

УДК 004.7; 621.391

Г. Л. ЛЫСЕНКО, В. И. МАЛИНОВСКИЙ, А. И. МАЛЬКЕЙСИ²

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УПЛОТНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ТРАФИКА НА БАЗЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ GRID- СЕТЕЙ

Винницький національний технічний університет,
21021, г. Винница, ул. Хмельницькое шоссе 95, Украина
E-mail: lg1@yntu.edu.ua

Аннотация. Исследованы методы и технологии оптических распределенных сетей с многопротокольной 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 метод та технології оптичних розподілених мереж з мультипротокольною 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 ПТ, оптичні транспортні технології, грид-обчислення, квантовий комутатор, багатопротокольна оптична комутація міток.

Abstract. We studied the method and technology of optical distributed 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 задач требует организацию мощных сетевых информационно-вычислительных платформ. Стремительный рост трафика данных в информационно-вычислительных сетях (ИВС) обуславливает потребность в разработке новых быстродействующих параллельных средств и методов передачи данных в распределенных сетях на базе GRID. Решением проблемы быстродействия ИВС является организация параллельного выполнения большого числа операций с использованием распределенной структуры вычислений.

Распределённые вычисления предполагают использование группы объединённых 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* [2-3].

Одной из перспективных технологий наряду с облачными вычислениями (*cloud computing*), позволяющей существенно снизить стоимость выполнения вычислительных операций, является технология грид-вычислений (*GRID*) [1-3, 9-10]. Архитектура *GRID* позволяет координировать

² © Г. Л. Лысенко, В. И. Малиновский, А. И. Малькейси, 2017

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.

Оптический связывающий транспортный канал современной GRID-сети должен обеспечивать высокую пропускную способность (≥ 100 Гбит/сек) на протяженных участках между узлами. В качестве транспортной технологии для GRID предлагается усовершенствованная архитектура на базе λ -MPLS.

Технология λ -MPLS использует для объединения в скоростные магистрали каналов ИВС маршрутизаторы λ -ESB, которые взаимодействуют с пограничными роутерами λ -ESR и формируют кадры с оптическими метками λ_k . Для увеличения спектральной эффективности каналов при скоростной коммутации в современных оптических сетях с DWDM активно применяют методы квадратурной амплитудной (QAM, DQAM) и фазовой (QPSK, PM-QPSK) модуляции сигналов [12,16].

Канал распределенной GRID-сети на базе $MPLS$ -метода с пропускной способностью 100-Gbps и более будет строиться на различной комбинации многих сигналов более низких скоростей, так как очень мало отдельных приложений сегодня используют эту высокую пропускную способность. Такие аппаратные решения в объединении с междоменными λ -ESB (Boundary) маршрутизаторами в λ -MPLS-домене предназначены для объединения низкоскоростных мультиплексированных каналов внутри домена в высокоскоростные магистрали с пограничными λ -ESB маршрутизаторами с минимальным временем формирования кадра с разными метками λ_k для формирования каналов с более высокой скоростью. Такая обобщенная схема (рис. 11) используется для оптимального повышения скорости для всей полосы пропускания междоменной модели ИВС на базе λ -MPLS, так как она ограничена скоростью времени мультиплексирования и демультиплексирования компонент.

Также активно применяется квадратурная модуляция QAM [12,14] и ее разновидности xPM -QAM (DQAM) в составе методов PSK –сжатия с одновременным, как с временным разделением (TDM) сигналов, так и в сочетании со спектральным уплотнением WDM в волоконно-оптических трактах, которое может быть осуществлено и в электрической и в оптической области, с каждым меньшей скорости канала передачи бит/с (пакет/с) в заданном временном интервале с ожиданием своей очереди маршрутизации и передачи на скоростях < 100 -400Gbps.

Структура и метод сжатия с применением TDM-WDM мультиплексированием с xPM -QAM модуляцией в $MPLS$ сетях базируется на принципах конвергенции IP-трафика потоков информации с общими заголовками «следования» с помощью комплексного наложения подходов мультиплексирования и модуляции информационных потоков: сначала с помощью TDM-временного, затем WDM-спектрального уплотнений, а затем с помощью скоростной модуляции xPM -QAM (как правило DQAM, как самого перспективного). Обобщенная модель показана на рис. 1

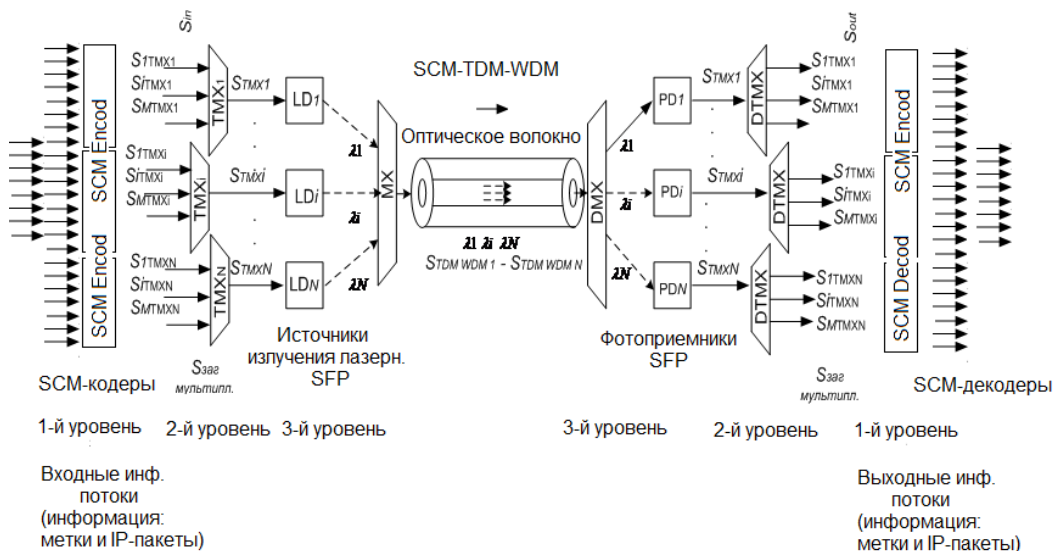


Рис. 1. Структурная модель системы сжатия на базе метода с применением 3-х уровневое SCM-TDM-WDM мультиплексирования

Комплексное наложение временных и спектральных методов мультиплексирования и скоростной модуляции по уровням сигнала дает возможность максимально эффективно (быстро и плотно) сжимать и передавать IP-трафик в $MPLS$ сетях. Причем комплексное применения технологий TDM модуляции и

сжатия пакетов происходит на сетевом и транспортном (L2-L3) уровне модели OSI, а применение спектрального сжатия WDM с xPM-QAM-модуляцией на физическом (L1) уровне этой модели. Так IP пакеты с общими заголовками и адресом назначения следующего пограничного λ -ESR маршрутизатора формируются в памяти буфера в одном временном фрейме T_i и направляются на QAM модулятор для последующего сжатия по отдельным каналам, после чего уплотняются блоками TDM сжатия по параллельным каналам. Процесс модуляции PSK и сжатия TDM происходит одновременно в одном временном интервале после чего потоки направляются на соответствующие каналы WDM-мультиплексоров для сжатия их на спектральном уровне. На выходе WDM-мультиплексора, который входит в состав λ -ESR маршрутизатора формируются новые IP-пакеты с уплотненной информацией с параллельных каналов и общим маршрутом (адресом) назначения следующего λ -ESR-маршрутизатора. После чего к таким пакетам прикрепляется метка с адресом назначения этого λ -ESR-маршрутизатора и он направляется в волоконно-оптический тракт для передачи на этот маршрутизатор назначения. Таким образом данный метод, отличается от известных тем, что предварительно информационные потоки с IP-пакетами с общим адресом назначения последующего λ -ESR-маршрутизатора уплотняются с помощью комплексного применения группы трехуровневых методов QAM-TDM-WDM и на выходе формируются новые уплотненные потоки информации с IP-пакетами с общим маршрутом следования, на которые прикрепляется спектральная метка.

Структурная схема метода уплотнения пакетов для λ -MPLS сетей представлена на рис.2.

