

Научная статья

УДК 621.391.64

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118>

EDN:UMHYVG



Быстрое оптическое переключение: анализ существующих решений и новый метод, обеспечивающий коммутацию сигналов/пакетов в мультисервисных сетях

- Ирина Леонидовна Виноградова^{1,2}, vil-4@mail.ru
- Альберт Ханович Султанов¹, sultanov.ah@mail.ru
- Евгения Юрьевна Головина³ ✉, egolovina82@mail.ru
- Аркадий Михайлович Комиссаров¹, arkadiy_kom@mail.ru
- Павел Евгеньевич Филатов¹, filatov.pe@ugatu.su

¹Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, 450076, Российская Федерация

²Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, 450064, Российская Федерация

³Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате,
Салават, 453250, Российская Федерация

Аннотация

Технологии *beamforming* в 5G / 6G и *fractional lambda switching* невозможны без быстрой (за времена <1 нс) пакетной коммутации. Существующие средства на микрорезонаторах и подобные ориентированы на малофотонные сигналы и не эффективны на традиционных волоконно-оптических линиях по G.703/G.802.3ba. Поэтому **актуальными** являются методы и устройства быстрой коммутации оптических пакетов.

Цель работы: создание нового нереляционного метода быстрой коммутации сигналов / пакетов в полнотью оптических сетях на базе чирпа импульсов. Научной задачей является разработка многопортового интерференционного устройства разделения по длинам волн с малым шагом.

Используемые методы: численное моделирование в пакете HFSS, методы теории вероятностей.

В ходе **решения научной задачи** получена интерференционная картина в рабочей области устройства, спроектировано спектрально избирательное выходное зеркало, и уточнен градиент показателя преломления.

Новизна: предложен метод быстрой оптической коммутации, двухрезонаторное устройство разделения с разработанной структурой выходного зеркала и уточненным показателем преломления.

Практическая значимость: устройство предназначено для пакетных сетей 5G / 6G без буферизации.

Результаты работы интересны при проектировании новых поколений оптических коммутаторов.

Практическая реализация устройства повышает производительность сетей с коммутацией пакетов.

Ключевые слова: волоконно-оптическая коммутация пакетов, двухрезонаторный интерферометр Фабри – Перо, оптический смеситель, градиент показателя преломления, дробное лямбда-коммутация

Финансирование: Работа выполнена в рамках конкурса лидерских проектов УГНТУ 2025 (№ В-17022).

Ссылка для цитирования: Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Головина Е.Ю., Комиссаров А.М., Филатов П.Е. Быстрое оптическое переключение: анализ существующих решений и новый метод, обеспечивающий коммутацию сигналов/пакетов в мультисервисных сетях // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 97–118. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118. EDN:UMHYVG

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118>

EDN:UMHYVG

Fast Optical Switching: Analysis of Existing Solutions and a New Method Ensuring Signal/Packet Switching in Multi-Service Networks

- ▣ Irina L. Vinogradova^{1,2}, vil-4@mail.ru
- ▣ Albert H. Sultanov¹, sultanov.ah@mail.ru
- ▣ Evgeniya Yu. Golovina³ ✉, egolovina82@mail.ru
- ▣ Arkadiy M. Komissarov¹, arkadiy_kom@mail.ru
- ▣ Pavel E. Filatov¹, filatov.pe@ugatu.su

¹Ufa University of Science and Technology,
Ufa, 450076, Russian Federation

²Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, 450064, Russian Federation

³Institute of Oil Refining and Petrochemistry of FSBEU VO "UGNTU" in Salavat,
Salavat, 453250, Russian Federation

Annotation

Beamforming technologies in 5G / 6G and fractional lambda switching are impossible without fast (in times <1 ns) packet switching. Existing microresonator devices and the like are focused on low-photon signals and are not effective on traditional G.703/G.802.3ba fiber-optic lines. Therefore, methods and devices for fast switching of optical packets are relevant.

The purpose of the work: to create a new non-relational method for fast switching of signals / packets in fully optical networks based on chirp pulses. The scientific task is to develop a multi-port interference wavelength separation device with a small step.

Methods used: numerical modeling in the HFSS package, methods of probability theory.

In the course of solving the scientific problem, an interference pattern was obtained in the working area of the device, a spectrally selective output mirror was designed, and the refractive index gradient was refined.

Novelty: a method of fast optical switching, a two-resonator separation device with a developed output mirror structure and a refined refractive index is proposed.

Practical significance: the device is designed for packet 5G / 6G networks without buffering.

The results of the work are interesting when designing new generations of optical switches.

The practical implementation of the device improves the performance of packet-switched networks.

Keywords: fiber optic packet switching, dual-cavity Fabry – Perot interferometer, optical mixer, refractive index gradient, fractional lambda switching

Funding: The work was completed within the framework of the Ufa State Petroleum Technological University leadership projects competition 2025 (No. V-17022).

For citation: Vinogradova I.L., Sultanov A.H., Golovina E.Yu., Komissarov A.M., Filatov P.E. Fast Optical Switching: Analysis of Existing Solutions and a New Method Ensuring Signal/Packet Switching in Multi-Service Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):97–118. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-97-118. EDN:UMHYVG

Введение

В настоящее время справедливо говорить о повышении интереса к оптической коммутации для телекоммуникационных систем. Наряду с расши-

рением областей применения сетевых технологий, ставших уже традиционными: xWDM для уплотнения каналов, λ -коммутации и маршрутизации, полностью оптической обработки сигналов, обес-

печивающих перевод управления на нижние уровни для ускорения работы сетей [1], появляются и новые, не имевшие ранее аналогов, технологии и приложения. В отношении последнего можно привести два характерных примера. Это: 1) технология beamforming в 5G / 6G наряду с использованием оптически управляемых антенных решеток для радиосетей миллиметрового диапазона [2, 3] самого разного назначения, и 2) оптические коммутационные системы в центрах обработки данных (ЦОД) [4].

В первом примере – в связи с увеличением частоты радионесущей снижается ее способность проникновения в городскую инфраструктуру, а значит, согласно [2], это приводит к необходимости использования высоконаправленной радиопередачи и работы с узкими лучами. Что, в свою очередь, требует быстрой динамической перенастройки элементов антенной решетки для корректного поддержания нескольких направленных лучей в системе, например, с MIMO. Причем сказанное актуально как для передающей, так и для принимающей стороны, отслеживающей луч. Если быстроедействие окажется недостаточным, то может иметь место потеря связи в мобильных сетях mmWave UDN (аббр. от англ. Ultra-Dense Networks – сверхплотные сети), которым свойственно динамическое изменение топологии и так называемый сервис «нарезки услуг» (service-aware slicing) [2]. Учитывая критический характер зависимости времени переключения в оптической схеме на формирование радиолуча, в настоящее время разрабатываются даже специализированные алгоритмы управления решателем [5], призванные минимизировать задержку передачи в коммутационной части радиосистемы (fronthaul) для mmWave UDN / C-RAN [6].

Во втором примере с коммутационными схемами ЦОД, по мнению авторов [4], электронным коммутаторам на смену неизбежно должны прийти оптические. Причем требование по быстродействию – до «субволнового времени» на установление соединения, обусловлено необходимостью работать также и в режимах всплесков трафика. Причем указанное требование неуклонно повышается наряду с необходимостью повышения энергоэффективности устройств переключения. Сюда же можно отнести и задачу оптической пакетной коммутации (OBS, аббр. от англ. Optical Burst Switching) как для ЦОД, так и других типов высокоскоростных сетей. В [7] подчеркивается, что эффективное снижение накладных расходов на управление в режиме с OBS может обеспечиваться применением коммутаторов с временами реконфигурации до 1 нс, в то время как на сегодняшний день, в соответствии с [3], ультранизкой задержкой уже считается время в пределах 0,1 мс.

Последнее явно не обеспечивает условие эффективной работы с OBS. Поэтому разрабатываемые оптические схемы коммутации для ЦОД [8] используют существующее оборудование xWDM с устройствами разделения по длинам волн, основанными на циркуляторах и оптоволоконных Брэгговского типа с большой шириной спектра – до нескольких микрометров (рисунок 1). Но даже и такие решения, согласно [8], позволяют повысить эффективность работы ЦОД.

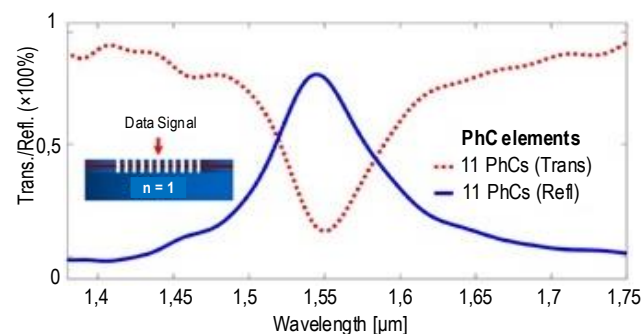


Рис. 1. Пример спектральной характеристики оптического устройства коммутации в ЦОД. Инвертирование спектра (пунктирная и непрерывная линии) связано со спецификой схемотехники коммутации (взято из [8])

Fig. 1. Example of Spectral Characteristics of an Optical Switching Device in a Data Center. Spectrum Inversion (Dotted and Continuous Lines) is Related to the Specifics of the Switching Circuitry (taken from [8])

Анализируя сказанное, можно сделать два характерных заключения. Во-первых, задача разработки высокоскоростных и энергоэффективных оптических переключателей / коммутаторов, управление которыми выполняется также оптическим способом, обладает актуальностью. И самый лучший вариант, если это управление – нереляционное [9], т. е. управляющая информация / воздействие переносится в самом переключаемом потоке / сигнале. Наличие подобных переключателей позволит кардинально изменить саму инфраструктуру высокоскоростных сетей, что значительно превзойдет по итоговой эффективности применение всевозможных вспомогательных средств, таких как ускоряющие коммутационные алгоритмы для решателя, алгоритмы, комбинирующие преобразование длин волн с волоконно-оптическими линиями задержки, протоколы маршрутизации отклонения [4, 5, 7], и подобные средства. И, во-вторых, напрашивается классификация рассматриваемых устройств на коммутаторы оптических потоков (или каналов), к классу которых можно отнести подавляющее большинство применяемых на оптических сетях в настоящее время переключателей, и коммутаторы сигналов (или пакетных сообщений, т. е. пакетов). Очевидно, что быстродействие последних должно быть весьма высоким – время на установление соединения не превышать долей наносекунд, и менее, что обусловлено короткой длительностью пакета / байта / бита в современных сетях.

Краткий обзор известных оптических переключателей / коммутаторов

Над созданием устройств переключения (пере-направления) оптических потоков для волоконно-оптических сетей (ВОС) работы ведутся достаточно давно, и к настоящему моменту уже разработана и серийно изготавливается целая линейка моделей [10]:

– оптические коммутаторы с механически перемещающимся элементом, коммутирующим световой поток от входных оптических портов к выходным; таким коммутирующим элементом может быть поворачиваемый отрезок оптического волновода, призма, зеркала, 3D-микроэлектромеханические переключатели (MEMS, *аббр. от англ. Micro-Electro-Mechanical Systems*) или направленный звездообразный / древовидный разветвитель с переменным коэффициентом связи; для перемещения элемента обычно используют пьезоэлементы или шаговые двигатели; известные модели, как правило, малоактуальны для информационных потоков ВОС за исключением оборудования тестирования и мониторинга, включая – средства служебной связи;

– электрооптические коммутаторы, основанные на изменении коэффициента связи под действием приложенного напряжения за счет электрооптического эффекта, например, в направленном разветвителе, либо в матрице дисплеев на жидких кремниевых кристаллах (LCoS, *аббр. от англ. Liquid Crystal on Silicon*), фокусирующем световой поток на одном из выходных портов устройства; известные модели обеспечивают скорости переключения до 108–109 Гц с низким управляющим напряжением (5–10 В);

– акустооптические коммутаторы, основанные на дифракции света на акустических волнах, представляющих собой фазовую дифракционную решетку неоднородностей показателя преломления, движущуюся со скоростью звука; последняя генерируется, как правило, пьезоэлектрическим устройством в такой акустооптической ячейке; управление достигается тем, что при изменении частоты звуковой волны изменяется и угол отклонения (дифракции) световой волны относительно угла падения;

– термооптические коммутаторы, базирующиеся на изменении коэффициента преломления рабочей среды под действием температуры с последующим анализом фазы проходящего излучения, например, в интерферометре Маха-Цендера (MZI, *аббр. от англ. Mach-Zehnder Interferometer*). Недостатком таких переключателей является относительно высокое энергопотребление и невысокие скорости выхода на режим.

Перечисленные типы моделей так или иначе используются для ВОС, но с точки зрения рассмат-

риваемой задачи их, скорее можно отнести к коммутаторам оптических потоков (некоторое исключение составляют электрооптические), к тому же ни о каком оптическом управлении не может идти речи. Кроме того, они являются реляционными, т. е. требуют отдельно подаваемого (передаваемого) управляющего воздействия. Последнее не только неизбежно будет занимать телекоммуникационный ресурс, но и потребует специализированного устройства (например, преобразователя оптика / электричество если все же передается по оптической сети в виде служебного сигнала), либо, что еще сложнее – специализированного канала передачи.

