

УДК 004.75; 621.391

Г. Л. ЛЫСЕНКО, С. Е. ТУЖАНСКИЙ, А. И. М. АЛЬКЕЙСИ

## **ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ GRID**

*Винницький національний технічний університет,  
21021, г. Винница, ул. Хмельницькое шоссе 95, Украина,  
E-mail: lgl@vntu.edu.ua*

**Аннотация.** Исследованы технологии и архитектуры оптических транспортных сетей с мультипротокольной фотонной коммутацией меток для организации работы распределенных вычислительных сетей типа GRID на связывающем уровне. Реализация предложенного подхода на новой элементной базе позволит максимально использовать пропускную способность масштабируемых и протяженных волоконных DWDM сетей, обеспечивая при этом эффективную конвергенцию сетей с пакетной и канальной коммутацией.

**Ключевые слова:** распределенные ИВС, оптические транспортные технологии, грид-вычисления, фотонный коммутатор, многопротокольная оптическая коммутация меток

**Анотація.** Досліджено технології та архітектури оптичних транспортних мереж з мультипротоковою фотонною комутацією міток для організації роботи розподілених обчислювальних мереж типу GRID на сполучному рівні. Реалізація запропонованого підходу на новій елементній базі дозволить максимально використовувати пропускну здатність масштабованих і протяжних волоконних DWDM мереж, забезпечуючи при цьому ефективну конвергенцію мереж пакетної і каналної комутації.

**Ключові слова:** розподілені ІТТ, оптичні транспортні технології, грид-обчислення, фотонний комутатор, багатопротоковна оптична комутація міток

**Abstract.** We studied the technology and architecture of optical transport networks with photonic multiprotocol label switching for the organization of distributed computing networks such as GRID on the connectivity level. Implementing the proposed approach on new element base allows maximum use of the bandwidth, and scalable DWDM extensive fiber networks, while ensuring efficient network convergence of circuit and packet-channel switching.

**Keywords:** distributed IVS, optical transport technologies, grid computing, photon commutator, multiprotocol optical label switching

### **ВВЕДЕНИЕ**

Решение трудоемких фундаментальных и прикладных научных задач связано с необходимостью организации мощных сетевых информационно-вычислительных платформ. Стремительный рост трафика данных в информационно-вычислительных сетях (ИВС) обуславливает потребность в разработке новых быстродействующих средств передачи и обмена информацией. При этом производительность вычислительного устройства и пропускная способность каналов обмена связаны между собой согласно закону Амдала (*Amdahl*) [1].

Сегодня развитие электронных технологий замедляется в связи с технологическими ограничениями максимальной частоты вычислительных операций в процессорах (по длине каналов транзисторов, времени переключения, теплоотводу и др.). Решением проблемы быстродействия ИВС является организация параллельного выполнения большого числа операций с использованием распределенной структуры вычислений.

Распределенные вычисления предполагают использование группы объединенных компьютеров, формирующих параллельную вычислительную систему. Для организации параллельных вычислений

используют архитектуру высокопроизводительных вычислительных кластеров (*HPC*). Современные *HPC* строятся на основе высокоскоростных интерфейсов межсоединений типа *Infiniband*, *Myrinet*, *SCI*, хотя в хорошо распараллеливаемых задачах возможно также применение различных скоростных версий *Ethernet* [2—4].

Одной из перспективных технологий наряду с облачными вычислениями (*cloud computing*), позволяющей существенно снизить стоимость выполнения вычислительных операций, является технология грид-вычислений (*GRID*). Архитектура *GRID* позволяет координировать распределённые ресурсы посредством универсальных протоколов и интерфейсов с обеспечением нетривиального качества обслуживания. При этом осуществляется централизованное удалённое предоставление ресурсов для решения различного рода вычислительных задач. Для передачи программ и данных *GRID* использует стандартные каналы и протоколы (*Ethernet*, *SDH*, *ATM*, *TCP/IP*, *MPLS* и т.д.) [3—5].

Широкое внедрение в сетях передачи данных волоконной оптики и фотоники открывает дополнительные возможности для улучшения работы связывающего уровня архитектуры *GRID*.

Таким образом, внедрение в архитектуру *GRID* полностью оптических сетевых технологий (*AON*), реализуемых на принципах фотонной коммутации пакетов и каналов, расширит функциональные возможности и пропускную способность таких распределённых ИВС.

### ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ МНОГОПРОТОКОЛЬНОЙ КОММУТАЦИИ МЕТОК ДЛЯ GRID

Уровни протоколов архитектуры *GRID* и их соответствие уровням протоколов Интернет (согласно модели OSI) представлены на рис. 1.

Так, аппаратный уровень *GRID* определяет компьютеры, устройства хранения, сети, сенсоры и др. устройства, связывающий уровень - коммуникационные протоколы и протоколы аутентификации.

Ресурсный уровень *GRID* реализует протоколы взаимодействия с ресурсами распределённой ИВС и их управления, коллективный — управление каталогами ресурсов, диагностику, мониторинг. Прикладной уровень определяет инструментарий для работы с *GRID* и пользовательские приложения.

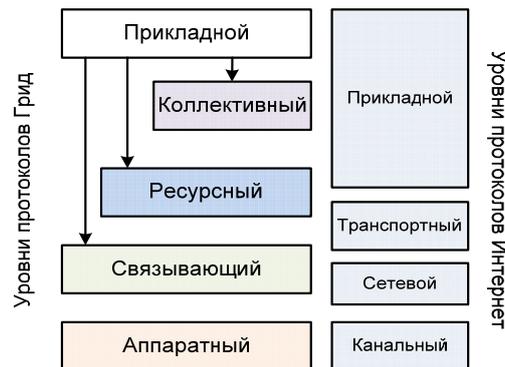


Рис. 1. Архитектура уровней протоколов Грид и Интернет (модель OSI)

Из рис. 1 видно, что на связывающем уровне *GRID* хорошо интегрируются с транспортным и сетевым уровнями Интернет, на которых работают современные оптические транспортные технологии.

