

**ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
НА КАЧЕСТВО КАНАЛОВ ВОСП СРК****ВПЛИВ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН
НА ЯКІСТЬ КАНАЛІВ ВОСП СРК****INFLUENCE OF OPTICAL FIBERS NONLINEAR DISTORTIONS ON A
CHANNELS QUALITY OF DWDM SYSTEM**

Аннотация. В статье решается задача оценки влияния фазовой самомодуляции и рамановского усиления оптического сигнала на качественные параметры волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов. В среде MatLab построена соответствующая имитационная модель, которая учитывает основные параметры системы передачи и среды распространения. Показано, что использование волокон с нормальной дисперсией с последующей ее компенсацией приводит к сокращению длительности импульсов приемного оптического сигнала и незначительному повышению Q-фактора.

Анотація. В статті вирішується задача оцінки впливу фазової самомодуляції та раманівського підсилення оптичного сигналу на якісні параметри волоконно-оптичної системи передавання зі спектральним розподілом каналів. У середовищі MatLab побудована відповідна імітаційна модель, яка враховує основні параметри системи передавання та середовища розповсюдження. Показано, що використання волокон з нормальною дисперсією з послідуною її компенсацією призводить до зменшення тривалості імпульсів приймального оптичного сигналу та незначного підвищення Q-фактора.

Summary. The problem of an influence estimation self-phase modulation and raman amplification of an optical signal at qualitative parameters optical fiber communication system with spectral channel multiplexing is considered in this article. The corresponding simulation model of such system is constructed in the MatLab environment and it is to allow for basic parameters of this system. Application of fibers with normal dispersion with its subsequent compensation leads to reduction of pulses duration of the received optical signal and corresponding increasing of Q-factor is shown in the article.

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) со спектральным разделением каналов (СРК) являются основной транспортной технологией сетей следующего поколения. Широкому распространению данной технологии на транспортных сетях операторов связи в середине 90-х годов прошлого столетия способствовало появление эрбиевых оптических усилителей [1]. В последние несколько лет также начали применяться рамановские усилители, которые позволяют значительно повысить качество передачи оптического сигнала и увеличить длину оптической секции [2]. При этом также возрастают и нелинейные искажения передаваемого оптического сигнала (в частности, фазовая самомодуляция) [3]. Поэтому проблема возрастания фазовой самомодуляции при использовании рамановских усилителей является актуальной. В статье [4] проводилось исследование влияния указанного нелинейного эффекта на качество оптических каналов с учетом только эрбиевых усилителей. Решению указанной проблемы и посвящена данная статья, которая является дополнением к предыдущей работе автора [4] и учитывает эффект рамановского усиления в ОВ.

Поэтому целью данной статьи является оценка влияния рамановского усиления и фазовой самомодуляции оптического сигнала на параметры качества оптических каналов ВОСП СРК.

Решение поставленной задачи выполнялось путем имитационного моделирования одного канала ВОСП СРК в среде MatLab. Функциональная схема модели (рис. 1) содержит канальный оптический передатчик и приемник, а также $N_{\text{секц}}$ одинаковых оптических секций. Каждая секция включает компенсатор дисперсии (КД), эрбиевый волоконно-оптический усилитель и предшествующий им распределенный рамановский усилитель.

Последний включает среду распространения (оптическое волокно) длиной $L_{ов}$, два оптических разветвителя, а также два лазера накачки (ЛН) с мощностями сигналов $P_{н1}$ и $P_{н2}$. Реализация оптического передатчика и приемника детально описана в предыдущей работе [4], поэтому ниже рассмотрена только реализация функциональных блоков оптической секции.

