

КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

Экспериментальное исследование нелинейного режима работы DP-QPSK 100G линии связи, содержащей распределенный рамановский усилитель с попутной накачкой

Д.Д.Старых, И.И.Шихалиев, В.А.Коньшев, О.Е.Наний, В.Н.Трещиков, Р.Р.Убайдуллаев, Д.Р.Харасов

Экспериментально исследована зависимость мощности нелинейного интерференционного шума от входных мощностей сигнала и попутной накачки, а также от дисперсии на входе в канал в когерентной однопродетной волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) с форматом модуляции DP-QPSK и распределенным рамановским усилителем с попутной накачкой. Получено выражение для расчета мощности нелинейного шума на выходе одноканальной ВОЛС. Экспериментально исследованы выигры от применения распределенного рамановского усилителя с попутной накачкой в однопродетной одноканальной ВОЛС.

Ключевые слова: распределенный рамановский усилитель, попутная рамановская накачка, высокоскоростная когерентная линия связи, 100 Гбит/с, хроматическая дисперсия, нелинейный интерференционный шум, накопление нелинейного шума, оптическое отношение сигнал/шум.

1. Введение

Наиболее распространенным и энергетически эффективным средством передачи данных на дальние расстояния с высокой скоростью является когерентная оптическая связь [1–10]. Максимальная дальность передачи и длина отдельного пролета в когерентных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) ограничены двумя основными факторами: линейными шумами спонтанной люминесценции эрбиевого усилителя (EDFA) и нелинейными эффектами в волокне. Оба явления уменьшают оптическое отношение сигнал/шум (OSNR) на входе в приемник транспондера, что приводит к ухудшению качества оптического сигнала и, как следствие, к ошибкам при его демодуляции. OSNR в конце линии можно повысить за счет увеличения мощности сигнала, однако это увеличение обуславливает появление нелинейных эффектов, таких как фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция, четырехволновое смешение и др. Поскольку в случае когерентной системы передачи дисперсия компенсируется транспондером при цифровой обработке сигнала [11], элементы физической компенсации дисперсии в ней мож-

но не использовать. Вследствие этого из-за большой накопленной дисперсии перечисленные выше нелинейные эффекты проявляют себя как аддитивный гауссов шум [3, 12]. Таким образом, нелинейные эффекты в когерентных ВОЛС можно характеризовать мощностью нелинейного шума, которая суммируется с мощностями шумов спонтанной люминесценции эрбиевых усилителей. При этом мощность нелинейного шума, возникающего из-за взаимодействия отдельных импульсов в одном канале, приближенно описывается выражением

$$P_{NL} = \eta(P_{\text{signal}}^{\text{in}})^3, \quad (1)$$

где $P_{\text{signal}}^{\text{in}}$ – входная канальная мощность; η – коэффициент нелинейности. Полное отношение сигнал/шум (OSNR_{BER}), учитывающее основные эффекты, влияющие на качество сигнала и определяющие количество ошибок при его демодуляции, можно описать формулой

$$\frac{1}{\text{OSNR}_{\text{BER}}} = \frac{P_{\text{ASE}} + P_{\text{NL}}}{P_{\text{signal}}} = \frac{1}{\text{OSNR}_L} + \frac{1}{\text{OSNR}_{\text{NL}}}, \quad (2)$$

где P_{ASE} – мощность шума усиленной спонтанной люминесценции; OSNR_L – линейное оптическое отношение сигнал/шум; OSNR_{NL} – нелинейное отношение сигнал/шум.

Для достижения наилучшей производительности ВОЛС необходимо, с одной стороны, обеспечивать максимально высокую мощность на выходе линии, а с другой стороны, избегать слишком высокой канальной мощности, при которой развиваются нелинейные эффекты. Один из способов увеличения канальной мощности на выходе из пролета линии без увеличения мощности нелинейного шума состоит в использовании распределенных рамановских усилителей. В процессе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) или рамановского рассеяния [13] телекоммуникационное волокно выступает в роли усиливающей среды. Таким образом, увеличиваются сигнальная мощность в конце пролета линии и OSNR_L на выходе ВОЛС за счет уменьшения коэффициента усиления эрби-

Д.Д.Старых, И.И.Шихалиев, Д.Р.Харасов. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр.1, офис 826; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: starykh@phystech.edu

В.А.Коньшев. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр.1, офис 826; Институт истории естествознания и техники им. С.И.Вавилова РАН, Россия, 109012 Москва, Старопанский пер., 1/5

О.Е.Наний. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр.1, офис 826; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9

В.Н.Трещиков, Р.Р.Убайдуллаев. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр.1, офис 826

Поступила в редакцию 21 марта 2018 г., после доработки – 18 июня 2018 г.

