

Прямое экспериментальное измерение ВКР-перекоса спектра в многоканальных многопролетных системах связи

Ю.А.Капин, О.Е.Наний, А.Г.Новиков, В.Н.Павлов, А.Ю.Плоцкий, В.Н.Трещиков

Экспериментально исследован нелинейный ВКР-перекос спектра многоканального сигнала со спектральным мультиплексированием в линиях связи на основе стандартного одномодового волокна. Установлено, что при фиксированных полосе спектра и суммарной мощности нелинейный ВКР-перекос не зависит от числа каналов, типа источников излучения в канале, начального перекоса (положительного или отрицательного). В многопролетной линии связи, состоящей из одинаковых пролетов, суммарный нелинейный перекос спектра (в децибелах) пропорционален количеству пролетов, ширине спектра и суммарной мощности.

Ключевые слова: DWDM, вынужденное комбинационное рассеяние, рамановский перекос, волоконно-оптическая линия связи.

1. Введение

В многоканальных системах связи со спектральным мультиплексированием (DWDM-системах) вынужденное комбинационное (рамановское) рассеяние (ВКР) приводит к усилению сигналов длинноволновых каналов за счет энергии более коротковолновых каналов [1–3]. Вследствие этого равномерный спектр мощности излучения на входе в линию связи после распространения по волокну становится неравномерным: мощность длинноволновых каналов оказывается больше мощности коротковолновых. Количественно величину этого нелинейного эффекта можно охарактеризовать величиной перекоса или наклона выходного спектра. Для разработки современных 80- и 40-канальных высокоскоростных систем связи [4–7] (общая скорость до 3.2 Тбит/с) необходима точная информация о зависимости величины нелинейного перекоса спектра от параметров линии связи.

Исследованию ВКР в волоконно-оптических линиях связи посвящено большое число работ [8–13], однако основное внимание в них уделено изучению спектра ВКР вблизи максимума ВКР-усиления, когда разность частот между взаимодействующими волнами примерно равна 13 ТГц.

В настоящей работе приведены результаты прямых экспериментальных исследований нелинейного перекоса спектра, обусловленного ВКР-взаимодействием оптических сигналов, разность частот между которыми меньше или равна 4 ТГц. Показано, что при расчетах ВКР-перекоса в DWDM-системах связи треугольная аппроксима-

ция спектра ВКР-усиления применима даже при наличии начального линейного положительного или отрицательного перекоса спектра.

2. Теория ВКР-перекоса

Теоретический анализ рамановского перекоса спектра дан в работе [1], он также описан в книге [2, гл. 8]. Следуя работе [1], рассмотрим систему N спектральных каналов, совместно распространяющихся в одномодовом волокне. Предположим, что все каналы расположены в пределах области спектра рамановского усиления, для которой применимо приближение линейной зависимости коэффициента усиления g_R от частотной расстройки (частотного интервала между взаимодействующими каналами $\Delta\nu_{ch}$). Пусть также длина волны канала 1 наименьшая, а длина волны канала N наибольшая, при этом каналы равномерно распределены по спектру. Тогда для взаимодействия каналов можно получить следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений [1–3]:

$$\frac{dP_n(z)}{dz} + \alpha_c P_n(z) + C_R P_n(z) \sum_{m=1}^N (m-n) P_m(z) = 0, \quad (1)$$

где $P_n(z)$ – мощность сигнала в канале n ; $C_R = S_R \Delta\nu_{ch} / (2A_{eff})$ – ВКР-усиление соседнего спектрального канала; $S_R = dg_R/d\nu$ – наклон спектра усиления; A_{eff} – площадь моды; α_c – затухание сигнала в оптическом волокне (в км^{-1}). Предполагается, что отношение частот сигналов в каналах $\nu_n/\nu_m \approx 1$ и учтено случайное изменение поляризации.

