ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2024. Том 91. № 11. С. 54–62
OPTICHESKII ZHURNAL. 2024. V. 91. № 11. P. 54–62
Научная статья
Research Article

Оптический журнал
Фотоника, нанофотоника и радиофотоника
Photonics, nanophotonics and radio photonics

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-11-54-62
УДК 535.2

Времяразрешенная модель трансформации сигнала в полупроводниковом оптическом усилителе для расчета ошибки передачи по линии связи

Пауль Ярославович Илюшин[1]✉, Даниил Евгеньевич Шипило[2], Ирина Алексеевна Николаева[3], Николай Андреевич Панов[4], Ольга Григорьевна Косарева[5]

[1, 2, 3, 4, 5]Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия
[1, 2, 3, 4, 5]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[1]ilusinpaul@gmail.com https://orcid.org/0009-0005-9583-2997
[2]schipilo.daniil@physics.msu.ru https://orcid.org/0000-0003-1715-9723
[3]irarubik@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-2360-5838
[4]napanov@ilc.edu.ru https://orcid.org/0000-0002-4356-5189

Аннотация

Предмет исследования. Волоконная оптическая линия, содержащая полупроводниковые оптические усилители; спонтанное излучение и нелинейность в полупроводниковых усилителях как эффекты, приводящие к ошибке передачи цифрового сигнала. **Цель работы.** Разработка модели волоконной линии связи с полупроводниковыми оптическими усилителями, учитывающей источники искажений слабых и сильных сигналов — спонтанное излучение активной среды усилителей и нелинейность в них соответственно. **Метод.** Исследование проведено методом численного моделирования. В модели учтено распространение излучения по оптическому волокну на расстояние 100 км, приводящее к его существенному дисперсионному расплыванию и поглощению. Средняя мощность лазерного излучения после участка волокна определяет квазистационарный режим работы усилителя, в том числе мощность спонтанного излучения в нем. В этом режиме рассчитывается трансформация квадратурно-модулированного сигнала в полупроводниковом усилителе. **Основные результаты.** Разработана численная модель волоконно-оптической линии связи со встроенными полупроводниковыми оптическими усилителями. На основе созданной модели проведен анализ потерь информации, переносимой квадратурно-модулированным сигналом, вследствие эффектов дисперсии и насыщения усиления, а также спонтанного излучения активной среды усилителей в линии связи. Установлено, что при длительности лазерного импульса 12 пс и более динамический диапазон мощностей сигнала на входе в усилитель превышает 20 дБм (от −37,5 до −17,5 дБм). В этих пределах не требуется компенсация искажений, вносимых усилителями. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты могут быть использованы для увеличения скорости передачи информации в волоконных линиях связи на расстояние сотни–тысячи километров.

Ключевые слова: полупроводниковые усилители, квадратурно-модулированный сигнал, волоконно-оптические линии связи, спонтанное излучение

Благодарность: авторы благодарят профессора С.К. Турицына, профессора А.Л. Делицына и А.В. Кондратьева за обсуждение представленных результатов. Работа поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» № 23-2-1-40-1.

Ссылка для цитирования: Илюшин П.Я., Шипило Д.Е., Николаева И.А., Панов Н.А., Косарева О.Г. Времяразрешенная модель трансформации сигнала в полупроводниковом оптическом усилителе для расчета ошибки передачи по линии связи // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 11. С. 54–62. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-54-62

Коды OCIS: 060.1660, 140.5960

Time-domain model of signal transformation in a semiconductor optical amplifier for bit error rate estimation along a communication line

Paul Ya. Ilyushin[1]✉, Daniil E. Shipilo[2], Irina A. Nikolaeva[3], Nikolay A. Panov[4], Olga G. Kosareva[5]

[1, 2, 3, 4, 5]P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[1, 2, 3, 4, 5]M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[1]ilusinpaul@gmail.com https://orcid.org/0009-0005-9583-2997
[2]schipilo.daniil@physics.msu.ru https://orcid.org/0000-0003-1715-9723
[3]irarubik@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-2360-5838
[4]napanov@ilc.edu.ru https://orcid.org/0000-0002-4356-5189