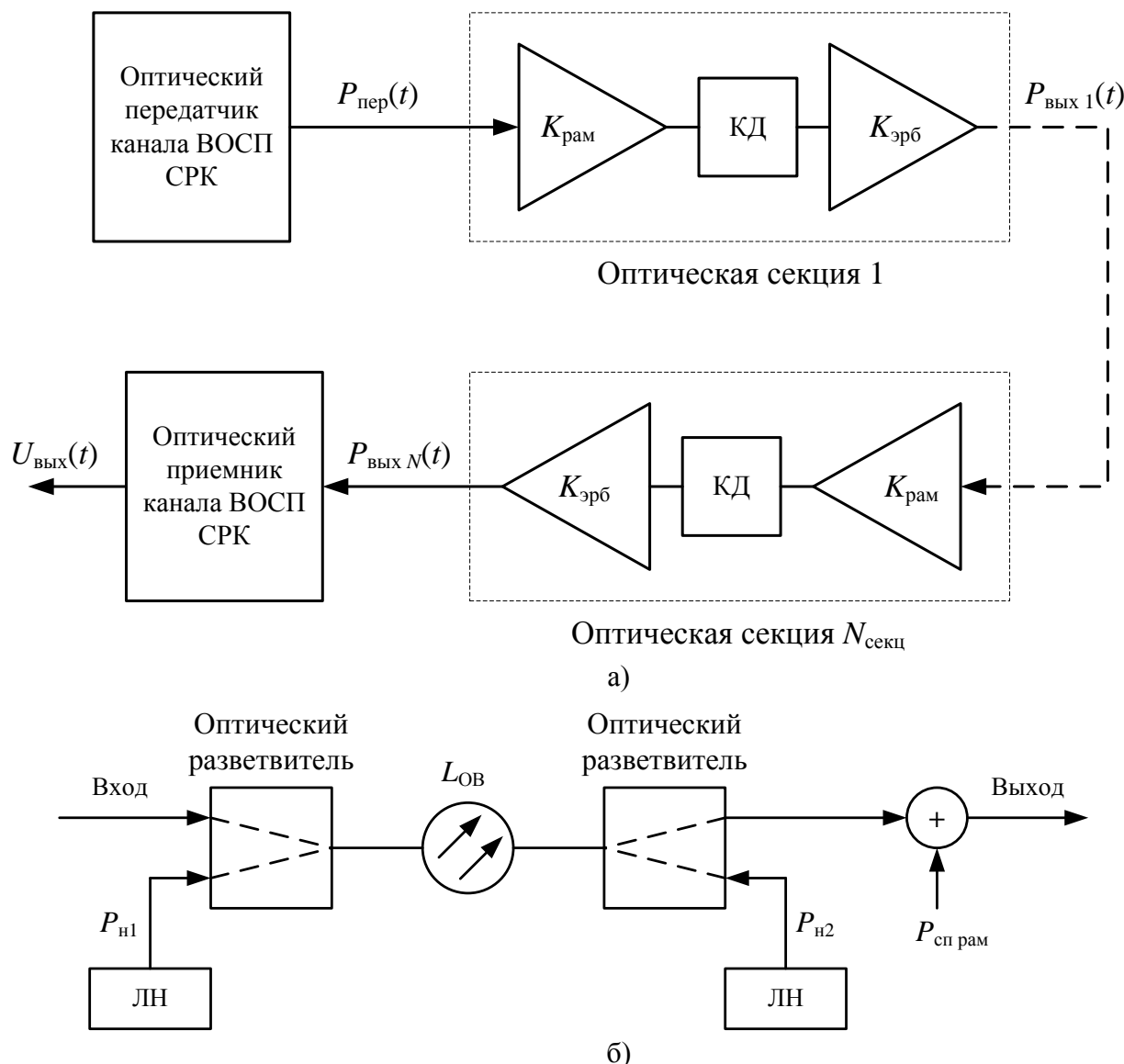


Рисунок 1 – Имитационная модель канала ВОСП СРК:
 а) общая функциональная схема модели;
 б) функциональная схема рамановского усилителя