Близкой технологией к рассматриваемым примерам является построение так называемого оптического (волоконно-оптического) суперканала¹, когда единым чипом (суперканальной линейной картой, далее – СЛК) управляется передача клиентских данных и устанавливаются значения несущих оптических длин волн. С точки зрения линейного сигнала, это совокупность нескольких (порядка 10) очень плотно расположенных оптических каналов (ближе, чем того требует G.694), которые при прохождении по ВОС должны управляться оптическими маршрутизаторами и коммутаторами как единое целое. Предполагается также, что СЛК при реконфигурировании изменяет не какую-либо одну несущую, как это классически свойственно xWDM, а всю совокупность несущих в целом, что значительно упрощает алгоритм и схему управления, а значит – увеличивает и скорость переключения.

Очевидно, что технология суперканала ориентирована на высокоскоростные ВОС и в настоящее время успешно справляется с данной задачей. Но, во-первых, система не является полностью оптической и характеризуется реляционным управлением, и, во-вторых, классифицируется как коммутатор потоков / каналов. Хотя, возможно, по быстродействию СЛК и могла бы обеспечить коммутацию пакетов в городских сетях (категории MAN [8]: xPON, FTTH и подобных), но аппаратно она сугубо для этого не предназначена. К тому же технология СЛК работает при поддержке буферизации¹.

Сказанное выше свидетельствует о назревшей необходимости в разработке оптических устройств, коммутирующих сигналы / пакеты. В связи с чем телекоммуникационными научными группами предлагаются подходы к построению так называемых «быстрых оптических переключателей» [11–15] (Ultrafast All-Optical Switching), по тематике которых уже немало публикаций. Принцип работы устройств,

¹ Основы технологии DWDM // Компания Т8. URL: https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrnx7a89we9in5xc7cf8e8604a1/T8_DWDM_basic_web.pdf (дата обращения 01.07.2025)

в основном, базируется на эффекте изменения связи мод в субволновых решетчатых и фотонно-кристаллических структурах за фемтосекундные времена и даже быстрее. Такие переключатели успешно смогут применяться в квантовых оптических сетях и для внутрочиповых решений, в которых переключение фактически сводится к перенаправлению единственного фотона. Для многофотонных сигналов, свойственных всем видам существующих сегодня ВОС и регламентированных по мощности (согласно G.703 – это 1 мВт), представленные в [11–15] и подобных источниках принципы коммутации вряд ли окажутся применимыми. К тому же подобные схемы могут работать в режиме «включено–выключено», или в лучшем случае – к выбору одного из двух направлений. Следовательно, для построения многопортовых коммутаторов понадобилось бы их каскадное включение (это же касается и многих других моделей, представленных выше), что неизбежно усложнит не только конструкцию, но и управление устройством.

Для наглядного представления описанных выше принципов коммутации они сведены в таблице 1, где использованы сокращения, связанные со спецификой конструкций.

1) Перенаправляющие входной поток / сигнал, исходя из его параметров (длины волны, состояния поляризации и пр.), не меняя собственной структуры и свойств (не перестраиваются – *НП*). Соответственно, являются не реляционными [8], и не требуют дополнительного канала управления. Практически не вносят задержку в сигнал, можно сказать – срабатывают за времена <1 пс.

2) Создают путь для входного сигнала, исходя из дополнительного управляющего воздействия, при этом, как правило, перенастраивают собственную структуру с изменением свойств (*П*). Соответственно, требуют дополнительного телекоммуникационного ресурса для управления; как правило, являются реляционными. Требуют на перестройку значительного времени: от наносекунд до десятков миллисекунд [2, 4].

ТАБЛИЦА 1. Принципы построения оптических коммутаторов / переключателей

TABLE 1. Principles of Designing Optical Switches

Многопортовые (коммутаторы), более 8		Малопортовые (вентили), 2÷4 выхода	
Волоконно-оптические однопролетные	Волоконно-оптические каскадные	На подложке (на чипе)	Волоконно-оптические
Волноводные решетчатые маршрутизаторы на волоконных структурах Брэгговского типа (AWGR, аббр. от англ. Arrayed Waveguide Grating Routers)* – <i>НП</i>		Микрорешетчатые структуры, включая резонансные дифракционные структуры, использующие связанность мод, включая плазменный резонанс – <i>П</i>	
MZI + эффект Поккельса, Керра, термоподогрев – <i>П</i>			
		MZI с нелинейным сдвигом фазы (MZI-PPLN) – <i>П</i>	
Микрокольцевые резонаторы* (MRR [4]) – <i>НП, П</i>		Микрополостные структуры – <i>НП, П</i>	
Акустооптические – <i>П</i>			
Нелинейно-поляризационные структуры – <i>П</i>			
Поворотное зеркало (возможно, + ЖК), MEMS – <i>П</i>			
		С использованием полупроводникового усилителя (SOA) – <i>П</i>	
		Полупроводниковый усилитель со средой на квантовых точках (CD-SOA) – <i>П</i>	
MZI + SOA – <i>П</i>			
Для переключения оптических потоков (не предназначены для быстрой и постоянной перестройки) – целесообразны для систем с коммутацией каналов		Для переключения оптических сигналов (могут оперативно переключаться от одной информационной единицы к другой) – целесообразны для систем с коммутацией пакетов; но в своем большинстве работают с наномощностями и не подходят для использования на традиционных ВОС	

*Как правило, характеризуются широкой спектральной линией ~0,1 нм [4]

С точки зрения разделения устройств по мощности, можно выделить:

1) волоконно-оптические – изготовлены преимущественно с самостоятельным соединением оптических волокон, по типу Y-разветвителей, с

минимальным использованием подложки, смешанных элементов и пр.; имеют миллиметровые / сантиметровые размеры; предназначены для работы со значительными мощностями (сотни мкВт ÷ десятки мВт) переключаемых сигналов, а значит –

могут использоваться в составе традиционных ВОС;

2) на подложке – изготовлены в составе подложки, как правило, не имеют собственных (отдельных от подложки) входов / выходов в виде волоконных пигтейлов; имеют микронные / субмиллиметровые размеры, и менее; предназначены для работы с малыми мощностями: ($nВт \div$ максимум единицы мкВт), вплоть до однофотонных сигналов; не могут использоваться в составе традиционных ВОС, а предназначены для логических схем (ЛС) в составе оптического, радиофотонного устройства, включая – для нанофотоники и квантовых технологий.

Таким образом, согласно представленному обзору, следует различать не только рабочие мощности устройств, но и базовый принцип переключения, основополагающим образом влияющий на быстродействие: перестройка внутренней структуры и связанное с этим изменение пути, и перенаправление, основанное на отличающихся параметрах сигнала. Очевидно, что быстродействие второго варианта многократно выше первого. Если во втором варианте отсутствуют каскадные схемы (наряду с многопортовостью, что важно для определенных задач), то это также повышает быстродействие. К тому же во втором варианте сохраняется нереляционность управления. Ясно также, что наиболее неизменным параметром сигнала (меткой) является длина волны излучения, что и используется в xWDM и GMPLS λ [1], и схемотехнически реализуется устройствами (в том числе – многопортовыми) с AWGR [1, 4, 7].

Следует заметить, что устройства с AWGR характеризуются весьма широкой спектральной линией; это вполне оправдано для магистральных ВОС. Однако, если рассматривать разветвленную оптическую линию с непротяженными сегментами, например, для управления антенной решеткой (АР) в системе Radio-over-Fiber (RoF) [16], то использование спектра по G.694 представляется, с одной стороны, высокорасточительным, а с другой – недостаточно быстро управляемым, даже (гипотетически) с привлечением технологии СЛК. Поэтому для экономии телекоммуникационного ресурса и обеспечения быстрого нереляционного переключения предлагается в качестве сигнальной метки использовать функцию чирпа [17] оптического импульсного сигнала внутри DWDM-канала совместно с узкоспектральным многопортовым волоконно-оптическим устройством разделения. В отличие от квантово-оптических решений, это позволит максимально сохранить существующую инфраструктуру ВОС, а также реализовать коммутацию оптических сигналов / пакетов, передаваемых в соответствии с G.703.

Волоконно-оптическое устройство для быстрого полностью оптического переключения

Узкоспектральное волоконно-оптическое устройство, реализующее метод быстрого полностью оптического переключения, может быть построено на базе двухрезонаторного интерферометра Фабри – Перо (ДИФП), представленного на рисунке 2а. Здесь предполагается, что переключение (перенаправление) сигнала происходит, исходя из его функции чирпа по аналогии с [18], управление которым выполняется на ранее расположенном элементе. Например, это может быть нелинейное специализированное оптоволокно, в котором функция чирпа подстраивается, исходя из мощности оптического сигнала [17]. Как показали ранее выполненные исследования [19], ДИФП обладает несколько большей резкостью интерференционной картины ζ , а значит – и большей разрешающей способностью, в сравнении с классическим интерферометром Фабри – Перо. Указанное свойство обусловлено наличием второго, связанного с первым (основным), резонатора – в виде волоконно-оптической петли обратной связи. Величина $\zeta_{\text{ДИФП}}$ зависит от соотношения мощностей в первом P_1 и во втором P_2 резонаторах. Максимальное значение $\zeta_{\text{ДИФП}}$ достигается, согласно [19], при $P_1/P_2 \sim 2,7 \dots 2,8$. Чтобы ДИФП получился многопортовым, главным образом – с большим количеством выходных световодов, например, для оптического управления АР [16], выходной торец (см. рисунки 2а, 2б) должен быть образован не единственным на выход (учитывая обязательно присутствующие торцы второго волоконного резонатора, образованного дополнительными световодами), а многими световодами. Если все световоды как на входном, так и выходном торце, выставлены в соответствующих единичных плоскостях, после чего отполированы с нанесением отражающего покрытия, то ДИФП получится с плоскими зеркалами. Если же световоды на торце (торцах) собраны со смещением, как показано на рисунках 2б, 2с, то устройство будет спектрально избирательным и может либо вносить чирпирование в сигнал (если световоды второго резонатора также выставлены со смещением и имеют различные длины [20]: например, $l_1 < l_2 < l_3$), либо разделять входной сигнал, исходя из значения мгновенной длины волны $\lambda_{\text{мгн}}$, т.е. функции чирпа $C_\lambda(t)$ [17]. Сам по себе второй резонатор не является высокочастотным, и если $l_1 = l_2 = l_3$, то какой-либо дополнительной задержки в сигнал вноситься не будет, а резонирование будет происходить и для незначительного отличия длин волн.

Очевидно, что ДИФП с гребенчатыми торцами может характеризоваться большей сферой практических приложений, нежели с плоскими. Но в этом случае зеркало интерферометра является

сложным, которое только в самом первом приближении можно рассматривать как конически-наклонное [21] – при малых и близко расположенных ступеньках гребенки. Если ступеньки крупные (порядка λ_0 и более), то зеркало приобретает рельефную фактурную структуру, которая, очевидно, усугубляет разрушение конструктивной интерференции. Для компенсации указанного явления материал смесителя ДИФП предложено изготавливать неоднородным – с градиентом показателя преломления κ , рассчитанным в ранних

исследованиях [20] ($\kappa = \text{grad}(n(r, z))$), как показано на рисунке 2d), обеспечивающим восстановление стройного порядка гребней стоячей волны в смесителе (даже вблизи сложных зеркал) подобно тому, что свойственно ДИФП с плоскими зеркалами. В [22] предложен подход к получению материала неоднородного смесителя – с применением специальным образом обработанного двухфазного ситаллового стекла.

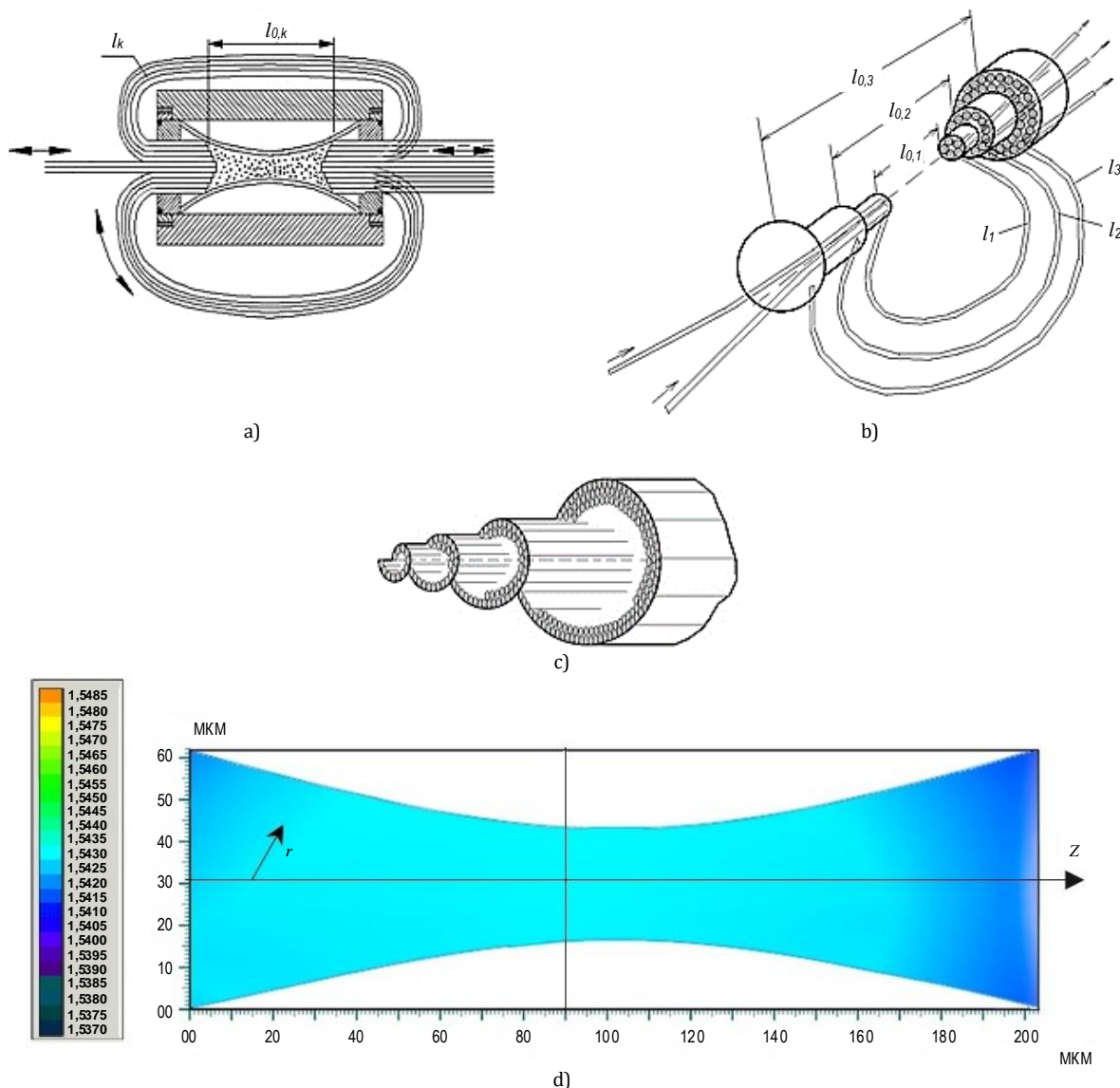


Рис. 2. ДИФП с неплоскими (гребенчатыми) торцами смесителя (а) и его конструктивные элементы: б) ступенчато-гребенчатые торцы с входными, выходными и дополнительными световодами, с) пример спирально-гребенчатого торца; д) градиент показателя преломления смесителя из [20]