Abstract

Subject of study. Fiber optical line containing semiconductor optical amplifiers; spontaneous emission and nonlinearity in semiconductor amplifiers as effects leading to digital signal transmission errors. **Goal of the work.** Development of a fiber communication line model with built-in semiconductor optical amplifiers that takes into account sources of distortion of weak and strong signals — spontaneous emission of the amplifiers' active medium and nonlinearity in it respectively. **Method.** The study was carried out using numerical simulation. The model takes into account the propagation of radiation along a 100 km long optical fiber span, leading to its significant dispersive spreading and absorption. The average power of laser radiation after the fiber span determines the quasi-stationary operating mode of the amplifier, including the power of spontaneous radiation in it. In this mode, the transformation of a quadrature-modulated signal in a semiconductor amplifier is calculated. **Main results.** A numerical model of a fiber-optic communication line with built-in semiconductor optical amplifiers has been developed. Based on the created model, an analysis of the information loss carried by a quadrature-modulated signal due to the effects of gain dispersion, gain saturation and spontaneous emission of the amplifier's active medium in the communication line was carried out. It was found that with a laser pulse duration of 12 ps or more, the amplifier's input power dynamic range exceeds 20 dBm (from −37.5 to −17.5 dBm). Within these limits, compensation of distortion introduced by amplifiers is not required. **Practical significance.** The results obtained in this work can be used to increase the information transmission speed in fiber communication lines over distances of hundreds to thousands of kilometers.

Keywords: semiconductor amplifier, quadrature modulation, fiber-optic communication line, spontaneous emission

Acknowledgment: the authors thank professor S.K. Turitsyn, professor A.L. Delitsyn and A.V. Kondratiev for fruitful discussions. Investigation sponsored by a Foundation for the Development of Theoretical Physics and Mathematics "BASIS" grant №23-2-1-40-1.

For citation: Ilyushin P.Y., Shipilo D.E., Nikolaeva I.A., Panov N.A., Kosareva O.G. Time-domain model of signal transformation in a semiconductor optical amplifier for bit error rate estimation along a communication line [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 11. P. 54–62. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-54-62

OCIS codes: 060.1660, 140.5960

ВВЕДЕНИЕ

Оптические волокна широко используются для передачи информации на значительные расстояния и имеют ряд преимуществ над витыми парами — значительно большие пропускную способность и дальность передачи. Поглощение в волокне (30 дБ на 150 км для стандарта G.652.D) ограничивает расстояние передачи сотней километров, и в более длинных линиях связи оптический сигнал периодически усиливается с помощью цифровых повторителей [1], волоконных усилителей [2] или полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) [3].

Принцип работы ПОУ аналогичен лазерному усилению оптического поля [4]. Возникающий при большой мощности сигнала эффект насыщения усиления приводит к искажениям временно́й формы и спектра сигнала, из-за которых часть переносимой информации теряется. При малых мощностях сигнала к потере информации приводит спонтанное излучение [5], вносящее непредсказуемые изменения в оптическое поле. Таким образом, мощность сигнала на входе усилителя должна выбираться из диапазона, определенного двумя этими эффектами. Модовая дисперсия волокна, а также дисперсия усиления/нелинейность ПОУ ограничивают пропускную способность оптической линии связи: для корректного восстановления битовой последовательности импульс должен быть длиннее нескольких десятков пикосекунд. Поэтому для увеличения пропускной способности используют сигналы, модуляция которых кодирует сразу несколько бит информации. Например, часто используемая квадратурная модуляция (КМ-16), при которой и действительная, и мнимая компоненты комплексной огибающей поля выбираются из 4-х состояний, позволяет передавать 4 бита информации в каждом импульсе.

Для проектирования волоконных линий связи критически важным является выбор оптимального протокола передачи (символьной частоты, под которой будем понимать обратную длительность лазерного импульса, средней мощности сигнала и др.), при использовании которого ошибка при передаче минимальна. Так как нелинейные искажения, внесенные ПОУ, существенно хуже поддаются цифровой компенсации, чем дисперсионные [6] (и даже нелинейные [7]) искажения, внесенные волокном, их влияние на долю ошибочно переданных бит было исследовано во многих экспериментах (см. например [8, 9]).

Цель настоящей работы состоит в разработке модели волоконной линии связи с ПОУ, учитывающей источники искажений слабых и сильных сигналов — спонтанное излучение активной среды усилителей и нелинейность в них соответственно.

МОДЕЛЬ

Представленная в работе модель совмещает в себе несколько теоретических подходов, разработанных ранее. Распространение по волокну будем описывать линейным параболическим уравнением для огибающей поля, как это было сделано во многих исследованиях [10, 11]. Следующим шагом оценим распределения вдоль активной среды ПОУ коэффициента усиления, мощности спонтанного излучения и отраженной волны, соответствующих стационарному режиму усиления согласно работе [12]. Затем опишем распространение вдоль ПОУ модулированного входного сигнала в рамках модели [13, 14] с учетом неоднородности усиления, оцененной на предыдущем шаге. Таким образом, в отличие от модели [13, 14] в настоящей работе учтено спонтанное излучение усилителя, которое приводит к искажениям слабых сигналов в ПОУ. Модель [12] описывает только стационарный режим работы усилителя, а модель [15], являющаяся времяразрешенной, не учитывает отражение от границ активной области усилителя, поскольку основана на усреднении по длине усилителя (по нашим оценкам влияние отражения от границ становится значимым при коэффициенте отражения более 10^{-3}).