Основой модели среды распространения является известное уравнение Шредингера [3]. Его решение, которое позволяет рассчитать мощность выходного сигнала с учетом эффектов рамановского рассеяния и затухания имеет вид [5]:

$$P(z_2) = P(z_1) \exp \left(g_r \int_{z_1}^{z_2} \left(P_{н1} e^{-\alpha_n z} + P_{н2} e^{-\alpha_n (L_{ов} - z)} \right) dz - \alpha_c (z_2 - z_1) \right), \quad (1)$$

где $P(z_1)$ и $P(z_2)$ – соответственно мощность оптического сигнала на расстоянии z_1 и z_2 от точки ввода в волокно ($0 \leq z_1 < z_2 \leq L_{ов}$); g_r – коэффициент рамановского усиления

волокна; α_n и α_c – затухание волокна на длине волны накачки и оптического сигнала соответственно.

Разделив обе части уравнения (1) на $P(z_1)$, получаем выражение для расчета коэффициента усиления рамановского усилителя:

$$K_{\text{рам}}(z_1, z_2) = \frac{P(z_2)}{P(z_1)} = \exp \left(g_r \int_{z_1}^{z_2} \left(P_{n1} e^{-\alpha_n z} + P_{n2} e^{-\alpha_n (L_{\text{ов}} - z)} \right) dz - \alpha_c (z_2 - z_1) \right). \quad (2)$$

Имитационное моделирование оптического волокна выполнялось Фурье-методом расщепления по физическим факторам [3]. Соответствующие выражения работы [4] после дополнения рамановским коэффициентом усиления волокна принимают следующий вид [5]:

$$A \left(z + \frac{1}{2} \Delta z, t \right) = \text{ifft} \left[\text{fft} \left(A(z, t) \right) K_{\text{рам}} \left(z, z + \frac{1}{2} \Delta z \right) e^{j\beta_2 \omega^2 \Delta z / 4} \right], \quad (3)$$

$$A \left(z + \frac{1}{2} \Delta z, t \right) = A \left(z + \frac{1}{2} \Delta z, t \right) e^{j\gamma \left| A \left(z + \frac{1}{2} \Delta z, t \right) \right|^2 \Delta z}, \quad (4)$$

$$A \left(z + \Delta z, t \right) = \text{ifft} \left[\text{fft} \left(A \left(z + \frac{1}{2} \Delta z, t \right) \right) K_{\text{рам}} \left(z + \frac{1}{2} \Delta z, z + \Delta z \right) e^{j\beta_2 \omega^2 \Delta z / 4} \right], \quad (5)$$

где $A(z, t)$ и $A(z + \Delta z, t)$ – напряженность электрического поля оптического сигнала на входе и выходе условного отрезка волокна; γ – коэффициент нелинейности ОВ; $\text{fft}()$ и $\text{ifft}()$ – соответственно операторы прямого и обратного преобразования Фурье.

Мощность усиленного спонтанного излучения на выходе рамановского усилителя рассчитывалась по формуле [6]

$$P_{\text{сп рам}} = K_{\text{рам}} \int_{z=0}^{L_{\text{ов}}} \frac{(1 + \eta_T) h \nu_c B_0 g_r P_n(z)}{G_{\text{рам}}(0, z)} dz, \quad (6)$$

где η_T – тепловое возбуждение; h – постоянная Планка; ν_c – частота оптического сигнала; B_0 – полоса пропускания полосового фильтра демультиплексора ВОСП СРК; $P_n(z)$ – суммарная мощность излучения лазеров накачки на расстоянии z от точки ввода информационного сигнала в ОВ.

