что канал X — Y фильтра F7 прозрачен для света с длинами волн λ4, λ12 и непрозрачен для света с длинами волн λ8, λ16. График 17 противофазен графику 16 и отображает диаграмму прозрачности канала X — Z фильтра F7. Этот канал прозрачен для света с длинами волн λ8, λ16 и непрозрачен для света с длинами волн λ4, λ12. Прозрачность каналов X — Y и X — Z (W — Z и W — Y) фильтра F7 по отношению к световым сигналам с длинами волн λ1 — λ3, λ5 — λ7, λ9 — λ11, λ13 — λ15 неопределённа, но такие сигналы не поступают на этот фильтр в процессе его работы.

Примеры 18 — 23 трасс прохождения оптических сигналов через волновой фильтр F1 (Рис. 3, *а* — *е*) показывают распространение группы световых сигналов через фильтр слева направо, справа налево и одновременно в обоих направлениях. В этих примерах один из выводов фильтра не используется. В примерах 24 — 26, приведенных на Рис. 3, *ж, з* и Рис. 4, *а,* использованы все выводы фильтра F1.

Примеры 24 и 25 показывают возможность применения фильтра F1 для сопряжения однонаправленных линий передачи оптических сигналов с двунаправленными.

В примере 24 оптический сигнал, поступающий на вход X с левой стороны, содержит 16 составляющих с длинами волн λ1 — λ16. Сигнал, снимаемый с выхода W фильтра, также содержит 16 составляющих с теми же длинами волн λ*1 — λ*16. Знаки «*» показывают, что сигналы поступили на входы фильтра F1 с правой стороны. На входе-выходе Y сигналы с длинами волн λ1, λ3, λ5,…, λ15 распространяются вправо, а сигналы с длинами волн λ*2, λ*4, λ*6,…, λ*16 — влево. На входе-выходе Z сигналы с длинами волн λ2, λ4, λ6,…, λ16 распространяются вправо, а сигналы с длинами волн λ*1, λ*3, λ*5,…, λ*15 — влево.

Пример 25 отличается от примера 24 направлениями передачи сигналов через выводы X и W фильтра F1.

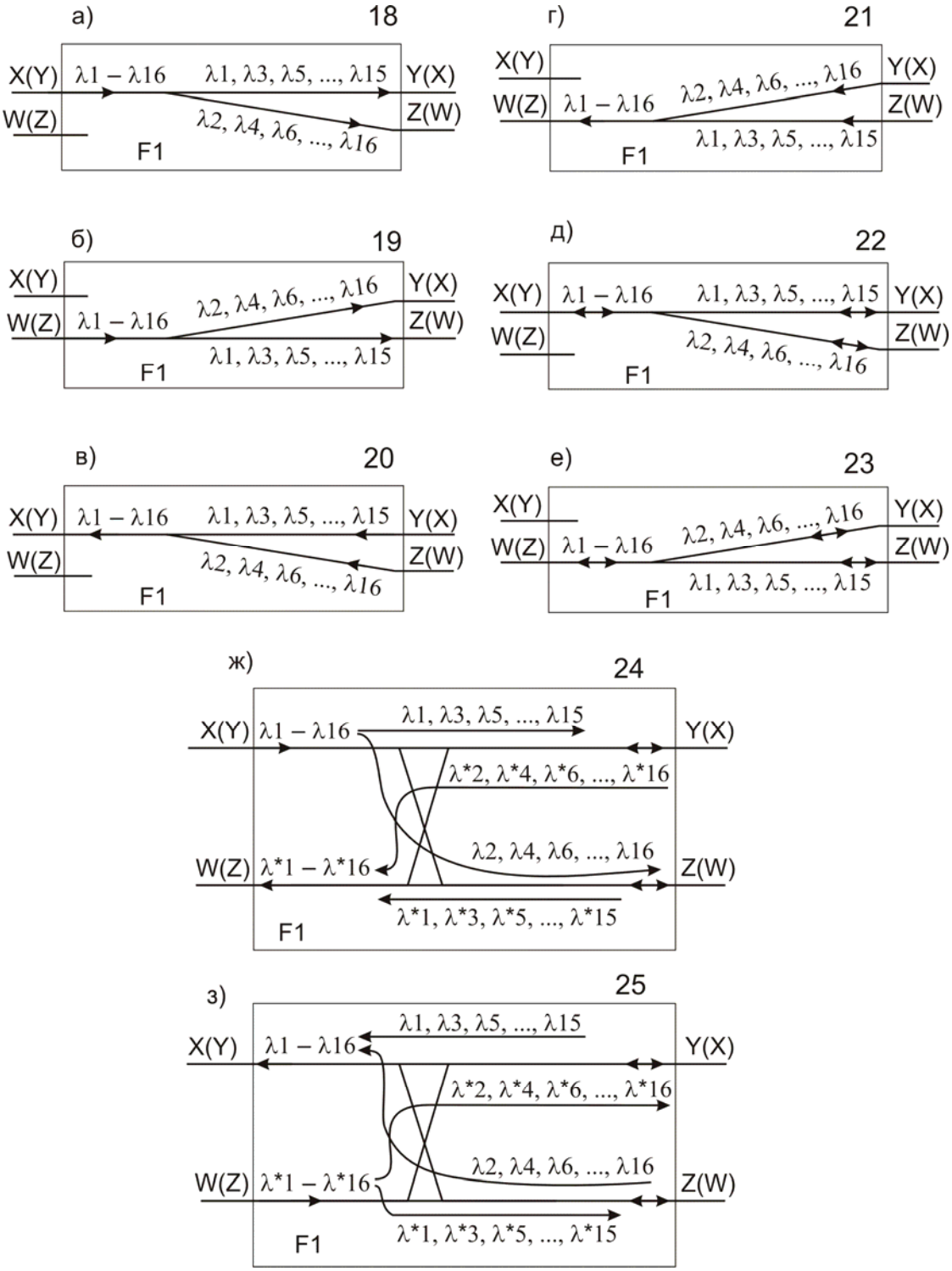

Рис. 3.Примеры трасс прохождения оптических сигналов через волновой фильтр первого типа

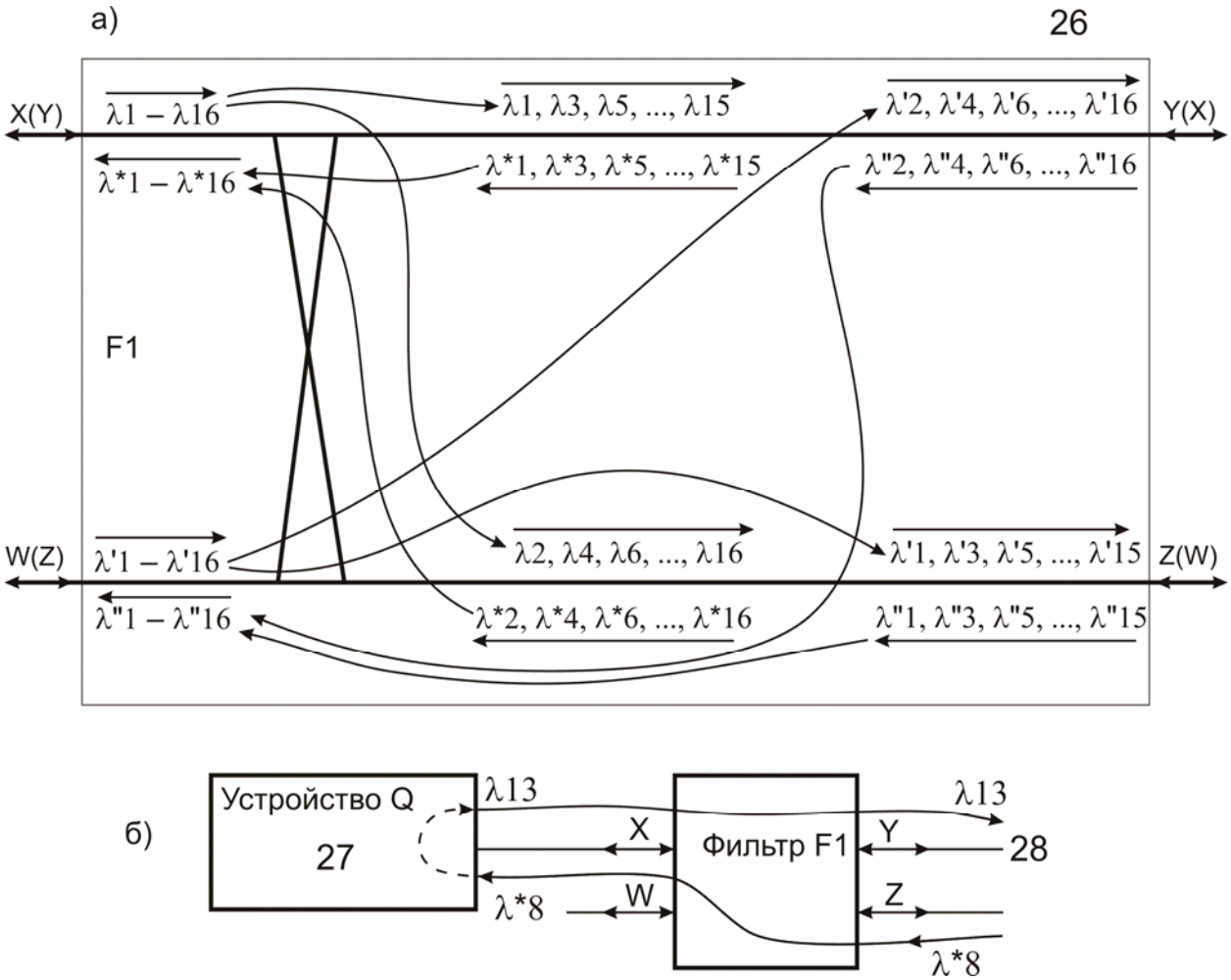

Рис. 4. Пример трасс прохождения двунаправленных оптических сигналов через волновой фильтр первого типа (*а*); пример включения этого фильтра в систему передачи данных (*б*)

В примере 26 (Рис. 4, *а*) все подключенные к фильтру F1 линии двунаправленные. По каждой линии передаются 16 пар противоположно направленных оптических сигналов, каждая пара имеет одинаковую длину волны. По существу, эта схема представляет собой неполносвязный коммутатор, способный транслировать данные в направлениях: X → Y, X → Z, W → Y, W → Z, Y → X, Y → W, Z → X, Z → W. Для выбора направления передачи (маршрутизации информационного пакета) источник данных использует длины волн с чётными или нечётными номерами. Например, внешний источник сигнала, подаваемого на вход-выход Z фильтра F1, желая передать сообщение в линию связи, подключенную к входам-выходам X или W, может использовать для этого световые импульсы с соответствующими длинами волн λ*6 или λ″15.

Непосредственная передача данных в смежных направлениях X → W, W → X, Y → Z, Z → Y невозможна. При наличии устройства — посредника 27 (Рис. 4, *б*) такие передачи осуществимы. Например, внешний источник сигнала, подаваемого на вход-выход Z фильтра F1, желая передать сообщение в линию связи 28, подключенную к входам-выходам Y, может использовать для этого световые импульсы с длиной волны λ*8. Эти импульсы проходят на вход-выход X и принимаются устройством Q (27). По предварительной «договорённости» с этим устройством, оно незамедлительно выдаёт полученные импульсы обратно на вход-выход X, но использует для этого свет с длиной волны λ13. Фильтр F1 передаёт эти импульсы на вход-выход Y, что и требуется.

Приведенные примеры (их можно распространить и на фильтры других типов с учётом их диаграмм прозрачности) открывают широкие возможности синтеза более сложных устройств. Рассмотрим некоторые из них.

2 Коммутаторы с кольцевой структурой

Коммутаторы с чётным числом каналов

Коммутатор, показанный на Рис. 5, *а*, обеспечивает связь каждого канала (A, B, C и D) с ближайшими соседними каналами кольцевой структуры.

Для двустороннего обмена данными между каналами (узлами сети) используются оптические сигналы с длинами волн λ1 — λ16, равномерно распределёнными на горизонтальной числовой оси диаграмм, показанных на Рис. 2, *а*. В коммутаторе применены рассмотренные ранее фильтры типа F1.

На диаграмме, приведенной на Рис. 5, *б*, точки и дуги между ними отображают пары каналов, которые используют для двустороннего обмена данными заданную длину волны. Из этой диаграммы следует, что узлы сети, подключенные к каналам A и B, обмениваются данными с использованием длин волн λ1, λ3, λ5,…, λ15. Эти же длины волн используются для двусторонней передачи данных между устройствами, подключенными к каналам C и D. Узлы сети, подключенные к каналам A и D, обмениваются данными с использованием длин волн λ2, λ4, λ6,…, λ16, что отображается удлинёнными дугами. Эти же длины волн используются для двунаправленной передачи данных между устройствами, подключенными к каналам B и C.

Таким образом, каждый узел сети может одновременно и двусторонне обмениваться данными с двумя ближайшими соседними узлами с использованием в каждом направлении приёма-передачи восьми длин волн.

В общем случае коммутатор оптических сигналов, показанный на Рис. 6, содержит 2N фильтров F1, N = 2, 3, 4,…, символ J обозначает номер канала.

Также как и в схеме на Рис. 5, *а*, соседние узлы компьютерной сети обмениваются данными с использованием длин волн λ1, λ3, λ5, …, λ15 или λ2, λ4, λ6, …, λ16 в зависимости от сочетания номеров J каналов коммутатора. В общем случае число используемых длин волн не ограничивается шестнадцатью.

Применение коммутатора позволяет упростить построение сетей с логической структурой типа «кольцо» и топологией типа «звезда». Коммутатор функционирует без источника питания. Маршрут передаваемого узлом сети пакета задаётся выбором длины волны (λ1 — λ16), что позволяет одновременно обмениваться информацией с соседними узлами с использованием 16 потоков данных.

Коммутаторы с нечётным числом каналов, первый вариант

Рассмотрим трёхканальный, пятиканальный и (2N + 1)-канальный (N = 1, 2, 3, ...) коммутаторы, показанные на Рис. 7 — Рис. 9.

В соответствии с Рис. 7, для двустороннего обмена данными между каналами (узлами сети) A, B, и C используются оптические сигналы из диапазона волн λ1 — λ16 (Рис. 2, *а, б*). В коммутаторе применены рассмотренные ранее фильтры типа F1 и F3.

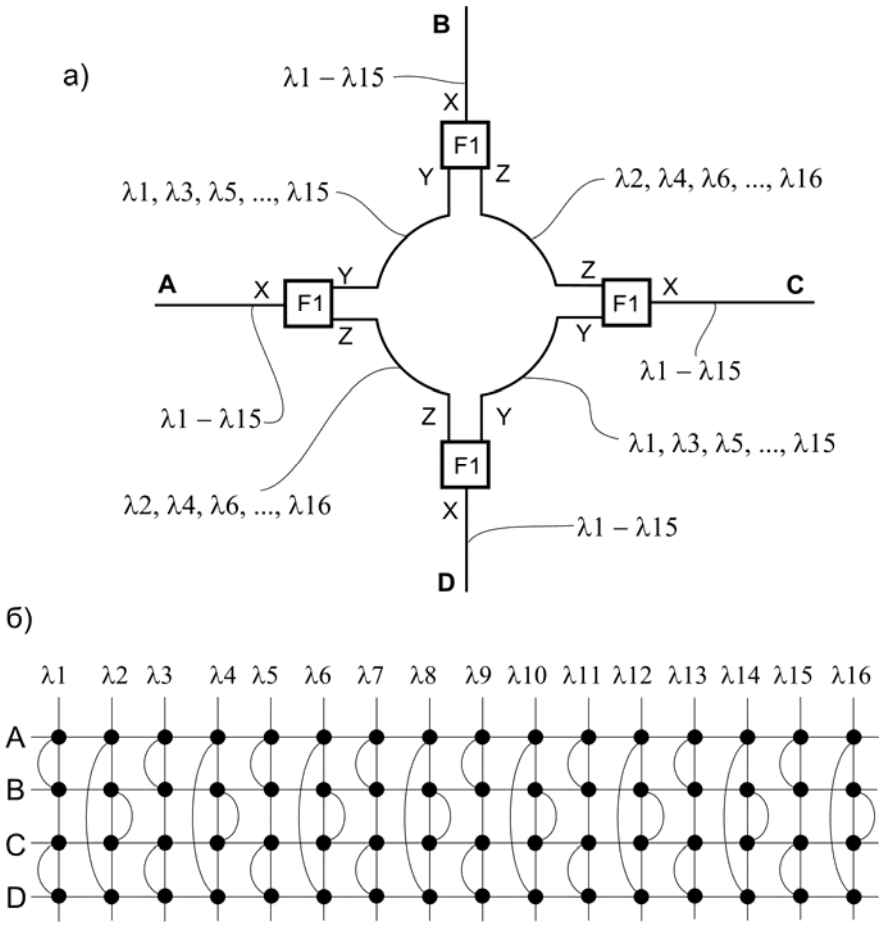

Рис. 5. Четырёхканальный коммутатор с кольцевой структурой: *а* — функциональная схема; *б* — диаграмма распределения сигналов обмена данными между каналами

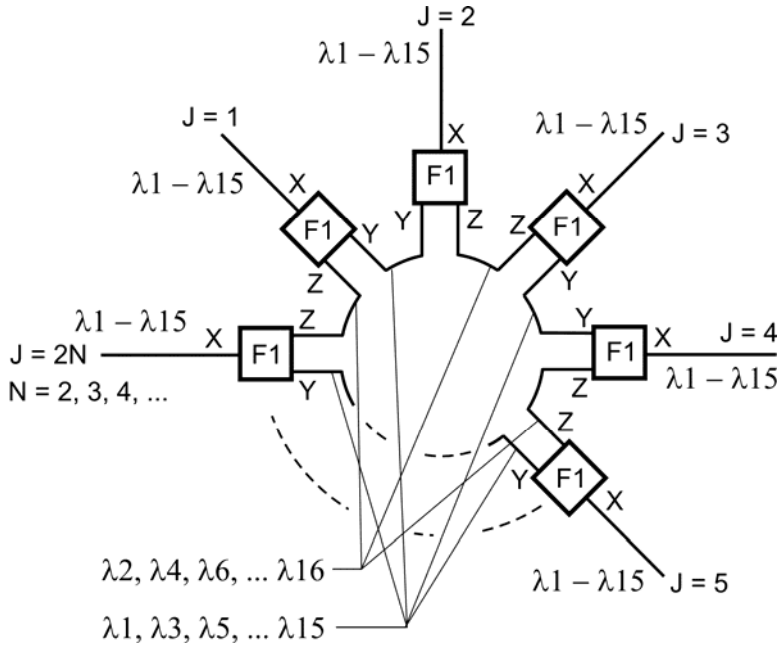

Рис. 6. Структура 2N-канального коммутатора (N = 2, 3, 4, ...)

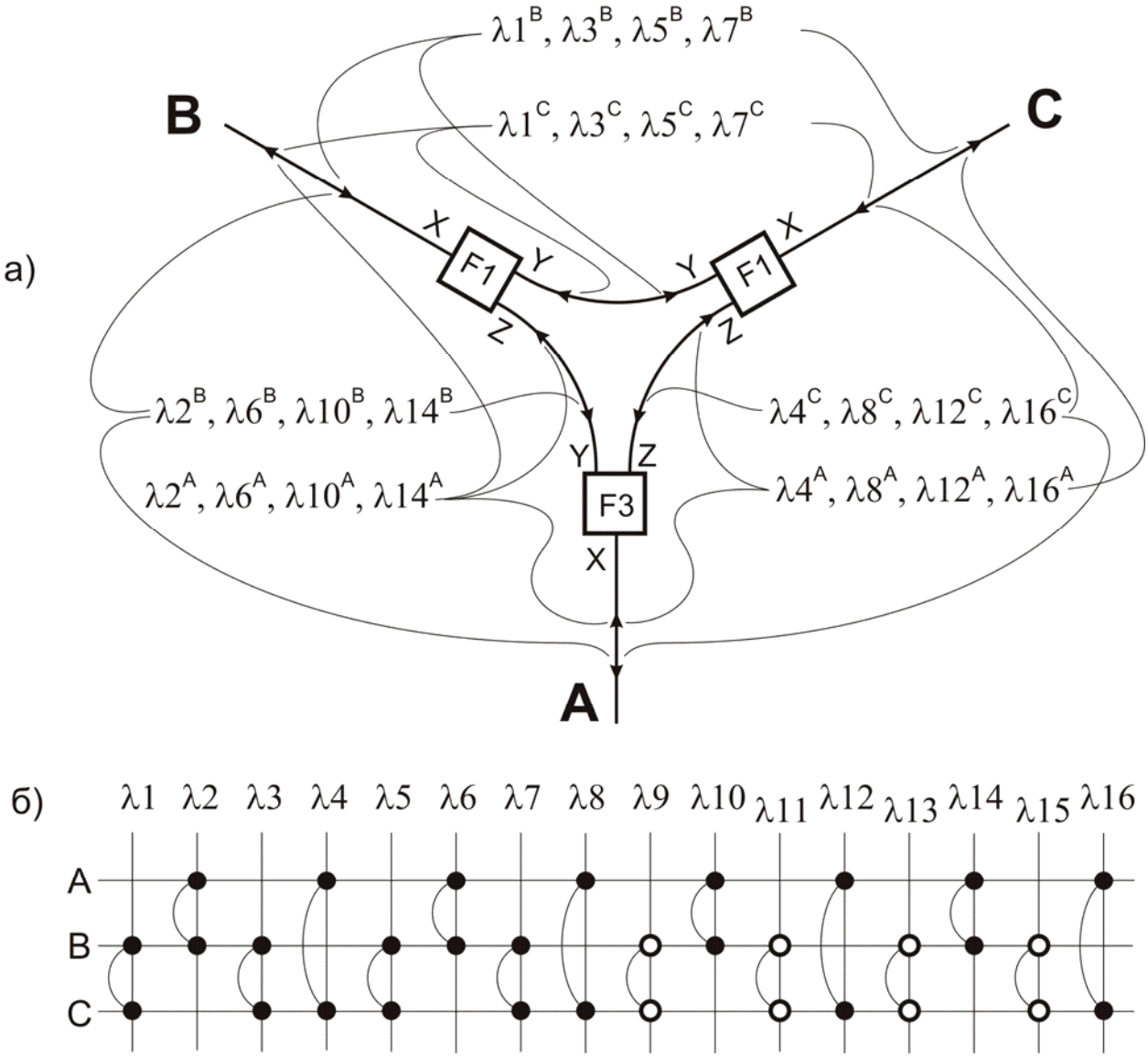

Рис. 7. Трёхканальный коммутатор с кольцевой структурой: *а* — функциональная схема; *б* — диаграмма распределения сигналов обмена данными между каналами

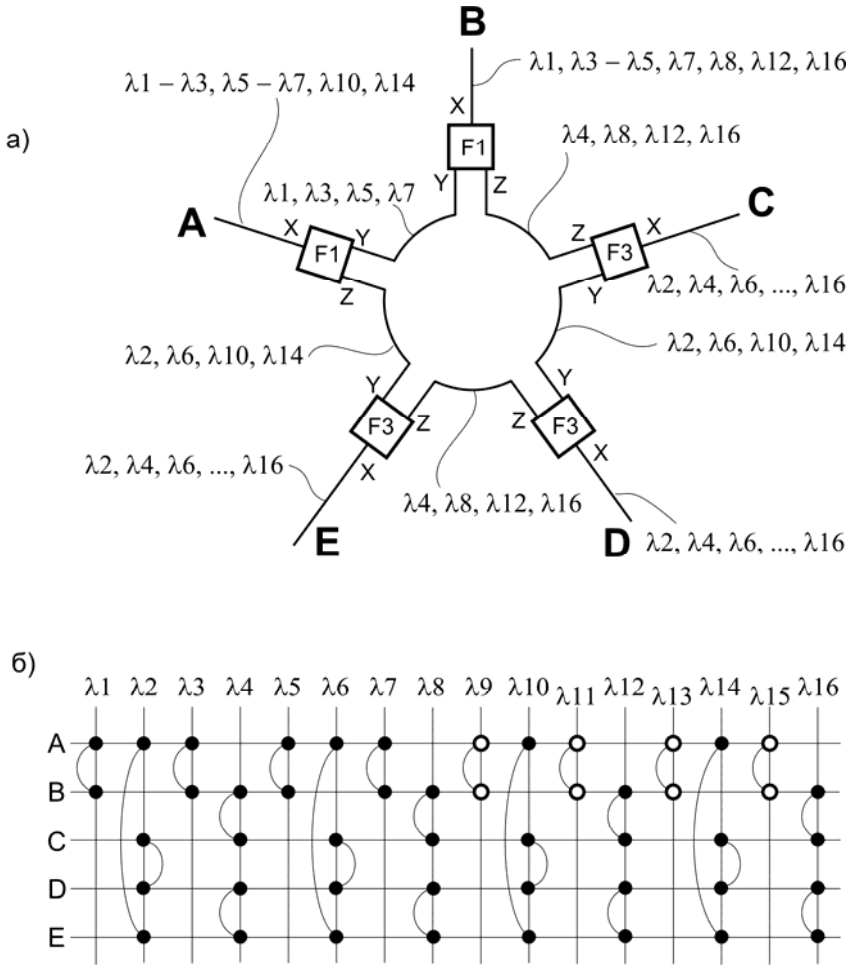

Рис. 8. Пятиканальный коммутатор с кольцевой структурой (первый вариант): *а* — функциональная схема; *б* — диаграмма распределения сигналов обмена данными между каналами

