

Нелинейные эффекты при передаче оптического сигнала в многомодовом волокне в режиме слабой связи мод

О.С.Сидельников, А.А.Редюк

Представлены результаты численного моделирования нелинейного распространения оптического сигнала по многомодовому волокну с градиентным и ступенчатым профилями показателя преломления в режиме слабой связи мод. Установлено, что для градиентного волокна при распространении сигналов в разных модах параметр качества системы Q -фактор растет с увеличением числа используемых мод. Продемонстрировано ухудшение качества передаваемых данных при увеличении числа задействованных мод в случае, когда сигналы в разных модах движутся с одинаковой скоростью. Показано, что при использовании «ступенчатого» волокна качество сигнала может значительно ухудшиться, что обусловлено наличием моды с малым дисперсионным параметром.

Ключевые слова: многомодовое оптическое волокно, нелинейные эффекты, режим слабой связи мод, численное моделирование.

1. Введение

На сегодняшний день волоконно-оптические линии связи являются самыми эффективными решениями для передачи больших объемов данных на дальние расстояния. Экспоненциально растущий спрос на пропускную способность линий связи является движущей силой для проведения новых исследований в области мощных оптических систем передачи данных. Однако пропускная способность систем связи, использующих распространенное стандартное одномодовое волокно (SSMF), уже приближается к своему пределу ввиду ограниченности рабочего диапазона волоконных усилителей, высоких требований к отношению сигнал/шум, ограничений на мощность сигнала, вводимого в оптоволокно [1]. В настоящее время ежегодный рост трафика уже превышает рост совокупной пропускной способности линий связи, и для преодоления этой тенденции необходимо разрабатывать новые технологии передачи данных.

Разработка систем связи, основанных на многомодовых волокнах (MMF), рассматривается в качестве перспективного пути для решения данной проблемы [2]. Многомодовые волокна позволяют значительно увеличить пропускную способность оптических сетей за счет одновременной передачи сигналов по разным модам волокна. Однако при одновременном использовании нескольких мод возникают новые эффекты, влияющие на передаваемые сигналы, такие как линейная связь мод [3], дифференциальная групповая задержка [4] и нелинейные межмодовые эффекты [5]. Для успешного использования многомодовых волокон в качестве среды, позволяющей

увеличить скорость передачи данных, необходимо изучить воздействие каждого из этих эффектов.

На данный момент уже представлены результаты лабораторных экспериментов по передаче данных по многомодовому волокну длиной 177 км, поддерживающему распространение шести мод [6]. Суммарная пропускная способность линии составила 24.6 Тбит/с при спектральной эффективности $32 \text{ бит} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$. Кроме того, была продемонстрирована возможность изготовления волокон с поддержкой 15 мод, распространяющихся одновременно [7]. Поэтому уже на данном этапе исследований необходимо уметь оценивать влияние нелинейных межмодовых эффектов на качество передаваемых сигналов в зависимости от количества используемых мод. В работе [8] исследовано влияние нелинейных эффектов на распространение сигнала в многомодовых волокнах в режиме сильной связи мод. Однако модель сильной связи не подходит для описания нелинейного распространения в протяженных системах передачи данных на основе многомодовых волокон. В настоящей работе мы рассматриваем режим слабой связи мод, который в последнее время широко применяется при моделировании многомодовых линий дальней связи [9].

В работе представлены результаты исследования влияния нелинейных эффектов на качество передаваемых сигналов в зависимости от числа используемых мод. Рассмотрены случаи распространения сигналов в разных модах как с различными, так и с одинаковыми скоростями.

2. Математическая модель

Целью настоящей работы является установление закономерностей и оценка влияния нелинейных эффектов в многомодовых линиях передачи данных в режиме слабой связи мод. Для этого использовалась система связи, схематически изображенная на рис.1. Каждый передатчик генерирует сигналы 16-QAM с символьной скоростью $R_s = 28.5 \text{ Гбод}$, что с учетом затрат на схемы коррекции ошибок FEC (14%) дает битовую скорость в каждой моде 100 Гбит/с. 16-QAM (16-уровневая квадратурная модуля-

О.С.Сидельников, А.А.Редюк. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6; e-mail: alexey.redyuk@gmail.com, o.s.sidelnikov@gmail.com

Поступила в редакцию 23 ноября 2016 г., после доработки – 6 февраля 2017 г.

