

УДК 621.391.052

А.В. Поляков

## УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПРОТЯЖЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

*Экспериментально исследованы способы увеличения скорости передачи данных за счет уменьшения флуктуаций временного положения информационных сигналов в волоконно-оптической системе. Минимизация флуктуационных эффектов при заданной температуре достигается выбором режимов работы оптоэлектронных компонентов.*

### Введение

Волоконно-оптические информационные системы (ВОИС) занимают все более заметное положение в науке и на производстве. Практически любая ВОИС независимо от функционального назначения состоит из трех основных оптоэлектронных компонентов: модулируемого источника излучения, волоконно-оптической линии задержки и фотоприемного устройства. Источниками излучения служат полупроводниковые инжекционные лазеры (ИЛ). В качестве фотоприемников используются лавинные фотодиоды (ЛФД), позволяющие за счет внутреннего усиления повысить отношение сигнал/шум при слабой мощности сигнала на выходе оптоволоконна.

Под цифровой оптической системой передачи и обработки данных понимается система, в которой информационный поток в двоичной системе счисления передается путем модуляции источника излучения таким образом, что излучаемая им энергия во время передачи бита информации была равна одному из двух уровней. Эта оптическая энергия может иметь высокий или низкий уровень, соответствующий информационным «1» или «0». В настоящее время наиболее часто применяется RZ-формат представления информации (амплитудная модуляция с возвращением к нулю), когда импульс, соответствующий «1», занимает только некоторую часть тактового интервала.

Основными способами увеличения информационной пропускной способности по одному волоконно-оптическому каналу в ВОИС являются спектральное уплотнение (передача информации одновременно на нескольких длинах волн) и временное (сокращение тактового интервала). Сейчас наибольшее внимание уделяется разработке методов спектрального уплотнения (WDM, DWDM), однако возможности временного уплотнения также далеко не исчерпаны. В данной работе проведены исследования способов уменьшения длительности тактового интервала и, соответственно, увеличения скорости передачи информации при сохранении требуемого значения вероятности ошибки.

### 1. Фазовое дрожание цифрового сигнала как фактор возрастания межсимвольных помех

В протяженных ВОИС используются одномодовые волоконные световоды (ВС) с ненулевой смещенной дисперсией с полосой пропускания порядка 1000 ГГц при скоростях передачи информации 2–3 Гбит/с и потерями оптической мощности 0,2 дБ на километр длины для излучения с длиной волны  $\lambda=1,55$  мкм. После первоначального усиления принятый фотоприемником сигнал поступает на решающее устройство, которое его стробирует в некоторой точке в течение каждого тактового интервала и затем сравнивает полученное значение отсчета с некоторым заданным пороговым уровнем. Если амплитуда отсчета превышает порог, генерируется «1»; если нет, предполагается, что передан «0». При наличии ошибок регенерированная информационная последовательность будет отличаться от импульсной последовательности, переданной первоначально. В протяженных ВОИС оптоволоконно разбивается на регенерационные участки, длина которых определяется заданной частотой появления ошибок приема информации (BER), которая обычно составляет величину  $10^{-9}$ – $10^{-11}$  (в зависимости от используемого сетевого стандарта). Одной из причин возрастания BER является эффект межсимвольных помех.

Межсимвольные помехи обусловлены тем, что часть энергии информационного импульса, относящегося к одному тактовому интервалу, поступает на пороговое решающее устройство в течение соседних тактовых интервалов. При приеме символа «1» такая помеха приводит к уменьшению амплитуды сигнальных отсчетов (повышается вероятность пропуска сигнала), а в случае приема символа «0» появляется дополнительная шумовая составляющая (повышается вероятность ложной тревоги). Считается [1], что влияние межсимвольных помех пренебрежимо мало, если выполняется условие

$$\sqrt{\sigma_0^2 + (\sigma_{\text{вс}}L)^2} \leq T/4, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – среднеквадратическая длительность оптического импульса, генерируемого ИЛ;  $\sigma_{\text{вс}}$  – среднеквадратическая временная дисперсия ВС;  $L$  – длина регенерационного участка ВС;  $T$  – длительность тактового интервала;  $B=1/T$  – скорость передачи информации.