В статье будем рассматривать участок линии связи, состоящий из последовательно соединенных участка волокна длиной 100 км и ПОУ, компенсирующего поглощение по длине волокна. Этого достаточно, чтобы исследовать вклад ПОУ в искажение сигнала во всей линии связи. Источник и приемник оптического поля будем полагать идеальными. Использованные для моделирования параметры основаны на характеристиках ПОУ INPHENIX IPSAD 1508 [16], которые приведены в таблице и являются достаточно типичными для современных ПОУ (например, в работах [8, 9, 13, 14] использованы усилители, у которых насыщенная выходная

Параметры усилителя INPHENIX IPSAD 1508 [16]
Parameters of the INPHENIX IPSAD 1508 amplifier [16]

Название параметра	Значение
Ток накачки, мА	350
Длина волны, нм	1550
Ширина спектра усиления, нм	45
Насыщенная выходная мощность, дБм	8
Усиление слабого сигнала, дБ	29
Геометрические размеры активной среды, мкм	300×1,2×0,18 (L×W×d)

мощность и усиление слабого сигнала отличаются на несколько децибел). Параметры для моделирования волокна соответствуют стандарту G.652.D [17].

МОДЕЛЬ ВОЛОКНА

Распространение оптического поля с комплексной огибающей $F^+(t, z)$ по волокну описывается линейным параболическим уравнением, учитывающим эффекты дисперсии второго порядка и поглощения,

$$\frac{\partial F^+(t,z)}{\partial z}=\frac{1}{2}\left(i\beta_f\frac{\partial^2}{\partial t^2}-\gamma\right)F^+(t,z). \quad (1)$$

Здесь $\beta_f = -2{,}3\times10^{-8}$ пс^2/мкм — коэффициент дисперсии волокна второго порядка, $\gamma = 0{,}2$ дБ/км — коэффициент поглощения волокна. Волокно принято одномодовым, нелинейные эффекты (в частности эффект Керра), зависящие от мощности оптического поля, вносят пренебрежимо малый вклад во всем диапазоне исследуемых мощностей, с которыми работают ПОУ.

СТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ УСИЛИТЕЛЯ

Для описания стационарного режима работы усилителя использована модель [12], основанная на следующих приближениях:

1. Уширение коэффициента усиления однородно.

2. Коэффициент усиления линейно зависит от концентрации носителей заряда.

3. Поперечные размеры активной среды малы по сравнению с ее длиной.

4. Диффузия носителей заряда мала и не вносит вклад в установление стационарного состояния.

5. Время жизни носителя заряда в зоне проводимости считается постоянным.

6. Рассматриваемое поле принимается скалярным.

Эти приближения позволяют записать систему уравнений для комплексной амплитуды когерентного излучения $F^\pm$ и мощности шумовой компоненты $X^\pm$, распространяющихся по усилителю в прямом (+) и обратном (–) направлениях

$$\frac{1}{v_g}\frac{\partial X^\pm}{\partial t}\pm\frac{\partial X^\pm}{\partial z}=(g-\alpha_{int})X^\pm+\frac{\Gamma\beta E_{sat}}{2\tau_c}(\Gamma aN_0+g), \quad (2)$$

$$\frac{1}{v_g}\frac{\partial F^\pm}{\partial t}\pm\frac{\partial F^\pm}{\partial z}=\frac{1}{2}(g-\alpha_{int})F^\pm-ik_sF^\pm, \quad (3)$$

$$\frac{\partial g}{\partial t}=\frac{g_0-g}{\tau_c}-\frac{g}{E_{sat}}\left[\left|F^+\right|^2+\left|F^-\right|^2+X^++X^-\right]. \quad (4)$$

