

## Моделирование переноса шумов в когерентных волоконно-оптических линиях связи с распределенным рамановским усилением

А. Е. Беднякова<sup>1,2,\*</sup>, Т. М. Федотенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

\*Контактный e-mail: [anastasia.bednyakova@gmail.com](mailto:anastasia.bednyakova@gmail.com)

Выполнено исследование процесса переноса шумов из накачки в сигнал в распределенных рамановских усилителях. На основе нелинейного уравнения Шрёдингера разработана численная модель, учитывающая такие эффекты в волоконном световоде, как дисперсия, керровская нелинейность и вынужденное комбинационное рассеяние. Данная модель позволяет исследовать влияние различных шумов, в том числе шума источника накачки, на фазово-модулированный сигнал, распространяющийся в когерентных волоконных линиях связи с распределенным рамановским усилением. Результаты моделирования качественно согласуются с результатами натуральных экспериментов.

*Ключевые слова:* когерентные волоконно-оптические линии связи, рамановский усилитель, ВКР-усилитель, относительная интенсивность шума, уравнение Шрёдингера, нелинейная волоконная оптика.

### Введение

Известно, что деградация информационного сигнала при распространении в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) приводит к уменьшению скорости передачи данных. На практике любая линия связи приносит искажения в информационный сигнал, которые могут быть полностью скомпенсированы (например, дисперсионное расплывание импульса) или только частично (например, шумы). К источникам искажений сигнала, приводящим к потере информации и влиянию которых невозможно полностью компенсировать, относятся спонтанный усиленный шум (ASE — Amplified Spontaneous Emission), обратное рэлеевское рассеяние и шум источников накачки в усилителях. Для компенсации оптических потерь в современных волоконно-оптических линиях связи используют две конкурирующие технологии — эрбиевые волоконные и распределенные рамановские волоконные усилители (ВКР-усилители) [1]. Принцип работы рамановских усилителей основан на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в волоконном световоде. В результате ВКР часть мощности излучения накачки преобразуется в излучение с более низкой частотой — стоксово излучение, тем самым усиливается слабый оптический сигнал на длине волны стоксовой компоненты.

Одним из основных преимуществ распределенных рамановских усилителей по сравнению с традиционными эрбиевыми усилителями является низкий уровень шума — возможность уменьшения шум-фактора в линиях связи, что позволяет передавать сигнал на большие расстояния без его деградации. Тем не менее даже распределенные рамановские усилители неизбежно добавляют оптический шум к сигналу. При исследовании распределенных рамановских усилителей необходимо учитывать различные источники шума, оказывающие влияние на сигнал при его распространении в линии связи. Шум, источниками которого являются обратное рэлеевское рассеяние и спонтанное рамановское рассеяние, накапливается в длинных (десятки и сотни километров) распределенных усилителях и приводит к ухудшению качества передачи сигнала. Еще одним источником шума в усилителях является шум источника накачки вследствие спонтанной эмиссии фотонов. Эти шумы могут передаваться от рамановского источника накачки к сигналу на длине волны стоксова сдвига, приводя к ухудшению качества передачи сигнала и необходимости уменьшения длины световода. Они характеризуются относительной интенсивностью — RIN (Relative Intensity Noise), а процесс переноса шумов из накачки в сигнал называется RIN Transfer.

Эффективность переноса шумов из накачки в сигнал максимальна на низких частотах и уменьшается с ростом частоты шума. Уменьшение эффективности переноса шумов на высоких частотах связано с расстройкой групповых скоростей между накачкой и сигналом, поскольку разница между групповыми скоростями приводит к усреднению высокочастотного шума. Также эффективность переноса шумов пренебрежимо мала в схемах со встречной накачкой. При распространении волн накачки и сигнала во встречном направлении расстройка групповых скоростей максимальна, поскольку относительная скорость встречных волн значительно выше, чем в случае с сонаправленным распространением. Таким образом, схемы с сонаправленным и двунаправленным усилением наиболее подвержены переносу шума из накачки в сигнал. Это приводит к более строгим требованиям к шумовым характеристикам сонаправленных источников накачки и необходимости использования источников накачки с низким уровнем вносимых шумов [2].

