

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДЛИНЫ УЧАСТКА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОСП ПО ДИСПЕРСИИ**

**ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ  
ДІЛЯНКИ РЕГЕНЕРАЦІЇ ВОСП ПО ДИСПЕРСІЇ**

**USE OF SIMULATION FOR DISPERSION REGENERATION SECTION LENGTH  
EVALUATION IN FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS**

**Аннотация.** В статье решается задача определения длины участка регенерации ВОСП по дисперсионным искажениям сигнала путем имитационного моделирования в MatLab. Проводится сравнение полученных результатов с аналогичными исследованиями по данному направлению.

**Анотація.** В статті вирішується задача визначення довжини ділянки регенерації ВОСП по дисперсійним спотворенням сигналу шляхом імітаційного моделювання в MatLab. Проводиться порівняння отриманих результатів з аналогічними дослідженнями в даному напрямі.

**Summary.** Problem of regeneration section length evaluation in fiber-optic transmission systems is being solved according to the signal's dispersion distortions by simulation in MatLab. Comparison of the results obtained with the similar researches in this domain of science is performed.

В настоящее время на телекоммуникационной сети Украины активно внедряются современные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) на базе технологии DWDM. Применение оптических усилителей позволяет существенно увеличить энергетический потенциал ВОСП и расстояние между регенераторами. При небольшом числе усилителей длина участка регенерации определяется только дисперсионными искажениями оптического волокна (ОВ). Поэтому проблема определения длины участка регенерации по дисперсионным искажениям является актуальной. В литературе данная задача решается аналитическим способом путем нахождения длины участка ОВ, при которой потеря защищенности за счет МСИ составляет 1...2 дБ [1]. Принято считать [2], что данной длине соответствует увеличение длительности оптического импульса на 25% величины тактового интервала. В работе [3] показано, что увеличение длительности импульса до 50% практически не увеличивает величины дисперсионных искажений. Однако все расчеты в указанных работах проводились для входных оптических импульсов с гауссовой формой, которая не совпадает с реально используемой формой импульсов ВОСП. Также в данных работах не учитывалась дополнительная МСИ, вносимая трансимпедансным усилителем приемного оптического модуля (ПРОМ) за счет ограничения полосы пропускаемых частот.

Одним из способов решения данной задачи является использование имитационного моделирования в математическом пакете (например, MatLab).

Поэтому целью данной статьи является определение длины участка регенерации по дисперсионным искажениям при помощи имитационного моделирования с учетом реальной формы оптических импульсов ВОСП и межсимвольной интерференции ПРОМ.

**1. Описание имитационной модели MatLab.** Структурная схема имитационной модели ВОСП, при помощи которой в статье решалась вышеуказанная задача, приведена на рис. 1. Она включает в себя передатчик и приемник ВОСП, а также одномодовое оптическое волокно. Рассмотрим детальное построение каждого из этих блоков.



Рисунок 1 – Структурная схема имитационной модели

**Передачік ВОСП** состоит из генератора псевдослучайной последовательности (ПСП), который формирует  $N_c$  двоичных символов  $\{0;1\}$  с равномерной вероятностью появления. В подавляющем большинстве публикаций [2] предполагается формирование на выходе излучателя оптических импульсов с гауссовой формой

$$P_a(t) = P_{\text{ісє}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}},$$

где  $P_{\text{пик}}$  – пиковая мощность оптического импульса;  $\sigma$  – половина условной длительности импульса (по уровню  $e^{-1/2}$  от амплитуды).

Однако в реальных ВОСП используются оптические импульсы, в которых гауссову форму имеют только передний и задний фронт. В паспортных данных излучателя (лазерного диода) приводится длительность фронта импульса  $t_{\text{фр}}$  при изменении интенсивности излучения от  $A_1$  до  $A_2$  ( $A_1, A_2 \in [0,1]$ ). Для расчета половинной длительности импульса  $\sigma$  авторами составлена следующая система уравнений, которая на основе выражения устанавливает взаимосвязь между ранее перечисленными параметрами лазера:

$$\begin{cases} e^{-\frac{t_1^2}{2\sigma^2}} = A_1 \\ e^{-\frac{t_2^2}{2\sigma^2}} = A_2 \\ |t_1 - t_2| = t_{\text{фр}} \end{cases},$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – моменты времени, соответствующие амплитудам мощности импульса  $A_1$  и  $A_2$  соответственно.

