

УДК 681.327.68

*А.В. ЖУКОВСКИЙ, А.В. ПОЛЯКОВ***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ
В ОПТОВОЛОКОННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ БУФЕРНОЙ ПАМЯТИ**

The structure of the optoelectronic dynamic memory, based on a method of regenerative storage and record of the optical information in a recirculating memory element with a fiber-optical delay line is offered, the multiparameter analysis of information characteristics of such system is lead.

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 ее ввода 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 быстродейст-

вующие 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. Достоинство ВОДЗУ заключается в том, что запись информационного потока в них осуществляется в реальном масштабе времени, а данные в цифровой и аналоговой форме хранятся 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 [1, 2] в основном ориентированы только на восстановление амплитудных характеристик циркулирующих сигналов, а время хранения информации ограничивается дисперсионными свойствами волоконных световодов (ВС). В работе [3] представлена разработанная нами архитектура цифрового ВОДЗУ со спектральным уплотнением информационных каналов, позволяющая уменьшить влияние указанных недостатков на информационные характеристики таких устройств. Данная структура обладает следующими отличительными особенностями. Во-первых, применение комбинации стандартного одномодового волокна и волокна с отрицательной дисперсией позволяет уменьшить результирующую хроматическую дисперсию более чем на два порядка (средняя хроматическая дисперсия на всем участке волоконного световода в этом случае не превышает $D_{xp} = 0,05$ пс/нм·км). Во-вторых, использование двух волоконно-оптических эрбиевых усилителей (EDFA – erbium-doped fiber amplifier), один из которых EDFA₁ является линейным и компенсирует потери в петле рециркуляции, а второй EDFA₂ представляет собой выходной усилитель мощности и дает возможность исключить использование электронных усилителей на выходе каждого фотоприемника. Кроме того, регенерация циркуляционных информационных сигналов происходит в оптическом диапазоне, что позволяет работать с гигагерцовыми скоростями записи информационного потока и не осуществлять промежуточное периодическое преобразование сигналов из оптического диапазона в электрический и обратно. Поскольку спектральная полоса усиления EDFA достигает 35 нм в окрестности длины волны $\lambda = 1550$ нм, а используемый интервал между спектральными каналами составляет 0,8 нм, общее число каналов превышает 40, при этом 32 канала являются информационными, а остальные – вспомогательными служебными.

Целью настоящей работы являлась разработка модели процесса рециркуляционного хранения информации в ВОДЗУ с дисперсионной компенсацией и периодическим оптическим восстановлением амплитуды сигналов, а также оценка информационных параметров таких систем.

Моделирование процесса рециркуляционного хранения информации

Время хранения информации в волоконно-оптическом динамическом запоминающем устройстве

$$t_{xp} = T \cdot N, \quad T = nL/c, \quad (1)$$

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

Особенностью процесса динамического хранения информации в замкнутом оптоэлектронном контуре является накопление искажений в процессе рециркуляции. Количество циклов рециркуляции N определялось из следующих условий: 1) значение вероятности ошибки при приеме информационных сигналов в битовом формате (BER – bit error rate) будет удовлетворять условию $BER \leq BER_0 = 10^{-9}$; 2) длительность циркулирующих импульсов τ не должна превышать величины тактового интервала T_i $\tau < T_i$. Информация представляется в виде самосинхронизирующих кодов форматов RZ или Манчестер-II.

Значение BER_a , обусловленное шумовыми источниками, рассчитывается согласно следующей формуле [4]:

$$BER_a = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\xi}}{2\sqrt{2}} \right), \quad (2)$$

где erfc – функция ошибок; ξ – отношение сигнал/шум на выходе приемного устройства.

Согласно предлагаемой структуре ВОДЗУ основными источниками шумов могут быть дробовые шумы фотодетектора $N_{др}$, тепловые шумы нагрузочного сопротивления $N_{теп}$, шумы эрбиевых оптических усилителей $N_{ус}$, шумы, обусловленные биениями между сигналом и усиленным спонтанным излучением (ASE – amplified spontaneous emission) $N_{с-ASE}$, и флуктуации излучения инжекционного лазера (ИЛ) $N_{лаз}$, величина которых, как показано в [5], является соразмерной с остальными источниками шумов при длинах волоконного световода до 20÷25 км. Считая эти источники шумов независимыми случайными величинами, формулу для расчета отношения сигнал/шум можно представить в следующем виде:

$$\xi = \frac{(P'_{вых} S_{\lambda} M)^2 \cdot R_{нагр}}{N_{др} + N_{лаз} + N_{теп} + N_{ус_1} + N_{ус_2} + N_{с-ASE}}, \quad (3)$$

где $P'_{вых}$ – 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 (ФД) (для pin-ФД $M = 1$, для ЛФД оптимальным с точки зрения максимума отношения сигнал/шум является $M = 10 \div 12$ при комнатной температуре [5]); $R_{нагр}$ – величина нагрузочного сопротивления (для наилучшего согласования распространения сигналов в электрическом тракте, как правило, $R_{нагр} = 50$ Ом).

