

М. А. Ходасевич, Ю. А. Варакса

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В МОДЕЛИ «ЧЕРНОГО ЯЩИКА»

Современные волоконно-оптические линии связи обязаны своим широким распространением, в первую очередь, эрбиевым волоконным усилителям, заменившим собой дорогостоящие электронные регенераторы сигналов. Достигнутые на сегодняшний день скорости передачи информации ограничиваются проявлениями нелинейных эффектов и дисперсии в волокне, а также шумами волоконно-оптических усилителей. Влияние первых двух причин может быть существенно уменьшено, например, путем применения волокон с модифицированной дисперсией и полых микроструктурированных волокон. В этом случае пропускная способность коммуникационной системы будет определяться шумом, вносимым в нее волоконным усилителем. Поэтому для нахождения предельных скоростных характеристик волоконно-оптических линий связи достаточно рассмотреть систему, свободную от дисперсии и нелинейности.

Наиболее простой моделью, корректно описывающей предельные скоростные характеристики оптических коммуникационных каналов при любых величинах соотношения сигнал/шум, является модель чисел заполнения [1]. Она подразумевает, что информация содержится в количестве квантов света в различных продольных модах электромагнитного поля. С помощью этой модели мы исследуем предельную спектральную эффективность передачи информации (в англоязычной литературе эта величина иногда называется также плотностью скорости передачи информации – information-rate density ID) линейных волоконно-оптических линий связи с эрбиевыми усилителями.

В модели чисел заполнения для коммуникационных каналов со спектральным уплотнением, ширина полосы пропускания которых значительно меньше частоты несущей, спектральная эффективность передачи информации, определенная как пропускная способность в единичной полосе пропускания, может быть представлена следующим выражением:

$$ID = \log_2\left(1 + \frac{SNR(0)}{F_0}\right) + \frac{SNR(0)}{F_0} \log_2\left(1 + \frac{F_0}{SNR(0)}\right). \quad (1)$$

Здесь $SNR(0)$ – отношение сигнал/шум на входе усилителя, а F_0 – шум-фактор, характеризующий ухудшение отношения сигнал/шум на выходе усилителя.

Строгое моделирование эрбиевых усилителей представляет собой достаточно сложную вычислительную задачу [2]. Существенной особенностью любого моделирования эрбиевых усилителей является необходимость спектрального разрешения усиления и шум-фактора. Оно может

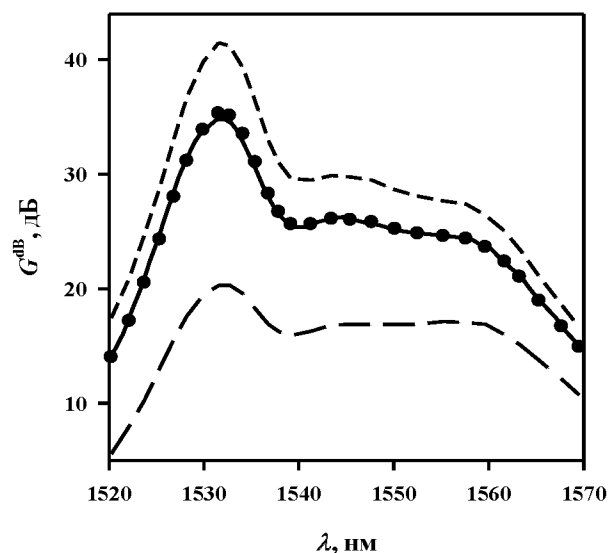


Рис. 1. Экспериментальные [5] (линии) и расчетные (точки) спектры усиления эрбиевого волоконного усилителя