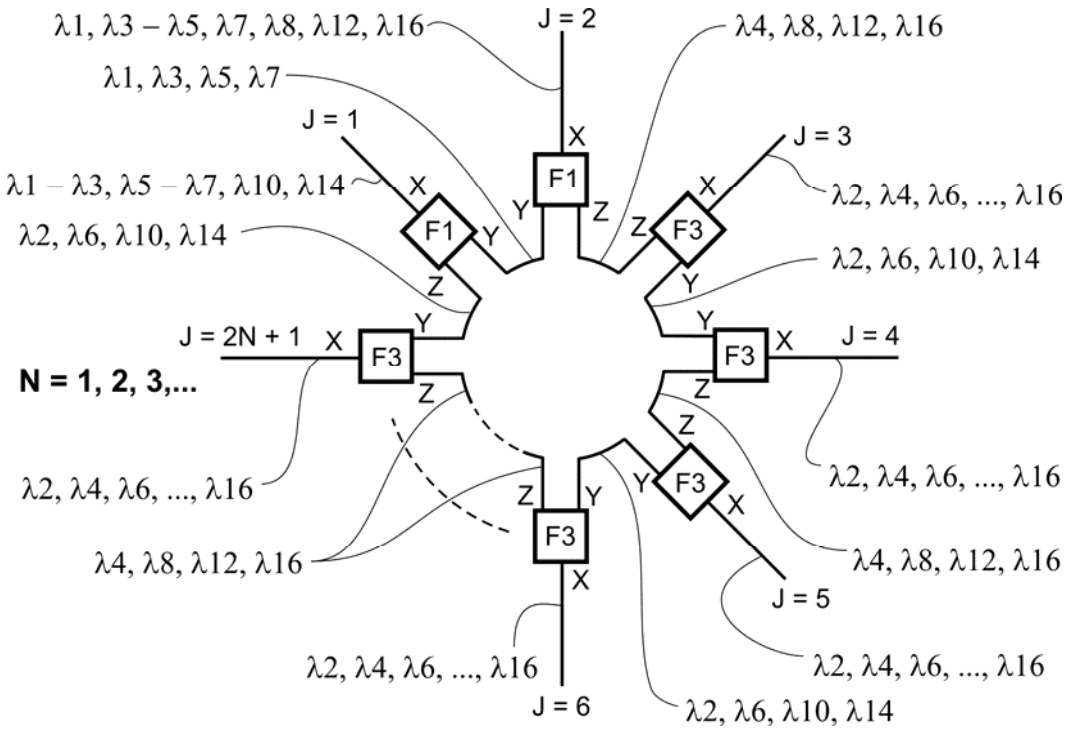

Рис. 9. Структура (2N + 1)-канального коммутатора (N = 1, 2, 3, ...), первый вариант

На диаграмме, приведенной на Рис. 7, *б*, чёрные точки и дуги между ними отображают пары каналов (A — B, A — C, B — C), которые используют для двунаправленного обмена данными заданную длину волны. Из этой диаграммы следует, что узлы сети, подключенные к каналам B и C, обмениваются данными с использованием длин волн λ1, λ3, λ5, λ7. Эта группа длин волн может быть расширена резервными длинами волн λ9, λ11, λ13, λ15, что отражено на диаграмме «полыми» кружками и дугами между ними.

Узлы сети, подключенные к каналам A и B, обмениваются данными с использованием длин волн λ2, λ6, λ10, λ14. Узлы сети, подключенные к каналам A и C, обмениваются данными с использованием длин волн λ4, λ8, λ12, λ16, что отображено удлинёнными дугами на диаграмме.

Для указания направлений передачи сигналов через коммутатор, показанный на Рис. 7, *а*, приняты следующие обозначения. В записи вида «$\lambda 1^A$» верхний индекс указывает источник сигнала (в данном примере это устройство, подключенное к каналу A) с длиной волны λ1. Таким образом,

$\lambda 1^C$, $\lambda 3^C$, $\lambda 5^C$, $\lambda 7^C$ — длины волн для передачи данных из канала C в канал B;
$\lambda 1^B$, $\lambda 3^B$, $\lambda 5^B$, $\lambda 7^B$ — длины волн для передачи данных из канала B в канал C;
$\lambda 2^A$, $\lambda 6^A$, $\lambda 10^A$, $\lambda 14^A$ — длины волн для передачи данных из канала A в канал B;
$\lambda 2^B$, $\lambda 6^B$, $\lambda 10^B$, $\lambda 14^B$ — длины волн для передачи данных из канала B в канал A;
$\lambda 4^A$, $\lambda 8^A$, $\lambda 12^A$, $\lambda 16^A$ — длины волн для передачи данных из канала A в канал C;
$\lambda 4^C$, $\lambda 8^C$, $\lambda 12^C$, $\lambda 16^C$ — длины волн для передачи данных из канала C в канал A.

В данном случае каждый узел сети может одновременно и двусторонне обмениваться данными с двумя ближайшими соседними узлами с использованием в каждом направлении приёма-передачи четырёх длин волн (не считая четырёх резервных длин волн для обмена данными между каналами B и C). Иными словами, все показанные на Рис. 7, *а* передачи могут осуществляться одновременно. С учётом резервных длин волн число таких передач равно 32.

Пятиканальный коммутатор (Рис. 8) построен аналогично на основе двух фильтров F1 и трёх фильтров F3 (см. Рис. 2, *а, б*).

Также как и в трёхканальном коммутаторе, в данном случае для обмена данными между узлами сети используются оптические сигналы с длинами волн λ1, λ2, …, λ8, λ10, λ12, λ14 и λ16 из множества сигналов с длинами волн λ1 — λ16.

Из диаграммы, представленной на Рис. 8, *б*, следует, что одна и та же длина волны может использоваться для передачи данных между одной или двумя парами узлов сети, подключенных к соседним каналам. Так, сигнал с длиной волны λ1 используется только для передачи данных по двунаправленной цепи A — B. Сигнал с длиной волны λ2 используется как для передачи данных по цепи A — E, так и по цепи C — D и т. д.

Также как и в трёхканальном коммутаторе, для обмена данными между узлами сети, подключенными к соседним каналам A и B, могут использоваться резервные длины волн λ9, λ11, λ13 и λ15.

В общем случае коммутатор оптических сигналов, показанный на Рис. 9, содержит 2N + 1 каналов (J = 1, 2, …, 2N + 1) и столько же фильтров, из которых два — типа F1, остальные — типа F3.

Также как и в схемах трёх- и пятиканального коммутаторов, соседние узлы компьютерной сети обмениваются данными с использованием соответствующих длин волн в зависимости от сочетания номеров J каналов коммутатора.

Коммутаторы с нечётным числом каналов, второй вариант

Второй вариант коммутатора при трёх каналах полностью совпадает с первым (Рис. 7). При большем числе каналов (5, 7, 9 и т. д.) второй вариант (Рис. 10, Рис. 11) коммутатора отличается от первого варианта тем, что в нём используется один фильтр типа F3, остальные фильтры — типа F1. Это влияет на пропускную способность каналов связи. Напомним, что в первом варианте коммутатора независимо от его размерности между оп-

ределёнными двумя каналами имеется резерв пропускной способности в виде запасных длин волн λ9, λ11, λ13 и λ15 (Рис. 7, *б*).

В данном случае ситуация в некотором смысле противоположная: в канале, подключённом к входу-выходу X фильтра F3, имеется недостаток пропускной способности из-за невозможности использования сигналов с длинами волн λ1, λ3, λ5, ..., λ15. Но в качестве своеобразной компенсации этого в остальных каналах, не граничащих с ним, использована вся группа длин волн λ1 — λ16.

Пятиканальный коммутатор (Рис. 10) построен на основе одного фильтра F3 и четырёх фильтров F1 (см. Рис. 2, *а, б*). Из диаграммы, приведенной на Рис. 10, *б*, следует, что канал A оперирует группой из восьми длин волн, соседние каналы (B и E) — группами из 12 длин волн, остальные каналы (C, D) — группами из 16 длин волн.

В общем случае коммутатор (Рис. 11) обладает теми же свойствами, что и только что рассмотренный.

Коммутаторы с нечётным числом каналов, третий вариант

Пятиканальный коммутатор в данном варианте (Рис. 12) содержит четыре фильтра F1 (Рис. 2, *а*).

Узлы сети, подключенные к каналам A и B, обмениваются данными с использованием длин волн λ1, λ3, λ5, …, λ15. Эти же длины волн используются для двунаправленной передачи данных между устройствами, подключенными к каналам C и D. Узлы сети, подключенные к каналам B и C, обмениваются данными с использованием длин волн λ2, λ4, λ6, …, λ16. Эти же длины волн используются для двунаправленной передачи данных между устройствами, подключенными к каналам D и E, а также к каналам E и A. Последнее достигается благодаря тому, что обмен данными с устройством, подключённым к каналу E, осуществляется одновременно по двум оптическим волокнам, соединённым с входами-выходами Z фильтров F1 соседних каналов.

Таким образом, каждый узел сети может одновременно и двусторонне обмениваться данными с двумя ближайшими соседними узлами с использованием в каждом направлении приёма-передачи восьми длин волн.

В общем случае (2N +1)-канальный коммутатор оптических сигналов (N = 1, 2, 3, ...), показанный на Рис. 13, содержит 2N фильтров F1. Также как и в пятиканальной схеме, соседние узлы компьютерной сети обмениваются данными с использованием длин волн λ1, λ3, λ5, …, λ15 или λ2, λ4, λ6, …, λ16 в зависимости от сочетания номеров J каналов коммутатора.

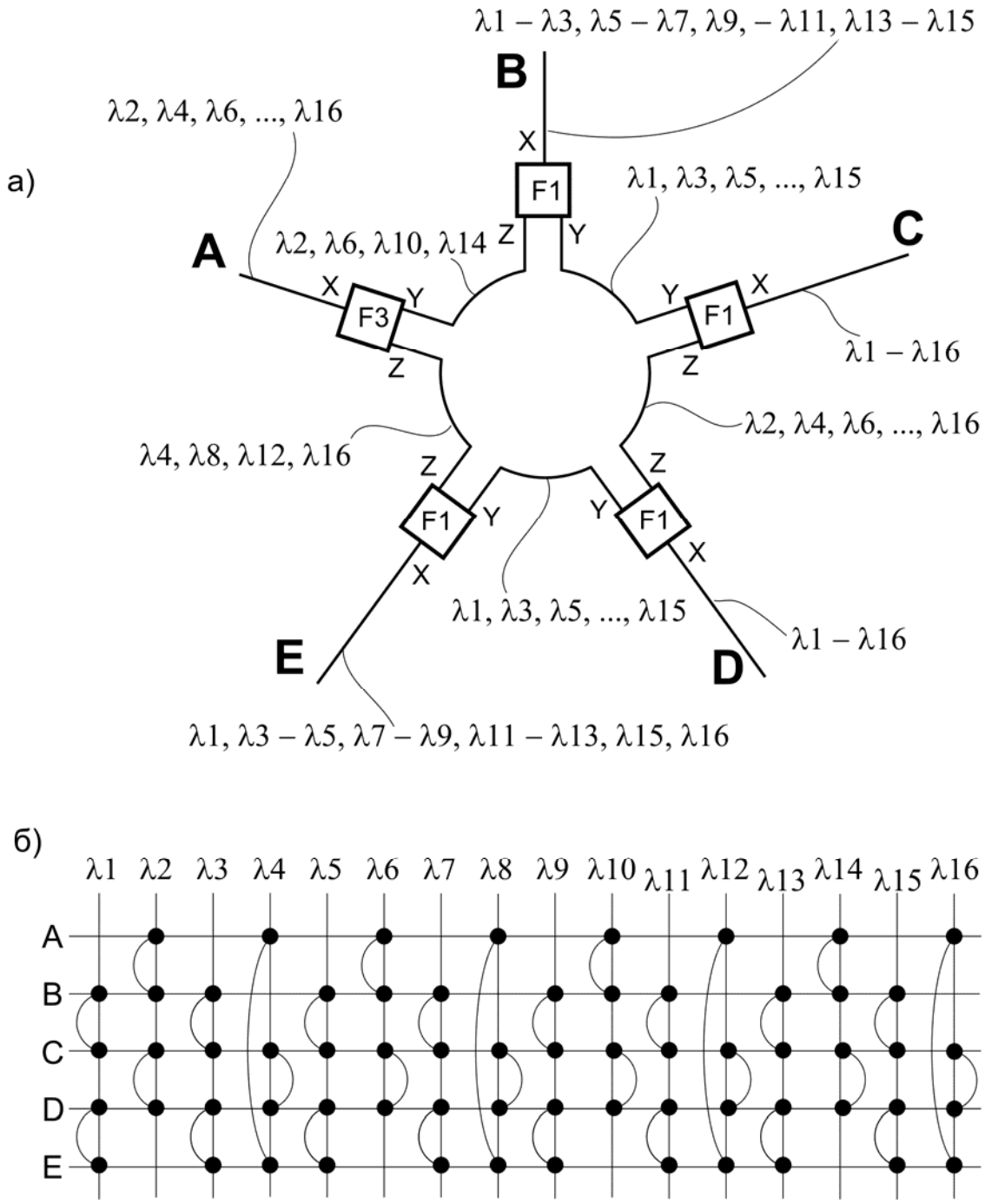

Рис. 10. Пятиканальный коммутатор с кольцевой структурой (второй вариант): *а* — функциональная схема; *б* — диаграмма распределения сигналов обмена данными между каналами

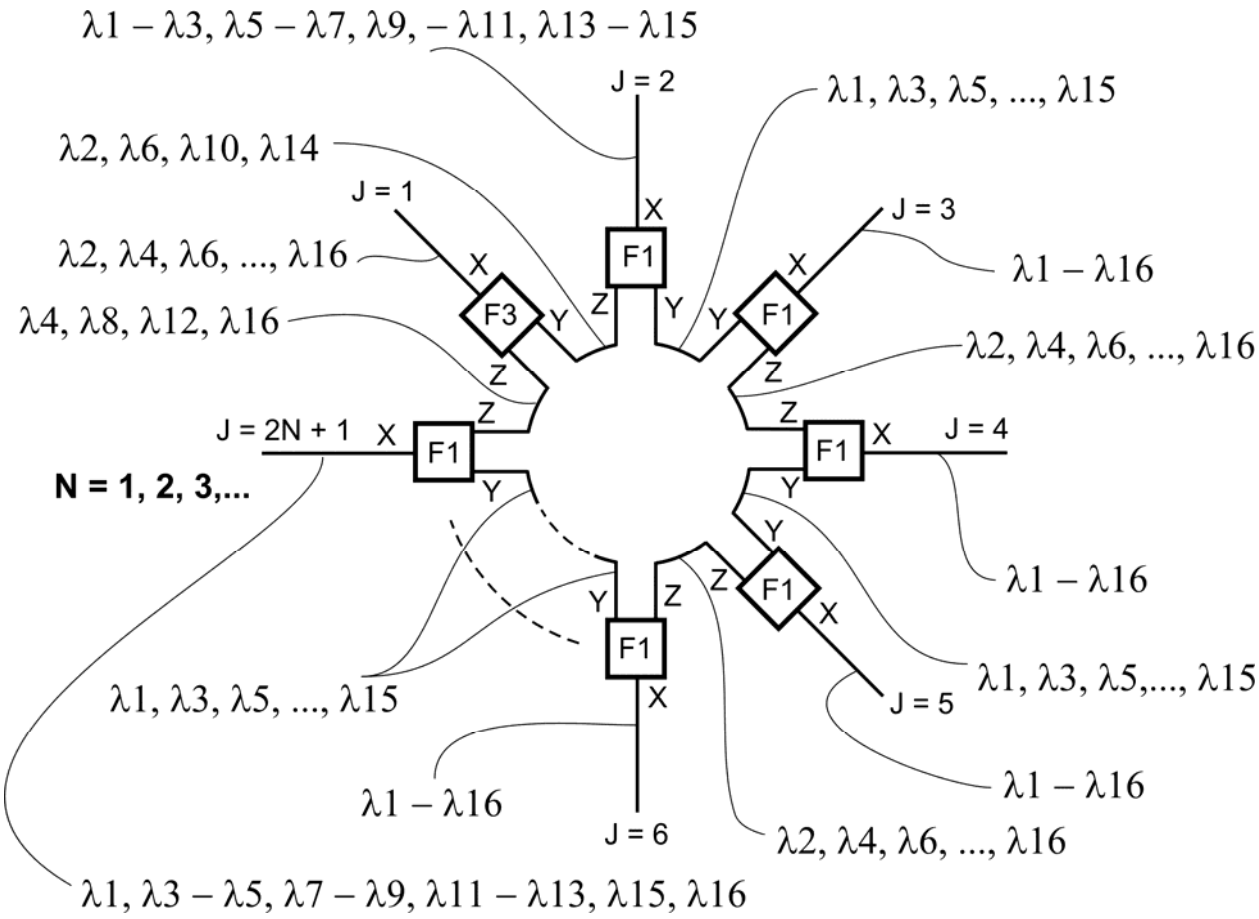

Рис. 11. Структура (2N + 1)-канального коммутатора (N = 1, 2, 3, ...), второй вариант

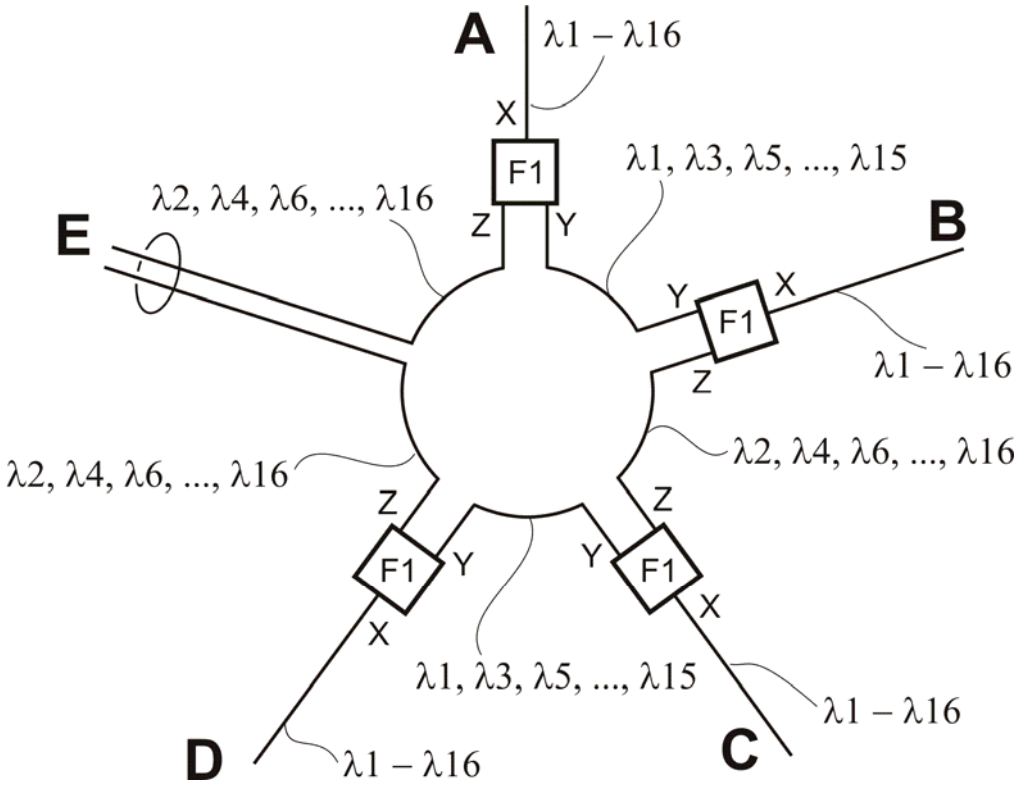

Рис. 12. Пятиканальный коммутатор с кольцевой структурой (третий вариант)

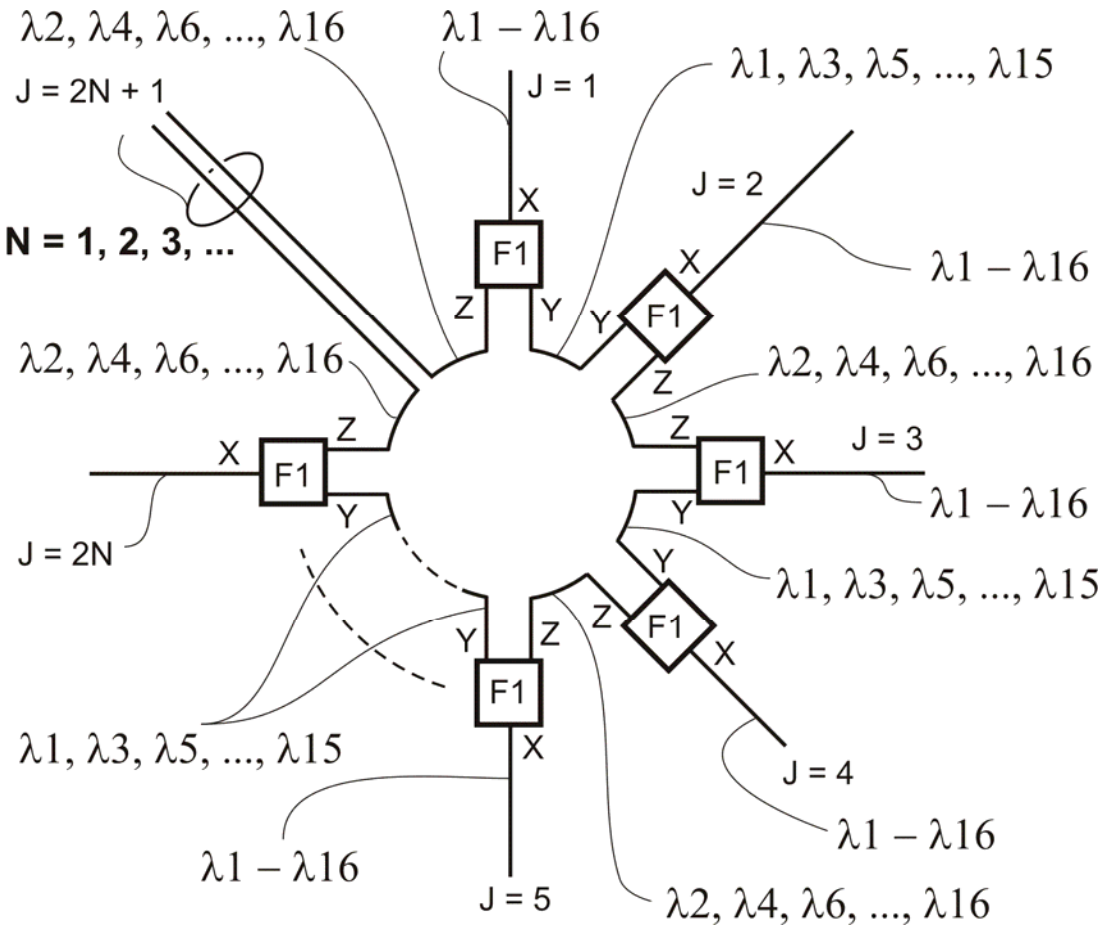

Рис. 13. Структура (2N + 1)-канального коммутатора (N = 1, 2, 3, ...), третий вариант

Коммутатор с шунтированием неработоспособных каналов

Восьмиканальный коммутатор (Рис. 14) содержит восемь одинаковых логических блоков (Рис. 15), построенных на фильтрах F1 — F3 (Рис. 2, *а, б*). В общем случае коммутатор данного типа может содержать 4N каналов, N = 2, 3, 4, … .