При этом граничные условия учитывают отражение от границ активной среды и имеют вид

$$F^+(0)=F_{in}\sqrt{1-R_1{}^2}+F^-(0)\sqrt{R_1},\quad F^-(L)=F^+(L)\sqrt{R_2}, \quad (5)$$

$$X^+(0)=X^-(0)R_1,\ \ X^-(L)=X^+(L)R_2.$$

В выражениях (2)–(5) введены следующие обозначения: v_g — групповая скорость импульса в ПОУ, $g(t, z)$ — коэффициент усиления, $\alpha_{int} = 0{,}002$ мкм$^{-1}$ — коэффициент внутреннего поглощения активной среды, $\Gamma = 0{,}9$ — фактор сдерживания, $\beta = 10^{-4}$ — коэффициент спонтанной эмиссии [18], $E_{sat} = Wd\hbar\omega_0/(\Gamma a)$ — энергия насыщения, $\omega_0 = 2\pi193{,}4$ ТГц — несущая частота, соответствующая длине волны $\lambda = 1550$ нм, $\hbar$ — приведенная постоянная Планка, $N_0 = 6{,}34\times10^6$ мкм$^{-3}$ — инверсия населенностей, обеспечивающая режим прозрачности усилителя, $a = 6{,}8\times10^{-8}$ мкм^2 — постоянная усиления, $\tau_c = 2$ нс — время жизни носителя заряда, k_s — волновое число

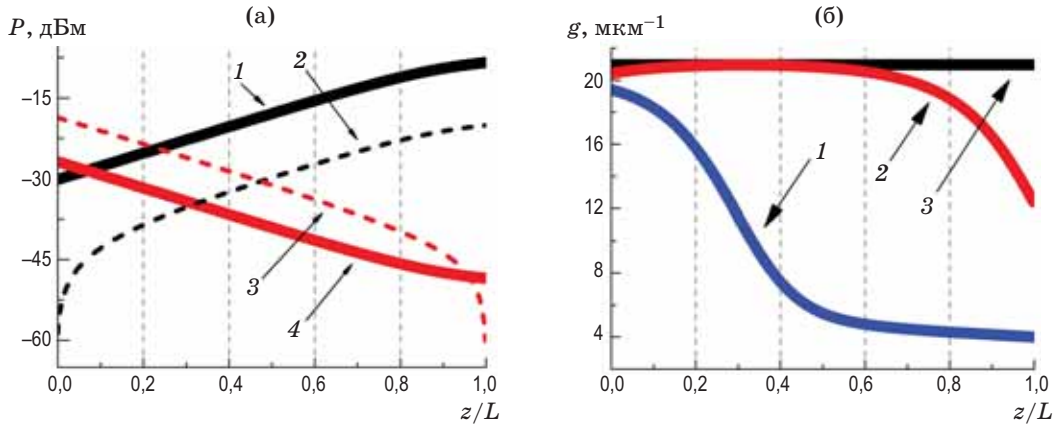


Рис. 1. Стационарный режим работы ПОУ. Распределения вдоль длины активной среды мощности усиленного оптического поля, распространяющегося прямо (*1*) и отраженного от торца активной среды (*4*), и мощности спонтанного излучения (*2*, *3*) — (а). Распределение коэффициента усиления вдоль длины активной среды при мощностях входного сигнала P_{in} –14 (*1*), –30 (*2*), –44 (*3*) дБм — (б)

Fig. 1. Stationary mode of semiconductor optical amplifier operation. (а) Distribution of the forwardpropagating (*1*) and reflected from the boundary of active medium (*4*) amplified optical field and spontaneous emission power (*2*, *3*) along the active medium. (б) Gain distribution along the active medium for input signal powers P_{in} (*1*) –14, (*2*) –30, (*3*) –44 dBm

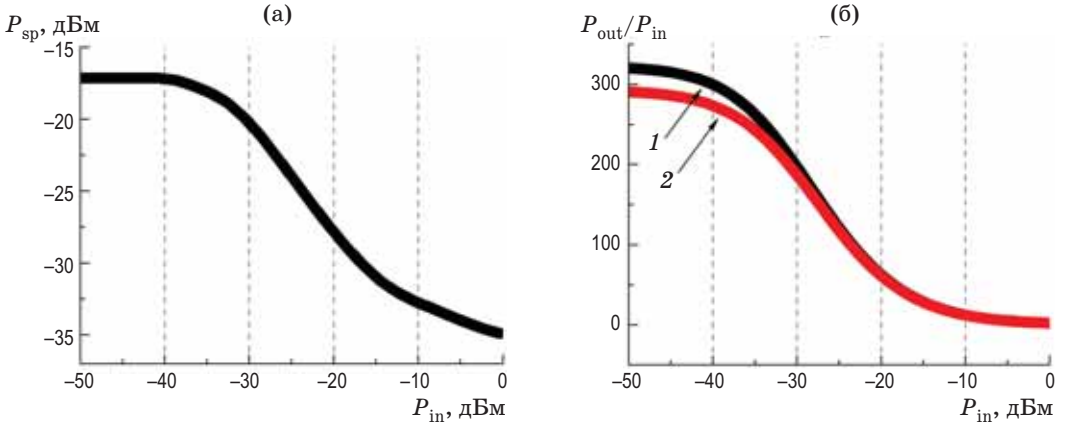


Рис. 2. Зависимости мощности спонтанного излучения P_{sp} (а), усиленного активной средой, и эффективности усиления $P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ (б) от мощности входного оптического поля P_{in} без учета (*1*) и с учетом (*2*) спонтанного излучения

