

Влияние нелинейных эффектов на информационные параметры оптоволоконных рециркуляционных запоминающих устройств на основе DWDM-технологии

А.В. Поляков, А.И. Смягликова

Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: polyakov@bsu.by

Волоконно-оптические информационные системы (ВОИС) занимают доминирующее положение среди устройств, предназначенных для высокоскоростной передачи и обработки потоков данных. В настоящее время актуальной является 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. 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.

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. Сделать это можно двумя путями: уменьшить спектральный интервал между каналами и увеличить канальную скорость B (что связано с уменьшением тактового интервала и, соответственно, длительностью информационных импульсов).

До тех пор, пока оптическая мощность в волоконном световоде (ВС) невелика (несколько мВт), волокно может считаться линейной средой, то есть потери и показатель преломления волокна не зависят от мощности сигнала. Однако внедрение технологии спектрального уплотнения WDM/DWDM, которая ведет к значительному возрастанию вводимой в ВС мощности, а также повышение скорости передачи до 10 Гбит/с и выше, требует учета нелинейных эффектов в ВС при исследовании ВОИС.

Одним из основных компонентов ВОИС является волоконно-оптическое динамическое запоминающее устройство (ВОДЗУ) регенеративного типа, которое может использоваться в качестве быстродействующей динамической буферной памяти в оптических процессорах, оптоволоконных линиях связи; при исследовании быстропротекающих процессов для записи, хранения и обработке поступающих с большой скоростью информационных полей и т.п. 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 таких оптоволоконных системах существует возможность организации по одному световоду одновременно нескольких информационных каналов, используя DWDM-технологию.

Для минимизации влияния нелинейных эффектов были выбраны следующие параметры для волоконно-оптического запоминающего устройства. Применялась DWDM-технология с $k = 8, 16, 32$ информационными каналами, имевшими межканальный интервал 100 ГГц. В качестве линии задержки использовался комбинированный световод с коррекцией хроматической дисперсии, состоящий из 22 км стандартного одномодового волокна (дисперсия 17 пс/нм·км на $\lambda = 1550$ нм) и 3,5 км компенсирующего волокна с W-профилем (дисперсия минус 106 пс/нм·км на $\lambda = 1550$ нм), в результате чего средняя хроматическая дисперсия на всем участке волоконного световода составляла $D_{\text{хр}} = 0,1$ пс/нм·км. Поляризационная модовая дисперсия равнялась $D_{\text{PMD}} = 0,1$ пс/км^{1/2}, усредненные потери составляли $\alpha = 0,26$ дБ/км. В качестве источников излучения использовались лазеры, согласованные с отрезками волокна, на которых сформированы брэгговские решетки (DFB). Использование решеток позволяет гибко варьировать длину волны лазерной генерации в пределах контура усиления активной среды лазера, обеспечить стабильность генерации, уменьшить ширину лазерной линии, реализовать ее перестройку. DFB-лазеры обладали высокой температурной стабильностью и в окрестностях рабочей длины волны 1,55 мкм при прямой модуляции со скоростью более 10 Гбит/с, имели пиковую мощность излучения $P_0 = 2\text{--}10$ мВт на один спектральный канал и ширину линии генерации не более 0,01 нм. В этом случае доминирующим нелинейным эффектом являлась фазовая самомодуляция (ФСМ).

Фазовая самомодуляция возникает вследствие того, что показатель преломления волокна содержит нелинейно-зависимую от интенсивности компоненту, которая вызывает смещение фазы, пропорциональное ин-

тенсивности 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, ФСМ модифицирует влияние дисперсии на расширение импульса. Так как этот эффект изменения ЛЧМ пропорционален мощности передаваемого сигнала, ФСМ более ощутим в системах, использующих высокие мощности передачи. Поэтому вызванные ФСМ 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.

На основе разработанной математической модели проведено исследование динамики изменения длительности циркулирующих импульсов в волоконно-оптическом запоминающем устройстве в зависимости от числа спектральных каналов и скорости записи информации с учетом дисперсионных свойств ВС (хроматической и поляризационной модовой дисперсии) и фазовой самомодуляции. Установлено, что длительность информационных импульсов в процессе циркуляции вначале уменьшается, а затем увеличивается. Начальное сжатие импульсов объясняется тем, что частотная модуляция импульса за счет ФСМ (отрицательный чирп) и наводимая хроматической дисперсией частотная модуляция (положительный чирп) для длин волн, больших длины волны нулевой дисперсии, имеют противоположный знак. В результате конкуренции эти два явления взаимно компенсируют друг друга и после прохождения некоторого числа циклов рециркуляции ЛЧМ-модуляция пропадает, импульс становится спектрально ограниченным, а его длительность – минимальной. Дальнейшее уширение импульса связано с тем, что доминирующим фактором становится накопившаяся хроматическая дисперсия в сочетании с поляризационной модовой дисперсией. Данный эффект увеличивается с увеличением передаваемой мощности (т. е. увеличением числа информационных каналов), поэтому наблюдается увеличение степени начального сжатия и скорости последующего расширения импульсов с увеличением передаваемой мощности. В результате численного моделирования установлено, что длительность циркулирующих информационных импульсов не превышает значения $0,6T_i$ (T_i – величина тактового интервала) до 190 ($k = 32$) и до 385 ($k = 8$) циклов рециркуляций при $P_0 = 2$ мВт и до 50 ($k = 32$) и 100 ($k = 8$) циклов при $P_0 = 10$ мВт для $B = 2,5$ Гбит/с; для $B = 10$ Гбит/с данные значения находятся в интервале 80–170 ($P_0 = 2$ мВт) и 22 – 43 цикла ($P_0 = 10$ мВт).