Такой коммутатор может применяться в резервированных сетях с кольцевой логической структурой и топологией типа «звезда». Резервирование в данном случае предполагает наличие обходного пути, шунтирующего неисправный узел сети или линию связи с ним.

С помощью коммутатора любой узел сети имеет возможность двунаправленного обмена данными как с двумя ближайшими соседними узлами сети, расположенными в направлении против часовой стрелки, так и с двумя ближайшими соседними узлами сети, расположенными в направлении по часовой стрелке.

Так, узел, подключённый к каналу D, может осуществлять двунаправленный обмен оптическими сигналами с узлом, подключённым к каналу C, по внутренней оптической связи *a* — *a* с использованием одной, или одновременно двух, трёх или четырёх длин волн из группы λ4, λ8, λ12, λ16. Этот же узел (подключённый к каналу D) может осуществлять двунаправленный обмен оптическими сигналами с узлом, подключённым к каналу E по связи *b* — *b* с использованием одной, или одновременно двух, трёх или четырёх длин волн из группы λ2, λ6, λ10, λ14.

Узел сети, подключённый к каналу D, может в обход каналов C или (и) E (например, в случае отказа одного, другого или обоих каналов или узлов) двусторонне обмениваться данными с узлами, подключёнными к каналам B и F.

Так, двунаправленный обмен оптическими сигналами между каналами D и B осуществляется по связи *c* — *c* с использованием одной или одновременно двух, трёх или четырёх длин волн из группы λ3, λ7, λ11, λ15. Аналогично двунаправленный обмен оптическими сигналами между каналами D и F осуществляется по связи *d* —*d* с использованием одной или одновременно двух, трёх или четырёх длин волн из группы λ1, λ5, λ9, λ13.

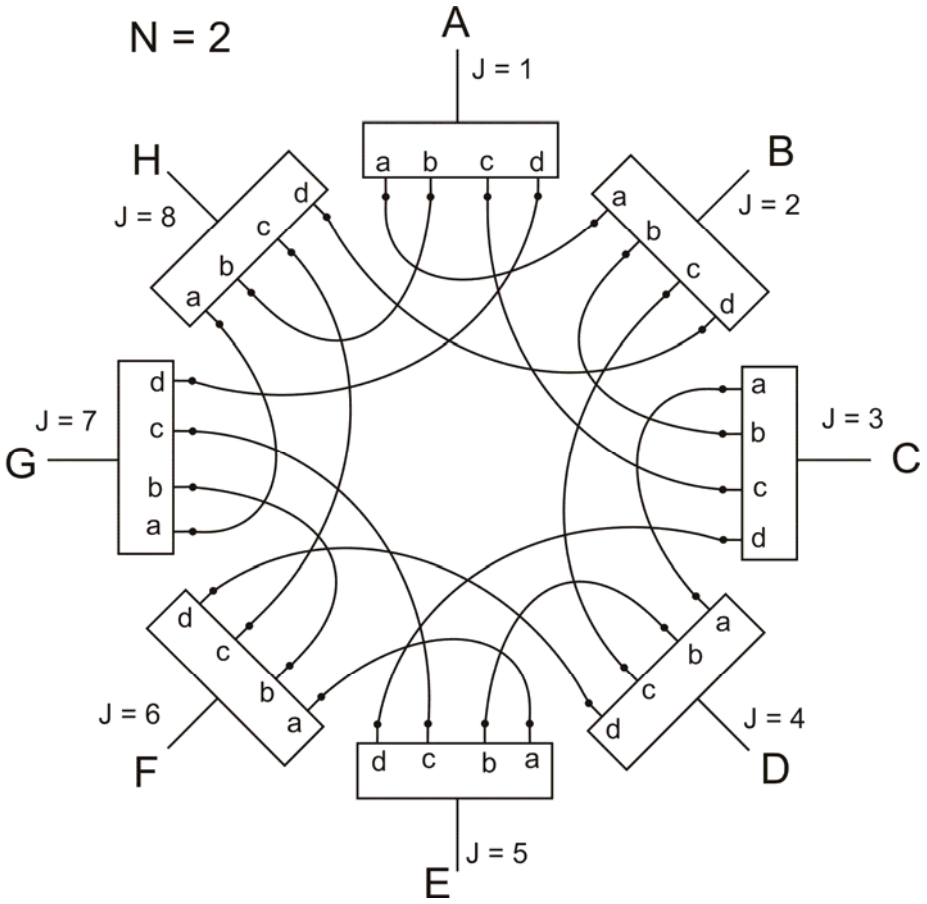

Рис. 14. Коммутатор с шунтированием неработоспособных каналов

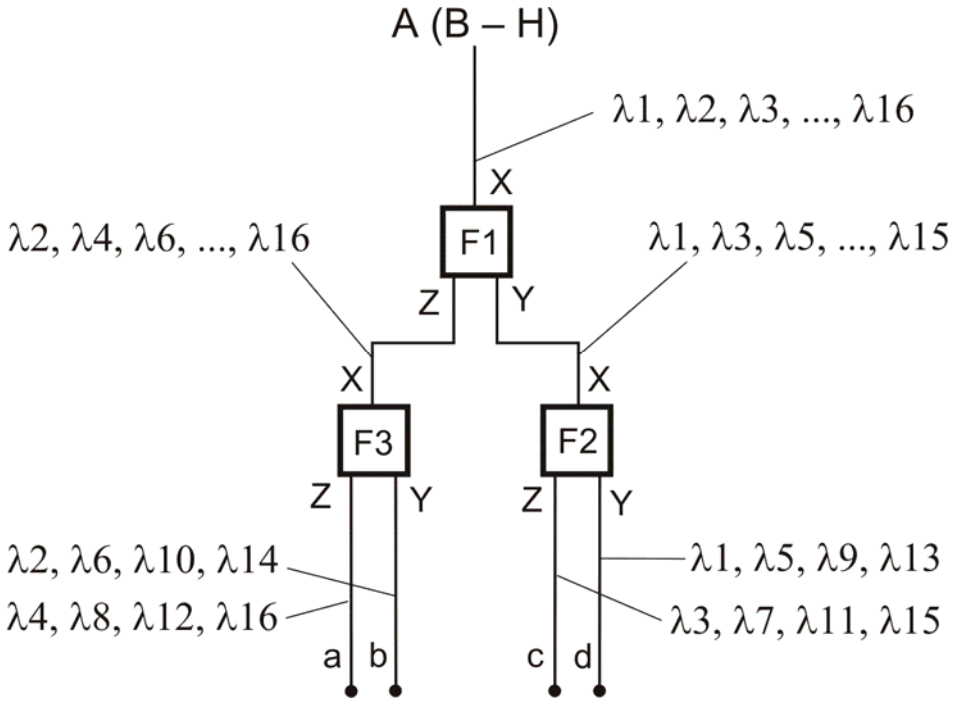

Рис. 15. Структура логического блока

Выявление неработоспособного канала может выполняться тестированием кольцевой структуры. В процессе тестирования поочерёдно проверяются предположения о неработоспособности каналов A, B, C и т. д. Каждый из этих каналов поочерёдно шунтируется, в результате определяется канал, при шунтировании которого целостность кольцевой структуры восстанавливается.

3 Четырёхканальные коммутаторы, реализующие полный граф соединений

При использовании коммутатора, показанного на Рис. 16, в компьютерной сети её узлы подключаются к входам-выходам A, B, C и D первого — четвёртого каналов. Коммутатор обеспечивает полный граф соединений, т. е. позволяет соединять каналы по принципу «каждый с каждым», а именно, A ↔ B, A ↔ C, A ↔ D, B ↔ C, B ↔ D, C ↔ D.

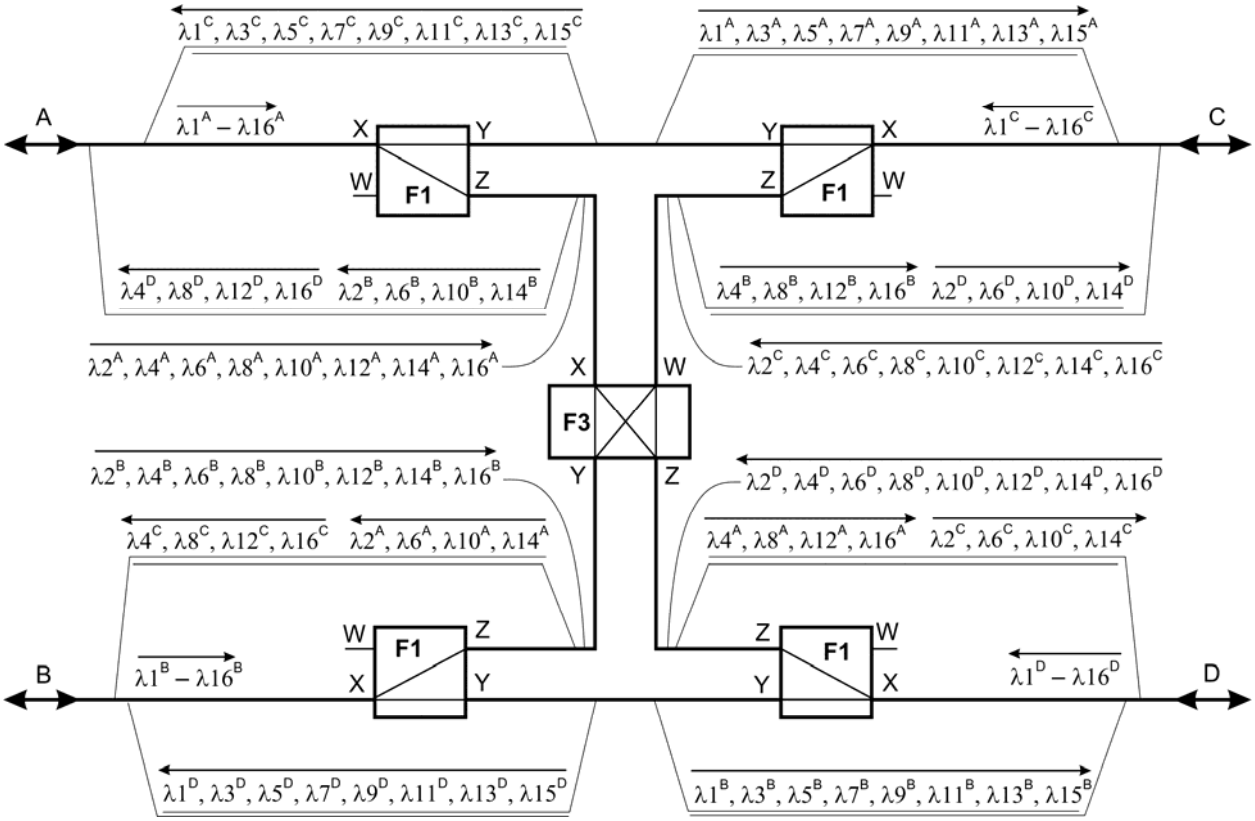

Рис. 16. Четырёхканальный оптический коммутатор с маршрутизацией сигнала по длине волны, первый вариант

Для двустороннего обмена данными между каналами (узлами сети) используются оптические сигналы с длинами волн λ1 — λ16, равномерно распределёнными на горизонтальных числовых осях диаграмм, показанных на Рис. 2, *а, б*. В коммутаторе применены рассмотренные ранее фильтры двух типов: F1 и F3.

Для указания направлений передачи сигналов через коммутатор приняты следующие обозначения. В записи вида «$\lambda 1^A$» верхний индекс указывает источник сигнала (в данном примере это устройство, подключенное к каналу A) с длиной волны λ1. Таким образом,

$\lambda 2^A$, $\lambda 6^A$, $\lambda 10^A$, $\lambda 14^A$ — длины волн для передачи данных из канала A в канал B;
$\lambda 2^B$, $\lambda 6^B$, $\lambda 10^B$, $\lambda 14^B$ — длины волн для передачи данных из канала B в канал A;
$\lambda 1^A$, $\lambda 3^A$, $\lambda 5^A$,…, $\lambda 15^A$ — длины волн для передачи данных из канала A в канал C;
$\lambda 1^C$, $\lambda 3^C$, $\lambda 5^C$,…, $\lambda 15^C$ — длины волн для передачи данных из канала C в канал A;
$\lambda 4^A$, $\lambda 8^A$, $\lambda 12^A$, $\lambda 16^A$ — длины волн для передачи данных из канала A в канал D;
$\lambda 4^D$, $\lambda 8^D$, $\lambda 12^D$, $\lambda 16^D$ — длины волн для передачи данных из канала D в канал A;
$\lambda 4^B$, $\lambda 8^B$, $\lambda 12^B$, $\lambda 16^B$ — длины волн для передачи данных из канала B в канал C;

$\lambda 4^C$, $\lambda 8^C$, $\lambda 12^C$, $\lambda 16^C$ — длины волн для передачи данных из канала C в канал B; $\lambda 1^B$, $\lambda 3^B$, $\lambda 5^B$,…, $\lambda 15^B$ — длины волн для передачи данных из канала B в канал D; $\lambda 1^D$, $\lambda 3^D$, $\lambda 5^D$,…, $\lambda 15^D$ — длины волн для передачи данных из канала D в канал B; $\lambda 2^C$, $\lambda 6^C$, $\lambda 10^C$, $\lambda 14^C$ — длины волн для передачи данных из канала C в канал D; $\lambda 2^D$, $\lambda 6^D$, $\lambda 10^D$, $\lambda 14^D$ — длины волн для передачи данных из канала D в канал C.

В данном случае каждый узел сети может одновременно и двусторонне обмениваться данными с любыми узлами с использованием в каждом направлении приёма-передачи четырёх или восьми длин волн.

Применение коммутатора позволяет упростить построение сетей с полным графом соединений между её узлами или с логической структурой типа «кольцо» и топологией типа «звезда» [6]. Благодаря возможности одновременной связи каждого канала с каждым, реализуется логическая изоляция неисправных узлов сети. Коммутатор функционирует без источника питания. Маршрут передаваемого узлом сети пакета данных задаётся на физическом (а не на сетевом) уровне выбором длины волны линейного сигнала.

Коммутатор, показанный на Рис. 17, *а*, [5] построен на основе мультиплексоров — демультиплексоров (для краткости — мультиплексоров) оптических сигналов с длинами волн $\lambda 1$ — $\lambda 3$.

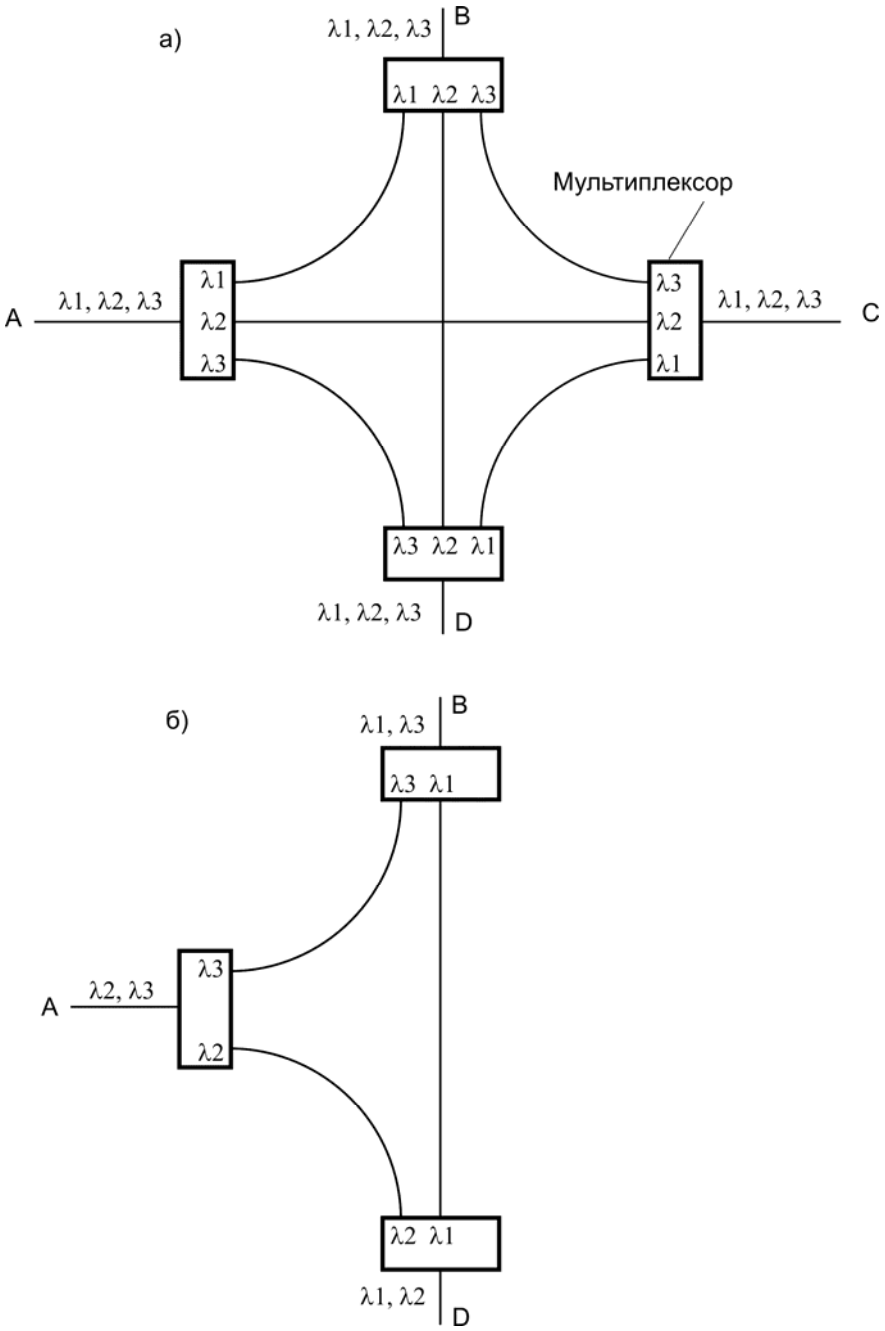

Рис. 17. Оптические коммутаторы с маршрутизацией сигнала по длине волны, второй вариант

Узел A для передачи данных в узлы B, C и D формирует сигналы данных с длинами волн, соответственно равными λ1, λ2 и λ3. Приёмный узел по длине волны полученного сигнала определяет, от какого узла поступило сообщение. Все связи двунаправленные, узлы сети равноправны.

Коммутатор, показанный на Рис. 17, *б*, получен из предыдущей схемы устранением одного из каналов.

4 Пятиканальный коммутатор, реализующий полный граф соединений

Коммутатор, показанный на Рис. 18, осуществляет соединение каждого двунаправленного канала связи A — E со всеми остальными. Соединение задаётся выбором нужной длины волны в соответствии с Табл. 1. Коммутатор содержит пять логических блоков LA — LE; их структура приведена на Рис. 19 — Рис. 23. Логические блоки выполнены на

оптических фильтрах F1, F2, F3 и F5; их характеристики прозрачности рассмотрены ранее (Рис. 2).

Таблица симметрична относительно диагонали из знаков «—», так как для передачи данных, например, из канала C в канал A, можно воспользоваться сигналами с теми же длинами волн, что и для передачи в обратном направлении, а именно, сигналами с длинами волн λ1, λ5, λ9, λ13. При этом можно использовать любое подмножество этих сигналов или все сигналы одновременно.

Из Табл. 1 следует, что внутренние связи между каналами A — E обладают различной пропускной способностью. Так, передача данных из канала A в каналы B, C и E (и обратно) осуществляется с использованием четырёх различных длин волн, в то время как для связи канала A с каналом D выделены только две длины волны (см. верхнюю строку таблицы). Отметим, что связи, образующие кольцо A — B — C — D — E — A обладают высокой пропускной способностью (использованы четыре длины волны для связи между соседними узлами), что повышает эффективность кольцевой сети с топологией типа «звезда».

Табл. 1. Длины волн для передачи данных между каналами A — E (Рис. 18)

—	A	B	C	D	E
A	—	λ2, λ6, λ10, λ14	λ1, λ5, λ9, λ13	λ3, λ11	λ4, λ8, λ12, λ16
B	λ2, λ6, λ10, λ14	—	λ4, λ8, λ12, λ16	λ7, λ15	λ3, λ11
C	λ1, λ5, λ9, λ13	λ4, λ8, λ12, λ16	—	λ2, λ6, λ10, λ14	λ7, λ15
D	λ3, λ11	λ7, λ15	λ2, λ6, λ10, λ14	—	λ1, λ5, λ9, λ13
E	λ4, λ8, λ12, λ16	λ3, λ11	λ7, λ15	λ1, λ5, λ9, λ13	—

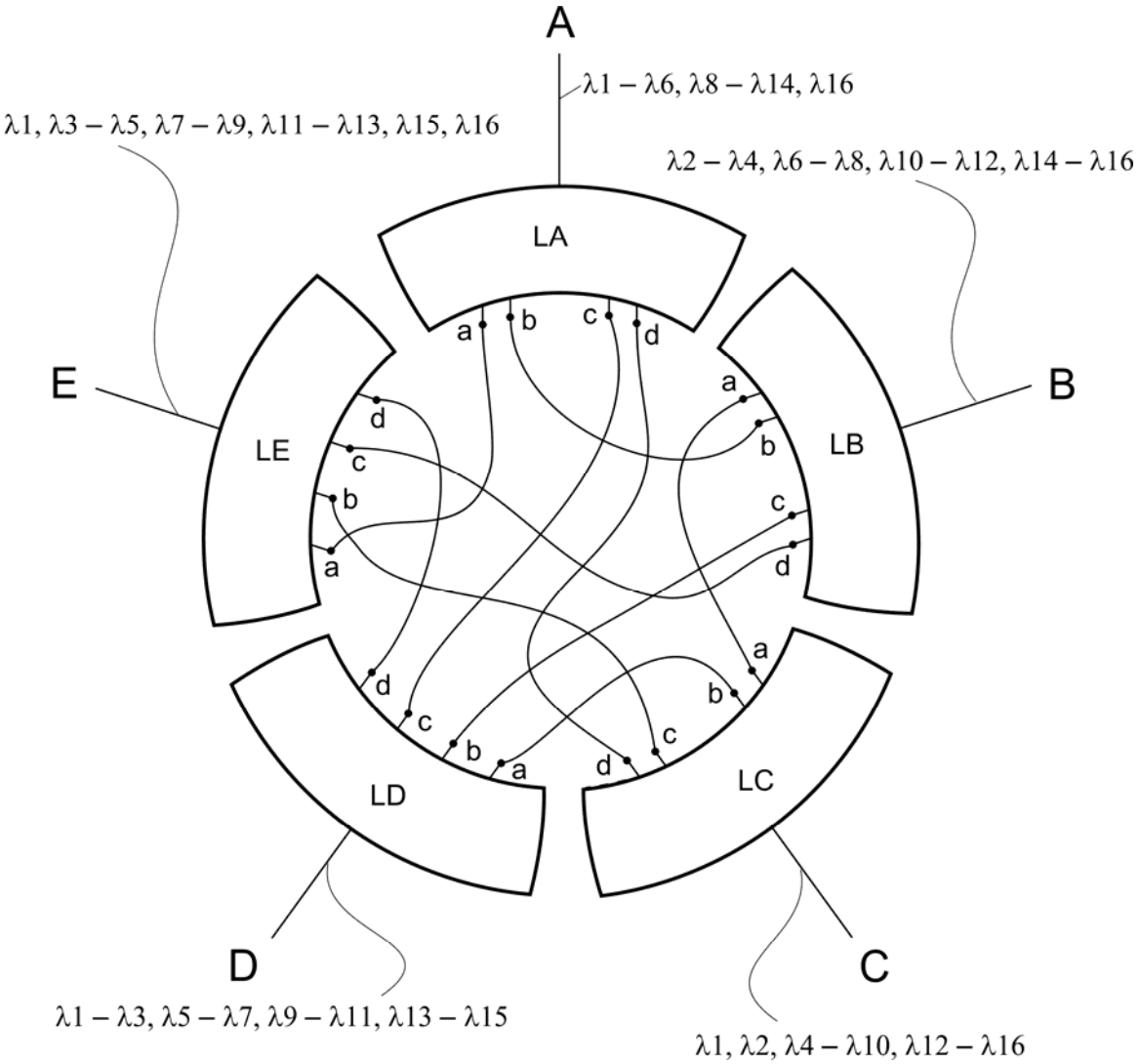

Рис. 18. Пятиканальный коммутатор, реализующий полный граф соединений

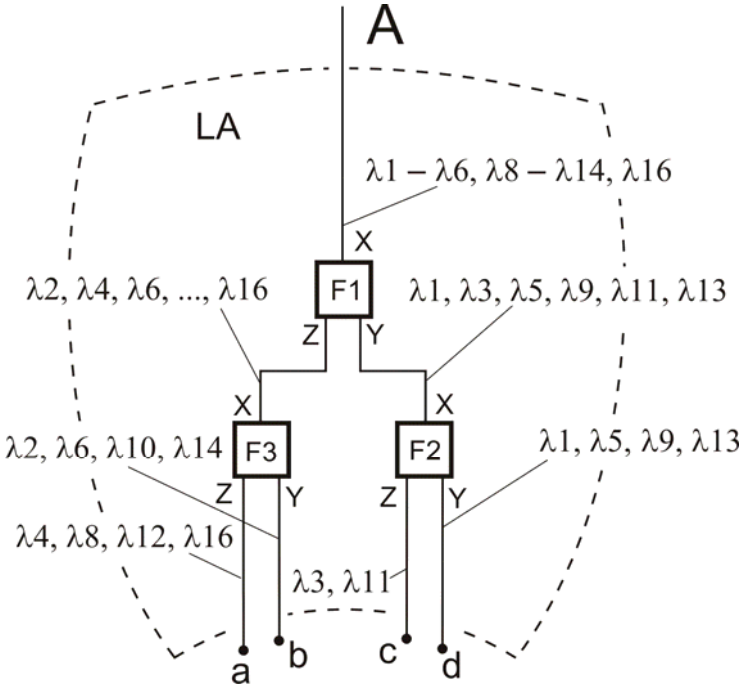

Рис. 19. Структура логического блока LA (Рис. 18)