При высоких скоростях обмена (>1 Гбит/с) транспортный протокол *TCP* (уровень *L4* модели *OSI*) ограничивает эффективность обмена данными (проблемы возникают при больших произведениях полосы пропускания *BW* и *RTT*). Для устранения этих недостатков разработана расширенная версия протокола передачи *GRIDFTP*.

Организацию обмена данными с высокими скоростями передачи информации в *GRID* невозможно представить без технологии уплотнения информации *WDM* (*Wavelength Division Multiplexing*), активно используемой для увеличения пропускной способности оптических сетей.

Современные технологии фотонной коммутации каналов основаны на использовании микроэлектронных механических систем (*Micro-Electro Mechanical Systems*, *MEMS*), электрооптических и акустооптических коммутаторов, устройств на нелинейных эффектах в оптических волокнах и полупроводниках. В фотонных коммутаторах используют интерферометры, дифракционные фазовые решетки и другие оптические элементы. Разрабатываются коммутаторы на фотонных кристаллах и жидкокристаллических матрицах [3—7].

Дополнительные возможности в области передачи данных и программ для *GRID* открывает использование технологий оптической мультипротокольной коммутации меток (*Optical MPLS*) —

$\lambda$ -MPLS ( $MP\lambda S$ ) и GMPLS. Использование оптического обмена меток (AOLS) и соответствующего кодирования позволяет строить полностью оптические сети (AON) с фотонной коммутацией. Совместное использование MPLS и  $MP\lambda S$  может обеспечить значительную сетевую избыточность.

На рис. 2 показано взаимодействие между логическим и физическим уровнями сетей  $MP\lambda S$ , а также относительная сложность организации IP-слоя по сравнению с волоконно-оптическим.

Дальнейшим развитием  $MP\lambda S$  стал протокол GMPLS, функционирующий на уровне LI модели OSI, значение временной задержки RTT оказывается минимизированным для протяженных скоростных сетей.

OMPAS позволяет транспортным сетям получить отдельные функции сетей с ячеистой топологией, в результате чего стает возможной интеграция таких оптических сетей с GRID. Ориентированность  $MP\lambda S$  и GMPLS сетей на пропускную способность обуславливает проблему возможной блокировки каналов, вероятность которой в  $\lambda$ -коммутируемых сетях выше, чем в сетях с коммутацией каналов.

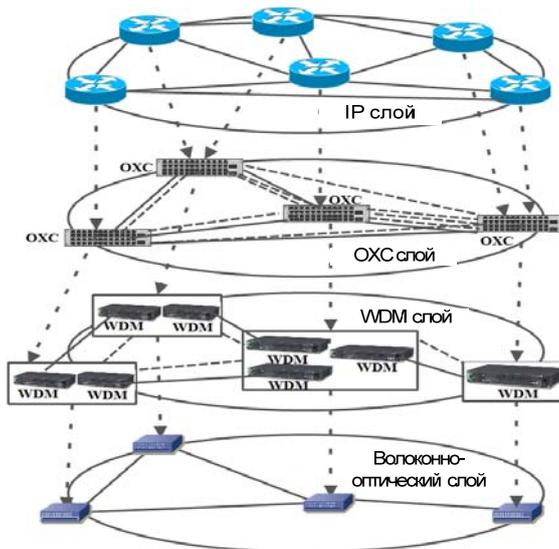


Рис. 2. Взаимодействие между физическим и логическим слоями сети  $MP\lambda S$

С учетом требований GRID определим минимальное количество коммутационных элементов, которое необходимо для полного соединения неблокирующих сетей с ячеистой топологией, сравнивая при этом логические каналные соединения MPLS с физическими каналными соединениями  $MP\lambda S$ .

Затем в сети  $MP\lambda S$  сравним вероятность блокирования  $P_b$  для случаев, когда оптические коммутаторы могут осуществлять преобразование длины волны и для случаев, когда коммутаторы не осуществляют преобразование длины волны.

Вначале определим минимальное количество коммутационных элементов  $S$ , необходимых для соединений с неблокируемой конфигурацией сети. Для MPLS сетей соединение логических каналов обеспечивает большую гибкость каналного соединения, где минимальное количество необходимых коммутационных элементов составляет [7]

$$S_{MPLS} = \frac{N_\lambda \cdot K_f \log_p(N_\lambda \cdot K_f)}{P}, \quad (1)$$

где  $N_\lambda$  — количество длин волн на волокно с учетом технологии DWDM,  $K_f$  — количество портов с волоконными соединителями,  $P$  — количество устройств ввода-вывода оптического коммутатора.

Для  $MP\lambda S$  сетей требуется соединение физического канала, где минимальное число переключателей, необходимых для того, чтобы сеть полностью подсоединилась и получила статус неблокируемой, является [8]

$$S_{MP\lambda S} = \frac{N_\lambda K_f [2(\log_p N_\lambda + \log_p K_f) - 1]}{P}. \quad (2)$$

На рис. 3 представлены графические зависимости минимального числа элементов коммутации для сетей MPLS и  $MP\lambda S$  от количества длин волн и портов, полученные на основании формул (1) и (2). Очевидно, что MPLS-сети имеют значительно меньшее число необходимых коммутационных элементов по сравнению с  $MP\lambda S$ -сетью.