Fig. 2. Dependences of (а) the spontaneous emission power P_{sp} amplified by the active medium and (б) the amplification efficiency $P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ on the power of the input optical field P_{in} (*1*) without taking into account and (*2*) with taking into account spontaneous emission

оптической волны, $g_0 = 0{,}02$ мкм$^{-1}$ — коэффициент усиления слабого сигнала, F_{in} — поле на входе в ПОУ, $R_1 = R_2 = 10^{-4}$ — коэффициенты отражения от границ активной среды.

Стационарное решение системы (2)–(4) будем искать с помощью итерационного алгоритма [19]. В результате определим зависимость мощностей шума и сигнала (рис. 1а), распространяющихся в обоих направлениях, от координаты распространения z, а также установившееся продольное распределение коэффициента усиления (рис. 1б). Зависимости коэффициента усиления сигнала и мощности спонтанного излучения от мощности входного сигнала приведены на рис. 2.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ УСИЛИТЕЛЯ

Для описания искажений модулированного (переносящего информацию) сигнала необ-

ходима нестационарная модель ПОУ. В работе использован постоянный уровень сигнала из стационарной модели с добавлением к нему квадратурной модуляции в некотором интервале времени. В рамках данной модели учитываются эффекты дисперсии и насыщения усиления. Система уравнений для амплитуды оптического поля F^+ и коэффициента усиления g описывается как

$$\frac{\partial F^+}{\partial z}+\frac{1}{v_g}\frac{\partial F^+}{\partial t}= \\ =\frac{1}{2}(1-i\alpha)\left(gF^+ + gT_2{}^2\frac{\partial^2 F}{\partial t^2}\right)-\frac{1}{2}\alpha_{\text{int}}F^+, \quad (6)$$

$$\frac{\partial g}{\partial t}=\frac{g_0(z)-g}{\tau_c}-\frac{g}{E_{\text{sat}}}\times \\ \times\left[\left|F^+(t,z)\right|^2+\left|F^-(z)\right|^2+X^+(z)+X^-(z)\right]. \quad (7)$$

Здесь $\alpha = 6$ — отношение показателя преломления к поглощению, $T_2 = 0{,}047$ пс — обратная ширина спектра усиления.

Для совместной работы двух моделей мощность постоянной части сигнала в этой модели должна быть согласована со стационарной моделью. При решении системы (6)–(7) значения $g_0(z)$, $X^+(z)$, $X^-(z)$, $F^-(z)$ выбираются из полученных стационарных распределений.

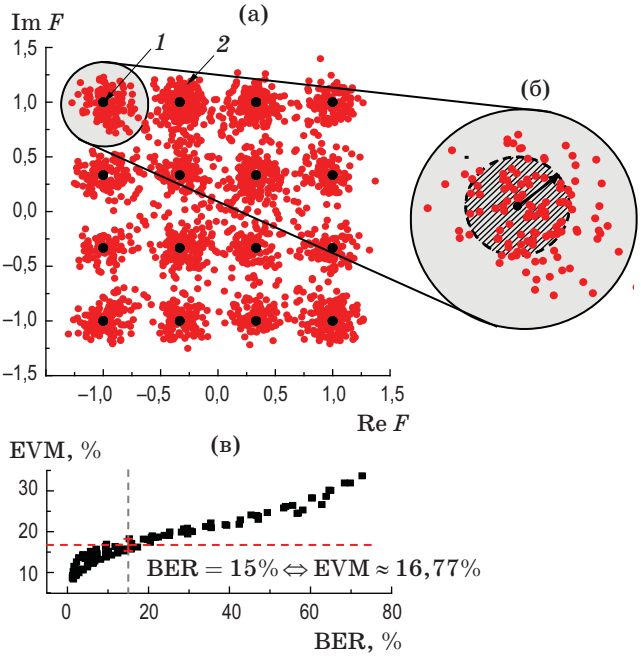


Рис. 3. Годограф входного (*1*) и искаженного спонтанным излучением (*2*) сигналов (а). Для одной из точек входного сигнала продемонстрированы точки искаженного сигнала, штриховкой обозначена область, соответствующая EVM = 15,7% (б). Перевод метрик передачи сигнала EVM и BER (в)

Fig. 3. (а) Hodograph of the initial (*1*) and the distorted by spontaneous emission (*2*) signals. (б) For one of the points of the initial signal, the points of the distorted signal are demonstrated, the dash-filled area corresponding to EVM = 15.7% is indicated. (в) EVM metric vs. BER metric