евого предусилителя. При этом усложняется учет нелинейных искажений. Для вычисления мощности нелинейного шума разработана модель аддитивного гауссова шума [14], однако ее использование для расчета реальных ВОЛС затруднено, т.к. теоретические выражения сложны и зависят от большого числа трудно контролируемых параметров сигнала. Кроме того, эта модель, строго говоря, применима только для каналов с минимальным частотным интервалом и постоянной спектральной плотностью мощности (Nyquist WDM). На практике используются упрощенные феноменологические модели, базирующиеся на экспериментальных данных.

В отсутствие рамановского усиления, когда сигнал экспоненциально затухает, разработаны простые и эффективные феноменологические модели, основанные на методиках экспериментального измерения коэффициента нелинейности η [15]. Однако при ВКР-усилении продольный профиль мощности (ППМ) сигнала меняет форму, что требует разработки новых моделей и экспериментальных методик. Задача создания расчетной модели решается по-разному для распределенных рамановских усилителей с попутной и встречной накачкой. Из-за малой мощности сигнала на выходе ВОЛС нелинейные эффекты на последних километрах волоконного тракта малы, поэтому при встречной рамановской накачке необходимо рассчитывать только мощность сигнала и шума спонтанного комбинационного рассеяния. В случае попутной рамановской накачки кроме ППМ необходимо учитывать влияние нелинейных эффектов на OSNR.

В ряде работ, посвященных созданию сверхдлинных однопролетных ВОЛС [16–20], продемонстрировано успешное использование попутной рамановской накачки для увеличения длины пролетов ВОЛС. Однако анализ ее вклада в увеличение дальности передачи и методики выбора параметров ВОЛС в этих работах не представлены.

Цель настоящей работы – создание феноменологической расчетной модели нелинейного шума в одноканальных DP-QPSK 100G ВОЛС с распределенными рамановскими усилителями, ее экспериментальная верификация, а также разработка методики измерения мощности нелинейного шума для подобных линий. Кроме того, в работе экспериментально исследовался полный выигрыш от

использования распределенного рамановского усилителя с попутной накачкой мощностью 1 Вт в оптимальном режиме работы линии связи. Для оценки формы продольного профиля канальной мощности по входным мощностям накачки и сигнала применялась экспериментально верифицированная программа на языке MATLAB, с помощью которой численно решалась система скоростных уравнений, описывающих процесс ВКР-усиления в различных типах волокон.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для измерения параметров оптической однопролетной линии связи приведена на рис.1. Оптический сигнал от передатчика BER-анализатора (BER – уровень битовых ошибок в сигнале) со скоростью передачи данных 100 Гбит/с поступает на клиентский вход 100G-транспондера. В транспондере к сигналу добавляется избыточное кодирование для упреждающей коррекции ошибок и для служебной информации, после чего полная битовая скорость составляет 120 Гбит/с. Затем оптический сигнал на длине волны 1551.72 нм (32-й канал стандартизованной сетки частот ITU-T) направляется в перестраиваемый элемент компенсации дисперсии для управления входной дисперсией. Для усиления сигнала транспондера применялся эрбиевый усилитель EDFA 1, настроенный на режим максимального коэффициента усиления. С целью повышения точности вычисления ППМ на основе входных параметров сигнала и накачки за EDFA 1 был установлен мультиплексор, осуществляющий фильтрацию шума спонтанной люминесценции ионов эрбия. Далее сигнал направляется на перестраиваемый аттенуатор VOA 1 и вместе с накачкой на длинах волн 1439 и 1455 нм от рамановского усилителя поступает на мультиплексор накачки. После этого с помощью ответвителя 10% общей мощности отводится на калиброванный спектроанализатор OSA 1 для измерения мощностей на входе в стандартное телекоммуникационное волокно (SSMF) длиной 100 км с суммарным затуханием 18.9 дБ. На выходе волокна сигнал усиливается усилителем EDFA 2 и, пройдя через аттенуатор VOA 2 и последний предусилитель EDFA 3, выступающий в качестве генератора шума