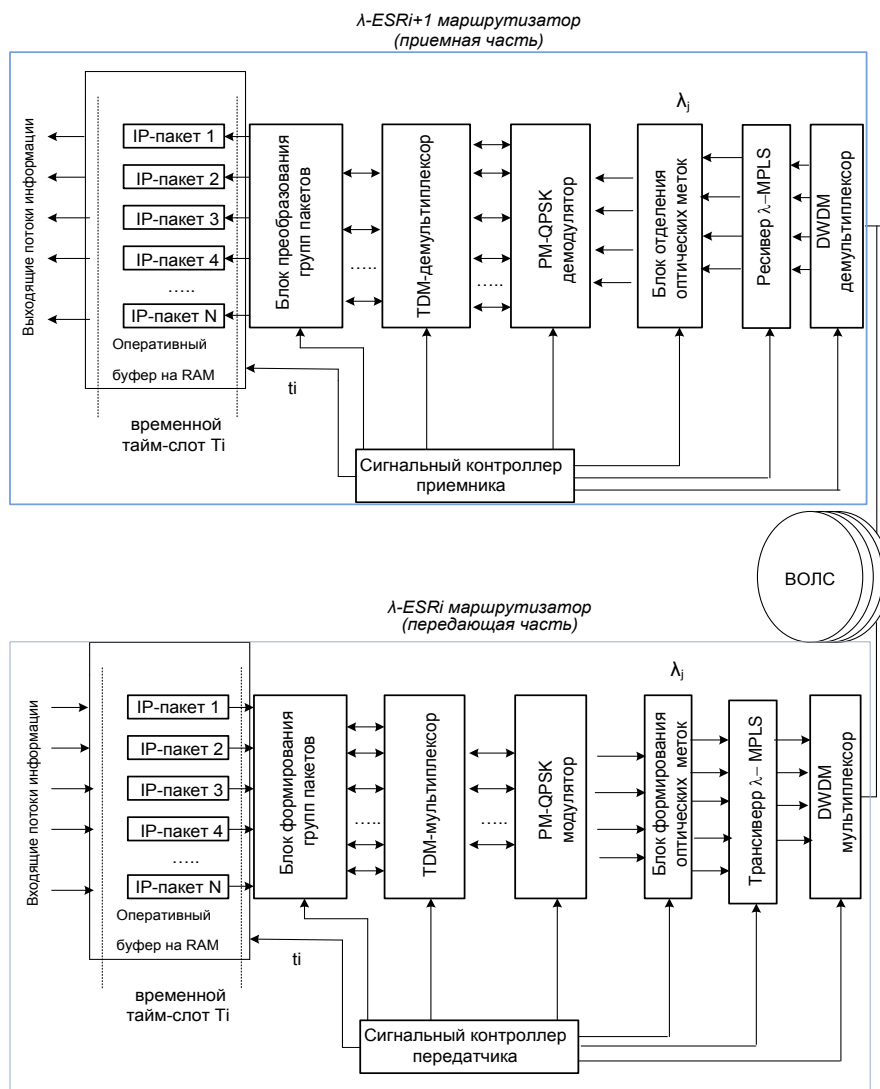


Рис.2. Обобщенная схема взаимодействия λ -ESR маршрутизаторов метода организации информационных потоков сети λ -MPLS с комплексной модуляцией и уплотнением PM-QPSK+TDM+DWDM

Для оптимізації полоси пропускання оптичного транспортного каналу розподіленої ІВС пропонується метод організації потоків для взаємодії λ -ESR маршрутизаторів, в якому техніка когерентної фазової модуляції сигналів комбінується з часовим і хвильовим мультиплексуванням оптичних пакетів. Для цього на прийомо-передаючому рівні мережі λ -MPLS в транспондері маршрутизатора пропонується застосувати когерентну фазову модуляцію сигналів PM-QPSK в поєднанні з часовим (TDM) і хвильовим ущільненням (за технологією DWDM) каналів в волоконно-оптичних трактах. Такий підхід дозволяє здійснити ущільнення інформації на електронному і на оптичному рівні в заданому часовому інтервалі, забезпечивши максимальні значення пропускної спроможності мережі (до 300-400 Гбіт/сек з збереженням максимальної дальності зв'язу).

Комплексне поєднання часових і спектральних методів мультиплексування зі швидкісною модуляцією сигналу дозволить більш ефективно стиснути і передавати IP-трафік в MPLS мережах. Застосування TDM модуляції і ущільнення пакетів відбувається на мережевому і транспортному (L_2 - L_3) рівнях моделі OSI, а спектрального стиснення DWDM з PM-QPSK-модуляцією – на фізичному L_1 рівні мережевої моделі.

Метод організації потоків між λ -ESR маршрутизаторами розподіленої ІВС типу λ -MPLS для IP-комутації пакетів на базі технології комплексної модуляції і ущільнення PM-QPSK+TDM+DWDM складається з передаючої і прийомної частин.

Послідовні етапи роботи передаючої частини транспондера λ -ESR маршрутизатора:

1. В буфері обміну i -го маршрутизатора в часовому вікні T_i збирається група IP-пакетів з загальними заголовками (адрес призначення – $i+1$ -й маршрутизатор мережі).
2. Електронний блок формування груп пакетів формує групові потоки IP-пакетів в часовому слоті T_i і направляє їх на TDM – мультиплексор.
3. TDM – мультиплексор виконує ущільнення груп IP-пакетів в часовому інтервалі, скорочуючи кількість потоків з різних джерел з загальним адресом призначення (к $i+1$ -му маршрутизатору).
4. Потоки IP-пакетів поступають в електронному вигляді на модулятори, які виконують когерентну поляризаційно-чутливу квадратурну фазову модуляцію сигналів PM-QPSK. Метод модуляції обраний як один з найбільш перспективних з точки зору збільшення спектральної ефективності при максимальній дальності зв'язу [16].
5. Блок формування меток присвоює сформованим групам пакетів оптичні метки з набору можливих довжин хвиль для заголовків λ_j . Преобразовані в оптичну форму з допомогою лазерних трансиверів пакети, сформовані на відповідних довжинах хвиль λ_j з набору DWDM, направляються на DWDM-мультиплексор.
6. DWDM-мультиплексор виконує хвильове ущільнення інформаційних каналів на довжинах хвиль пакетів λ_j (частотна сітка 25ГГц) для наступної передачі пакетів через волоконно-оптичний тракт ВОЛС на наступний $i+1$ -й λ -ESR-маршрутизатор (або в інший пункт призначення).

Прийомна частина транспондера виконує зворотні перетворення в такому порядку:

1. Пришедші на λ -ESR-маршрутизатор оптичні IP-пакети з волоконно-оптичного тракту направляються через DWDM-демультиплексор, який виконує спектральне розділення хвильових каналів і їх передачу на відповідні ресивери згідно сформованим по λ_j потокам.
2. Відокремлення груп пакетів згідно відповідним довжинам хвиль заголовків λ_j здійснюється в блоці відокремлення меток.
3. Преобразовані в електронну форму відокремлені IP-пакети направляються на TDM-демультиплексор, який виконує другу ступінь декомпресії потоків по часовим інтервалам з формуванням розширених груп IP-пакетів.
4. Розширені групи IP-пакетів направляються на PM-QPSK-демодулятор, де відбувається когерентна фазова демодуляція і декодування інформації з наступним направленням IP-пакетів в блок перетворення груп пакетів.
5. Блок розподілення груп пакетів розподіляє IP-пакети в відповідності з їх адресом призначення на відповідні порти кінцевого λ -ESR-маршрутизатора згідно таблиці маршрутизації і оптичної метки групи IP-пакетів. Демодульовані IP-пакети направляються в буфер оперативної пам'яті RAM кінцевого λ -ESR-маршрутизатора для наступної паралельної комутації на відповідні порти або перенаправлення в мережу згідно адресу призначення.

Сигнальні контролери λ -ESR-маршрутизаторів (швидкісні FPGA) здійснюють оперативне управління процесами передачі, кодування-декодування і модуляції-демодуляції, що дозволяє функціонувати пристрою мережі λ -MPLS з максимальним швидким реагуванням, а також обробляти і передавати великі об'єми IP-трафіка в оптичних сегментах мережі λ -MPLS.

Таким чином, в запропонованому методі інформаційні потоки з IP-пакетами з загальним адресом призначення наступного λ -ESR-маршрутизатора попередньо обробляються з допомогою комплексного ущільнення і модуляції PM-QPSK+TDM+WDM. На виході транспондера формуються

уплотненные во времени по длинам волн спектральные потоки с вложенными IP-пакетами, которые отправляются по маршрутам согласно прикрепленной оптической метке.