Дробовые шумы ЛФД, флуктуации интенсивности излучения ИЛ и тепловые шумы нагрузочного сопротивления фотоприемника подробно описаны в работе [5].

Эффект накопления шума в процессе рециркуляции по замкнутому контуру можно рассматривать, исходя из предположения, что коэффициент усиления G_1 волоконно-оптического усилителя подобран таким образом, чтобы компенсировать потери на каждом цикле рециркуляции. Такой подход, хотя и является упрощенным, в частности, не учитывает эффект насыщения усиления, однако дает достаточно точные результаты [6]. Для простоты анализа удобно разделить шум на квантовый и классический. Классический шум аналогичен полезному сигналу, т. е. ослабляется в петле и усиливается в усилителе. Кроме того, на каждом цикле рециркуляции к усиленному классическому шуму от предыдущей циркуляции добавляется шум усиленного спонтанного излучения, который линейно накапливается. Таким образом, мощность шума, вносимого EDFA, будет состоять из мощности усиленного спонтанного излучения, которое линейно накапливается на каждом цикле рециркуляции, и шума, связанного с квантовыми флуктуациями. Шум на выходе линейного эрбиевого оптического усилителя EDFA₁ после $N-1$ циркуляций равен

$$N_{ус_1} = \left(h\nu \left[2(N-1)n_{sp}(G_1-1) + 1 \right] K_n G_2 K_2 S_{\lambda} M \right)^2 B_0 B_f R_{нагр}, \quad (4)$$

где ν – частота оптического сигнала отдельного информационного сигнала; B_0 – оптическая полоса частот, которая определяется спектральным окном фильтра или демультиплексора; n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, зависящий от заселенности уровней эрбия; G_1 – коэффициент усиления линейного EDFA₁; K_n – потери мощности в рециркуляционной петле; K_2 – потери мощности сигнала при распространении от петли до фотоприемника; h – постоянная Планка. Частота ν , соответствующая длине волны 1550 нм, равна $1,94 \cdot 10^{14}$ Гц, $n_{sp} = 1,2$. Поскольку коэффициент усиления EDFA₁ должен компенсировать потери мощности излучения в волоконно-оптической петле на каждом цикле рециркуляции, то величину G_1 можно оценить из соотношения

$$G_1 = \exp(0,23[\alpha_1 + \alpha_B L]),$$

где α_1 – суммарные потери на соединениях и элементах, входящих в волоконно-оптическую петлю; $\alpha_B = 0,25$ дБ/км – погонные потери в самом волокне. Величина коэффициента потерь в петле равна $K_n = 10^{-0,1(\alpha_n + \alpha_B L)}$.

Значение шума $N_{ус_2}$ на последнем цикле рециркуляции определяется комбинацией линейного усилителя EDFA₁ и усилителя мощности EDFA₂. Шум-фактор двух последовательных усилителей, характеризующихся коэффициентами усиления G_1 и G_2 и шум-факторами NF_1 и NF_2 соответственно, определяется по формуле

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1},$$

где $NF_1 = \frac{1}{G_1} [1 + 2n_{sp}(G_1 - 1)]$; $NF_2 = \frac{1}{G_2} [1 + 2n_{sp}(G_2 - 1)]$.

В этом случае формула для расчета N_{yc_2} имеет вид

$$N_{yc_2} = \left(hv \left[NF_1 G_1 G_2 + (NF_2 - 1) G_2 \right] K_2 S_\lambda M \right)^2 B_0 B_f R_{нар} . \quad (5)$$