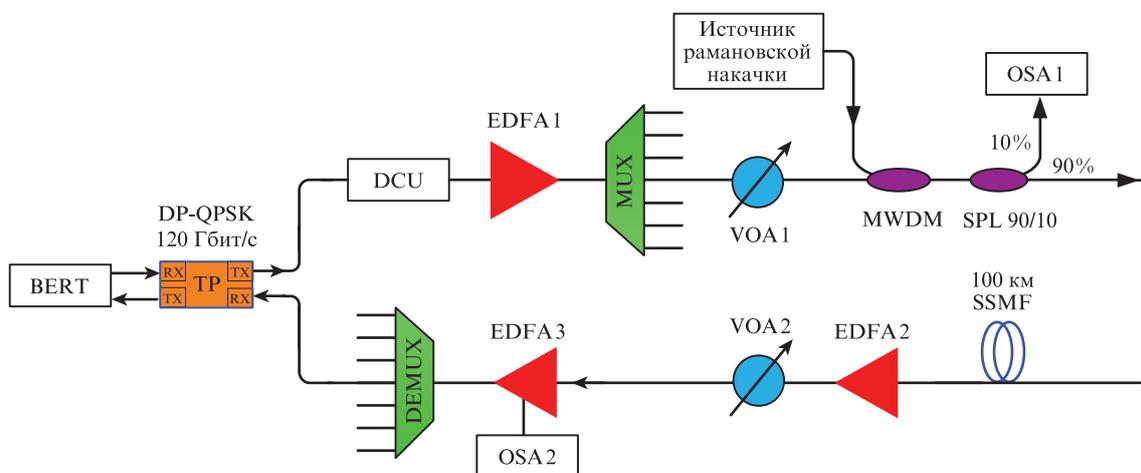


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

TP – 100G-транспондер; BERT – BER-анализатор; DCU – переменный компенсатор дисперсии; EDFA 1 – EDFA 3 – эрбиевые волоконные усилители; DEMUX – демультиплексор; MUX – мультиплексор; VOA 1 и VOA 2 – переменные аттенуаторы; MWDM – мультиплексор накачки; SPL 90/10 – ответвитель, делящий оптическое излучение по мощности в соотношении 10:90; OSA 1 и OSA 2 – оптические спектроанализаторы; SSMF – стандартное одномодовое волокно.

спонтанной люминесценции, направляется через демультиплексор на приемник транспондера.

Качество демодуляции оптического сигнала оценивалось по уровню ошибок в клиентском трафике на BER-анализаторе. Для каждого набора входных параметров, таких как дисперсия и мощности сигнала и накачки, подбирались (путем перестройки затухания на аттенуаторе VOA 3) минимальное значение $OSNR_L$ на входе в приемник транспондера, необходимое для условно безошибочной демодуляции сигнала. Такое значение линейного $OSNR$ в дальнейшем будет называться требуемым $OSNR$ ($OSNR_R$). Поскольку спектр нелинейного шума целиком лежит в полосе сигнала, этот шум невозможно детектировать с помощью анализатора оптического спектра. Поэтому его доля в общем внутриканальном шуме оценивалась косвенно. С ростом мощности нелинейного шума требуемое $OSNR$ растет, поскольку линейные шумы замещаются нелинейными так, чтобы величина $OSNR_{BER}$ на входе в транспондер оставалась неизменной. Таким образом, нелинейный $OSNR$ можно найти по формуле

$$\frac{1}{OSNR_{NL}} = \frac{1}{OSNR_{BTB}} - \frac{1}{OSNR_R}, \quad (3)$$

где $OSNR_{BTB}$ – требуемое $OSNR$, измеренное в схеме back-to-back, когда гарантируется отсутствие нелинейного шума на входе в приемник транспондера.

3. Феноменологическая модель

При разработке феноменологической модели возник вопрос о выборе параметров входного сигнала и накачки, на основе которых в дальнейшем будут строиться все зависимости. Использование разных длин волн для рамановской накачки приводит к тому, что одним и тем же значениям входных мощностей будут соответствовать разные ППМ и мощности нелинейного шума. Чтобы избежать привязки разрабатываемой феноменологической модели к конкретному типу рамановской накачки, целесообразнее строить зависимости мощности нелинейного шума от формы ППМ (рис.2).