Подход позволяет реализовать комплексное сжатие потоков информации без изменения структуры пакета IP, что позволяет использовать этот универсальный метод в традиционной структуре оптических транспортных IP-сетей.

Для полного использования полосы пропускания оптического кабеля к описанному методу следует добавить технологию пространственной коммутации оптических волокон, выполняемую с помощью техники оптических переключателей (GMPLS, стандарт RFC 3945) [4]. В таком случае сигнал на входе в волокно может быть направлен маршрутизатором λ -ESB или λ -ESR на любой выходной оптический порт. При этом N входных меток оптического волокна могут быть соединены между собой с $N_{\lambda k}$ портами с помощью матрицы оптических переключателей N_k . Однако в них каждый оптический канал занимает свою пространственную координату, и другие каналы не могут быть переданы одновременно. Для устранения блокировок дополнительно создается матрица пространственной коммутации на уровне L3.

Суммарная полоса пропускания оптоволоконного канала ИВС на физическом уровне L1 может быть оценена с учетом дисперсии оптического волокна τ_z , увеличения спектральной эффективности C_{psk} и числа волновых каналов DWDM опускания в ВОЛС по формуле [12]:

$$W_F = \frac{0.44 N_{TDM} \cdot N_{\lambda} \cdot C_{PSK}}{\tau_z} \quad (1)$$

Расчет оценки приведенной на 500 км пропускной способности волоконного канала с учетом $N_{TDM} = 2$, $C_{PSK} = 4$, $N_{\lambda} = 160$ при суммарной (с учетом поляризационной модовой) дисперсии волокна порядка 2,5 пс/км дает значение ~ 450 Гбит/сек.

С учетом количества волоконных жил в кабеле N_F суммарная пропускная способность модифицированной сети λ -MPLS увеличится: пропорционально их числу:

$$W_{\lambda-MPLS} = W_F \cdot N_F = \frac{0.44}{\tau_z} N_{TDM} \cdot N_{\lambda} \cdot C_{PSK} \cdot N_F \quad (2)$$

Таким образом, при реализации предложенного подхода, теоретическое предельное значение полосы пропускания ИВС составит $W_{\lambda-MPLS} \geq 10$ Тбит / сек.

По сравнению с традиционной структурой сетей AOLS при оптическом наложении меток в нашем подходе достигается возможность гибкой маршрутизации с потоковым трехуровневым уплотнением данных, хотя производительность конечных узлов сети и ограничена традиционными трактами с электронной IP-инфраструктурой. При этом на магистральном уровне за счет потенциального роста числа длин волн для передачи в OMPLS трактах (при том же числе меток) выполняется конвергенция большего числа потоков информации в линейном оптическом тракте. Также данный метод интегрируется в архитектуру существующих сетей λ -MPLS, расположенную поверх технологий ATM.

Стандарт GMPLS [5, 6] имеет похожую архитектуру реализации и также обеспечивает высокие характеристики пропускной способности оптических MPLS каналов и сегментов сетей на их основе. Тем не менее GMPLS имеет ряд недостатков, обусловленных нагромождением длин волн и сложностью аппаратной реализации, что приводит к большим ресурсным затратам, значительно усложняя его внедрение на практике в существующую архитектуру сетей.

Общее количество каналов, которые можно уплотнить с помощью сочетания технологий TDM и WDM можно определить на основании числа M входов мультиплексоров для TDM и N для WDM как $C_{mix} = M \cdot N$.

Современные одномодовые лазерные источники излучения для ВОЛС (DBR - лазеры) имеют ширину спектра порядка 0.1 нм [12]. При таком интервале технология DWDM позволяет разместить до 200 каналов на длинах волн $\lambda_1 - \lambda_N$ при полосе пропускания 2,5-10 Гбит/с на канал. При этом информационная емкость одного волоконного канала составит 500 Гбит/с и более, что позволяет реализовать необходимую для GRID пропускную способность на магистральных сегментах сети $MPLS$.

Таким образом, внедрение в технику передачи информации λ -MPLS на базе ВОЛС комплексных технологий сжатия PS-QPSK+TDM+WDM открывает перспективы использования каналов λ -MPLS в распределенных сетях GRID с конвергенцией разнородного трафика для распределенных вычислений.

Основной проблемой при этом остаются высокие аппаратные и ресурсные затраты из-за сложной архитектуры $MPLS$ и дорогостоящих оптических λ -ESR-маршрутизаторов, которые увеличиваются пропорционально росту размерности элементов и числа волоконно-оптических каналов сети λ -MPLS.

Очевидно что сравнивая традиционные сети TCP/IP на базе OSPF или EIGRP маршрутизаторами, λ -ESB MPLS ИВС будут иметь значительно большее общее время латентности по сравнению с традиционными λ -ESR маршрутизаторами. $T_Z \lambda\text{-ESB} \gg T_Z \lambda\text{-ESR}$ за счет агрегации содержимого IP-трафика в магистральных каналах между доменами λ -MPLS и менее быстрой коммутации (L3).

Пропускная способность внешнедоменной магистрали с коммутацией пакетов и статистическим мультиплексированием и λ -MPLS определится как:

$$BW_{\lambda\text{-MPLS}(\lambda\text{-ESB})}(i) = C_{\text{MPLS}} \times \frac{\bar{L}_{\text{layer}}(i)}{\bar{L}_{\text{packet}}(i+1)} \cdot K_{\text{usable}} \cdot R(i) \cdot K_{\lambda\text{-ESB}} \quad (3)$$

где $\bar{L}_{\text{layer}}(i)$ и $\bar{L}_{\text{packet}}(i+1)$ – слои иерархии сети ИВС на базе и λ -MPLS; K_{usable} – коэффициент использования слоя ; $R(i)$ – функция распределения пакетами нагрузки сети по слоям; $K_{\lambda\text{-ESB}}$ – коэффициент распределения скорости на λ -ESR маршрутизаторах.

По сравнению с традиционной структурой сетей MPLS в том числе и GMPLS на базе оптического наложения метки λ_k в усовершенствованной структуре достигается возможность гибкой маршрутизации и потокового трехуровневого сжатия данных, однако общая производительность междоменной сети будет ограничиваться традиционными трактами с электронной IP-инфраструктурой. За счет использования меньшего числа конечных оптических сигналов в оптических OMPLS трактах и большого числа их на входе с одинаковым количеством меток λ_k в ВОЛС выполняется конвергенция большого числа потоков информации в сам основной оптический тракт с соответствующими длинами волн λ_j и λ_k , необходимых для выделения передачи большого количества трафика. Также данный метод может гармонически ложиться в архитектуру существующих сетей λ -MPLS расположенную поверх технологий ATM или FrameRelay передаются IP-пакеты.

Последняя разработка стандарта MPLS - его разновидность GMPLS согласно спецификации RFC3031 имеет похожую архитектуру реализации, за исключением некоторых особенностей прохождения и организации пакета в структуре пограничных маршрутизаторов LSR. Это дает возможность реализовать максимальные характеристики пропускной способности оптических MPLS каналов и сегментов сетей на их основе.

Стандарт и технология GMPLS и его оптическая разновидность λ -MPLS концептуально похожи на технологии MPLS, но вместо того, чтобы использовать явную отличительную метку на пути прохождения пакета – LSP на каждом пограничном маршрутизаторе LSR, некоторые физические свойства полученного потока данных и структура пакетов информации различны и используют следующие комбинационные схемы организации пакетов данных:

- с помощью временного интервала (так называемый time slot – «тайм слот») в пакете данных для идентификации пути прохождения (маршрута следования) – LSP, по каналу передачи данных с технологии временного разделением каналов TDM;
- с использованием длины волны для идентификации маршрута следования LSP, по каналу связи с различными длинами волн с разделением каналов на базе технологии WDM;
- с использованием волоконного порта и сокета, на котором принимается пакет данных.

Поэтому пути прохождения пакета LSP согласно технологии GMPLS являются неявно помечеными в сетях GMPLS в отличии от сетей MPLS и образуются динамически, в зависимости от различного рода факторов.