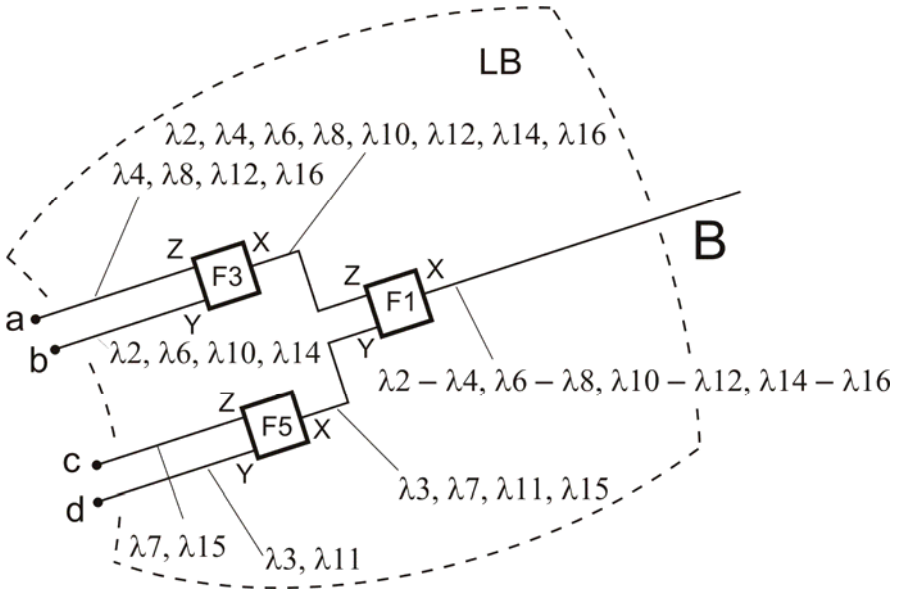

Рис. 20. Структура логического блока LB (Рис. 18)

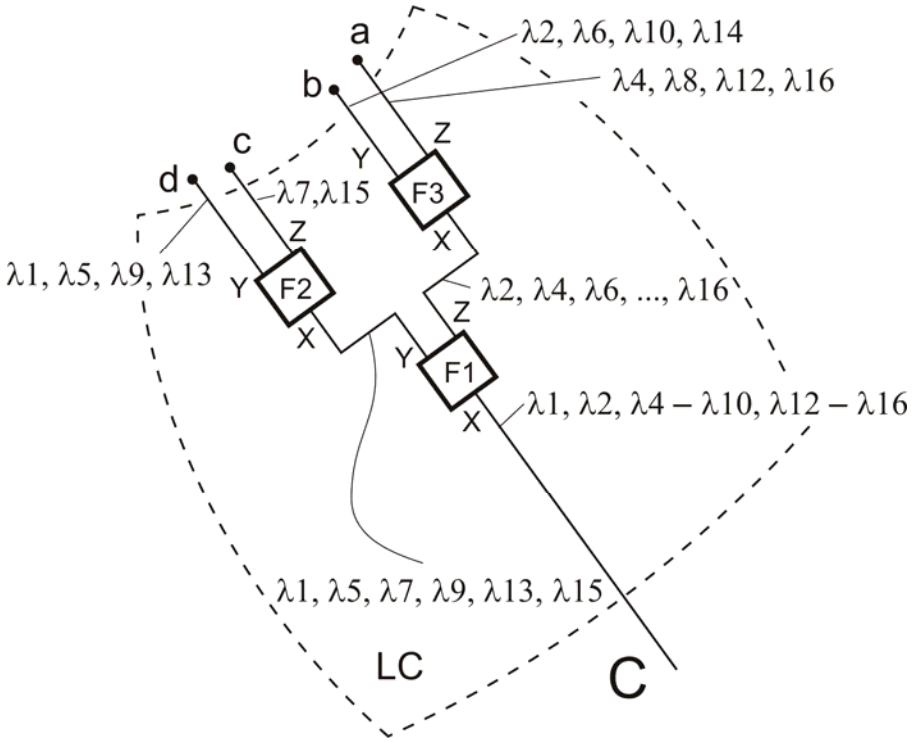

Рис. 21. Структура логического блока LC (Рис. 18)

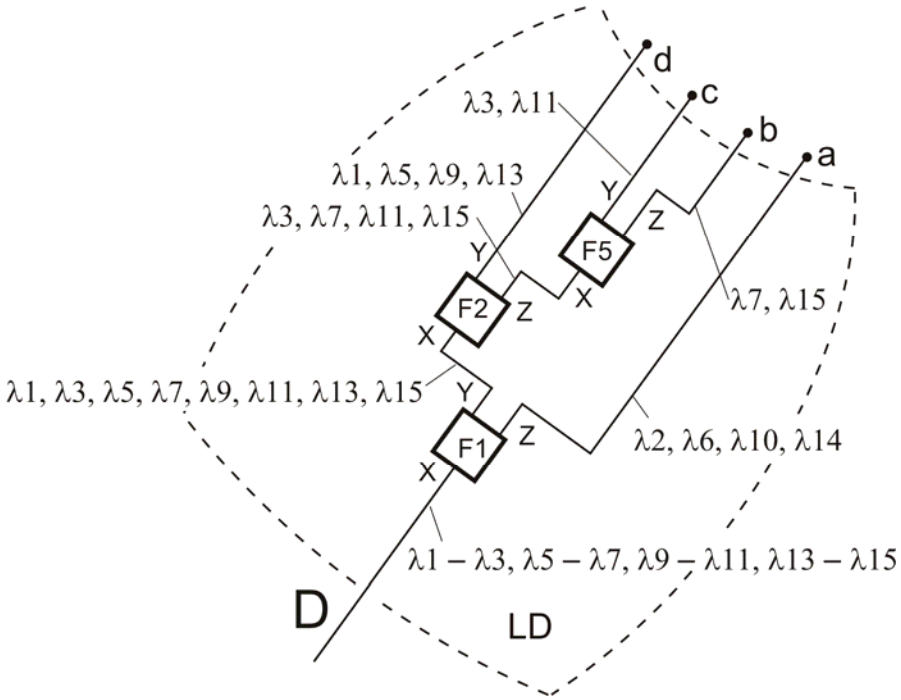

Рис. 22. Структура логического блока LD (Рис. 18)

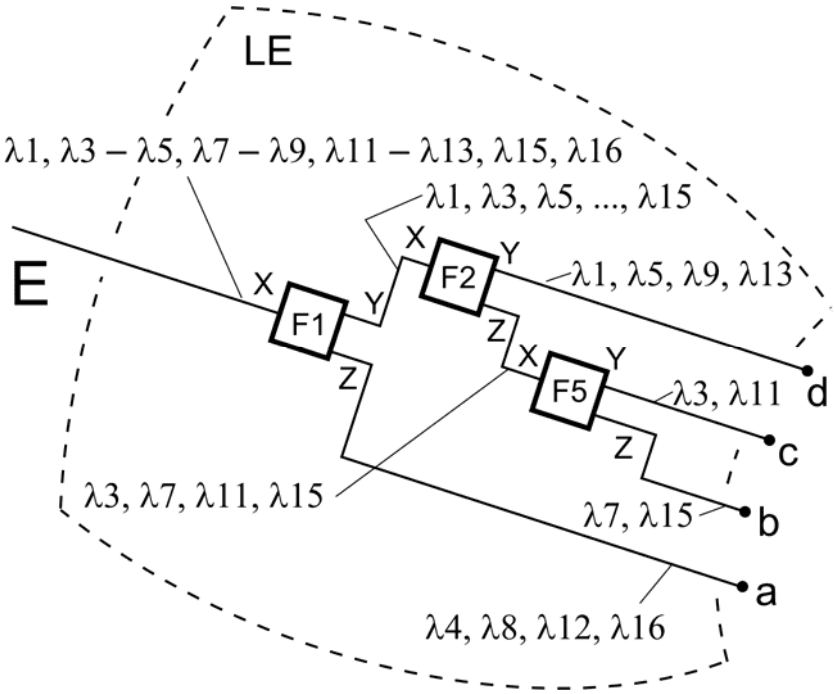

Рис. 23. Структура логического блока LE (Рис. 18)

5 Шестиканальный коммутатор, реализующий полный граф соединений

Коммутатор, показанный на Рис. 24, осуществляет соединение каждого двунаправленного канала связи A — F со всеми остальными. Соединение задаётся выбором нужной длины волны в соответствии с Табл. 2. Коммутатор содержит шесть логических блоков MA — MF; их структура приведена на Рис. 25 — Рис. 30. Логические блоки выполнены на оптических фильтрах F1 — F5; их характеристики прозрачности рассмотрены ранее (Рис. 2).

Таблица симметрична относительно диагонали из знаков «—», так как для передачи данных, например, из канала C в канал A, можно воспользоваться сигналами с теми же длинами волн, что и для передачи в обратном направлении, а именно, сигналами с длинами волн λ7 и λ15. При этом можно использовать любой из этих сигналов или оба сигнала одновременно.

Из Табл. 2 следует, что внутренние связи между каналами A — F обладают различной пропускной способностью. Так, передача данных из канала A в каналы B и F (и обратно) осуществляется с использованием четырёх различных длин волн, в то время как для связи канала A с каждым из каналов C, D и E выделены только две длины волны (см. верхнюю строку таблицы). Отметим, что связи, образующие кольцо A — B — C — D — E — F — A обладают высокой пропускной способностью (использованы четыре длины волны для передачи данных между соседними узлами), что повышает эффективность кольцевой сети с топологией типа «звезда».

Табл. 2. Длины волн для передачи данных между каналами A — F (Рис. 24)

—	A	B	C	D	E	F
A	—	λ4, λ8, λ12, λ16	λ7, λ15	λ1, λ9	λ5, λ13	λ2, λ6, λ10, λ14
B	λ4, λ8, λ12, λ16	—	λ2, λ6, λ10, λ14	λ7, λ15	λ1, λ9	λ5, λ13
C	λ7, λ15	λ2, λ6, λ10, λ14	—	λ4, λ8, λ12, λ16	λ3, λ11	λ1, λ9
D	λ1, λ9	λ7, λ15	λ4, λ8, λ12, λ16	—	λ2, λ6, λ10, λ14	λ3, λ11
E	λ5, λ13	λ1, λ9	λ3, λ11	λ2, λ6, λ10, λ14	—	λ4, λ8, λ12, λ16
F	λ2, λ6, λ10, λ14	λ5, λ13	λ1, λ9	λ3, λ11	λ4, λ8, λ12, λ16	—

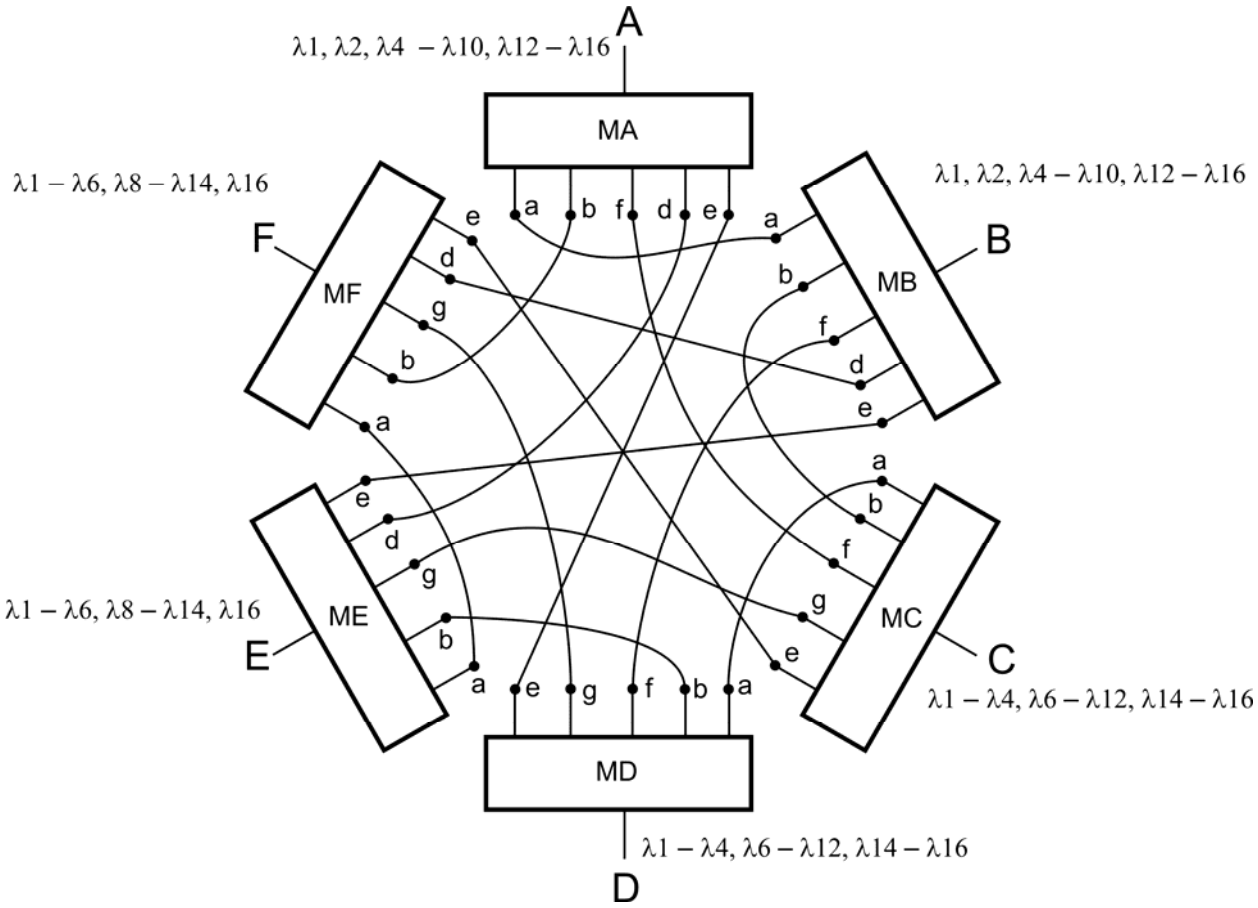

Рис. 24. Шестиканальный коммутатор, реализующий полный граф соединений

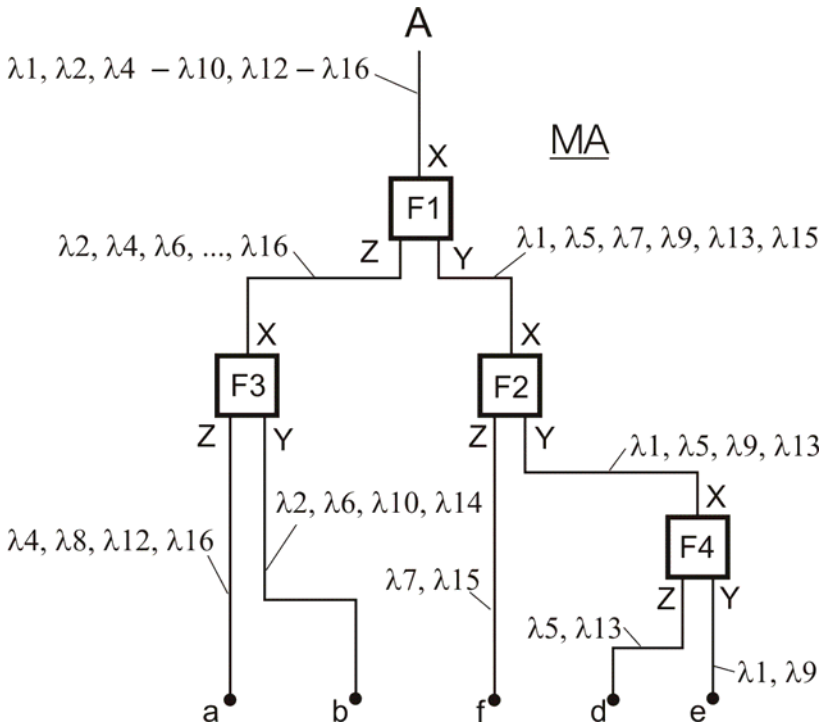

Рис. 25. Структура логического блока МА (Рис. 24)

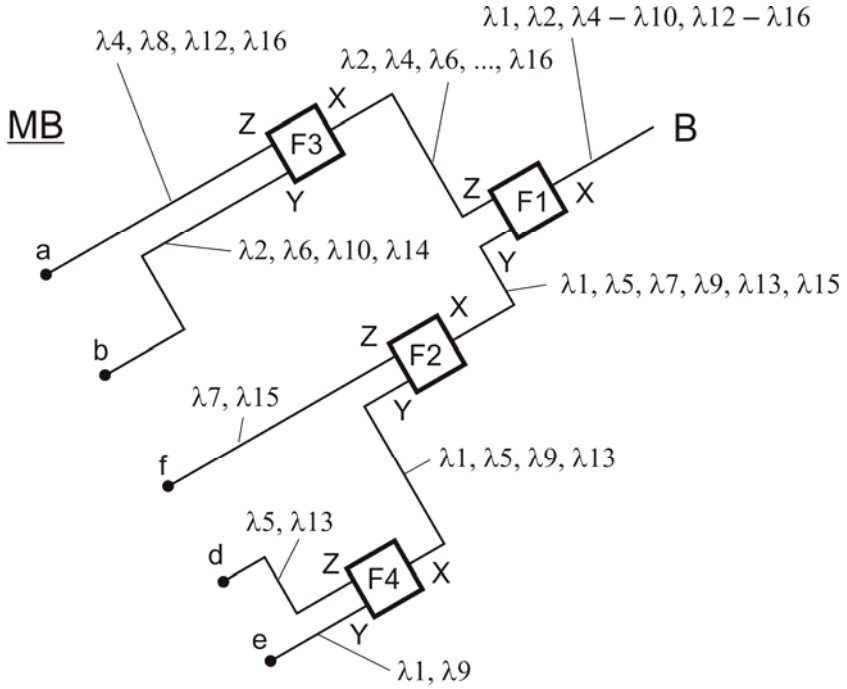

Рис. 26. Структура логического блока MB (Рис. 24)

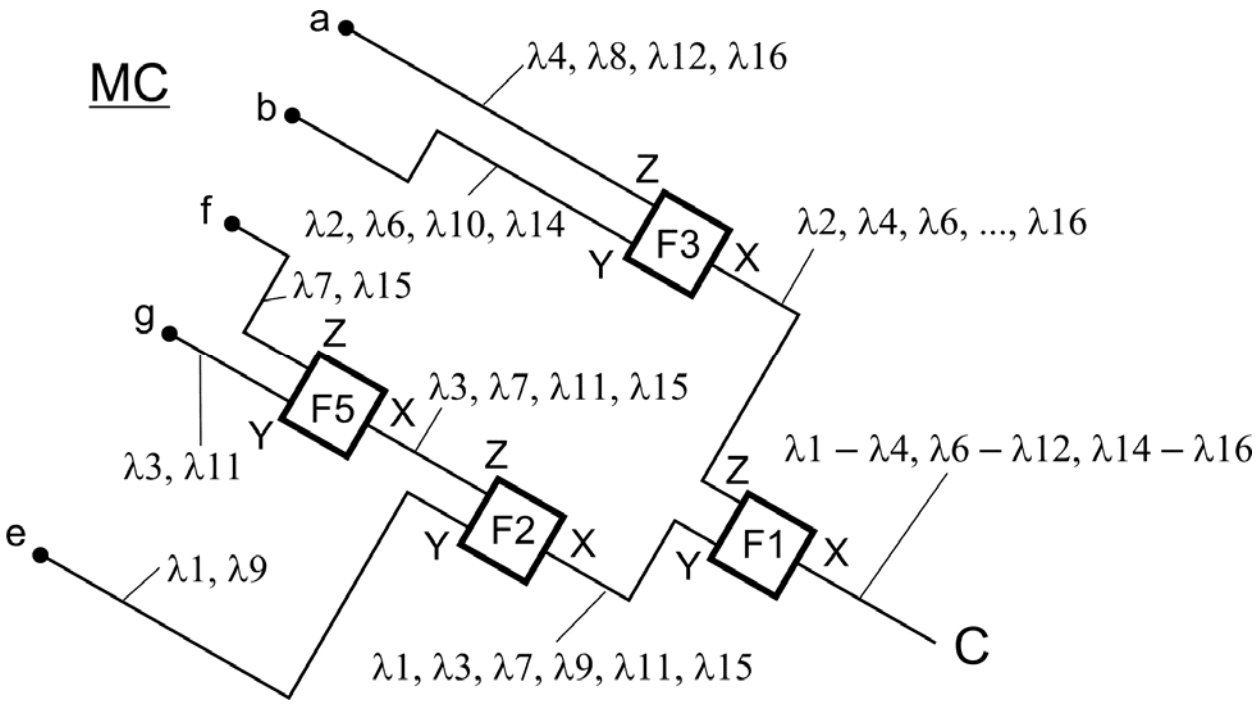

Рис. 27. Структура логического блока MC (Рис. 24)

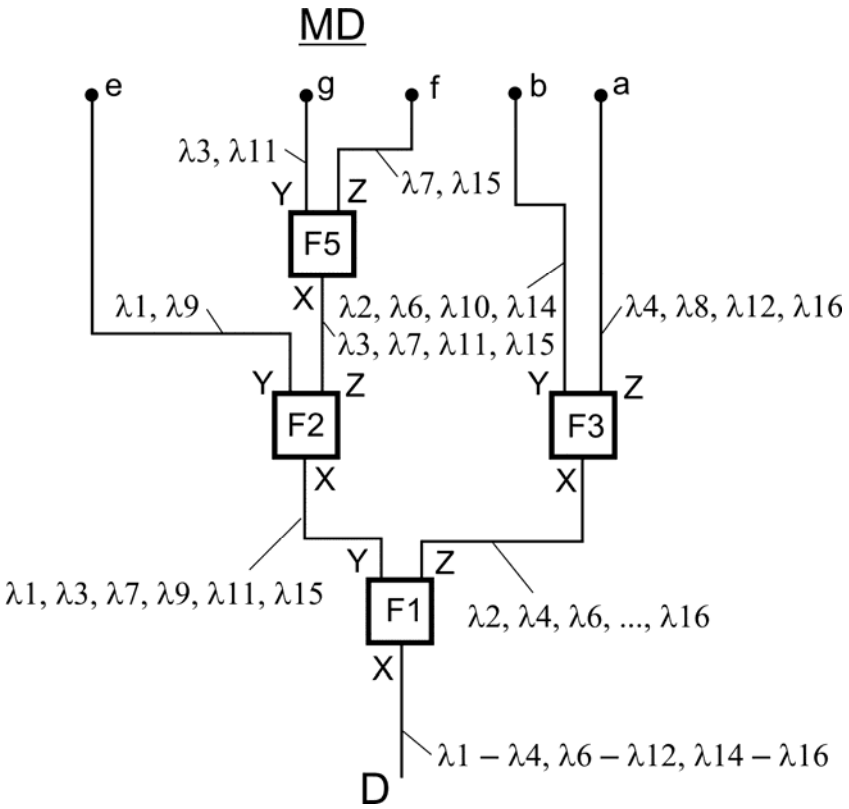

Рис. 28. Структура логического блока MD (Рис. 24)