Поскольку нелинейные эффекты зарождаются в области максимальной мощности сигнала, целесообразнее описывать ППМ тремя параметрами, а именно величиной максимума канальной мощности (P_{peak}), его пространственной удаленностью от места ввода накачки (z_{peak}), а также первой производной S функции, описывающей ППМ вблизи положения максимума канальной мощности. Последний параметр необходим для использования модели в отсутствие рамановской накачки. Таким образом,

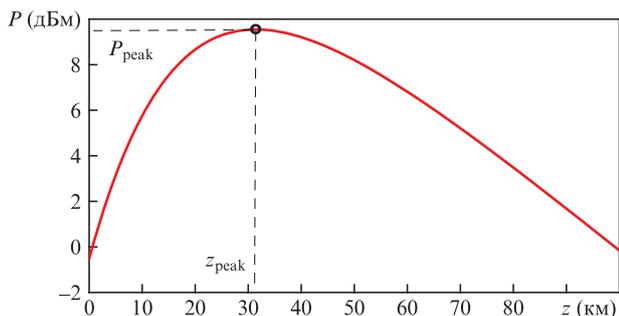


Рис.2. Продольный профиль канальной мощности P при попутном рамановском усилении сигнала.

с помощью первых двух параметров в условиях рамановской накачки можно описать продольный профиль канальной мощности одной точкой с координатами z_{peak}, P_{peak} , как показано на рис.2.

4. Результаты экспериментов

Были проведены эксперименты по выявлению зависимости мощности нелинейного шума от выбранных параметров продольного профиля канальной мощности (z_{peak}, P_{peak}, S) и входной дисперсии D^{in} . Было сделано предположение, что мощность нелинейного шума на входе в предусилитель P_{NL}^{out} можно представить в виде произведения функций от этих параметров:

$$P_{NL}^{out}(z_{peak}, P_{peak}, S, D^{in}) = F_D(D^{in}, z_{peak}) F_S(S) F_z(z_{peak}) F_P(P_{peak}). \quad (4)$$

Данная гипотеза подтвердилась в дальнейшем и были найдены функциональные зависимости от каждого из параметров. Исследовалась зависимость мощности нелинейного шума на выходе 100-километрового участка волокна от максимальной канальной мощности в линии. Для этого на основе численного решения скоростных уравнений, описывающих ВКР, были рассчитаны такие входные мощности рамановской накачки и сигнала, которые обеспечивали бы постоянное пространственное положение максимума канальной мощности z_{peak} и переменное абсолютное значение максимальной канальной мощности P_{peak} (рис.3, 4). Серия подобных экспериментов была выполнена при удаленности максимумов канальной мощ-

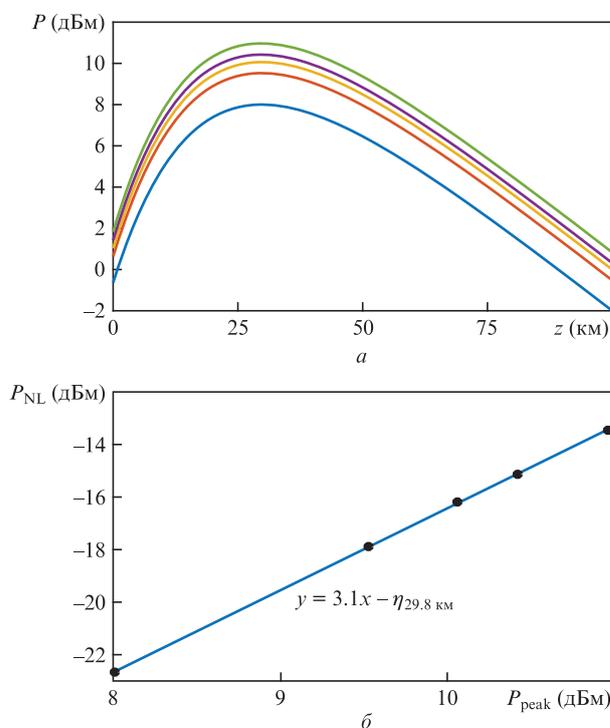


Рис.3. Продольные профили канальной мощности (а) и зависимость мощности нелинейного шума от максимума канальной мощности в линии (б) при его удалении от места ввода накачки на 29.8 км. Точки – эксперимент, сплошная линия – аппроксимация. Цветные варианты рис.3–8 помещены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