Вследствие идентичности всех оптических секций необходимо обеспечивать равенство мощностей на входе и выходе оптических секций. Этого можно добиться путем выполнения условия $K_{\text{рам}}(0, L_{\text{ов}}) K_{\text{эрб}} = 1$. В данной статье исследуется влияние величины рамановского усиления на нелинейные искажения оптического сигнала, поэтому по заданной величине усиления эрбиевого усилителя $K_{\text{эрб}}$ определялась необходимая величина рамановского усиления:

$$K_{\text{рам}}(0, L_{\text{ов}}) = \frac{1}{K_{\text{эрб}}}. \quad (7)$$

Коэффициент усиления $K_{\text{рам}}(z_1, z_2)$ в (2) зависит от мощности лазеров накачки, поэтому необходимо получить выражение для расчета P_{n1} и P_{n2} . Для этого проинтегрируем (2) ($z_1 = 0$ и $z_2 = L_{\text{ов}}$):

$$K_{\text{рам}}(0, L_{\text{ов}}) = \exp \left(\frac{g_r}{\alpha_n} \left(P_{n1} + P_{n2} \right) e^{-\alpha_n L_{\text{ов}}} - \alpha_c L_{\text{ов}} \right). \quad (8)$$

Из данного выражения получаем формулу для расчета необходимой суммы мощностей лазеров накачки:

$$P_{n1} + P_{n2} = \frac{\alpha_n \left(K_{\text{рам}}(0, L_{\text{ов}}) + \alpha_c L_{\text{ов}} \right)}{g_r e^{-\alpha_n L_{\text{ов}}}}. \quad (9)$$

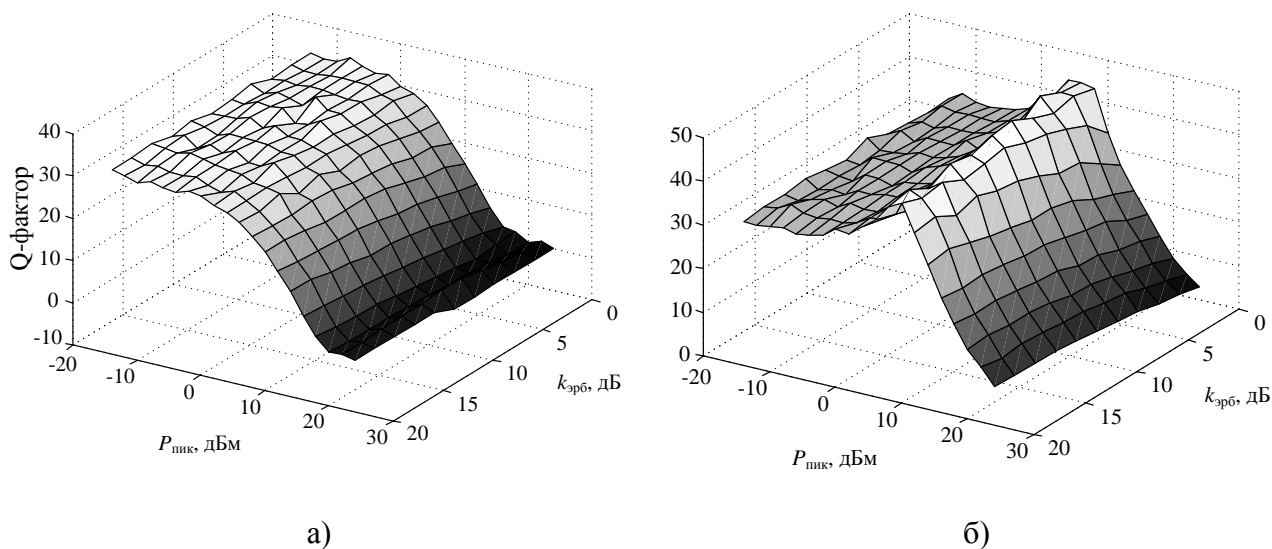
Известно [5], что ввод излучения лазера накачки попутно с информационным оптическим сигналом приводит к значительным нелинейным искажениям последнего. Поэтому во всех исследованиях данной статьи $P_{н1} = 0$. Перед моделированием по заданной величине усиления эрбиевого усилителя $K_{эrb}$ рассчитывалась мощность лазера накачки $P_{н2}$ согласно выражению (9). Параметры всех функциональных блоков модели приведены в табл. 1. Модель среды распространения построена согласно параметрам оптического волокна TrueWave REACH Low Water Peak [7]. Длины волн лазера накачки и информационного сигнала равны 1430 нм и 1550 нм соответственно. Модель компенсатора дисперсии аналогична модели ОВ, однако хроматическая дисперсия бралась с противоположным знаком (-6,525 пс/(нм·км)), а все остальные параметры (коэффициент затухания на всех длинах волн и коэффициент нелинейности) равны нулю.

