

01;07;12

## Вынужденное комбинационное рассеяние в волоконно-оптических линиях связи

© В.Ю. Голышев, Е.А. Жуков, И.Э. Самарцев, Д.Г. Слепов

Научно-техническое объединение „ИРЭ-Полюс“,  
141120 Фрязино, Московская область, Россия  
e-mail: mail@ntoire-polus.ru

(Поступило в Редакцию 29 апреля 2003 г.)

Теоретически исследовано вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) в волоконно-оптической линии дальней связи со спектральным уплотнением каналов при больших мощностях передаваемого сигнала. Предложен новый критерий определения порога ВКР, в соответствии с которым рассчитана критическая мощность на входе линии в зависимости от количества оптических каналов и расстояния между ними. Проведена экспериментальная проверка аналитической модели. Приведены экспериментальные результаты измерений ВКР взаимодействия двух каналов в линии связи с ВКР усилителем, для которого нелинейной средой является волоконный световод линии.

### Введение

Для увеличения дальности передачи информации в современных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) используются эрбиевые усилители. Однако при возрастании мощности передаваемого сигнала в световоде возникают различные нелинейные явления: вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), самомодуляция и кросс-модуляция, вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна, четырехволновое смешение. Наиболее значительным эффектом, ограничивающим дальность связи [1,2], является вынужденное комбинационное рассеяние. Особенно сильно ВКР проявляется в системах со спектральным уплотнением каналов. В этом случае при распространении в волокне излучения нескольких длин волн происходит усиление более длинноволновых сигналов за счет ослабления коротковолновых [3,4]. Причем перекачка мощности между каналами, вносимая ВКР, возрастает с увеличением расстояния между ними в пределах ширины спектра комбинационного усиления (15 THz). При достижении определенного уровня сигнала на входе линии выходная мощность коротковолновых каналов практически перестает расти.

В опубликованных ранее работах, посвященных ВКР, все расчеты проводились либо для коротких длин волокна (до 10 км), либо при малых мощностях передаваемого сигнала (до 20 мВт). Однако в настоящее время получили распространение волоконно-оптические линии дальней связи (более 200 км), использующие технологию спектрального уплотнения каналов, для которых характерны большие мощности излучения (от 100 мВт и выше). В связи с этим одной из задач, которая ставилась в нашей работе, было выявление ограничений по мощности, обусловленных ВКР, в современных ВОЛС.

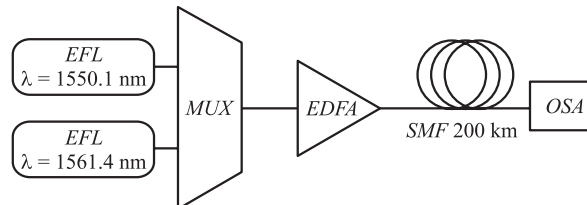
Точное аналитическое решение для эволюции ВКР взаимодействия каналов в системе со спектральным уплотнением найдено в работе [5]. На основании полученного результата нами была построена модель для расчета пороговой мощности при различном количестве спектральных сигналов и расстоянии между

ними, в которой использовалась треугольная аппроксимация спектра усиления с коэффициентом наклона  $g' = 5.1 \cdot 10^{-18} \text{ м}/(\text{W} \cdot \text{GHz})$ .

### Экспериментальная проверка аналитической модели

С целью проверки теоретической модели был проведен эксперимент, схема которого представлена на рис. 1. В качестве источника сигнала применялся эрбиевый волоконный лазер (EFL) с шириной линии менее 0.06 нм. Два оптических сигнала с длинами волн  $\lambda_1 = 1550.12 \text{ нм}$  и  $\lambda_2 = 1561.42 \text{ нм}$  через мультиплексор (MUX) подавались на вход волоконной линии длиной 200 км. Неравномерность мощности между двумя каналами измерялась при помощи оптического анализатора спектра (OSA) в широком диапазоне мощностей входного сигнала (до 250 мВт).

Полученные результаты эксперимента и теоретического расчета приведены на рис. 2. Хорошее согласие теории и эксперимента подтверждает адекватность использованной модели в широком диапазоне мощностей передаваемого сигнала при больших расстояниях передачи.



**Рис. 1.** ВОЛС с эрбиевым усилителем на входе линии. EFL — эрбиевый волоконный лазер, MUX — мультиплексор, EDFA + SMF — входное устройство и волоконная линия, OSA — оптический анализатор спектра.