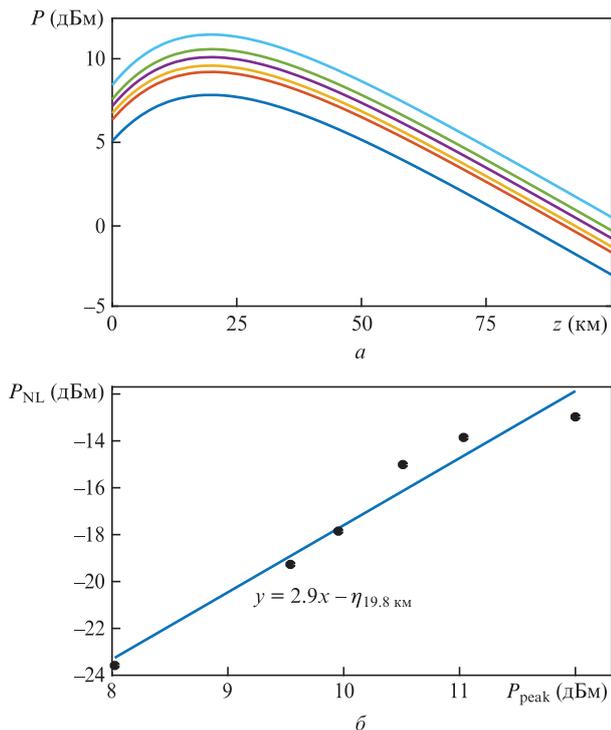


Рис.4. Продольные профили канальной мощности (а) и зависимость мощности нелинейного шума от максимума канальной мощности в линии (б) при его удалении от места ввода накачки на 19.8 км. Точки – эксперимент, сплошная линия – аппроксимация.

ности от места ввода накачки на 30 и 20 км. Предполагалось, что при больших значениях входной дисперсии D^{in} зависимость от нее выходит на постоянный уровень, как и в когерентных ВОЛС без распределенных рамановских усилителей. Поэтому эти и следующие измерения проводились при большой входной дисперсии (-3000 пс/нм), чтобы не учитывать в эксперименте потенциально сложную зависимость от входной дисперсии. Полученные результаты представлены на рис.3 и 4. Из рис.3,б и 4,б видно, что зависимости мощности нелинейного шума от максимальной канальной мощности хорошо аппроксимируются кубической зависимостью, это будет использовано в дальнейшем при построении модели.

Затем была исследована зависимость мощности нелинейного шума от пространственной удаленности максимума канальной мощности от места ввода накачки (z_{peak}). Для этого входные мощности сигнала и накачки выбирались такими, чтобы поддерживать на постоянном уровне максимальную канальную мощность P_{peak} при разных мощностях накачки (рис.5,а). На рис.5,б приведена одна из таких зависимостей. Для постоянной максимальной канальной мощности $P_{peak} = 9.5$ дБм, как и для других значений P_{peak} , были получены линейные зависимости вида $P_{NL}^{out} \propto (kz_{peak} + 1)$.

Влияние входной дисперсии D^{in} на мощность нелинейного шума (4) в ВОЛС без рамановского усиления описывалось аппроксимирующей формулой из работы [21]:

$$F(D^{in}) = 1 - \exp\left(-\mu_{100} - \left|\frac{D^{in} - D_0}{D_0 \rho_0}\right|^{1.5}\right), \quad (5)$$

где коэффициенты μ_{100} , ρ_0 , D_0 получены в результате аппроксимации зависимости нормированной мощности

