



В табл. 3 и 4 приведены размеры фокального пятна по полуспаду интенсивности (FWHM) в плоскости максимальной интенсивности по оси распространения и радиус центрального пика ( $r_s$ ) для рассмотренных аксиконоподобных элементов.

Таблица 3 – Размеры фокального пятна при равномерном освещении

Тип аксикона	Максимальная интенсивность, $\lambda$	FWHM <sub>x</sub> , $\lambda$	FWHM <sub>y</sub> , $\lambda$	$r_s$ , $\lambda$
Бессель	1,684	0,8564419	0,3235491	0,38
Косинус	1,614118	0,8538503	0,3268803	0,26
Экспонента	1,296	0,8564658	0,3147078	0,51

Таблица 4 – Размеры фокального пятна при вихревой фазовой сингулярности

Тип аксикона	Максимальная интенсивность, $\lambda$	FWHM <sub>x</sub> , $\lambda$	FWHM <sub>y</sub> , $\lambda$	$r_s$ , $\lambda$
Бессель	1,084941	0,3585496	0,824537	0,38
Косинус	1,084941	0,3537205	0,82037	0,26
Экспонента	1,225647	0,360114	0,82398	0,51

Наилучший результат был получен в случае освещения аксикона типа (4) равномерным излучением (FWHM<sub>y</sub>=0,3147078  $\lambda$ ). Это несколько меньше теоретической оценки (1), однако численные результаты согласуются с ранее полученными результатами для случая радиальной поляризации падающего на аксикон пучка<sup>6</sup>. При внесении вихревой фазовой сингулярности лучшие результаты оказались у аксикона типа (3).

1. V.P. Kalosha, I. Golub, *Opt. Lett.*, **32**, 3540-3542, (2007)
2. P. Zijlstra, J. W. M. Chon, M. Gu, *Nature*, **459**, 410-413 (2009)
3. А.В. Устинов, С.Н.Хонина, *Компьютерная оптика*, **35**, №4, 480-490 (2011)
4. С.Н. Хонина, *Компьютерная оптика*, **34**, №4, 461-468, (2010)
5. S.N. Khonina, S.G.Volotovskiy, *J. Opt. Soc. Am. A*, **27**, №10, 2188-2197 (2010)
6. V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, S. S. Stafeev, *Prog. In Electr. Res. C.*, **5**, 35-43, (2008)

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ КЛАСТЕРНЫЙ ПРОЦЕССОРРЕГЕНЕРАТИВНОГО ТИПА

**Поляков А.В., Малевич И.А., Чубаров С.И.\*, Жуковский А.В.**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
\*БГПУ им. М.Танка, Минск, Беларусь

Разработана архитектура оптоэлектронного процессора активного типа с регенеративным принципом хранения и записи информации в лазерном элементе памяти. Совмещение в оптическом диапазоне элементов программирования, первичной обработки, хранения и кодирования входной оптической информации открывает новые перспективы построения высокоэффективных оптических кластеров суперкомпьютерных систем.

Интенсивное развитие национальных суперкомпьютерных систем, инициировало появление целого ряда новых направлений исследований и разработок на базе кластерного принципа повышения производительности и эффективности входных каналов вычислительных систем сверхвысокой производительности. Особое значение в оптимизации параллельно-конвейерных алгоритмов суперкомпьютерных систем приобретают оптические вычислительные кластерные технологии входной обработки больших массивов информации в реальном масштабе времени в оптоэлектронном базисе.

Нами предложен метод построения архитектуры быстродействующего оптоэлектронного процессора-кластера с параллельной аналоговой и цифровой обработкой информации и на этой основе создан ряд его базовых моделей. В основу построения архитектуры оптического кластера данного типа был положен принцип бинарной вариативности оптической памяти, основанный на методе регенеративного хранения и записи в реальном времени оптической информации и совмещающей в оптическом базисе программирование, первичную обработку, хранение и декодирование оптической информации в соответствии с требованиями структуры и вычислительных ресурсов суперкомпьютерной системы. Такие задачи возникают в экспериментах по спектральному зондированию окружающей среды, экспресс диагностики космических стволов связи, локационных и медицинских диагностических экспериментах. Бинарная вариативность (совмещение в единой структуре аналоговой и цифровой обработки) имеет принципиальное отличие от параллельной вычислительной архитектуры, в том числе и от моделей нейровычислительных сетей, т.к. позволяет проводить обработку входного массива данных непосредственно от источника поступления информации в широком оптическом спектре частот.