Таблица 1 – Параметры модели ВОСП СРК

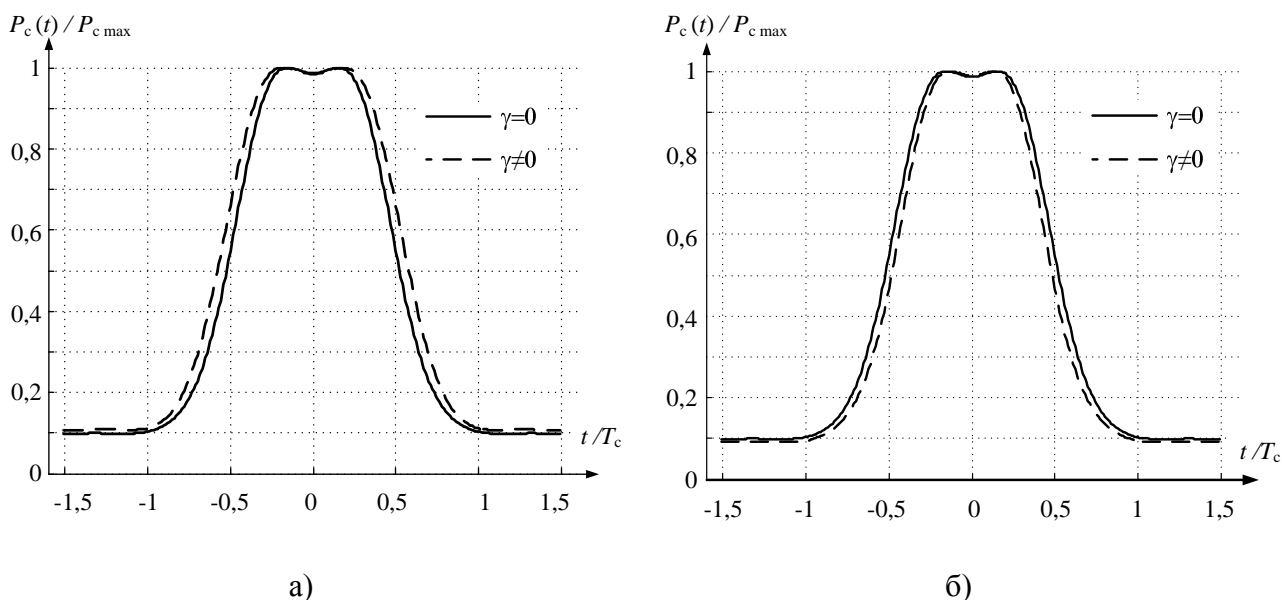
Функциональный блок	Параметр	Значение
Передачик	скорость информационного сигнала V	10 Гбит/с
	число передаваемых информационных символов $N_{\text{симв}}$	1000
	длительность фронта оптического импульса (изменение мощности от 20% до 80% пикового значения) $t_{\text{фр}}$	35 пс
	коэффициент гашения лазера	10 дБ
	длина волны излучения	1550 нм
Оптическое волокно	длина $L_{\text{ов}}$	100 км
	число элементарных отрезков при использовании Фурье-метода расщепления по физическим факторам	100
	коэффициент затухания на длине волны 1430 нм	0,287 дБ/км
	коэффициент затухания на длине волны 1550 нм	0,207 дБ/км
	хроматическая дисперсии на длине волны 1550 нм	6,525 пс/(нм·км)
	эффективная площадь	55 мкм ²
	коэффициент нелинейности	1,98 1/(Вт·км)
Эрбиевый усилитель	шум-фактор	6 дБ
Оптический приемник	полоса пропускания полосового оптического фильтра	66 ГГц
	токовая чувствительность фотоприемника	0,8 А/Вт
	тип трансимпедансного усилителя	ADN2820