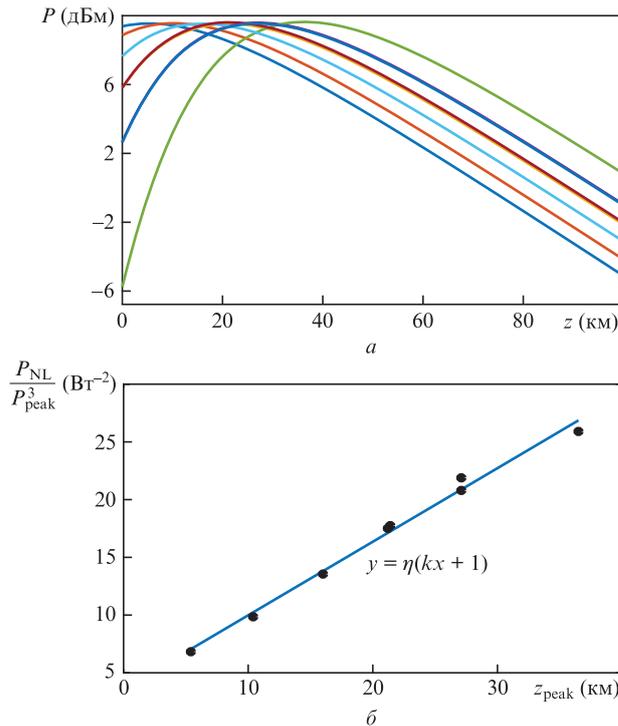


Рис.5. Продольные профили канальной мощности (а) и зависимость мощности нелинейного шума от пространственного положения максимума канальной мощности (б) при $P_{peak} = 9.5$ дБм. Точки – эксперимент, сплошная линия – аппроксимация.

нелинейного шума от входной дисперсии. Мощность нелинейного шума при произвольной входной дисперсии нормировалась на мощность нелинейного шума при большой входной дисперсии (-3000 пс/нм) и фиксированных прочих параметрах.

Для расширения границ применимости формулы (5) будем считать, что коэффициенты μ_{100} , ρ_0 , D_0 зависят от пространственного положения максимума канальной мощности z_{peak} . Для проверки указанного предположения была проведена серия экспериментов с измерением зависимости мощности нелинейного шума от входной дисперсии при разных пространственных положениях максимума канальной мощности в волоконном тракте (рис.6,а).

На рис.6,б видно изменение формы аппроксимирующей кривой при удалении максимума канальной мощности от места ввода накачки. Зависимость каждого параметра аппроксимирующей функции от z_{peak} описывалась полиномом, степень которого подбиралась из условий наилучшей сходимости. Итоговая формула может быть представлена в виде

$$F_D(D^{in}, z_{peak}) = 1 - \exp\left(-\mu_{100} - \left|\frac{D^{in} + D_0 + D_1 z_{peak} + D_2 z_{peak}^2}{\rho_0(-D_0 - D_1 z_{peak} - D_2 z_{peak}^2)}\right|^{1.5}\right). \quad (6)$$

Для расчета мощности нелинейного шума при слабой рамановской накачке уже недостаточно только одной точки ППМ, поскольку одним и тем же значениям z_{peak} , P_{peak} соответствуют разные ППМ. Рамановское усиление приводит к тому, что при плавном росте мощности накачки увеличивается дистанция, на которой поддерживается постоянный уровень канальной мощности (рис.7),

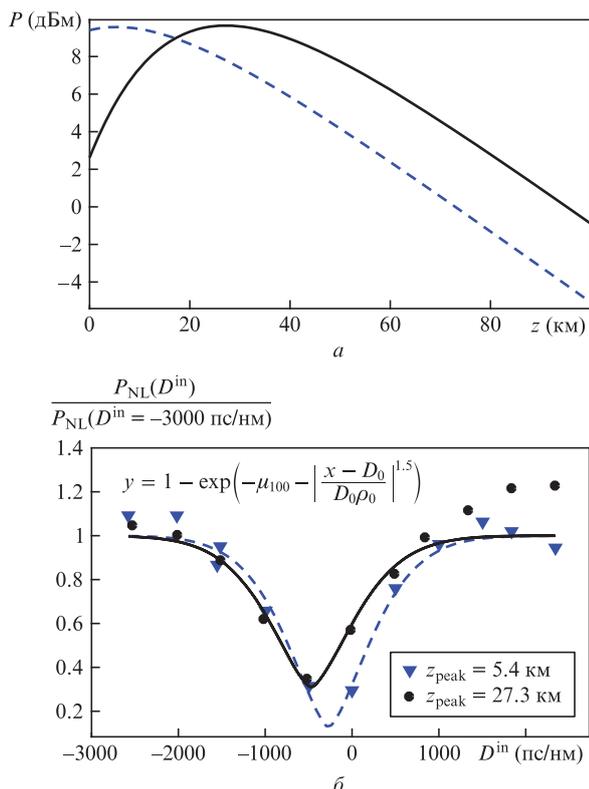


Рис.6. Продольные профили канальной мощности (а) и зависимости мощности нелинейного шума от входной дисперсии (б) при пространственной удаленности максимума канальной мощности от места ввода накачки на 5,4 и 27,3 км. Точки – эксперимент, кривые – аппроксимация.