При проведении исследований распределенных усилителей различных конфигураций важно выбрать наиболее оптимальные. В ряде публикаций показано, что использование двухкаскадных распределенных рамановских усилителей с двунаправленной накачкой в ВОЛС позволяет улучшить качество передачи сигнала, уменьшив уровень шума благодаря равномерному усилению сигнала вдоль световода [3, 7]. В подобных системах с двунаправленной накачкой сигнал распространяется вдоль длинного участка оптического световода с незначительными отклонениями средней мощности от постоянного значения. Преимущества двухкаскадных усилителей заключаются в улучшенном оптическом отношении сигнал-шум и меньшем нелинейном набеге фазы по сравнению со стандартными схемами с одним каскадом ВКР-преобразования [8]. Несмотря на то что использование распределенных рамановских усилителей с двунаправленной накачкой и двумя каскадами ВКР-преобразования излучения позволяет значительно увеличить расстояние передачи информационного сигнала, они практически не используются в современных линиях связи из-за высокой степени переноса шумов из накачки в сигнал.

Данная работа посвящена исследованию процесса переноса шумов в распределенных рамановских усилителях с помощью методов математического моделирования. Перенос шумов исследовался другими авторами как численно [9], так и аналитически [10].

Тем не менее большинство используемых моделей основаны на квазимонохроматическом приближении и представляют собой системы балансных уравнений на среднюю мощность [11, 12]. Квазимонохроматические модели не учитывают влияние нелинейных и дисперсионных эффектов на сигнал и не подходят для описания эволюции сигналов с фазовыми форматами модуляции в когерентных линиях связи.

В данной работе на основе нелинейного уравнения Шрёдингера построена численная модель, позволяющая исследовать распространение сигнала с фазовым форматом модуляции в рамановском усилителе под влиянием дисперсии и нелинейности, а также различных источников шумов — спонтанного шума и шума источников накачки. С помощью построенной модели выполнено исследование деградации информационного сигнала в экспериментальной когерентной волоконной линии связи с двунаправленным рамановским усилением.

## 1. Схема эксперимента

На рис. 1 изображена схема распределенного рамановского усилителя с двунаправленной накачкой [13]. Усиление сигнала с длиной волны порядка 1550 нм осуществляется посредством двухкаскадного ВКР-преобразования излучения накачки. В качестве сонаправленного источника накачки служит волоконный лазер с длиной волны порядка 1455 нм, активный световод которого легирован ионами висмута. Особенностью этого лазера является низкий уровень шума ( $-140$  дБ/Гц) [14]. Также для осуществления количественного сравнения с результатами математического моделирования в эксперименте рассмотрен источник накачки с относительно высоким уровнем шума — порядка  $-110$  дБ/Гц. В качестве встречной накачки служит волоконный лазер с распределенной обратной связью (DFB — Distributed Feedback Laser), генерирующий излучение на длине волны 1366 нм. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) с максимальным отражением, близким к 100 %, образует лазерный резонатор на длине волны первого стоксова пика 1455 нм. В качестве активной среды усилителя служит стандартный одномодовый телекоммуникационный световод длиной 83 км. Все лазеры накачки являются непрерывными. Мощность сонаправленного источника накачки фиксирована и равна 90 мВт. Мощность встречной накачки настраивается таким образом, чтобы мощность сигнала на входе в усилитель была равна мощности сигнала на выходе из усилителя. В усилителе распространяется сигнал со спектральным уплотнением каналов, состоящий из десяти частотных каналов с межканальным расстоянием 100 ГГц. Каждый спектральный канал передает информацию со скоростью 120 Гбит/с с использованием четырехуровневого фазового формата модуляции QPSK для модуляции сигнала. Форма импульса — гауссиан. Однако при измерении RIN в качестве сигнала рассматривалась непрерывная волна мощностью 0.15 мВт.

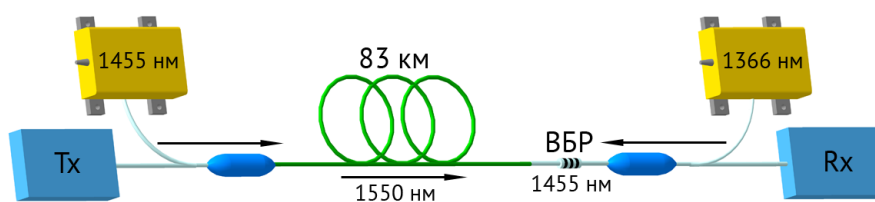


Рис. 1. Схема распределенного рамановского усилителя: Tx — передатчик; Rx — приемник оптического сигнала

