

УДК 621.39

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-68-85>

EDN: MQPIJB

Применение управляемых мультиплексоров ввода / вывода ROADM в DWDM-сетях

Былина М. С., Шевцова А. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Актуальность. Современные оптические транспортные сети OTN-DWDM имеют сложные топологии, в которых между любыми двумя узлами существует более одного маршрута. Для гибкого управления сетью и обеспечения ее надежной и бесперебойной работы необходима динамическая оптическая маршрутизация спектральных каналов. Маршруты спектральных каналов в сети OTN-DWDM создаются с помощью оптических мультиплексоров ввода / вывода (OADM). Пассивные OADM на основе оптических фильтров не позволяют изменить маршрут без физической замены оборудования, поэтому в современных сетях применяются реконфигурируемые OADM (ROADM), позволяющие динамически перестраивать маршруты каналов. **Цель работы** – качественная оценка эффективности и целесообразности применения ROADM в сетях OTN-DWDM на основе сравнительного анализа их структурных схем и архитектур. **Результаты:** рассмотрены принципы работы и структурные схемы ROADM и их основных компонентов – спектрально-селективных переключателей (WSS) для сетей DWDM с использованием фиксированных и гибких сеток спектральных каналов, проведен сравнительный анализ архитектур ROADM (Colored, Colorless, Directionless, Contentionless, Broadcast-and-Select, Route-and-Select), даны рекомендации по выбору архитектуры ROADM для транспортной сети OTN-DWDM. **Практическая значимость:** предлагаемые рекомендации по выбору архитектуры ROADM могут быть использованы при проектировании и модернизации сетей OTN-DWDM для снижения эксплуатационных затрат и повышения устойчивости сети.

Ключевые слова: технология спектрального уплотнения DWDM, оптическая транспортная сеть OTN, управляемый оптический мультиплексор ввода / вывода ROADM, спектрально-селективный переключатель WSS, Colorless & Directionless & Contentionless ROADM, архитектура Broadcast-and-Select, архитектура Route-and-Select

Введение

Современные оптические транспортные сети строятся по стандарту OTN (аббр. от англ. Optical Transport Network) с применением технологии плотного спектрального мультиплексирования (DWDM, аббр. от англ. Dense Wavelength Division Multiplexing), позволяющей вводить в оптическое волокно на передающей стороне и выводить из него на приемной стороне одновременно n оптических

Библиографическая ссылка на статью:

Былина М. С., Шевцова А. А. Применение управляемых мультиплексоров ввода / вывода ROADM в DWDM-сетях // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 1. С. 68–85. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-68-85. EDN: MQPIJB

Reference for citation:

Bylina M., Shevtsova A. Application of Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexers in DWDM Networks // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 1. PP. 68–85. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-68-85. EDN: MQPIJB

сигналов (спектральных каналов), сформированных на n оптических несущих с разными длинами волн: $\lambda_i (i = 0, 1, \dots, n - 1)$.

Основным отличием OTN от транспортных сетей предыдущего поколения является наличие оптического уровня, позволяющего управлять оптическими сигналами, не прибегая к преобразованию их в электрические и считыванию заголовков, в том числе осуществлять их маршрутизацию¹ [1, 2].

Маршрутизация оптических сигналов осуществляется оптическими мультиплексорами ввода / вывода (OADM, аббр. от англ. Optical Add / Drop Multiplexer), которые размещают в узлах сети. На рисунке 1 представлен фрагмент сети OTN / DWDM кольцевой топологии, в которой каждый узел соединен с двумя соседними, образуя замкнутый контур. OADM включаются в разрыв кольца, выполняя выделение, добавление и транзит оптических каналов.

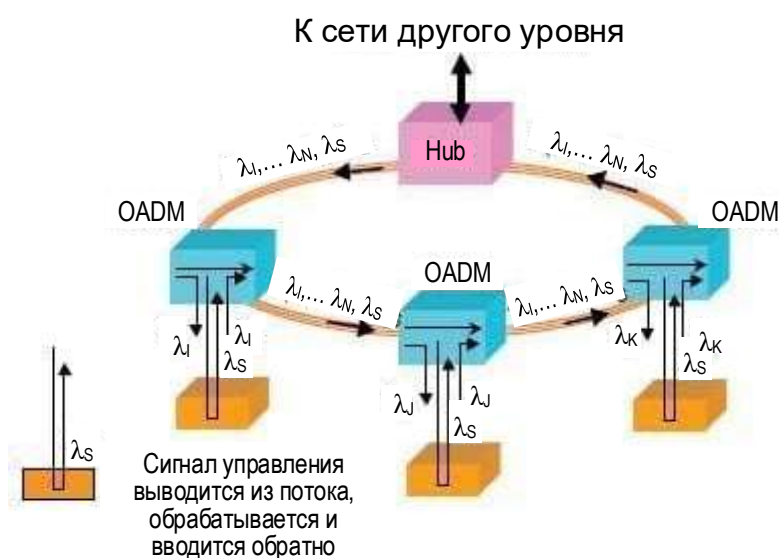


Рис. 1. Фрагмент сети OTN / DWDM кольцевой топологии

Фиксированные (пассивные) устройства (Fixed OADM, FOADM) не позволяют динамически перенастраивать маршруты каналов без физической замены оборудования, что ведет к высоким эксплуатационным затратам и нерациональному использованию спектрального ресурса. Для устранения этих недостатков были разработаны управляемые мультиплексоры ввода / вывода (Reconfigurable OADM, ROADM) [2–5].

Архитектура ROADM прошла путь от устройств с фиксированной привязкой портов к длинам волн (Colored) до современных бесцветных, всенаправленных и бесконфликтных (CDC, аббр. от англ. Colorless, Directionless and Contentionless) узлов с поддержкой гибкой частотной сетки. В данной работе представлен общий взгляд на развитие ROADM и их ключевых компонентов – спектрально-селективных переключателей (WSS, аббр. от англ. Wavelength Selection Switch), даны рекомендации по выбору архитектуры ROADM для транспортных сетей.

¹ Recommendation G.709/Y.1331. Interfaces for the optical transport network. 2020. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709> (дата обращения 11.04.2026).

Частотное планирование в сетях OTN с DWDM

Технология DWDM² допускает два варианта частотных планов – сетки с фиксированным канальным интервалом (Fixed Grid) и гибкие сетки с переменным канальным интервалом (Flexible Grid) (рисунок 2).

В частотном плане Fixed Grid канальный интервал $\Delta\nu$ между соседними спектральными каналами фиксирован и может составлять 12,5; 25; 50; 100; 200 или 400 ГГц. Наиболее часто используются значения 50 и 100 ГГц. Центральные частоты отдельных спектральных каналов получаются из соотношения: $\nu_i = \nu_0 + i \cdot \Delta\nu$, где $\nu_0 = 193,1$ ТГц – образующая частота; $i = \pm 1, \pm 2, \dots$

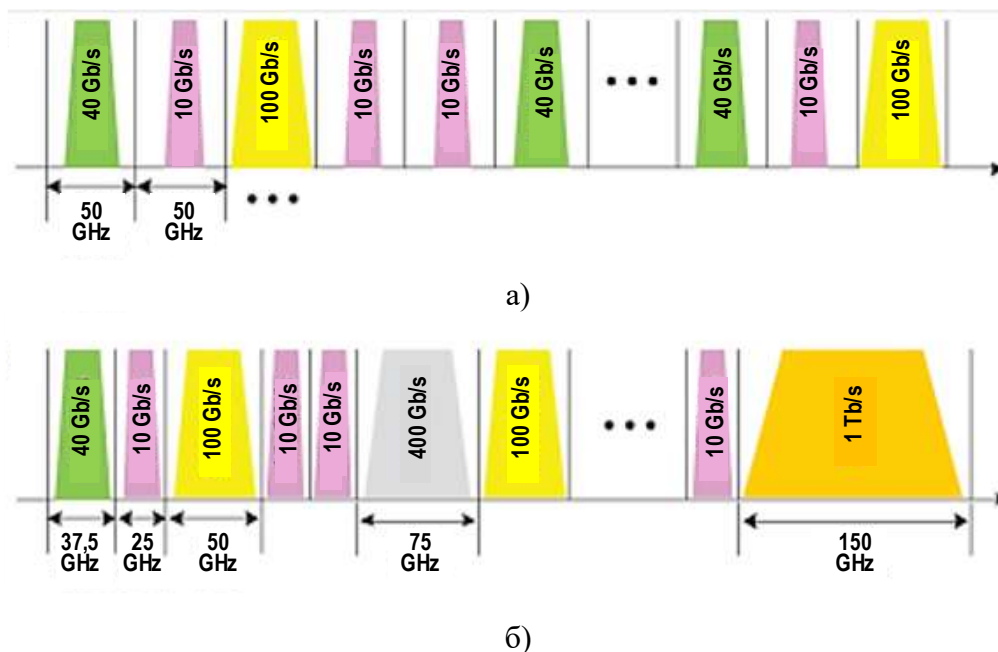


Рис. 2. Частотные планы DWDM: а) Fixed Grid; б) Flexible Grid

Основными достоинствами частотного плана Fixed Grid являются:

- низкая стоимость компонентов: мультиплексоры и WSS для Fixed Grid имеют значительно более простые конструкции, чем их аналоги для Flexible Grid;
- максимальная совместимость оборудования: большинство трансиверов, мультиплексоров, оптических усилителей и ROADMs, выпущенных за последние 20 лет, работают с планом Fixed Grid.

Однако из рисунка 2а видно, что при уплотнении потоков, имеющих разную скорость передачи (разную ширину спектра), некоторые каналные интервалы могут использоваться неэффективно. Эту проблему решает применение частотного плана Flexible Grid (рисунок 2б), в котором ширина канального интервала может различаться для разных каналов. Возможные центральные частоты спектральных каналов плана Flexible Grid получаются из образующей частоты ν_0 в соответствии с соотношением: $\nu_i = \nu_0 + i \cdot \Delta\nu_{flex}$, где $\Delta\nu_{flex} = 6,25$ ГГц, а минимальная ширина спектрального канала составляет 12,5 ГГц.

² Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. 2020. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1> (Accessed 11 April 2026).

Неуправляемые мультиплексоры ввода / вывода спектральных каналов

В сетях OTN/DWDM с использованием частотного плана Fixed Grid могут использоваться FOADM на основе [1–4, 6–8]:

- каскадного соединения интерференционных тонкопленочных фильтров (TFF, аббр. от англ. Thin-Film Filter) или волоконных брэгговских решеток (FBG, аббр. от англ. Fiber Bragg Grating) (рисунок 3);
- встречного включения двух интегрально-оптических мультиплексоров (Multiplexer, MUX) на массиве волноводов (AWG, аббр. от англ. Arrayed Waveguide Grating) (рисунок 4).

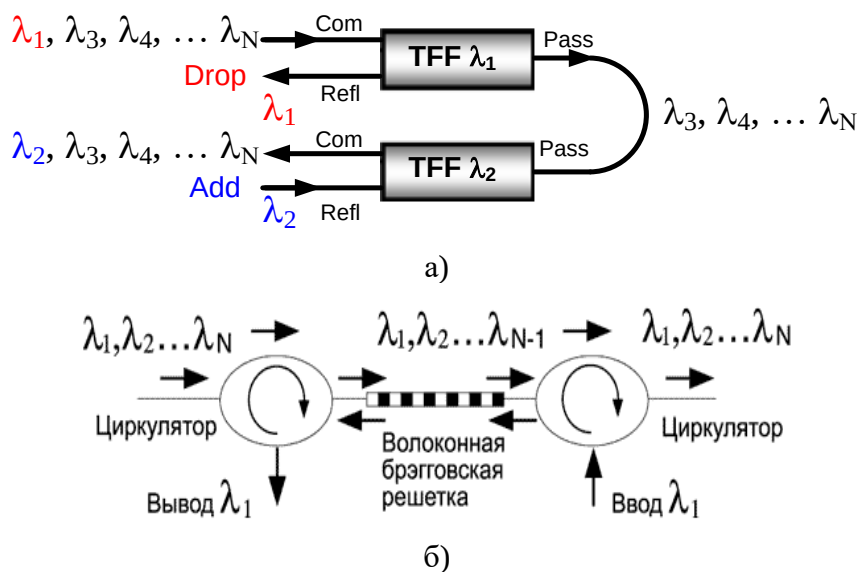


Рис. 3. Конструкции OADM для ввода / вывода одного спектрального канала на основе: а) TFF; б) FBG

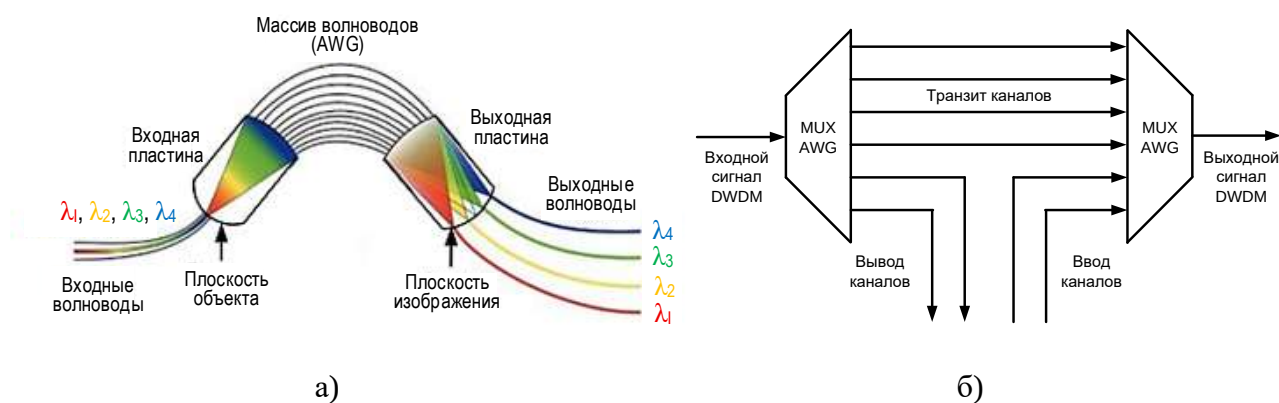


Рис. 4. MUX AWG (а) и OADM на основе встречного включения двух MUX AWG (б)

Достоинствами FOADM являются низкая стоимость компонентов и пассивность конструкции (нет необходимости в электропитании). Общим недостатком FOADM является жесткое закрепление длины волны за портом (фильтром). Перенастроить такой узел без физической замены фильтров невозможно.

Проектировать сеть с использованием FOADM целесообразно, если:

- сеть имеет фиксированную простую топологию, которую не предполагается менять в течение длительного периода времени;

– можно заранее определить, какие именно длины волн будут выделяться / добавляться в каждом узле;

– в узлах требуется выделять / добавлять небольшое число длин волн.

Более современным решением является применение ROADM, в которых реализуется программно-настраиваемый режим работы каждого спектрального канала: ввод / вывод (add / drop) или транзит (pass / through).

Спектрально-селективные переключатели WSS

Для обеспечения таких возможностей необходимы WSS, выполняющие две основные функции: демультиплексирование входного группового сигнала DWDM на отдельные спектральные каналы и управляемое переключение каждого канала на любой из выходных портов без электрооптического преобразования [2–5, 9].

Для демультиплексирования спектральных каналов в WSS может использоваться дифракционная решетка или MUX AWG. Переключение каналов между выходными портами осуществляется матрицей коммутационных элементов, для создания которых чаще всего применяются две технологии:

– микроэлектромеханические системы (Microelectromechanical System, MEMS) подвижных зеркал для частотного плана Fixed Grid [2, 9–11];

– жидкие кристаллы на кремнии (Liquid Crystal on Silicon, LCoS) для частотного плана Flexible Grid [12–15].

На рисунке 5 представлен WSS с коммутационной матрицей подвижных зеркал MEMS. MEMS-коммутаторы обеспечивают низкие вносимые потери и высокую изоляцию каналов, однако их возможности ограничены при работе с частотными планами Flexible Grid [9–11].