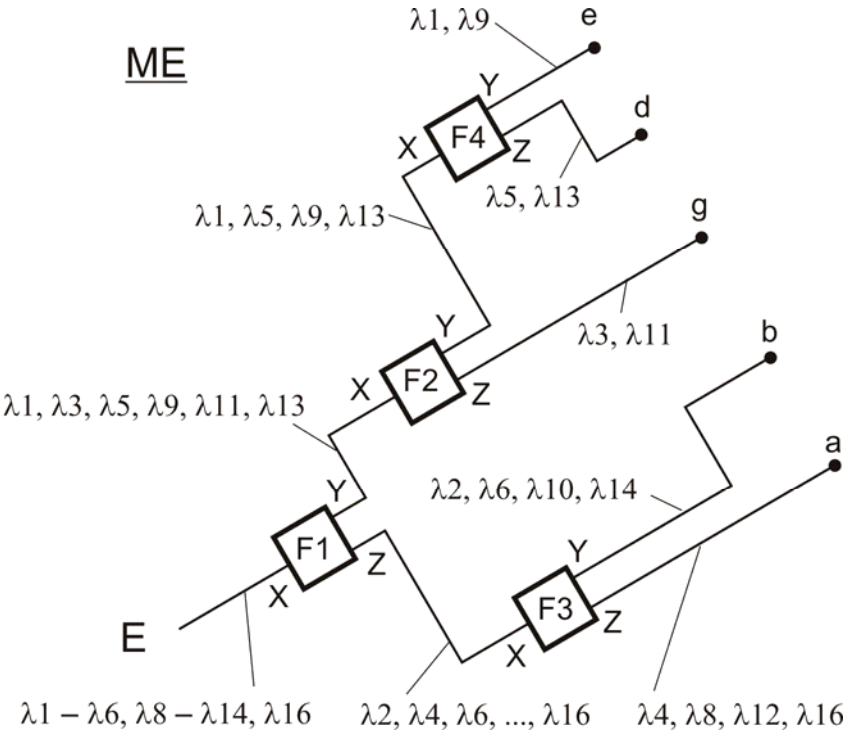

Рис. 29. Структура логического блока ME (Рис. 24)

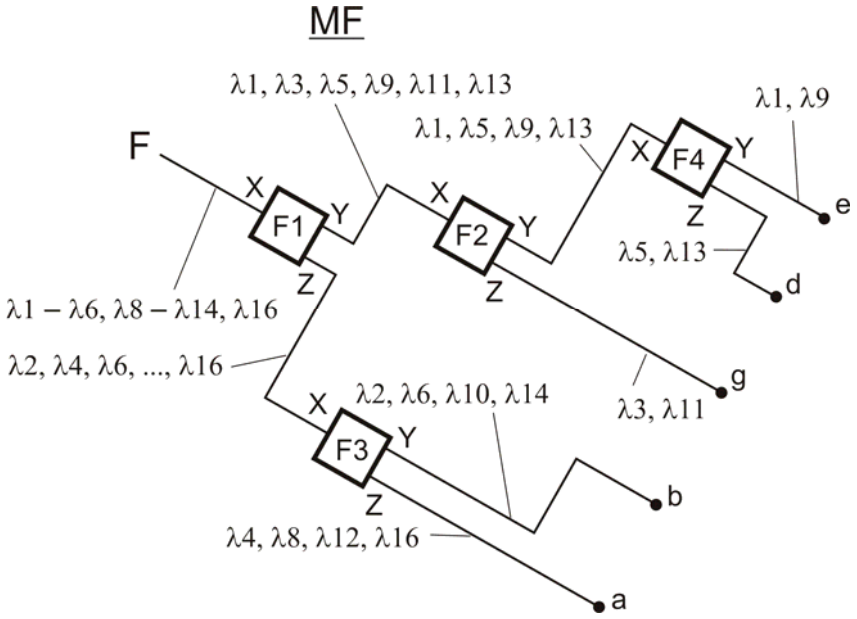

Рис. 30. Структура логического блока MF (Рис. 24)

6 Семиканальный коммутатор, реализующий полный граф соединений

Коммутатор, показанный на Рис. 31, осуществляет соединение каждого двунаправленного канала связи A — G со всеми остальными. Соединение задаётся выбором нужной длины волны в соответствии с Табл. 3. Коммутатор содержит семь логических блоков NA — NG; их структура приведена на Рис. 32 — Рис. 38. Логические блоки выполнены на оптических фильтрах F1 — F7; их характеристики прозрачности рассмотрены ранее (Рис. 2).

Таблица симметрична относительно диагонали из знаков «—», так как для передачи данных, например, из канала C в канал A, можно воспользоваться сигналами с теми же длинами волн, что и для передачи в обратном направлении, а именно, сигналами с длинами волн λ2 и λ10. При этом можно использовать любой из этих сигналов или оба сигнала одновременно.

Из таблицы следует, что внутренние связи между каналами A — G обладают различной пропускной способностью. Так, передача данных из канала A в канал B (и обратно) осуществляется с использованием четырёх длин волн, в то время как для связи канала A с каждым из остальных выделены только две длины волны (см. верхнюю строку таблицы).

Табл. 3. Длины волн для передачи данных между каналами A — G (Рис. 31)

—	A	B	C	D	E	F	G
A	—	λ1, λ8, λ9, λ16	λ2, λ10	λ3, λ11	λ5, λ13	λ7, λ15	λ6, λ14
B	λ1, λ8, λ9, λ16	—	λ4, λ12	λ6, λ14	λ3, λ11	λ5, λ13	λ7, λ15
C	λ2, λ10	λ4, λ12	—	λ7, λ8, λ15, λ16	λ6, λ14	λ3, λ11	λ1, λ9
D	λ3, λ11	λ6, λ14	λ7, λ8, λ15, λ16	—	λ4, λ12	λ2, λ10	λ5, λ13
E	λ5, λ13	λ3, λ11	λ6, λ14	λ4, λ12	—	λ1, λ8, λ9, λ16	λ2, λ10

F	λ7, λ15	λ5, λ13	λ3, λ11	λ2, λ10	λ1, λ8, λ9, λ16	—	λ4, λ12
G	λ6, λ14	λ7, λ15	λ1, λ9	λ5, λ13	λ2, λ10	λ4, λ12	—

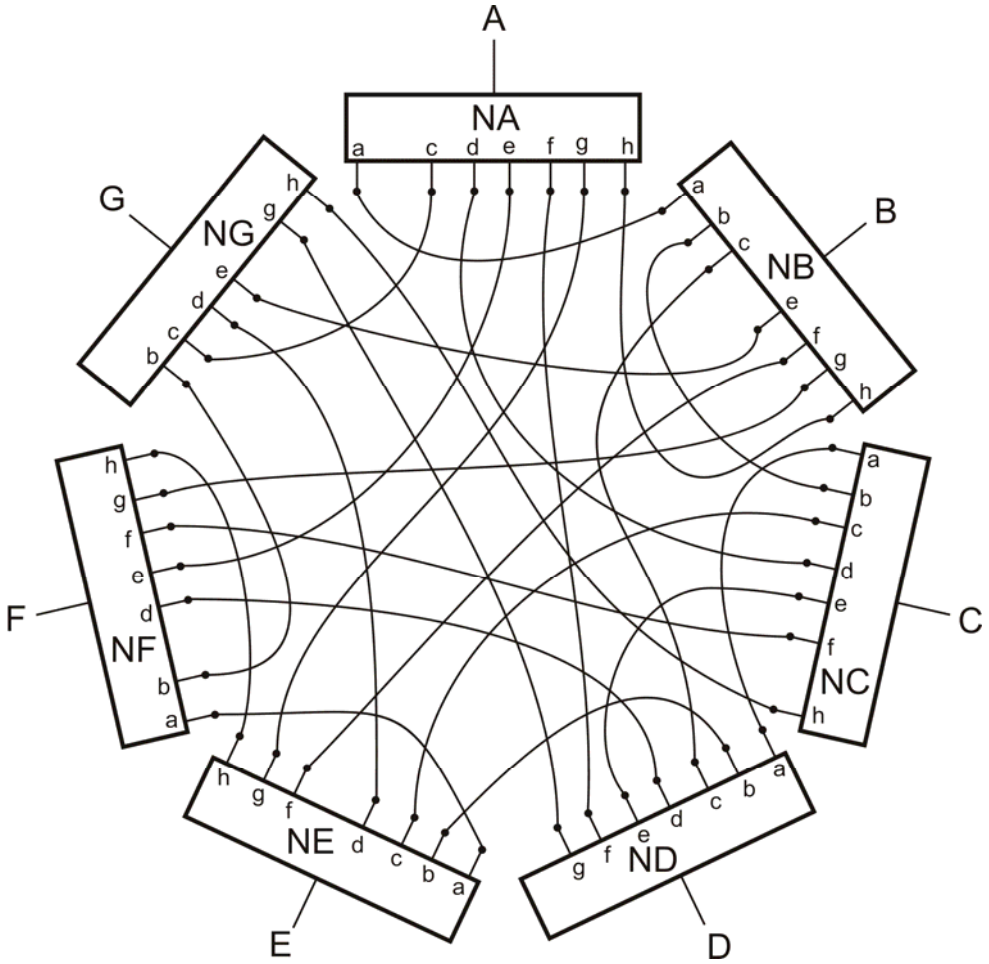

Рис. 31. Семиканальный коммутатор, реализующий полный граф соединений

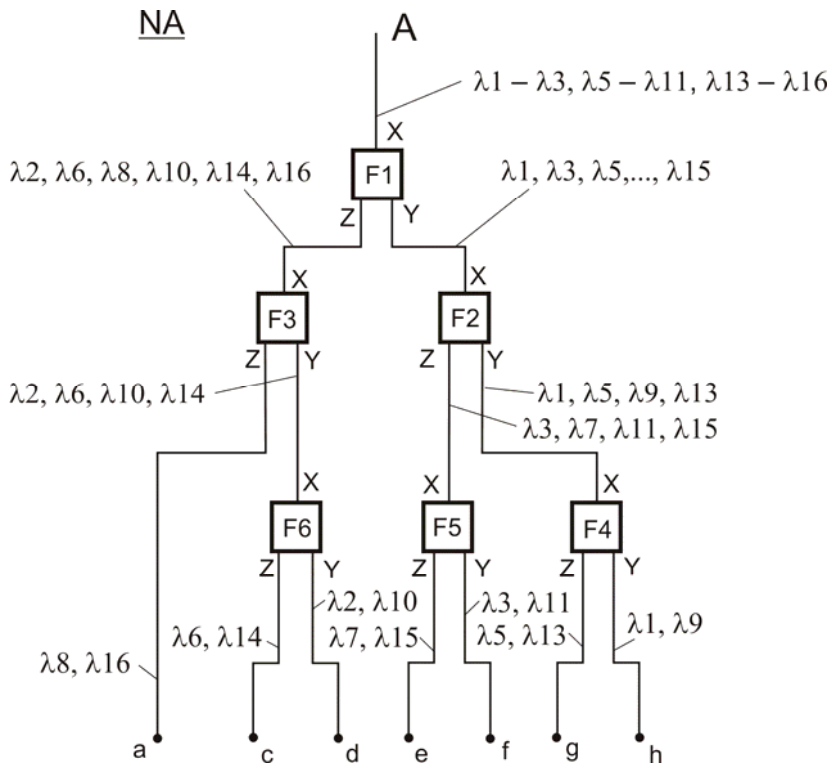

Рис. 32. Структура логического блока NA (Рис. 31)

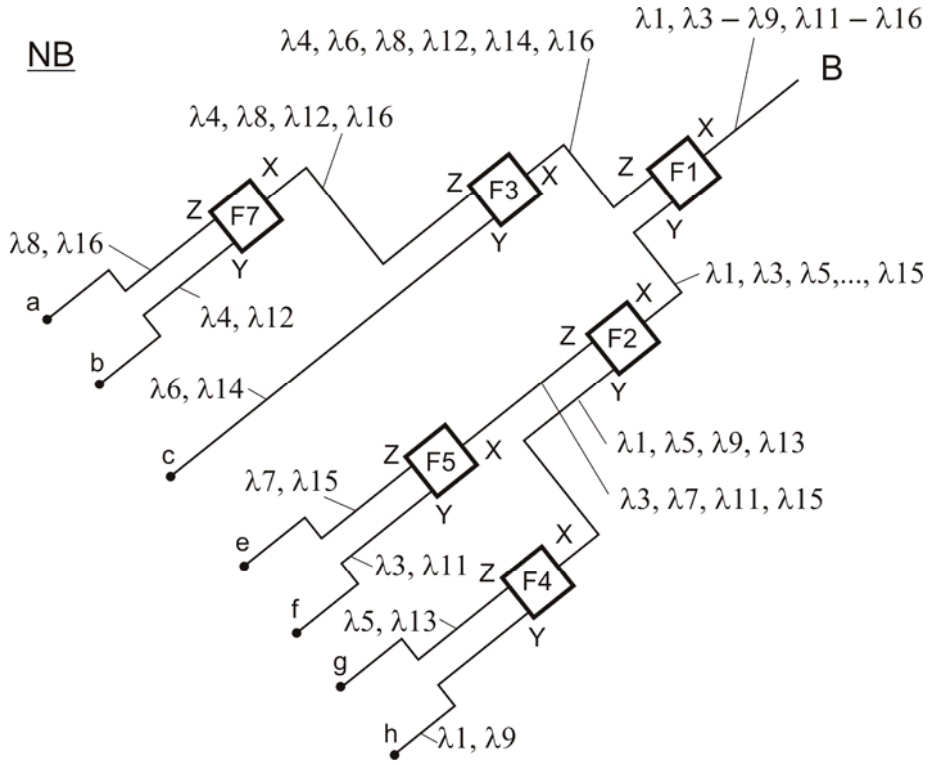

Рис. 33. Структура логического блока NB (Рис. 31)

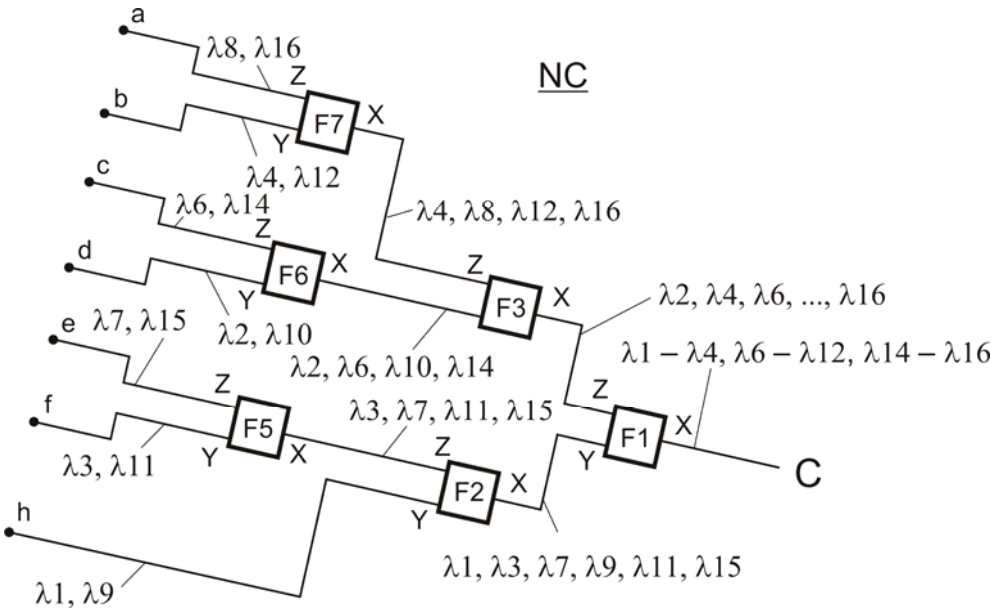

Рис. 34. Структура логического блока NC (Рис. 31)

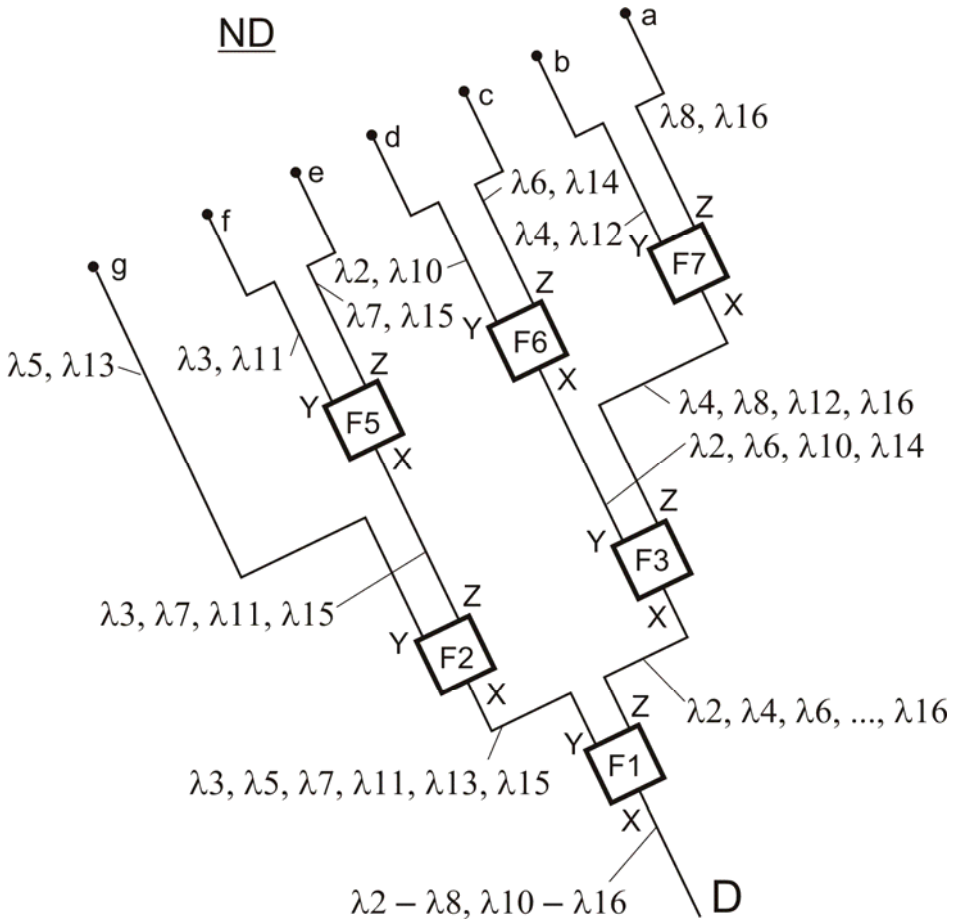

Рис. 35. Структура логического блока ND (Рис. 31)

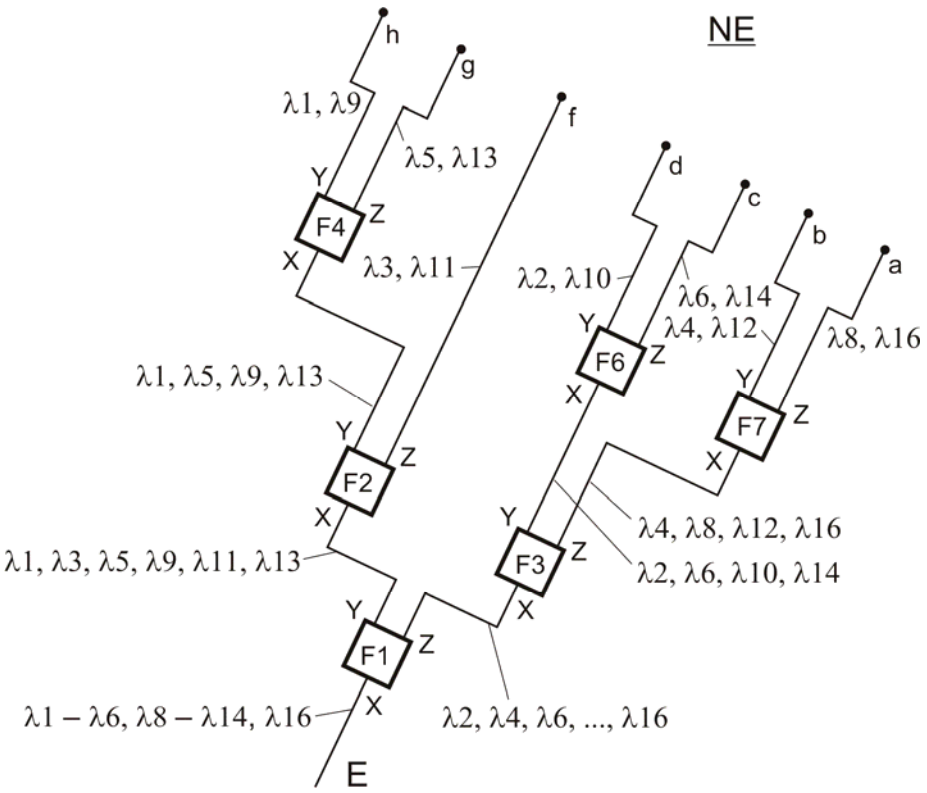

Рис. 36. Структура логического блока NE (Рис. 31)

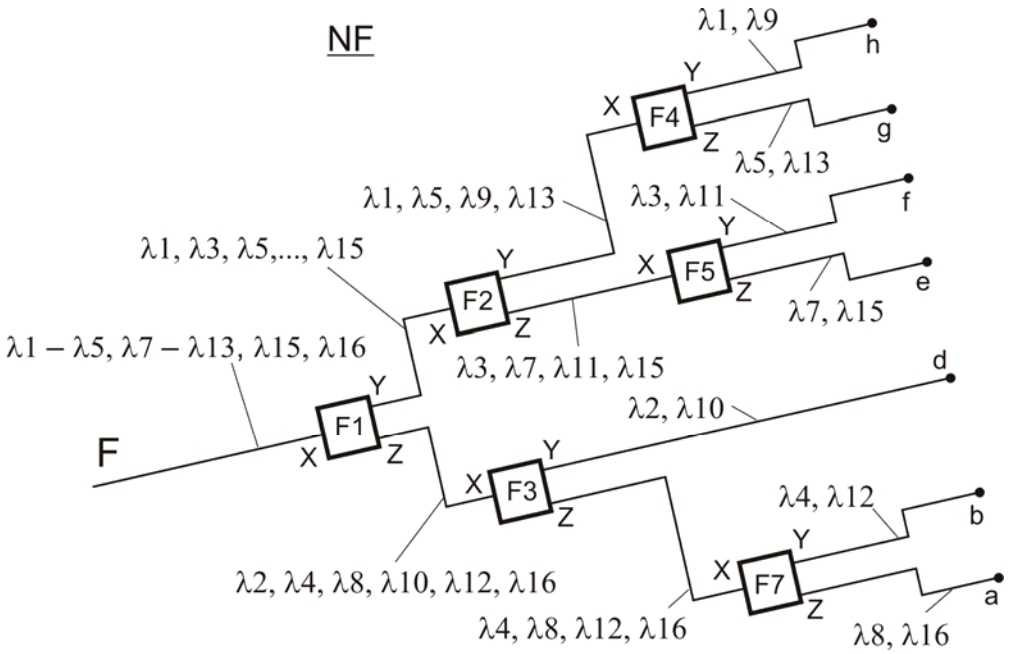

Рис. 37. Структура логического блока NF (Рис. 31)

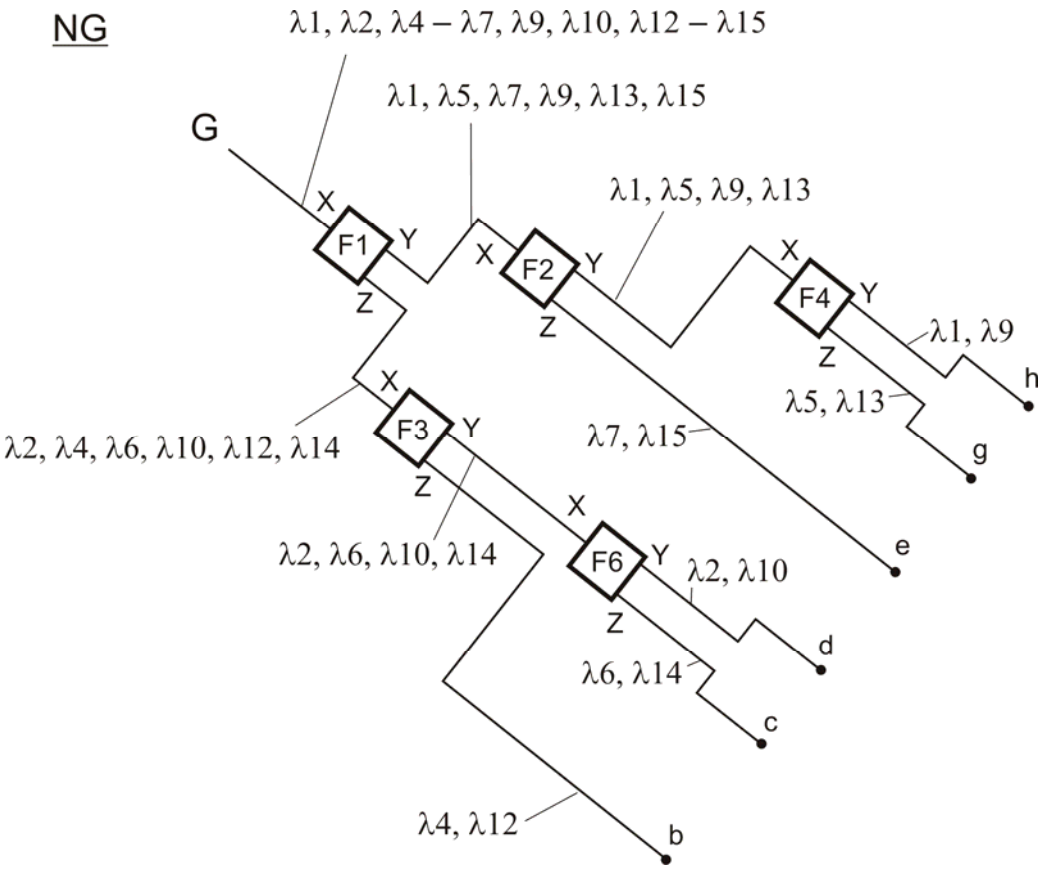

Рис. 38. Структура логического блока NG (Рис. 31)

7 Восьмиканальный коммутатор, реализующий полный граф соединений

Коммутатор, показанный на Рис. 39, осуществляет соединение каждого двунаправленного канала связи A — H со всеми остальными. Соединение задаётся выбором нужной длины волны в соответствии с Табл. 4. Коммутатор содержит восемь логических блоков JA — JH; их структура приведена на Рис. 40 и Рис. 41. Логические блоки выполнены на оптических фильтрах F1 — F7; их характеристики прозрачности рассмотрены ранее (Рис. 2).