## 2. Математическая модель и численный алгоритм

Распространение сигнала и сонаправленной волны накачки в световоде подчиняется системе связанных нелинейных уравнений Шрёдингера, которые описывают усиление сигнала в результате ВКР, истощение накачки, дисперсию в световоде, а также эффекты фазовой самомодуляции и фазовой кроссmodуляции [1]:

$$\frac{\partial A_p^+}{\partial z} = -\frac{i\beta_{2p}}{2} \frac{\partial^2 A_p^+}{\partial t^2} + i\gamma_p [|A_p^+|^2 + (2 - f_R)|A_s|^2] A_p^+ - \frac{g_p}{2} |A_s|^2 A_p^+, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_s}{\partial z} = & d \frac{\partial A_s}{\partial t} - \frac{i\beta_{2s}}{2} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + i\gamma_s [|A_s|^2 + (2 - f_R)|A_p^+|^2] A_s + \\ & + \frac{g_s}{2} (|A_p^+|^2 + \langle |A_p^-|^2 \rangle) A_s + iN(z, t). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $A_j$  — медленно-меняющаяся огибающая электромагнитного поля, нижние индексы  $j = p$  и  $j = s$  обозначают сигнал накачки на длине волны 1455 нм и стоксов сигнал на длине волны 1550 нм соответственно; верхние индексы “+” и “−” означают направление распространения волн накачки;  $\beta_{2j}$  — коэффициенты дисперсии второго порядка;  $\gamma_j$  — коэффициенты нелинейности;  $g_j$  — коэффициенты ВКР-усиления;  $d = v_{gp}^{-1} - v_{gs}^{-1}$  — параметр группового разбегания, соответствующий разнице групповых скоростей накачки и стоксова сигнала;  $f_R$  — относительный вклад запаздывающего рамановского отклика в нелинейную поляризацию.

Стоит отметить, что в уравнениях рассматривается усредненная по времени мощность встречной волны накачки  $|A_p^-|^2$ , поскольку ввиду большой расстройки групповых скоростей переносом шумов и нелинейным взаимодействием между встречными волнами можно пренебречь [15]. Слагаемое  $iN(z, t)$  описывает генерацию спонтанного усиленного шума, имеющего статистические свойства белого гауссова шума с неединичной дисперсией. Белый гауссов шум задается с помощью функции автокорреляции

$$\langle N_{\text{ASE}}(z, t) N_{\text{ASE}}^*(z, t') \rangle = \rho_{\text{ASE}} \delta(z - z') \delta(t - t'), \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{ASE}} = n_{sp} \hbar \nu \alpha L$  — спектральная плотность шума на частоте  $\nu$  в световоде с распределенным рамановским усилением;  $\hbar$  — постоянная Планка;  $\alpha$  — коэффициент оптических потерь;  $L$  — длина световода.

Начальные условия для системы уравнений (1) и (2) имеют вид

$$A_p^+(z = 0) = A_{p0}^+(t), \quad (4)$$

$$A_s(z = 0) = A_{s0}(t). \quad (5)$$

Численное решение задачи Коши (1)–(5) найдено с помощью метода расщепления по физическим процессам с использованием преобразования Фурье на линейном шаге. Интегрирование на нелинейном шаге осуществлялось с помощью метода Рунге — Кутты второго порядка.

Для решения системы уравнений (1) и (2) с начальными условиями (4) и (5) необходимо предварительно найти распределение мощности встречной накачки  $|A_p^-|^2 = P_p^2$  на длине волны 1455 нм вдоль световода. Поскольку на выходе из усилителя мощность сигнала должна восстанавливаться, мощность встречной накачки первого порядка на входе в усилитель (длина волны 1366 нм), необходимая для компенсации потерь в световоде, должна удовлетворять условию  $P_s(0) = P_s(L)$ . Искомые мощность накачки на входе

в световод и распределение средней мощности накачки на длине волны 1455 нм могут быть найдены из решения системы балансных уравнений, представляющих собой квази-монохроматическую модель [16]. В описанной ниже модели учтены такие эффекты, как истощение накачки и усиление сигнала в результате ВКР, а также спонтанная эмиссия и обратное рэлеевское рассеяние. При этом модель не учитывает влияние дисперсионных и нелинейных эффектов на сигнал, а также шум источника накачки, который может привести к деградации сигнала при его распространении в линии связи в результате переноса шумов из накачки в сигнал. Зависимость средней мощности излучения с длиной волны  $\lambda_i$  от координаты вдоль световода описывает уравнение

$$\frac{dP_i^\pm}{dz} = \pm \left( -\alpha_i^{eff}(z)P_i^\pm(z) + \varepsilon_i P_i^\mp(z) + 2\hbar\nu_i\Delta\nu_i \sum_{j<i} \frac{g_{ji}}{A_j} (P_j^+(z) + P_j^-(z)) \left( 1 + \frac{1}{e^{\frac{\hbar(\nu_j-\nu_i)}{kT}} - 1} \right) \right),$$

