

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЦЕССОР ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

И. А. Малевич, А. В. Поляков, С. И. Чубаров

Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

E-mail: polyakov@bsu.by

Предлагается структура оптоэлектронного процессора активного типа, основанная на методе регенеративного хранения и записи оптической информации в лазерном элементе памяти с волоконно-оптической линией запаздывания, и совмещающая в оптическом диапазоне элементы программирования, первичную обработку, хранение и кодирование оптической информации.

Ключевые слова: волоконно-оптическое динамическое запоминающее устройство, спектральное уплотнение информационных каналов.

В оптическом диапазоне длин волн в настоящее время поиск методов построения систем обработки и преобразования информации ведется по нескольким направлениям, связанным с созданием оптических логических элементов и оптоэлектронных процессоров пассивного и активного действия с многоуровневым преобразованием информации в лазерных устройствах. Одним из перспективных направлений является создание оптического компьютера с обработкой информации по принципу регенеративных нейронных систем. Наиболее известными разработками в данном направлении являются структуры оптических процессоров типа digital bit-serial memory (DBSM) [1] и analog fiber-optic memory (AOFM) [2]. В DBSM структуре хранение массива информации осуществляется в цифровом виде; в AOFM структуре информация представляется в аналоговом виде.

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, то 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.

Одним из основных вопросов для архитектуры современных сверхвысокопроизводительных вычислительных систем является вопрос, связанный с реализацией запоминающих устройств, обладающих достаточным быстродействием при большой информационной емкости. Для эффективной реализации принципа управления потоками данных, кроме этого, память должна обладать дополнительным свойством ассоциативного доступа к данным.

В настоящее время существует задача промежуточного хранения оптической информации в цифровом и аналоговом виде, например, поступающей с аэрокосмических носителей при лазерно-локационном зондировании, для последующего ввода этой информации в вычислительные структуры, в частности в вычислительный канал суперкомпьютера «СКИФ К1000-2». Существующие в настоящее время интерфейсы электронных компьютеров не позволяют осуществлять непосредственный ввод данных субнаносекундного диапазона. Для этих целей разрабатываются специализированные быстродействующие буферные запоминающие устройства, позволяющие избежать потерь оптической информации при ее последующей обработке.

Одним из перспективных направлений создания буферной памяти являются волоконно-оптические динамические запоминающие устройства (ВОДЗУ) рециркуляционного типа. Интерес исследователей к подобным системам обусловлен, прежде всего, их способностью производить высокоскоростную запись реализаций однократных быстропротекающих случайных процессов. Достоинством ВОДЗУ является то, что запись информационного потока в них осуществляется в реальном масштабе времени, а хранение данных в цифровой и аналоговой форме возможно в течение времени, необходимого для их последующей обработки. Кроме того, в системах рециркуляционного типа существует возможность организации по одному световоду одновременно нескольких информационных каналов, используя плотное спектральное мультиплексирование с разделением по длинам волн (DWDM-технология).

Существующие в настоящее время архитектуры ВОДЗУ [3–5] в основном ориентированы только на восстановление амплитудных характеристик циркулирующих сигналов, что ограничивает время хранения информации за счет дисперсионных эффектов в волоконном световоде. Нами разработана архитектура цифрового ВОДЗУ со спектральным уплотнением информационных каналов [6], позволяющая умень-

шить влияние указанных недостатков на информационные характеристики таких устройств. Отличительной особенностью данной структуры является использование, во-первых, комбинации стандартного одномодового волокна и волокна с отрицательной дисперсией, что позволило уменьшить результирующую хроматическую дисперсию более чем на два порядка, во-вторых, двух волоконно-оптических эрбиевых усилителей, один из которых является линейным усилителем и компенсирует потери в петле рециркуляции, а второй представляет собой выходной усилитель мощности и позволяет исключить использование электронных усилителей на выходе каждого фотоприемника. Кроме того, регенерация циркуляционных информационных сигналов осуществляется в оптическом диапазоне, что дает возможность работать с гигагерцовыми скоростями записи информационного потока и не осуществлять промежуточное периодическое преобразование сигналов из оптического диапазона в электрический и обратно. Поскольку ширина полосы усиления волоконных усилителей составляет 35–40 нм и спектральный интервал между информационными каналами равняется 0,8 нм, следовательно, запоминающее устройство позволяет проводить одновременную запись и считывание по 32 каналам на разных длинах волн.