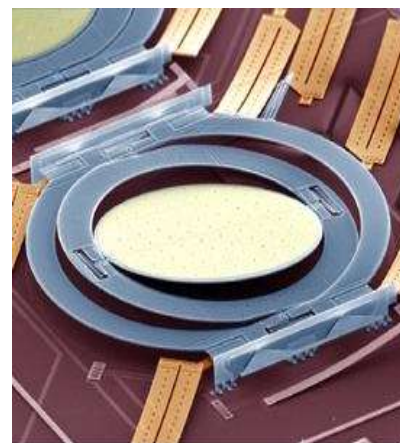
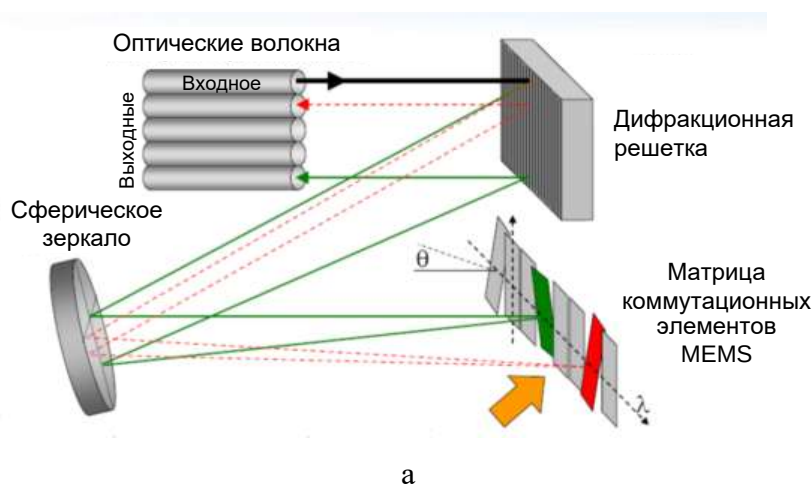


Рис. 5. WSS с коммутационной матрицей подвижных зеркал MEMS:
а) принцип работы; б) двухосевое подвижное зеркало

На рисунке 6 представлен WSS с коммутационной матрицей LCoS. Сигнал из входного оптического волокна коллимируется линзой и попадает на отражающую дифракционную решетку, которая разделяет его на отдельные спектральные каналы и направляет на матрицу LCoS, коммутационными элементами которой являются независимо управляемые жидкокристаллические пиксели,

модулирующие фазу падающего излучения. Такая матрица является по сути пространственным модулятором света. Излучение отдельного спектрального канала попадает одновременно на группу пикселей, образующих управляемую фазовую дифракционную решетку, которая отклоняет излучение на нужный угол, соответствующий выбранному выходному порту.

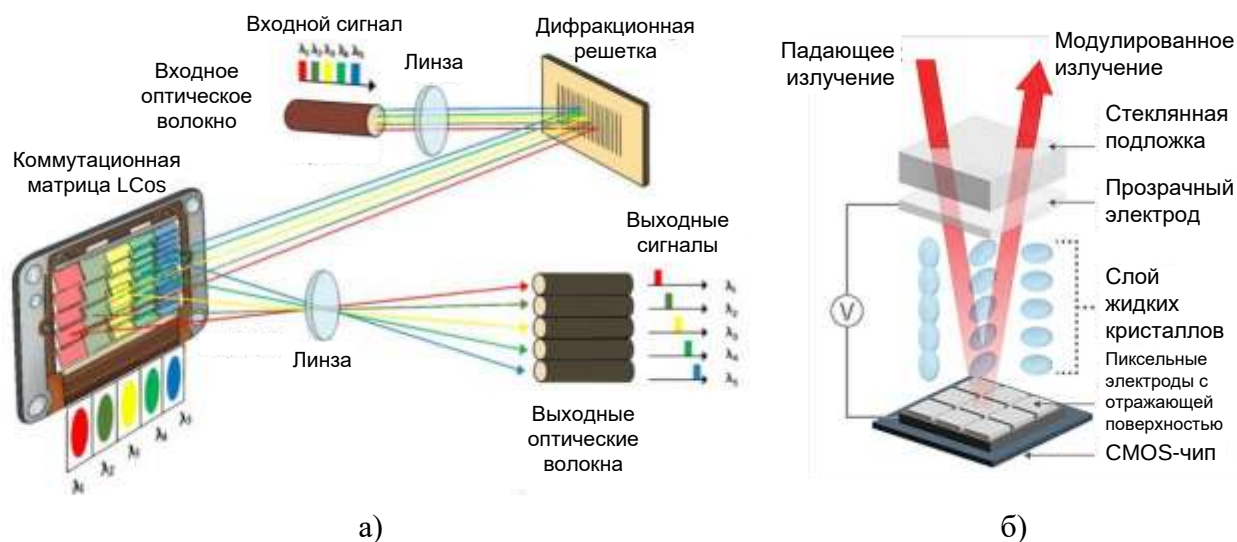


Рис. 6. WSS с коммутационной матрицей LCoS: а) принцип работы; б) структура матрицы

WSS с коммутационными матрицами LCoS, которые могут состоять из миллионов пикселей, широко используются в системах DWDM с гибкими частотными планами Flexible Grid. Главное свойство технологии WSS – бесцветность (Colorless), т. е. возможность направить излучение любой длины волны с входного порта на любой выходной порт. Именно это свойство лежит в основе эволюции ROADM от простейших цветных (Colored) узлов к гибким бесцветным, всенаправленным и бесконфликтным (CDC) архитектурам.

Broadcast-and-Select Colored & Directional ROADM

На рисунке 7 представлена структурная схема ROADM первого поколения [2, 5], в которую входят: оптические усилители на основе легированных эрбием волокон (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), MUX AWG, широкополосные оптические разветвители мощности (Power Splitter, PS) и управляемые оптические аттенюаторы (Variable Optical Attenuator, VOA). Данный узел ROADM связан с тремя другими узлами, расположенными в северном (North), западном (West) и восточном (East) направлениях. Оптический сигнал, входящий с одного из указанных направлений, после усиления в EDFA разделяется с помощью PS на N ослабленных копий, из которых используются только три по числу поддерживаемых направлений: одна копия направляется в блок ввода/вывода каналов своего направления, а две другие – в блоки ввода и транзита каналов двух других направлений. Выбор каналов для ввода, вывода и транзита осуществляется этими блоками. Такая архитектура называется Broadcast-and-Select (трансляция и выбор).

Вывод каналов. Проследим за сигналом, входящим с направления West. Одна его копия направляется на приемный демультиплексор AWG блока ввода /

вывода каналов West, где демультиплексируется на отдельные спектральные каналы, поступающие на входы приемников R трансиверов. В состав блока входят VOA. Управляя их затуханием, можно подавлять транзитные каналы, которые не должны выводиться в данном узле, а также регулировать уровни сигналов на входах приемников. Две другие копии поступают на WSS в блоках ввода и транзита каналов, расположенных в направлениях North и East.

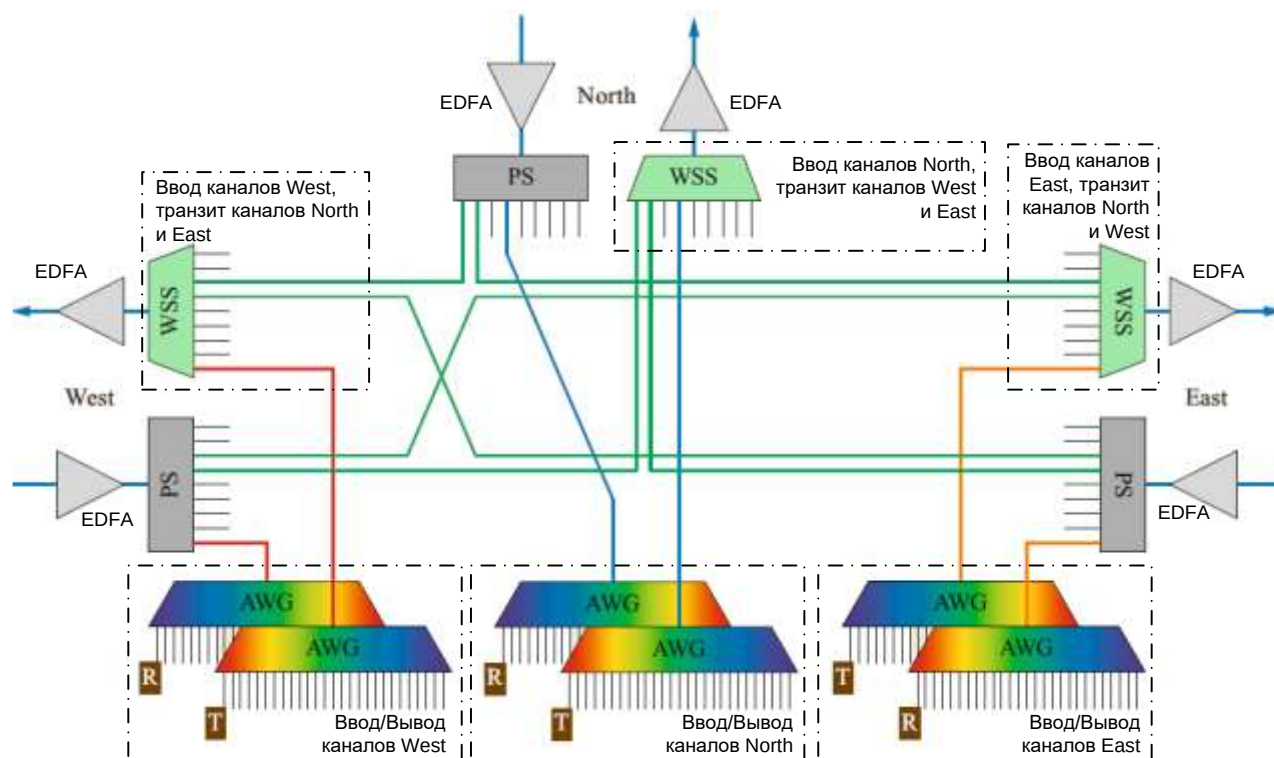


Рис. 7. Структурная схема Broadcast-and-Select Colored & Directional ROADM для узла с тремя направлениями

Ввод и транзит каналов. Рассмотрим работу WSS, формирующего исходящий в направлении West сигнал. На его входы поступают три сигнала:

- копии сигналов, входящих в ROADM с направлений North и East, содержащие каналы, которые можно пропустить транзитом;
- сигнал, состоящий из вводимых в направлении West каналов, который формируется в блоке ввода / вывода каналов West, содержащем передатчики T трансиверов, и объединяющий MUX AWG.

WSS объединяет транзитные и вводимые каналы в исходящий сигнал, подавляя при этом излучение каналов, которые выводятся в данном узле или проходят транзитом в других направлениях. Поскольку данный ROADM содержит MUX AWG, он является «цветным» (Colored), т. е. в нем имеется возможность динамически изменять набор вводимых и выводимых спектральных каналов, но для этого может потребоваться переключение трансиверов на другие порты ввода / вывода, так как каждый порт соотнесен со своей длиной волны.

В данном ROADM возможно также динамическое перенаправление транзитных каналов к разным узлам без физического вмешательства в инфраструктуру сети. Однако ввод каналов в исходящий сигнал каждого направления

осуществляется своим блоком ввода / вывода, т. е. переключение вводимого канала с одного направления на другое осуществляется вручную. Подобные ROADM называют «направленными» (Directional). Кроме того, использование MUX AWG жестко фиксирует частотный интервал между спектральными каналами, что исключает использование технологии Flex Grid.

Broadcast-and-Select Colorless & Directionless ROADM

Более современные ROADM представляют собой бесцветные (Colorless) и «всенаправленные» (Directionless) устройства (CD ROADM). Чтобы обеспечить «всенаправленность», все входящие и исходящие сигналы должны попадать на вход / выход каждого из направлений. Такой ROADM представлен на рисунке 8 [2, 5, 16, 17]. В отличие от устройства, изображенного на рисунке 7, в данном ROADM на каждый блок вывода каналов поступают копии входящих сигналов со всех направлений, а каждый блок ввода каналов отправляет копии вводимых сигналов на WSS всех направлений.

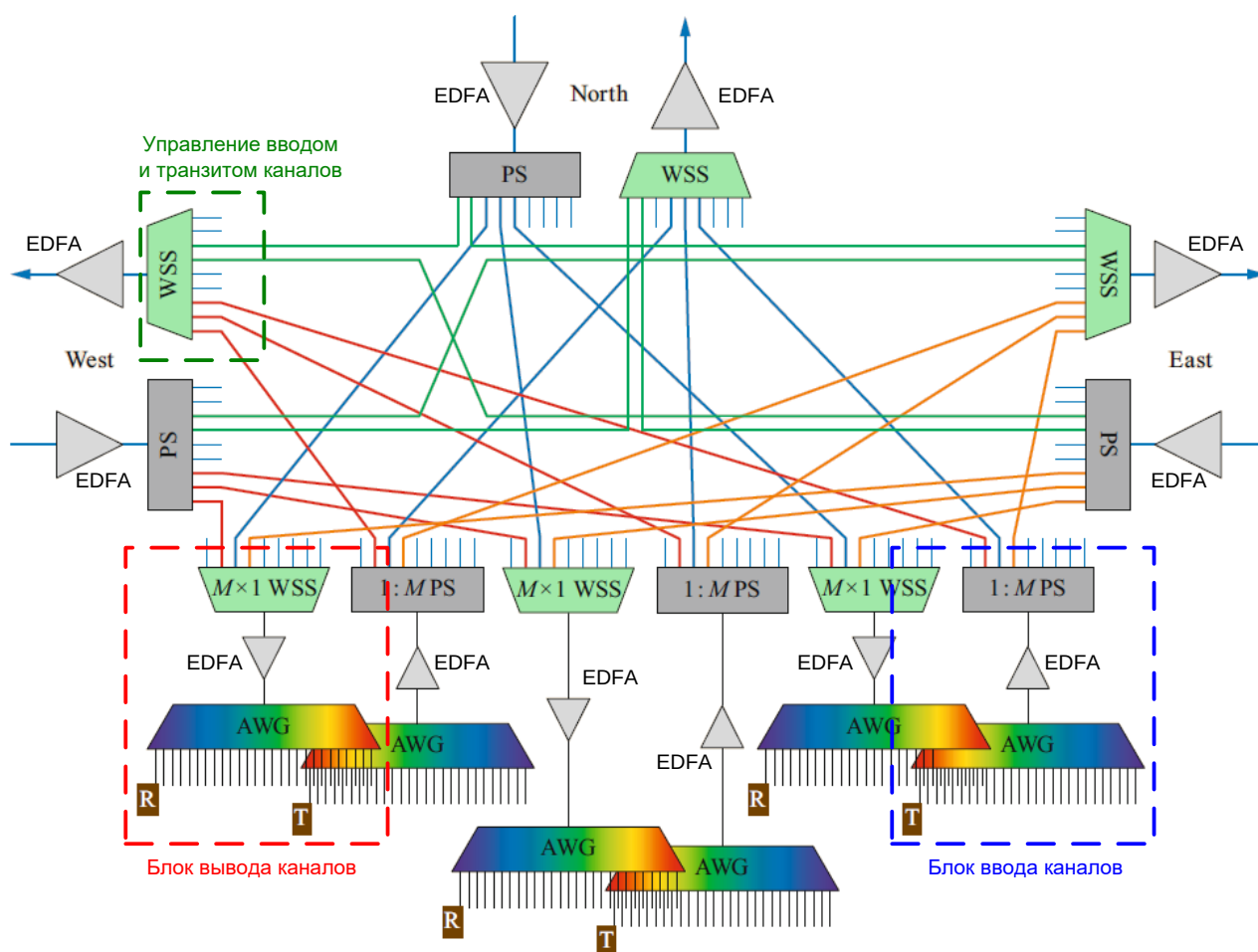


Рис. 8. Структурная схема Broadcast-and-Select CD ROADM для узла с тремя направлениями

Несмотря на то, что в блоках ввода и вывода каналов используются MUX AWG, данная схема обеспечивает бесцветность портов. Выводимые каналы отбираются бесцветными WSS $M \times 1$, а копии вводимых каналов создаются

неселективными $1 \times M \times PS$. Число портов M должно быть не меньше числа используемых направлений. В такой схеме обеспечивается принципиальная возможность осуществить для сигнала каждого спектрального канала любое необходимое действие: вывести его на приемное устройство, пропустить транзитом или ввести вместо него другой сигнал.