Протоколы сетей GMPLS могут быть использованы для установления этих путей прохождения пакетов данных LSP, и для схемы распределения пакетного трафика. Так, с помощью комплексного применения технологий TDM и WDM LSP-трафик коммутируется с основного на непрерывный в постоянном свойстве потока данных - поток данных не включается в один пакет за один раз. Это позволяет достаточно эффективно реализовать передачу данных с нуля для каждого пакета и средства его поиска в сети, что делает технологию GMPLS весьма подходящим протоколом для работы в сетях с высокой пропускной способностью.

Кроме этого, операция пересылки трафика пограничными маршрутизаторами LSR, в сети GMPLS аналогична традиционной технологии MPLS, где на каждом пограничном маршрутизаторе LSR, неявная метка полученных данных определяет исходящий интерфейс и неявную метку, с помощью которой осуществляется передача.

Тем не менет перспективная технология GMPLS не лишена недостатков, в основном обусловленных в первую очередь нагромождением длин волн, что приводит к аппаратным, ресурсным и

часто временным затратам и зачастую значительно усложняет внедрение GMPLS на практике в существующую архитектуру сетей.

Для решения этих проблем необходимо разработка новых подходов на основе комбинационной реализации структуры пакета с параллельным сокращением длин волн и универсальной пакетной коммутацией.

В существующей архитектуре распределенных информационно-вычислительных сетях, построенных на базе технологии λ -MPLS существует весома проблема накопления длин волн (спектральных каналов) в виде меток пакетов при увеличении количества узлов сети. Эта проблема приводит к существенному увеличению аппаратных затрат и соответственно стоимости оборудования для таких распределенных GRID-сетей.

Для решения данной проблемы необходима разработка нового метода коммутации пакетов λ -MPLS с существенно меньшим числом длин волн λ_j , соответствующим меткам, что позволит сократить аппаратные затраты на оптические компоненты и WDM-тракты. Подходом к этому может быть использование динамической длительности пакетов (рис.13, рис.14).

Известно [14], что как традиционная технология MPLS, так и оптическая λ -MPLS предполагает размещения одной метки на один IP, ICMP пакет, значение которой может меняться на протяжении пути следования пакета в канале (рис.3.).

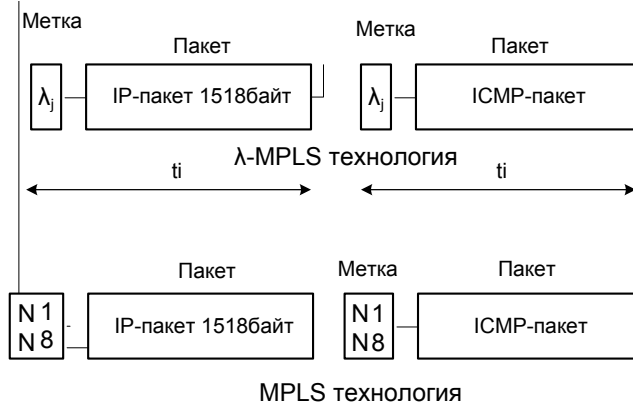


Рис.3. Примеры пакетов с меткой традиционной MPLS и оптической λ -MPLS технологий с полными длительностями пакетом t_i пакетами нагрузки сети по слоям.

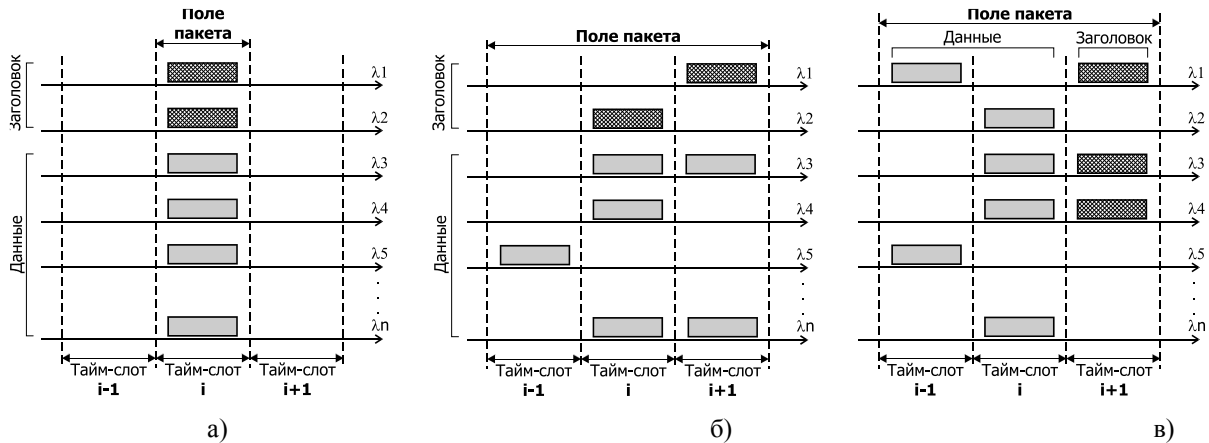


Рис. 4. Структуры пакетов с фиксированной длительностью;

а) – с внутрислотовым делением по длине волны; б) – с временным делением по длине волны; в) – с делением по времени.

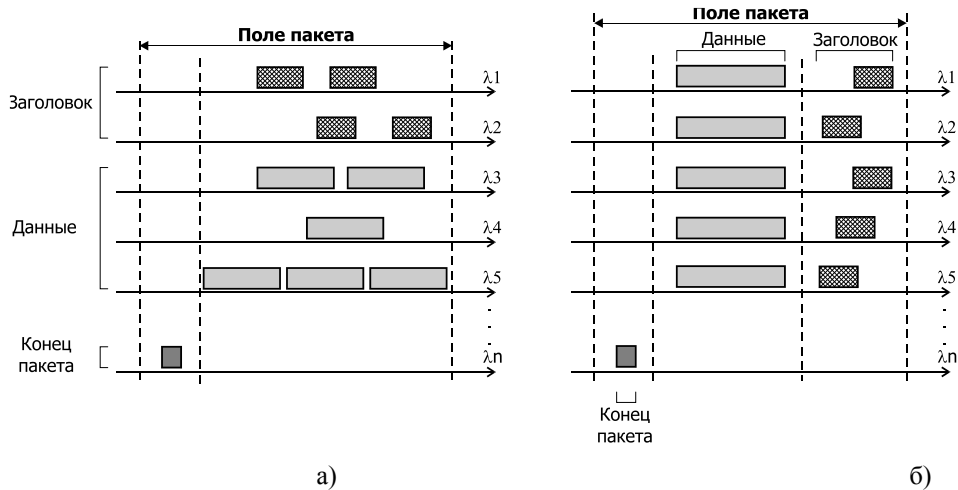


Рис.5. Структуры пакетов с условной длительностью

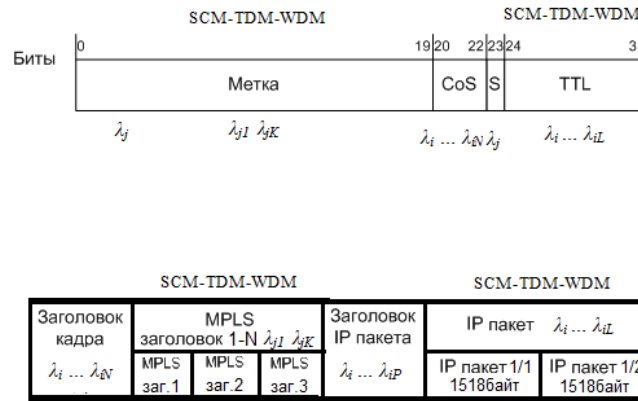


Рис. 6. Структуры λ -MPLS пакетов с условной длительностью, сформированные с помощью метода комплексного сжатия

Средний размер Internet-пакета (IP- пакета) в междоменной такой λ -MPLS сети составляет 1518 бит. Каждый пакет содержит сервисную информацию протоколов IP (20 байт), TCP (от 20 до 25 байт), HDLC (6 байт), причем последняя опускается при коммутации по λ -MPLS (1500-битный пакет IPv4 содержит 320 бит служебной информации L service на уровнях L2-L3 и 2064 бита данных B_{data}). Кроме этого, перед передачей на AAL3 к каждому пакету присоединяется дополнительно 8 байт фрейма AAL3, и 8 байт LLC/SNAP, и 2бита LLC/SNAP/ λ -MPLS т.е. Кроме этого, перед передачей на AAL3 к каждому пакету присоединяется дополнительно 8 байт фрейма AAL5, и 8+2 байт LLC / SNAP.