Общее решение системы уравнений (1) получено в работе [1]:

$$P_n(z) = \frac{P_n(0) P_t \exp(-\alpha_c z) \exp[C_R P_t (n-1) L_{eff}]}{\sum_{m=1}^M P_m(0) \exp[(m-1) C_R P_t L_{eff}]}, \quad (2)$$

где $P_t = \sum_{m=1}^M P_m(0)$ – суммарная мощность сигналов во всех спектральных каналах; $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_c L)]/\alpha_c$ – эффективная длина волокна; L – длина линии. Перейдя в (2) к логарифмическим единицам (дБ и дБм), получим

О.Е.Наний, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: nanii10@rambler.ru

Ю.А.Капин, А.Г.Новиков, В.Н.Павлов, А.Ю.Плоцкий, В.Н.Трещиков, ООО «Т8», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатерская, 44/1, офис 826; e-mail: info@t8.ru

Поступила в редакцию 3 апреля 2012 г., после доработки – 28 июня 2012 г.

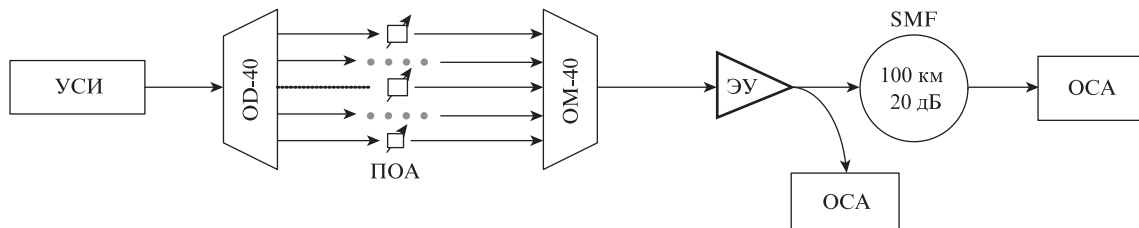


Рис.1. Схема экспериментальной установки для измерения ВКР-перекоса в оптических волокнах в DWDM-системе: УСИ – источник усиленного спонтанного излучения; OD-40 – 40-канальный демультиплексор; POA – переменные оптические аттенуаторы; OM-40 – 40-канальный мультиплексор; волокно SMF длиной 100 км с потерями 20 дБ; ЭУ – эрбиевый оптический усилитель; OCA – оптический спектроанализатор.

$$p_n(L) = p_n(0) - \alpha L + 10 \lg \frac{P_1}{\sum_{m=1}^M P_m(0) \exp[(m-1) C_R P_1 L_{\text{eff}}]} + (n-1) C_R P_1 L_{\text{eff}} (10 \lg e), \quad (3)$$

где $p_n = 10 \lg P_n$; $\alpha = 10 \alpha_c \lg(e) = 4.3 \alpha_c$ – потери сигнала (в дБ/км).

Определим величину ВКР-перекоса как разность между выходными мощностями (в дБ) крайних каналов: $\Delta p_{M,1} = p_M(L) - p_1(L)$, а приращение ВКР-перекоса – как разность между перекосами на выходе и входе линии: $\delta(\Delta p_{M,1}) = p_M(L) - p_1(L) - [p_M(0) - p_1(0)]$. Из формулы (3) можно получить простое выражение для приращения ВКР-перекоса:

$$\delta(\Delta p_{M,1}) = \chi_R \Delta \nu_{M,1} L_{\text{eff}} P_1, \quad (4)$$

где $\chi_R = 4.3 S_R / (2 A_{\text{eff}})$ – нелинейный параметр волокна, который можно назвать коэффициентом перекоса.

Из простой формулы (4) вытекают три важных следствия:

1. При сохранении суммарной мощности P_1 и частотного интервала $\Delta \nu_{M,1}$ между крайними каналами приращение перекоса не зависит от количества каналов.
2. Приращение перекоса (в дБ) линейно зависит от суммарной мощности (в Вт).
3. Приращение перекоса не зависит от начального перекоса спектра.

3. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Для моделирования многоканального DWDM-сигнала использовалось устройство, содержащее широкополосный источник усиленного спонтанного излучения (УСИ) и специальный модуль для формирования 40-канального сигнала с управляемыми мощностями каналов. Модуль для формирования такого сигнала содержит демультиплексор на 40 каналов (OD-40), 40 переменных оптических аттенуаторов (ПОА) и 40-канальный мультиплексор (OM-40). Данный модуль обеспечивал формирование сигнала DWDM с любым требуемым спектральным распределением мощностей сигналов в оптических каналах (с погрешностью не более 0.1 дБ) на длинах волн от 1529.55 до 1560.61 нм, соответствующих стандартной сетке частот с межканальным интервалом 100 ГГц. Эрбиевый усилитель (ЭУ) обеспечивал получение необходимого уровня мощности на входе волоконной линии.