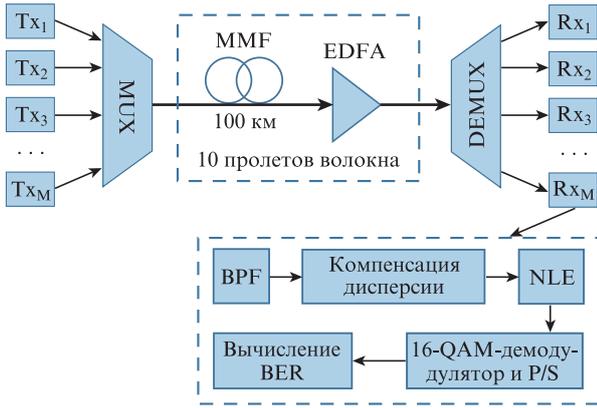


Рис.1. Схема исследуемой линии: Tx – передатчик сигнала для одной моды; MUX – модовый мультиплексор; EDFA – эрбиевый усилитель; DEMUX – модовый демultipлексор; Rx – приемник сигнала для одной моды; BPF – полосовой фильтр; NLE – компенсация нелинейных эффектов.

ция) – разновидность амплитудной модуляции сигнала, в которой несущая волна разделена на две несущие одинаковой частоты, сдвинутые относительно друг друга на 90°, и каждая из них промодулирована по одному из четырех дискретных уровней амплитуды. Таким образом, один 16-QAM-символ передает 4 бита информации. Для формирования профиля импульсов используется фильтр с характеристикой типа «приподнятый косинус» с коэффициентом сглаживания 0.2. Линия передачи состоит из 10 пролетов многомодового волокна MMF по 100 км каждый. В конце каждого пролета затухание сигнала точно компенсируется с помощью эрбиевых оптических усилителей EDFA с фактором шума усилителя $NF = 4.5$. Шум, соответствующий усиленному спонтанному излучению усилителей, добавляется к оптическому сигналу после каждого пролета. Хроматическая дисперсия и дифференциальные групповые задержки точно компенсируются в цифровом виде при прохождении оптического сигнала через приемник Rx. Для компенсации нелинейных эффектов для каждой принятой моды используется процедура, основанная на методе опорных векторов (SVM) [10]. Для оценки качества передачи данных вычисляется Q-фактор, усредненный по всем модам, который связан с коэффициентом битовых ошибок (BER) следующим образом:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right),$$

где BER – отношение числа ошибочно принятых битов к общему числу переданных битов. Таким образом, Q-фактор является показателем качества передаваемого сигнала в каждой моде, при этом чем выше значение Q-фактора, тем меньше возникает ошибок при передаче данных.

Влияние нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах исследуется в зависимости от числа используемых мод в режиме слабой связи. Этот режим характеризуется тем, что линейная связь между различными пространственными модами мала по сравнению со связью между двумя поляризационными компонентами одной пространственной моды (в режиме сильной связи оба типа связи являются величинами одного порядка). В этом случае нелинейное распространение сигнала вдоль одной моды многомодо-

вого волокна описывается следующим уравнением Манакова [11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{A}_p}{\partial z} + \langle \delta \beta_{0p} \rangle \bar{A}_p + \langle \delta \beta_{1p} \rangle \frac{\partial \bar{A}_p}{\partial t} + i \frac{\beta_{2p}}{2} \frac{\partial^2 \bar{A}_p}{\partial t^2} \\ = i \gamma \left(f_{pppp} \frac{8}{9} |\bar{A}_p|^2 + \sum_{m \neq p} f_{mmp} \frac{4}{3} |\bar{A}_m|^2 \right) \bar{A}_p, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\langle \delta \beta_{0p} \rangle = \frac{1}{2} (\beta_{px} + \beta_{py}) - \beta_g,$$

$$\langle \delta \beta_{1p} \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \beta_{px}}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} + \frac{\partial \beta_{py}}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} \right) - \frac{1}{v_g}.$$