Кроме того, при нахождении результирующего отношения сигнал/шум на входе порогового решающего устройства необходимо учитывать шумы, связанные с флуктуациями фототока, вызванными биениями между сигналом и усиленным спонтанным излучением (N_{c-ASE}):

$$N_{c-ASE} = 4hvP'_{вых} G_1 NF (S_\lambda M)^2 B_f R_{нар} . \quad (6)$$

Межсимвольные помехи обусловлены тем, что часть энергии, относящаяся к одному тактовому периоду, поступает на ФП в течение следующего периода. При передаче символа «1» такая помеха приводит к уменьшению величины интенсивности сигнальных отсчетов, а в случае символа «0» появляется дополнительная шумовая составляющая. Показано [7], что на практике величина межсимвольных помех не превышает 1 дБ и может не учитываться в расчетах при условии, что длительность циркулирующих импульсов τ удовлетворяет условию $\tau / T_i \leq 0,6$. Поскольку, как правило, начальная длительность генерируемых ИЛ импульсов равна $\tau_0 = 0,5 T_i$ и в процессе рециркуляции значение τ будет увеличиваться из-за дисперсионных свойств ВС, то при анализе информационных характеристик ВОДЗУ влиянием межсимвольных помех пренебрегать нельзя. В результате аппроксимации графических зависимостей влияния межсимвольных помех на мощность излучения в передаваемых импульсах, представленных в работе [7], нами получены аналитические выражения, связывающие оптическую мощность сигнала P_c , усредненную по обоим двоичным символам $P_c = (P_1 + P_0) / 2$ при условии равновероятного появления в информационной последовательности битов «0» и «1», с эквивалентной мощностью при наличии межсимвольных помех $P_{вых}$ для гауссовой формы циркулирующих импульсов:

$$P_{вых} = 10^{-0,08 B \tau \exp(2B\tau)} P_c K_1, \quad (7)$$

$$K_1 = 10^{-0,1(\alpha_{MUX} + 2\alpha_c + \alpha_{3dB})}, \quad \tau = \left(\tau_0^2 + (D_{xp} \Delta \lambda NL)^2 + D_{PMD}^2 NL \right)^{1/2}, \quad \tau_0 = 0,5 T_i = 0,5 \frac{1}{B},$$

где B – скорость поступающего потока данных; α_{MUX} – потери на мультиплексоре (дБ); α_c – потери на соединении (дБ); α_{3dB} – потери на ответвителе (дБ); D_{xp} – средняя хроматическая дисперсия на всем участке ВС ($D_{xp} = 0,05$ пс/нм·км); D_{PMD} – поляризационная модовая дисперсия ($D_{PMD} = 0,1$ пс/км^{1/2}); $\Delta \lambda$ – спектральная ширина генерации ИЛ ($\Delta \lambda = 0,16$ нм).

Мощность излучения на входе ФП $P'_{вых}$ можно оценить по формуле

$$P'_{вых} = P_{вых} G_2 K_2, \quad K_2 = 10^{-0,1(\alpha_{DEMUX} + \alpha_{in} + 6\alpha_c + \alpha_{3dB})}, \quad (8)$$

где α_{DEMUX} – потери на демультиплексоре (дБ).

В моделях оценки информационных характеристик быстродействующих ВОДЗУ субнаносекундного диапазона на уровень коэффициента ошибок BER, кроме амплитудных флуктуаций, заметное влияние могут оказывать временные флуктуации положения информационных импульсов относительно своего тактового интервала, известные как временной джиттер Гордона – Хауса (ДГХ) (Gordon – Haus jitter). Данный эффект заключается в следующем. Оптический усилитель оказывает влияние не только на амплитуду, но и на фазу усиливаемых сигналов, что ведет к флуктуациям частоты оптического сигнала. Вследствие дисперсии групповой скорости оптического сигнала в волокне случайные изменения скорости приводят к случайному сдвигу положения импульсов на входе фотоприемника, что и является временным джиттером.

С использованием результатов, представленных в работе [8], величину ДГХ на N -м цикле рециркуляции можно оценить согласно выражению

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{2} \frac{S_{sp}}{E_0} \sigma_\tau^2 \left[N + N (Nd + \alpha_{ch})^2 \right], \quad (9)$$

где σ_τ – среднеквадратичная длительность импульса, E_0 – энергия информационного импульса.

Спектральная плотность «белого» шума линейного волоконного эрбиевого усилителя вычисляется по формуле

$$S_{sp} = (G_1 - 1) n_{sp} hv. \quad (10)$$

Энергия информационного импульса супергауссовой формы может быть представлена в форме

$$E_0(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\text{вых}}^1 \exp \left[-\left(\frac{t}{\tau} \right)^{2m} \right], \quad (11)$$

где $P_{\text{вых}}^1$ – мощность оптического импульса, соответствующая логической «1», для гауссовой формы импульса $m=1$.