Фактом, подтверждающим наличие ограничений является то, что поля метки (20 бит) и класса обслуживания *CoS* (3 бита), взятые вместе, определяют виртуальный коммутируемый с помощью меток путь (*Label-Switched Path — LSP*) для пакета. В результате объединения полей получаем  $N = 2^{23} = 8388608$  различных комбинаций, что на пять порядков выше количества доступных длин волн в *MPλS*-сетях ( $N_\lambda = 160$  для *DWDM* в *C*-диапазоне) в сети на каждом узле.

Вместе с тем, развитие передовых технологий оптической передачи и модуляции сигналов, позволило создать волновые конвертеры (*WC*) для диапазона длин волн *DWDM* с оптическим и электрическим управлением. Так, сегодня представлены на рынке промышленные образцы конвертеров, имеющие времена переключения порядка десятков псек [6]. В частности, *H. Volcan* и *V. Sabnis* (*Stanford Univ.*) разработали интегральную технологию многофункционального коммутатора с функцией преобразования любых длин волн в *C*-диапазоне [10]. Интегральная технология основана на волноводном электро-абсорбционном модуляторе света (*ЭАМ*), который управляется внешним световым потоком и способен восстанавливать сигнал на другой длине волны. Важной особенностью технологии является возможность построения перестраиваемых коммутационных массивов  $64 \times 64$  на элементах *ЭАМ*, что делает чип подходящим для эффективной обработки каналов в *DWDM* и *CWDM*.

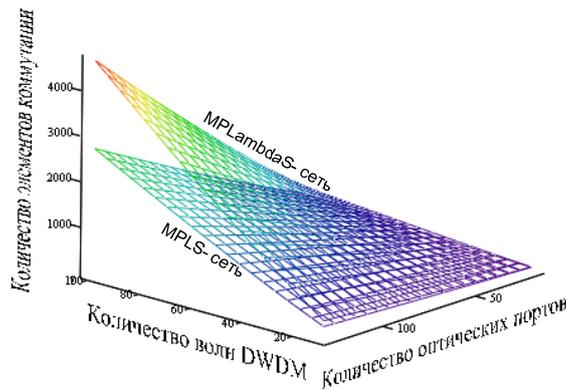


Рис. 3. Минимальное количество коммутационных элементов, необходимых для неблокирующих полностью соединенных *MPLS*-сетей и *MPλS*-сетей ( $P = 16, N_\lambda = 10 \dots 100, K_f = 16 \dots 128$ )

Таким образом, практически можно увеличить количество волновых комбинаций оптических меток в сети *MPλS* до максимального значения  $K_f = 160 \times 64 = 10240$ .

В таком случае минимальное количество коммутационных элементов *MPλS*-сети с волновым конвертером можно оценить по формуле

$$S_{MP\lambda S(WC)} = \frac{N_\lambda K_f [2(\log_p N_\lambda + \log_p K_f - \log_p V_{WC}) - 1]}{P \cdot V_{WC}}, \quad (3)$$

где  $V_{WC}$  — количество конвертируемых *WC* длин волн *DWDM*.

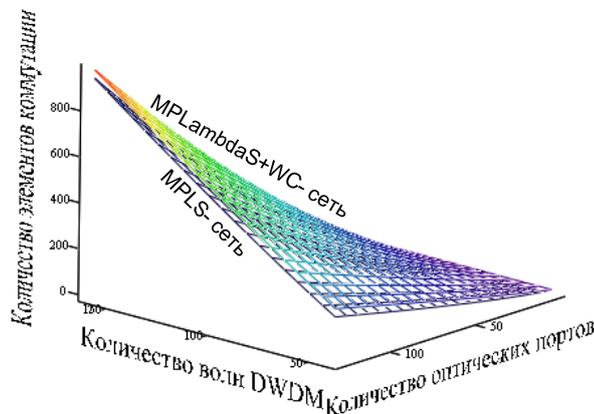


Рис. 4. Минимальное число элементов коммутации, необходимых для неблокирующих полностью соединенных *MPLS*-сетей и *MPλS* сетей с конверсией волн ( $P = 8, N_c = 16, N_\lambda = 40 \dots 160, K_f = 1 \dots 128$ )

Как видно из рис. 4, в этом случае количество требуемых коммутационных элементов при этом приблизится к значениям для *MPLS*-сетей.

Таким образом, применение новой элементной базы в сочетании с новыми стандартами и протоколами позволит оптимизировать работу *AOLS* сетей для *GRID* с минимальным количеством элементов коммутации, требуемых для неблокирующих соединений).

### ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ GRID

Оптические сети для организации работы связывающего уровня *GRID* могут представлять собой гибридную параллельную структуру, отдельные зоны в которой работают на разных технологиях (*OTN*, *SONET*, *ATM*, *MPAS*, *GMPLS* и др.). В гибридных оптических ИВС возможны несколько механизмов оптической коммутации, которые обеспечивают выполнение различных функций.

Варианты работы параллельных оптических гибридных ИВС:

1. Несколько оптических сетей, каждая из которых имеет свои ресурсы (волокна, базовые коммутаторы) (в сети *CHEETAN* трафик может быть направлен в виде пакетов через Интернет или в виде ячеек через сеть *SONET*) [5];

2. Одна физическая сеть, в которой ресурсы разделены между пакетной (*OPS*) и канальной (*OCS*) коммутацией (трансиверы и длины волн могут быть статически либо динамически распределены для каждой из технологий). Например, из  $w$  длин волн в сети  $k$  длин волн используется для передачи трафика *OPS*, а длины волн  $w-k$  используют для передачи трафика *OCS*.