Общее количество каналов которые можно уплотнить с помощью сочетания технологий TDM и WDM можно определить исходя из количества входов мультиплексоров M для TDM и N для WDM, как $S_{сум} = M \cdot N$.

Увеличение количества каналов, которые мультиплексируются можно определить при условии соответствия соединению каждого волнового мультиплексора WDM – с одним мультиплексором TDM, как общее количество $S_{заг.мультипл.}$ входных сигналов $S_{TMX} 1 \dots N$ у ВОЛС каналах λ -MPLS сети :

$$S_{TDM-WDM} = N \cdot \sum_{i=1}^M S_{TMXi} \quad (4)$$

Современные одномодовые лазерные источники излучения для ВОЛС (например, как DBR - лазеры) имеют ширину спектральной полосы меньшую с 0.1 нм [12]. При таких условиях, при интервале между соседними полосами 0.8нм (технология WDM можно разместить до 50 каналов на длинах волн $\lambda_1 - \lambda_N$ при полосе пропускания в 2.5 -10Гбит/с на каждый канал, что можно обеспечить в магистральных каналах λ -MPLS на основе оптоволоконного проводника. При таких условиях полная емкость одного волоконно-оптического канала составит 125-500Гбит/с и более, что является вполне достаточным для реализации необходимой пропускной способности в магистральных сегментах сети MPLS.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА λ -MPLS В СТРУКТУРЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ GRID-СИСТЕМЫ

Структура и количество сервисов распределенной grid-системы показано на рис. 7. Для решения задачи оценки эффективности применения модифицированного метода уплотнения λ -MPLS в Grid-системах и определения области его ограничений, необходимо рассмотреть модель формирования загрузки Grid-системы в разные моменты времени, когда распределенный трафик будет неравномерен по времени, а пиковые моменты его появления будут описаны нормальным законом распределения.

Выигрыш по продуктивности в GRID MPLS сетях будет зависеть от значения максимальной полосы пропускания (5) такой комплексной модели на физическом уровне (L1) можно оценить минимальным временем передачи заголовка пакета $T_{загMPLS}$, которое определяется следующим соотношением:

$$T_{загMPLS} = m(T_p + T_{MPLSD} + D(K_{MPLS} - 1)\Delta\lambda_{MPLS}L), \quad (5)$$

где T_{MPLSD} – время латентности при доменном взаимодействии grid mpls архитектуре.



Рис. 7. Структура и количество сервисов распределенной Grid-системы

MPLS ИВС будут иметь значительно большее общее время латентности по сравнению с традиционными λ -ESR маршрутизаторами. $T_Z \lambda\text{-ESB} \gg T_Z \lambda\text{-ESR}$ за счет агрегации содержимого IP-трафика в магистральных каналах между доменами λ -MPLS и менее быстрой коммутации (L3).

Пропускная способность внешнедоменной магистрали с коммутацией пакетов и статистическим мультиплексированием и λ -MPLS определится как:

$$BW_{\lambda\text{-MPLS}(\lambda\text{-ESB})}(i) = C_{\text{MPLS}} \times \frac{\bar{L}_{\text{layer}}(i)}{\bar{L}_{\text{packet}}(i+1)} \cdot K_{\text{usable}} \cdot R(i) \cdot K_{\lambda\text{-ESB}} \quad (6)$$

где $\bar{L}_{\text{layer}}(i)$ и $\bar{L}_{\text{packet}}(i+1)$ – слои иерархии сети ИВС на базе и λ -MPLS; K_{usable} – коэффициент использования слоя; $R(i)$ – функция распределения пакетами нагрузки сети по слоям; $K_{\lambda\text{-ESB}}$ – коэффициент распределения скорости на λ -ESR маршрутизаторах.

Функция распределения пакетами нагрузки сети $R(i)$ по слоям для решения задачи оценки максимальных возможностей применения усовершенствованного метода в распределенных Grid-системах можно задать нормальным законом распределения, как основным. При этом, в компьютерной модели должно предусматриваться правило формирования пакетов с максимальным уровнем соответствия и точностью процессу образования и преобразования импульсов на оптоэлектронной элементной базе. В частности временные характеристики образования пакетов в реальных распределенных системах могут быть наиболее точно описаны нормальным законом распределения (распределение Гаусса) с плотностью распределения [14]:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - M\xi)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

де $M\xi$ – математическое ожидание; $D\xi = \sigma^2$ – дисперсия.

Закон нормального распределения описывается полной функцией распределения [6]:

$$F(x) = p(\xi \leq x) = \Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x - M\xi)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (8)$$

Формулы (7) и (8) позволяют проводить оценку границ образования случайных величин при построении компьютерной имитационной модели, которым является параметры пакетной загрузки ($R(i)$), которые получаются от значений скорости вычисления элементов распределенной вычислительной системы grid в имитационной модели ее работы.

Таким образом конкретная функция пакетной загрузки $R(i)$ будет описана, как

$$R(i) = F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x - M\xi)^2}{2\sigma^2}\right) dx.$$

Тогда пропускная способность магистрали с коммутацией пакетов и комплексным мультиплексированием и λ -MPLS определится как:

$$BW_{\lambda\text{-MPLS}(\lambda\text{-ESB})}(i) = C_{\text{MPLS}} \times \frac{\bar{L}_{\text{layer}}(i)}{\bar{L}_{\text{packet}}(i+1)} \cdot K_{\text{usable}} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - M\xi)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot K_{\lambda\text{-ESB}} \quad (9)$$

где $\bar{L}_{\text{layer}}(i)$ и $\bar{L}_{\text{packet}}(i+1)$ – слои иерархии сети ИВС на базе и λ -MPLS; K_{usable} – коэффициент

использования слоя; $R(i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x - M\xi)^2}{2\sigma^2}\right) dx$ – функция распределения пакетами нагрузки

сети по слоям; $K_{\lambda\text{-ESB}}$ – коэффициент распределения скорости на λ -ESR маршрутизаторах.

В частности основные характеристики функции загрузки, такие, как частота появления пакетов, их количество, распределения во времени, и скорость передачи в канале могут быть преобразованы в соответствующие массивы данных пакетов – «пакетных всплесков» (ПВ), с определенной долей вероятности случайных процессов.

Пригодность нормального закона распределения для моделирования распределенных систем обусловлена тем, что он удовлетворительно аппроксимирует распределение значений многих количественных показателей, вызванных действием множества равносильных факторов, которыми являются данные в массивах пакетных всплесков при их обработке. Поэтому этот закон можно принимать как вероятностную модель процесса образования массивов данных псевдочасовых пакетных всплесков по информационным параметрам.

Основной и наиболее подходящей для оценки пакетной загрузки и производительности распределенной grid-сети характеристикой является время появления пакетов $t_{ipacket}$ и время распределения пакетов в нем, поскольку наиболее точно описывает пространственное распределение поля пакетов во времени. Время появления $t_{ipacket}$ также является одной из базовых признаков в системах распознавания образов, и позволяет достаточно точно оценить производительность распределенных систем..

Поэтому можно выбрать время появления $t_{ipacket}$ и передачи $t_{ipackets}$, как основной признак для компьютерной модели, для того, чтобы максимально соответствовать реальным условиям процесса обработки и сжатия пакетных всплесков усовершенствованным 3-х уровневый методом на параллельных оптико-электронной распределенных вычислительных системах.

Основной задачей имитационной части компьютерной модели является преобразование значения длительностей пакетов $H1t_{packet}(f_{ij}) \dots Hn t_{packet}(f_{ij})$, что соответствует пакетам $f_{1ij}, f_{n_{ij}}$ входящего трафика в соответствующие значения функций пакетной загрузки t'_{ij} , и t''_{ij} ($H1t_{packet}(f_{ij}) + \dots Hn t_{packet}(f_{ij}) \rightarrow Rt'(i)$) по правилу нормального закона распределения. На основе сформированных числовых значений функции распределения пакетной загрузки интервалов $Rt'(i)$ формируются их массивы данных пакетных всплесков, описывающие загрузку распределенной системы и входящие и выходящие потоки данных. Это соответствует первому этапу предварительной обработки в усовершенствованном методе трехуровневого сжатия λ -MPLS.