### Результаты моделирования

При увеличении мощности многоканального сигнала на входе волоконной линии мощность самого коротковолнового канала на выходе сначала растет. Но затем из-за влияния ВКР рост замедляется и доходит до максимума. При дальнейшем увеличении сигнала выходная мощность начинает уменьшаться. Критическая мощность ВКР на входе линии была определена из условия достижения максимальной мощности самого коротковолнового канала на выходе. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Количество каналов изменялось от 2 до 64. Расстояние между каналами выбиралось как 100, так и 200 GHz. Так, для восьмиканальной системы с расстоянием 200 GHz между каналами критическая мощность составляет 135 mW. Для меньшего числа каналов и расстояния между ними она еще больше.

ВКР приводит к спектральной неравномерности на выходе линии. На рис. 4 показаны спектры шестнадцатиканального сигнала на входе и выходе световода длиной 200 km. Заводимая в волокно мощность была равна критической мощности, а расстояние между каналами — 100 GHz.

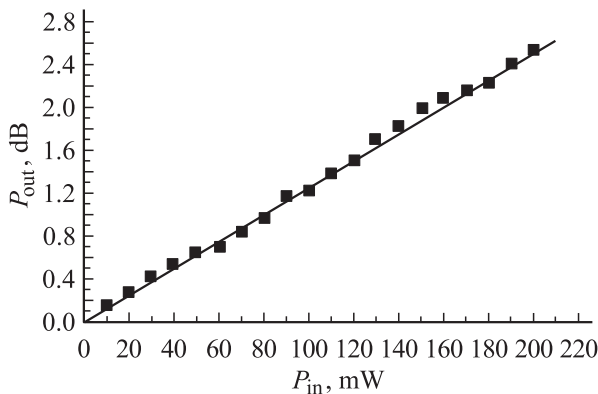


Рис. 2. Перекрестное взаимодействие между двумя каналами при различной выходной мощности на канал. ■ — эксперимент, сплошная линия — теория.  $P_{in}$  — входная мощность на канале.

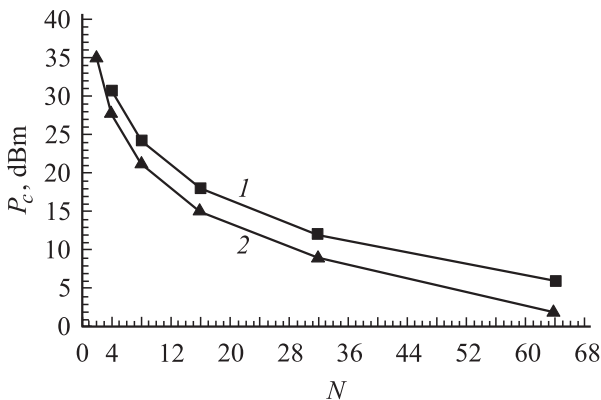


Рис. 3. Зависимость пороговой мощности от числа каналов ( $N$ ) в системе связи. 1 — интервал между каналами 100 GHz, 2 — 200 GHz.

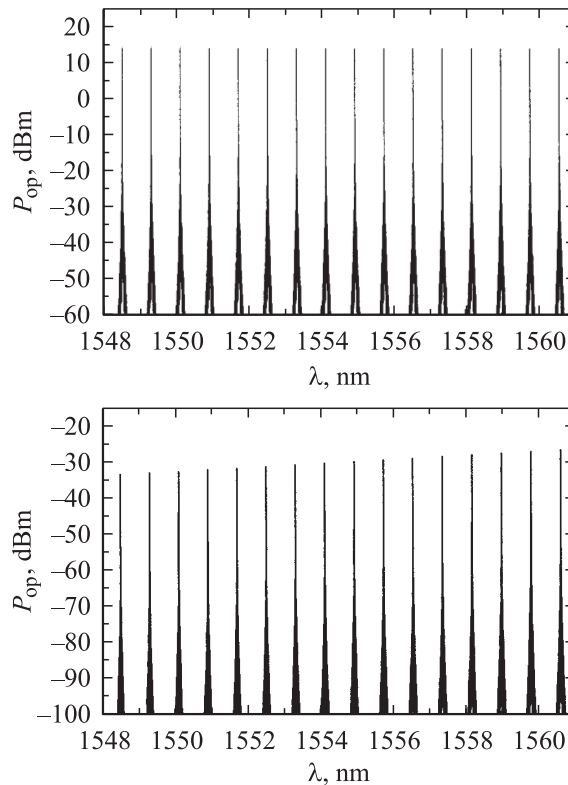


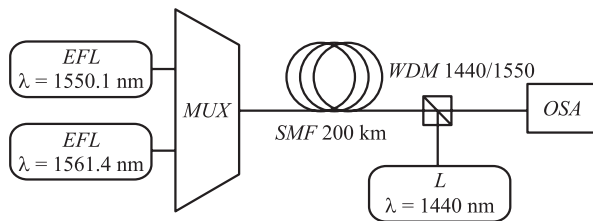
Рис. 4. Многоканальный оптический сигнал на входе (слева) и выходе (справа) 200 km линии.