Таблица симметрична относительно диагонали из знаков «—», так как для передачи данных, например, из канала C в канал A, можно воспользоваться сигналами с теми же длинами волн, что и для передачи в обратном направлении, а именно, сигналами с длинами волн λ2 и λ10. При этом можно использовать любой из этих сигналов или оба сигнала одновременно.

Из Табл. 4 следует, что внутренние связи между каналами A — H обладают различной пропускной способностью. Так, передача данных из канала A в канал E (и обратно) осуществляется с использованием четырёх длин волн, в то время как для связи канала A с каждым из остальных каналов выделены только две длины волны (см. верхнюю строку таблицы).

Табл. 4. Длины волн для передачи данных между каналами A — H (Рис. 39)

—	A	B	C	D	E	F	G	H
A	—	λ8, λ16	λ6, λ14	λ7, λ15	λ1, λ5, λ9, λ13	λ3, λ11	λ2, λ10	λ4, λ12
B	λ8, λ16	—	λ3, λ4, λ11, λ12	λ6, λ14	λ7, λ15	λ1, λ9	λ5, λ13	λ2, λ10
C	λ6, λ14	λ3, λ4, λ11, λ12	—	λ8, λ16	λ2, λ10	λ7, λ15	λ1, λ9	λ5, λ13
D	λ7, λ15	λ6, λ14	λ8, λ16	—	λ4, λ12	λ2, λ5, λ10, λ13	λ3, λ11	λ1, λ9
E	λ1, λ5, λ9, λ13	λ7, λ15	λ2, λ10	λ4, λ12	—	λ8, λ16	λ6, λ14	λ3, λ11
F	λ3, λ11	λ1, λ9	λ7, λ15	λ2, λ5, λ10, λ13	λ8, λ16	—	λ4, λ12	λ6 λ14
G	λ2, λ10	λ5, λ13	λ1, λ9	λ3, λ11	λ6, λ14	λ4, λ12	—	λ7, λ8, λ15, λ16
H	λ4, λ12	λ2, λ10	λ5, λ13	λ1, λ9	λ3, λ11	λ6 λ14	λ7, λ8, λ15, λ16	—

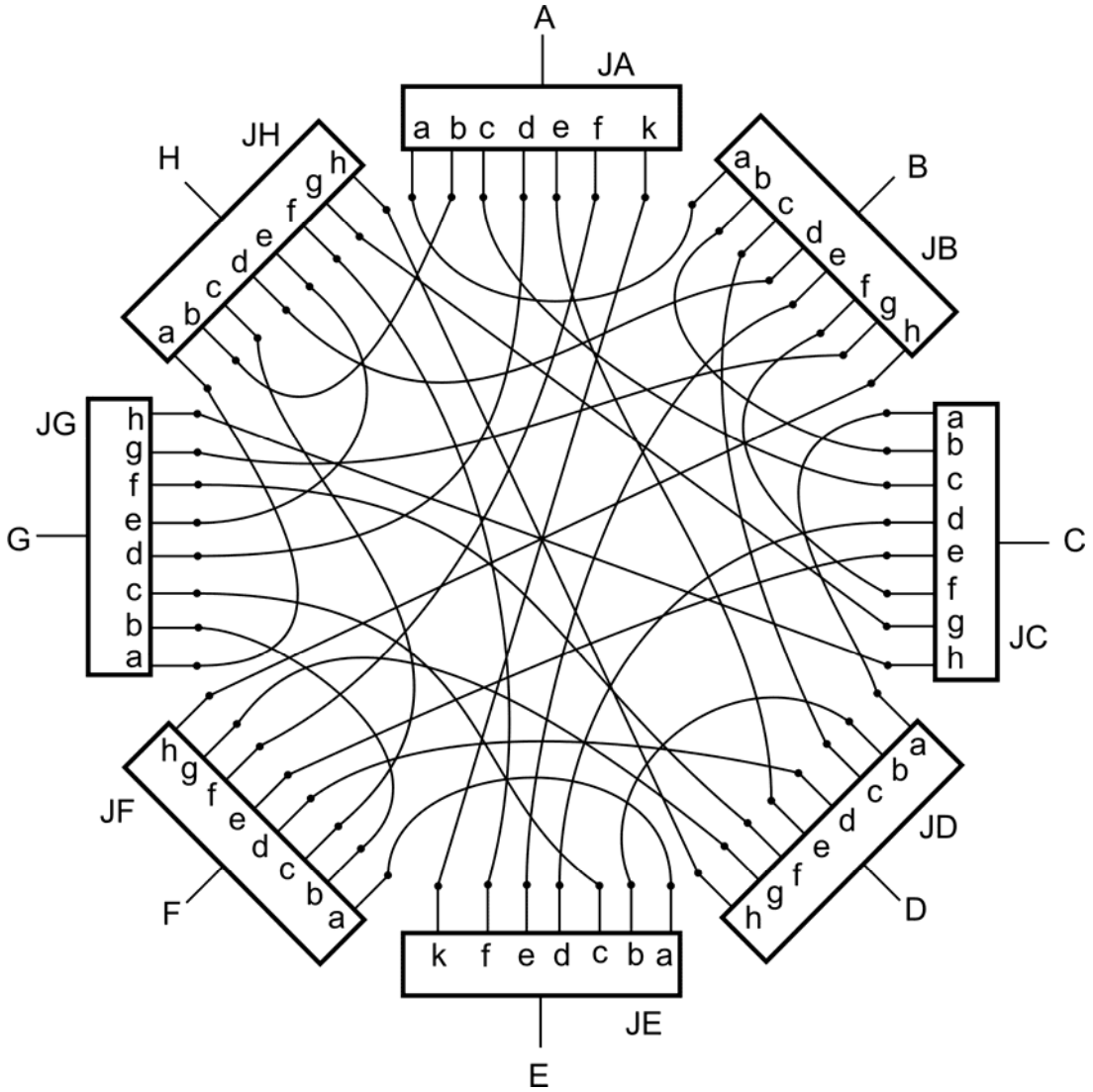

Рис. 39. Восьмиканальный коммутатор, реализующий полный граф соединений

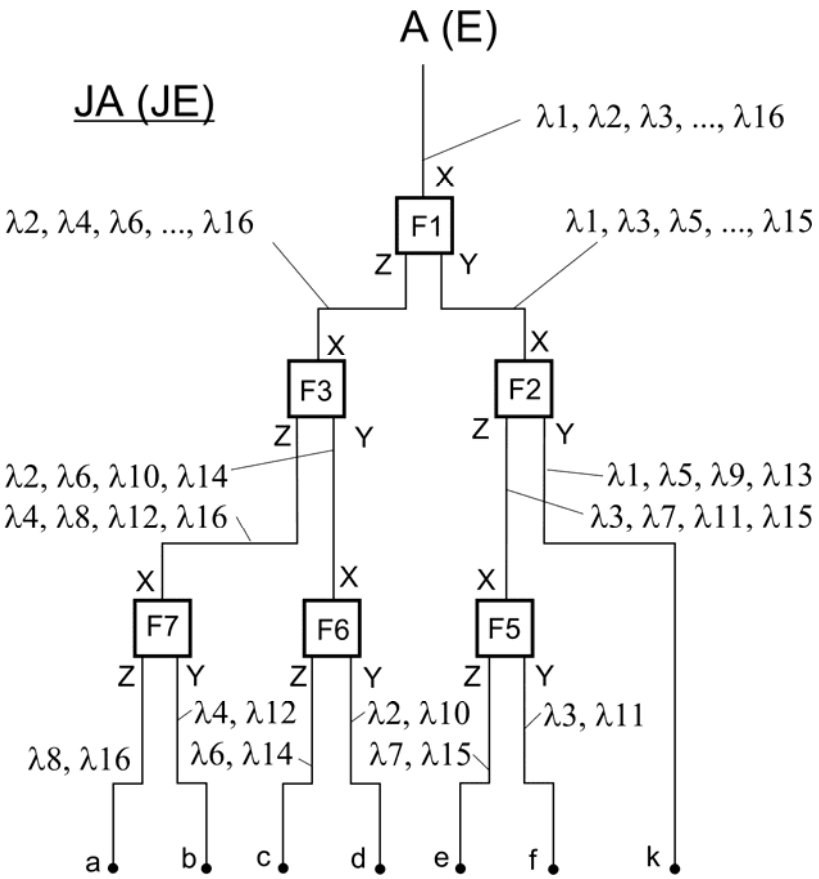

Рис. 40. Структура логического блока JA(JE), см. Рис. 39

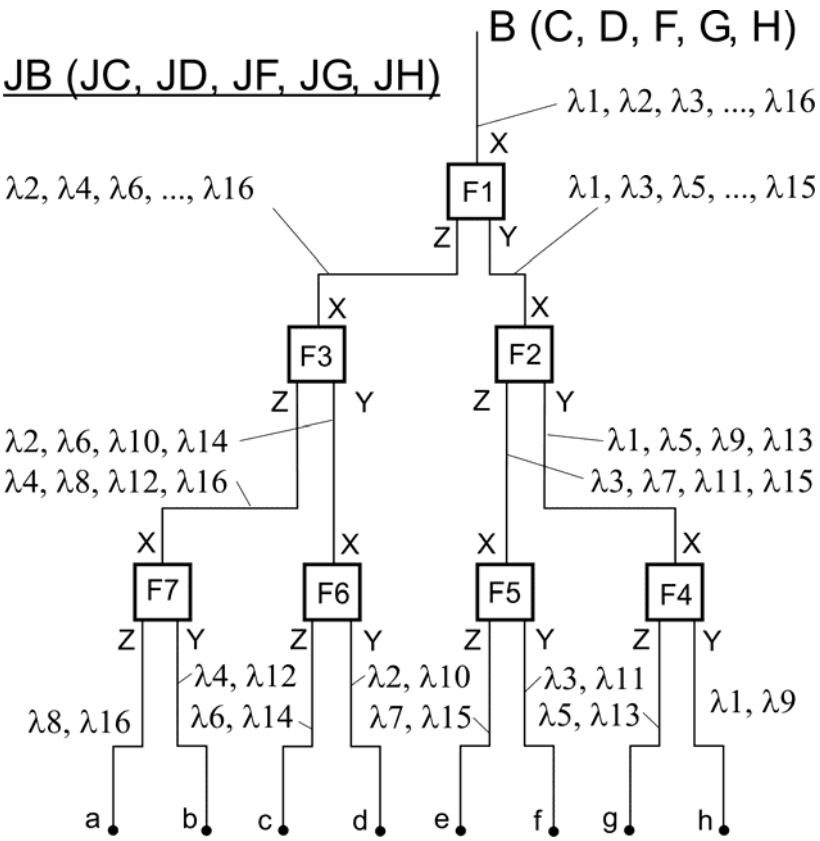

Рис. 41. Структура логического блока JB(JC, JD, JF, JG, JH), см. Рис. 39

8 Четырёхканальный логический блок для построения коммутаторов, первый вариант

В ранее рассмотренных коммутаторах в качестве логических блоков использовались простые модификации шифраторов-дешифраторов оптических сигналов. При использовании более сложных структур логических блоков можно получить на их основе ряд коммутаторов с большей функциональностью. Поясним сказанное.

Логический блок, показанный на Рис. 42 (обведён утолщённой линией), содержит шесть оптических фильтров: четыре фильтра типа F1, и по одному фильтру типа F2 и F3. Эти фильтры были рассмотрены ранее (см. Рис. 2, *а, б*). Логический блок содержит также функциональные входы-выходы A — D и входы-выходы расширения, обозначенные точками. Все внутренние и внешние соединения логического блока выполнены оптическими связями.

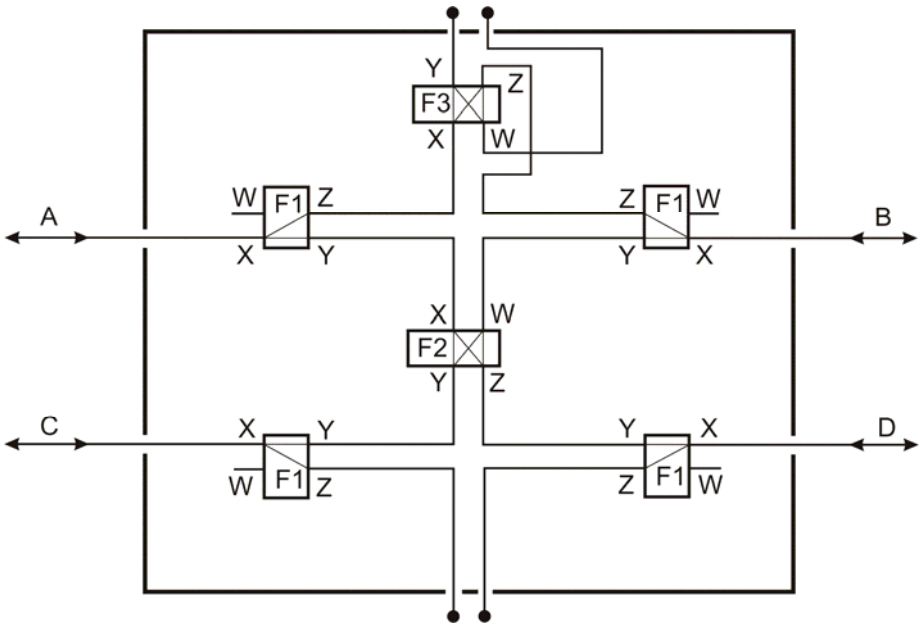

Рис. 42. Функциональная схема логического блока

Для удобства описания логического блока и более сложных структур на его основе далее приняты сокращённые обозначения подмножеств группы сигналов λ1, λ2, λ3, …, λ16, поступающих в заданную точку устройства из канала Q (Q — обобщённое обозначение имени канала) в соответствии с Табл. 5.

Табл. 5. Краткие обозначения подмножеств группы сигналов с длинами волн λ1, λ2, λ3, …, λ16

Подмножество группы сигналов λ1, λ2, λ3,…, λ16, поступающих в заданную точку устройства из канала J	Краткое обозначение подмножества
λ1, λ2, λ3, …, λ16	Q 123
λ1, λ3, λ5, …, λ15	Q 135
λ1, λ5, λ9, λ13	Q 15
λ3, λ7, λ11, λ15	Q 37
λ2, λ4, λ6, …, λ16	Q 246
λ2, λ6, λ10, λ14	Q 26
λ4, λ8, λ12, λ16	Q 48

Логический блок (Рис. 42) в простейшем случае можно рассматривать как функционально-законченное устройство (Рис. 43, *а*). При его использовании в компьютерной

сети её узлы A — D подключаются к входам-выходам соответствующих каналов A — D. Узлы K и L, а также узлы M и N подключаются к соответствующим входам-выходам расширения.

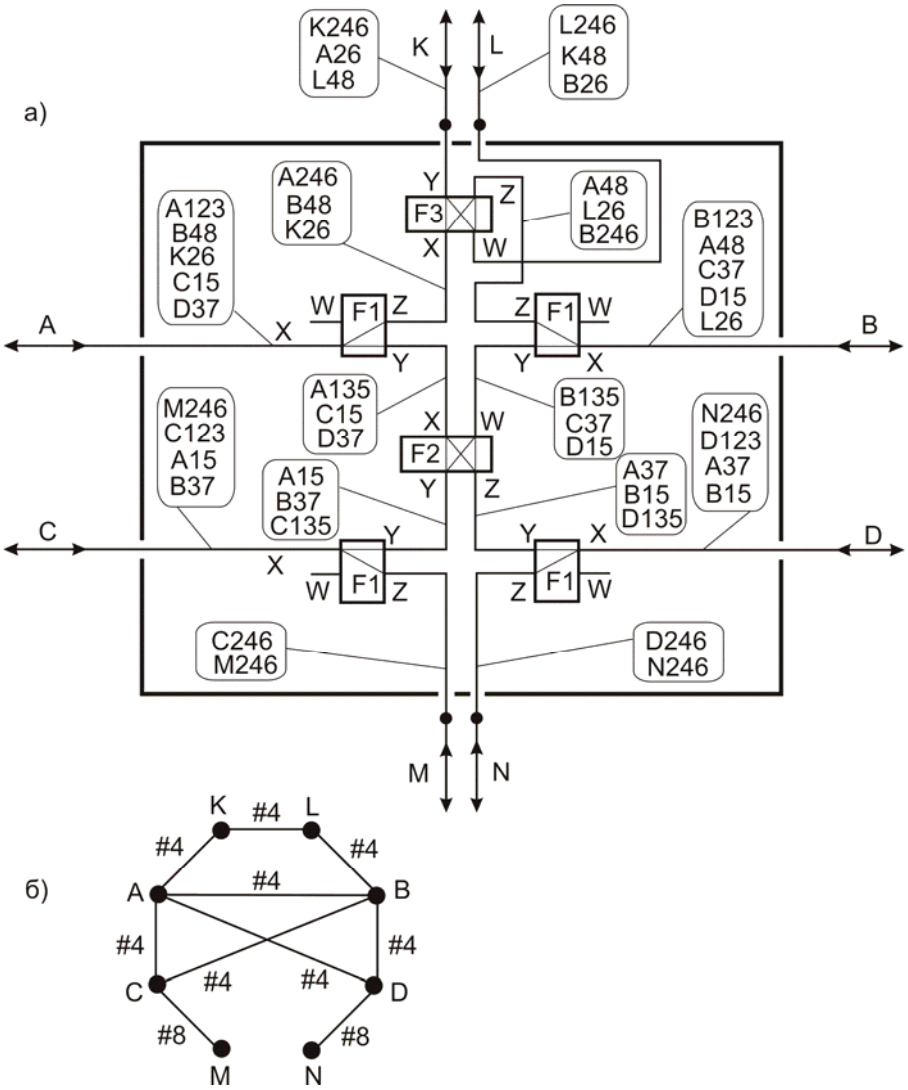

Рис. 43. Схема (*а*) непосредственного включения логического блока в сеть и её топология (*б*)

Граф двунаправленных соединений между узлами сети представлен на Рис. 43, *б*. Цифры, помеченные символами «#», показывают число длин волн, на которых может осуществляться связь между соответствующими узлами сети. Так, для связи между узлами A и K используются четыре длины волны: λ2, λ6, λ10, λ14. В этом можно убедиться, прослеживая путь от канала A к каналу K или в обратном направлении.

Проследим путь сигналов из канала A в канал K. Из канала (узла сети) A на вход X фильтра F1 логического блока 37 поступают сигналы с длинами волн λ1 — λ16, что соответствует краткому обозначению A123. Половина этих сигналов, имеющих длины волн λ2, λ4, λ6, …, λ16 (см. обозначение A246) проходит с выхода Z фильтра F1 на вход X фильтра F3. В свою очередь, половина сигналов λ2, λ4, λ6, …, λ16, а именно, сигналы λ2, λ6, λ10, λ14 (см. обозначение A26) проходит в канал K.

Канал K оперирует восемью двунаправленными сигналами. Группа сигналов K246 поступает из узла сети K на вход Y фильтра F3, часть K26 сигналов этой группы проходит через фильтры F3 и F1 в канал A.

В структурах, приведённых на последующих рисунках, прослеживание прохождения сигналов выполняется аналогично в соответствии с указателями-транспарантами, на которых приведены сокращённые обозначения подмножеств сигналов, имеющихся в данных точках.

В схеме, показанной на Рис. 44, *а*, входы-выходы расширения логического блока попарно объединены (правый с правым, левый с левым). Узлы сети, подключённые к каналам A — D, образуют структуру, в которой каждый узел соединён со всеми остальными (Рис. 44, *б*). Для передачи данных между узлами A и C, а также между узлами B и D используются восемь длин волн. Для остальных передач используются четыре длины волны.