Fig. 2. DIFP with Non-Planar (Comb) Mixer Ends (a) and its Design Elements: b) Stepped-Comb Ends with Input, Output and Additional Light Guides Forming the Second Resonator; c) an Example of a Spiral-Comb End; d) the Gradient of the Refractive Index of the Mixer from [20]

Здесь же подробнее остановимся на проектировании световодной гребенчатой структуры (гребенки), составляющей основу зеркал (зеркала) ДИФП, обеспечивающей, с одной стороны, эффективное разделение по выходным световодам chirпированного оптического сигнала в диапазоне 0,001...0,01 нм (таблица 2), с другой стороны – вносящей наименьшие искажения в интерференцию.

Последнее обеспечит необходимость в меньшем значении κ , что будет способствовать удешевлению устройства. Так как аналитически расчет параметров гребенчатого торца вряд ли можно выполнить эффективно, т. е. с получением сходящегося решения и точностью, составляющей хотя бы порядок точности входных данных, то целесообразно воспользоваться моделирующим пакетом.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение диапазонов длин волн для использования chirпированного сигнала в RoF-сети

TABLE 2. Comparison of Wavelength Ranges for Using a Chirped Signal in a RoF Network

№ п/п	Возможное значение, нм, $C_{\lambda, \max} = \Delta\lambda_{\max}$ (вблизи $\lambda_0 = 1550$ нм)	Соответствующая отстройка радиочастоты для схемы [17]	Специфика	Используем/ не используем
1	1	125 ГГц	$\Delta\lambda$ является отдельным λ -каналом в xWDM (по G.957 ширина спектральной линии Δ не должна превышать: $\Delta = 0,5$ нм для STM-16; 0,1 нм для STM-64+CWDM и 0,08 нм для STM-64+DWDM)	-
2	0,5	62,5 ГГц		
3	0,05	6,25 ГГц		
4	0,005	625 МГц	$\Delta\lambda$ не является отдельным λ -каналом в xWDM; при этом возможна работа радиоканала – с компенсатором дрейфа несущей (например, см. [23])	✓
5	$0,0005 = 5 \cdot 10^{-4}$	62,5 МГц	существенное повышение сложности изготовления и стоимости устройства	-

Здесь следует сделать пояснение: аналитический расчет амплитуды (электрической напряженности поля световой волны) \vec{E} в рамках метода, базирующегося на приближении медленно изменяющейся амплитуде [17], предполагающего отбрасывание вторых производных от E как по координатам ($\partial^2 E / \partial r^2 \approx 0, \partial^2 E / \partial z^2 \approx 0$), так и по времени ($\partial^2 E / \partial t^2 \approx 0$), хорошо работающий для протяженной световодной структуры, вряд ли позволит получить приемлемую точность решения в рассматриваемой задаче. Аналитическое интегрирование уравнений второго порядка («в лоб») в граничных условиях, соответствующих конструкции, показанной на рисунке 2а, также не представляется возможным, в то время как численное интегрирование и является основой функционирования большинства соответствующих компьютерных пакетов. В данном случае был выбран пакет HFSS, позволяющий задавать как сложные конфигурации (с загрузкой чертежа из пакета AutoCAD), так и неоднородные области с требуемым градиентом, с возможностью последующей оптимизации конструкции (в том числе – и при решении обратной задачи).

Из-за того, что пакет HFSS ориентирован на моделирование СВЧ-систем (базируется на методе конечных элементов (FEM, аббр. от англ. Finite Element Method), то для применения его к оптической структуре (в основу многих специализированных пакетов: Lumerical, COMSOL, MEEP, Tidy3D и подобных, заложен метод конечных разностей во

временной области (FDTD, аббр. от англ. Finite Difference Time Domain)) сначала было выполнено сравнение результатов счета первого прогона с адаптивной сеткой в реперных точках с полученными ранее аналитическими результатами [16]. Результат сравнения удовлетворил авторов. Размеры конструкции задавались, исходя из пропорционального пересчета, что обосновывается линейностью явления интерференции. Так, показатель преломления n задавался через диэлектрическую проницаемость как $n \cong \sqrt{\epsilon}$ при $\mu = 1$; зеркала обозначались как объекты с электропроводностью σ : для оптического коэффициента отражения $\rho = 1$ коэффициент σ задавался равным 0,098 См/м, что свойственно для железа; для $\rho = 0,9$ задавалось $\sigma = 0,075$ См/м (подобно GaAs-м структурам), и так далее. Частота входного поля в расчетах была выбрана равной 30 ГГц, т. е. с $\lambda_{\text{вх}} = 1$ см. Если в ВОС обычно $\lambda_0 = 1550$ нм, то коэффициент пересчета получился равным: $K = 6452$.

Необходимо все же сделать оговорку об источнике неспецифичности HFSS для оптических расчетов в сравнении с перечисленными выше специализированными средствами. Если моделировать оптические процессы напрямую, т. е. задавать длину волны оптического диапазона, то и шаг сетки следует устанавливать достаточно малым. При этом заложенный в основу HFSS FEM, в отличие от FDTD, на мелкой сетке становится более громоздким ввиду значительного увеличения количества элементов (<http://www.cadferm-cis.ru/products/ansys/>

[simulation/electromagnetics/hfss](#)). Этого не происходит в FDTD, а значит, при достижении той же точности модель HFSS потребует больших вычислительных мощностей и объема оперативной памяти, которых, как правило, все же не хватает исследователям. Поэтому в рассматриваемом случае следует искать компромисс между точностью решения, временем на вычисления и ресурсами, необходимыми для его реализации, исходя из физических процессов в задаче. Если же безотносительно к последним добиваться сколь угодно уменьшения шага, осознанно допуская увеличение объема вычислений, то можно столкнуться не с увеличением, а даже с уменьшением итоговой точности результатов, не говоря уже о сложности

получения стабильных решений. Так, в [24] показано, что у погрешности вычислений имеется минимум при небольшом количестве (вообще, порядка 3...4 во многих технических задачах) знаков после запятой, и с увеличением последних точность снижается.

Компьютерное моделирование проводилось следующим образом. Сначала было рассчитано поле (стоячая волна) в резонаторе – смесителе ДИФП, обладающем плоскими зеркалами (рисунок 3) с последующей выгрузкой данных в отдельный вспомогательный файл. Поле характеризуется параллельно расположенными гребнями волны, свидетельствующими о наличии конструктивной интерференции.

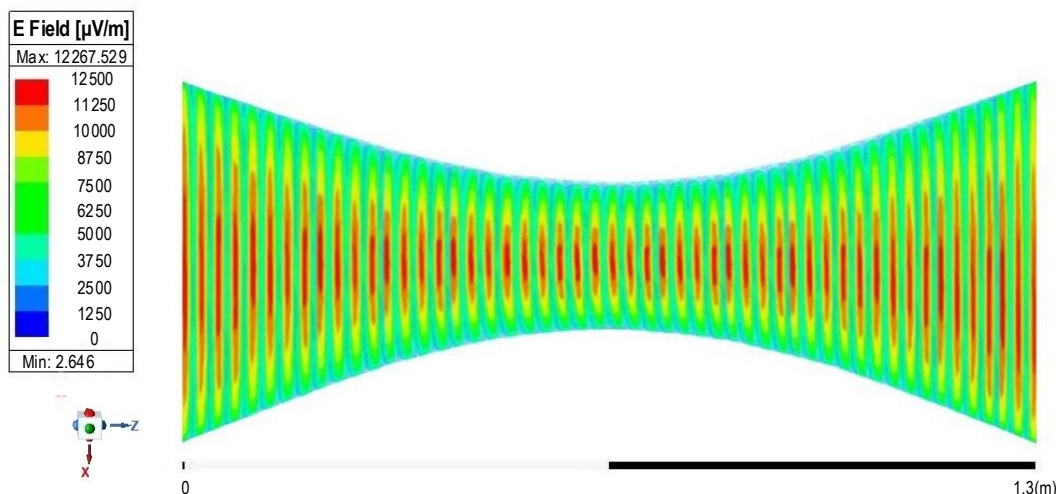


Рис. 3. Стоячая волна в смесителе ДИФП с плоскими зеркалами: показаны 1 через 8 для наглядности, коэффициент отражения зеркал $\rho = 0,85$ (пояснения см. далее)

Fig. 3. Standing Wave in a DIFP Mixer with Flat Mirrors: Characterized by Parallel Wave Crests: Shown 1 Through 8 for Clarity, Reflection Coefficient of the Mirrors $\rho = 0,85$ (See Below for Explanations)

Затем в режиме решения обратной задачи полученное поле заводилось в другой файл – с конструкцией ДИФП, содержащей гребенчатое выходное зеркало, и рассматривалось как желаемый результат, т. е. задавалось на первом шаге итерации. Все расчеты проводились только для одного (выходного) гребенчатого зеркала, другое (входное) оставалось плоским. В случае, если выставить оба зеркала гребенчатыми, то не удастся получить сходящегося решения ни при каком k . Далее в программе запускался процесс параметризации (выявление наиболее значимых параметров искомой структуры – световодной гребенки), а уже затем – процесс оптимизации по найденным параметрам. При оптимизации задавался критерий θ минимального отличия ширины получаемых гребней стоячей волны h относительно изначальной их ширины h_0 , соответствующей случаю плоских зеркал (рисунок 3), т. е. $\theta = \min|h - h_0|$. Величина h , как известно [21], определяет резкость интерфе-

ренционной картины, которую и требовалось по возможности сохранить для ДИФП со сложным зеркалом. Кроме того, при моделировании ДИФП со сложным зеркалом отслеживался порядок следования гребней стоячей волны (не допускалось их соединение или расщепление), возможен был только некоторый изгиб – в соответствии с изогнутостью зеркала.

Моделирование проводилось только в виде линейной задачи, так как ориентировочно предполагалась работа устройства в линейном режиме. Кроме того, HFSS непосредственно решает лишь линейные уравнения Максвелла, и тем самым не предназначен для моделирования нелинейных процессов.

Хотя, в случае широкого применения ДИФП-разделителя для перенаправления самых разных оптических сигналов, включая служебные, вполне могут возникать различные оптические нелиней-

ности, например, такие как SPM или XPM. Причем, если обратиться к [17], то нелинейности могут происходить как по причине повышенной мощности, так и в связи с короткой длительностью импульса, оба эти варианта принципиально возможны – если не в настоящее время, то в некоторой перспективе. Поэтому изучить влияние нелинейностей на установление интерференционной картины представляется целесообразным в дальнейших исследованиях – либо с применением специализированных пакетов, либо, в первом приближении, с уже опробованным инструментом HFSS, но с добавлением специальных решателей. Так, в частности, решатель Discontinuous Galerkin Time Domain (DGTD), построенный на методе Галеркина (<http://www.cadferm-cis.ru/products/ansys/simulation/electromagnetics/hfss>) и реализующий дополнение HFSS-Transient, обеспечивает решение задач электродинамики в нестационарной постановке, с возбуждением во временной области и анализом переходных процессов. Дополненный пакет HFSS-Transient предназначен для задач импульсной локализации, анализа переходных процессов на СВЧ и High-Speed пассивных узлах [25], и даже позволяет моделировать процессы разрядов и ударов молний. Решатель Electromagnetic Interference Tool (EMIT) тоже может быть полезен в нелинейных задачах – позволяет рассчитывать радиочастотные взаимодействия через динамическую связь с основным решателем HFSS (<http://www.cadferm-cis.ru/products/ansys/simulation/electromagnetics/hfss>) [25], и тем самым позволяет учитывать эффекты нелинейных компонентов системы.