Здесь $\beta_{0p}, \beta_{1p}, \beta_{2p}$ – постоянная распространения, обратная групповая скорость и дисперсия групповой скорости пространственной p -й моды соответственно; β_g и v_g – постоянная распространения и групповая скорость фундаментальной моды; $\gamma = \omega_0 n_2 / (c A_{\text{eff}})$ – нелинейный параметр, где n_2 – нелинейный показатель преломления стекла и A_{eff} – эффективная площадь фундаментальной моды на центральной частоте ω_0 ; f_{mmp} – коэффициент нелинейной связи между пространственными модами, который имеет следующий вид:

$$f_{mmp} = \frac{A_{\text{eff}}}{\sqrt{I_l I_m I_n I_p}} \iint F_l F_m F_n F_p dx dy, \quad (2)$$

где F_p – пространственное распределение моды p ; $I_p = (\bar{n}_p / \bar{n}_{\text{eff}}) \iint |F_p|^2(x, y) dx dy$; \bar{n}_{eff} и n_p – эффективный показатель преломления фундаментальной моды и моды p соответственно.

Используемый в работе метод SVM аналогичен методу, представленному в статье [10], где используется модель с многоклассовой классификацией, способная распознать различные 16-QAM-символы. Для построения нелинейных разделителей классов в качестве ядра используется радиальная базисная функция с параметром $\gamma_{\text{SVM}} > 0$. Для метода SVM также использовалась кросс-валидация для нахождения лучших γ_{SVM} и параметра регуляризации C . Затем с помощью этих параметров SVM-детектор обучается на основе данных о принятых 2^{12} 16-QAM-символах. После обучения такой SVM-детектор используется в численных экспериментах для распознавания принятого сигнала.

3. Результаты численного моделирования

Для численного решения уравнения Манакова (1) использовался симметричный вариант метода расщепления по физическим процессам, который имеет второй порядок точности по шагу h эволюционной переменной z . Уравнения распространения для каждой из мод решались численно с шагом 100 м. В ходе расчетов было проверено, что при дальнейшем уменьшении численного шага результаты не изменялись.

В качестве канала для передачи сигнала использовалось многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления (показатель градиентности профиля $\alpha_{\text{gr}} = 2$) с «траншеей» в оболочке (GCCT). Данное волокно в настоящее время применяется для уменьшения дифференциальной модовой задержки при распростра-

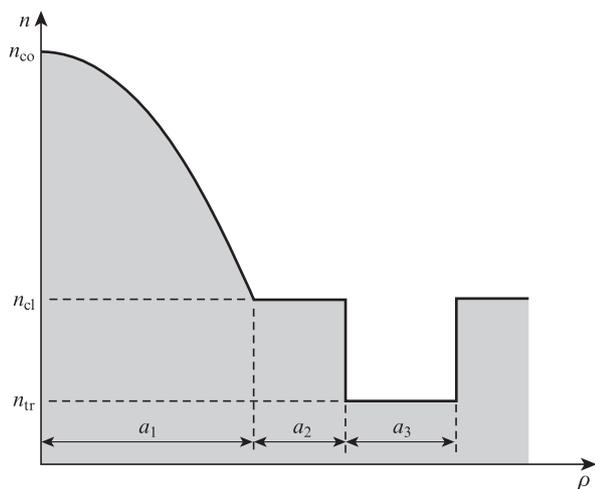


Рис.2. Профиль показателя преломления волокна GCCT.