Отличительной особенностью данной архитектуры является использование двухсекционной оптической динамической памяти для обработки и хранения информации. Первая секция является аналоговой памятью для хранения временных интервалов. Вторая секция служит для хранения оптических импульсных последовательностей, объем хранимой информации определяется длиной волоконно-оптической линии задержки. Время хранения информации определяется индексом нестабильности, и он должен быть меньше интервала между импульсами оптической последовательности. В аналоговой памяти информация кодируется в виде длительности временных интервалов между импульсами. В этом случае свойства оптической линии задержки полностью определяются входными параметрами информации. В качестве устройства считывания используется оптоэлектронный анализатор интервалов времени, что позволяет анализировать временные интервалы с точностью до десятков пикосекунд. В памяти для хранения импульсных последовательностей информация хранится в стандартной битовой форме в формате с возвращением к нулю *RZ* (return to zero). Помимо стойкости к нелинейным искажениям при распространении, сигналы *RZ*-формата имеют дополнительное преимущество – они более устойчивы к поляризационной модовой дисперсии, чем *NRZ*-сигналы. В случае совмещения аналогового и *bit-serial* режимов свойства малой петли передаются большой с временным интервалом, равным длине малой петли. Таким образом, большая петля квантуется на временные зоны малой петли и тем самым увеличивает объем хранимой информации. Предложенная структура памяти с использованием *bit-serial* режима и аналогового позволяет без использования дополнительных арифметико-логических устройств осуществлять элементарные операции над хранимыми данными (сложение).

Однако наряду с отмеченными преимуществами увеличение скорости передачи информации сопровождается ростом искажений цифровых сигналов. В частности, искажения, вызываемые хроматической дисперсией, растут пропорционально квадрату канальной битовой скорости, искажения из-за воздействия поляризационной модовой дисперсии в первом приближении пропорциональны первой степени канальной битовой скорости. Мощность шумов также пропорциональна битовой скорости.

Для повышения производительности весьма перспективным представляется метод синтеза информационных импульсов (ИИ) из гармонических составляющих. В

простейшем случае такие ИИ с синусоидальной огибающей интенсивности могут быть получены путем смешивания излучения двух непрерывных одночастотных лазеров с несколько различающимися длинами волн. Частота следования получаемых ИИ будет равна разности частот лазеров и может изменяться путем изменения частоты любого из них. Средняя мощность получаемой последовательности ИИ равна суммарной мощности непрерывных лазеров. Таким образом, рассматриваемый метод дает выигрыш по мощности по сравнению с методом прямой модуляции в 4 раза. При частоте тактирования 10^{11} Гц и стабильности частоты генерации лазера 1 МГц получаем относительную нестабильность 10^{-5} .

Создание ВОДЗУ с высокими эксплуатационными характеристиками ограничено следующими факторами:

- увеличение объема хранимой информации при сохранении длины волоконного световода ограничено допустимым временем хранения информации, обусловленным полосой пропускания системы;

- время хранения информации увеличивается оптимизацией схемного построения и режимов работы элементов контура ВОДЗУ по критерию максимума отношения сигнал/шум.

Особенностью процесса динамического хранения информации в замкнутом оптоэлектронном контуре является накопление ее искажений в процессе рециркуляции. Количество циклов рециркуляции N определялось из следующих условий: 1) значение вероятности ошибки при приеме информационных сигналов в битовом формате (BER) будет удовлетворять условию $BER \leq BER_0 = 10^{-9}$; 2) длительность циркулирующих импульсов τ не должны превышать величины тактового интервала T_i $\tau < T_i$.

На основе разработанной математической модели проведен многопараметрический анализ процесса рециркуляции информационного потока в замкнутом оптоэлектронном контуре с учетом амплитудных флуктуаций интенсивности излучения инжекционного лазера, дробовых шумов полупроводникового фотоприемника, тепловых шумов нагрузочного сопротивления, шумов волоконно-оптических эрбиевых линейного усилителя и усилителя мощности, 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. Получено, что использование pin-фотодиодов в качестве фотоприемников не позволяет обеспечить необходимый уровень вероятности ошибки без использования электронных усилителей на выходе ФП. В этом случае необходимо применять лавинные фотодиоды (ЛФД), которые за счет своего внутреннего усиления обеспечивают требуемое отношение сигнал/шум. Кроме того, установлено, что повышение коэффициента усиления усилителя мощности G_2 приводит к увеличению времени хранения информации, однако, поскольку мощность излучения на входе этого усилителя составляет -10 дБм, коэффициент усиления насыщения G_2 не превышает 20 дБ. Проведенные расчеты показали, что при длине циркуляционной петли 25 км для скорости информационного потока $B=10$ Гбит/с время хранения информации равно $t_{xp}=55$ мс, информационная емкость составляет $W=4,7$ Мбайт при использовании 32 спектральных информационных каналов.