Компьютерная модель процесса оценки и параллельной обработки пакетов посредством распределенных grid-систем в среде MathCAD 2014 предусматривает формирование последовательности очереди загрузки.

Описывая процесс преобразования значений времени появления пакетных всплесков и формирование их массивов данных есть для имитационной модели будет справедливо:

$$t'_{ij} = k_p(x) \times H1t_{packet}(f_{ij}); \quad t''_{ij} = k_p(x) \times Hnt_{packet}(f_{ij}), \quad (10)$$

где $k_p(x)$ – коэффициент преобразования, учитывающий вероятностную смену (имитационная часть модели) данных временных интервалов пакетов в каждом из элементов массивов данных на входе и выходе:

$$k_p(x) = K_A \cdot p(x) = \frac{K_A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - M\xi)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

где K_A – коэффициент изменения и нормирования амплитуды значений элементов; $p(x)$ – плотность распределения вероятности по нормальному закону, имитирующий разброс параметров длительностей временных интервалов в реальных распределенных grid-системах. Использование переменных случайных величин x позволяет максимально точно приблизить имитационную компьютерную модель сравнения изображений к реальному процессу обработки и передачи посредством grid-систем, поскольку предполагает учет случайных изменений длительностей аппаратными преобразователями, процесс преобразования пакетной загрузки в аналогичную функцию параметров элементов компьютерной модели и многих других факторов, учитывающий колебания длительностей коэффициентом преобразования $k_p(x)$,

f_{ij} , - элементы матрицы входного и выходного массивов пакетов на входе преобразователя на усовершенствованном методе трехуровневого сжатия λ -MPLS.

На этом этапе необходимо обязательное задание параметров: $k_p(x)$, K_A , . та $p(x)$. плотность распределения $p(x)$ определяется заданными значением математического ожидания, дисперсии и пределами изменений случайной переменной x . Образование временной информации происходит по

принципу: чем больше количество пакетов в матрице - тем больше продолжительность временного интервала обработки соответствующего элемента массива: $F(t_{ij}) = f\{ti_j\}$.

Для реализации самого процесса моделирования необходима подпрограмма в среде MathCAD с циклом по координатам «i» и «j» в каждом массиве пакетов на входе и выходе.

При построении массивов пакетов на входе и выходе возможна симуляция динамических процессов обработки, которая реализуется, самой grid-системой. Это осуществляется также путем применения приемов имитационного моделирования и замены статических процессов отображения параметров пакетной загрузки и информации в виде массивов псевдочасовых показателей динамической загрузки в реальном времени, соответствует аппаратной модели распределенной процессорной обработки на базе усовершенствованного метода трехуровневого сжатия λ -MPLS. Для этого необходима будет замена динамических переменных на временные динамические переменные и, что иминуватимуть динамичность изменения срезов массивов пакетов во времени. Для этого элементы массивов должны отвечать соответствующим элементам входа и выхода пакетного агрегатора. Но динамичная модель системы и метода обработки и сжатия на базе трехуровневого λ -MPLS значительно сложнее в плане реализации на ЭВМ, поскольку потребует значительных вычислительных ресурсов и гибкости программных алгоритмов, в первую очередь - их параллельности, что невозможно на традиционных персональных ЭВМ. Организация самого процесса обработки массивов сложившихся функций с помощью корреляционной функции обработки:

$$KF = \sum_i \sum_j b_{ij} [F1(f_{ij}) \oplus Fn(f_{ij})], \quad (12)$$

где $b_{ij} [F1(f_{ij}) \oplus Fn(f_{ij})]$ - результат операции "сумма по модулю 2" над массивами входа и выхода агрегатора пакета; \oplus - знак операції „сума за модулем 2”.

Для упрощения процесса и постановки альтернативы, проверки требует простой алгоритм агрегации элементов массива.

При этом потребуются организация программного модуля в среде MatLAB для осуществления операции агрегации и поиска определителей массивов. Как и любая другая системы, средства агрегации дают определенную ошибку процесса оценки производительности обработки, и поэтому, при оценке значения корреляционной функции (КФ) необходимо учитывать определенный допуск, учитывающий ошибку процесса поривниння. Как показывает анализ известных методов обработки, точность процесса грубые может находиться в пределах 78-84%.

Для проверки эффективности алгоритма агрегации на базе модифицированного 3-х уровневого преобразования было создано функцию для среды Matlab, которая обеспечивает наглядное представление результатов в виде графиков.

Для создания простых массивов пакетов для входящего и выходящего в агрегатом трафика, необходимо провести предварительную обработку данных пакетов. Поскольку при построении самих массивов пакетов, для упрощения задачи не необходимая полная информация о параметре каждого сигнала в пакете, то можно преобразовать входящие компоненты пакета в условную единицу пакета, интересует в данным момент лишь время его появления. В функции проверки алгоритма данный этап реализуется с помощью функции rgb2gray следующей последовательностью команд:

```
firstPacketGray = rgb2gray(firstPacket);
secondPacketGray = rgb2gray(secondPacket);
```

При исследовании эффективности алгоритма является важным учета шумов, присущих реальным системам. Для учета данной особенности данные пикселей каждого из входящих изображений предварительно искажались гауссовской шумом с помощью устроенной в Matlab функции imnoise з параметрами: тип – gaussian, математическое ожидание – 0, и переменной дисперсией disp, для проверки эффективности алгоритма при различных степенях искажения изображений шумами:

```
firstPacketGrayNoised = imnoise(firstPacketGray, 'gaussian', 0, disp);
secondPacketGrayNoised = imnoise(secondPacketGray, 'gaussian', 0, disp);
```

Создание массивов функций пакетной загрузки для оценки уровня агрегации пакетов выполняется с помощью процесса бинаризации данных пакетов и задается следующей формуле:

$$k(t_{ij}) = \begin{cases} 1, & f_{ij} \geq binLvl \\ 0, & f_{ij} < binLvl \end{cases},$$

где f_{ij} - значения данных пакета на входе и выходе агрегатора

Полученный массив функций имеет такую же размерность, как и соответствующее ему массив пакетов на агрегаторе и принимает значение 1 для тех элементов массивов, уровень которых выше или равен порогу binLvl, и 0 - для элементов, которые меньше порога. Приведенные выше действия можно провести с помощью следующей команды в Matlab: `firstPacketLGF = (firstPacketGrayNoised >= binarisationLevel);` где `firstPacketGrayNoised` массив пакетов в градациях серого после наложения шумов, а `binarisationLevel` - порог бинаризации.

Сама агрегация сформованных функций возможно провести с помощью корреляционной функции КФ, что задается следующей формуле:

$$KF = \sum_i \sum_j b_{ij} [F1(f_{ij}) \oplus Fn(f_{ij})],$$

где $b_{ij} [F1(f_{ij}) \oplus Fn(f_{ij})]$ - результат операции «сумма по модулю 2» над входным и выходным массивом. Результатом применения КФ будет количество одинаковых элементов обоих массивов.

Реализацию корреляционной функции возможно осуществить в Matlab с помощью цикла `for` и переменной `matchedPixels`, в которой хранится количество одинаковых элементов массивов КФ функций сравниваемых пакетов `for i = 1:r*c`

```

if secondPacketLGF(i) == firstPacketLGF(i),
    matchedPixels = matchedPixels + 1;
end
end

```

где `r` – высота размера массива пакетов, `c` – ширина массива пакетов, `secondPacketLGF` и `firstPacketLGF` соответственно функций обоих массивов (входного и выходного) пакетов.

Имея данный результат можно провести расчет процента сжатия и агрегации пакета обоим массивов формуле:

$$R = \frac{Matched}{Total} * 100\%,$$

где `Matched` – количество одинаковых обработанных элементов обоих в массивах пакетах, `Total` – общее количество элементов пакетов в массиве.

Полный листинг функции Matlab, не вошел в материалы статьи, а включен в исходные файлы исследования, из-за большого объема. В общем листинг данной программы отличается от листинга базового алгоритма наличием последовательного генерирования новых массивов пакетов с различными размерами и вывода графика с помощью функции `plot`. Результат каждой итерации в виде значения процента совпадения и быстродействия агрегации пакетов добавлялся в массив результатов `overallMatching` по данным которого в дальнейшем строился график зависимости процента агрегированных пакетов от уровня функции пакетной загрузки и их размера. Для данного опыта значение дисперсии шума отмечалось равным 0.001, а порог бинаризации - 20. На рис. 8 приведены графики, полученные после четырех серий опытов.