Ее решением является выражение

$$\sigma = \frac{t_{\text{фр}}}{\sqrt{2\left(\sqrt{|\ln(A_1)|} - \sqrt{|\ln(A_2)|}\right)}}.$$

На выходе излучателя каждому входному символу с номером  $n$  на символьном интервале длительностью  $T_c$  ставится в соответствие выходной оптический сигнал в коде без возвращения к нулю и следующей формой огибающей:

$$P_{10}(t) = \begin{cases} P_{\text{пик}}, 0 \leq t < \Delta t \\ P_r(t - \Delta t), \Delta t \leq t \leq T_c \end{cases},$$

$$P_{01}(t) = \begin{cases} P_r(t - T_c + \Delta t), 0 \leq t \leq (T_c - \Delta t) \\ P_{\text{пик}}, (T_c - \Delta t) < t \leq T_c \end{cases},$$

$$P_{00}(t) = 0, 0 \leq t \leq T_c,$$

$$P_{11}(t) = P_{\text{пик}}, 0 \leq t \leq T_c,$$

где  $\Delta t$  – смещение гауссового импульса по длительности оптического импульса.

Первый символ нижнего индекса в формулах (4)...(7) соответствует значению бита предыдущего тактового интервала, второй символ – биту текущего тактового интервала.

Для упрощения программной реализации авторской модели передатчика, от выражений и потребовалось выполнение условия

$$P_{10}\left(\frac{T_c}{2}\right) = P_{01}\left(\frac{T_c}{2}\right) = \frac{P_{\text{пик}}}{2}.$$

На основании выражений и найдено следующее решение полученного уравнения:

$$\Delta t = \frac{T_c}{2} - \sigma \sqrt{2 \ln(2)}.$$

В основу модели оптического излучателя положен лазерный диод NX8564 фирмы NEC ( $A_1=0,2$ ;  $A_2=0,8$ ;  $t_{\text{фр}}=100$  пс;  $V=2,5$  Гбит/с) [4]. Форма оптических импульсов для данного лазера, вычисленная согласно выражениям ..., приведена на рис. 2.



Рисунок 2 – Форма импульсов на выходе оптического излучателя

**Имитационная модель оптического волокна** представлена КИХ фильтром, имеющим эквивалентный оптическому волокну отклик. При построении модели предполагалось использование распространенного одномодового оптического волокна (G.652), поэтому при вычислении отклика учитывалось затухание и хроматическая дисперсия ОВ. Форму спектральной относительной плотности мощности лазера можно описать гауссовой кривой [4], аналогичной выражению :

$$\frac{P_{\text{нп}}(\lambda)}{P_{\text{нп}}(\lambda_0)} = e^{-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma_{\text{нп}}^2}},$$

где  $\sigma_{\text{нп}}$  – половина условной ширины спектра лазера (по уровню  $e^{-1/2}$  от амплитуды), нм;  $\lambda_0$  – длина волны лазера с максимальной интенсивностью ( $\lambda_0 = 1550$  нм).

По известной ширине спектральной линии излучения лазера  $\Delta\lambda$  (по уровню -3 дБ от амплитуды интенсивности на длине  $\lambda_0$ ) можно вычислить условную ширину спектра в :

$$\sigma_{\text{нп}} = \frac{\Delta\lambda}{2\sqrt{2\ln(2)}}.$$

При построении отклика ОВ учитывались  $N_d$  дискретных спектральных составляющих. Крайние значения составляющих спектра лазера, которые использованы при моделировании, имеют величину в  $0,01 P_{\text{нп}}(\lambda_0)$  и отстоят от  $\lambda_0$  на  $\Delta\lambda_{\text{кр}}$  :

$$P_{\text{нп}}(\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{кр}}) = P_{\text{нп}}(\lambda_0 - \Delta\lambda_{\text{кр}}) = 0,01 P_{\text{нп}}(\lambda_0).$$

После подстановки в получаем следующее выражение для  $\Delta\lambda_{\text{кр}}$  :

$$\Delta\lambda_{\text{кр}} = \sqrt{2\sigma_{\text{нп}}^2 \ln(100)}.$$

Сумма всех учтенных составляющих спектра лазера равна его пиковой мощности  $P_{\text{пик}}$ . Для выполнения этого условия каждую составляющую спектра, вычисленную по формуле, необходимо умножить на коэффициент

$$K = \frac{P_{\text{пик}}}{\sum_{i=-\frac{N_d-1}{2}}^{\frac{N_d-1}{2}} P_{\text{нп}}(\lambda_i)}.$$

На основании вышесказанного можно записать выражение для расчета мощности составляющей спектра (с номером  $k$ ) на длине волны  $\lambda_k$  :

$$P_{\text{нп}}(\lambda_k) = K P_{\text{нп}}(\lambda_k) = \frac{P_{\text{пик}}}{\sum_{i=-\frac{N_d-1}{2}}^{\frac{N_d-1}{2}} P_{\text{нп}}(\lambda_i)} P_{\text{нп}}(\lambda_k).$$