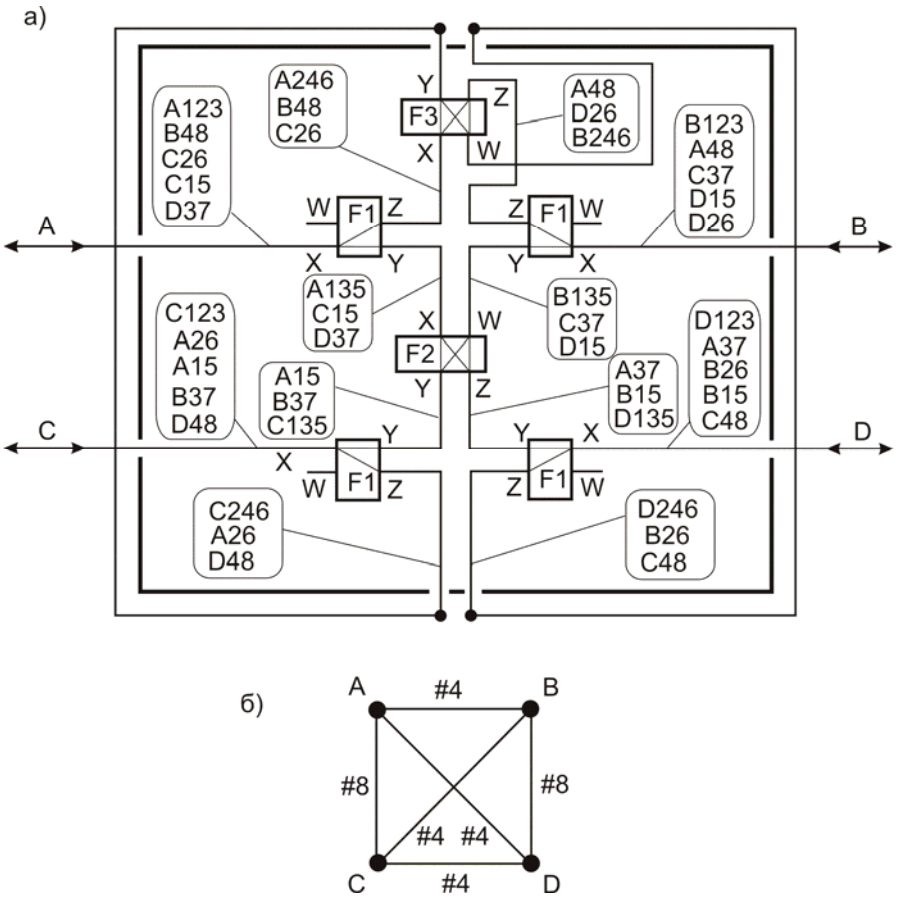

Рис. 44. Логический блок (*а*) с прямыми соединениями входов-выходов расширения и топология (*б*) сети на его основе

Схема, приведенная на Рис. 45, *а*, отличается от предыдущей (Рис. 44, *а*) тем, что входы–выходы расширения коммутатора 36 соединены между собой по-иному: верхний левый соединён с нижним правым, а верхний правый — с нижним левым. Топология сети осталась неизменной (сравните Рис. 44, *б* с Рис. 45, *б*), однако распределение длин волн по связям между узлами стало иным.

В схеме, показанной на Рис. 46, два логических блока объединены по входам-выходам расширения, в результате получен составной 8-канальный коммутатор.

Этот коммутатор реализует несколько десятков различных вариантов кольцевых соединений между восемью узлами (каналами): A — D; A* — D*. Три примера таких соединений приведены на Рис. 47.

Значительное число вариантов возможных кольцевых структур позволит строить адаптивные кольцевые сети, в которых на основе мониторинга трафика структура выбранного в текущем интервале времени кольца оптимальна по отношению к имеющимся на данный момент потокам данных.

Идея оптимизации в общем виде состоит в следующем. Предположим, что в сети, показанной на Рис. 47, в некоторый период времени наблюдается пересылка значительного объёма данных между узлами A и C*. Эти узлы расположены достаточно далеко друг от друга, поэтому поток данных вынужден проходить через узлы C и A*, как показано на рисунке утолщённой линией. Если «мгновенно» перейти по стрелке к структуре, показанной в центре рисунка, то узлы A и C* оказываются расположенными рядом, что повышает

эффективность передачи данных по кольцевой сети, так как исключаются «бесполезная» пересылка потока данных через узлы C и A*. Переход от одной структуры к другой происходит «без ведома» аппаратуры коммутатора на уровне программного обеспечения сети.

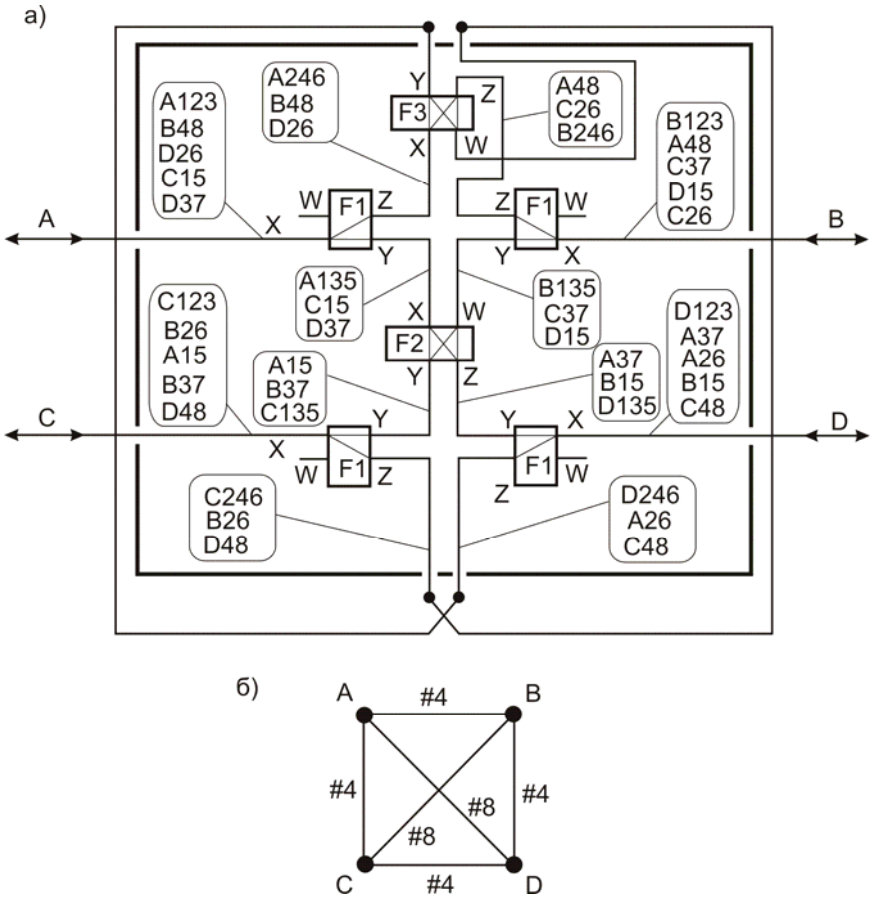

Рис. 45. Логический блок (*а*) с перекрёстными соединениями входов-выходов расширения и топология (*б*) сети на его основе

В схеме, показанной на Рис. 48, применены три логических блока, соединённых между собой по входам расширения. Здесь также имеется множество альтернативных вариантов построения кольцевых структур, один из которых показан на Рис. 49.

Число объединяемых логических блоков можно увеличивать и далее. При этом не происходит накопления затухания сигнала, так как независимо от общей конфигурации сети каждый узел (канал) связан только с четырьмя другими, а регенерация сигнала осуществляется в каждом узле сети.

На Рис. 50 представлен один из множества вариантов структуры сети на основе составного оптического коммутатора, содержащего четыре логических блока, объединённых по входам расширения (схема коммутатора строится по аналогии с рассмотренными ранее (Рис. 46, Рис. 48) и здесь не приводится).

Возможны и иные схемы составных коммутаторов на основе логического блока (Рис. 42), что дополнительно расширяет функциональные возможности сетей, где они применяются.

Применение предлагаемых коммутаторов оптических сигналов позволяет упростить построение сетей с логической структурой типа «кольцо» и топологией типа «звезда». Благодаря значительному числу альтернативных вариантов построения кольцевых структур, появляется возможность построения сетей с возможностью адаптации к трафику. Коммутатор функционирует без источника питания. Маршрут передаваемого узлом сети пакета данных задаётся на физическом (а не на сетевом) уровне выбором длины волны линейного сигнала.

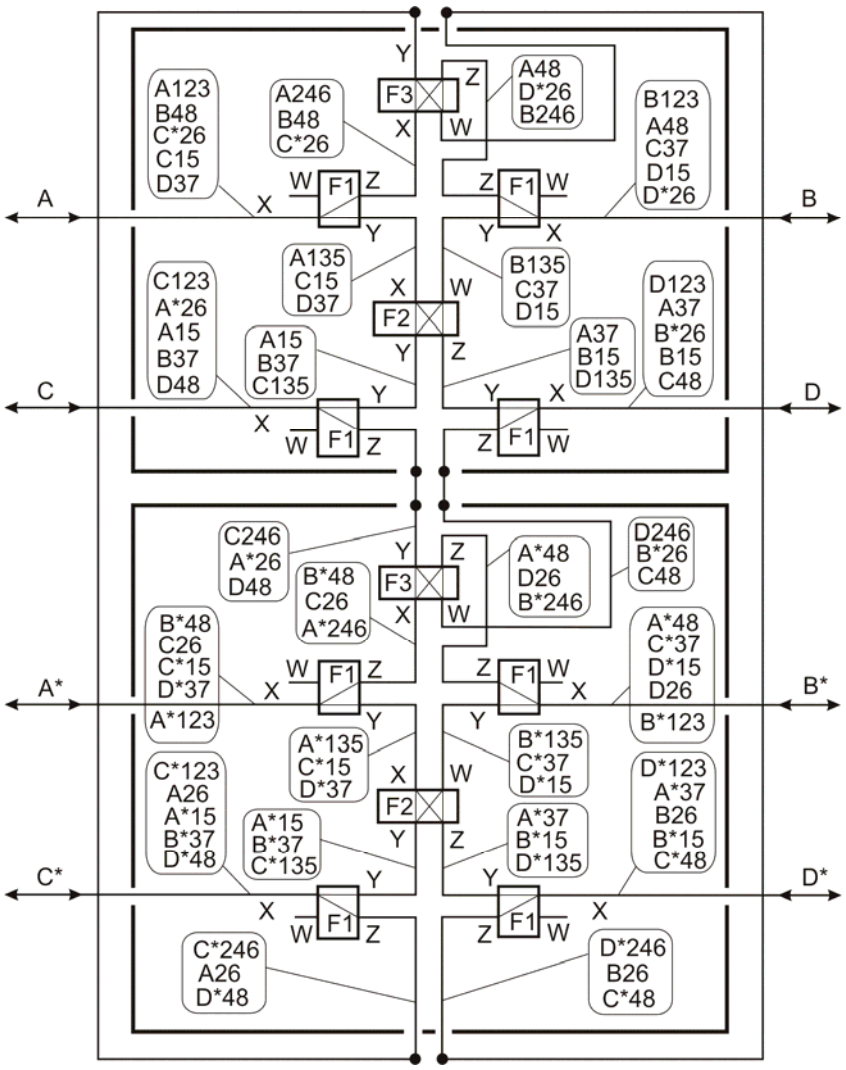

Рис. 46. Коммутатор оптических сигналов на основе двух логических блоков (Рис. 42)

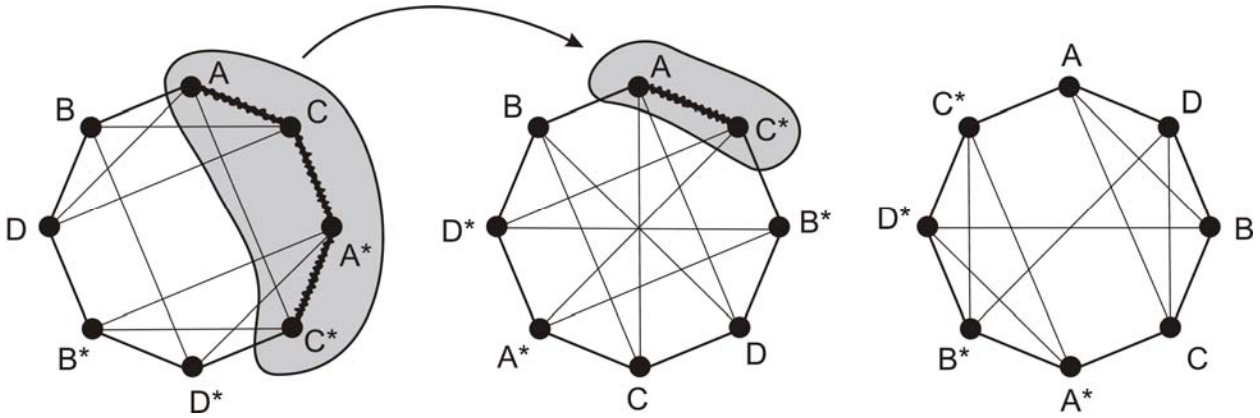

Рис. 47. Варианты топологии сети на основе коммутатора, показанного на Рис. 46

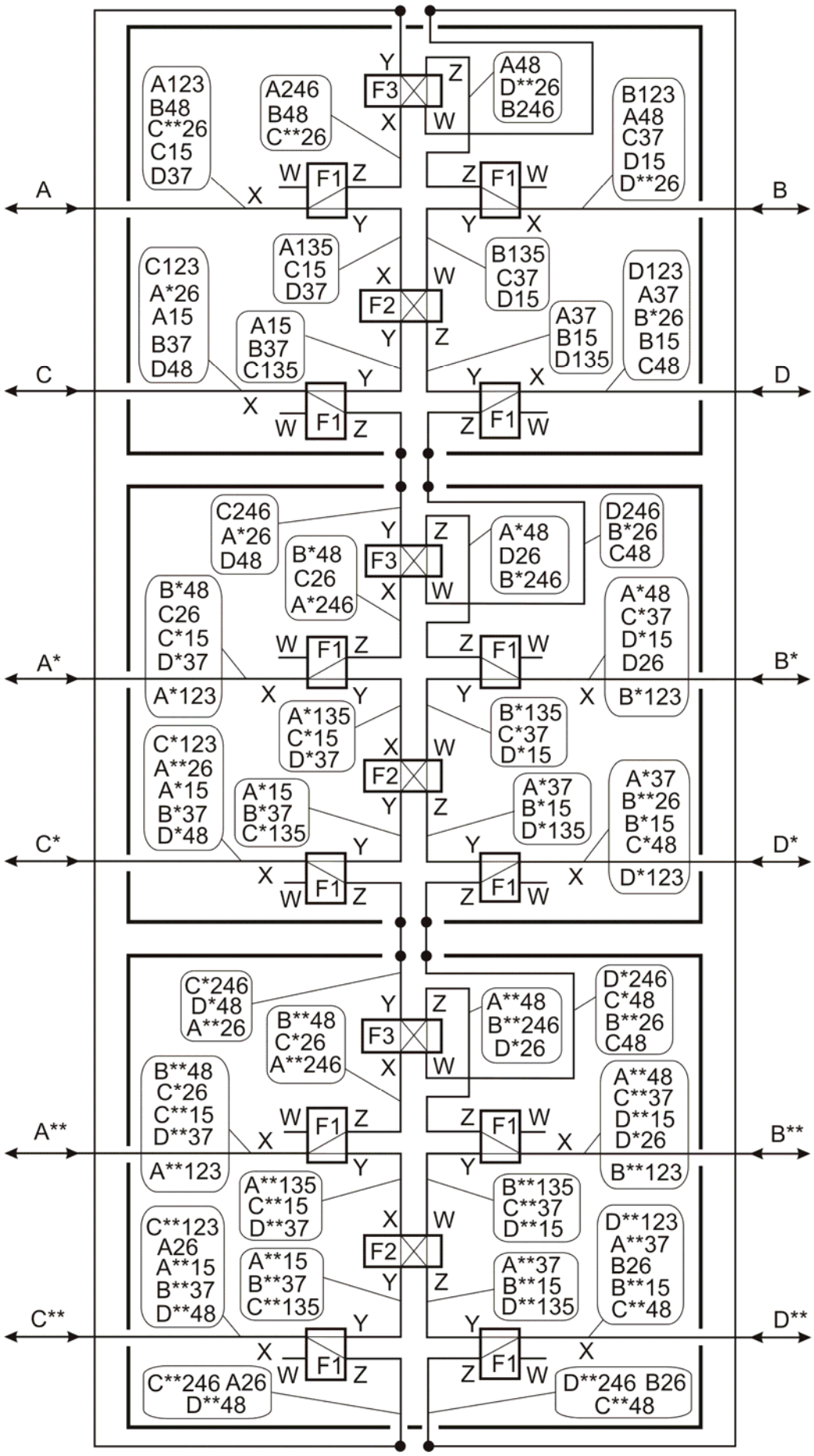

Рис. 48. Коммутатор оптических сигналов на основе трёх логических блоков (Рис. 42)

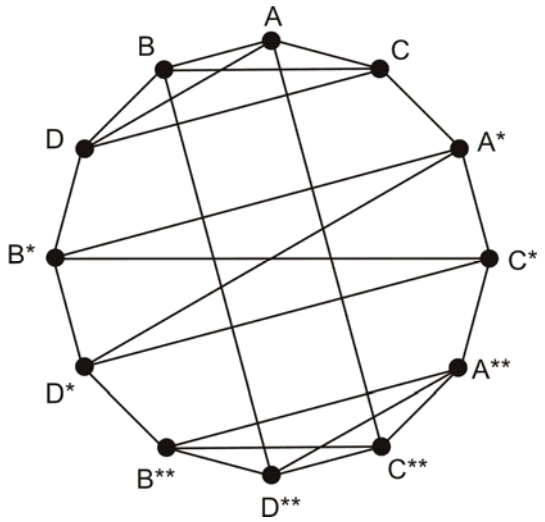

Рис. 49. Один из множества вариантов топологии сети при использовании коммутатора, показанного на Рис. 48

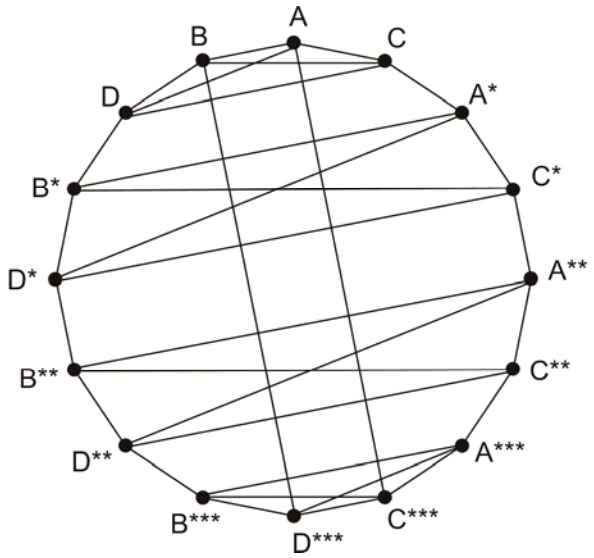

Рис. 50. Один из множества вариантов топологии сети при использовании коммутатора, состоящего из четырёх логических блоков (по аналогии со схемой, показанной на Рис. 48)

9 Четырёхканальный логический блок для построения коммутаторов, второй вариант

Логический блок, показанный на Рис. 51, отличается от рассмотренного ранее (Рис. 42) только перекрёстной перестановкой связей с выводами W и Z фильтра F3. Но даже такие незначительные отличия приводят к заметному изменению топологии сетей.

Так же, как и в рассмотренной ранее схеме, логический блок, показанный на Рис. 51 (обведён утолщённой линией), содержит шесть оптических фильтров: четыре фильтра типа F1, и по одному фильтру типа F2 и F3. Эти фильтры были рассмотрены ранее (см. Рис. 2, *а, б*). Логический блок содержит также функциональные входы-выходы A — D и входы-выходы расширения, обозначенные точками. Все внутренние и внешние соединения логического блока выполнены оптическими связями.

Для удобства описания логического блока и более сложных структур на его основе далее приняты сокращённые обозначения подмножеств группы сигналов λ1, λ2, λ3, …, λ16, поступающих в заданную точку устройства из канала Q (Q — обобщённое обозначение имени канала) в соответствии с введённой ранее Табл. 5.

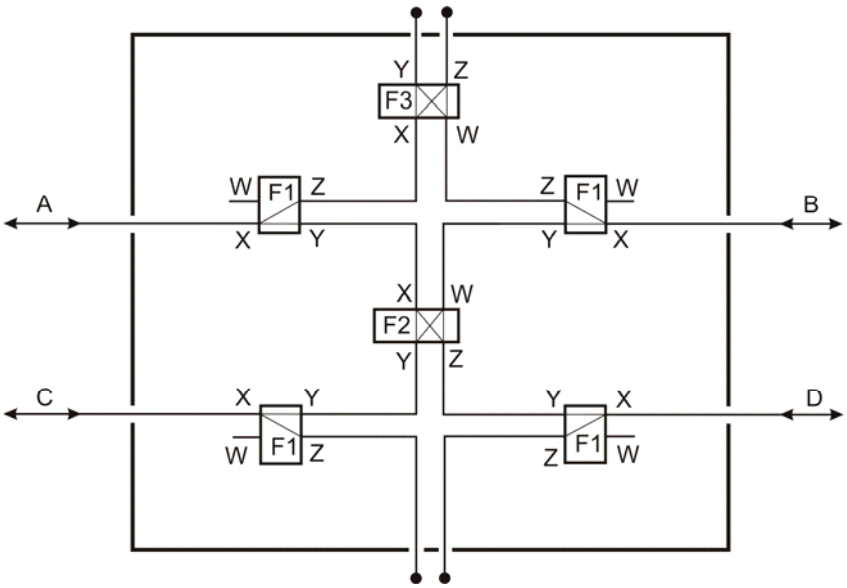

Рис. 51. Функциональная схема логического блока

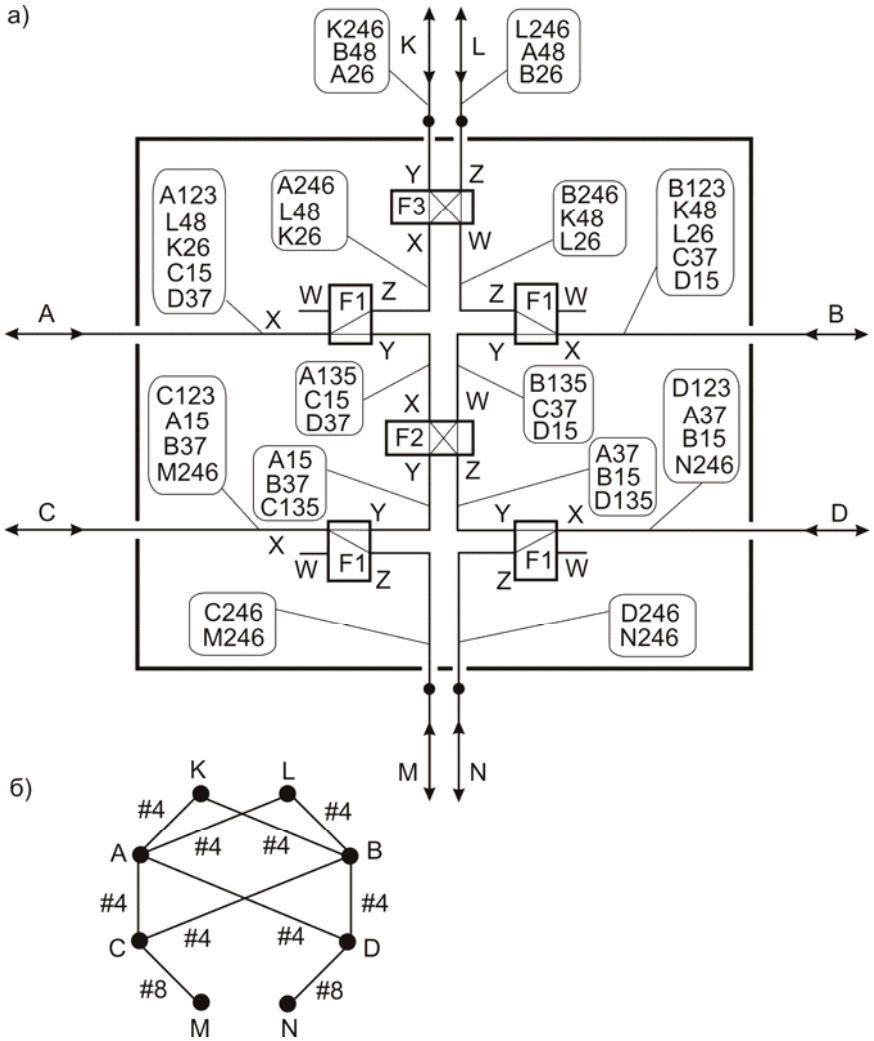

Рис. 52. Схема (*а*) непосредственного включения логического блока в сеть и её топология (*б*)