где эффективный коэффициент затухания  $\alpha_i^{eff}$  имеет вид

$$\alpha_i^{eff}(z) = \alpha_i - \sum_{j<i} \frac{g_{ji}}{A_j} (P_j^+(z) + P_j^-(z)) + \sum_{j>i} \frac{i}{j} \frac{g_{ij}}{A_i} (P_j^+(z) + P_j^-(z)) + 4\hbar\nu_i \sum_{j>i} \frac{g_{ij}}{A_i} \left( 1 + \frac{1}{e^{\frac{\hbar(\nu_j-\nu_i)}{kT}} - 1} \right) \Delta\nu_j.$$

Здесь  $\alpha_i$  — оптические потери на длине волны  $\lambda_i$ ;  $g_{ij}$  — коэффициент ВКР-усиления;  $A_i$  — эффективная площадь моды световода на длине волны  $\lambda_i$ ;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура световода;  $\varepsilon_i$  — коэффициент обратного рэлеевского рассеяния;  $\Delta\nu_i$  — эффективная ширина спектра сигнала;  $z$  — координата вдоль световода.

Граничные условия, описывающие отражение от волоконной брэгговской решетки и ввод накачки в резонатор (рис. 1), имеют вид

$$P_s(0) = P_{s0}, \quad P_{p2}^+(0) = P_{p20}, \\ P_{p1}^-(L) = P_{p10}^-, \quad P_{p2}^-(L) = RP_{p2}^+(L).$$

Здесь нижние индексы  $p1$ ,  $p2$  и  $s$  соответствуют волне накачки первого порядка на длине волны 1366 нм, волне накачки второго порядка на длине волны 1455 нм и сигналу на длине волны 1550 нм.  $P_{pi}$  — мощность излучения накачки на соответствующей длине волны,  $P_s$  — мощность сигнала на длине волны 1550 нм. Верхние индексы “+” и “-” означают направление распространения волн накачки.

Приближенное решение краевой задачи найдено с помощью метода коллокаций, реализованного в пакете прикладных программ Matlab. Значения параметров стандартного одномодового световода, которые использовались в счете, приведены в таблице.

Характеристики световода SMF-28

$\lambda$ , нм	$g$ , Вт <sup>-1</sup> · км <sup>-1</sup>	$\alpha$ , дБ · км <sup>-1</sup>	$\varepsilon$ , км <sup>-1</sup>
1366	0.51	0.32	1.010 <sup>-4</sup>
1455	0.36	0.245	6.010 <sup>-5</sup>
1550	—	0.2	4.310 <sup>-5</sup>

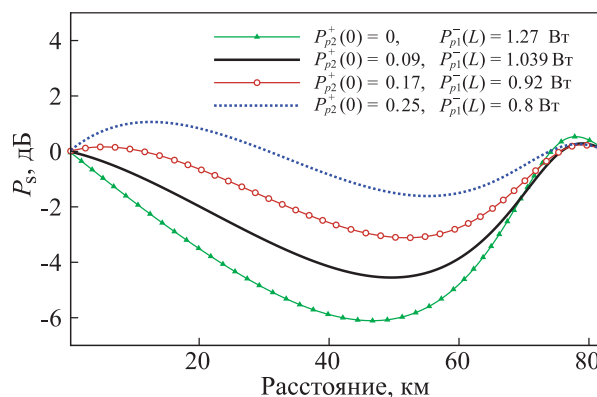


Рис. 2. Распределение мощности сигнала с длиной волны 1550 нм вдоль усилителя при различных значениях мощности сонаправленной накачки  $P_{p2}^+(0)$  с длиной волны 1455 нм на входе в световод

Мощность встречной накачки на входе в световод  $P_{p1}^-(L)$ , при которой выполнено условие  $P_s(0) = P_s(L)$ , найдена с помощью метода бисекции. Данная квазимонохроматическая модель позволяет с хорошей точностью определить распределение средней мощности встречной накачки с длиной волны 1455 нм вдоль усилителя.

Типичное распределение мощности сигнала с длиной волны 1550 нм вдоль усилителя при различных значениях мощности сонаправленной накачки  $P_{p2}^+(0)$  с длиной волны 1455 нм на входе в световод приведено на рис. 2. Мощность встречной накачки  $P_{p1}^-(L)$  с длиной волны 1366 нм найдена с помощью метода бисекции.