Для сохранения требуемого уровня ошибок приема информации из-за наличия межсимвольных помех необходимо либо уменьшать длину регенерационного участка ВС, либо увеличивать тактовый интервал (уменьшать скорость передачи данных). При наносекундных и субнаносекундных длительностях тактовых интервалов на величину межсимвольных помех начинают оказывать существенное влияние не только дисперсионные характеристики ВС, но и флуктуации времени поступления информационного сигнала на решающее устройство. Момент приема бита информации в течение тактового интервала не остается постоянным, возникает фазовое дрожание цифрового сигнала, обусловленное режимами работы устройств передачи и приема в волоконно-оптическом тракте. В этом случае условие (1) может быть переписано в виде

$$\sqrt{\sigma_0^2 + (\sigma_{\text{вс}}L)^2 + \sigma_a^2} \leq T/4, \quad (2)$$

где  $\sigma_a$  – среднеквадратические временные флуктуации моментов регистрации информационного импульса, обусловленные приемопередающей аппаратурой.

Широко используемая в настоящее время в ВОИС технология многоканального спектрального уплотнения в сочетании с оптическими усилителями на основе оптоволокна, легированного эрбием (*EDFA*), требует использования ВС с ненулевой смещенной дисперсией. В противном случае наблюдается четырехволновое смешение. Этот эффект выражается в появлении дополнительных паразитных сигналов на частотах, являющихся комбинацией рабочих частот, которые также усиливаются, проходя через каскады усилителей *EDFA*. Такое явление становится особенно заметным при так называемом плотном спектральном мультиплексировании (*DWDM*). Из сказанного следует, что уменьшение  $\sigma_{\text{вс}}$  возможно лишь до определенного предела. Далее, согласно (2), при постоянной  $\sigma_0$  для повышения скорости передачи информации следует минимизировать величину  $\sigma_a$ .

## 2. Экспериментальная установка для исследования временных флуктуаций в ВОИС

Рассматриваемые временные флуктуации в ВОИС являются результатом наложения целого ряда независимых друг от друга явлений. Наиболее существенное влияние на их структуру оказывают следующие факторы: временной джиттер в инжекционном лазере, возникающий из-за случайных изменений времени задержки между импульсом тока накачки и излучением лазера; нестабильность времени отклика лавинного фотодиода; временной разброс моментов срабатывания порогового решающего устройства, который связан с изменением амплитуды входного сигнала из-за флуктуаций мощности излучения ИЛ, дробовых шумов ЛФД, тепловых шумов нагрузочного сопротивления, шумов входных каскадов усилителя и т. д. Сложный характер флуктуаций временных параметров требует разработки специальных экспериментальных методик изучения закономерностей распространения сигналов в оптоэлектронной системе.

Для исследования флуктуаций времени распространения оптических импульсов по оптоэлектронному тракту с высоким временным разрешением был использован метод многоканаль-

ного временного анализа [2, 3], который основан на регистрации вероятностной структуры флуктуаций периодов импульсных процессов. Этот метод хорошо зарекомендовал себя и нашел дальнейшее развитие при исследованиях в области синтеза образцовых интервалов времени [4, 5]. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Уменьшение ошибки дискретизации, свойственной счетно-импульсным методам измерений, в разработанной системе достигалось использованием принципа времяамплитудного интерполяционного преобразования выделенной флуктуационной составляющей в пределах периода измерения. Основным измерительным узлом установки является стенд для анализа флуктуаций временных интервалов с разрешением 20 пс, состоящий из блока селекции временных интервалов, времяамплитудного преобразователя (ТА-преобразователя), многоканального амплитудного анализатора (МАО).