Коэффициент дисперсии групповой скорости имеет вид

$$d = -\frac{D_{\text{xp}} \lambda^2}{2\pi c} \frac{L}{\tau^2}. \quad (12)$$

Параметр α_{ch} представляет собой чирп-фактор ИЛ, который определяет скорость линейного изменения несущей частоты оптического сигнала при инжекционной накачке. Плотность носителей ΔN_c зависит от величины тока модуляции I_m , вследствие чего изменяется коэффициент преломления n_{IL} лазерного резонатора и соответственно частота продольной моды генерации. Величину α_{ch} можно оценить по формуле $\alpha_{\text{ch}} = A \Delta N_c(I) I_m / n_{\text{IL}}$, где A – коэффициент пропорциональности. Для InGaAsP-ИЛ $A=7 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$, $\Delta N_c=2,7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}/\text{мА}$, $n_{\text{IL}}=3,5$. Значение I_m рассчитывается как разность между общим током накачки $I=1,5I_{\text{п}}$ и током постоянного смещения $I_0=0,9I_{\text{п}}$. Если принять пороговый ток $I_{\text{п}}=37 \text{ мА}$, то $I_m=23 \text{ мА}$.

Плотность вероятности $p(\Delta t)$ временных флуктуаций оптических импульсов при ДГХ описывается гауссовой статистикой и выражается через σ_j^2 как $p(\Delta t) = (2\pi\sigma_j^2)^{-1/2} \exp(-\Delta t^2 / 2\sigma_j^2)$. Таким образом, уровень BER_j , обусловленный эффектом ДГХ, можно представить как

$$\text{BER}_j = \text{erfc} \left(\frac{T_i}{2\sqrt{2}\sigma_j} \right) \approx \frac{4\sigma_j}{\sqrt{2\pi}T_i} \exp \left(-\frac{T_i^2}{8\sigma_j^2} \right). \quad (13)$$

Результирующее значение уровня ошибок определяется следующим образом:

$$\text{BER} = \sqrt{\text{BER}_a^2 + \text{BER}_j^2}. \quad (14)$$

Проблема увеличения времени динамического хранения информации в контуре ВОДЗУ находится в неразрывной связи с вопросом информационной емкости этого контура. Поэтому эти два параметра ВОДЗУ необходимо исследовать вместе. Информационная емкость W рассматриваемой системы зависит от скорости поступающего потока данных B следующим образом:

$$W = kBLn / c, \quad (15)$$

где k – число спектральных информационных каналов.

Результаты и их обсуждение

Предложенная математическая модель (1) – (15) процесса рециркуляции позволяет провести исследования, направленные на улучшение информационных характеристик ВОДЗУ в зависимости от конструктивных особенностей контура с учетом параметров, представленных в таблице. Установлено (рис. 1), что вначале 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

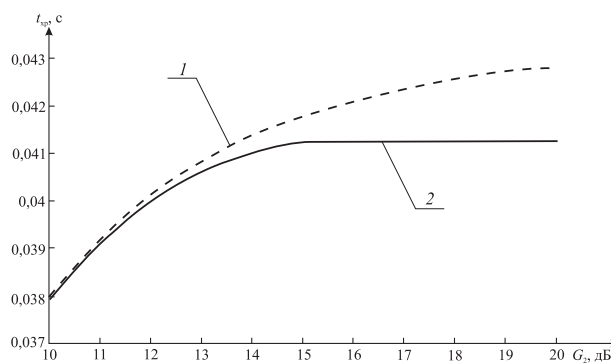


Рис. 1. Время хранения информации в ВОДЗУ при различных коэффициентах усиления волоконно-оптического эрбиевого усилителя мощности:

1 – с учетом джиттера Гордона – Хауса, 2 – без учета временного джиттера

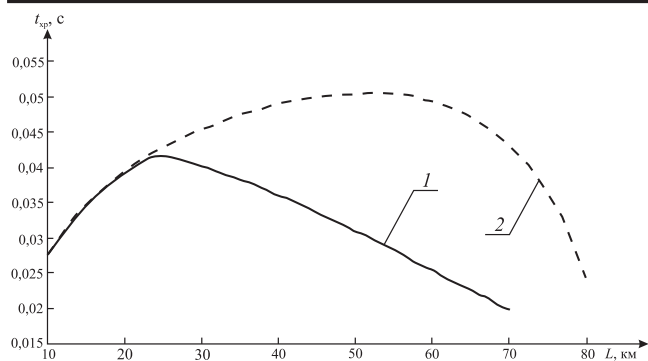


Рис. 2. Зависимость времени хранения информации от длины волоконно-оптической петли рециркуляции для скорости информационного потока $B = 10$ Гбит/с: 1 – с учетом джиттера Гордона – Хауса; 2 – без учета временного джиттера