### 3. Моделирование шумовых характеристик сигнала и накачки

Мощность непрерывной волны на входе в усилитель может быть представлена как

$$P(t) = \bar{P} + \delta P(t),$$

где  $\bar{P}$  — средняя мощность сигнала;  $\delta P(t)$  — мощность шума малой амплитуды, как правило, имеющего статистические свойства белого гауссова шума. По определению относительной интенсивностью шума является отношение мощности шума к средней мощности сигнала  $\text{RIN} = \delta P(t)/\bar{P}$ . Во многих практических задачах относительную интенсивность шума удобнее выражать в некоторой спектральной полосе конечной ширины через плотность спектральной мощности излучения  $S_I(f)$ :

$$S_I(f) = \frac{2}{\bar{P}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \langle \delta P(t) \delta P(t + \tau) \rangle \exp(i2\pi f \tau) d\tau, \quad (6)$$

$$\text{RIN} = \frac{\delta P(t)}{\bar{P}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_I(f) df}. \quad (7)$$

В данной работе для моделирования относительной интенсивности шума накачки и сигнала на входе в световод использовались формулы (6) и (7), поскольку экспериментально измеренное распределение шума было неоднородным в частотной области.

Вычисление RIN фазово-модулированного сигнала осуществляется в два этапа. На первом этапе вычисляется распространение сигнала в усилителе без учета влияния шума источника накачки и усиленного спонтанного шума:

$$P_s^{clear}(t) = P_s(L, t),$$

где  $RIN = 0$ ,  $ASE = 0$  на входе в световод.

На втором этапе вычисляется распространение сигнала в усилителе под влиянием шума источника накачки и усиленного спонтанного шума

$$P_s^{noisy}(t) = P_s(L, t),$$

где  $RIN \neq 0$ ,  $ASE \neq 0$  на входе в световод. Тогда относительная интенсивность шума сигнала на выходе из усилителя может быть вычислена как

$$\delta P_s = P_s^{noisy}(t) - P_s^{clear}(t).$$

#### 4. Результаты моделирования и сравнение с экспериментом

Рассмотрим схему распределенного рамановского усилителя с двумя направлениями накачки, приведенную на рис. 1. В качестве источника сонаправленной накачки рассмотрим лазер с относительной интенсивностью шума, равной порядка  $-110$  дБ/Гц. Особенность шумовых характеристик данного источника накачки — модуляции шума в частотной области (рис. 3, *a*). Уровень шума в сигнале на входе в световод составляет порядка  $-140$  дБ/Гц (рис. 3, *в*). В качестве начальных данных для системы уравнений (1) и (2) рассмотрим непрерывные волны накачки и сигнала, шумовые характеристики которых близки к экспериментально измеренным характеристикам (рис. 3, *б, г*).

На рис. 3, *д, е* представлены шумовые характеристики сигнала на выходе из усилителя в эксперименте и расчете. Шум сигнала становится модулированным в частотной области, как и шум источника накачки. Из-за влияния дисперсии в световоде уровень шума на низких частотах оказывается выше, чем на высоких. Нижняя граница амплитуды шума определяется уровнем спонтанного усиленного шума (ASE), накопленного сигналом при распространении в усилителе длиной 83 км. Таким образом, можно говорить о том, что результаты расчета качественно согласуются с экспериментальными данными и численная модель адекватно описывает эффект переноса шумов из накачки в сигнал.

В качестве второго примера рассмотрим схему усилителя, в которой используется малошумящий источник сонаправленной накачки с относительной интенсивностью шума  $RIN = -140$  дБ/Гц [14]. На рис. 4, *a* (зеленая линия) изображен RIN сигнала накачки. Стоит отметить, что распределение шума в частотной области является неравномерным и включает узкую полосу шума высокой амплитуды на низких частотах (менее 20 МГц). Распределение RIN выходного сигнала имеет такую же особенность, как и сигнал накачки, — низкочастотную шумовую компоненту, которая наблюдается как в расчете (рис. 4, *б, зеленая линия*), так и в эксперименте (рис. 4, *б, черная линия*). Наличие данного высокоамплитудного шума приводит к деградации шум-фактора сигнала в линии связи [13], несмотря на низкий основной уровень шума источника накачки. С помощью математического моделирования была выполнена оптимизация шумовых характеристик источника накачки, заключающаяся в уменьшении амплитуды низкочастотной