Рассматривались световодные гребенки двух видов – ступенчатая и спиральная (см. рисунки 2b, 2c), в последней предполагалось размещение световодов без их ступенчатого смещения, но с полированием световодных торцов под углом $< 90^\circ$ к оси световода. Это позволяло снизить потери на рассеяние в интерференционной картине, так как фактически имело место плоское наклонное зеркало в каждой точке без ребристости структуры, что увеличивало ее резкость при аналогичных параметрах по сравнению со случаем ступенчатой гребенки, а значит – позволяло уменьшить k . Проектирование гребенки выполнялось следующим образом: сначала находилась ее общая форма (рисунок 4), обеспечивающая наименьшее искажение интерференционной картины, в том числе – и при изменении длины волны в выбранном диапазоне. В процессе моделирования выполнялось также и небольшое варьирование показателя преломления вблизи данного зеркала, что позволило получить уточненное k^* по отношению к [20], также способствующее минимизации ϑ .

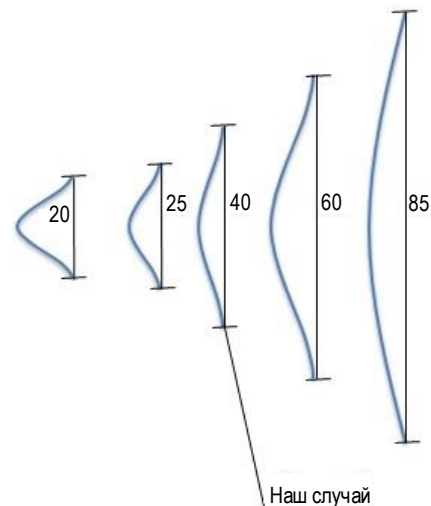


Рис. 4. Найденные формы для выпукло-изогнутого гребенчатого зеркала ДИФП для различных его диаметров
Fig. 4. Found Shapes for the Convex-Curved Comb Mirror of the DIFP for Its Various Diameters

Значимые параметры (см. рисунок 4), выявленные при параметризации в HFSS:

- 1) градиент показателя преломления вблизи зеркала;
- 2) длина и ширина выступающей узкой части («носика») по отношению к диаметру основания;
- 3) соотношение длины «носика» и общей высоты выпуклости также с учетом диаметра.

В расчетах предполагалось, что шероховатость (ребристость) зеркала отсутствует. Установлено также, что коэффициент отражения зеркал в пределах $\rho = 0,85...0,95$ (задаваемый в HFSS через σ) слабо влиял на результат.

Также было установлено, что такое зеркало должно содержать характерный перегиб: с увеличением диаметра точка перегиба удаляется от оси, а сам перегиб уменьшался вплоть до его исчезновения. Для малых диаметров, наоборот, перегиб становится более выраженным, а «носик» – более вытянутым (см. рисунок 4). При этом для различных диаметров такое изогнутое зеркало должно содержать плоский (хотя бы небольшой) «торец носика». Для пропорционального (по отношению к [20] смесителя (см. рисунок 2a), т. е. с длиной 1,3 м при расчетах в HFSS) его диаметр в области выходного торца должен составлять $\sim 38,7$ см для $\lambda_{\text{вх}} = 1$ см.

Затем для найденных – формы выпукло-изогнутого зеркала и k^* вновь выполнялось построение интерференционной картины – гребней стоячей волны (рисунок 5). Был получен следующий результат: вблизи сложного зеркала гребни соответствующим образом также претерпевают изгиб, некоторое расширение (увеличивается h), усугубляющееся к основанию зеркала (т. е. для больших r) вплоть до полного их пропадания, и расщепление.

Последнее проявлялось значительно также для больших r и становилось заметным для ρ свыше 0,9. В расчетах было принято $\lambda_1 = 1$ см, что соответствует оптической $\lambda_0 \cong 1,5499$ мкм, и $\lambda_2 = 1,01$ см, что соответствует $\lambda_0 \cong 1,5654$ мкм; $\rho = 0,85$. В примере для наглядности λ_1 существенно отличается от λ_2 , чем требуется в задаче.

Изменение длины волны несколько меняло картину: для более коротких волн эффект оказывался выраженным сильнее, чем для более длинных. Поэтому далее с целью уменьшения наблюдаемого, вновь выполнялся подбор κ (варьированием только вблизи сложного зеркала, не далее 20 λ от «носика», чтобы не увеличивать чрезмерно время счета). Так был получен итоговый

градиент показателя преломления κ^{**} , обеспечивающий наименьшее разрушение интерференционной картины в рассматриваемой конфигурации. Он получился, в отличие от представленного на рисунке 2d, несколько уменьшающимся к самому зеркалу. Но даже и при последующем установлении κ^{**} описанное выше влияние длины волны сохранялось. Поэтому в отношении структуры световодной гребенки был сделан следующий вывод: для выведения (выделения) сигнала на коротких волнах необходимо выполнять резонирование с гребенчатой структурой интерферометра у самого ее «носика», так как дальше к ее основе интерференционная картина уже разрушается.

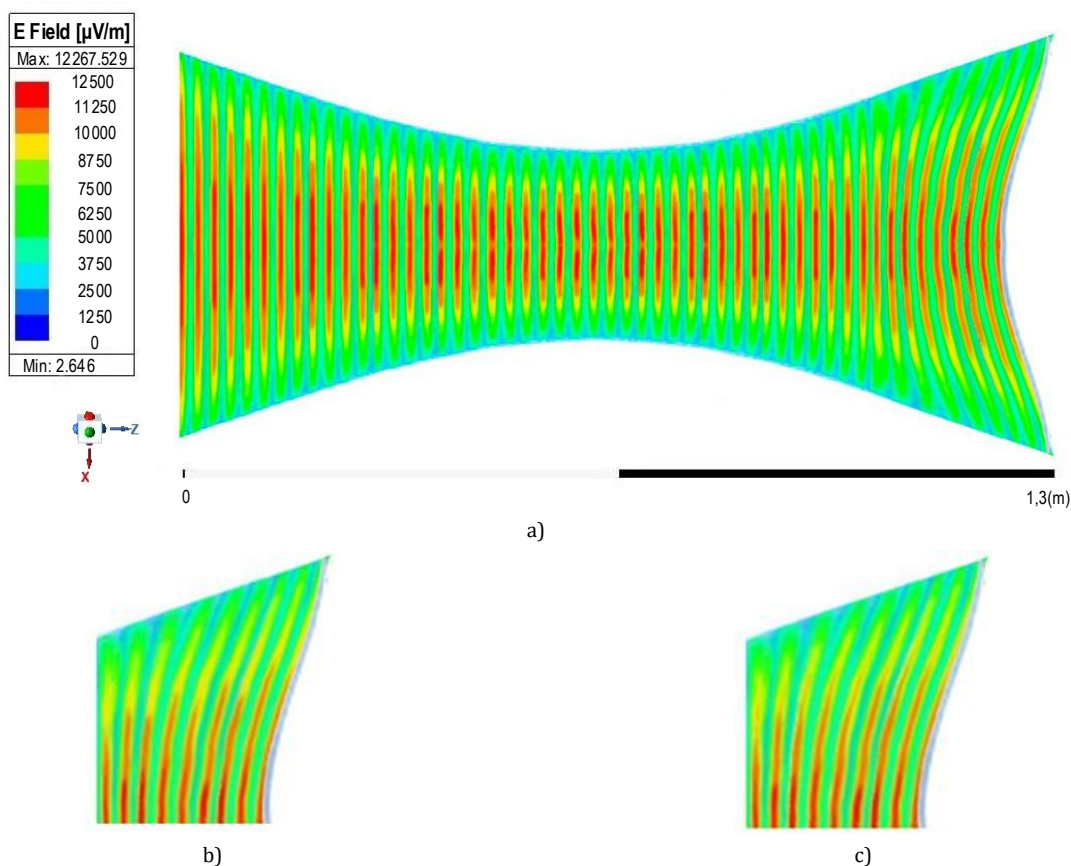


Рис. 5. Стоячая волна в смесителе ДИФП с выходным оптимизированным сложным зеркалом (а), характеризуется изогнутыми гребнями стоячей волны вблизи сложного зеркала: б) для меньших длин волн

Fig. 5. The Standing Wave in the DIFP Mixer with an Optimized Complex Mirror Output (a), is Characterized by Curved Crests of the Standing Wave Near the Complex Mirror: for Shorter (b) and Longer (c) Wavelengths

Для несколько более длинных волн интерференционная картина имеет стройный вид не только около «носика», но и немного дальше, т. е. продолжает сохраняться с ростом r . С еще большим увеличением длины волны процесс сохранения стройности интерференционной картины к основанию сложного зеркала продолжается. Откуда

ясно, что проектирование гребенки необходимо выполнять, исходя из следующего:

– выходные торцы световодов для отведения более коротких волн из ДИФП должны устанавливаться ближе к «носика» гребенки (ступенька 1 на рисунке б; каждая ступенька содержит несколько ярусов световодных торцов, образующих концен-

трические кольца относительно оси устройства);

- выходные световоды, отводящие более длинные волны (далее от «носика» к основанию гребенки – ступенька 2);
- еще более длинные волны (еще дальше к основанию – ступенька 3);
- размещение торцов дополнительных световодов (образующих второй резонатор), обеспечивающих разделение мощностей в приведенном выше соотношении ($P_1 / P_2 \sim 2,7...2,8$), из которого пропорциональным пересчетом можно получить, что дополнительных световодов суммарно должно быть примерно в 2 раза больше, чем выходных с каждой ступеньки для $\rho = 0,85$; при изменении ρ эта пропорция, очевидно, меняется.

На рисунке 6 представлена схема объединения выходных и дополнительных световодов в гребенчатую структуру, соответствующая представленным соображениям.

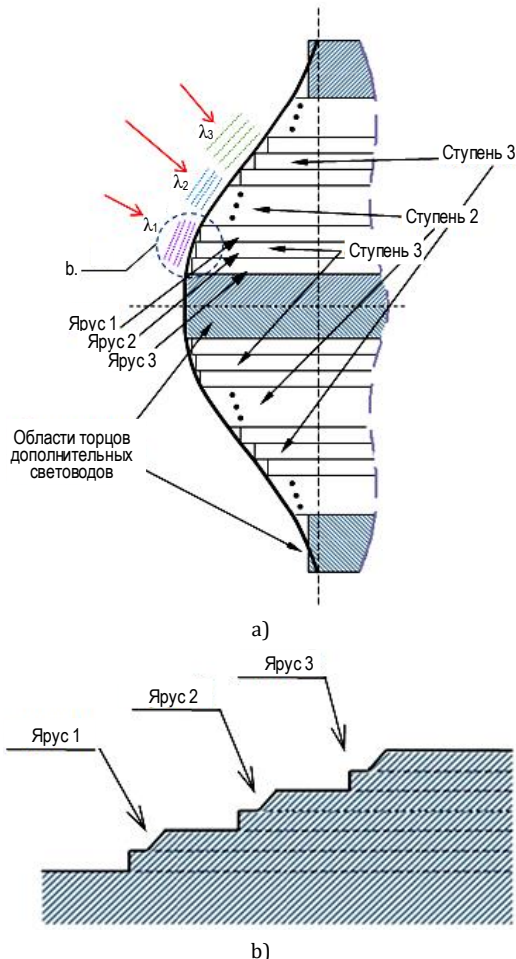


Рис. 6. Предложенный принцип построения ступенчатой световодной гребенки: а) общий вид (сбоку) и б) пример ступенчато-скошенной сборки первой ступени, состоящей из трех двухслойных ярусов световодов (световодных торцов)

Fig. 6. The Proposed Principle of Constructing a Stepped Light Guide Comb: a) General View (Side View) and b) an Example of a Stepped-Beveled Assembly of the First Stage, Consisting of Three Two-Layer Tiers of Light Guides (Light Guide Ends)

Нетрудно установить, что если собирать гребенку из 3-х многоярусных ступенек, ориентированных на определенные длины волн, то соотношение суммарного количества выходных световодов к количеству дополнительных световодов окажется в пропорции как $\sim 1,665/1$. Если с каждой ступеньки отводить по 30...50 шт. световодов, то во второй резонатор потребуется порядка 100 шт. Их предлагается размещать на самом «носике» гребенки и около ее основания, так как в данной задаче не требуется получения спектральной избирательности второго резонатора. Каждая ступенька (в случае ступенчатой структуры гребенки), как уже упоминалось выше, образована несколькими ярусами с характерным смещением d , зависящим от выводимой длины волны данной ступенькой (определяется расстоянием между гребнями стоячей волны и будет обсуждаться далее).

Каждый ярус может состоять из нескольких слоев, и ввиду того, что гребни стоячей волны являются наклонными к оси устройства в области торцов выходных световодов, то предложено полировку указанных торцов в ярусах также выполнить под углом $< 90^\circ$ к оси устройства (по аналогии со спиральным способом размещения, т. е. со скошенностью) – в соответствии с расположением стоячей волны в данной области. Скошенность торцов обеспечивает их квазипараллельность к фронтам стоячей волны. Сдвиг на первой ступеньке d_1 соответствует резонансу с λ_1 (представлен для наглядности не в масштабе). Угол скошенности зависит от расположения торца данного световода на гребенке, т. е. от удаленности его от оси устройства; $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$.

Для построения устройства целесообразно использовать световоды уменьшенного диаметра (4 мкм [26]) также с уменьшенным (сточенным) диаметром оболочки. Либо вообще изделие-гребенку выполнять не в виде волоконной сборки, а в виде цельнолитого изделия (например, литографическим способом [27]), а световоды приклеивать уже затем к его основанию.