В данной работе рассматривается структура оптоэлектронного процессора активного типа (ОЭП), основанная на методе регенеративного хранения и записи оптической информации в лазерном многостабильном элементе памяти с волоконно-оптической линией запаздывания. В простейшем случае лазерный многостабильный элемент памяти с регенеративным принципом хранения информации представляет собой оптическую колебательную систему, восприимчивую к информационному потоку с различными типами носителей, которые в процессе управляемого оптического хранения могут подвергаться преобразованию по заданной программе вычислений. При обеспечении возвратного отношения больше 1, в данном оптическом элементе памяти устанавливается стационарный режим, позволяющий реализовать полный цикл записи, хранения и считывания информации. Достоинством ОЭП регенеративного типа является возможность записи и хранения информации как в цифровом, так и в аналоговом виде. При этом скорость записи информации зависит от времени срабатывания инжекционного лазера и может варьироваться от наносекундного до пикосекундного масштаба длительности. Если необходимо в память ОЭП записать цифровую информацию в виде линейного кода, или в виде случайной последовательности световых импульсов возможно, используя синтезатор оптических частот, сформировать цифровую информацию в виде дискретно заданной последовательности моментов срабатывания инжекционного лазера и, таким образом, осуществляется программирование оптоэлектронного процессора. При необходимости записи в ОЭП аналоговой информации, например, в виде временных интервалов между оптическими импульсами, в контуре памяти оптоэлектронного процессора формируются временные шкалы, размерность которых соответствует информационным признакам аналоговых сигналов.

Для задачи повышения быстродействия при вводе в вычислительный канал суперкомпьютера больших массивов оптической информации предложен новый принцип адаптивной матричной вариативности оптической памяти и разработана структура волоконно-оптического динамического запоминающего устройства с

последовательно-параллельными каналами ввода-вывода и оптической регенерацией, выявлены способы улучшения информационных характеристик таких систем с учетом флуктуационных источников, нелинейных явлений и эффекта межсимвольных помех в волоконно-оптическом контуре.

Основным способом повышения пропускной способности оптоволоконных информационных каналов является технология плотного спектрального (частотного) мультиплексирования (уплотнения) каналов с разделением по длинам волн, получившей название *DWDM*-технологии (*dense wavelength division multiplexing*). Экономичность *DWDM*-систем с большой суммарной скоростью передачи данных в значительной степени зависит от эффективности использования рабочего спектра для передачи информации, от увеличения так называемой спектральной эффективности. Нами разработана архитектура волоконно-оптического динамического запоминающего устройства (ВОДЗУ) со спектральным уплотнением информационных каналов, которая может использоваться как быстродействующая буферная память. Данная структура обладает следующими отличительными особенностями. Комбинация стандартного одномодового волокна и волокна с отрицательной дисперсией позволила увеличить время хранения информации при заданной вероятности ошибки более чем на порядок. Использование в качестве линейного усилителя непосредственно в оптоволоконной петле рециркуляции и усилителя мощности двух волоконно-оптических эрбиевых усилителей исключает применение электронных усилителей на выходе каждого фотоприемника и обеспечивает регенерацию циркулирующих информационных сигналов непосредственно в оптическом диапазоне, что позволяет работать с гигагерцовыми скоростями записи информационного оптического потока.

Установлено, что в начале при увеличении коэффициента усиления волоконно-оптического эрбиевого усилителя мощности время хранения при заданной вероятности ошибок начинает расти, поскольку определяется отношением сигнал/шум на выходе фотоприемника. При дальнейшем увеличении коэффициента усиления время хранения перестает изменяться и принимает постоянное значение. Это связано с тем, что определяющее ограничение на время хранения информации начинают оказывать уже не источники амплитудных шумов, а временные флуктуации положения информационных импульсов относительно своего тактового интервала (временной джиттер), возникающие вследствие дисперсии групповой скорости оптического сигнала в волокне. Из проведенных расчетов следует, что коэффициент усиления усилителя мощности  $EDFA_2$  может быть ограничен величиной 16 дБ, поскольку дальнейшее увеличение усиления не приводит к росту времени хранения информации из-за дисперсионных свойств волоконного световода (ВС).