В обоих случаях граничный коммутатор *ESR* принимает решение относительно выбора модели оптической сети для передачи трафика. Базовые коммутаторы (*core switches*) также должны обеспечивать поддержку установленных механизмов коммутации.

Все длины волн могут быть использованы для передачи как *OCS*, так и *OPS* трафика в технологии интегрированных гибридных оптических сетей [8].

*HOS* (интегрированная гибридная оптическая коммутация) интегрирует *OCS*, *OBS* и *OPS* [5—7]. Этот метод базируется на унифицированных пакетах управления для всех входящих типов данных. В их заголовке имеются поля, посредством которых базовый коммутатор определяет, является ли пакет управления запросом на создание оптического пути, информационным пакетом управления или заголовком оптического пакета. Затем, базовый коммутатор использует подходящий алгоритм диспетчеризации в зависимости от типа данных. В такой интеграции трафик *OCS* имеет наивысший приоритет, а *OPS* трафик имеет самый низкий приоритет. Некоторые каналы длин волн могут работать в режиме временных интервалов, а другие — в асинхронном режиме.

На рис. 5 изображена архитектура базового коммутатора *HOS* [6].

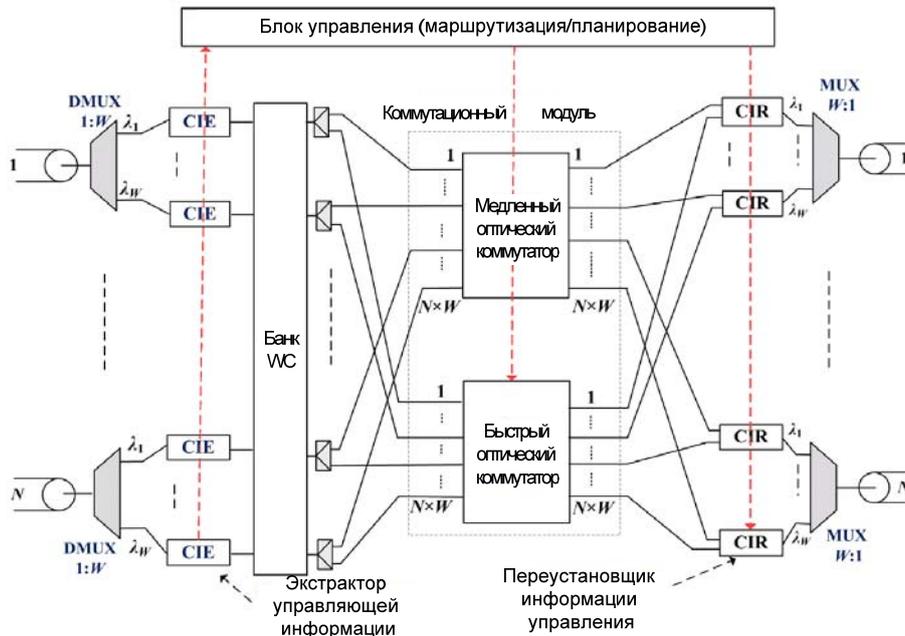


Рис. 5. Архитектура базового коммутатора *HOS* [11].

Пакеты клиентов, прибывающие на граничный коммутатор  $\lambda$ -*ESR*, *HOS* разделяются на четыре типа трафика в оптическом домене:

1. *Трафик схем OCS* (приоритетная оптическая коммутация каналов).

2. *Трафик длинных информационных пакетов OBS* (данные с низкой латентностью, широковещательный видеотрафик, скоростные данные). Пакеты направляются на каналы асинхронной длины волны.

3. *Трафик коротких информационных пакетов OBS* (интерактивный трафик в реальном времени, мультимедийный трафик).

4. *Трафик пакетов OPS* (низкоприоритетные данные).

Контрольная информация, связанная с каждым каналом длины волны извлекается блоком СЕ (экстрактором контрольной информации), а затем направляется на контроллер, в то время, как соответствующие данные направляются на модуль коммутации. Контрольный блок преобразует управляющий сигнал в электронную область и обрабатывает его, чтобы выбрать соответствующий выходной путь для данных.

Коммутационный модуль включает:

- быстродействующий волоконно-оптический коммутатор (например, на технологии SOA);
- медленный волоконно-оптический коммутатор, основанный на технологии MEMS.

Быстродействующий оптический коммутатор используется для коммутации коротких импульсов и пакетного трафика, а медленный оптический коммутатор используется для коммутации длинных импульсов и схемного трафика. Преобразователи длины волны в виде волоконных линий задержки FDL могут быть использованы для разрешения конфликтов на выходных портах после коммутации сетевого трафика, информация заголовка вставляется в оптические данные блока CIR.

Интегрированные гибридные оптические сети являются оптимальными с точки зрения использования ресурсов для GRID. Однако, им присуща слишком сложная архитектура блоков коммутации и управления.

Поэтому в качестве рабочей гибридной оптической технологии предлагается модифицированная сеть HOTARU, архитектура центрального узла которой представлена на рис. 6 [15].