Для поддержки технологии Flexible Grid блоки ввода / вывода каналов не должны содержать MUX AWG. На рисунке 9 представлена структурная схема Colorless & Directionless ROADM, в которой вместо MUX AWG используются WSS $n \times 1$ и WSS $1 \times n$, выполняющие функции терминального мультиплексора и демультиплексора соответственно [2, 5, 16–20]. Число портов n в них должно быть не меньше числа используемых в сети спектральных каналов. Красными рамками показаны компоненты, относящиеся к блоку вывода, синими – к блоку ввода и транзита каналов.

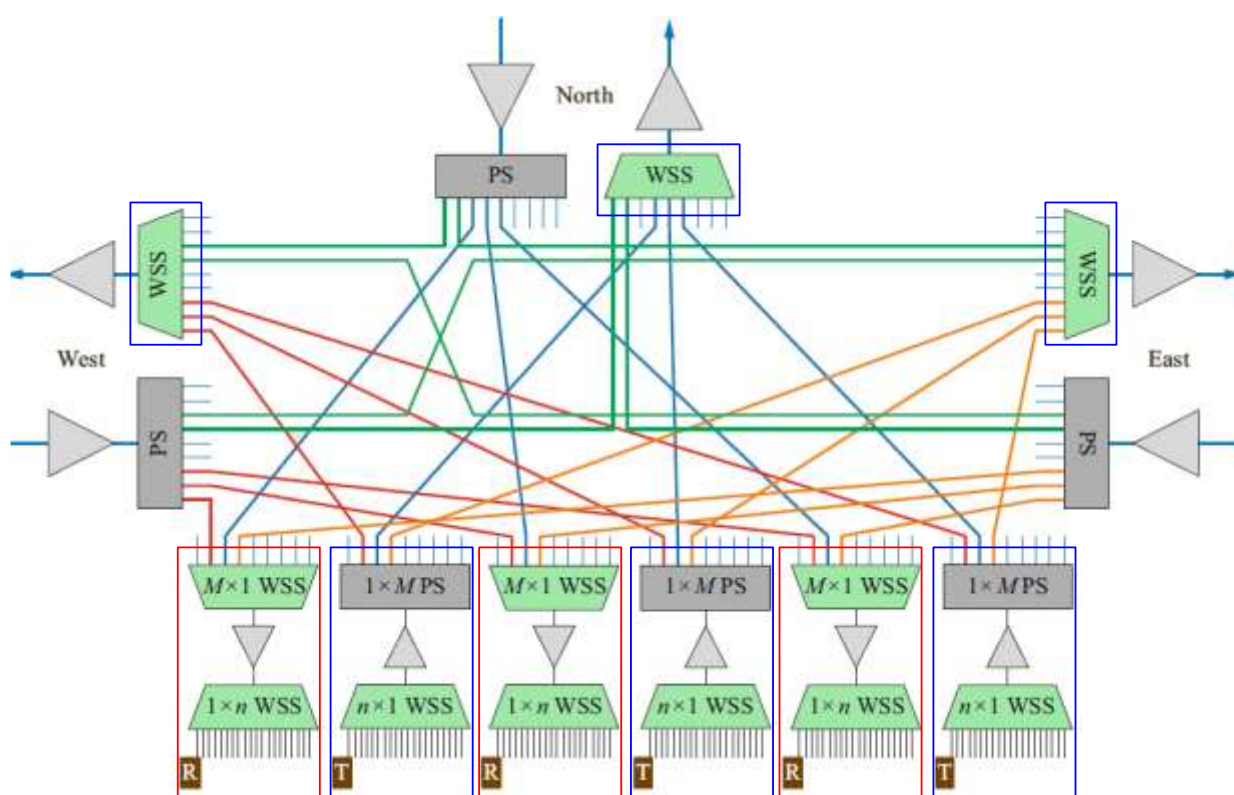


Рис. 9. Структурная схема Broadcast-and-Select CD ROADM для узла Flexible Grid с тремя направлениями

Route-and-Select Colorless & Directionless ROADM

Производительность ROADM с архитектурой Broadcast-and-Select быстро падает с увеличением числа направлений. В [2] для узлов с числом направлений восемь и более рекомендуется использовать архитектуру Route-and-Select (маршрутизация и выбор).

Структурная схема такого ROADM представлена на рисунке 10. Она отличается от схемы на рисунке 9 использованием WSS вместо PS [2, 16, 18, 19, 21]. Красными рамками обозначены компоненты, относящиеся к блоку вывода, синими – к блоку ввода каналов.

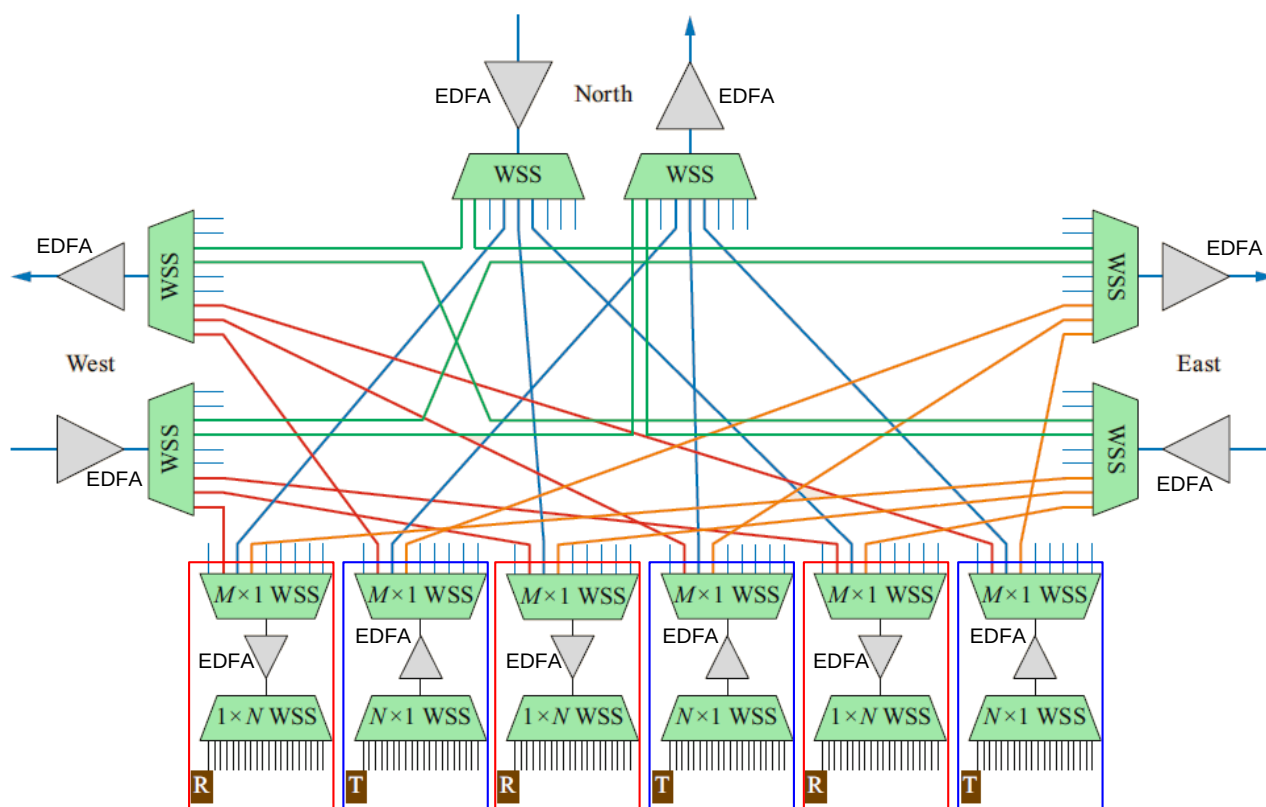
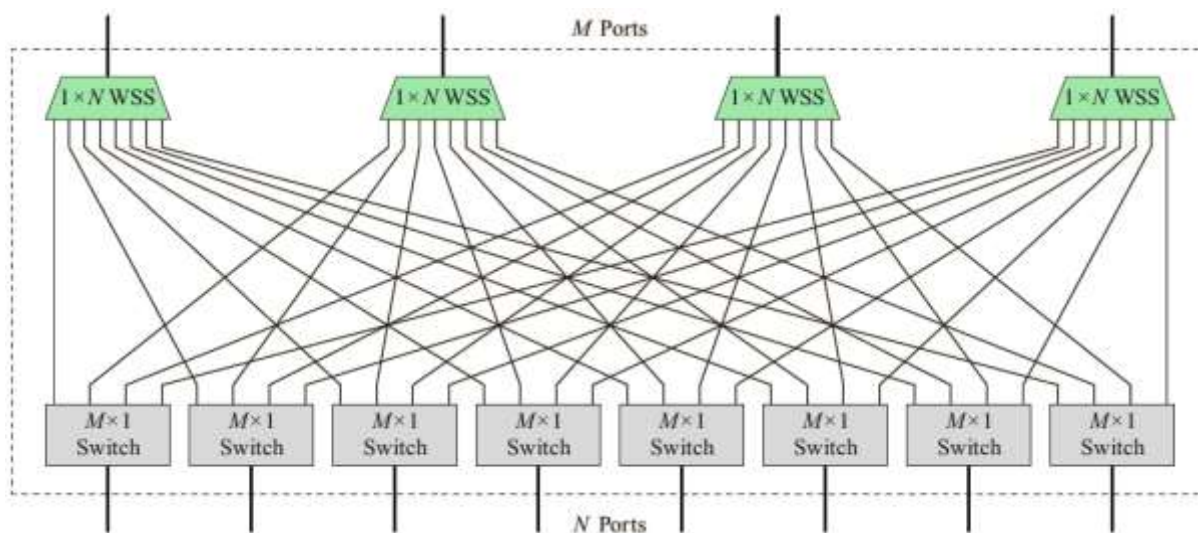


