

Нелинейный режим работы ВОЛС с распределенными рамановскими усилителями

Д.Д. Старых^{1,2,*}, В.А. Кобышев^{1,5}, О.Е. Наний,^{1,2,3}
В.Н. Трещиков^{1,4}, И.И. Шихалиев^{1,2}

¹Группа компаний Т8

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

⁴Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

⁵Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН

*E-mail: starykh@phystech.edu

DOI:10.31868/RFL2018.212-213

Наиболее распространенным и энергоэффективным средством передачи данных на дальние расстояния с высокой скоростью является когерентная оптическая связь [1], [2]. Максимальная дальность передачи и длина отдельного пролета в когерентных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) ограничена двумя основными факторами: линейными шумами спонтанной люминесценции эрбиевого усилителя (EDFA) и нелинейными эффектами в волокне. Оба явления уменьшают оптическое соотношение 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 увеличение мощности оптического излучения в волоконном тракте приводит к появлению нелинейных эффектов, таких как фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция, четырехволновое смешение и других. Поскольку в случае когерентной системы передачи дисперсия компенсируется транспондером при цифровой обработке сигнала [3], элементы физической компенсации дисперсии можно не использовать в когерентных ВОЛС. Вследствие этого из-за большой накопленной дисперсии перечисленные выше нелинейные эффекты проявляют себя как аддитивный гауссов шум [4], [5]. Таким образом нелинейные эффекты в когерентных ВОЛС можно характеризовать мощностью нелинейного шума, которая суммируется с мощностями шумов спонтанной люминесценции эрбиевых усилителей.

Наилучшая производительность ВОЛС достигается при максимально высокой мощности на выходе линии, при которой слабо развиваются нелинейные эффекты. Этого можно добиться используя распределенные рамановские усилители. В процессе вынужденного комбинационного (ВКР) или рамановского рассеяния [6] телекоммуникационное волокно выступает в роли усиливающей среды. Таким образом увеличивается сигнальная мощность в конце пролета линии и отношение мощности сигнала к мощности шумов спонтанной люминесценции ($OSNR_L$) на выходе линии. Но при этом усложняется задача учета нелинейных искажений. Для учета подобных искажений создана феноменологическая расчетная модель нелинейного шума в многоканальных 100G DP-QPSK ВОЛС с распределенными рамановскими усилителями с попутной накачкой.

В схеме Рис. 1 были проведены эксперименты для выявления зависимостей полной мощности нелинейного шума от различных параметров продольного профиля канальной мощности Рис. 2, таких как максимум мощности исследуемого канала в линии (P_{peak}^{main}) и воздействующих каналов ($P_{peak}^{n_{ch}}$),

удаленности точки, в которой достигается P_{peak}^{main} , от места ввода накачки (Z_{peak}), дисперсии на входе в линию (D^{in}), а также количества (N_{ch}) и спектрального расположения воздействующих каналов (Δf). Сформированная феноменологическая модель (1) – (3) позволяет рассчитывать полную мощность нелинейного шума (P_{NL}^{full}) в когерентных 100G DP-QPSK ВОЛС с распределенными рамановскими усилителями с попутной накачкой мощностью до 1 Вт на длинах волн от 1425 нм до 1480 нм. Сравнение расчетного запаса по OSNR с экспериментальным показало расхождение не более 1 дБ.

$$P_{NL}^{full} = (P_{NL}^{self100} + P_{NL}^{cross100}) \times e^{\alpha(100[km] - L_{span}[km])} \quad (1)$$

$$P_{NL}^{self100} = \eta_0^{self} \left(1 - e^{-0.3 \frac{D^{in} + 295 - 6.3 \times Z_{peak} + 0.51 \times Z_{peak}^2}{3.5 \times (-295 + 6.3 \times Z_{peak} - 0.51 \times Z_{peak}^2)} \cdot 1.5} \right) \times (0.23 Z_{peak} + 1) \times (P_{peak}^{main})^3 \quad (2)$$

$$P_{NL}^{cross100} = 1.8 \times \eta_0^{cross} \left(\frac{50[GHz]}{\Delta f} \right)^2 \times \sum_{n_{ch}=1 \dots \frac{N_{ch}}{2}} \left\{ \frac{P_{peak}^{main} \times (P_{peak}^{n_{ch}})^2}{(n_{ch})^2} \right\}, \quad (3)$$

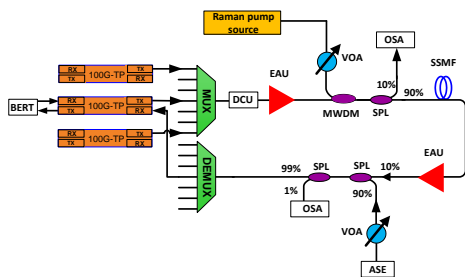


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

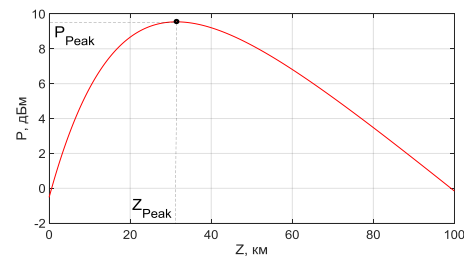


Рис. 2 Продольное распределение сигнальной мощности в ВОЛС с попутной рамановской накачкой

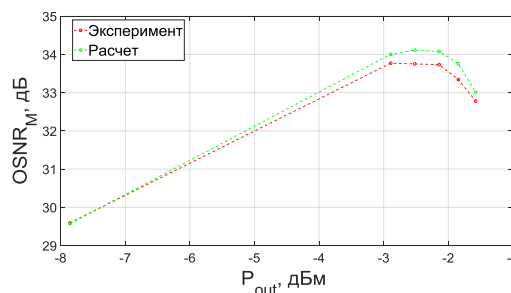


Рис. 3 Зависимость запаса по OSNR 31-го ITU-канала от выходной мощности в ВОЛС с попутной рамановской накачкой мощностью 29 дБм и с 8-ю симметрично расположенными воздействующими каналами с частотным интервалом 50 ГГц

Литература

- [1] V. Gainov *et al.*, *Opt. Express*, vol. **22**, no. 19, p. 22308 (2014)
- [2] D. Chang *et al.*, *J. Lightwave Technology*, vol. **33**, no. 3, pp. 631–638 (2015)
- [3] S. J. Savory, *Quantum Electron.*, vol. **16**, no. 5, pp. 1164–1179 (2010)
- [4] P. Poggiolini, *J. Lightwave Technology*, vol. **30**, no. 24, pp. 3857–3879 (2012)
- [5] Н. В. Гуркин *et al.*, *Quantum Electron.*, pp. 550–553 (2013)
- [6] G. Agrawal, *Elsevier, New York*, p. 467 (2001)