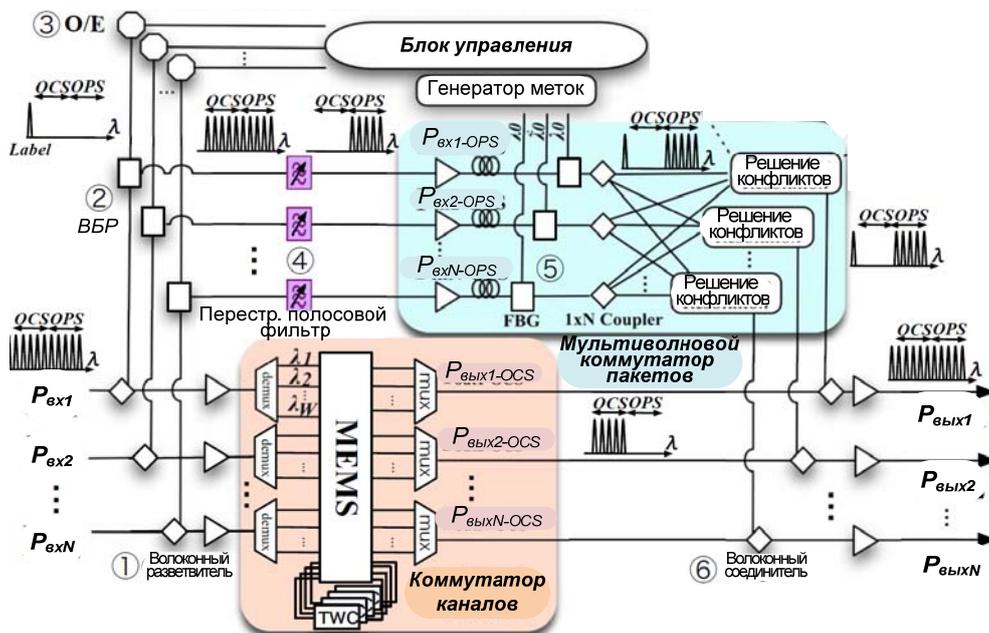


Рис. 6. Архитектура  $N \times N$  узла сети HOTARU:  $N$  — число портов,  $W$  — число длин волн [15]

Базовыми коммутаторами схемы являются коммутатор каналов (OCS) и мультиволновой коммутатор пакетов (MW-OPS). OCS построен на фотонном коммутаторе MEMS, массиве волноводных решеток AWG и перестраиваемых преобразователях длин волн TWC. Скорость переключения MEMS невысокая, но ее должно быть достаточно для размещения  $N \cdot W$  портов. MW-OPS построен на принципах широкополосной передачи с отбором по длинам волн оптических меток и состоит из волоконных решеток Брэгга ВБР, 3dB волоконных ответвителей и компонентов схем разрешения конфликтов.

Оптические коммутаторы MW-OPS должны быть широкополосными и достаточно быстрыми для коммутации множества коротких оптических пакетов на больших расстояниях.

Сеть работает следующим образом. Волоконный разветвитель (1) расщепляет общий входной сигнал (OCS+OPS) на два потока ВБР (2) и MEMS. ВБР (2) извлекает длину волны для оптических меток и передает сигнал, содержащий метки на опто-электронный преобразователь О/Е (3). Остальные волны

направляются к перестраиваемым длинноволновым полосовым фильтрам LBPf. О/Е преобразователь (3) преобразует сигнал, контроллер обрабатывает метки. Блок управления ищет выходной порт в таблице пересылки, управляет генератором меток и оптических переключателей в пределах схем разрешения конфликтов в соответствии с выходным портом сигнала.

Перестраиваемый полосовой фильтр LBPf (4) извлекает длины волн полезных волновых нагрузок (отсекая при этом область длин волн для OCS) и вновь сформированные метки объединяются в ВБР (5). Оптические пакеты переключаются на коммутаторе MW-пакетов на основе широкополосного вещания с отбором. Другое ответвление сигнала на ВБР (1) демультиплексируется и переключается с помощью MEMS. MEMS, TWC и перестраиваемый LBPf управляются с помощью протоколов установки пути сигнализации (RSVP-TE протоколов GMPLS). Объединитель (6) собирает оба сигнала в требуемый выходной порт. Максимальная полоса пропускания таких систем составила 400 Гбит/с.

Для усовершенствования HOTARU предлагается схема гибридного разрешения конфликтов с объединением  $B$  волоконных линий задержек FDL и  $r_{wc}$  конвертеров WC в выходных портах (рис. 7) [15].