Использовался также DWDM-сигнал, образованный мультиплексированием сигналов от серийных телекоммуникационных передатчиков разного типа.

4. Результаты экспериментальных исследований

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что спектр DWDM-сигнала на выходе участка линии на основе одномодового волоконного световода характеризуется линейной зависимостью мощности (в дБм) от длины волны. Для примера на рис.2 приведен спектр DWDM-сигнала на выходе участка компенсирующего дисперсию волокна (DCF). Аналогичный спектр получен на выходе стандартного телекоммуникационного волокна SMF. Характер выходного спектра (равномерный наклон) сохраняется и при наличии наклона (любого знака) спектра входного сигнала. Экспериментально показано, что выражение (4) для приращения нелинейного перекоса спектра выполняется в широких диапазонах суммарных мощностей DWDM-сигнала (от 0 до 20 дБм), перекосов спектра на входе в линию, изменений ширины спектра входного сигнала (от 0.1 до 4 ТГц), количества каналов (от 2 до 40), а также при использовании источников излучения разного типа (усиленное спонтанное излучение, излучение РОС-лазеров с прямой модуляцией тока, излучение РОС-лазеров с внешней модуляцией).

Графики зависимости перекоса от суммарной мощности P_1 при ширине спектра DWDM-сигнала 3.9 ТГц для двух типов волокна приведены на рис.3. Видно, что полный перекоп выходного спектра (в дБ) в SMF-волокне состоит из нелинейной части, зависящей от мощности (ВКР-перекоп), и линейной части, не зависящей от мощности:

$$\Delta p_{\text{out}} = p_{\text{max}} - p_{\text{min}} = \Delta p_{\text{lin}} + \Delta p_R = 0.55 + 11 P_1, \quad (5)$$

где Δp_R – нелинейный ВКР-перекоп и Δp_{lin} – линейный перекоп (при $p_{\text{in}} = 0$).

В волокнах SMF линейный перекоп вызван спектральной зависимостью оптических потерь. График такой зави-

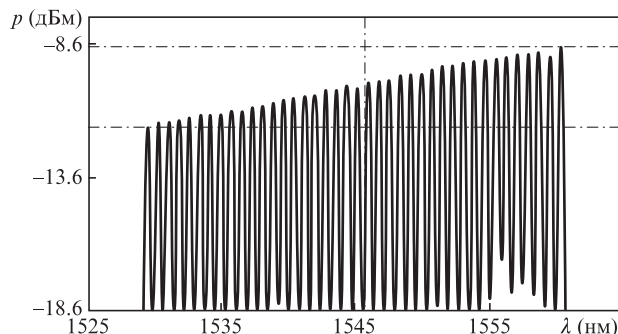


Рис.2. Спектр мощности DWDM-сигнала на выходе из линии на основе волокна DCF; суммарная мощность в линии 20 дБм.

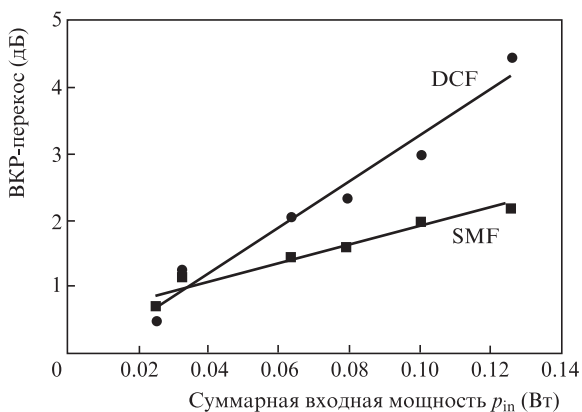


Рис.3. Зависимость ВКР-перекоса от суммарной входной мощности в линию P_{in} для участка волокна SMF длиной 100 км и участка волокна DCF, компенсирующего дисперсию 100-километрового участка SMF.