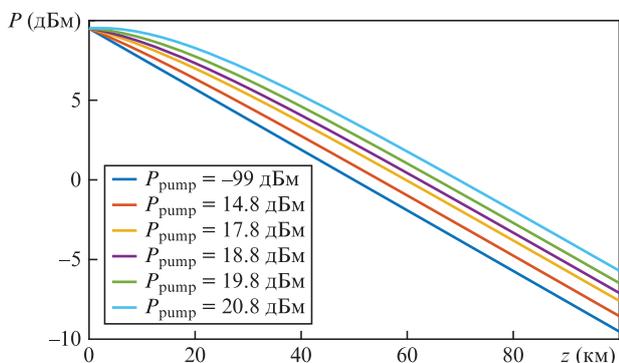


Рис.7. Продольные профили канальной мощности при малых мощностях рамановской накачки P_{pump} .

а это расширяет область возникновения нелинейных эффектов и повышает мощность нелинейного шума на выходе линии. При этом максимум канальной мощности не изменяется и не смещается из начала волоконного тракта. С помощью первой численной производной функции, описывающей ППМ в точке, удаленной от пространственного положения максимума канальной мощности на 5 км, устанавливается соответствие между формой ППМ и отвечающей ему мощностью нелинейного шума.

Переход к профилю мощности с экспоненциальным затуханием связывается с первой производной S функции, описывающей ППМ в точке, удаленной на 5 км от z_{peak} , и определяется линейной зависимостью

$$F_S(S) = 2\Theta(-z_{peak})(b_1 S - b_0) + 1, \quad (7)$$

где Θ – функция Хэвисайда; b_0 и b_1 – численно подобранные коэффициенты. Итоговая зависимость мощности нелинейного шума от параметров ППМ в канале имеет вид

$$P_{NL}^{out}(z_{peak}, P_{peak}, S, D^{in}, L_{span}, \alpha) = \exp[-\alpha(L_{span} - 100)] \times \eta_0 \left[1 - \exp\left(-\mu_{100} - \left| \frac{D^{in} + D_0 + D_1 z_{peak} + D_2 z_{peak}^2}{\rho_0(-D_0 - D_1 z_{peak} - D_2 z_{peak}^2)} \right|^{1.5} \right) \right] \times [2\Theta(-z_{peak})(b_1 S - b_0) + 1](k z_{peak} + 1) P_{peak}^3, \quad (8)$$

где η_0 – фундаментальный коэффициент нелинейности; L_{span} – длина пролета (в км); α – затухание в волокне (в км^{-1}).

5. Экспериментальная верификация феноменологической модели

Одним из основных параметров, демонстрирующих надежность ВОЛС, является запас по OSNR (в дБ), определяемый формулой

$$osnr_M = osnr_L - osnr_R. \quad (9)$$

Применимость предложенной феноменологической модели для расчетов запаса по OSNR исследовалась путем сравнения результатов расчета и эксперимента. Рассматривались три типа рамановских усилителей с длинами волн накачки от 1425 до 1480 нм. Входная мощность накачки варьировалась в диапазоне 0–1 Вт, а мощность сигнала – в диапазоне 10 мкВт–25 мВт. Использовались линии длиной 100 и 150 км. Применялся формат модуляции DP-QPSK 100G. Показано, что во всем исследованном диапазоне отличие теоретических результатов от экспериментальных не превышает 1 дБ. Экспериментальные и расчетные данные для одного из усилителей приведены на рис.8. Кроме того, было продемонстрировано, что использование рамановского усилителя с попутной накачкой мощностью до 1 Вт позволяет увеличить $OSNR_{BER}$ на входе в приемник транспондера на 6 дБ или длину пролета линии примерно на 30 км.