Рис. 10. Структурная схема Route-and-Select CD ROADM для узла Flexible Grid с тремя направлениями

Спектрально-селективные переключатели WSS $N \times M$

«Всенаправленность», реализованная в схемах на рисунках 8–10, привела к тому, что все устройства ввода и вывода каналов представляют собой единый блок, в котором присутствуют все вводимые и выводимые длины волн. В результате одна длина волны может быть использована для ввода / вывода только один раз и только в одном направлении. В таких узлах нельзя сформировать два канала, несущих разную информацию, но имеющих одну и ту же длину волны, даже если они предназначены для ввода в исходящие сигналы разных направлений. Такую возможность предоставляют ROADM нового поколения, которые кроме бесцветности и всенаправленности обладают свойством бесконфликтности (Contentionless). Для обеспечения бесконфликтности в ROADM используют для ввода / вывода каналов WSS $N \times M$ с несколькими входными и выходными портами.

WSS $N \times M$ (рисунок 11) содержат N неселективных переключателей $M \times 1$ Switch и M частотно-селективных переключателей WSS $1 \times N$ [2, 16, 22, 23]. Ввод / вывод канала осуществляется следующим образом. Излучение вводимого канала поступает на вход одного из переключателей $M \times 1$ Switch. Переключатель $M \times 1$ Switch направляет это излучение на WSS $1 \times N$ того из M направлений, в которое необходимо ввести данный канал. Выводимый канал отбирается частотно-селективным переключателем WSS $1 \times N$ и направляется им на нужный переключатель $M \times 1$ Switch.

Рис. 11. Структурная схема WSS $N \times M$

Такое устройство позволяет независимо перенаправлять сигнал любой длины волны с любого из M входных портов на любой из N выходных портов. При этом исключается ситуация направления двух сигналов одинаковой длины волны на один и тот же выходной порт.

Route-and-Select Colorless & Directionless & Contentionless ROADM

Последним достижением в развитии ROADM стала разработка бесконфликтных (Contentionless) устройств, в которых отсутствует ограничение на использование одинаковых длин волн на разных направлениях (рисунок 12) и сохраняются все преимущества бесцветности и всенаправленности. Такие Colorless & Directionless & Contentionless устройства называют CDC ROADM. [2, 16, 24].

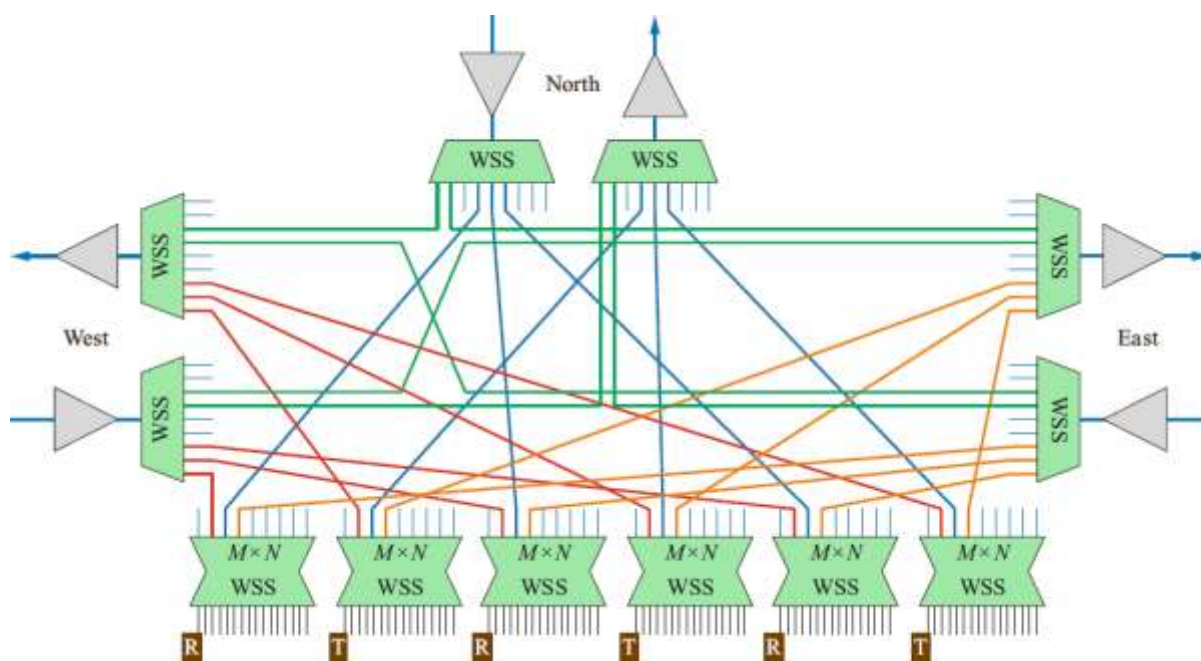


Рис. 12. Структурная схема Route-and-Select CDC ROADM для узла Flexible Grid с тремя направлениями

Рекомендации по выбору архитектуры ROADM

Выбор конкретной архитектуры узла ROADM для транспортной сети зависит от нескольких факторов. Основными критериями являются масштаб сети, число поддерживаемых направлений, тип частотного плана.

Необходимость использования архитектур CD и CDC ROADM, поддерживающих автоматическую перенастройку узла, связана с масштабом сети. В небольших корпоративных сетях, где изменения конфигурации происходят редко (не чаще нескольких раз в год), автоматизация этих изменений нецелесообразна. В городских сетях, где перенастройка может требоваться несколько раз в неделю, например, при перераспределении каналов между узлами или аварийных переключениях, автоматизация изменений может быть экономически оправданной. В крупных магистральных сетях с высокими требованиями к отказоустойчивости перенастройка может происходить ежедневно, и автоматизация необходима. Выбор между архитектурами Broadcast-and-Select и Route-and-Select зависит от числа направлений, поддерживаемых узлом ROADM. Обобщенные рекомендации по выбору архитектуры ROADM приведены в таблице 1.