Выражение показывает, что спектральные составляющие с минимальным  $k_{\min} = -(N_d - 1)/2$  и максимальным  $k_{\max} = (N_d - 1)/2$  номерами соответствуют длинам волн  $(\lambda_0 - \Delta\lambda_{\text{кр}})$  и  $(\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{кр}})$  соответственно. Данное утверждение позволяет записать выражение для расчета  $\lambda_k$ :

$$\lambda_k = \lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{кр}} \frac{k}{\frac{N_d - 1}{2}} = \lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{кр}} \frac{2k}{N_d - 1}, \quad k_{\min} \leq k \leq k_{\max}.$$

Вследствие наличия хроматической дисперсии каждая из спектральных составляющих имеет время прохождения вдоль среды распространения [2]

$$t_k = \left( n(\lambda_k) - \lambda_k \frac{dn(\lambda_k)}{d\lambda} \right) \frac{L}{c},$$

где  $c$  – скорость света ( $c = 300000$  км/с);  $L$  – длина ОВ, км.

Показатель преломления оптического волокна рассчитывался по известной формуле Селмейера [5]

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda - C_i^2}},$$

где  $B_i$  и  $C_i$  – коэффициенты ряда Селмейера (для кварца  $B_1 = 0,6961663$ ;  $B_2 = 0,4079425$ ;  $B_3 = 0,8974794$ ;  $C_1 = 0,0684043$ ;  $C_2 = 0,1162414$ ;  $C_3 = 9,896161$ ).

При отсутствии потерь, отсчет импульсной характеристики ОВ в момент времени  $t_k$  равен мощности составляющей спектра лазера  $P_d(\lambda_k)$ . Для среды распространения с потерями, все отсчеты импульсной характеристики ОВ  $h(t_k)$  необходимо уменьшить пропорционально коэффициенту затухания  $\alpha$  [2]:

$$h(t_k) = P_d(\lambda_k) 10^{-0,1\alpha L}.$$

Пример рассчитанной по выражениям ... импульсной характеристики модели ОВ ( $L=100$  км;  $\alpha = 0,3$  дБ/км;  $N_d=171$ ;  $\Delta\lambda = 0,1$  нм;  $\lambda_0=1550$  нм) приведен на рис. 3. Длительность импульса на уровне половины амплитуды составляет 200 пс, что соответствует дисперсии порядка 20 пс/(нм·км).

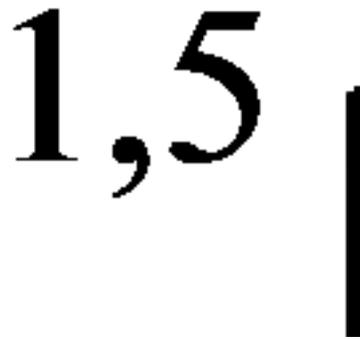


Рисунок 3 – Импульсная характеристика модели оптического волокна G.652

**Модель приемника ВОСП** состоит из фотодетектора с токовой чувствительностью  $R = 0,8$  А/Вт (типичное значение для  $p-i-n$  фотодиода) и трансимпедансного усилителя (ТИУ). Значение электрического тока на выходе фотодетектора  $I_{\text{ф}}(t) = P_{\text{пр}}(t)R$ . Инерционность фотодетектора не учитывалась ввиду его малой величины по сравнению с дисперсионными искажениями волокна. Темновой и дробовой токи также не учитывались вследствие их незначительного значения по сравнению с  $I_{\text{ф}}(t)$  [6].

При построении модели ТИУ необходимо учитывать характеристику трансимпеданса  $Z_{\text{тиу}}(f)$  и внутренние шумы. Последними можно пренебречь при использовании в DWDM оптических усилителей и высоком уровне приемного сигнала (намного больше чувствительности ПРОМ). Поэтому в данной статье использовалась модель ТИУ в виде КИХ фильтра с АЧХ, соответствующей характеристике трансимпеданса  $Z_{\text{тиу}}(f)$ . За основу модели взят распространенный ТИУ MAX3864 со следующими параметрами:

- трансимпеданс  $Z_{\text{тиу}} = 2750$  Ом;

– скорость передачи цифрового сигнала  $B = 2,5$  Гбит/с.  
 КИХ фильтр рассчитывался стандартной функцией *fir2* (Matlab) по отсчетам характеристики трансимпеданса, взятой из [7]. АЧХ рассчитанного фильтра приведена на рис. 4.