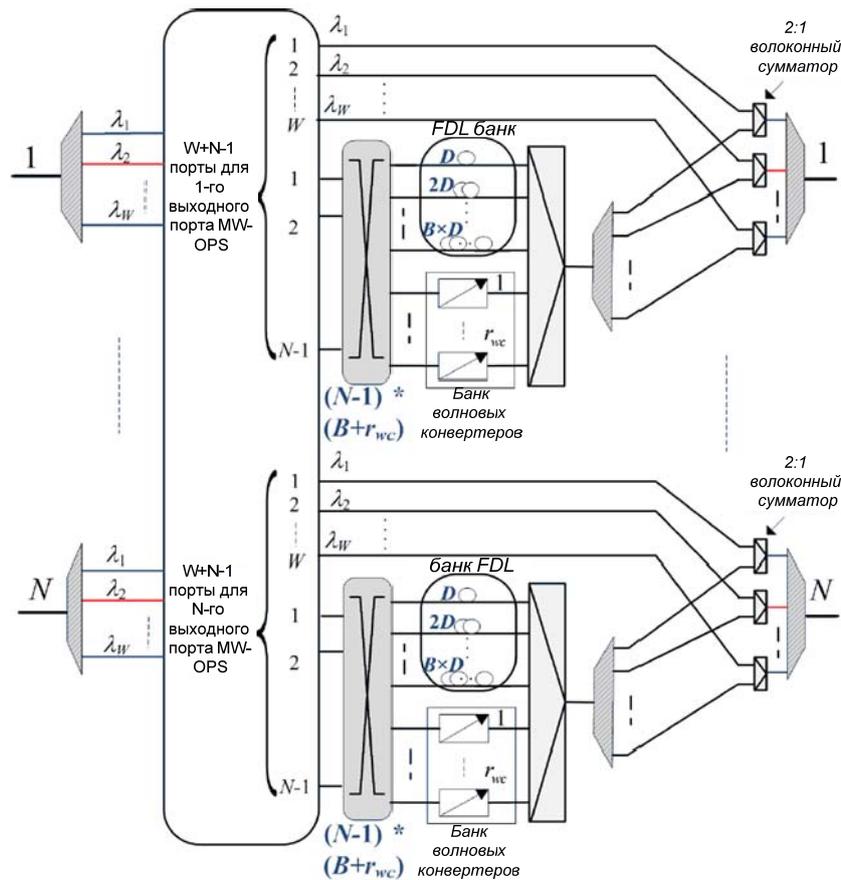


Рис. 7. Схема разрешения конфликтов для MW-OPS в HOTARU

Второе коммутационное поле размером  $(N - 1) \cdot (B + r_{wc})$  направляет конкурирующий оптический пакет в данном выходном порте либо в WC банк, либо в FDL банк. Оптические пакеты, покидающие банки объединяются сумматором, затем демультиплексируются до длины волны  $\lambda_i$  и  $\lambda_w$  а затем направляются на сумматоры 2:1. Оптический пакет, поступающий на сумматор 2:1 может не нуждаться в разрешении конфликта или требовать его разрешения (посредством преобразования либо задержки).

В данной архитектуре планировщик разрешения конфликта вначале пытается направить конкурирующие оптические пакеты через один из  $r_{wc}$  преобразователей длины волны. Если свободные WC отсутствуют, выбирается одна из FDL, чтобы задержать конкурирующий оптический пакет. Планировщик делает попытку вначале направить пакет через более короткую FDL (меньшая задержка), а затем через длинную FDL. Если в наличии нет FDL, конкурирующий оптический пакет отбрасывается.

Другим отличием реализации сети — применение в качестве второй коммутационной матрицы схемы (рис. 7) интегрированного массива элементов на волноводных ЭАМ, конструкция и выходная модуляционная характеристика которых представлены на рис. 8 [5].

Оптически управляемый чип коммутационного элемента включает в себя волновод с ЭАМ и нормально освещенный фотодетектор (PD), которые интегрированы в часть схемы на фосфиде индия (InP). Массив таких элементов позволяет преобразовывать и коммутировать длины волн в C — диапазоне.

Рис. 8 также демонстрирует эффективность модуляции переключателя, работающего на скорости передачи 40 Гбит/с.

В качестве базового элемента задержки  $D$  оптического буфера памяти предлагается использовать динамический FDL с электрооптическим модулятором света, характеристики которого детально описаны в работе [12].

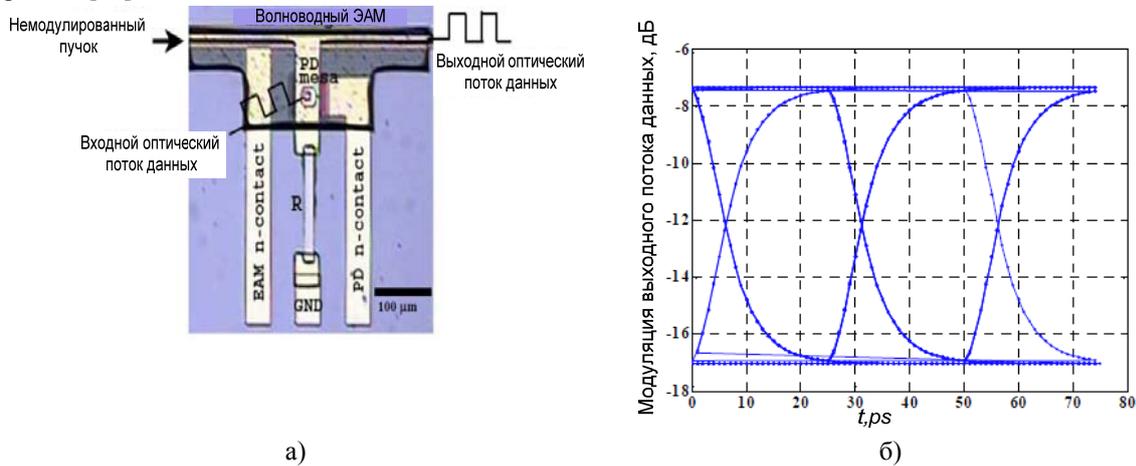


Рис. 8. Конструкция элемента (а) и модуляционная характеристика (б) коммутатора на волноводном ЭАМ [8]

При построении сетей следует учитывать ограничения предлагаемых архитектур по максимальному числу используемых длин волн, конвертеров, разветвителей и волновых линий задержки. Результаты моделирования и экспериментов показывают, что увеличение числа аппаратных средств в коммутационных узлах таких сетей выше определенного порога не приводит к дальнейшему увеличению их производительности, однако значительно увеличивает стоимость коммутации, усложняя при этом управление [10—14]. Также при этом не уменьшается ниже порога вероятность потери пакетов (рис. 9).