УСИЛЕНИЕ КВАДРАТУРНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Квадратурно-модулированный сигнал, используемый в данной работе, представляет собой поле с комплексной огибающей, действительная и мнимая компоненты которой для каждого импульса выбираются из 4-х состояний, как изображено черными точками на годографе (рис. 3а). Таким образом, один импульс сигнала переносит 4 бита информации. В нашей модели перед усилением в ПОУ сигнал проходит участок волокна длиной $l_f = 100$ км, что существенно превышает дисперсионную длину (27 км для импульса длительностью 20 пс), поэтому на входе в ПОУ отдельные исходные импульсы неразличимы. На выходе ПОУ длительность цепочки импульсов существенно не изменяется, однако добавляется комплексный гауссов шум с единичной дисперсией $\xi(t)$, обусловленный спонтанным излучением ПОУ,

$$F_{\text{out}}(t)=F^+(t,L)+\sqrt{X^+(L)}\xi(t). \quad (8)$$

Именно такой сигнал $F_{\text{out}}(t)$ регистрируется на выходе из линии. После оцифровки возможна цифровая компенсация линейной дисперсии волокна

$$\hat{F}_{\text{comp}}(\omega)=\hat{F}_{\text{out}}(\omega)\exp\left[\frac{i}{2}l_f\beta_f\omega^2\right]. \quad (9)$$

Здесь $\hat{F}_{\text{out}}$ — спектр огибающей оптического поля на выходе, $\hat{F}_{\text{comp}}$ — спектр огибающей со скомпенсированной дисперсией волокна.

Таким образом, в сигнале останутся только искажения, вызванные ПОУ. Годограф сигнала

будет содержать точки, изменившие свои координаты вследствие этих искажений. Количественно это изменение описывается несколькими метриками. При описании аналогового поля удобно оценивать амплитуду вектора ошибки[1], измеряемую в процентах от амплитуды сигнала (рис. 3б),

$$\mathrm{EVM}(\%) = \frac{1}{F_0 N_\mathrm{p}} \sum_j \left| \mathbf{r}_j - \mathbf{R}_j \right|. \qquad (10)$$

Здесь $\mathbf{R}_j$ — вектор j-го состояния начального поля, $\mathbf{r}_j$ — вектор j-го состояния поля на выходе, N_p — количество импульсов в сигнале, F_0 — амплитуда входного сигнала.

Для описания потерь информации при передаче более удобной метрикой является доля ошибки[2], которая характеризует долю импульсов, зарегистрированных на выходе в области годографа, отличной от их начальной. На рис. 3в продемонстрирована возможность пересчета метрик BER и EVM между собой. Для эффективной компенсации потерь требуется BER $< 15\%$ и, соответственно, EVM $< 17\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе разработанной модели был проведен анализ качества передачи при различных параметрах сигнала — средней входной мощности и длительности импульса. Помехоустойчивые протоколы передачи имеют возможность, увеличив количество передаваемых бит на 30%, восстановить 15% потерянных данных. При анализе результатов параметры сигнала выбраны так, чтобы BER не превышала 15%.

Многократно генерировались случайные последовательности квадратурно-модулированных сигналов и анализировались ошибки, возникающие при прохождении моделируемой линии. Зависимость усредненного по реализациям сигнала значения EVM от средней мощности P_in при всех длительностях импульса $2\tau_\mathrm{p}$ имеет качественно одинаковый вид (рис. 4), согласующийся с экспериментальными результатами работы [8], где на рис. 3 и 4 приведены зависимости среднего

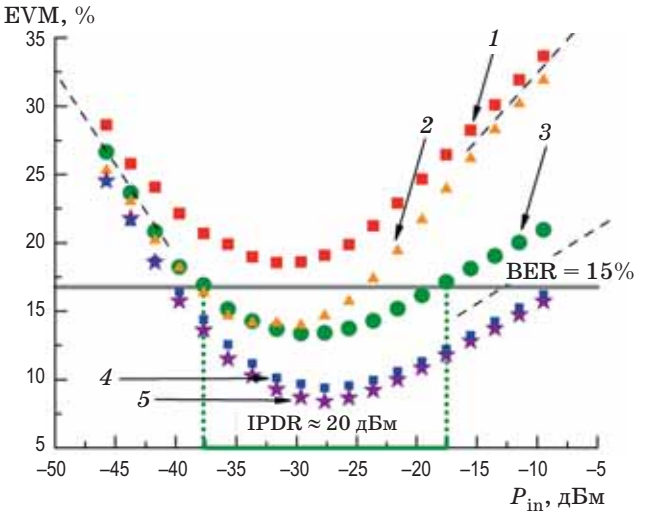


Рис. 4. Зависимость метрики EVM от мощности входного оптического поля при длительностях импульса сигнала $2\tau_\mathrm{p}$ 4 (*1*), 8 (*2*), 12 (*3*), 16 пс (*4*), 20 (*5*) пс. Обозначен уровень EVM, соответствующий значению метрики BER = 15%, для длительности импульса 12 пс отмечены границы диапазона допустимых входных мощностей[3]. Штриховые линии — асимптотики EVM при низких и высоких мощностях входного сигнала