Результаты верификации показывают, что для систем связи на основе формата модуляции DP-QPSK 100G феноменологическая модель (8) обеспечивает точность расчета запаса по OSNR не хуже 1 дБ в пролете ВОЛС из SSMF-волокна такой длины, на которой экстремум функции, описывающей ППМ, расположен на расстоянии не

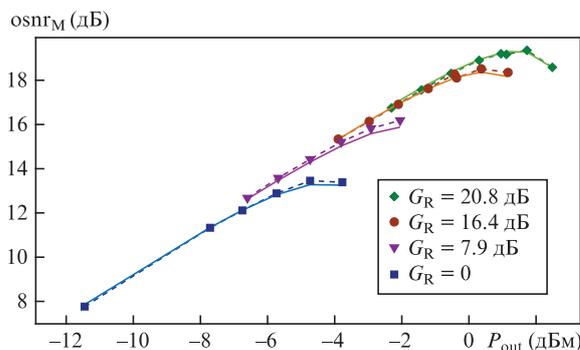


Рис.8. Зависимости запаса по OSNR от выходной канальной мощности P_{out} при различных коэффициентах усиления G_R распределенного рамановского усилителя с попутной накачкой. Точки – эксперимент, сплошные кривые – расчет.

менее 15 км от конца пролета. Для большинства коммерчески доступных распределенных рамановских усилителей с мощностью накачки до 1 Вт экстремум достигается на расстоянии 10–50 км от места ввода накачки в зависимости от входной мощности сигнала. При расчете участков ВОЛС с длиной, не соответствующей рекомендуемому диапазону длин, модель будет давать завышенные значения мощности нелинейного шума. Таким образом, полученные зависимости можно рекомендовать для расчета пролетов когерентных DP-QPSK 100G ВОЛС длиной от 65 км с произвольной входной дисперсией.

6. Заключение

Экспериментально показано, что мощность нелинейного шума в условиях распределенного рамановского усиления пропорциональна третьей степени максимальной канальной мощности в волоконном тракте. Продемонстрировано, что мощность нелинейного шума на выходе линии линейно растет при удалении положения максимума канальной мощности от места ввода накачки. Обнаружено, что при увеличении расстояния между местом ввода накачки и положением максимума канальной мощности уменьшается оптимальная по мощности нелинейного шума предкомпенсация дисперсии. Показано, что при использовании распределенного рамановского усилителя с попутной накачкой мощностью 1 Вт полное OSNR на выходе линии увеличивается на 6 дБ, что позволяет удлинить однопролетную линию на 30 км. Предло-

жена формула для расчета мощности нелинейного шума на выходе одноканальной когерентной ВОЛС, содержащей распределенный рамановский усилитель с попутной накачкой.

1. Gainov V. et al. *Opt. Express*, **22** (19), 22308 (2014).
2. Gainov V.V. et al. *Laser Phys. Lett.*, **10** (7), 75107 (2013).
3. Гуркин Н.В. и др. *Квантовая электроника*, **43** (6), 550 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (6), 550 (2013)].
4. Chang D. et al. *J. Lightwave Technol.*, **33** (3), 631 (2015).
5. Carena A. et al. *J. Lightwave Technol.*, **30** (10), 1524 (2012).
6. Konyshev V.A. et al. *Opt. Commun.*, **355**, 279 (2015).
7. Poggiolini G.B. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **24** (14), 1230 (2012).
8. Konyshev V.A. et al. *Opt. Commun.*, **349**, 19 (2015).
9. Poggiolini P. et al. *J. Lightwave Technol.*, **32** (4), 694 (2014).
10. Poggiolini P. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **23** (11), 742 (2011).
11. Savory S.J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **16** (5), 1164 (2010).
12. Poggiolini P. *J. Lightwave Technol.*, **30** (24), 3857 (2012).
13. Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Acad. Press, 2001, p.467).
14. Poggiolini P. et al. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.0394.pdf>.
15. Коньшев В.А. и др. *Квантовая электроника*, **46** (12), 1121 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (12), 1121 (2016)].
16. Chang D.I. et al. *Opt. Express*, **19** (26), B971 (2011).
17. Bissessur H. et al. *Proc. European Conf. on Optical Communication (ECOC 2014)* (Cannes, 2014).
18. Chang D.I. et al. *Proc. IEEE Photonics Conf. (IPC 2014)* (San Jose, 2014).
19. Etienne S. et al. *Proc. European Conf. on Optical Communication (ECOC 2015)* (Valencia, 2015).
20. Zhu B. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **25** (19), 1863 (2013).
21. Konyshev V.A. et al. *Opt. Commun.*, **381**, 352 (2016).