симости для волокна, использовавшегося в эксперименте, приведен на рис.4. В волокне DCF линейный перекос оказался пренебрежимо мал из-за относительно малой длины волокна (10.2 км) и малого полного затухания (6.2 дБ). Поэтому полный перекос в этом случае определяется нелинейным ВКР-перекосом:

$$\Delta p_{out} = 34.5 P_t \tag{6}$$

С помощью формулы (4) и экспериментальных зависимостей (5) и (6) были рассчитаны коэффициенты нелинейного перекоса (см. табл.1).

Для исследования накопления (прироста) перекоса спектра от пролета к пролету в многопролетной линии был проведен следующий эксперимент с использованием установки, представленной на рис.1. На вход участка волоконной линии, моделирующего второй пролет многопролетной линии связи, подавался DWDM-сигнал, спектр которого имитировал спектр усиленного DWDM-сигнала с выхода первого пролета. Измеренный на выходе участка, моделирующего второй пролет, спектр DWDM-сигнала использовался для моделирования сигнала на входе в третий пролет и т.д. Такой итерационный процесс повторялся до десяти раз, что позволило имитировать прохождение сигнала в многопролетной линии связи с числом

Табл.1. Коэффициенты ВКР-перекоса.

Волокно	χ_R (дБ·ТГц ⁻¹ ·Вт ⁻¹ ·км ⁻¹)	Эффективная длина (км)	Ширина спектра (ТГц)
SMF	0.145±0.02	19.5	3.9
DCF	1.1±0.1	8.1	3.9

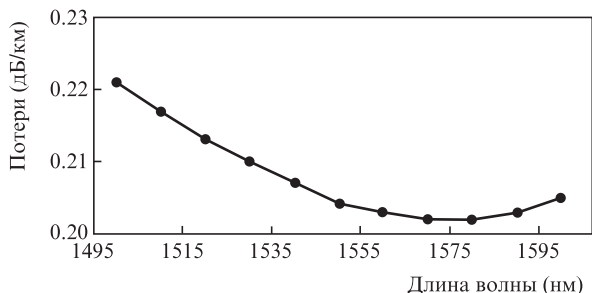


Рис.4. Зависимость оптических потерь от длины волны в исследованном телекоммуникационном волокне SMF.

пролетов до десяти и максимальной длиной 1000 км. Суммарная мощность DWDM-сигнала на входе линии поддерживалась постоянной. В пределах точности измерений прирост перекоса постояен и равен перекосу на 1-й итерации (в первом пролете). Это означает, что суммарный перекос в многопролетной линии растет пропорционально количеству пролетов N .

В эксперименте исследовался также прирост перекоса при входном сигнале, имеющем отрицательный наклон спектра мощности. Прирост перекоса при этом оказался таким же, как и в случае нулевого или положительного перекоса. Таким образом, экспериментально продемонстрирована независимость прироста перекоса от начального перекоса.

Экспериментальная установка позволила измерить перекос при изменении количества каналов путем соответствующей настройки переменных аттенуаторов ПОА. Экспериментально показано, что при сохранении частотного интервала между двумя крайними каналами (по которым и определяется перекос) зависимость перекоса $p_{max} - p_{min}$ (в дБ) от суммарной мощности P_t всех каналов (в Вт) близка к линейной и не зависит от числа каналов. Измерения проводились для 40, 20, 10 и 2 каналов.

Величина перекоса была также измерена в DWDM-сигнале, образованном мультиплексированием сигналов от транспондеров разного типа. Установлено, что при фиксированной полосе спектра и постоянной суммарной мощности DWDM-сигнала ВКР-перекос не зависит ни от числа каналов (40, 20, 10, 5), ни от типа источников излучения в канале (исследовались варианты с источником шума, транспондерами 2.5G и транспондерами 40G). Линейная зависимость перекоса (в дБ) от суммарной мощности (в Вт) экспериментально подтверждена для DWDM-сигналов с шириной спектра, изменяющейся от 0.3 до 4 ТГц.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтверждают высокую точность выполнения формулы (4). Отклонение от формулы (4) было экспериментально обнаружено только при измерении перекоса сигналов с сильно неоднородным спектром. Такой сигнал формировался тремя каналами с длинами волн 1561.42, 1549.32 и 1529.55 нм. Суммарная мощность в каналах поддерживалась постоянной (20 дБм). Мощности крайних каналов были равны, изменялась разность мощностей центрального и крайних каналов.