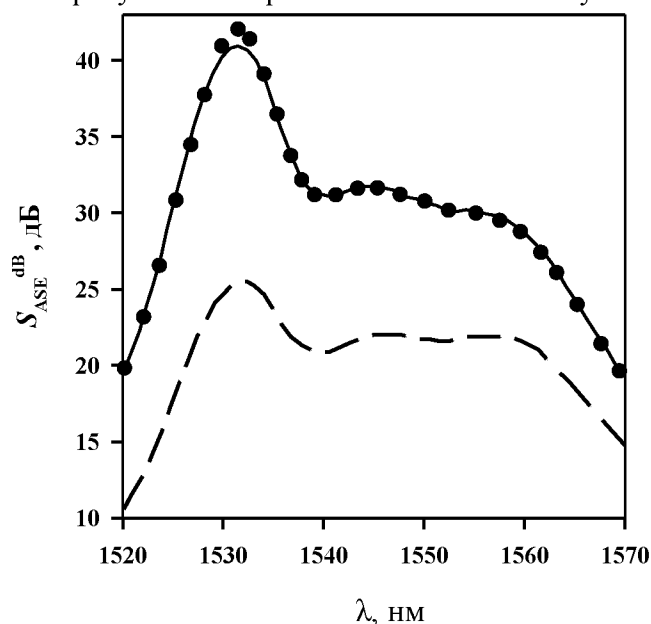


Рис. 2. Экспериментальные [5] (линии) и расчетные (точки) спектры плотности мощности усиленного спонтанного излучения на выходе эрбиевого волоконного усилителя.

Спектры, обозначенные одинаковыми символами на рис. 1–3 соответствуют одинаковым условиям насыщения

быть достигнуто с помощью системы скоростных уравнений, описывающих пространственное взаимодействие оптического поля с ионами эрбия в волокне [3]. Численное моделирование такой системы требует знания спектров сечений поглощения и испускания ионов эрбия, их концентрации и распределения в волокне, длины и коэффициента поглощения волокна, мощности накачки, спектра входного сигнала и параметров пас-

сивных оптических элементов внутри усилителя. Для физического устройства не все из перечисленных параметров могут быть легко измерены.

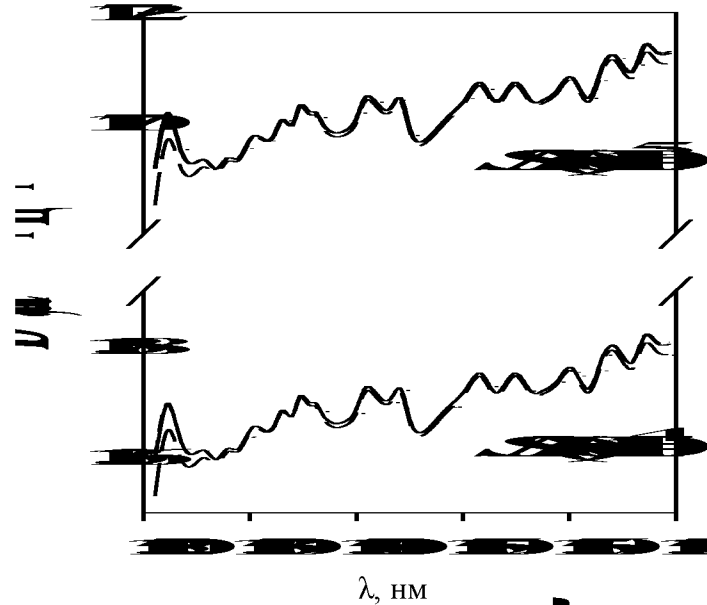


Рис. 3. Предельные спектральные эффективности передачи информации эрбиевых волоконных усилителей в С-полосе

Другим подходом к моделированию эрбиевых усилителей, базирующемся также на скоростных уравнениях, является так называемая модель «черного ящика» [4]. Само название говорит о том, что для проведения моделирования используются легко измеряемые передаточные характеристики усилителя без детальных знаний его структуры и особенностей. Эта модель справедлива в предположении однородного уширения полосы усиления квази-двухуровневых систем, в которых можно пренебречь частью активных ионов, не находящихся ни в основном, ни в возбужденном состояниях. В этом случае усиление задается усредненной по длине активного волокна инверсной населенностью, которая, в свою очередь, определяется балансом между процессами заполнения и опустошения метастабильного уровня. Скорости протекания этих процессов зависят от мощности накачки и спектра входного сигнала. В модели «черного ящика» спектры усиления и шума эрбиевых волоконных усилителей описываются тремя «функциями наклона» [4, 5], которые определяются с помощью трех экспериментально измеренных спектров: двух спектров усиления для разных условий насыщения и одного спектра шума для любого из этих условий.