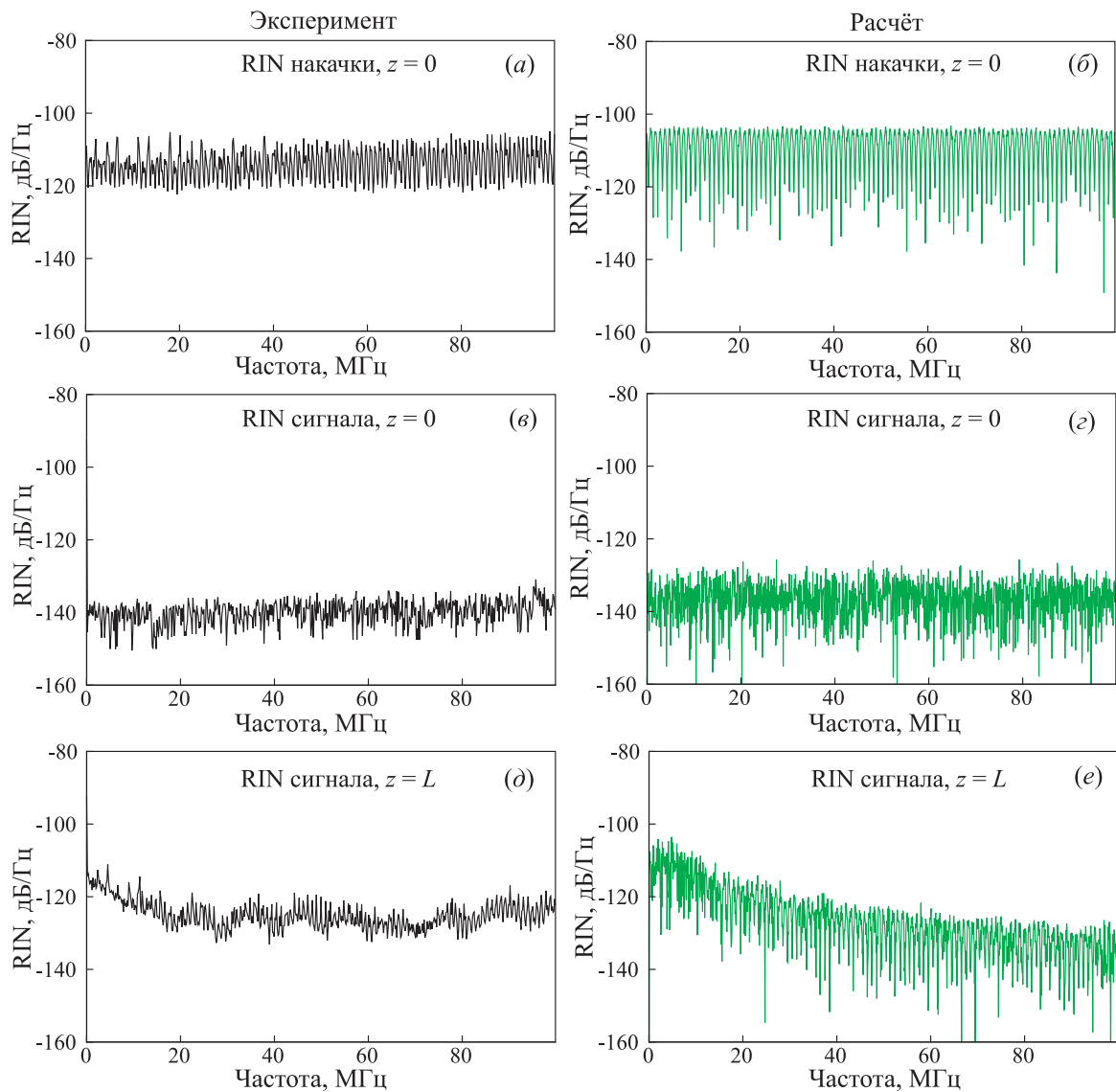


Рис. 3. Относительная интенсивность шума накачки ( $a, б$ ), а также шума сигнала на входе в усилитель ( $в, г$ ) и выходе из усилителя ( $д, е$ ) в эксперименте (слева) и расчете (справа)