Проведенные исследования показали, что ограничения на число циркуляций накладывает процесс увеличения длительности информационных импульсов за счет дисперсионных свойств оптоволоконного канала. С целью увеличения времени хранения инфор-

мации необходимо периодически восстанавливать форму циркулирующих импульсов, т. е. осуществлять так называемую 2R-регенерацию (re-amplification+re-shaping). Применение в качестве регенераторов электрических устройств ведет к существенному ограничению быстродействия ВОДЗУ, требует преобразования оптического сигнала в электрический ток и обратно. В этом случае для работы с субнаносекундными скоростями информационных потоков необходимо применять оптические регенераторы. Одним из способов такой оптической регенерации является использование нелинейного оптического кольцевого зеркала (НОКЗ) на основе оптического волокна. Скорость работы таких устройств определяется временем нелинейного отклика среды (кварца), составляющим всего несколько фемтосекунд. НОКЗ является оптоволоконным аналогом интерферометра Саньяка и состоит из несимметричного оптического соединителя, петли сильнонелинейного волокна со смещенной точкой нулевой дисперсии, эрбиевого усилителя и аттенюатора. Перед НОКЗ включен гауссов фильтр со спектральной шириной $B_{\text{opt}}=160$ ГГц, после которого находится эрбиевый волоконный усилитель с коэффициентом усиления $G=21-23$ дБ, осуществляющий усиление сигнала до мощностей, необходимых для работы НОКЗ в нелинейном режиме, после НОКЗ стоит аттенюатор с $G=-23$ дБ, компенсирующий избыточную мощность сигнала. Принцип работы устройства основывается на том, что сигнал, попадающий на его вход, разделяется на оптическом соединителе на сигналы, распространяющиеся по оптоволоконному кольцу в противоположных направлениях, при этом амплитуды сигналов делятся в отношении 70 : 30, а к фазе одного из сигналов добавляется $\pi/2$. Затем сигналы вновь интерферируют на выходе из кольца. За счет выбора величины предусиления сигнала на входе НОКЗ можно добиться того, что передаточная характеристика зеркала будет иметь точку устойчивого равновесия, при этом пиковая мощность излучения должна находиться в пределах 7–12 мВт. В этом случае возможен автосолитонный режим распространения, когда информационные импульсы при прохождении НОКЗ полностью восстанавливают свою форму. С помощью такой структуры возможно осуществлять регенерацию импульсов длительностью до 5–7 пс, при этом установлено, что небольшие колебания мощности не нарастают с увеличением расстояния, а время хранения информации увеличивается до минут и даже часов.

Таким образом, на основе оптоэлектронных процессоров возможно создание сверхбыстродействующих оптоэлектронных вычислительных устройств, совмещающих в оптическом диапазоне элементы программирования, первичную обработку, вычисление, хранение и кодирование оптической информации, что позволяет значительно увеличить быстродействие, точность и уменьшить объем вычислительных процедур.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Heuring, V. P.* Designing digital optical computing systems: power distribution and cross talk / V. P. Heuring, J. P. Pratt // *Applied Optics*. 1992. Vol. 31, № 23. P. 4657–4661.
2. Implementation of a general-purpose stored-program digital optical computer / T. Main [et al.] // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, № 8. P. 1619–1628.
3. *Singh, R. K.* Wavelength division multiplexed loop buffer memory based optical packet switch / R. K. Singh, R. Srivastava and Y. N. Singh // *Optical and Quantum Electronics*. 2007. Vol. 39, № 1. P. 15–34.
4. *Laevens, K.* Queueing analysis of a single-wavelength fiber-delay-line buffer/ K. Laevens, M. Maeneclaey, H. Brunnel // *Telecommun. Syst.* 2006. Vol. 31, № 3. P. 259–287.

5. An optical resilient packet ring node with SOA-based loadable and erasable storage buffer/ S. Fu [et al.] // Appl. Phys. B. 2006. Vol. 85, № 4. P. 571–574.

6. *Малевич, И. А.* Оптоэлектронное рециркуляционное устройство динамической записи и хранения оптической информации / И. А. Малевич, А. В. Поляков, С. И. Чубаров // Оптика неоднородных структур-2011: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Могилев, 2011. С. 312–315.