Ступенчатая гребенка, по мнению авторов, лучше спиральной ввиду того, что выведение заданных длин волн выполняется установленным, предсказуемым образом. В то время как спиральная гребенка, согласно результатам моделирования, хотя и обеспечивает несколько меньшие потери, но выводит длины волн хаотично по выходным световодам. Из-за чего трудно спроектировать устройство, распределяющее заданные длины волн из chirпированного сигнала, например, на заданные элементы фазированной антенной решетки (ФАР) [18]. Кроме того, ступенчатая гребенка обеспечивает большую мощность выведенного сигнала на заданной длине волны. Поэтому

окончательно решено остановиться на ступенчато-скошенной конструкции гребенки (см. рисунок 6), взяв достоинства как спирального, так и ступенчатого вариантов построения.

Представленные результаты получены без учета потерь излучения, которые укрупненно можно разделить на две категории: потери, связанные со свойствами материалов, в основном определяющие километрическое затухание в линии, и условные потери, связанные с ненулевой постоянной составляющей интерференционной картины. В первом случае – это потери у оптических материалов, и в настоящее время они, как правило, невелики, к тому же устройство имеет все же весьма ограниченный размер. Вторым случаем более интересен и непосредственно связан с конструкцией. Для оценки таковых рассмотрим соотношение:

$$\xi = \left(\frac{E_c}{E_p} \right) 100 \%,$$

где E_c представляет амплитуду в минимуме (по расчетам на рисунке 5 – ~2700 мкВ/м); E_p – на вершине интерференционного пика ~12500 мкВ/м.

Следовательно, $\xi_{0,85} \cong 20...22 \%$ для $\rho = 0,85$. Однако с ростом ρ величина ξ заметно снижается: для $\rho = 0,9$ получается $\xi_{0,9} \cong 14...16 \%$; далее – $\xi_{0,95} \cong 7...8 \%$, и $\xi_{0,98} \cong 3...4 \%$. Но безусловный выбор высоких коэффициентов отражения авторы не считают целесообразным, так как чем выше ρ , тем конструкция получится дороже, и значительнее скажутся погрешности и неувязки изготовления. Выбор $\rho = 0,85$ для проведения настоящих расчетов обусловлен анализом ранних исследований [19], но задача оптимизации ρ представляется значимой и является предметом отдельного исследования.

Можно сказать, что описанное здесь устройство: волоконно-оптический ДИФП с профилированным смесителем и оптимизированной многопортовой световодной гребенкой на выходном зеркале – является нереляционным переключателем оптических сигналов (чирпированных импульсов), либо – пакетов, когда функция чирпа $C_\lambda(t)$ меняется не в пределах одного импульса (например: $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2 \rightarrow \lambda_3$), либо от импульса к импульсу, а в пределах их группы [18]. Если к выходам ДИФП подключены радиоизлучатели, например, многолучевой ФАР, то устройство позволяет выполнять коммутацию пакетов на различные радиолучи, которые могут обслуживать различные подсети (VLANы [18]).

Данное устройство авторы относят к классу волоконно-оптических многопортовых и одновременно – быстрых оптических переключателей ввиду того, что вариация $C_\lambda(t)$, например, в волоконно-оптическом сегменте RoF, может выполняться изменением мощности импульса в свето-

водном элементе с повышенной нелинейностью, что реализуется аналоговыми средствами за времена ~0,01 нс и даже быстрее [17]. Количество выходных портов зависит от размера смесителя и структуры выходного зеркала ДИФП, и может составлять порядка 50...100 и более. Описанный метод не требует буферизации, и это также добавляет ему привлекательности. Но в отличие от решений Ultrafast All-Optical Switching [11–15], представленная схема призвана коммутировать сигналы традиционных многофотонных ВОС, работающих по G.703.

О практическом применении полностью оптического переключателя

Описанное выше многопортовое интерференционное устройство может применяться для узко-спектрального разделения составляющих сигнала в зависимости от значения их мгновенной длины волны $\lambda_{\text{мгн}}$. Отсюда понятно, что одним из основополагающих параметров является его разрешающая способность $\theta = \lambda_0 / \delta\lambda$. Но если для классического интерферометра Фабри – Перо с порядком интерференции m величина $\theta_{\text{ИПФ}}$ однозначно определяется коэффициентом отражения зеркал ρ [21]:

$$\theta_{\text{ИПФ}} = \pi m \frac{\sqrt{\rho}}{(1 - \rho)}, \tag{1}$$

что находится из аналитической передаточной функции интерферометра Фабри – Перо, то для рассматриваемого ДИФП величина $\theta_{\text{ДИФП}}$ аналитически получена быть не может – ввиду отсутствия аналитической передаточной функции устройства, обладающего к тому же градиентом показателя преломления k . Поэтому проведем оценку $\theta_{\text{ДИФП}}$ по аналогии с $\theta_{\text{ИПФ}}$ и исходя из параметров вычисленной в программе HFSS картины поля (см. рисунок 5).

Так, в интерферометре Фабри – Перо, согласно [21], ширина интерференционной полосы по уровню половинной интенсивности резонанса (рисунок 7), выраженная в долях разности фаз δ , имеет вид:

$$\Delta\delta = \frac{(1 - \rho)}{\sqrt{\rho}}. \tag{2}$$

Если рассматривать ширину интерференционной полосы как: $h = |z_1 - z_2|$ (см. рисунок 7), то $\Delta\delta(z) = \frac{4\pi n h}{\lambda_0}$, и после подстановки в (1) получаем минимально разрешаемую ширину линии $\delta\lambda$:

$$\delta\lambda \cong \frac{4n}{m} \cdot |z_1 - z_2|. \tag{3}$$

Учитывая, что рассматриваемый ДИФП обладает градиентом показателя преломления, то окончательно для минимально разрешаемой ширины линии можно записать:

$$\delta\lambda \cong \frac{4}{m} \cdot |n(z_1) \cdot z_1 - n(z_2) \cdot z_2|. \quad (4)$$

Если порядок интерференционной картины ДИФП m в области световодной гребенки составляет ~ 400 для коэффициента отражения зеркал 0,85 (см. рисунок 5), то с учетом найденного κ^{**} и рассчитанного значения ширины интерференционной полосы в области торцов выходных световодов, пересчитанной затем с коэффициентом K для оптического случая (составляет порядка 0,04 мкм с небольшой вариацией от r в третьем знаке, т. е. в зависимости от удаленности световодного торца от носика гребенки), получаем: $\delta\lambda_{\text{опт}} \cong 1,6 \cdot 10^{-5}$ нм, что можно считать достаточным для выбранного диапазона chirпирования (см. таблицу 2). Здесь следует обратить внимание на то, что в расчетах предполагалось отсутствие рельефности на зеркалах ДИФП. При наличии по-

следней $\delta\lambda_{\text{опт}}$ окажется больше. Но учитывая, что на функционирование устройства влияет не только его абсолютная разрешающая способность, а также и конструкция выходной части – световодной гребенки со ступенчатой структурой, предложено функцию chirпа использовать тоже ступенчатого вида. В частности, если $\Delta\lambda_{\text{max}} = 0,005$ нм, то для 3-ступенчатой гребенки целесообразно взять: $\Delta\lambda_1 = 0$, что означает передачу сигнала на несущей и $\lambda_1 = \lambda_0$; $\Delta\lambda_2 = 0,0025$ нм и $\lambda_2 = \lambda_0 + \Delta\lambda_2$; и $\Delta\lambda_3 = 0,005$ нм и $\lambda_3 = \lambda_0 + \Delta\lambda_3$. Как видно из (4), устройство вполне позволит выполнить разрешение указанных длин волн. В отношении самой гребенки, т. е. смещения световодных ярусов: d_1 для первой ступеньки (см. рисунок 6), соответственно: d_2 и d_3 для второй и третьей ступенек, их следует рассчитывать исходя из условия попадания максимумов стоячей волны на соответствующие ярусы (см. рисунок 7).

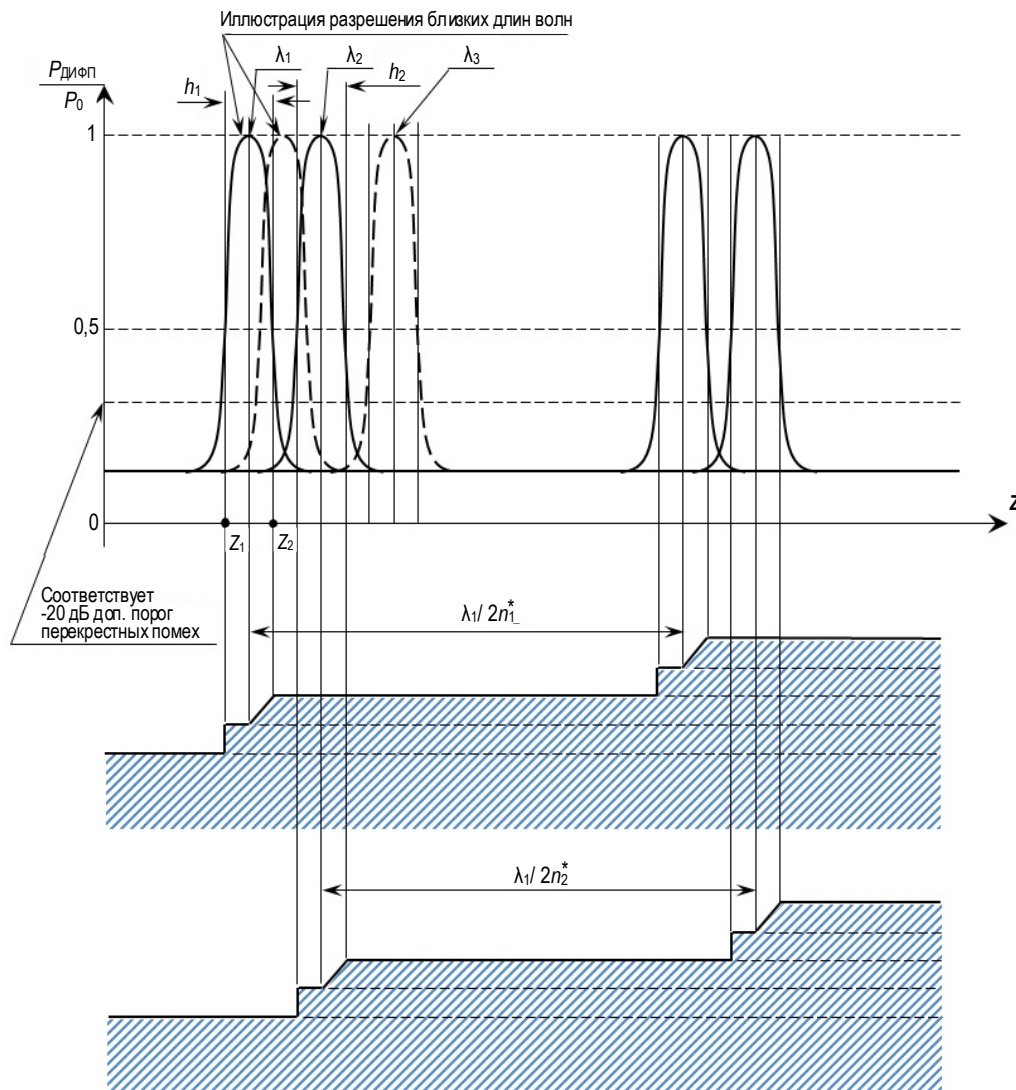


Рис. 7. Принцип выделения устройством интерференционных максимумов на длинах волн λ_1 и λ_2 различными ступеньками световодной гребенки (с шагом между ярусами $\lambda_1/2n_1^*$ и $\lambda_2/2n_2^*$, соответственно)

Fig. 7. The Principle of Selection by the Device of Interference Maxima at Wavelengths λ_1 and λ_2 by Different Steps of the Light Guide Comb (with a Step between the Tiers $\lambda_1/2n_1^*$ and $\lambda_2/2n_2^*$)

На рисунке 7 величины h_1 и h_2 определяют ширину интерференционных максимумов по [21]); n_1^* и n_2^* – значения показателей преломления в области торцов данных ярусов. Согласно [19], резонансный спектр ДИФП отличается от аналогичного для интерферометра Фабри – Перо более крутым спаданием максимумов при той же ширине интерференционной полосы. Кроме того, ДИФП свойственна слабая зависимость контрастности с ростом ρ для $\rho \geq 0,85$, приводящая последнюю фактически к наклонно-асимптотическому виду в отличие от интерферометра Фабри – Перо, для которого контрастность продолжает увеличиваться вплоть до предела $\rho = 1$, что, по-видимому, связано с наличием второго не высокочастотного резонатора. При выборе конкретных значений λ_1 и λ_2 (в таблице 2 приведены оценочные величины), следует учитывать нормы на перекрестные помехи (Cross-talk) в ВОС в соответствии с G.709, G.984.2, согласно которым при изменении от значений λ_1 к λ_2 интерференционные максимумы должны перекрываться менее, чем на –20 дБ.

Из-за того, что световодные ярусы имеют ненулевую толщину из-за сточенности (скошенности, см. рисунок 6), особо узкой интерференционной линии добиваться и не следует. Более важным является точность установки ярусов с учетом незначительного отличия λ_1 , λ_2 и λ_3 . Но задача выполнения световодной сборки с допустимой абсолютной субнанометровой погрешностью успешно решена в [28], где описана лабораторная (малосерийная) методика изготовления подобных компонентов Российской научной группой. Можно также воспользоваться и методикой [27], выполняя гребенку в виде единого дополнительного изделия. Для снижения сложности изготовления конструкции устройства в последствии следует ориентироваться не на традиционные технологии сборки, ставшие уже классическими для волоконно-оптических изделий, а, скорее всего, привлекать нанометровые техпроцессы, которые самым активным образом развиваются сегодня как в электронике [29], так и в оптике ([https://www.photonics.com/Articles/Nano-Optics Technology Optical Alchemy/a25513](https://www.photonics.com/Articles/Nano-Optics%20Technology%20Optical%20Alchemy/a25513)), и уже выходят на уровень серийных производств. Одним из сложных элементов ДИФП, несомненно, является градиентный смеситель, который авторы, как один из возможных вариантов, предлагают выполнять из наноструктурного ситаллового стекла [22]. Но необходимо заметить, что такой подход вряд ли может подойти для серийных изделий, так как весьма непростой задачей является выбор подходящей области заготовки – с требуемыми размерами и градиентом n . В работе [22] авторы стремились экспериментально изучить возможность получения подобных градиентов оптически прозрачных тел, исходя из до-

ступных технических средств и материалов. Существуют и иные подходы к решению данной задачи – например, с привлечением технологии квантовых точек. Последние, как показано в [30], определяют макроскопическую диэлектрическую проницаемость ϵ , а с ней – и значение n , и, кроме того, обеспечивают плановость свойств, что допускает применение метода для серийного производства. Причем указанное может реализовываться на аморфном материале, обладающем, как правило, меньшими погонными потерями в сравнении с кристаллитным ситаллом. Другие оптические свойства, такие как километрическое затухание и линейная составляющая усредненного показателя преломления (n_0) вблизи телекоммуникационных длин волн, следует подбирать (проектировать) близкими к параметрам оптического волокна (ОВ) (например, по G.652, как наиболее распространенного в эксплуатации на сегодня в России).

Здесь еще раз обратим внимание, что результаты расчета поля в смесителе ДИФП, заложенные в основу последующих количественных оценок, получены с применением неспециализированного программного пакета, который, кстати, не позволяет напрямую задавать оптические параметры – их приходится вычислять через СВЧ-характеристики. Последний был выбран ввиду значительного разнообразия функциональных средств, необходимых для моделирования в рассматриваемой задаче. Поэтому полученные результаты правильнее было бы считать лишь приближенными, а в случае необходимости их уточнения – структуры поля вблизи выходного торца смесителя и подобных, что значительно влияет на последующее конструирование компонентов (целесообразность и расчет углов скошенности световодных торцов на ярусах гребенки, количество и структуру ярусов, и прочее) следует проводить с более подходящим программным средством, что можно считать направлением дальнейших исследований. Скорее всего это позволит определиться и с наибольшим возможным количеством ступенек гребенки (по оценке их может быть не более 10 шт.), сделать анализ влияния рельефной структуры зеркала, а значит – и определить потенциальные возможности устройства.

Далее для того, чтобы понять, на каких характеристических сегментах ВОС может применяться рассматриваемый метод быстрой коммутации с chirпированным сигналом, выполнена оценка влияния на него хроматической дисперсии (ХД) со стороны световодов, составляющих основу современных Российских линий – SMF-28 (т. е. соответствующих G.652). Их параметры: коэффициент фазы по [17] $\beta_{2,SMF} \approx -21,7$ пс²/м и, соответственно, дисперсионный коэффициент в области длин волн магни-

стральной передачи $\lambda_0 \cong 1550$ нм соответствует выражению:

$$D_{\text{ХД, SMF-28}} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \beta_2 \cong 17 \text{ пс/нм}\cdot\text{км}.$$

В таблице 3 приведены вычисленные значения дисперсионной длины [17] L_D для разных начальных длительностей информационного импульса T_0 , соответствующих актуальным битовым скоростям B , а также временная зависимость величины смещения частоты несущей (частотного чирпа) $C_{\omega}^{(\text{ХД})}$ и значения наибольшего смещения длины волны – волнового чирпа $C_{\lambda, \text{max}}^{(\text{ХД})}$, приобретаемые под действием ХД. При проведении расчетов ис-

пользовалось соотношение между C_{λ} и C_{ω} : $C_{\lambda} = -\frac{\lambda_0^2}{2\pi c} \cdot C_{\omega}$. Согласно данным таблицы 3, для чирп-управления компонентами ВОС, предполагающего удаленную передачу заданного чирп-сигнала, следует использовать невысокие (средние) битовые скорости (до 1 Гбит/с), характерные для многих протоколов xPON, а также низких скоростей иерархии SDH, что свойственно для большинства сетей городского масштаба. В этом случае в пределах характерных длин сегментов городских сетей (до 100 км) воздействие ХД на управляющий чирп не окажет решающего влияния. На более высоких скоростях целесообразно работать на коротких сегментах, например, в сетях ЦОДов.

ТАБЛИЦА 3. Сравнение приобретаемого из-за ХД и рабочего значений чирпа

TABLE 3. Comparison of Acquired due to CD and Operating Chirp Values

B, Гбит/с (предполагается, что $B \approx 1/T_0$)	T_0		L_D , км	Приобретаемые значения $C_{\omega, \text{max}}^{(\text{ХД})}$ и $C_{\lambda, \text{max}}^{(\text{ХД})}$ на L_D под действием ХД для световода типа SMF-28		Наибольшее значение рабочего чирпа: $C_{\lambda, \text{max}} = 5 \cdot 10^{-3}$ [нм]; разрешение по длине волны ДИФП: $\delta\lambda \cong 1,6 \cdot 10^{-5}$ [нм]
	сек	пс		$C_{\omega, \text{max}}^{(\text{ХД})}$ [рад/с]	$C_{\lambda, \text{max}}^{(\text{ХД})}$ [нм] на длительности импульса	
0,5	$2 \cdot 10^{-9}$	2000	184,3	$0,13 \cdot 10^{18}$ $T_0 = 0,26 \cdot 10^9$	$0,165 \cdot 10^{-3}$	действие ХД можно не учитывать
1	10^{-9}	1000	46,01	$0,5 \cdot 10^{18}$ $T_0 = 0,5 \cdot 10^9$	$0,635 \cdot 10^{-3}$	в первом приближении действием ХД пренебрегаем
10	10^{-10}	100	0,4608	$0,5 \cdot 10^{20}$ $T_0 = 5 \cdot 10^9$	$6,35 \cdot 10^{-3}$	нужен компенсатор ХД / чирпа из-за ХД на городских сегментах
40	$0,25 \cdot 10^{-10}$	25	0,0288	$0,8 \cdot 10^{21}$ $T_0 = 20 \cdot 10^9$	$25,4 \cdot 10^{-3}$	возможна работа на коротких сегментах, например в ЦОД

Следует также учитывать, что воздействие ХД ведет к линейному смещению чирпирования, что вполне может быть учтено при формировании сигнала, и в ряде задач позволит увеличить протяженность сегмента.

С точки зрения актуального приложения ДИФП-коммутатора для телекоммуникаций можно сказать следующее. Разработанное устройство позволяет реализовывать λ -коммутацию оптических сигналов / пакетов (без буферизации), в отличие от традиционной λ -коммутации потоков (каналов) в xWDM. Причем действие может производиться как для внутриволнового излучения (внутри λ -канала xWDM по G.694, так называемый принцип дробного лямбда-переключения (F λ S, аббр. от англ. Fractional Lambda Switching [31–33]), так и для узких спектральных каналов. Последнее соответствует недавней редакции рекомендации G.694.1, опубликованной в октябре 2020 г., где допускается снижение $\Delta\lambda$ до значения 0,01 нм на короткосегментных оптических сетях. Таковые обусловлены масштабным внедрением оптической передачи в системы ЦОД, а также во внутреннюю архитектуру высокоскоростных аппаратных средств (optical backplane [34]), появлением технологии виртуаль-

ных подсетей VMware NSX, Nutanix Xtreme Computing Platform в рамках SDN, когда заданные лямбды переносят выделенные сервисы [35], и подобное. Причем в этих перечисленных случаях система передачи с коммутацией пакетов выглядит существенно более привлекательной по отношению к системе с коммутацией каналов. Но ввиду отсутствия в коммерческом доступе многопортовых волоконно-оптических высокоскоростных узкоспектральных переключателей, предназначенных для работы с традиционными телекоммуникационными сигналами (по G.703), указанные задачи либо не доведены до оптического решения, либо, как отмечается в [36–38], пакетно-коммутирующая сеть фактически введена в режим коммутации каналов, что негативно сказывается на ее итоговой производительности. Согласно теории массового обслуживания, в режиме коммутации каналов при молчании абонентов время от времени система не использует эту часть свободного канального ресурса (рисунок 8), т. е. можно сказать, что высокопроизводительному абоненту не предоставляется этого не занятого ресурса. Такой абонент работает с выделенной ему полосой пропускания, и не более того, а значит – он ждет

своих сообщений дольше, чем потенциально могла бы обеспечить для него система передачи.

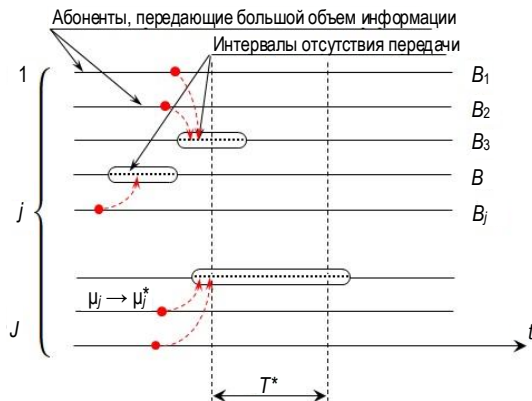


Рис. 8. Иллюстрация принципа функционирования системы с коммутацией каналов, в которой возможно заполнение периодов молчания абонентов

Fig. 8. Illustration of a Circuit-Switched System Operating Principle in Which it is Possible to Fill the Periods of Subscriber Silence

Для количественной сравнительной оценки параметров такой многоканальной системы с коммутацией каналов определим потенциальную пропускную способность (см. рисунок 8), как сумму: $\Psi = \sum_{j=1}^J B_j$, где B_j – установленные битовые скорости в каналах (вполне возможно: $B_1 = B_2 = \dots = B_j, \dots, = B_j$; всего J каналов, тогда $\Psi = J \cdot B_j$). Но, согласно сказанному выше, с учетом возможного молчания абонентов реальное количество передаваемой информации (реальная производительность системы связи), обозначим через Θ , без возможности задействования таких периодов неизбежно окажется меньше: $\Theta < \Psi$. На рисунке пунктирными линиями (обведены овалами) обозначены периоды молчания малопроизводительных абонентов, которые вполне могут быть использованы для передачи сообщений от высокопроизводительных абонентов (красные пунктирные стрелки символизируют переброс трафика); T^* – произвольный период наблюдения. Следует заметить, что в большинстве случаев для систем с коммутацией каналов поток обслуживания принимается простейшим, μ_j являются неизменными – как от канала к каналу ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_j, \dots, = \mu_j$), так и во времени.

Предположим также, что режим работы системы характеризуется стационарным Пуассоновским процессом с соответствующими интенсивностями η_j и μ_j – поступления и обслуживания заявок абонентов, соответственно ($\mu_j = 1/t_j^{(обсл.)}$). Следует отметить, что при необходимости более детального учета свойств трафика без потери общности можно заменить Пуассоновское распределение на распределение Эрланга и т. д. [39].

Тогда с учетом молчания абонентов на L линиях из общего количества J в предположении об экс-

поненциальном распределении длительностей промежутков молчания, можно записать:

$$\Theta(t) = \sum_{j=1}^J j \cdot B_j (1 - A_j e^{-\mu_j t}) \cdot e^{-\eta_j t} - \sum_{j=1}^{L, L < J} B_j (1 - M_j e^{-s_j t}), \quad (5)$$

где s_j – интенсивности потоков, характеризующие периоды молчания; A_j – нормированные коэффициенты работоспособности, определяющие возможное перенаправление трафика с других линий; M_j – нормированные коэффициенты молчания, связанные с техническими причинами, для которых по аналогии с [40] можно положить:

$$A_j = \prod_{i=1, i \neq j}^J \left(\frac{\mu_i - g_i}{\frac{\mu_j - g_j}{\gamma_j} - \frac{\mu_i - g_i}{\gamma_i}} \right) \times \left(\sum_{i=1}^J \frac{\mu_i - g_i}{\gamma_i} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$M_j = \prod_{i=1, i \neq j}^{L, L < J} \left(\frac{\gamma_i (s_i + g_i)}{\gamma_i (s_i + g_i) + \gamma_j (s_j + g_j)} \right) \times \left(\sum_{i=1}^{L, L < J} \frac{s_i + g_i}{\gamma_i} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где γ – степени загрузки оборудования или нагрузка (зависит от отношения η и μ); g – определяет среднюю интенсивность интервалов молчания абонентов (индексы опущены для краткости); для функционирующей системы передачи выполняются условия: $0 \leq A_j \leq 1$ и $0 \leq M_j \leq 1$.

Итак, если предоставлять высокопроизводительным абонентам дополнительную полосу пропускания в периоды молчания в параллельных каналах, как было предложено выше, то соответствующие интенсивности обслуживания заявок $\mu_j, j = 1 \dots (J - L), L < J$, увеличатся до значений:

$$\mu_j^*, \mu_j^* > \mu_j.$$

Тогда для реальной производительности системы связи можно записать:

$$\Theta^*(t) = \sum_{j=1}^J j \cdot B_j (1 - A_j e^{-\mu_j^* t}) \cdot e^{-\eta_j t}, \quad (8)$$

где A_j соответствуют (6) ввиду не влияния в первом приближении переброски трафика на работоспособность линий.

Также в первом приближении определим:

$$\mu_j^* \cong \mu_j \cdot \left(1 + \left(\frac{\mu_j - s_j}{\gamma_j} \cdot e^{s_j t} \right) \Big|_{t, t \leq T^*} \right), \quad (9)$$

где $\langle \bullet \rangle$ – функция усреднения величины по времени на протяжении интервала наблюдения T^* .

Тогда результирующую эффективность от применения предложенного способа управления трафиком можно записать в следующем виде:

$$Y = \frac{\Theta^*}{\Theta}. \quad (10)$$

На рисунке 9 представлены графики, полученные в результате компьютерного моделирования для параметра Y в сети с ДИФП-коммутатором, выполняющим частичную переброску трафика с обслуживающих высокопроизводительных абонентов линий (каналов) в периоды молчания менее производительных абонентов.

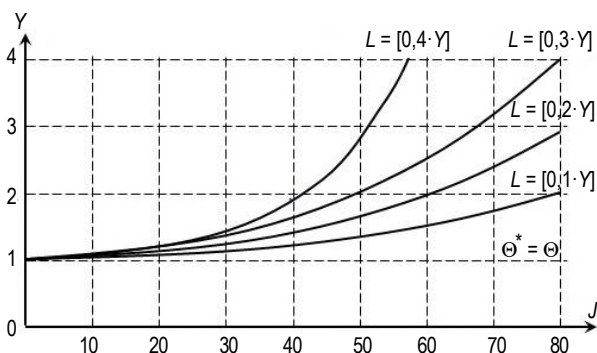


Рис. 9. Графики для результирующей эффективности в сети с ДИФП-коммутатором, заполняющим периоды молчания абонентов

Fig. 9. Graphs for the Resulting Efficiency in a Network with a DIFP Switch Filling the Periods of Subscriber Silence

Считаем, что процесс появления эпизодов молчания является стационарным, поэтому выбор T^* не влияет на характер представленных зависимостей, а только на их относительный масштаб. Значения η_j , μ_j , S_j , g_j и γ_j для выполнения моделирования были взяты, исходя из примера типового телекоммуникационного ЦОД-сегмента [41], и составляли: $\mu = 0,0033$ сеанс/с (примем, что средняя длительность сеанса связи – 5 минут, и одинаковая для всех линий), а остальные величины рассматривались как случайные и распределенные по Гауссовскому закону с математическими ожиданиями $\eta_{(MO)} = 0,146$ сеанс/с, $S_{(MO)} = 0,088$ сеанс/с, $g_{(MO)} = 0,01$ сеанс/с, и дисперсиями $\eta_{(D)} = 0,0625$ (сеанс/с)², $S_{(D)} = 0,01$ (сеанс/с)², $g_{(D)} = 0,01$ (сеанс/с)², $\gamma = \eta/\mu$. Количество каналов J было принято, исходя из параметров распространенной в настоящее время аппаратуры DWDM [42] и составило $J = 88$. Битовые скорости во всех каналах были равными 40 Гбит/с.

Таким образом, с применением разработанного устройства увеличивается пропускная эффективная способность сети, что влияет на один из наиболее существенных QoS-показателей – способствует уменьшению времени ожидания сообщения абонентами.

Выводы

Резюмируя выполненное исследование, можно сказать следующее. Анализ известных волоконно-оптических коммутационных устройств показал, что имеет место определенный пробел в отношении коммутаторов оптических сигналов / пакетов, предназначенных для применения в традиционных ВОС (работающих с сигналами по G.703). Применение же коммерчески доступных моделей, ориентированных на xWDM (по G.694) для построения оптических пакетных сетей не представляется коммерчески обоснованным ввиду получающейся низкой загрузки λ -канала в таком режиме. Поэтому реальное практическое применение OBS характеризуется существенно меньшим масштабом в сравнении с востребованностью данной технологии в настоящее время. Именно в рамках этого обстоятельства прорабатывается вопрос об использовании внутрислосной маркировки радиочастотного канала [2] (в RoF, по сути – в оптическом домене), обеспечивающий параллельную обработку битов с такой λ -меткой, и как следствие – низкую задержку наряду с минимальным задействованием телекоммуникационных ресурсов при управлении «на оптическом уровне» [2], а также создание технологии дробного лямбда-переключения (F_λS) [31–33]. Очевидно, что все это может успешно функционировать при наличии узкоспектральных разделителей, конструктивно основанных на применении высокоизбирательных средств, один из вариантов которых и представлен в настоящей статье.

В основу разрабатываемого многопортового волоконно-оптического переключателя / разделителя положен ДИФП с профилированным градиентным смесителем и гребенчатой структурой выходного зеркала. Последняя обеспечивает выделение (перенаправление) сигнальной компоненты с заданной λ -меткой из общего потока в определенный волоконно-оптический сегмент. В статье предложена конструкция указанной гребенки и выполнена количественная оценка ее основных параметров, исходя из компьютерного результата моделирования электрической составляющей поля (интерференционной картины) в смесителе. Сделано предположение, что гребенка может быть выполнена не только в виде световодной сборки, но и как отдельный элемент с последующим встраиванием в световодную структуру.

Устройство является однопролетным и многопортовым, с разрешающей способностью выше, чем у дисперсионных аналогов (работа которых основана на применении призмоподобных структур), и вполне подходит для сетей с F_λS. Быстрое оптическое переключение может быть реализовано, например, с применением чирпированного сигнала, изменение параметров которого может

достигаться в оптическом домене также полностью оптическим способом. Кроме того, градиентный характер показателя преломления может быть дополнен дисперсионными свойствами материала смесителя, что позволит усилить различие в формировании интерференционных максимумов на разных длинах волн.

В статье выполнена оценка такого сетевого параметра, как производительность при передаче

трафика на сегменте с ДИФП-коммутатором. Улучшение достигается благодаря пакетной коммутации при разгрузке трафика в xWDM, активно применяющихся сегодня в сетях ЦОДов. Следовательно, разработанное устройство может найти самые разные приложения – для поддержки OBS в оптических и оптико-радиоэфирных мультисервисных сетях.

Список источников

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 304 с.
2. Sahinel D., Rommel S., Monroy I.T. Resource Management in Converged Optical and Millimeter Wave Radio Networks: A Review // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 221. DOI:10.3390/app12010221. EDN:IAHVJF
3. Shafi M., Jha R.K., Jain S. 6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks // IEEE Access. 2024. Vol. 12. PP. 57548–57573. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3385230. EDN:ICZPDX
4. Xue X., Zhang S., Guo B., Ji W., Yin R., Chen B., et al. Optical Switching Data Center Networks: Understanding Techniques and Challenges // arXiv:2302.05298. DOI:10.48550/arXiv.2302.05298
5. Zhao C., Cai Y., Liu A., Zhao M., Hanzo L. Mobile Edge Computing Meets mmWave Communications: Joint Beamforming and Resource Allocation for System Delay Minimization // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2020. Vol. 19. Iss. 4. PP. 2382–2396. DOI:10.1109/twc.2020.2964543. EDN:QXLJHM
6. Росляков А.В., Герасимов В.В. Анализ сквозной задержки в транспортном сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN // Труды учебных заведений связи. 2024;10(1):73–84. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84. EDN:SJWTLO
7. Sato K. Optical switching will innovate intra data center networks [Invited Tutorial] // Journal of Optical Communications and Networking. 2023. Vol. 16. Iss. 1. PP. A1–A23. DOI:10.1364/JOCN.495006
8. Miao W., Luo J., Di Lucente S., Dorren H., Calabretta N. Novel flat datacenter network architecture based on scalable and flow-controlled optical switch system // Optics Express. 2024. Vol. 22. Iss. 3. PP. 2465–2472. DOI:10.1364/OE.22.002465
9. Mukherjee B. Optical Communication Networks. Mc.Graw-Hill, 2005. 576 p.
10. Sasikala V., Chitra K. All optical switching and associated technologies: a review // Journal of Optics. 2018. Vol. 47. PP. 307–317. DOI:10.1007/s12596-018-0452-3. EDN:OHBQOC
11. Zhao Y., Qian C., Qiu K., Gao Y., Xu X. Ultrafast optical switching using photonic molecules in photonic crystal waveguides // Optics express. 2015. Vol. 23. Iss. 7. PP. 9211–9220. DOI:10.1364/OE.23.009211. EDN:UVOCHP
12. Chai Z., Hu X., Wang F., Niu X., Xie J., Gong Q. Ultrafast All-Optical Switching // Advanced Optical Materials. 2017. Vol. 5. Iss. 7. P. 1600665. DOI:10.1002/adom.201600665. EDN:YWBFYN
13. Ono M., Hata M., Tsunekawa M., Nozaki K., Sumikura H., Chiba H., et al. Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides // Nature Photonics. 2020. Vol. 14. Iss. 1. PP. 37–43. DOI:10.1038/s41566-019-0547-7. EDN:OYKIDV
14. Rutckaia V., Schilling J. Ultrafast low-energy all-optical switching // Nature Photonics. 2020. Vol. 14. Iss. 1. PP. 4–6. DOI:10.1038/s41566-019-0571-7. EDN:DURANK
15. Rehman A.U., Khan Y., Irfan M., Butt M.A., Khonina S.N., Kazanskiy N.L. A Novel Design of Optical Switch Based on Guided Mode Resonances in Dielectric Photonic Crystal Structures // Photonics. 2022. Vol. 9. Iss. 8. P. 580. DOI:10.3390/photonics9080580. EDN:UJDEOL
16. Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Мешков И.К., Андрианова А.В., Абдрахманова Г.И., Ишмияров А.А. и др. Способ подключения антенных излучателей для RoF с применением оптического устройства и методика расчёта его параметров // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 5. С. 728–737. DOI:10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737. EDN:VCCHWZ
17. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Boston: Academic Press, 2009. 466 p.
18. Vinogradova I.L., Golovina E.U., Gizatulin A.R., Meshkov I.K., Filatov P.E., Komissarov A.M. Method of RoF-network segment control using chirped optical pulses // Proceedings of the Conference on Optical Technologies for Telecommunications (Kazan, Russian Federation, 22–24 November 2023). 2023. Vol. 13168. PP. 51–62. DOI:10.1117/12.3026194
19. Виноградова И.Л. Характеристики двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо // Радиотехника. 2002. № 6. С. 33–39.
20. Абдрахманова Г.И., Андрианова А.В., Виноградова И.Л., Грахова Е.П., Зайнуллин А.Р., Ишмияров А.А., и др. Устройство для разветвления и чирпирования оптических сигналов. Патент на полезную модель № RU 163995 U1, от 08.02.2016. Опубл. 20.08.2016. EDN:RKEEJZ
21. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.
22. Андрианова А.В., Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Абдрахманова Г.И., Грахова Е.П. и др. Подход к получению 3D-наноструктурного двухфазного ситаллового стекла, основанный на интенсивном кручении под высоким давлением // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 4. С. 489–500. DOI:10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500. EDN:WMIKAN
23. Карпенко Г.Д., Клименко А.И. Способ динамической компенсации дрейфа постоянной составляющей низкочастотного синусоидального сигнала. Патент SU 482686 A1, от 16.04.1973. Опубл. 30.08.1975. EDN:OVVZIS

24. Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Поречный С.С. Об одном подходе к практической оценке погрешностей численных результатов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 3. С. 105–110. EDN:KXXBVL
25. Евграфов А. ANSYS HFSS: передовые технологии трехмерного решения электродинамических задач // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 6(138). С. 162–167. EDN:SQWBTD
26. Kudinova M., Bouwmans G., Vanvincq O., Habert R., Plus S., Bernard R., et al. Two-step manufacturing of hundreds of meter-long silicon micrometer-size core optical fibers with less than 0.2 dB/cm background losses // *APL Photonics*. 2021. Vol. 6. Iss. 2. DOI:10.1063/5.0028195. EDN:UAKRHQ
27. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Butt M.A. Grayscale Lithography and a Brief Introduction to Other Widely Used Lithographic Methods: A State-of-the-Art Review // *Micromachines*. 2024. Vol. 15. Iss. 11. P. 1321. DOI:10.3390/mi15111321. EDN:OMVMD0
28. Chesnokova M., Nurmukhametov D., Ponomarev R., Agliullin T., Kuznetsov A., Sakhabutdinov A., et al. Microscopic Temperature Sensor Based on End-Face Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer // *Photonics*. 2024. Vol. 11. Iss. 8. P. 712. DOI:10.3390/photonics11080712. EDN:NHSVWJ
29. Zhang D., Li Y. A RISC-V 32-bit microprocessor on two-dimensional semiconductor platform // *Journal of Semiconductors*. 2025. Vol. 46. Iss. 8. DOI:10.1088/1674-4926/25050016
30. Saha S., Pal S., Ganguly J., Ghosh M., et al. Exploring optical refractive index change of impurity doped quantum dots driven by white noise // *Superlattices and Microstructures*. 2015. Vol. 88. PP. 620–633. DOI:10.1016/j.spmi.2015.10.021
31. Baldi M., Ofek Y. Realizing Dynamic Optical Networking. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://staff.polito.it/mario.baldi/publications/ONM2003.pdf (дата обращения 08.10.2025)
32. Agrawal D., Baldi M., Corra M., Fontana G., Marchetto G., Nguyen V.T. A Scalable Approach for Supporting Streaming Media: Design, Implementation and Experiments // *Proceedings of the 12th IEEE Symposium on Computers and Communications (Santiago, Portugal, 01–04 July 2007)*. IEEE, 2007. PP. 211–217. DOI:10.1109/ISCC.2007.4381589
33. Baldi M., Ofek Y. Fractional Lambda Switching Principles of Operation and Performance Issues // *Simulation*. 2004. Vol. 80. Iss. 10. PP. 527–544. DOI:10.1177/0037549704046
34. Follett D.R., Sobin D.L. Optical backplane. Patent USA, no. 4870637A, 24.12.1987. <https://patents.google.com/patent/US4870637A/en>
35. Jorepalli S. Transforming Network Architectures with VMware NSX-T Data Centre: A Deep Dive into Software-Defined Networking for Multi-Cloud Environments // *Applied Science and Engineering Journal for Advanced Research*. 2025. Vol. 4. Iss. 1. PP. 7–12. DOI:10.5281/zenodo.14784450
36. Xue X., Calabretta N. Nanosecond optical switching and control system for data center networks // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 2257. DOI:10.1038/s41467-022-29913-1. EDN:DVCWFP
37. Singh O., Paulus R. A critical review of optical switches // *Journal of Optical Communications*. 2023. Vol. 44. Iss. 1. PP. 349–358. DOI:10.1515/joc-2020-0284
38. Lei Y., Li J., Liu Z., Joshi R., Xia Y. Nanosecond Precision Time Synchronization for Optical Data Center Networks // *arXiv:2410.17012*. 2024.
39. Еременко В.Т., Фисун А.П., Саитов И.А., Миронов А.Е., Орешин А.Н., Королев А.В. Методы и модели теории телеграфика. Орел: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2019. 244 с.
40. Бачев А.Г., Вакуленко Н.Н., Захаров М.К. Математическая модель сети обмена данными с коммутацией пакетов // *Программные продукты и системы*. 2010. № 1. С. 158–161. EDN:MNMVVL
41. Huang S., Wang M., Liu Y., Liu Z., Cui Y. Iphicles: Tuning Parameters of Data Center Networks with Differentiable Performance Model // *Proceedings of the 32nd International Symposium on Quality of Service (IWQoS, Guangzhou, China, 19–21 June 2024)*. IEEE, 2024. PP. 1–10. DOI:10.1109/IWQoS61813.2024.10682926
42. Трещиков В.Н., Листвин В.Н. DWDM-системы. М.: Техносфера. 2021. 420 с.

References

1. Goldstein A.B., Goldstein B.S. *MPLS Technology and Protocols*. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ.; 2005. 304 p. (in Russ.)
2. Sahinel D., Rommel S., Monroy I.T. Resource Management in Converged Optical and Millimeter Wave Radio Networks: A Review. *Applied Sciences*. 2022;12(1):221. DOI:10.3390/app12010221. EDN:IAHVFI
3. Shafi M., Jha R.K., Jain S. 6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks. *IEEE Access*. 2024;12:57548–57573. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3385230. EDN:ICZPDX
4. Xue X., Zhang S., Guo B., Ji W., Yin R., Chen B., et al. Optical Switching Data Center Networks: Understanding Techniques and Challenges. *arXiv:2302.05298*. DOI:10.48550/arXiv.2302.05298
5. Zhao C., Cai Y., Liu A., Zhao M., Hanzo L. Mobile Edge Computing Meets mmWave Communications: Joint Beamforming and Resource Allocation for System Delay Minimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020;19(4):2382–2396. DOI:10.1109/twc.2020.2964543. EDN:QXLJHM
6. Roslyakov A., Gerasimov V. Analysis of End-to-End Delay in the Transport Segment of Fronthaul 4G/5G Networks Based on TSN Technology. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(1):73–84. (In Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84. EDN:SJWTLO
7. Sato K. Optical switching will innovate intra data center networks [Invited Tutorial]. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2023;16(1):A1–A23. DOI:10.1364/JOCN.495006
8. Miao W., Luo J., Di Lucente S., Dorren H., Calabretta N. Novel flat datacenter network architecture based on scalable and flow-controlled optical switch system. *Optics Express*. 2024;22(3):2465–2472. DOI:10.1364/OE.22.002465
9. Mukherjee B. *Optical Communication Networks*. Mc.Graw-Hill; 2005. 576 p.

10. Sasikala V., Chitra K. All optical switching and associated technologies: a review. *Journal of Optics*. 2018;47:307–317. DOI:10.1007/s12596-018-0452-3. EDN:OHBQOC
11. Zhao Y., Qian C., Qiu K., Gao Y., Xu X. Ultrafast optical switching using photonic molecules in photonic crystal waveguides. *Optics express*. 2015;23(7):9211–9220. DOI:10.1364/OE.23.009211. EDN:UVOCHP
12. Chai Z., Hu X., Wang F., Niu X., Xie J., Gong Q. Ultrafast All-Optical Switching. *Advanced Optical Materials*. 2017;5(7):1600665. DOI:10.1002/adom.201600665. EDN:YWBFFYN
13. Ono M., Hata M., Tsunekawa M., Nozaki K., Sumikura H., Chiba H., et al. Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides. *Nature Photonics*. 2020;14(1):37–43. DOI:10.1038/s41566-019-0547-7. EDN:OYKIDV
14. Rutckaia V., Schilling J. Ultrafast low-energy all-optical switching. *Nature Photonics*. 2020;14(1):4–6. EDN:DURANK
15. Rehman A.U., Khan Y., Irfan M., Butt M.A., Khonina S.N., Kazanskiy N.L. A Novel Design of Optical Switch Based on Guided Mode Resonances in Dielectric Photonic Crystal Structures. *Photonics*. 2022;9(8):580. DOI:10.3390/photonics9080580. EDN:UJDEOL
16. Sultanov A.Kh., Vinogradova I.L., Meshkov I.K., Andrianova A.V., Abdrakhmanova G.I., Ishmiyarov A.A., et al. A method for connecting antenna radiators to rof systems using an optical device and calculating its parameters. *Computer Optics*. 2015;39(5):728–737. (in Russ.) DOI:10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737. EDN:VCCHWZ
17. Agrawal G. P. *Nonlinear Fiber Optics*. Boston: Academic Press; 2009. 466 p.
18. Vinogradova I.L., Golovina E.U., Gizatulina A.R., Meshkov I.K., Filatov P.E., Komissarov A.M. Method of RoF-network segment control using chirped optical pulses. *Proceedings of the Conference on Optical Technologies for Telecommunications, 22–24 November 2023, Kazan, Russian Federation, vol.13168*. 2023. p.51–62. DOI:10.1117/12.3026194
19. Vinogradova I.L. Characteristics of a two-resonator Fabry-Perot interferometer. *Radio Engineering*. 2002;6:33–39. (in Russ.)
20. Abdrakhmanova G.I., Andrianova A.V., Vinogradova I.L., Grakhova E.P., Zainullin A.R., Ishmiyarov A.A., et al. *Device for branching and chirping optical signals*. Patent RF, no. 163995 U1, 02.08.2016. (in Russ.) EDN:RKEEJZ
21. Skokov I.V. *Multibeam interferometers in measuring technology*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1989. 256 p. (in Russ.)
22. Andrianova A.V., Vinogradova I.L., Sultanov A.K., Meshkov I.K., Abdrakhmanova G.I., Grakhova E.P. Approach to obtaining 3D-nanostructured two-phase siall glass based on intense torsion under high pressure. *Computer Optics*. 2016;40(4):489–500. (in Russ.) DOI:10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500. EDN:WMIKAH
23. Karpenko G.D., Klimenko A.I. *Method of dynamic compensation of drift of constant component of low-frequency sinusoidal*. Patent SU, no. 482686 A1, 16.04.1973. (in Russ.) EDN:OVVZIS
24. Zhitnikov V.P., Sherykhalina N.M., Porechny S.S. On one approach to practical evaluation of errors of numerical results. *Computing, Telecommunication and Control*. 2009;3:105–110. (in Russ.) EDN:KXXBVL
25. Evgrafov A. ANSYS HFSS. Advanced technology for three-dimensional electrodynamic problems solution. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2014;6(138):162–167. (in Russ.) EDN:SQWBTD
26. Kudinova M., Bouwmans G., Vanvincq O., Habert R., Plus S., Bernard R., et al. Two-step manufacturing of hundreds of meter-long silicon micrometer-size core optical fibers with less than 0.2 dB/cm background losses. *APL Photonics*. 2021;6:2. DOI:10.1063/5.0028195. EDN:UAKRHQ
27. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Butt M.A. Grayscale Lithography and a Brief Introduction to Other Widely Used Lithographic Methods: A State-of-the-Art Review. *Micromachines*. 2024;15(11):1321. DOI:10.3390/mi15111321. EDN:OMVMDO
28. Chesnokova M., Nurmukhametov D., Ponomarev R., Agliullin T., Kuznetsov A., Sakhabutdinov A., et al. Microscopic Temperature Sensor Based on End-Face Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer. *Photonics*. 2024;11(8):712. DOI:10.3390/photonics11080712. EDN:NHSVWJ
29. Zhang D., Li Y. A RISC-V 32-bit microprocessor on two-dimensional semiconductor platform. *Journal of Semiconductors*. 2025;46(8). DOI:10.1088/1674-4926/25050016
30. Saha S., Pal S., Ganguly J., Ghosh M., et al. Exploring optical refractive index change of impurity doped quantum dots driven by white noise. *Superlattices and Microstructures*. 2015;88:620–633. DOI:10.1016/j.spmi.2015.10.021
31. Baldi M., Ofek Y. *Realizing Dynamic Optical Networking*. URL: chrome-extension://efaidnbmnnpbpcjpcglclefindmkaj/https://staff.polito.it/mario.baldi/publications/ONM2003.pdf [Accessed 08.10.2025]
32. Agrawal D., Baldi M., Corra M., Fontana G., Marchetto G., Nguyen V.T. A Scalable Approach for Supporting Streaming Media: Design, Implementation and Experiments. *Proceedings of the 12th IEEE Symposium on Computers and Communications, 01–04 July 2007, Santiago, Portugal*. IEEE; 2007. p.211–217. DOI:10.1109/ISCC.2007.4381589
33. Baldi M., Ofek Y. Fractional Lambda Switching Principles of Operation and Performance Issues. *Simulation*. 2004;80(10):527–544. DOI:10.1177/003754970404046
34. Follett D.R., Sobin D.L. *Optical backplane*. Patent USA, no. 4870637A, 24.12.1987. <https://patents.google.com/patent/US4870637A/en>
35. Jorepalli S. Transforming Network Architectures with VMware NSX-T Data Centre: A Deep Dive into Software-Defined Networking for Multi-Cloud Environments. *Applied Science and Engineering Journal for Advanced Research*. 2025;4(1):7–12. DOI:10.5281/zenodo.14784450
36. Xue X., Calabretta N. Nanosecond optical switching and control system for data center networks. *Nature Communications*. 2022;13(1):2257. DOI:10.1038/s41467-022-29913-1. EDN:DVCWFP
37. Singh O., Paulus R. A critical review of optical switches. *Journal of Optical Communications*. 2023;44(1):349–358. DOI:10.1515/joc-2020-0284
38. Lei Y., Li J., Liu Z., Joshi R., Xia Y. Nanosecond Precision Time Synchronization for Optical Data Center Networks. *arXiv:2410.17012*. 2024.


39. Eremenko V.T., Fisun A.P., Saitov I.A., Mironov A.E., Oreshin A.N., Korolev A.V. *Methods and Models of Teletraffic Theory*. Orel: Oryol State University named after I.S. Turgenev Publ.; 2019. 244 p. (in Russ.)
40. Bachev A.G., Vakulenko N.N., Zakharov M.K. Mathematical model of a data exchange network with packet switching. *Software and Systems*. 2010;1:158–161. (in Russ.) EDN:MNKMVL
41. Huang S. Wang M., Liu Y., Liu Z., Cui Y. Iphicles: Tuning Parameters of Data Center Networks with Differentiable Performance Model. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Quality of Service, IWQoS, 19–21 June 2024, Guangzhou, China*. IEEE; 2024. p.1–10. DOI:10.1109/IWQoS61813.2024.10682926
42. Treshchikov V.N., Listvin V.N. *DWDM systems*. Moscow: Technosfera Publ.; 2021. 420 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 16.08.2025; принята к публикации 12.09.2025.


The article was submitted 28.07.2025; approved after reviewing 16.08.2025; accepted for publication 12.09.2025.

Информация об авторах:


ВИНОГРАДОВА
Ирина Леонидовна

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского университета науки и технологий, профессор кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика» Уфимского государственного нефтяного технического университета
 <https://orcid.org/0000-0003-4618-6843>


СУЛТАНОВ
Альберт Ханович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского университета науки и технологий
 <https://orcid.org/0000-0002-2830-3498>


ГОЛОВИНА
Евгения Юрьевна

старший преподаватель кафедры информационных технологий Института нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате
 <https://orcid.org/0009-0006-3624-5490>

КОМИССАРОВ
Аркадий Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского университета науки и технологий
 <https://orcid.org/0009-0004-2809-4309>

ФИЛАТОВ
Павел Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского университета науки и технологий
 <https://orcid.org/0009-0007-2607-033X>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.