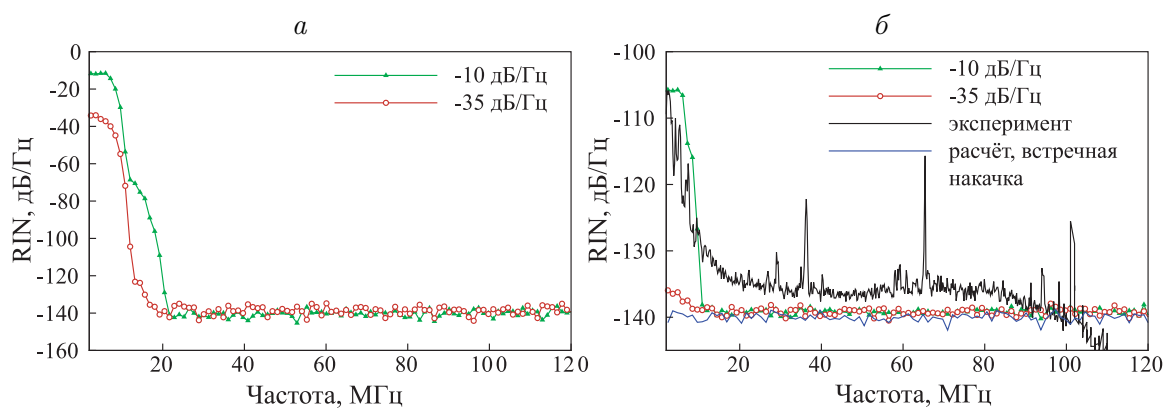


Рис. 4. Относительная интенсивность шума накачки на входе в линию связи ( $a$ ); RIN выходного сигнала при различных RIN сонаправленной накачки в расчете и эксперименте ( $б$ ). Синяя линия соответствует схеме усилителя со встречной накачкой



шумовой компоненты. В результате продемонстрировано, что уменьшение амплитуды низкочастотного шума до уровня ниже 35 дБ/Гц (рис. 4, красная линия) уменьшает эффективность переноса шумов из накачки в сигнал до пренебрежимо малого уровня, достижимого в схеме усилителя при использовании только встречной накачки (рис. 4, б, синяя линия).

## Заключение

Выполнено исследование процесса переноса шумов из накачки в сигнал в схеме распределенного рамановского усилителя с двунаправленной накачкой. На основе нелинейного уравнения Шрёдингера построена численная модель, позволяющая исследовать распространение сигнала с фазовыми форматами модуляции в рамановском усилителе под влиянием дисперсии и нелинейности, а также влияние различных источников шума — спонтанного шума и шума источников накачки. С помощью построенной модели выполнено исследование деградации информационного сигнала в экспериментальной когерентной волоконной линии связи с двунаправленным рамановским усилением. Продемонстрировано качественное согласие результатов моделирования с результатами экспериментальных измерений. Проведена оптимизация шумовых характеристик источника накачки, заключающаяся в уменьшении амплитуды низкочастотной шумовой компоненты. В результате было продемонстрировано, что уменьшение амплитуды низкочастотного шума до уровня ниже 35 дБ/Гц уменьшает эффективность переноса шумов из накачки в сигнал до пренебрежимо малого уровня, достижимого в схеме усилителя при использовании только встречной накачки.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-41-543268).

## Список литературы / References

- [1] **Islam, M.N.** Raman amplifiers for telecommunications 1: Physical principles // Springer Ser. in Optical Sci. 2004. Vol. 90(1). 300 p. DOI:10.1007/b97299.
- [2] **Rizzelli, G., Iqbal, M.A., Gallazzi, F., Rosa, P., Tan, M., Ania-Castanon, J.D., Krzaczanowicz, L., Corredera, P., Phillips, I., Forysiak, W., Harper, P.** Impact of input FBG reflectivity and forward pump power on RIN transfer in ultralong Raman laser amplifiers // Optics Express. 2016. Vol. 24. P. 29170–29175.
- [3] **Ania-Castanon, J.D., Karalekas, V., Harper, P., Turitsyn, S.K.** Simultaneous spatial and spectral transparency in ultralong fiber // Phys. Review Lett. 2008. Vol. 101. P. 123903.
- [4] **Ellingham, T.J., Ania-Castanon, J.D., Ibbotson, R., Chen, X., Zhang, L., Turitsyn, S.K.** Quasi-lossless optical links for broad-band transmission and data processing // Photon. Technol. Lett. 2006. Vol. 18, No. 1. P. 268–270.
- [5] **Ania-Castanon, J.D., Ellingham, T.J., Ibbotson, R., Chen, X., Zhang, L., Turitsyn, S.K.** Ultralong Raman fiber lasers as virtually lossless optical media // Phys. Review Lett. 2006. Vol. 96. P. 023902.
- [6] **Bednyakova, A., Fedoruk, M., Harper, P., Turitsyn, S.** Hybrid gain-flattened and reduced power excursion scheme for distributed Raman amplification // Optics Express. 2013. Vol. 21, No. 24. P. 29140–29144.