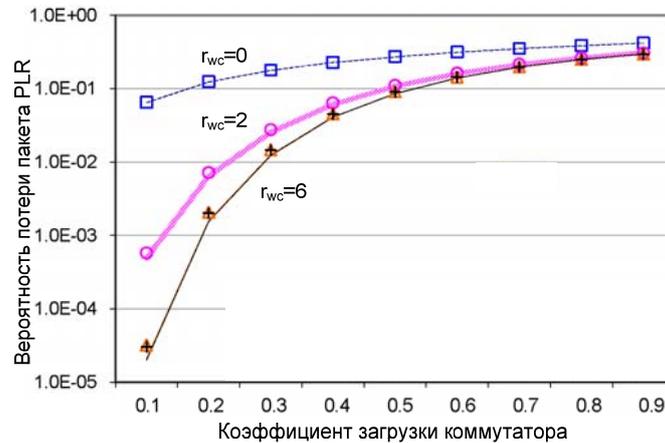


Рис. 9. Вероятность потери пакета для разного числа волновых конвертеров MW-OPS [14]

Для расчета оптимального числа элементов  $B$  задержки буферной FDL коммутатора MW-OPS используем теорию многоканальных систем массового обслуживания [3].

Вероятность наличия в буферной памяти FDL  $n$  требований определяется соотношениями [8]

$$\begin{cases} P_n = P_0 \frac{W^n \rho^n}{n!}, & 0 \leq n \leq W, \\ P_n = P_0 \frac{W^K \rho^n}{W!}, & n \geq W, \end{cases} \quad (4)$$

где  $P_0 = \left[ \frac{W^W \rho^W}{W!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^{W-1} \frac{W^n \rho^n}{n!} \right]^{-1}$ ,  $W$  — количество волновых каналов,  $\rho$  — коэффициент загрузки.

На основании (4) оптимальное число элементов  $B$  с учетом вероятности наличия в памяти  $n$  требований (запросов) определяется максимумами функций  $P_{b1}(n)$  и  $P_{b2}(n)$  для разных коэффициентов загрузки на графиках, представленных на рис. 10.

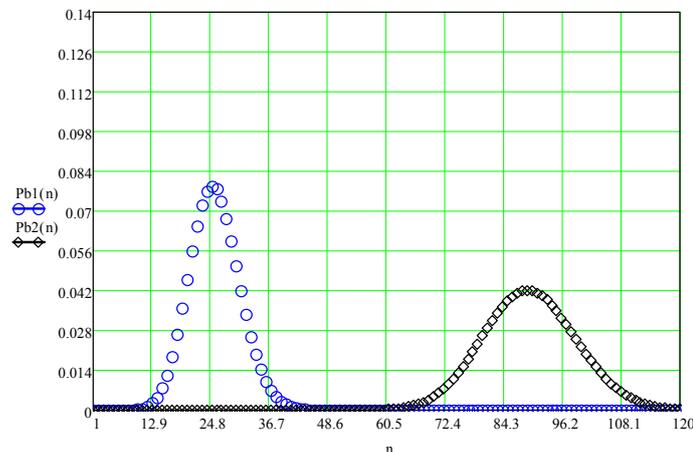


Рис. 10. Моделирование оптимального числа элементов задержки  $B$  в буфере FDL коммутатора MW-OPS

Таким образом, расчетное оптимальное число элементов  $B$  в буфере FDL коммутатора MW-OPS для числа волновых каналов  $W = 128$  и коэффициентов загрузки  $\rho_1 = 0,2$  и  $\rho_2 = 0,7$  равны соответственно  $B_1 = 26$  и  $B_2 = 92$ .

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены основные технологии и обоснована техническая возможность построения архитектуры оптической сети с фотонной многопротокольной коммутацией меток для реализации связывающего уровня распределенной ИВС типа GRID. Исследованы архитектурные особенности построения и возможности базовых коммутационных узлов для эффективной конвергенции технологий пакетной и канальной коммутации с обеспечением максимальной пропускной способности протяженных волоконных сетей на их основе. Модифицирована структура гибридной сети HOTARU в части реализации на новой элементной базе схемы разрешения конфликтов с объединением конвертеров и волоконных линий задержки буферной памяти на выходных портах. Проведена модельная оценка оптимального числа элементов задержки в буферной памяти FDL для коммутаторов MW-OPS. Использование предложенных подходов позволит увеличить полосу пропускания трактов и улучшить коммуникационное взаимодействие узлов для решения различного рода вычислительных задач в GRID.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shah Y. K. Formation and Design Considerations of Grid Architecture / Y. K. Shah et. al.// Int. J Comp Sci. Emerging Tech, 2014. — Vol. 5, No. 4. — pp. 169—176.
2. Куссуль Н. Н. Grid-системы для задач исследования Земли. Архитектура, модели и технологии: [Монография] / Н. Н. Куссуль, А. Ю.Шелестов. — К. : «Наукова думка», 2008. — 452 с.
3. Вербовецкий А. А. Новые методы и средства организации оптических суперкомпьютерных комплексов / А. А. Вербовецкий // Зарубежная радиоэлектроника. — 2001. — № 12. — С. 51—63.
4. Ben Yoo S. J. Optical-label switching, MPLS, MPLambdaS, and GMPLS / S. J. Ben Yoo // Optical Networks Magazine, 2003. — 3(6). — p. 17—31.
5. Rosen E., Viswanathan A., R. Callon. Multiprotocol Label Switching Architecture, RFC 3031, January 2001.
6. Rahbar A. G. Quality of Service in Optical Packet Switched Networks. — Wiley-IEEE Press, 2015. — 452 p.
7. Demir H. V. Scalable Wavelength-Converting Crossbar Switches / H. V. Demir et. al.// IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, 2004. — No. 10. — pp. 2305—2307.
8. Demir H. V. Multifunctional Integrated Photonic Switches/ H. V. Demir et. al.// IEEE Journal Of