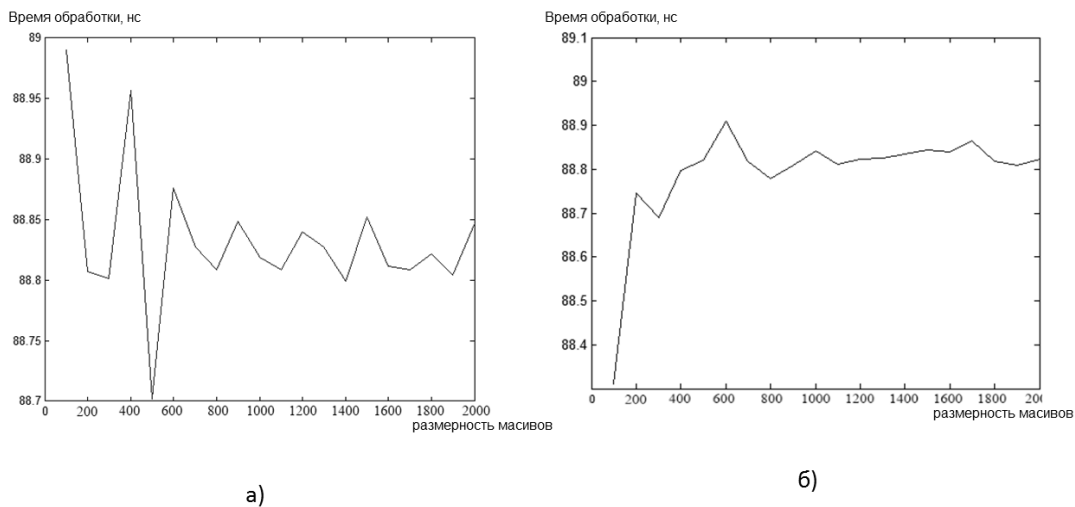


Рис. 8. Графики зависимостей времени агрегации массивов пакетов от их размера

Приведенные графики наглядно показывают отсутствие зависимости процента совпадения агрегированных и сжатых пакетов в зависимости от размера их массивов. Все различия между одинаковыми пакетами создаются только шумами, поэтому следующим этапом исследования эффективности алгоритма является анализ зависимости процента агрегированных и сжатых пакетов от дисперсии шумов. Для этого одинаковые массивы пакетов размерами 100×100 , последовательно сравнивались при дисперсии шумов от 0.001 до 1.01 с шагом 0.05 и пороговые бинаризации 20. Полученный график зависимости процента агрегированных и сжатых пакетов от уровня загрузки приведен на рис. 9.

Приведенный график позволяет утверждать о экспоненциальной зависимости процента агрегированных и сжатых пакетов в зависимости от дисперсии шума. Для дисперсии 0.01 одинаковые изображения совпадают на 84%, а при 1.0 - на 75%, поэтому при построении систем на базе модифицированного метода 3-х уровневое сжатия важно минимизировать уровень шумов на этапе получения входных пакетов. Если предположить, что в реальных систем дисперсия шума будет составлять 0.05, можно ожидать результата сравнения одинаковых изображений в 90%. Функция, с помощью которой была получена данная зависимость называется `function [] = LAF_Test2(imOne, imTwo, binarisationLevel)`. Также была выполнена проверка зависимости процента совпадения от величины дисперсии шумов.

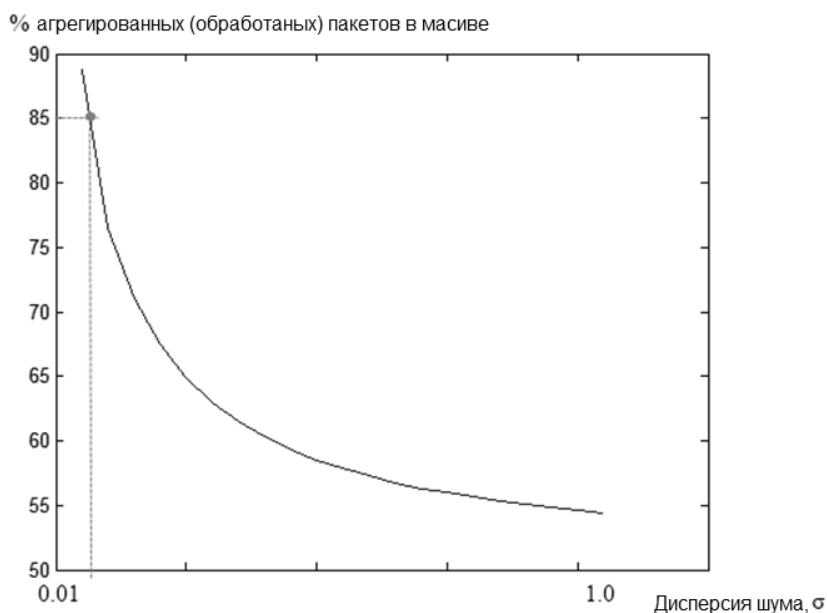


Рис. 9. Результирующий график зависимости процента агрегированных и сжатых пакетов в массиве пакетов зависимо от их размера в зависимости от дисперсии шума

Применение среды разработки и моделирования MatLab и создание функции для проверки алгоритма оценки и определения агрегации пакетной загрузки на базе модифицированного 3-х уровневое преобразования позволило также оценить его скорость на обычных компьютерных системах с помощью встроенных в Matlab функции `tic / toc`. Для системы на базе центрального процессора Intel Core 2 Duo E8200 с двумя ядрами, работающими на частоте 2.86 ГГц, создание массивов функций пакетов и сравнение двух изображений размером 1000×1000 продолжалось 18.3 мс. Используя функцию Matlab - `gpuArray` возможно проверить скорость алгоритма на видеокартах с поддержкой технологии CUDA, поскольку в ближайшее компьютерным аналогом параллельных распределенных `grid` систем является именно распределенные видеокарты с технологией мультитядерности и мультипотокности NVIDIA CUDA. Однако использование видеокарт для параллельных вычислений в MATLAB в настоящее время имеет ряд ограничений. Поскольку оператор `> =` в текущей версии MATLAB (7.14 - R2011) для видеокарт не поддерживает массивы типа `uint8`, а замена данной операции эквивалентной с использованием цикла `for` невозможна из-за отсутствия возможности индексировать массивы пакетов, хранящиеся в оперативной памяти, формат массива пакетов предварительно расширился до формата `uint32`, а стадия наложения шума была опущена из-за отсутствия поддержки командой `imnoise` массивов пакетов типа `uint32`.

Экспериментальные эмпирические данные исследования скорости алгоритма приведены в табл. 1.

Таблица 1

Время сравнения изображений при использовании центральных процессоров.

CPU						
Название модели	Количество ядер	Тактовая частота работы, GHz	Время агрегации массива пакета T, мс	Время создание массивов КФ функций	Время агрегации и сжатия одного пакета, $t = \frac{T}{n}$, n – к-ство пакетов; мкс	Частота работы оперативной памяти, MHz
Intel Core 2 Duo E8200	2	2.86	18.3	12.3	3.03	800
Intel Core i5 2410M	2	2.30	11.3	14.8	3.11	1333

Данные результаты были получены при помощи функции, листинг которой приведен далее
function [] = LAF_Test3(imOne, imTwo, binarisationLevel)

Оптимальное управление процессом формирования и преобразования меток на всех уровнях иерархии ИВС на базе λ -MPLS с учетом ее архитектуры и взаимодействия между слоями.

Таблица 2.

Время сравнения изображений при использовании графических процессоров.