Fig. 4. EVM metric dependency on the input optical field power for signal pulse durations $2\tau_\mathrm{p}$ (*1*) 4, (*2*) 8, (*3*) 12, (*4*) 16, (*5*) 20 ps. The EVM level corresponding to BER = 15% is shown, and acceptable input powers range limits are marked for a pulse duration of 12 ps. Dashed lines indicate the asymptotics of EVM at low and high input powers

EVM от мощности на входе в усилитель. Амплитуда вектора ошибки возрастает с уменьшением значения сигнал/шум, приходя к общей асимптотике при низких входных мощностях. В то же время эффект насыщения усиления увеличивает ошибку при высоких значениях P_in. Тем самым (см. рис. 4) существует диапазон входных мощностей в окрестности оптимума, при котором ошибка не превышает критического значения. При $2\tau_\mathrm{p} = 12$ пс зависимость имеет менее крутую асимптотику при высоких мощностях, чем таковые при меньших длительностях, а значит, это значение может быть выбрано в качестве критического. Динамический диапазон (IPDR) при выбранных параметрах усилителя и $2\tau_\mathrm{p} = 12$ пс составляет 20 дБм: от –37,5 до –17,5 дБм.

[1] *Error Vector Magnitude* (EVM).
[2] *Bit Error Rate* (BER).
[3] *Input Power Dynamic Range* (IPDR).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате разработана модель волоконной линии связи с полупроводниковыми усилителями, в которой рассматриваются такие источники искажения сигнала, как насыщение и дисперсия усиления, а также спонтанное излучение в усилителях. Получены параметры сигнала (длительность импульса, диапазон входных мощностей), при которых ошибка, вносимая усилителем, остается в пределах, требуемых современными помехоустойчивыми протоколами. Значениями этих параметров стали длительность $2\tau_p = 12$ пс и диапазон мощностей от –37,5 до –17,5 дБм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang J., Wu Z., Iyer V. High performance optical repeater // US Patent 9 444 551 B2. 2016. Publ. Jun. 23, 2016.
2. Дианов Е.М. Волоконные лазеры // УФН. 2004. Т. 174. № 10. С. 1139—1142. https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200410m.1139
   Dianov E.M. Fiber lasers // Physics-Uspekhi. 2004. V. 47. P. 1065—1068. https://doi.org/10.1070/PU2004v047n10ABEH002018
3. Alferov Z.I. The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology (Nobel Lecture) // Review of Modern Physics. 2001. V. 73. P. 767. http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.73.767
   Алфёров Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии // УФН. 2002. Т. 172. С. 1068.
4. Gould G. Optically pumped laser amplifiers // US Patent 4 053 845. 1977. Publ. Oct. 11, 1977.
5. Talli G., Adams M.J. Amplified spontaneous emission in semiconductor optical amplifiers: Modelling and experiments // Optics Commun. 2003. V. 218. P. 161. https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01196-9
6. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К. и др. Использование голографических методов передачи изображений по многомодовому оптическому волокну для повышения пропускной способности волоконно-оптических линий связи // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 13–23. http://doi.org/10.17586/10235086-2023-90-10-13-23
   Timofeev A.L., Sultanov A.H., Meshkov I. K., et al. Holographic methods of image transmission over multimode optical fiber for increased bandwidth of fiber-optic communication lines // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 10. P. 569–574. https://doi.org/10.1364/JOT.90.000569
7. Делицын А.Л. Быстрые алгоритмы решения обратной задачи рассеяния для системы уравнений Захарова–Шабата и их приложения // Математические заметки. 2022. Т. 112. № 2. С. 301. https://doi.org/10.4213/mzm13561
   Delitsyn A.L. Fast algorithms for solving the inverse scattering problem for the Zakharov–Shabat methodological system and their applications [in Russian] // Mathematical Notes. 2022. V. 112. № 2. P. 301. https://doi.org/10.4213/mzm13561
8. Bonk R., Huber G., Vallaitis T., et al. Impact of alfa-factor on SOA dynamic range for 20 GBd BPSK, QPSK and 16-QAM signals // Optical Fiber Commun. Conf. (IEEE). Los-Angeles, USA. March 6 — 10, 2011.
9. Rocha P., Gallep C.M., Conforti E. Impact of semiconductor optical amplifier nonlinear gain over 16-QAM optical signals at 40 and 100 Gbit/s // Opt. Eng. 2018. V. 57. № 10. P. 106112. https://doi.org/10.1117/1.OE.57.10.106112