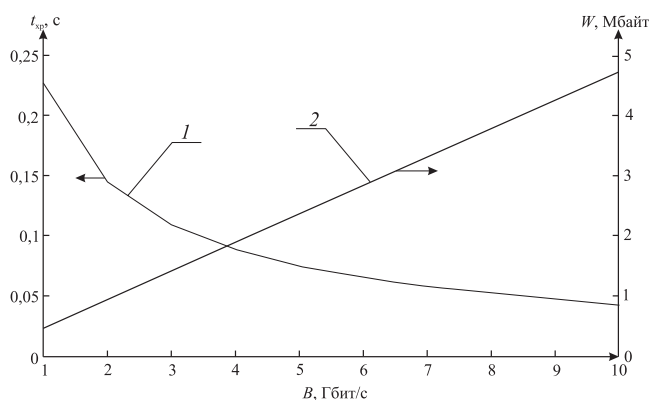


Рис. 3. Зависимость времени хранения информации (1) и информационной емкости (2) параметров ВОДЗУ от скорости записи цифрового информационного потока

информации необходимо использовать специальные методы оптической регенерации, обеспечивающие восстановление информационной импульсной последовательности не только по амплитуде, но по форме и временному положению.

Параметры ВОДЗУ, используемые для расчетов

Параметры	Значение	Параметры	Значение	Параметры	Значение
α_{MUX}	6 дБ	$\alpha_{\text{п}}$	4 дБ	$\alpha_{\text{с}}$	0,2 дБ
α_{DEMUX}	1,5 дБ	$P_{\text{с}}$	2 мВт	$\alpha_{\text{зdB}}$	3 дБ
$\alpha_{\text{из}}$	0,15 дБ	$\alpha_{\text{пер}}$	2 дБ	$\alpha_{\text{в}}$	0,25 дБ/км

Таким образом, 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. Выявлены закономерности влияния режимов работы элементов контура на предельно достижимые информационные характеристики.

1. Laevens K., Maeneclaey M., Brunel H. // Telecommun. Syst. 2006. Vol. 31. P. 259.
2. Fu S., Shum P., Wu C. et al. // Appl. Phys. B. 2006. Vol. 85. P. 571.
3. Волоконно-оптическое запоминающее устройство: пат. 8012 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 11 C 21/00, G 11 C 13/04 / И.А. Малевич, А.В. Поляков, С.И. Чубаров, заявитель Бел. гос. ун-т. № 20110684; заявл. 09.09.11; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2012. № 1. С. 257.
4. Srivastava R., Singh R.K., Singh Y.N. // Optical and Quantum Electronics. 2009. Vol. 41. P. 463.
5. Поляков А.В. // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. С. 33.
6. Убайдуллаев Р.Р. // Lightwave russian edition. 2003. № 1. С. 22.
7. Гауэр Дж. Оптические системы связи. М., 1989.
8. Agrawal G.P. Fiber Optic Communication Systems. New York, 2002.

Поступила в редакцию 22.12.11.

Андрей Вячеславович Жуковский – студент 4-го курса факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Александр Владимирович Поляков – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и аэрокосмических технологий.

расчетов следует, что коэффициент усиления усилителя мощности EDFA₂ может быть ограничен величиной 16 дБ, поскольку дальнейшее увеличение усиления не приводит к росту времени хранения информации из-за дисперсионных свойств ВС. Совместное влияние амплитудных флуктуаций, явления временного джиттера и эффекта межсимвольных помех приводят к появлению максимума времени хранения информации в зависимости от длины оптоволоконной петли. Наибольшее время хранения для данной конфигурации ВОДЗУ наблюдается при длине волоконно-оптического контура 25 км (рис. 2). В этом случае требуемая хроматическая дисперсия 0,05 пс/нм·км достигается путем комбинации 20 км стандартного одномодового волокна (дисперсия 17 пс/нм·км на $\lambda = 1550$ нм) и 5,13 км компенсирующего волокна (дисперсия –66 пс/нм·км на $\lambda = 1550$ нм). На основе графиков, представленных на рис. 3, можно провести общую оценку информационных параметров ВОДЗУ в зависимости от скорости поступления информационного потока. Так, для скорости информационного потока $B = 10$ Гбит/с время хранения информации при заданной вероятности ошибки равно $t_{\text{хр1}} = 34$ мс, информационная емкость составляет $W_1 = 4,7$ Мбайт; для $B = 2,5$ Гбит/с $t_{\text{хр2}} = 0,12$ с, $W_2 = 1,3$ Мбайт. С целью увеличения времени хранения информации