Для запуска волоконно-оптической системы использовали генератор импульсов Г5-72, который вырабатывал прямоугольные сигналы длительностью 10 нс и амплитудой 3 В. Формирователь информационных импульсов Ф генерировал импульсы накачки ИЛ длительностью 1 нс на полувысоте. Одновременно на ИЛ подавался регулируемый ток постоянного смещения  $I_0$ . Источником излучения служил InGaAsP-ИЛ с длиной волны излучения  $\lambda=1,55$  мкм и пороговым током  $I_n=37$  мА. Для лазера применялась пассивная термостабилизация в виде медного теплоотвода. В качестве волоконно-оптической линии задержки использовался отрезок одномодового оптического волокна длиной 50 м. Длина волокна выбиралась небольшой, чтобы минимизировать влияние ВС на результаты измерений. В схему вносились дополнительные потери 20 дБ, что эквивалентно потерям оптической мощности при прохождении сигналом ВС длиной 100 км. Детектирование фотосигнала осуществлялось лавинным фотодиодом со скоростью нарастания переходной характеристики 300 пс при коэффициенте лавинного умножения  $M=10$  и нагрузочном сопротивлении  $R_n=50$  Ом. Для исключения влияния на температуру элементов окружающих воздушных потоков при проведении экспериментов вся оптоэлектронная часть схемы была помещена в специальный кожух. Решающее устройство РУ представляло собой электронный блок с регулируемым порогом срабатывания  $U_n$ . Генератором временных интервалов ГВИ служил источник временных сдвигов И1-8, а регистрацию гистограмм функции распределения кратковременных флуктуаций производили с помощью МАО типа АИ-8К. Многоканальный амплитудный анализатор АИ-8К, предназначенный для анализа амплитудного распределения сигналов, представляет собой многофункциональную плату с шиной ISA. Плата МАО устанавливалась в персональный компьютер IBM PC и не требовала дополнительного оборудования. При работе в режиме многоканального анализатора буферная память использовалась как память гистограммного типа, состоящая из 2048 каналов преобразования с емкостью каждого канала  $2^{24}-1$ . Такая емкость каналов позволяла набирать любой спектр без перезаписи его в память компьютера в процессе набора данных. Период импульсной последовательности генератора составлял 5 мкс, что обусловлено временем преобразования МАО. В измерительной схеме использовалось преобразование по методу Вилкинсона, которое обеспечивает наилучшую линейность и достаточно высокую точность.

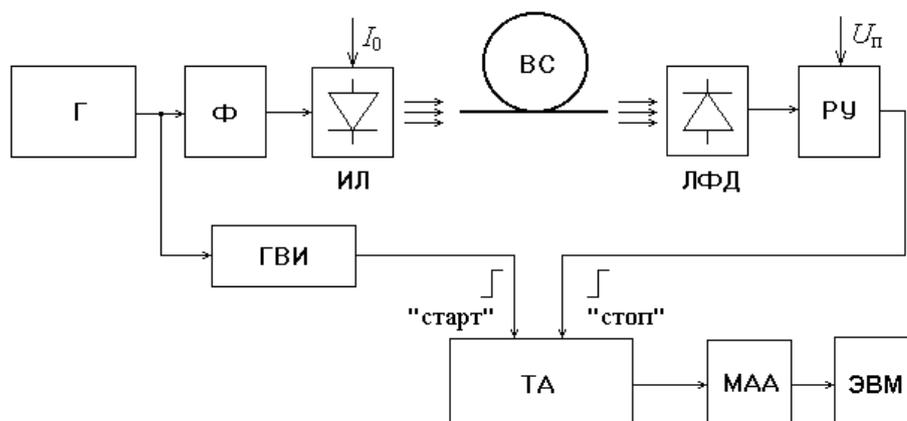


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования флуктуаций временных интервалов в ВОИС

Для выявления зависимостей флуктуаций временного положения информационных импульсов от уровня накачки лазера, режимов работы ЛФД и порога срабатывания решающего устройства в работе измеряли среднеквадратичные отклонения времени распространения импульсов по оптоэлектронному тракту согласно следующей методике. По переднему фронту импульса, формируемого генератором Г, одновременно запускался формирователь информационного импульса Ф и генератор временных интервалов ГВИ. Сигнал на выходе ГВИ с задержкой, примерно равной времени распространения сигнала по оптоэлектронному тракту, поступал на старт-вход ТА-преобразователя и своим передним фронтом запускал его. Импульс тока накачки ИЛ с регулируемой амплитудой задавался формирователем Ф. Излучение лазера, прошедшее через ВС, регистрировали при помощи ЛФД, сигнал с ЛФД поступал на пороговое решающее устройство, в котором вырабатывался TTL стоп-сигнал для ТА-преобразователя. В многоканальном амплитудном анализаторе МАА регистрировалась гистограмма функции распределения амплитуд сигналов на выходе ТА-преобразователя. С помощью соответствующего программного обеспечения накопленные амплитудные распределения обрабатывались, что позволяло оценить флуктуации исследуемых временных интервалов. Все эксперименты проводились без активного термостатирования элементов контура при комнатной температуре.

### 3. Результаты измерений

С целью определения максимальной длины регенерационного участка ВС (или максимальной скорости передачи информации) при заданной вероятности ошибки первоначально регистрировались экспериментальные гистограммы функции распределения временных интервалов при различных режимах работы элементов ВОИС, а затем на основе полученных данных вычислялись среднеквадратические отклонения (рис. 2).

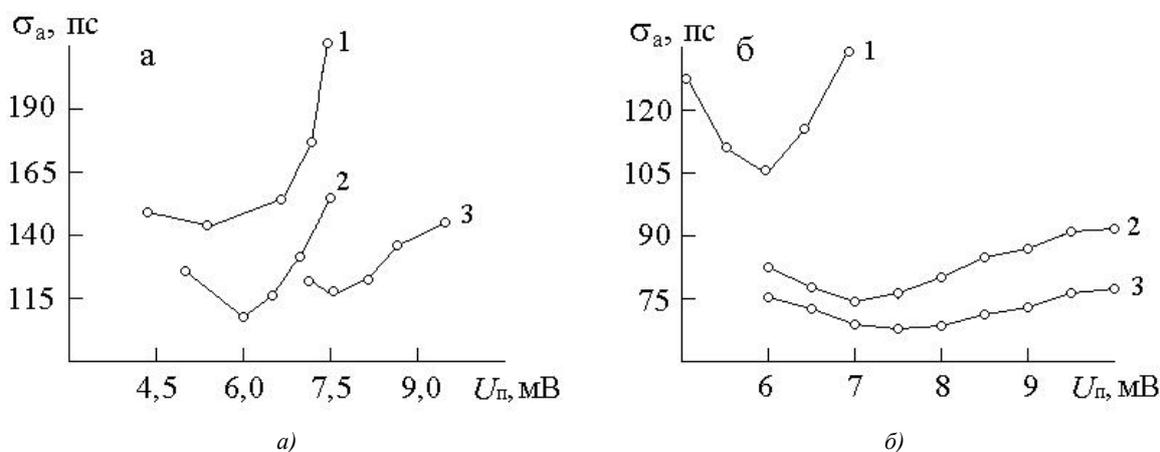


Рис. 2. Зависимости среднеквадратических флуктуаций времени распространения импульса в оптоэлектронном тракте  $\sigma_a$  от величины порога срабатывания решающего устройства  $U_n$  при различных значениях коэффициента лавинного умножения ЛФД (а) и тока постоянного смещения ИЛ (б): а)  $I_0=0,75I_n$ ; 1 –  $M=4$ ; 2 –  $M=10$ ; 3 –  $M=20$ ; б)  $M=10$ ; 1 –  $I_0=0,75I_n$ ; 2 –  $I_0=0,85I_n$ ; 3 –  $I_0=0,9I_n$

Анализ полученных результатов показал, что для каждого значения тока накачки лазера и коэффициента лавинного умножения ЛФД существует определенное значение порога срабатывания решающего устройства, обеспечивающее минимальные флуктуации времени распространения сигналов в ВОИС. Из рис. 2, а следует, что наименьшее значение  $\sigma_a$  достигается при коэффициенте лавинного умножения ЛФД  $M \approx 10$ , когда отношение сигнал/шум близко к максимальному значению [6]. С ростом коэффициента  $M$  отношение сигнал/шум увеличивается до тех пор, пока растущие пропорционально  $M^{2+x}$  ( $x$  – коэффициент избыточного шума, для Ge-ЛФД  $x=0,8-1$ , для InGaAsP-ЛФД  $x=0,5-0,7$ ) дробовые шумы не станут преобладать над дру-

гими шумовыми источниками. Показано [6], что при комнатной температуре для анализируемой системы оптимальный коэффициент лавинного умножения для таких ЛФД лежит в пределах 8–12 и практически не зависит от мощности излучения ИЛ или длины ВС. Увеличение тока постоянного смещения  $I_0$  ведет к уменьшению амплитудных флуктуаций интенсивности излучения и минимизирует временной джиттер ИЛ. Это также снижает уровень флуктуации временного положения импульса в ВОИС в пределах тактового интервала (рис. 2, б). Данный эффект будет наблюдаться до  $I_0=0,9-0,95 I_{th}$ , далее в предпороговом режиме излучение лазера становится нестабильным. Во всех случаях минимальные флуктуации наблюдались, когда порог решающего устройства соответствовал линейному участку фронта импульса. При этом, чем больше крутизна этого участка, т. е. амплитуда сигнала на входе РУ, тем в меньшей степени на величину флуктуаций будет влиять временной разброс моментов срабатывания порогового устройства.

### Заключение

Таким образом, выбором режимов работы элементов ВОИС (ток постоянного смещения ИЛ, напряжение питания ЛФД, величина порога срабатывания решающего устройства) при комнатной температуре можно снизить флуктуации временного положения информационных импульсов в полтора-два раза. При этом скорость передачи информации увеличивается с 1,7 до 3 Гбит/с для длины регенерационного участка 100 км при условии выполнения неравенства (2). Это позволяет более эффективно использовать в протяженных ВОИС применяемые для коррекции ошибок избыточные коды Рида – Соломона ( $RS(n, k)$ ), поскольку упреждающая коррекция ошибок ( $FEC$ ) требует повышения скорости битового потока между кодером и декодером  $FEC$  на величину избыточных символов. Эффективность использования кодов  $RS(n, k)$  связана с резким повышением качества работы ВОИС, в частности позволяет сохранить на прежнем уровне значение  $BER$  при более низком отношении сигнал/шум ( $SNR$ ) на приемной стороне. Так для  $BER=10^{-11}$  использование кодов Рида – Соломона с избыточностью 23 % обеспечивает выигрыш  $SNR$  около 7,2 дБ [7].

Полученные результаты могут найти широкое применение при разработке протяженных волоконно-оптических линий связи, оптоэлектронных динамических запоминающих устройств, используемых в качестве быстродействующей буферной памяти [8] и т. д.

Автор выражает благодарность академику НАН Беларуси А.Ф. Чернявскому за ценные замечания, высказанные при обсуждении результатов работы.

### Список литературы

1. Гауэр, Дж. Оптические системы связи: пер. с англ. / Дж. Гауэр. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
2. Потапов, А. В. Статистические методы измерений в экспериментальной ядерной физике / А.В. Потапов, А.Ф. Чернявский. – М.: Атомиздат, 1980. – 264 с.
3. Малевич, И.А. Метод многоканального анализа флуктуаций фазированных импульсных систем / И.А. Малевич, Ю.И. Постоянов, А.Ф. Чернявский // Автотметрия. – 1974. – № 5. – С. 72–80.
4. Данилевич, В.В. Временные измерения в физическом эксперименте / В.В. Данилевич, А.Ф. Чернявский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 319 с.
5. Ефременко, Д.А. Цифровой метод синтеза образцовых импульсных последовательностей / Д.А. Ефременко, И.А. Малевич // Приборостроение. – 1979. – Т. 22, № 4. – С. 3–7.
6. Chubarov, S.I. Two-wavelength optoelectronic vernier and synthesizer of reference optical scales / S.I. Chubarov, V.L. Kozlov, A.V. Poliakov // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5582. – P. 315–322.
7. Убайдуллаев, Р.Р. Протяженные ВОИС на основе EDFA / Р.Р. Убайдуллаев // Lightwave russian edition. – 2003. – № 1. – С. 22–28.
8. Малевич, И.А. Архитектура быстродействующего оптоэлектронного процессора с параллельной аналоговой и цифровой обработкой информации / И.А. Малевич, А.В. Поля-

---

ков, С.И. Чубаров // Суперкомпьютерные системы и их применение (SSA'2004): сб. докл. междунар. науч. конф., Минск, 26–28 октября 2004 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2004. – С. 43–48.

Поступила 09.11.05

*Белорусский государственный университет,  
Минск, пр. Независимости, 4  
e-mail: polyakov@bsu.by*

**A.V. Poliakov**

**INCREASE OF DATA TRANSFER SPEED  
IN EXTENDED FIBRE-OPTIC INFORMATION SYSTEMS**

Methods of data transmission speed increase are experimentally investigated due to reduction of fluctuations of information signal temporal position in fibre-optic system. Minimization of fluctuation effects at the given temperature is achieved by a choice of optoelectronic components operating mode.