Зависимость перекоса от неоднородности спектра (разности мощностей в каналах) приведена на рис.5. Полученный результат можно объяснить тем, что реальный спектр

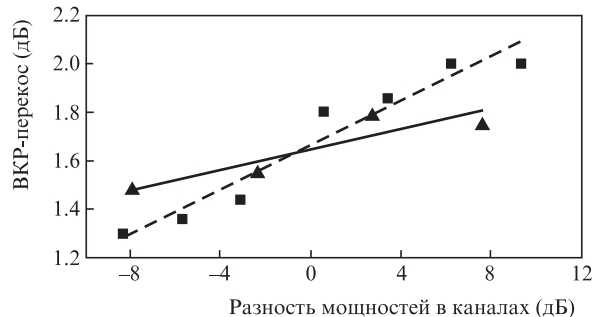


Рис.5. Зависимость ВКР-перекоса для участка волокна SMF длиной 100 км от неравномерности трехканального спектра мощности (разности между мощностью центрального канала и одного из крайних) при постоянной суммарной входной мощности в линию 20 дБм для каналов от источника шума (сплошная линия) и трех каналов транспондера 2.5G (штриховая линия).

отличается от линейной аппроксимации: отношение коэффициента усиления к отстройке частоты есть функция отстройки, причем это отношение для разности частот между средним и крайними каналами больше, чем для разности частот между крайними каналами.

Тем не менее, как следует из предыдущих разделов, линейная аппроксимация спектра усиления применима для анализа наклона спектра в большинстве практически важных для DWDM-систем связи случаев.

5. Выводы

В настоящей работе исследованы характеристики нелинейного ВКР-перекоса спектра мощности многоканального DWDM-сигнала в оптических линиях связи на основе одномодового волокна. Измерен коэффициент ВКР-перекоса в волокнах SMF и DCF.

Продемонстрирована независимость прироста перекоса от начального наклона спектра и пропорциональная зависимость величины суммарного перекоса в многопролетной линии от количества пролетов, ширины спектра и суммарной мощности.

Показано, что при фиксированной ширине спектра и суммарной мощности DWDM-сигнала ВКР-перекос не

зависит от числа каналов и типа источников излучения в канале.

Авторы благодарны В.Н.Листвину, А.И.Микилеву и Р.Р.Убайдуллаеву за стимулирующие дискуссии и полезные замечания и уточнения.

1. Christodoulides D.N., Jander R.B. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1722 (1996).
2. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communications Systems* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002).
3. Chraplyvy A.R. *Electron. Lett.*, **20**, 58 (1984).
4. Kamalov V., et al. *Proc. OFC'10* (Los Angeles, USA, 2010, NTuC2).
5. Наний О.Е., Трещиков В.Н. *Вестник связи*, №4, 52 (2011).
6. Гуркин Н.В. и др. *Электросвязь*, №1, 17 (2012).
7. Редюк А.А. и др. *Квантовая электроника*, **41**, 929 (2011).
8. Shaulov G., Mazurczyk V.J., Golovchenko E.A., *Techn. Dig. OFC Conf.* (Baltimore, 2000, paper TuA4).
9. Bigo S., Gauchard S., Bertain A., Hamaide J.-P. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 671 (1999).
10. Mazurczyk V.J., Shaulov G., Golovchenko E.A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 1573 (2000).
11. Казанцева Н.А., Наний О.Е. *Вестник Моск. ун-та. Сер. Физика. Астрономия*, **45** (5), 70 (2004).
12. Кобцев С.М., Пустовских А.А. *Квантовая электроника*, **34**, 1054 (2004).
13. Кобцев С.М., Пустовских А.А. *Квантовая электроника*, **34**, 575 (2004).