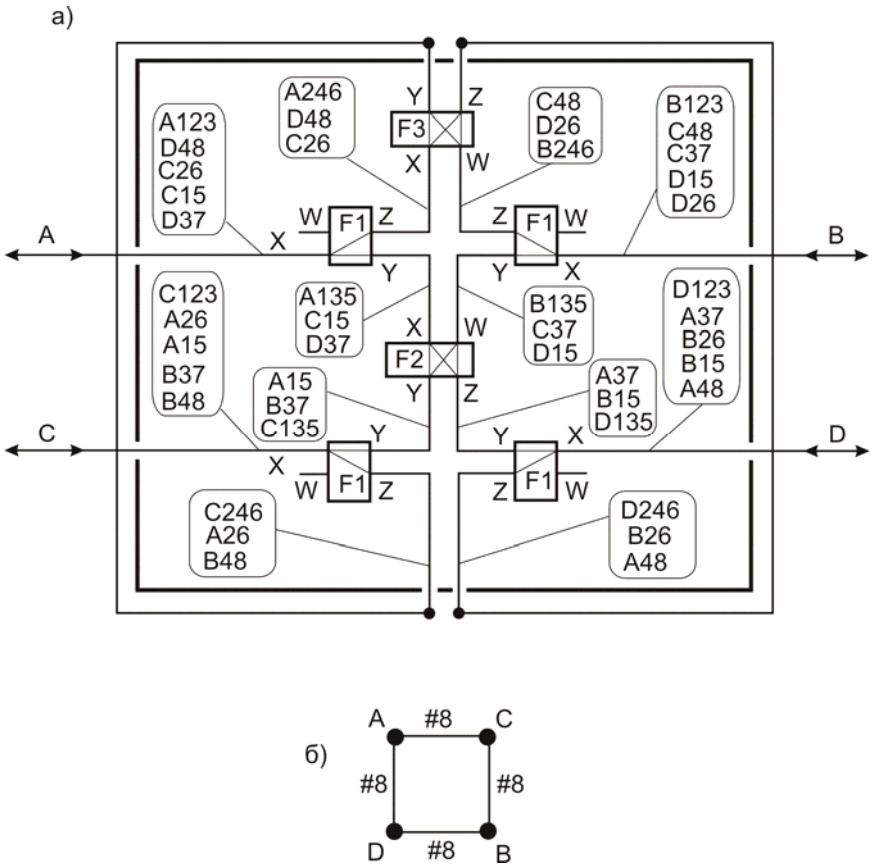

Рис. 53. Логический блок (*а*) с прямыми соединениями входов-выходов расширения и топология (*б*) сети на его основе

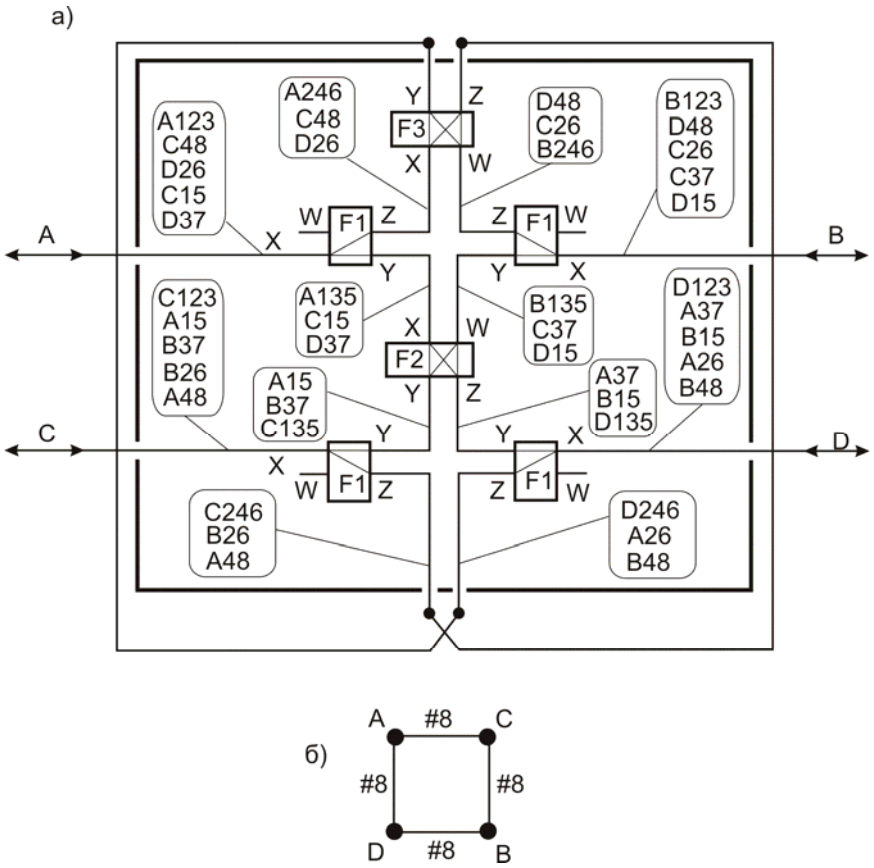

Рис. 54. Логический блок (*а*) с перекрёстными соединениями входов-выходов расширения и топология (*б*) сети на его основе

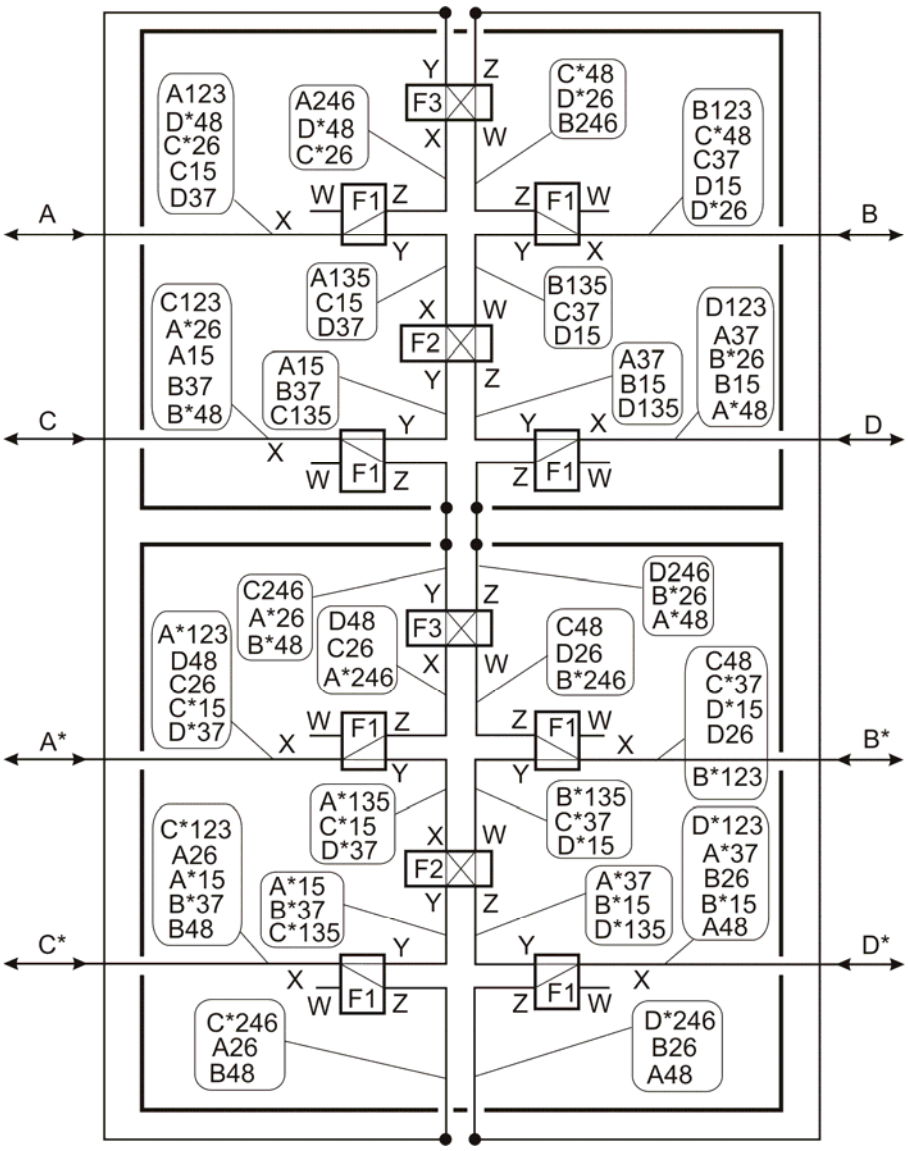

Рис. 55. Коммутатор оптических сигналов на основе двух логических блоков (Рис. 51)

Логический блок (Рис. 51) в простейшем случае можно рассматривать как функционально-законченное устройство (Рис. 52, *а*). При его использовании в компьютерной сети её узлы A — D подключаются к входам-выходам соответствующих каналов A — D. Узлы K и L, а также узлы M и N подключаются к соответствующим входам-выходам расширения.

Граф двунаправленных соединений между узлами сети представлен на Рис. 52, *б*. Цифры, помеченные символами «#», показывают число длин волн, на которых может осуществляться связь между соответствующими узлами сети. Так, для связи между узлами A и L используются четыре длины волны: λ4, λ8, λ12, λ16. В этом можно убедиться, прослеживая путь от канала A к каналу L или в обратном направлении.

Проследим путь сигналов из канала A в канал L. Из канала (узла сети) A на вход X фильтра F1 логического блока поступают сигналы с длинами волн λ1 — λ16, что соответствует краткому обозначению A123. Половина этих сигналов, имеющих длины волн λ2, λ4, λ6, …, λ16 (см. обозначение A246) проходит с выхода Z фильтра F1 на вход X фильтра F3. В свою очередь, половина сигналов λ2, λ4, λ6, …, λ16, а именно, сигналы λ4, λ8, λ12, λ16 (см. обозначение A48) проходит в канал L.

Канал L оперирует восемью двунаправленными сигналами. Группа сигналов L246 поступает из узла сети L на вход Z фильтра F3, часть L48 сигналов этой группы проходит через фильтры F3 и F1 в канал A.

В структурах, приведённых на последующих рисунках, прослеживание прохождения сигналов выполняется аналогично в соответствии с указателями-транспарантами, на которых приведены сокращённые обозначения подмножеств сигналов, имеющихся в данных точках.

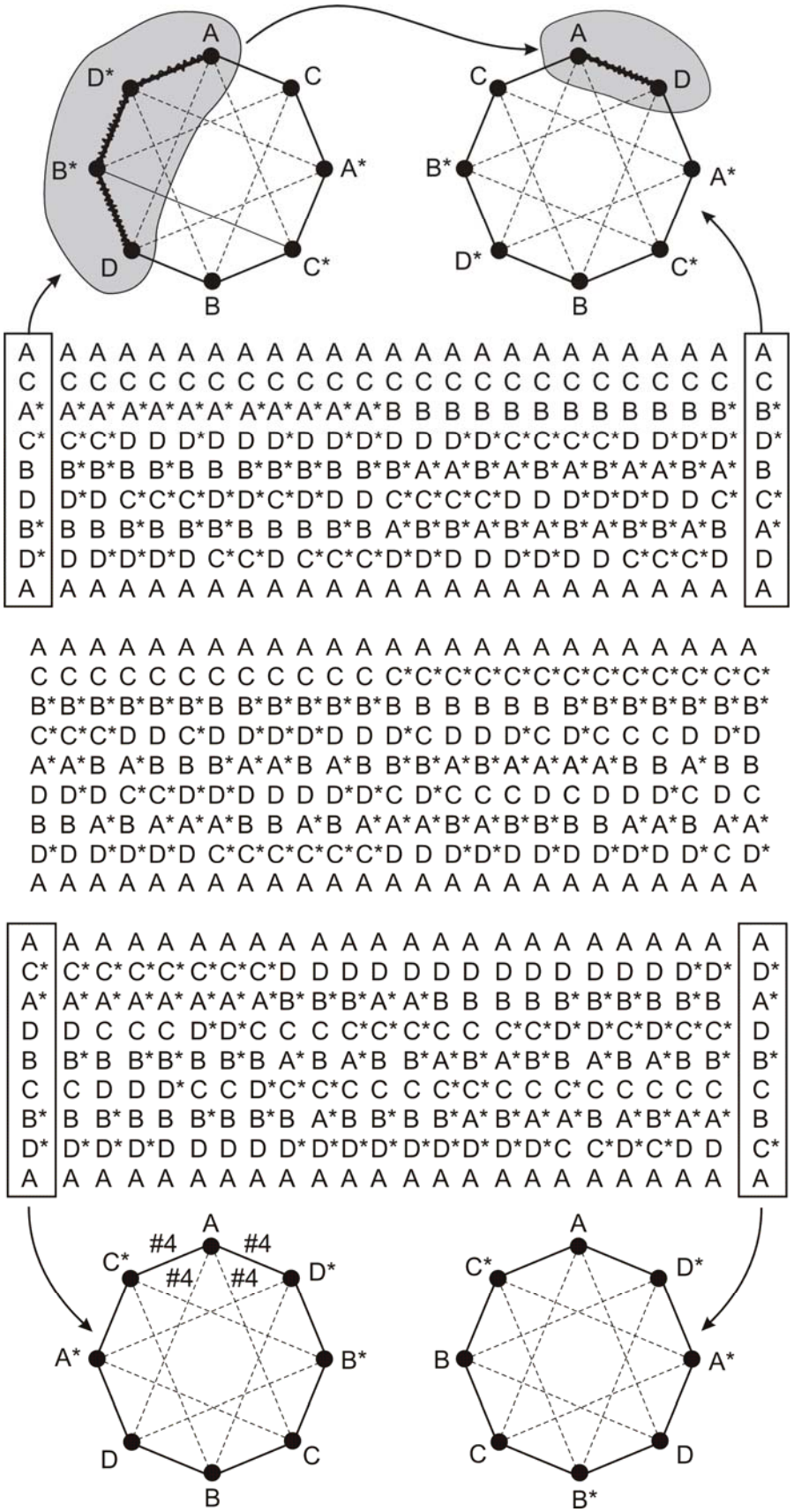

Рис. 56. Варианты топологии сети на основе коммутатора, показанного на Рис. 55

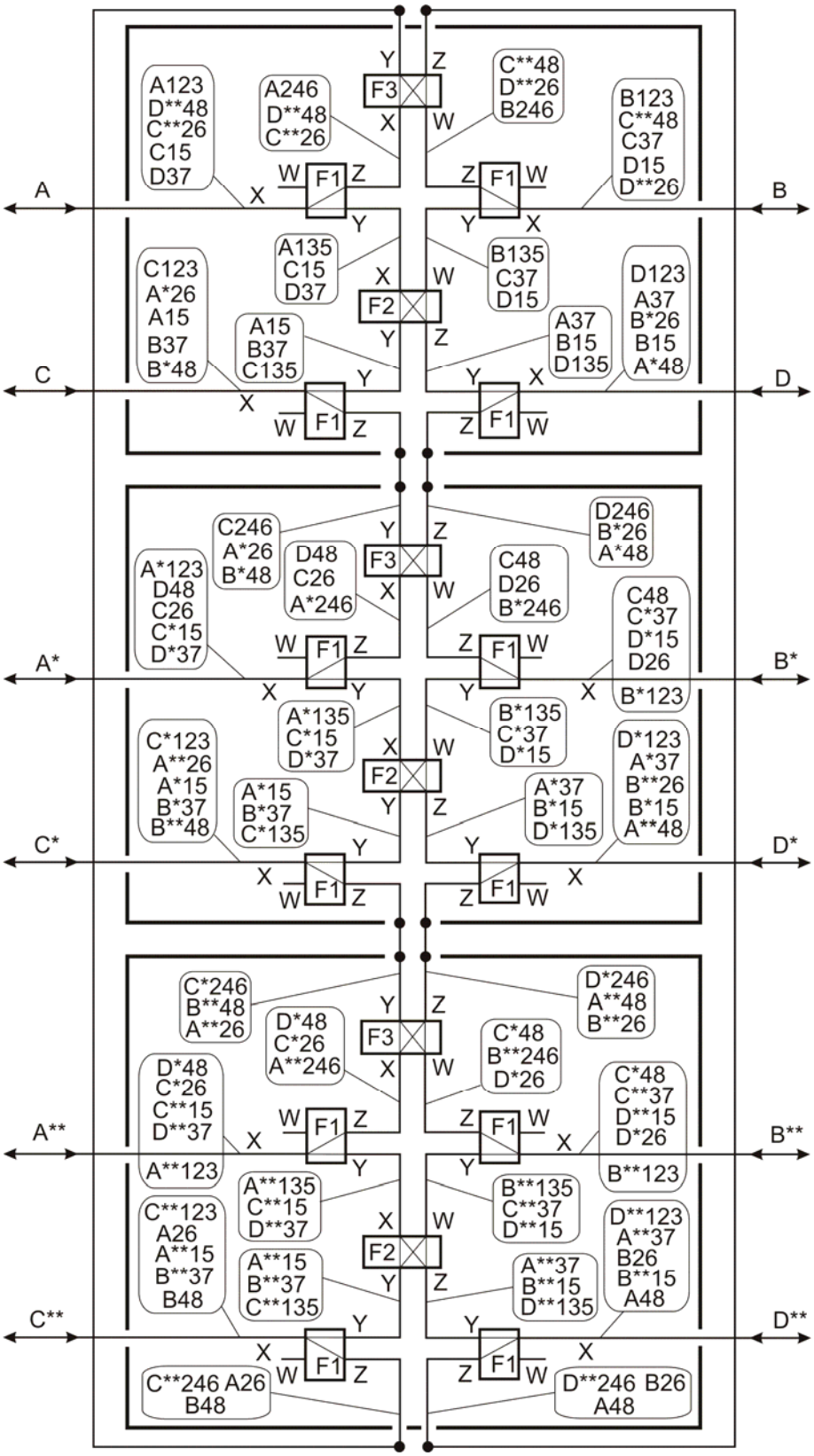

Рис. 57. Коммутатор оптических сигналов на основе трёх логических блоков (Рис. 51)

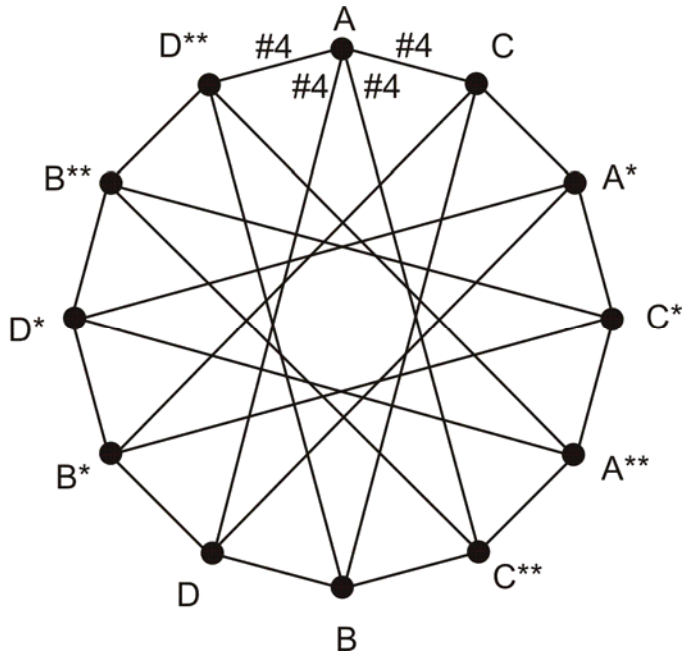

Рис. 58. Один из множества вариантов топологии сети при использовании коммутатора, показанного на Рис. 57

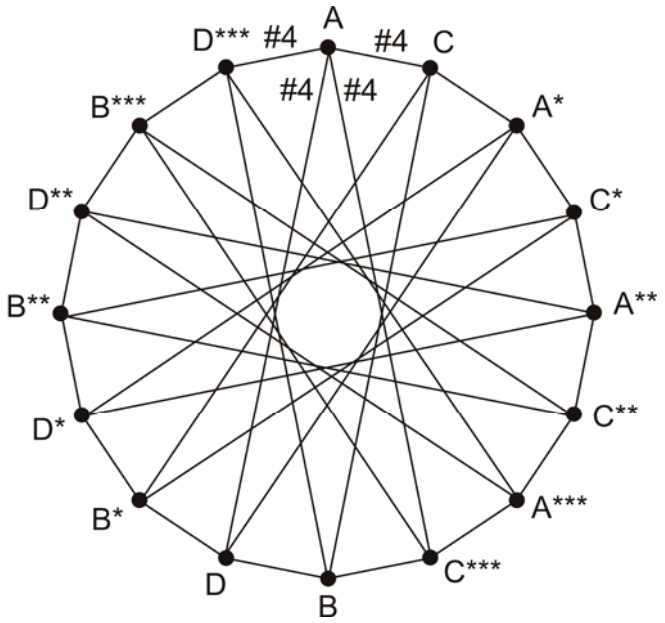

Рис. 59. Один из множества вариантов топологии сети при использовании коммутатора, состоящего из четырёх логических блоков (по аналогии со схемой, показанной на Рис. 57)

В схеме, показанной на Рис. 53, *а*, входы-выходы расширения логического блока попарно объединены (правый с правым, левый с левым). Узлы сети, подключённые к каналам A — D, образуют кольцевую структуру, в которой каждый узел соединён с двумя ближайшими соседними узлами (Рис. 53, *б*). Для передачи данных между узлами используются восемь длин волн (см. обозначение «#8»). Обратите внимание, что порядок следования узлов в кольце таков: A — C — B — D.

Схема, приведенная на Рис. 54, *а*, отличается от предыдущей (Рис. 53, *а*) тем, что входы–выходы расширения коммутатора 36 соединены между собой по-иному: верхний левый соединён с нижним правым, а верхний правый — с нижним левым. Топология сети осталась неизменной, однако распределение длин волн по связям между узлами стало иным.

В схеме, показанной на Рис. 55, два логических блока объединены по входам-выходам расширения, в результате получен составной 8-канальный коммутатор.

Этот коммутатор реализует несколько десятков различных вариантов кольцевых соединений между восемью узлами (каналами): A — D; A* — D*. Примеры соединений приведены на Рис. 56 в виде последовательностей символов в столбцах таблицы. Так, верхний левый столбец (выделен рамкой) отображает следующий двунаправленный замкнутый в кольцо путь между узлами сети: A — C — A* — C* — B — D — B* — D* — A. Этот путь соответствует кольцевой структуре, на которую направлена стрелка, исходящая от данного столбца. Помимо кольцевых связей, каждый узел содержит две дополнительные связи, показанные штриховыми линиями.

Аналогично коммутатор (Рис. 55) реализует все остальные перечисленные в таблице кольцевые структуры, в частности, соответствующие трём другим выделенным рамками столбцам.

Обилие вариантов возможных кольцевых структур позволяет строить адаптивные сети, в которых на основе мониторинга трафика структура выбранного в текущем интервале времени кольца оптимальна по отношению к имеющимся на данный момент потокам данных.

Идея оптимизации в общем виде состоит в следующем. Предположим, что в структуре, показанной в верхней левой части Рис. 56, в некоторый период времени наблюдается пересылка значительного объёма данных между узлами A и D. Эти узлы расположены достаточно далеко друг от друга, поэтому поток данных вынужден проходить через узлы D* и B*, как показано на рисунке утолщённой линией. Если «мгновенно» перейти к структуре 60, показанной в верхней правой части рисунка, то узлы A и D оказываются расположенными рядом, что повышает эффективность передачи данных по сети, так как исключаются бесполезная пересылка потока данных через узлы D* и B*. Переход от одной структуры к другой происходит без какой-либо аппаратной перестройки коммутатора на уровне программного обеспечения сети.

В схеме коммутатора, показанной на Рис. 57, применены три логических блока, соединённые между собой через входы-выходы расширения. Здесь также имеется множество альтернативных вариантов построения кольцевых структур, один из которых показан на Рис. 58.

Число объединяемых логических блоков можно увеличивать и далее. При этом не происходит накопления затухания сигнала, так как независимо от общей конфигурации сети каждый узел (канал) связан только с четырьмя другими.

На Рис. 59 представлен один из множества вариантов структуры сети на основе составного оптического коммутатора, содержащего четыре логических блока, объединённых по входам расширения (схема коммутатора строится по аналогии с рассмотренными ранее (Рис. 55, Рис. 57) и здесь не приводится).

Возможны и иные схемы составных коммутаторов на основе логического блока (Рис. 51), что дополнительно расширяет функциональные возможности сетей, где они применяются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. США № 5.809.190 http://www.uspto.gov.
2. Пат. США № 6.654.514 B2 http://www.uspto.gov.
3. Пат. США № 6.735.365 B2 http://www.uspto.gov.
4. Пат. США № 6.597.842 B2 http://www.uspto.gov.
5. Пат. США № 7.596.318. B2 http://www.uspto.gov.
6. Шевкопляс Б.В. Элементы схемотехники оптоволоконных систем. Инженерные решения. — М.: ИП РадиоСофт, 2011. — 760 с., ил.