- Selected Topics In Quantum Electronics, Vol. 11, 2005. — No. 1. — pp. 86—96.
9. Worldwide LHC Computing Grid [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. — Режим доступу: <http://wlcg.web.cern.ch> (дата звернення 30.11.2016) — Назва з екрана.
  10. Ukrainian National GRID [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. — Електронні дані. — Режим доступу : <http://grid.kpi.ua> (дата звернення 30.11.2016) — Назва з екрана.
  11. Маккавеев В. И. Фотонные коммутаторы / В. И. Маккавеев // Компоненты и технологии. — 2006. — № 2. — С. 142—146.
  12. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації ; [Навчальний посібник] / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лисенко. — Вінниця : ВДТУ, 2002. — 106 с.
  13. Ашраф И. М. Алькейси. Разработка и исследования модели внешнедоменной и внесетевой организаций иерархических оптических сетей на основе метода  $\lambda$ -MPLS // Наукові праці ВНТУ. — 2016. — № 2. — Режим доступу до журн. : <http://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/494/495>
  14. Shah Y. K. Formation and Design Considerations of Grid Architecture / Y. K.Shah et. al.// Int. J Comp Sci. Emerging Tech, 2014. — Vol. 5, No. 4. — pp. 169—176.
  15. Imaizumi H. HOTARU: ANovel Concept of Hybrid Optical Network Architecture Combining Multi-Wavelength Packet and Circuit Switching / H. Imaizumi et al. // Proceedings of the 15th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2009). IEEE, 2009. — Vol. 131. — pp. 549—552.

#### SPISOK LITERATURY

1. Shah Y. K. Formation and Design Considerations of Grid Architecture / Y. K.Shah et. al.// Int. J Comp Sci. Emerging Tech, 2014. — Vol. 5, No. 4. — pp. 169—176.
2. Kussul' N. N. Grid-sistemy dlya zadach issledovaniya Zemli. Arkhitektura, modeli i tekhnologii: [Monografiya] / N. N. Kussul', A. YU. Shelestov. — К. : «Naukova dumka», 2008. — 452 с.
3. Verbovetskiy A. A. Novyye metody i sredstva organizatsii opticheskikh superkomp'yuternykh kompleksov / A. A. Verbovetskiy // Zarubezhnaya radioelektronika. — 2001. — № 12. — S. 51—63.
4. Ben Yoo S. J. Optical-label switching, MPLS, MPLambdaS, and GMPLS / S. J. Ben Yoo // Optical Networks Magazine, 2003. — 3(6). — p. 17—31.
5. Rosen E., Viswanathan A., R. Callon. Multiprotocol Label Switching Architecture, RFC 3031, January 2001.
6. Rahbar A. G. Quality of Service in Optical Packet Switched Networks. — Wiley-IEEE Press, 2015. — 452 p.
7. Demir H. V. Scalable Wavelength-Converting Crossbar Switches / H. V. Demir et. al.// IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, 2004. — No. 10. — pp. 2305—2307.
8. Demir H. V. Multifunctional Integrated Photonic Switches/ H. V. Demir et. al.// IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics, Vol. 11, 2005. — No. 1. — pp. 86=96.
9. Worldwide LHC Computing Grid [Yeletkronnyy resurs]: [Veb-sayt]. — Rezhim dostupa: <http://wlcg.web.cern.ch> (data obrashcheniya 30.11.2016) — Nazvaniye s ekrana.
10. Ukrainian National GRID [Yeletkronnyy resurs]: [Veb-sayt]. — Yeletkronni daní. — Rezhim dostupu: <http://grid.kpi.ua> (data zvernennya 30.11.2016) — Nazva z yekrana.
11. Makkaveyev V. I. Fotonnyye kommutatory / V. I. Makkaveyev // Komponentny i tekhnologii. — 2006. — № 2. — S. 142—146.
12. Volokonno-optichni strukturi komutatsii ta peredachi informatsii ; [Navchal'niy posibnik] / V. P. Kozhem'yako, S. V. Pavlov, T. B. Martinyuk, G. L. Lisenko. — Vinnitsya : VDTU, 2002. — 106 s.
13. Ashraf I. M. Al'keysy. Razrabotka i issledovaniya modeli vneshnedomenoy i vnesevoy organizatsiy iyerarkhicheskikh opticheskikh setey na osnove metoda l-MPLS // Naukoví pratsi VNTU. — 2016. — № 2. — Rezhim dostupu do zhurn.: <http://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/494/495>
14. Shah Y.K. Formation and Design Considerations of Grid Architecture / Y.K.Shah et. al.// Int. J Comp Sci. Emerging Tech, 2014. — Vol. 5, No. 4. — pp. 169-176.
15. Imaizumi H. NOTARU: ANovel Concept of Hybrid Optical Network Architecture Combining Multi-Wavelength Packet and Circuit Switching / H. Imaizumi et al. // Proceedings of the 15th

Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2009). IEEE, 2009. — Vol. 131. — pp. 549—552.

Надійшла до редакції 20.12.2016 р.

**ЛЫСЕНКО ГЕННАДИЙ ЛЕОНИДОВИЧ** — к. т. н., профессор, профессор кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, E-mail: [lg1@vntu.edu.ua](mailto:lg1@vntu.edu.ua)

**ТУЖАНСКИЙ СТАНИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ** — к. т. н., доцент, доцент кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, E-mail: [slavat@vntu.edu.ua](mailto:slavat@vntu.edu.ua)

**АШРАФ И. М. АЛЬКЕЙСИ** — соискатель кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, E-mail: [ashrafalqaisi1978@gmail.com](mailto:ashrafalqaisi1978@gmail.com)