При равной мощности на входе линии разность мощностей самого длинноволнового и самого коротковолнового  $P_N - P_1$  каналов будет максимальной. Результаты расчета измерений  $P_1$  и  $P_N$  показаны в таблице. Изменение 0 dB соответствует случаю отсутствия ВКР.

Число каналов $N$	Изменение $P_1(P_N)$ , dB	
	$\Delta f = 100$ GHz	$\Delta f = 200$ GHz
2	—	-3.6/ +1.9
4	-3.8/ +2.6	-3.8/ +2.6
8	-3.9/ +2.8	-3.9/ +2.8
16	-3.9/ +2.9	-3.9/ +3.0
32	-3.9/ +3.0	-3.9/ +3.0
64	-3.9/ +3.0	—

Указанная спектральная неравномерность может быть скомпенсирована при помощи спектральных фильтров, установленных на входе или на выходе линии.

Таким образом, эффект ВКР накладывает существенные ограничения на максимальную передаваемую мощность излучения, а следовательно, и на дальность связи. Однако эти ограничения не являются принципиальными. Одним из способов их преодоления при больших длинах пассивного участка является применение волоконного комбинационного усилителя (ВКУ), в котором волоконный световод линии используется как нелинейная среда, преобразующая излучение накачки в сигнал.



**Рис. 5.** Волоконный комбинационный усилитель в составе ВОЛС.  $L$  — лазер накачки. Остальные обозначения — те же, что и на рис. 1.

Мы провели экспериментальное измерение спектральной неравномерности в двухканальной системе с использованием распределенного ВКУ, накачиваемого со стороны выхода линии. Схема эксперимента показана на рис. 5.

Для накачки ВКУ использовался лазер с длиной волны 1440 nm, мощность которого менялась от 0 до 1.2 W. Излучение заводилось в волокно через направленный оптический мультиплексор (WDM 1440/1550). Оптическая мощность на входе линии составляла 20 mW на канал, а выходная мощность изменялась от 0 до 85  $\mu$ W. Неравномерность оптических сигналов оказалась очень малой во всем диапазоне измерений — менее 0.3 dB. Волоконный комбинационный усилитель позволяет значительно уменьшить потери мощности сигнала, обусловленные ВКР взаимодействием различных каналов между собой, по сравнению со стандартной схемой линии с эрбиевым усилителем на входе. К недостаткам использования ВКУ следует отнести то, что требуемая мощность лазера накачки должна быть на порядок больше, чем мощность эрбиевого усилителя при одинаковой мощности сигнала на выходе линии.

## Заключение

В настоящей работе приведены результаты теоретического моделирования ВКР взаимодействия в системе со спектральным уплотнением каналов на больших расстояниях связи в широком диапазоне мощностей оптического сигнала. Они позволяют определить оптимальную мощность на входе линии в зависимости от количества спектральных каналов и расстояния между ними. Была сделана экспериментальная проверка предложенной аналитической модели. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании современных волоконно-оптических линий дальней связи. Проведены также измерения ВКР в системе с волоконным комбинационным усилителем. В этом случае ВКР взаимодействие спектральных сигналов пренебрежимо мало.

Авторы выражают благодарность О.Г. Шкурихину и А.Г. Гетману за помощь в работе.

## Список литературы

- [1] *Smith R.G.* // Appl. Optics. 1972. Vol. 11. P. 2489.
- [2] *Stolen R.H.* // Proc. IEEE. 1980. Vol. 68. P. 1232.
- [3] *Chraplyvy A.R., Henry P.S.* // Electron. Lett. 1983. Vol. 19. P. 641.
- [4] *Chraplyvy A.R.* // J. Lightwave Technology. 1990. Vol. 8. P. 1548.
- [5] *Christodoulides D.N., Janger R.B.* // IEEE Photonics Technology Lett. 1996. Vol. 8. P. 1722.