GPU						
Название модели	Количество потоковых процессоров	Частота работы ядра, MHz	При агрегации массивов, мс	Время создания массивов КФ функций пакетов	Время агрегации одного пакета, $t = \frac{T}{n}$, n – к-ство пакетов; мкс	Частота работы оперативной графической памяти, MHz
nVidia GeForce GTX460	336	715	4.23	5.86	1.11	1800
nVidia GeForce GT540M	96	672	5.45	5.57	1.24	900

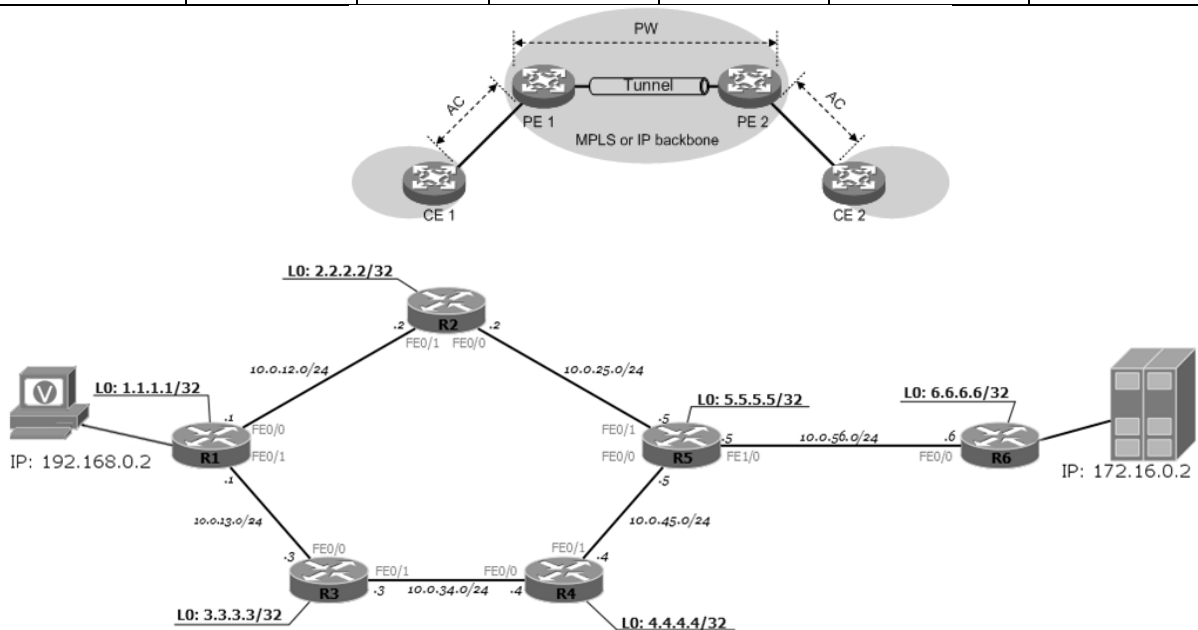


Рис.10. Пример общей логической структуры распределенной ИВС на базе усовершенствованного на базе λ -MPLS

Пример общей логической структуры ИВС на базе усовершенствованного на базе λ -MPLS с учетом ее архитектуры и взаимодействия между слоями показан на рис.10.

Результаты моделирования и экспериментов показывают, что увеличение числа аппаратных средств в коммутационных узлах скоростных оптических ИВС выше определенного порога не приводит к дальнейшему увеличению их производительности, однако значительно увеличивает стоимость коммутации, усложняя при этом управление [4-6, 11].

ВЫВОДЫ

Рассмотрены основные технологии и метод высокоскоростного уплотнения информационных потоков в информационных сетях, а также 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. Предложен метод организации потоков для взаимодействия λ -ESR маршрутизаторов сети λ -MPLS, в котором поляризационно-чувствительная когерентная техника квадратурной фазовой модуляции сигналов комбинируется с временным и волновым мультиплексированием оптических пакетов. Проведена его модельная оценка оптимального числа элементов формирования пакетов в буферной памяти волоконной линии для коммутаторов λ -MPLS. Использование предложенных подходов позволит увеличить полосу пропускания оптических трактов при сохранении максимальной дальности связи и улучшить коммуникационное взаимодействие узлов для решения различного рода вычислительных задач в GRID.

Значительные величины скорости передачи трафика (в 100-400 Гбит/с, для магистральных каналов сетей $MPLS$ на базе ВОЛС с комплексным применением технологий сжатия QAM-TDM-WDM дают значительные перспективы использования каналов $MPLS$ в распределенных сетях с комплексным доступом и конвергенцией разнородного трафика в системах распределенных вычислений и кластерных вычислительных станций. Весомой проблемой при этом является рост аппаратных и ресурсных затрат за счет внедрения сложной архитектуры $MPLS$ и структур дорогостоящих оптических роутеров λ -ESR-маршрутизаторов, что пропорционально увеличению размеростей элементов и числа волоконно-оптических каналов сети λ -MPLS.

По сравнению с традиционной структурой сетей MPLS в том числе и GMPLS на базе оптического наложения метки λ_k в усовершенствованной структуре достигается возможность гибкой маршрутизации и потокового трехуровневого сжатия данных, однако общая производительность междоменной сети будет ограничиваться традиционными трактами с электронной IP-инфраструктурой. За счет использования меньшего числа конечных оптических сигналов в оптических OMPLS трактах и большого числа их на входе с одинаковым количеством меток λ_k в ВОЛС выполняется конвергенция большого числа потоков информации в сам основной оптический тракт с соответствующими длинами волн λ_j и λ_k , необходимых для выделения передачи большого количества трафика. Также данный метод может гармонически ложиться в архитектуру существующих сетей λ -MPLS расположенную поверх технологий ATM или FrameRelay передаются IP-пакеты.

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: [Монографія] / 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 обращения 30.11.2016) – Название с экрана.
 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. Цирульник С.М., Кожем'яко В.П., Лисенко Г.Л. Архітектура динамічних оптичних оперативних запам'ятовувальних пристроїв на волоконно-оптичних лініях: [Монографія] / С.М. Цирульник. – Вінниця: ВНТУ, 2009. — 187 с.
 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
 16. Lach E. Modulation formats for 100G and beyond / E. Lach, W. Idler // Optical Fiber Technology, 2011 – Vol. 17. – pp. 377–386.

REFERENCES

- 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.
- Kussul' N.N. Grid-sistemy dlya zadach issledovaniya Zemli. Arkhitektura, modeli i tekhnologii: [Monografiya] / N. N. Kussul', A. YU.Shelestov. – K.: “Naukova dumka”, 2008. – 452 с.
- Verbovetskiy A. A. Novyye metody i sredstva organizatsii opticheskikh superkomp'yuternykh kompleksov / A. A. Verbovetskiy // Zarubezhnaya radioelektronika. – 2001. – №12. – S. 51 – 63.
- Ben Yoo S. J. Optical-label switching, MPLS, MPLambdaS, and GMPLS / S. J. Ben Yoo // Optical Networks Magazine, 2003. – 3(6). – p.17-31.
- Rosen E., Viswanathan A., R. Callon. Multiprotocol Label Switching Architecture, RFC 3031, January 2001.
- Rahbar A.G. Quality of Service in Optical Packet Switched Networks. – Wiley-IEEE Press, 2015. - 452 p.
- 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.
- 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.
- Worldwide LHC Computing Grid [Yelettronnyy resurs]: [Veb-sayt]. – Rezhim dostupa: <http://wlcg.web.cern.ch> (data obrashcheniya 30.11.2016) – Nazvaniye s ekrana.
- Ukrainian National GRID [Yelettronniy resurs]: [Veb-sayt]. – Yelettronni daní. – Rezhim dostupu: <http://grid.kpi.ua> (data zvernennya 30.11.2016) – Nazva z yekrana.
- Makkaveyev V.I. Fotonnyye kommutatory / V.I. Makkaveyev // Komponentny i tekhnologii. – 2006. – №2. – S. 142-146.
- 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.
- Tsirul'nik S.M., Kozhem'yako V.P., Lisenko G.L. Arkhitektura dinamichnikh optichnikh operativnikh zapam'yatovuval'nikh pristroiv na volokonno-optichnikh liniyakh: [Monografiya] / S.M. Tsirul'nik. – Vinnitsya: VNTU, 2009. — 187 s.
- 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.
- 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.
- Lach E. Modulation formats for 100G and beyond / E. Lach, W. Idler // Optical Fiber Technology, 2011 – Vol. 17. – pp. 377–386.

Надійшла до редакції 12.10.2017 р.

ЛЫСЕНКО ГЕННАДИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.т.н., профессор, профессор кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина, *E-mail:* lgl@vntu.edu.ua

МАЛИНОВСКИЙ ВАДИМ ИГОРЕВИЧ – к.т.н., доцент кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина, *E-mail:* yad.malinovsky@gmail.com

АШРАФ И.МАЛЬКЕЙСИ – соискатель кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина, *E-mail:* ashrafalqaisi1978@gmail.com