Для нахождения «функций наклона» были использованы обозначенные штриховыми линиями на рис. 1 экспериментально измеренные спектры [5] эрбиевого волоконного усилителя, накачиваемого излучением с длиной волны 1480 нм. Как видно из рис. 1, расчетный спектр усиления (точки) с точностью не хуже 0.2 дБ совпадает с экспериментально изме-

ренным, обозначенным сплошной линией, за исключением области вблизи 1530 нм.

На рис. 2 представлены спектры плотности мощности спонтанного излучения на выходе усилителя. На основе экспериментальных данных, обозначенных линией с длинными штрихами на рис. 1 и 2, был рассчитан спектр эквивалентного входного шума. Затем с помощью результатов моделирования спектра усиления был получен спектр плотности мощности спонтанного излучения, представленный на рис. 2 сплошной линией. Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных данных не превышает 0.5 дБ за пределами пика усиленного спонтанного излучения. Таким образом, можно сделать вывод о применимости модели «черного ящика» для корректного описания шумовых характеристик эрбиевых волоконных усилителей.

На рис. 3 представлена спектральная эффективность передачи информации для различных условий насыщения при соотношении сигнал/шум на входе, составляющем 40 дБ (когерентный сигнал мощностью 10 мкВт при ширине спектра 10 ГГц) и 50 дБ (100 мкВт). Видно, что предельная спектральная эффективность передачи информации сильно зависит от входного соотношения сигнал/шум и слабо зависит от величины усиления и составляет от 13.3 до 13.8 (бит/с)/Гц для $SNR(0) = 40$ дБ и от 16.7 до 17.2 (бит/с)/Гц для $SNR(0) = 50$ дБ, что соответствует ограниченной шумами усилителя предельной пропускной способности линейных оптических линий связи, превышающей 80 Тбит/с и 100 Тбит/с соответственно в спектральном диапазоне С-полосы. Следует отметить, что достигнутая на сегодняшний день спектральная эффективность – около 0.4 (бит/с)/Гц [6, 7], а теоретический предел для систем с бинарным кодированием и амплитудной модуляцией составляет 1 (бит/с)/Гц [7].

Литература

1. *Lebedev D. S., Levitin L. B.* Information transmission by electromagnetic field // *Inf. Control.* 1966. Vol. 9. P. 1–22.
2. *Roudas I., Richards D. H., Antoniadou N., et al.* An efficient simulation model of the erbium-doped fiber for the study of multiwavelength optical networks // *Opt. Fiber Tech.* 1999. Vol. 5. P. 363–389.
3. *Giles C. R., Desurvire E.* Modeling erbium-doped fiber amplifiers // *J. Lightwave Tech.* 1991. Vol. 9, № 2. P. 271–283.
4. *Burgmeier J., Cords A., Marz R., et al.* A black box model of EDFA's operating in WDM systems // *J. Lightwave Tech.* 1998. Vol. 16, № 7. P. 1271–1275.
5. *Vanin E.V., Persson U., Jakobsen G.* spectral function forms for gain and noise characterization of erbium-doped fiber amplifiers // *J. Lightwave Tech.* 2002. Vol. 20, № 2. P. 243–249.
6. *Desurvire E.* Fundamental information-density limits in optically amplified transmission: an entropy analysis // *Opt. Lett.* 2000. Vol. 25, № 10. P. 701–703.
7. *Kahn J.M., Ho K. P.* A bottleneck for optical fibres // *Nature.* 2001. Vol. 411. P. 1007–1010.