Таблица 1. Рекомендации по выбору архитектуры ROADM

Масштаб сети	Число направлений	Необходимость перенастройки	Частотный план	Рекомендуемая архитектура
Небольшая или средняя	2–8	редко	Fixed Grid	Broadcast-and-Select Colored & Directional
Средняя	2–8	часто	Fixed Grid или Flexible Grid	Broadcast-and-Select Colorless & Directionless
Средняя	4–16	часто	Flexible Grid	Route-and-Select Colorless & Directionless
Крупная	8–16	часто	Flexible Grid	Route-and-Select Colorless & Directionless & Contentionless

Заключение

Развитие оптических транспортных сетей послужило толчком для эволюции ROADM, которые прошли путь от цветных и направленных устройств до современных бесцветных, всенаправленных и бесконфликтных решений. Каждый новый этап развития ROADM был обусловлен необходимостью преодоления конкретных ограничений:

- отказ от привязки портов к длинам волн (Colorless) и направлениям (Directionless) позволил осуществлять маршрутизацию сигналов на оптическом уровне без физического вмешательства в инфраструктуру;
- переход от архитектуры Broadcast-and-Select к Route-and-Select решил проблему масштабируемости, обеспечив эффективную работу узлов с большим числом направлений;
- обеспечение бесконфликтности (Contentionless) позволило повысить эффективность использования спектрального ресурса.

Однако применение современных CDC ROADMs с поддержкой Flexible Grid в оптических транспортных сетях не всегда оправдано. Выбор архитектуры ROADM для конкретного участка сети должен опираться на комплексную оценку ее масштаба, интенсивности изменений трафика, типа частотного плана. Для крупных магистральных сетей с высокой динамикой трафика для обеспечения гибкости, надежности и экономической эффективности необходимо внедрять CDC ROADMs, но для небольших сетей целесообразно использовать более простые решения.

Литература

1. Трешиков В. Н., Листвин В. Н. DWDM-системы. М.: Техносфера, 2024. 476 с.
2. Springer Handbook of Optical Networks / Ed. by B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. J. Winzer, Y. Zhao. Cham: Springer, 2020. 1182 p. DOI: 10.1007/978-3-030-16250-4.
3. Kartalopoulos S. V. DWDM: Networks, Devices, and Technology. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2002. 487 p. DOI: 10.1109/9780470544440.
4. Chen Y.-K., Chang C. H., Yang Y. L., Kuo I. Y., Liang T. C. Mach-Zehnder Fiber-Grating-Based Fixed and Reconfigurable Multichannel Optical Add-Drop Multiplexers for DWDM Networks // Optics Communications. 1999. Vol. 169. Iss. 1–6. PP. 245–262. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00408-3. EDN: ADXUMB
5. Былина М. С., Глаголев С. Ф., Гоменица В. А., Фраз А. В., Цветков Д. А. и др. Принципы построения современных мультиплексоров ввода/вывода ROADM // Сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024)» (27–28 февраля 2024 г., Санкт-Петербург): в 4 т. / под. ред. С. А. Брусиловского. Т. 1. СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 146–151. EDN: HLBNRG
6. Tachikawa Y., Inoue Y., Ishii M., Nozawa T. Arrayed-Waveguide Grating Multiplexer with Loop-Back Optical Paths and Its Applications // Journal of Lightwave Technology. 1996. Vol. 14. Iss. 6. PP. 977–984. DOI: 10.1109/50.511597
7. Brückner V. Elements of Optical Networking: Basics and Practice of Glass Fiber Optical Data Communication. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. 251 p.
8. Dlamini P. P., Isoe G. M., Grattan K. T. V., Rahman A. B. M., Leitch A. W. R., et al. Fibre Bragg Grating Based All Optical OADM for Flexible Spectrum Channel Reservation to Minimize Optical Crosstalk in WDM Optical Communication Networks // Proceedings of Southern African Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC, Kwa-Zulu Natal, South Africa, 1–4 September 2019). Kwa-Zulu Natal, 2019. PP. 138–143.
9. Ma Y., Stewart L., Armstrong J., Clarke I. G., Baxter G. Recent Progress of Wavelength Selective Switch // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39. Iss. 4. PP. 896–903. DOI: 10.1109/JLT.2020.3022375. EDN: IQHYYS

10. Thakulsukanant K. MEMS Technology for Optical Switching // Walailak Journal of Science and Technology. 2013. Vol. 10. Iss. 1. PP. 9–18. DOI: 10.2004/wjst.v10i1.390
11. Liu A.-Q. Photonic MEMS Devices: Design, Fabrication and Control. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 483 p.
12. Frisken S., Baxter G., Abakoumov D., Zhou H., Clarke I., et al. Flexible and Grid-less Wavelength Selective Switch using LCOS Technology // Optical Fiber Communication Conference (OSA, 6–10 March 2011, Los Angeles, USA). 2011. DOI: 10.1364/OFC.2011.OTuM3
13. Optical Fiber Telecommunications. Vol. VIA. Components and Subsystems / Ed. by I. Kaminow, T. Li, A. E. Willner. Amsterdam: Academic Press: Elsevier, 2013. 794 p.
14. Wang M., Zong L., Mao L., Marquez A., Ye Y., et al. LCoS SLM Study and Its Application in Wavelength Selective Switch // Photonics. 2017. Vol. 4. Iss. 2. Art. 22. DOI: 10.3390/photonics4020022
15. Ji H., Shan Y., Mo Y. Chen Zh., Ma D. Optical Design of an LCoS-Based 1×10 WSS with High Coupling Efficiency and Compact Light Paths // Photonics. 2023. Vol. 10. Iss. 10. P. 1107. DOI: 10.3390/photonics10101107. EDN: CZEWMA
16. Handbook of Radio and Optical Networks Convergence / Ed. by T. Kawanishi. Singapore: Springer, 2024. 1723 p. DOI: 10.1007/978-981-97-2282-2
17. Way W. I., Ji P. N., Patel A. N. Wavelength Contention-Free via Optical Bypass within a Colorless and Directionless ROADM [Invited] // Journal of Optical Communications and Networking. 2013. Vol. 5. Iss. 10. PP. A220–A229. DOI: 10.1364/JOCN.5.00A220
18. Sakamaki Y., Kawai T., Fukutoku M. Next-generation Optical Switch Technologies for Realizing ROADM with More Flexible Functions // NTT Technical Review. 2014. Vol. 12. Iss. 1. PP. 37–41. DOI: 10.53829/ntr201401fa6
19. Jinno M., Sasaki R., Izumi T., Kitada M., Miyamura T., et al. Minimal-Hardware Colorless-Directionless ROADM Based on a Single Multi-Input-Port-WSS with Joint Switching // Journal of Optical Communications and Networking. 2026. Vol. 18. Iss. 3. PP. 195–205. DOI: 10.1364/jocn.580878. EDN: ELFAEM
20. Skorin-Kapov N., Pavón-Mariño P., Quagliotti M., Riccardi E., Napoli A., et al. A Broadcast-and-Select ROADM Architecture to Support Linear Hub-Ended Trees Using Point-to-Multipoint Coherent Transceivers [Invited] // Journal of Optical Communications and Networking. 2025. Vol. 17. Iss. 7. PP. C1–C10. DOI: 10.1364/JOCN.550101. EDN: OEJPKY
21. Yang R., Liu L., Yan S., Simeonidou D. A Programmable ROADM System for SDM/WDM Networks // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 9. P. 4195. DOI: 10.3390/app11094195. EDN: LZTQMC
22. Yamaguchi K., Ikuma Y., Nakajima M., Suzuki K., Itoh M., et al. $M \times N$ Wavelength Selective Switches Using Beam Splitting by Space Light Modulators // IEEE Photonics Journal. 2016. Vol. 8. Iss. 1. P. 7901708. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2527705.

23. Ikeda K., Suzuki K., Konoike R., Kawashima H. Silicon Photonics Wavelength Selective Switch with Unlimited Free Spectral Range // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38. Iss. 12. PP. 3268–3275. DOI: 10.1109/JLT.2020.2989379. EDN: TDAJWW

24. Фокин В. Г., Ибрагимов Р. З. Гибкие оптические сети: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2022. 252 с.