Качество оптического канала оценивалось величиной Q -фактора приемного сигнала, который вычислялся по методике, описанной в предыдущей работе [4]. Зависимость качества канала от усиления эрбиевого усилителя и пиковой мощности сигнала передатчика $P_{\text{пик}}$ показана на рис. 2. Данный рисунок показывает, что увеличение мощности оптического сигнала приводит к монотонному уменьшению Q -фактора в случае использования волокна с аномальной дисперсией. В случае использования волокна с нормальной дисперсией наблюдается экстремум Q -фактора при уровне мощности сигнала порядка 5 дБм. Такой характер зависимостей можно объяснить тем, что в данной модели ВОСП на Q -фактор оказывают влияние дисперсия и нелинейные искажения волокна. Эксперименты показали,

что усиленное спонтанное излучение рамановского и эрбиевого усилителей на фоне межсимвольной интерференции (МСИ) трансимпедансного усилителя не оказывают влияния на качество оптического канала. Пояснить сложившуюся ситуацию можно при помощи рис. 3, на котором изображена форма сигнала на выходе оптического фильтра при наличии и отсутствии нелинейных искажений. В волокне с аномальной дисперсией наблюдается увеличение длительности импульса, а в волокне с нормальной дисперсией – уменьшение длительности. Уменьшение длительности фронтов импульсов приводит к уменьшению межсимвольной интерференции, что и повышает Q -фактор в последнем случае.



а) б)
 Рисунок 2 – Q -фактор оптического сигнала:
 а) при аномальной дисперсии ($\beta_2 = -8,31 \text{ пс}^2/\text{км}$);
 б) при нормальной дисперсии ($\beta_2 = 8,31 \text{ пс}^2/\text{км}$)



а) б)
 Рисунок 3 – Форма сигнала на выходе оптического фильтра при $P_{\text{пик}} = 10 \text{ дБм}$:
 а) при аномальной дисперсии ($\beta_2 = -8,31 \text{ пс}^2/\text{км}$);
 б) при нормальной дисперсии ($\beta_2 = 8,31 \text{ пс}^2/\text{км}$)

В заключение следует отметить, что поставленная в статье задача оценки влияния рамановского усиления и фазовой самомодуляции оптического сигнала на параметры качества оптических каналов ВОСП СРК выполнена. Моделирование в среде MatLab

показало, что введение в волокно рамановского усиления не приводит к существенному изменению Q -фактора оптического сигнала. Также было установлено, что в волокнах с нормальной дисперсией наблюдается небольшой экстремум Q -фактора при уровне мощности сигнала 5 дБм. В волокнах с аномальной дисперсией указанного экстремума не наблюдается.

В дальнейших исследованиях по данному направлению целесообразно превратить данную модель в многоканальную и учесть в ней эффект четырехволнового смешения.

Литература

1. *Becker P.C.* Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology / P.C. Becker. – Academic Press, 1999. - 460 p.
2. *Mohammad N.I.* Raman Amplifiers for Telecommunications 1: Physical Principles / N.I. Mohammad. – Springer, 2003. -298 p.
3. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г.; пер. с англ. С.В. Черникова, И.Ю. Хрущева, Д.В. Коробкина. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
4. *Педяш В.В.* Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 109-114.
5. *Agrawal G.* Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems / G. Agrawal G., C. Headley. – Academic Press, 2004. – 392 p.
6. *Kaminow I.P.* Optical Fiber Telecommunications IV-A: Components / Kaminow I.P., Li T. – Academic Press, 2002. – 876 p.
7. TrueWave REACH Fiber Low Water Peak [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.optimal.com.au/technical_pdfs/TrueWaveREACHFiber-124.pdf. Заголовок з екрана.