- [7] **Bednyakova, A.E., Fedoruk, M.P.** Spatially cascaded cavities for power saving distributed Raman amplification // Optics Commun. 2012. Vol. 291. P. 274–278.
- [8] **Perlin, V.E., Winful, H.G.** On trade-off between noise and nonlinearity in WDM systems with Raman amplification // Proc. of Optical Fiber Commun. Conf. and Exhibit, Los Angeles, CA, USA, 2012 (OFC-2012). P. 178–180.
- [9] **Alcon-Camas, M., Ania-Castanon, J.D.** RIN transfer in 2nd-order distributed amplification with ultralong fiber lasers // Optics Express. 2010. Vol. 18. P. 23569–23575.
- [10] **Fludger, C.R.S., Handerek, V., Mear, R.J.** Pump to signal RIN transfer in Raman fiber amplifiers // J. Lightwave Technol. 2001. Vol. 19. P. 1140.
- [11] **Krause, M., Cierullies, S., Renner, H., Brinkmeyer, E.** Pump-to-Stokes RIN transfer in Raman fiber lasers and its impact // Optics Commun. 2006. Vol. 260, No. 2. P. 656–661.
- [12] **Nuno, J., Ania-Castanon, J.D.** RIN transfer in second-order Raman amplification with centrally-pumped random distributed feedback lasers // Intern. J. of Modern Phys. B. 2014. Vol. 28. P. 1442005.
- [13] **Tan, M., Dvoyrin, V., Iqbal, M.A., Turitsyn, S.K., Harper, P.** Evaluation of long-haul coherent transmission performance using low RIN forward Raman pump // Asia Commun. and Photonics Conf., Wuhan, China, 2016. OSA Technical Digest (Opt. Soc. of America, 2016). Paper AF3D.2.
- [14] **Dvoyrin, V., Tan, M., Zlenko, A., Mashinsky, V., Melkumov, M., Dianov, E., Harper, P., Turitsyn, S.K.** Bi-doped fiber laser for telecom applications // Conf. on Lasers and Electro-Optics, San Jose, CA, USA, 2016. OSA Technical Digest (Opt. Soc. of America, 2016). Paper STu1F.4.
- [15] **Churkin, D.V., Smirnov, S.V., Podivilov, E.V.** Statistical properties of partially coherent cw fiber lasers // Optics Lett. 2010. Vol. 35, No. 19. P. 3288–3290.
- [16] **Namiki, S., Emori, Y.** Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes // IEEE J. Selected Topics Quantum Electron. 2001. Vol. 7, No. 1. P. 3–16.

*Поступила в редакцию 14 ноября 2017 г.*

### **Numerical modelling of relative intensity noise transfer in coherent optical communication links with distributed Raman amplification**

BEDNYAKOVA, ANASTASIA E.<sup>1,2,\*</sup>, FEDOTENKO, TIMOFEY M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

\*Corresponding author: Bednyakova, Anastasia E., e-mail: [anastasia.bednyakova@gmail.com](mailto:anastasia.bednyakova@gmail.com)

The paper addresses an investigation of RIN transfer from pump to signal in distributed Raman amplifiers using the methods of numerical modelling. The process of RIN transfer was investigated by other authors both numerically and analytically. However, the vast majority of models are based on power balance equations derived in quasi-monochromatic approximation. These models do not take into account the influence

of nonlinear and dispersive effects on a signal in a long fiber and cannot be used to describe phase-modulated signal evolution in coherent optical communication links.

In this work a numerical model based on the nonlinear Schrödinger equation was implemented, which enables study of phase-modulated signal propagation in Raman amplifier under influence of dispersion, nonlinearity and different noise sources including pump noise and amplified spontaneous emission (ASE). Using the proposed model we studied signal degradation in real coherent communication link with distributed Raman amplification and bi-directional pumping. The results of the numerical simulations are in a good agreement with the experiment. Numerical optimization of pump noise was performed. It demonstrated that the decrease of low-frequency component of pump noise below 35 dB/Hz leads to the decrease of pump-to-signal RIN transfer to the negligibly low level, achievable only in the amplifier with counter-propagating pump.

*Keywords:* coherent optical communication links, Raman amplifier, relative intensity noise, RIN, Schrödinger equation, nonlinear fiber optics.

**Acknowledgements.** This research was supported by RFBR (grant No. 17-41-543268).

*Received 14 November 2017*