**Статья поступила 08 мая 2026 г.
Одобрена после рецензирования 27 мая 2026 г.
Принята к публикации 06 июля 2026 г.**

Информация об авторах

Былина Мария Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: Bylina.Maria@sut.ru

Шевцова Александра Андреевна – студент 3-го курса факультета инфокоммуникационных систем и сетей (группа ИКТО-38) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: shevtsova.aa@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-68-85>
EDN: MQPIJB

Application of Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexers in DWDM Networks

 M. Bylina ,  A. Shevtsova

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
Saint-Petersburg, 193232, Russian Federation

Background. Modern OTN-DWDM optical transport networks have complex topologies, with more than one route between any two network nodes. Dynamic optical routing of spectral channels is required for flexible network management and to ensure reliable and uninterrupted operation. Spectral channel routes in OTN-DWDM networks are created using optical add / drop multiplexers (OADMs). Passive OADMs, based on optical filters, do not allow route changes without physical equipment replacement. Therefore, reconfigurable OADMs (ROADMs) are used in modern networks, enabling dynamic channel rerouting. **Purpose.** To qualitatively assess the effectiveness and feasibility of using ROADMs in OTN-DWDM networks based on a comparative analysis of their structural diagrams and architectures. **Results.** The operating principles and structural diagrams of ROADMs and their main components—wavelength-selective switches (WSS)—for DWDM networks using fixed and flexible spectral channel grids are examined. A comparative analysis of ROADM architectures (Colored, Colorless, Directionless, Contentionless, Broadcast-and-Select, Route-and-Select) is conducted. Recommendations for selecting a ROADM architecture for an OTN-DWDM transport network are provided. **Practical relevance.** The proposed recommendations for selecting a ROADM architecture can be used in the design and modernization of OTN-DWDM networks to reduce operating costs and improve network resilience.

Key words: dense wavelength division multiplexing DWDM, optical transport network OTN, reconfigurable optical add / drop multiplexer ROADM, wavelength-selective switch WSS, Colorless & Directionless & Contentionless ROADM, broadcast-and-select architecture, Route-and-Select architecture

References

1. Trechikov V. N., Listin V. N. DWDM-Systems. Moscow: Technosphere Publ., 2024. 476 pp. (in Russian)
2. Springer Handbook of Optical Networks / Ed. by B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. J. Winzer, Y. Zhao. Cham: Springer, 2020. 1182 p. DOI: 10.1007/978-3-030-16250-4.
3. Kartalopoulos S. V. DWDM: Networks, Devices, and Technology. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2002. 487 p. DOI: 10.1109/9780470544440.
4. Chen Y.-K., Chang C. H., Yang Y. L., Kuo I. Y., Liang T. C. Mach-Zehnder Fiber-Grating-Based Fixed and Reconfigurable Multichannel Optical Add-Drop Multiplexers for DWDM Networks // Optics Communications. 1999. Vol. 169. Iss. 1–6. PP. 245–262. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00408-3. EDN: ADXUMB
5. Bylina M., Glagolev S., Gomenitsa V., Fraz A., Tsvetkov D., et al. Principles of Construction of Modern Input/Output Multiplexers ROADM // Proceedings of the XIII of the International Scientific, Technical and Methodical Conference “International Conference on Advanced Infotelecommunications” (ICAIT, 27–28 February

2024, St. Petersburg, Russia) / Ed. by S. Brusilovsky. Vol. 1. St. Petersburg: SPbSUT, 2024. PP. 146–151. (in Russian) EDN: HLBNRG

6. Tachikawa Y., Inoue Y., Ishii M., Nozawa T. Arrayed-Waveguide Grating Multiplexer with Loop-Back Optical Paths and Its Applications // *Journal of Lightwave Technology*. 1996. Vol. 14. Iss. 6. PP. 977–984. DOI: 10.1109/50.511597

7. Brückner V. Elements of Optical Networking: Basics and Practice of Glass Fiber Optical Data Communication. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. 251 p.

8. Dlamini P. P., Isoe G. M., Grattan K. T. V., Rahman A. B. M., Leitch A. W. R., et al. Fibre Bragg Grating Based All Optical OADM for Flexible Spectrum Channel Reservation to Minimize Optical Crosstalk in WDM Optical Communication Networks // *Proceedings of Southern African Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC, 1–4 September 2019, Kwa-Zulu Natal, South Africa)*. Kwa-Zulu Natal, 2019. PP. 138–143.

9. Ma Y., Stewart L., Armstrong J., Clarke I. G., Baxter G. Recent Progress of Wavelength Selective Switch // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. Vol. 39. Iss. 4. PP. 896–903. DOI: 10.1109/JLT.2020.3022375. EDN: IQHYYS

10. Thakulsukanant K. MEMS Technology for Optical Switching // *Walailak Journal of Science and Technology*. 2013. Vol. 10. Iss. 1. PP. 9–18. DOI: 10.2004/wjst.v10i1.390

11. Liu A.-Q. Photonic MEMS Devices: Design, Fabrication and Control. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 483 p.

12. Frisken S., Baxter G., Abakoumov D., Zhou H., Clarke I., et al. Flexible and Grid-less Wavelength Selective Switch using LCOS Technology // *Optical Fiber Communication Conference (OSA, 6–10 March 2011, Los Angeles, USA)*. 2011. DOI: 10.1364/OFC.2011.OTuM3

13. Optical Fiber Telecommunications. Vol. VIA. Components and Subsystems / Ed. by I. Kaminow, T. Li, A. E. Willner. Amsterdam: Academic Press: Elsevier, 2013. 794 p.

14. Wang M., Zong L., Mao L., Marquez A., Ye Y., et al. LCoS SLM Study and Its Application in Wavelength Selective Switch // *Photonics*. 2017. Vol. 4. Iss. 2. Art. 22. DOI: 10.3390/photonics4020022

15. Ji H., Shan Y., Mo Y. Chen Zh., Ma D. Optical Design of an LCoS-Based 1×10 WSS with High Coupling Efficiency and Compact Light Paths // *Photonics*. 2023. Vol. 10. Iss. 10. P. 1107. DOI: 10.3390/photonics10101107. EDN: CZEWMA

16. Handbook of Radio and Optical Networks Convergence / Ed. by T. Kawanishi. Singapore: Springer, 2024. 1723 p. DOI: 10.1007/978-981-97-2282-2

17. Way W. I., Ji P. N., Patel A. N. Wavelength Contention-Free via Optical Bypass within a Colorless and Directionless ROADM [Invited] // *Journal of Optical Communications and Networking*. 2013. Vol. 5. Iss. 10. PP. A220–A229. DOI: 10.1364/JOCN.5.00A220

18. Sakamaki Y., Kawai T., Fukutoku M. Next-generation Optical Switch Technologies for Realizing ROADM with More Flexible Functions // *NTT Technical Review*. 2014. Vol. 12. Iss. 1. PP. 37–41. DOI: 10.53829/ntr201401fa6

19. Jinno M., Sasaki R., Izumi T., Kitada M., Miyamura T., et al. Minimal-Hardware Colorless-Directionless ROADM Based on a Single Multi-Input-Port-WSS with

Joint Switching // Journal of Optical Communications and Networking. 2026. Vol. 18. Iss. 3. PP. 195–205. DOI: 10.1364/jocn.580878. EDN: ELFAEM

20. Skorin-Kapov N., Pavón-Mariño P., Quagliotti M., Riccardi E., Napoli A., et al. A Broadcast-and-Select ROADM Architecture to Support Linear Hub-Ended Trees Using Point-to-Multipoint Coherent Transceivers [Invited] // Journal of Optical Communications and Networking. 2025. Vol. 17. Iss. 7. PP. C1–C10. DOI: 10.1364/JOCN.550101. EDN: OEJPKY

21. Yang R., Liu L., Yan S., Simeonidou D. A Programmable ROADM System for SDM/WDM Networks // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 9. P. 4195. DOI: 10.3390/app11094195. EDN: LZTQMC

22. Yamaguchi K., Ikuma Y., Nakajima M., Suzuki K., Itoh M., et al. $M \times N$ Wavelength Selective Switches Using Beam Splitting by Space Light Modulators // IEEE Photonics Journal. 2016. Vol. 8. Iss. 1. P. 7901708. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2527705.

23. Ikeda K., Suzuki K., Konoike R., Kawashima H. Silicon Photonics Wavelength Selective Switch with Unlimited Free Spectral Range // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38. Iss. 12. PP. 3268–3275. DOI: 10.1109/JLT.2020.2989379. EDN: TDAJWW

24. Fokin V. G., Ibragimov R. Z. Flexible Optical Networks: A Teaching Manual for Universities. St. Petersburg: Lan' Publ., 2022. 252 p. (in Russian)

Information about Authors

Bylina Maria – Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: Bylina.Maria@sut.ru

Shevtsova Alexandra – 3-rd-Year Student of Faculty of Infocommunication Networks and Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: shevtsova.aa@sut.ru