Внедрение технологии спектрального уплотнения *WDM/DWDM*, которая ведет к значительному возрастанию вводимой в волоконный световод мощности излучения, а также повышение скорости передачи до 10 Гбит/с и выше требует учета нелинейных эффектов в ВС при исследовании волоконно-оптических информационных систем. Фазовая автомодуляция (ФА) возникает вследствие того, что показатель преломления волокна содержит нелинейно-зависимую от интенсивности компоненту, которая вызывает смещение фазы, пропорциональное интенсивности импульса. По этой причине различные составляющие импульса претерпевают различные фазовые смещения, обуславливая изменение линейной частотной модуляции (ЛЧМ) импульсов вне зависимости от их формы. Изменение ЛЧМ импульсов в свою очередь приводит к увеличению их длительности из-за дисперсии. Таким образом, ФА модифицирует влияние дисперсии на расширение импульса. Так как этот эффект изменения ЛЧМ пропорционален мощности передаваемого сигнала, ФА более ощутим в системах, использующих высокие мощности передачи. Поэтому вызванные ФА изменение ЛЧМ оказывает влияние на расширение импульса вследствие дисперсии и в связи с этим должно учитываться в системах с высокими битовыми скоростями, которые уже

обладают значительными ограничениями из-за дисперсии. Показано, что под влиянием фазовой автомодуляции, связанной с зависимостью показателя преломления волокна от оптической мощности, в процессе рециркуляции длительность информационных импульсов сначала уменьшается, а затем увеличивается. Данный эффект усиливается с возрастанием передаваемой мощности (т.е. увеличением числа информационных каналов) и оказывает существенное влияние на информационные параметры оптоволоконной памяти.

Установлено, что совместное влияние амплитудных флуктуаций, явления временного джиттера и эффекта межсимвольных помех приводит к появлению максимума времени хранения в зависимости от длины оптоволоконной петли. Это позволяет выбирать длину волоконного световода с компенсацией дисперсии в бинарной вариативной оптической памяти, обеспечивающую наилучшие информационные параметры при заданной скорости поступления информации. При скорости информационного потока  $B=10$  Гбит/с длина петли, обеспечивающая максимальное время хранения, составляет  $L=30$  км при числе информационных каналов  $k=8$  и  $L=50$  км для  $k=32$ . Установлено, что эта длина не зависит от скорости поступающей информации.

На основе разработанной математической модели проведен многопараметрический анализ процесса рециркуляции информационного потока в замкнутом оптоэлектронном контуре с учетом шумовых источников, временного джиттера, а также эффекта межсимвольных помех. Для оценки возможностей использования рассматриваемых ВОДЗУ в качестве буферной памяти проведены совместные исследования времени хранения и информационной емкости при заданной вероятности ошибки  $BER \leq 10^{-9}$ . Для скорости информационного потока  $B=10$  Гбит/с время хранения информации при заданной вероятности ошибки равно  $t_{xp1}=23$  мс, информационная емкость составляет  $W_1=9,4$  Мбайт; для  $B=2,5$  Гбит/с  $t_{xp2}=0,11$  с,  $W_2=2,6$  Мбайт. Увеличение времени хранения информации связано с использованием специальных методов и средств оптической 3R-регенерации, обеспечивающей восстановление циркулирующих импульсов по форме, амплитуде, длительности, а также временному положению относительно тактового интервала.

Разработанный метод построения архитектуры оптического кластера суперкомпьютерных систем представляет также интерес для разработчиков экспериментальных моделей интеллектуальных систем, где одной из не полностью решенных проблем является информационная «узость» каналов очувствления и их заметная инерционность, а также трудности работы в реальном времени с большими по временной и частотной динамике массивами входной информации. Реализованный оптический кластер с матричной вариативной архитектурой, несомненно, решает данные проблемы.

## **СИНТЕЗ КОРРЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕШЕТОК**

**Лапшин Б.А., Петраков В.А., Смирнов И.Ю.**

Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены оптические многослойные решетки, являющиеся новым элементом для построения амплитудных корректоров. Приведен пример расчета локального корректора амплитудных искажений, вносимых усилительным участком линейного тракта волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов.