

ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА С 2R РЕГЕНЕРАЦИЕЙ

А. А. Запольская

Для осуществления высокоскоростной широкополосной системы обмена данными как между спутниками, так и с наземным сегментом все чаще предлагается использовать оптический диапазон. Одной из главных особенностей оптических лазерных систем связи по сравнению с радиосистемами являются существенно более узкие диаграммы направленности лучей и увеличенные коэффициенты усиления передающих оптических антенн (что позволяет получить большое отношение сигнал/шум и достичь очень высокой пропускной способности линий связи).

При высокоскоростной передаче информации для космического, а особенно для наземного сегмента спутниковых сетей связи, необходимо использовать специализированные быстродействующие буферные запоминающие устройства. Такие устройства позволяют избежать потерь оптической информации при ее доставке конечному потребителю. Одним из перспективных направлений решения подобных задач является использование волоконно-оптических динамических запоминающих устройств (ВОДЗУ). 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 оптоволоконных системах существует возможность организации по одному световоду одновременно нескольких информационных каналов, используя DWDM-технологии.

Нами разработана архитектура цифрового волоконно-оптического динамического запоминающего устройства со спектральным уплотнением информационных каналов. Отличительной особенностью данной структуры является следующее. Во-первых, использование комбинации стандартного одномодового волокна и волокна с отрицательной дисперсией позволило уменьшить результирующую хроматическую дисперсию более чем на два порядка. Во-вторых, применяется комбинация двух волоконно-оптических эрбиевых усилителей. Первый из них 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. С целью увеличения времени хранения информации в

оптическом диапазоне осуществлялась 2R–регенерация (re-amplification+re-shaping) циркулирующих информационных сигналов с помощью нелинейного оптического кольцевого зеркала (НОКЗ). Это дает возможность работать с гигагерцовыми скоростями записи информационного потока и не осуществлять промежуточное периодическое преобразование сигналов из оптического диапазона в электрический и обратно. Ширина полосы усиления волоконных усилителей составляет 35–40 нм и спектральный интервал между информационными каналами равняется 0,8 нм. Поэтому запоминающее устройство может проводить одновременную запись и считывание по 32 информационным каналам на разных длинах волн, при этом существует возможность организовать еще несколько дополнительных вспомогательных служебных каналов.

С учетом предложенной архитектуры ВОДЗУ была разработана математическая модель для анализа информационных параметров, таких как время хранения информации t_{xp} и информационная емкость W :

$$t_{\text{од}} = T \cdot N + T_R N_R, \quad T = nL/c, \quad T_R = nL_R/c, \quad (1)$$

где T – период рециркуляции, T_R – период регенерации, N – количество циклов рециркуляции, N_R – количество числа регенераций, L – длина волоконно-оптической петли, L_R – длина оптоволокна в НОКЗ, n – показатель преломления сердцевины волокна (для длин волн излучения в окрестности 1550 нм $n=1,48$), c – скорость света в вакууме.

Информационная емкость W рассматриваемой системы зависит от скорости поступающего потока данных B следующим образом:

$$W = kBLn/c, \quad (2)$$

где k – число спектральных информационных каналов.

Расчеты времени хранения проводились для условия $BER < 10^{-9}$, где $BER = \sqrt{BER_a^2 + BER_j^2}$. Данная вероятность ошибки складывается из амплитудных флуктуаций (BER_a) и временного джиттера (BER_j), которые можно оценить из следующих формул:

$$BER_a = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\xi}}{2\sqrt{2}} \right), \quad BER_j = \operatorname{erfc} \left(\frac{T_i}{2\sqrt{2}\sigma_j} \right) \approx \frac{4\sigma_j}{\sqrt{2\pi}T_i} \exp \left(-\frac{T_i^2}{8\sigma_j^2} \right), \quad (3)$$

где ξ – отношение сигнал/шум на выходе фотоприемного устройства, T_i – величина тактового интервала, σ_j – значение временного джиттера Гордона – Хауса.

При расчете отношения сигнал/шум учитывались дробовые шумы лавинного фотодиода ($N_{\text{ад}}$), амплитудные шумы лазера ($N_{\text{эа}}$), тепловые

шумы нагрузочного сопротивления ($N_{\text{оаі}}$), шумы на выходе линейного усилителя ($N_{\text{оі}_1}$), усилителя мощности ($N_{\text{оі}_2}$) и усилителя в НОКЗ ($N_{\text{уц}_3}$), шумы, вызванные биениями между сигналом и усиленным спонтанным излучением ($N_{\text{і-ASE}}$):

$$\xi = \frac{(P'_{\text{аі}} S_{\lambda} M)^2 \cdot R_{\text{іааі}}}{N_{\text{аі}} + N_{\text{еаі}} + N_{\text{оаі}} + N_{\text{оі}_1} + N_{\text{оі}_2} + N_{\text{оі}_3} + N_{\text{і-ASE}}}, \quad (4)$$

где $P'_{\text{аі}}$ – мощность излучения на входе фотодетектора, S_{λ} – спектральная чувствительность фотоприемника (для InGaAs-фотодиодов $S_{\lambda} \approx 0,9$ А/Вт), M – коэффициент лавинного умножения фотодиода (для рin-ФД $M=1$, для ЛФД оптимальным с точки зрения максимума отношения сигнал/шум является $M=10-12$ при комнатной температуре), $R_{\text{наі}}$ – величина нагрузочного сопротивления (для наилучшего согласования распространения сигналов в электрическом тракте, как правило, $R_{\text{наі}}=50$ Ом).

На основе разработанной математической модели проведены исследования эффекта разрушения оптических информационных полей в процессе хранения цифровой информации при спектральной и временной компрессии входных потоков. Расчеты осуществлялись при скорости передачи информации $B=10$ Гбит/с и $B=2,5$ Гбит/с при RZ-кодировании. Показано, что совместное влияние амплитудных флуктуаций, явления временного джиттера приводит к появлению максимума времени хранения в зависимости от длины оптоволоконной петли (рис. 1). Это позволяет выбирать длину волоконного световода, обеспечивающую максимальное время хранения. Установлено, что значение этой длины не зависит от скорости поступающей информации, мощности излучения лазера и коэффициента усиления волоконного эрбиевого усилителя мощности EDFA₂.

На рисунке 2 представлены результаты расчета информационной емкости. Точками отмечена информационная емкость, соответствующая максимальному времени хранения.

Таким образом, для оценки возможностей использования рассматриваемых ВОДЗУ в качестве буферной памяти проведены совместные исследования времени хранения и информационной емкости при заданной вероятности ошибки $BER < 10^{-9}$. Для длины волоконно-оптической петли хранения $L=15$ км, количества информационных каналов $k=32$ и мощности излучения полупроводникового лазерного источника излучения $P=10$ мВт время хранения информации при заданной вероятности ошиб-

ки равно $t_{xp1}=0,3$ с, информационная емкость составляет $W_1=3$ Мбайт (скорость информационного потока $V=10$ Гбит/с); для $V=2,5$ Гбит/с $t_{xp2}=5,2$ с, $W_2=0,75$ Мбайт. Данное время хранения на порядок больше, чем для ВОДЗУ с 1R-регенерацией.

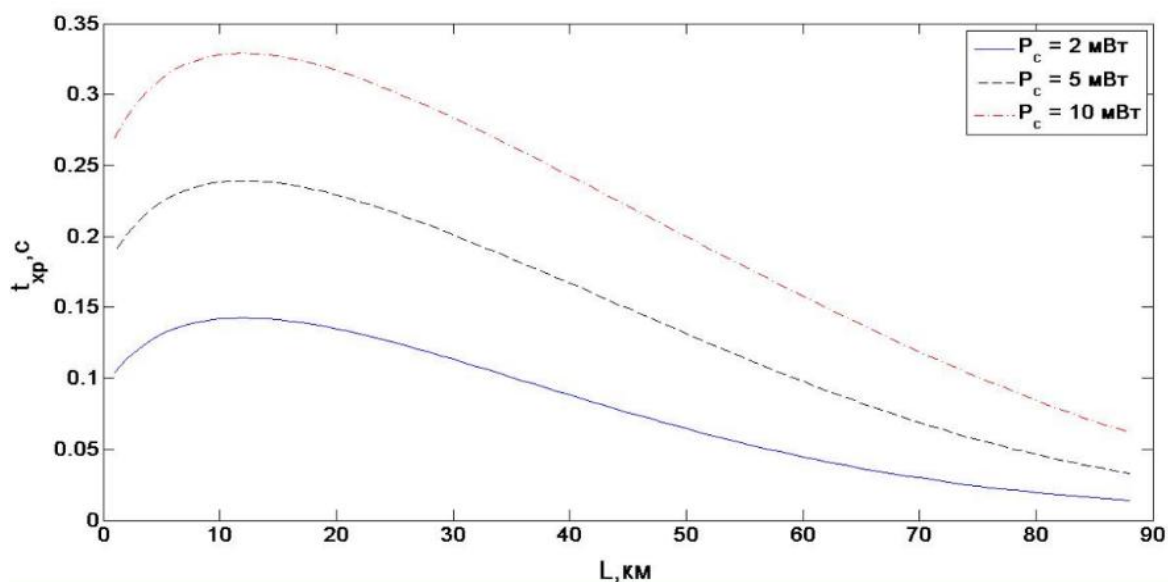


Рис. 1. Зависимость времени хранения информации от длины волоконно-оптической петли рециркуляции для скорости информационного потока $V=10$ Гбит/с для различной мощности излучения полупроводникового источника излучения

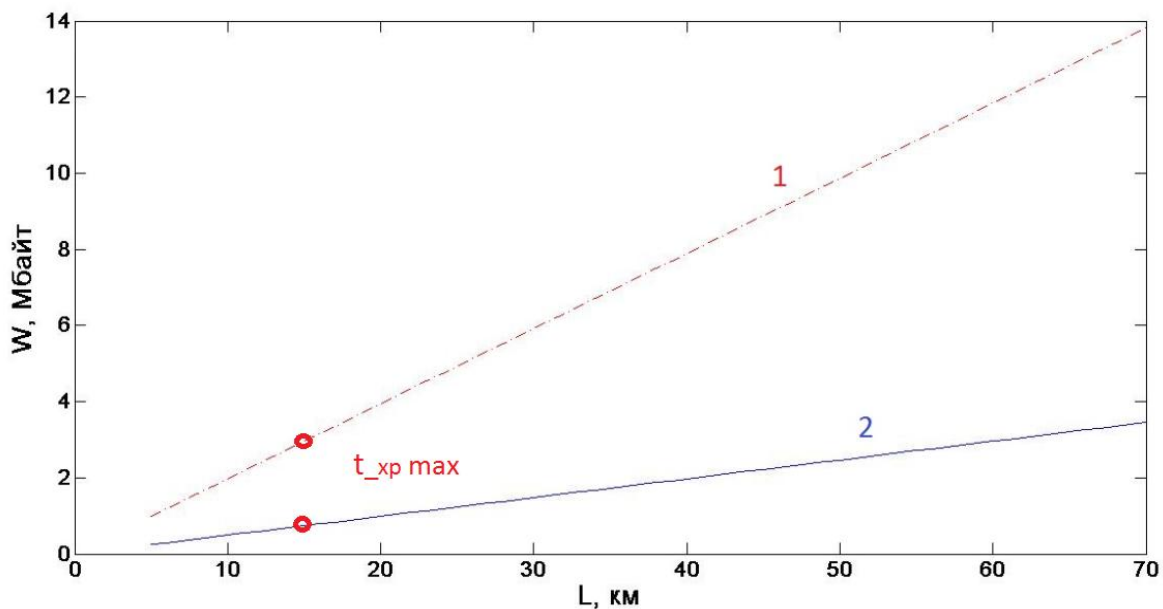


Рис. 2. Зависимость информационной емкости ВОДЗУ от длины волоконно-оптической петли при скорости информационного потока 10 Гбит/с (1) и 2,5 Гбит/с (2)