10. Carena A., Curri V., GaudinoR., et al. A time-domain optical transmission system simulation package accounting for nonlinear and polarization-related effect in fiber // IEEE J. Selected Areas in Commun. 1997. V. 15. № 4. P. 751. https://doi.org/10.1109/49.585785
11. Bahrampour A.R., Mahjoei M., Rasouli A. A theoretical analysis of the effects of erbium ion pair on the dynamics of an optical gain stabilized fiber amplifier // Opt. Commun. 2006. V. 265. P. 283. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2006.03.006
12. Brosson P. Analytical model of a semiconductor optical amplifier // J. Lightwave Technol. 1994. V. 12. № 1. P. 49. https://doi.org/10.1109/50.265734
13. Agrawal G.P., Olsson N.A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers // IEEE J. Quantum Electron. 1989. V. 25. P. 2297. https://doi.org/10.1109/3.42059
14. Agrawal G.P. Effect of gain dispersion on ultrashort pulse amplification in semiconductor laser amplifiers // IEEE J. Quantum Electron. 1991. V. 27. P. 1843. https://doi.org/10.1109/3.90014
15. Cassioli D., Scotti S., Mecozzi A. A time-domain computer simulation of the nonlinear response of semiconductor optical amplifiers // IEEE J. Quantum Electron. 2000. V. 36. № 9. P. 1072. https://doi.org/10.1109/3.863960
16. Электронный ресурс URL: https://www.inphenix.com/en/semiconductor-optical-amplifiers (INPHENIX INC. / Каталог полупроводниковых оптических усилителей).
    Electronic resource URL: https://www.inphenix.com/en/semiconductor-optical-amplifiers (INPHENIX INC. / Catalog of semiconductor optical amplifiers).
17. Электронный ресурс URL: https://www.optokon.com/product/261-single-mode-fiber-g-652-d (OPTKON a.s. / Описание товара Одномодовое Волокно G.652.D).
    Electronic resource URL: https://www.optokon.com/product/261-single-mode-fiber-g-652-d (OPTKON a.s. / Description of product Single Mode Fiber G.652.D).
18. Buus J., Plastow R. A theoretical and experimental investigation of Fabry–Perot semiconductor laser amplifiers // IEEE J. Quantum Electron. 1985. V. 21. № 6. https://doi.org/10.1109/JQE.1985.1072710
19. Connelly M.J. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model // IEEE J. Quantum Electron. 2001. V. 37. № 3. P. 439. https://doi.org/10.1109/3.910455

АВТОРЫ

Пауль Ярославович Илюшин — стажер-исследователь, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; студент магистратуры Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия; https://orcid.org/0009-0005-9583-2997; ilusinpaul@gmail.com

Даниил Евгеньевич Шипило — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; инженер, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия; https://orcid.org/0000-0003-1715-9723; schipilo.daniil@physics.msu.ru

Ирина Алексеевна Николаева — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; аспирант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия; https://orcid.org/0009-0003-2360-5838; irarubik@mail.ru

Николай Андреевич Панов — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; доцент Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия; https://orcid.org/0000-0002-4356-5189; napanov@ilc.edu.ru

Ольга Григорьевна Косарева — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия; https://orcid.org/0000-0002-5754-1057; kosareva@physics.msu.ru

AUTHORS

Paul Ya. Ilyushin — Research Intern, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; Master Student, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0009-0005-9583-2997; ilusinpaul@gmail.com

Daniil E. Shipilo — PhD (Physics and Mathematics), Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; Engineer, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1715-9723; schipilo.daniil@physics.msu.ru

Irina A. Nikolaeva — Junior Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; PhD Student, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0009-0003-2360-5838; irarubik@mail.ru

Nikolay A. Panov — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; Associate Professor, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0002-4356-5189; napanov@ilc.edu.ru

Olga G. Kosareva — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; Professor, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0002-5754-1057; kosareva@physics.msu.ru

Статья поступила в редакцию 12.11.2023
Одобрена после рецензирования 24.04.2024
Принята к печати 30.09.2024

The article was submitted to the editorial office 12.11.2023
Approved after review 24.04.2024
Accepted for publication 30.09.2024