Рисунок 4 – Характеристики трансимпеданса

**2. Результаты моделирования ВОСП.** Согласно вышеприведенному описанию в математическом пакете MatLab построена имитационная модель ВОСП. Конечной целью моделирования являлось построение глаз-диаграммы выходного сигнала для расчета потери защищенности сигнала  $\Delta A_3$  вследствие дисперсионных искажений

$$\Delta A_3 = 20 \lg \left( \frac{D}{d} \right),$$

где  $D$  и  $d$  – амплитуда единичного символа на выходе ТИУ и раскрыв глаз-диаграммы соответственно.

Глаз-диаграмма сигнала на выходе ТИУ показана на рис. 5,а при следующих параметрах моделирования:

- скорость передачи цифрового сигнала  $B = 2,5$  Гбит/с;
- количество передаваемых символов  $N_c = 10000$ ;
- ширина линии излучения лазера  $\Delta \lambda = 0,1$  нм;
- количество дискретных составляющих спектра лазера  $N = 171$ ;
- пиковая мощность лазера  $P_{\text{пик}} = 1$  мВт;
- длина ОВ  $L = 100$  км;
- коэффициент затухания ОВ  $\alpha = 0,3$  дБ/км;
- токовая чувствительность фотоприемника  $R = 0,8$  А/Вт;
- частота дискретизации 1 ТГц.

Зависимость  $\Delta A_3$  от величины относительной дисперсии сигнала (дополнительного уширения импульса, разделенного на  $T_c$ ) показана непрерывной линией на рис. 5,б. Пунктирной линией на нем также показана аналогичная зависимость из [3].

2,5

18

а)

б)

Рисунок 5 – Результаты моделирования ВОСП:  
а) глаз-диаграмма выходного сигнала; б) определение потери допустимой защищенности приемного сигнала

В результате выполненного моделирования ВОСП и последующих расчетов можно сделать следующие выводы. Характер и численные значения полученной в результате моделирования кривой потери защищенности практически полностью повторяет результат, полученный в [3]. Незначительное отличие объясняется применением другой формы импульсов передатчика, а также использованием трансимпедансного усилителя, вносящего дополнительную МСИ. На участке 0...0,5 полученный график (рис. 5,б) имеет линейную зависимость, что доказывает теоретическую возможность увеличения длины участка регенерации по дисперсии вдвое по сравнению с общепринятой методикой расчета [2]. Потере защищенности в 2 дБ соответствует дисперсия в  $0,8 T_c$ , которая достаточно близка к результату  $0,7 T_c$ , полученному в [3].

В заключение необходимо отметить, что поставленная задача определения длины участка регенерации по дисперсионным искажениям при помощи имитационного моделирования выполнена. В построенной для MatLab имитационной модели учтена форма оптических импульсов, формируемых лазером и межсимвольная интерференция трансимпедансного усилителя ПРОМ. Разработанная модель позволяет получить глаз-диаграмму сигнала на входе решающего устройства приемника и оценить потерю защищенности приемного сигнала вследствие дисперсионных искажений среды распространения, что позволяет правильно выбирать длину участка регенерации ВОСП. Проведенное имитационное моделирование, которое учитывало только дисперсионные искажения при отсутствии других шумов, также показало теоретическую возможность увеличения длины участка регенерации по дисперсии вдвое по сравнению с общепринятой методикой расчета.

В дальнейших исследованиях по данному направлению необходимо рассмотреть влияние фазовых дрожаний выделителя тактовой частоты приемника на потерю защищенности  $\Delta A_3$ .

#### **Литература**

1. *Ramaswami R.* Optical networks: a practical perspective / R. Ramaswami, K. Sivarajan. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002. – 831 p. – (The Morgan Kaufmann Series in Networking).
2. *Гауэр Д.* Оптические системы связи / Гауэр Д.; пер. с англ. А.И. Ларкина. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
3. *Брескин В.А.* Влияние дисперсионных искажений сигнала на длину регенерационной секции волоконно-оптических систем передачи / В.А. Брескин, А.Д. Мазур // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. - № 1. – С. 80-84.
4. NX8564 NEC's EA modulator integrated InGaAsP MQW DFB laser diode module for 2.5 Gb/s ultralong-reach 360, 600, 240 km DWDM applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.cel.com/pdf/datasheets/nx8564le.pdf](http://www.cel.com/pdf/datasheets/nx8564le.pdf). Заголовок з екрана.
5. *Malitson I.H.* Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica / I.H. Malitson // Journal Of The Optical Society Of America. – 1965. – Vol. 55, № 2. – P. 1205-1209.
6. *Sackinger E.* Broadband circuits for optical fiber communication / Sackinger E. – New York: John Wiley & Sons, 2005. – 453 p.
7. 2.5Gbps, +3V to +5.5V, Wide Dynamic Range Transimpedance Preamplifier [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX3864.pdf>. Заголовок з екрана.