нении нескольких мод, что необходимо для уменьшения сложности ММО-приемников [12]. Профиль показателя преломления волокна GCCT представлен на рис.2 и аналитически описывается как

$$n(\rho) = \begin{cases} n(0)[1 - \Delta n_{co}(\rho/a_1)^{\alpha_{gr}}], & |\rho| < a_1, \\ n_{cl}, & a_1 < |\rho| < a_1 + a_2, \\ n_{tr}, & a_1 + a_2 < |\rho| < a_1 + a_2 + a_3, \\ n_{cl}, & |\rho| > a_1 + a_2 + a_3. \end{cases}$$

Для численных экспериментов использовались следующие параметры профиля волокна: показатели преломления сердцевины и оболочки $n_{co} = 1.4559$ и $n_{cl} = 1.444$ соответственно, $a_1 = 15$ мкм, $a_2 = 1$ мкм, показатель преломления «траншеи» $n_{tr} = 1.44$, $a_3 = 4$ мкм [13]. Такое волокно поддерживает распространение девяти пространственных мод без учета вырожденных (LP₀₁, LP₁₁, LP₀₂, LP₂₁, LP₁₂, LP₃₁, LP₂₂, LP₄₁, LP₀₃).

При моделировании распространения сигналов учитывалось, что потери волокна $\alpha = 0.2$ дБ/км, нелинейность волокна $\gamma = 1.4$ Вт⁻¹·км⁻¹, несущая длина волны одноканального сигнала $\lambda = 1550$ нм, количество отсчетов на каждый символ $q = 16$, общее число символов $N_s = 2^{18}$. Значения дифференциальной модовой задержки (DMD), дисперсии (D) и эффективной площади моды для каждой моды представлены в табл.1. Коэффициенты нелинейной связи между всеми пространственными модами приведены в табл.2, нижняя часть которой не заполнена на основании того, что $f_{mnp} = f_{pnm}$.

На рис.3,а изображена зависимость Q -фактора на приемнике, усредненного по всем используемым модам, от

Табл.1. Дифференциальная модовая задержка, дисперсия и эффективная площадь моды для волокна GCCT.

Мода	DMD (пс/км)	D (пс/(км·нм))	A_{eff} (мкм ²)
LP ₀₁	0	20.2	129.9
LP ₁₁	19.6	20.4	168.7
LP ₀₂	35.4	20.5	250.4
LP ₂₁	42.6	20.6	224.5
LP ₁₂	26.5	20.5	270.7
LP ₃₁	59.4	20.6	269.2
LP ₂₂	-111.3	19.2	341.9
LP ₄₁	38.7	20.5	308.6
LP ₀₃	-187.7	18.4	364

Табл.2. Коэффициенты нелинейной связи между пространственными модами для волокна GCCT.

Мода	LP ₀₁	LP ₁₁	LP ₀₂	LP ₂₁	LP ₁₂	LP ₃₁	LP ₂₂	LP ₄₁	LP ₀₃
LP ₀₁	1	0.4976	0.5094	0.2483	0.3736	0.1238	0.2462	0.0616	0.3847
LP ₁₁		0.7547	0.2508	0.3780	0.3770	0.2519	0.2492	0.1569	0.1862
LP ₀₂			0.5110	0.2511	0.2520	0.2513	0.1250	0.2194	0.3240
LP ₂₁				0.5692	0.1897	0.3166	0.2817	0.2369	0.1551
LP ₁₂					0.4734	0.1908	0.2201	0.1988	0.1729
LP ₃₁						0.4759	0.1578	0.2774	0.1404
LP ₂₂							0.3757	0.1589	0.1865
LP ₄₁								0.4164	0.1411
LP ₀₃									0.3542

начальной мощности сигнала в одной моде при распространении сигналов по волокну GCCT по одной, двум, трем, шести или девяти модам. Из рисунка видно, что с ростом числа мод качество передаваемого сигнала повышается, достигая разницы 1 дБ для случаев с одной и девятью модами.

Для объяснения полученного эффекта рассмотрим рис.3,б, на котором изображен Q -фактор только для моды

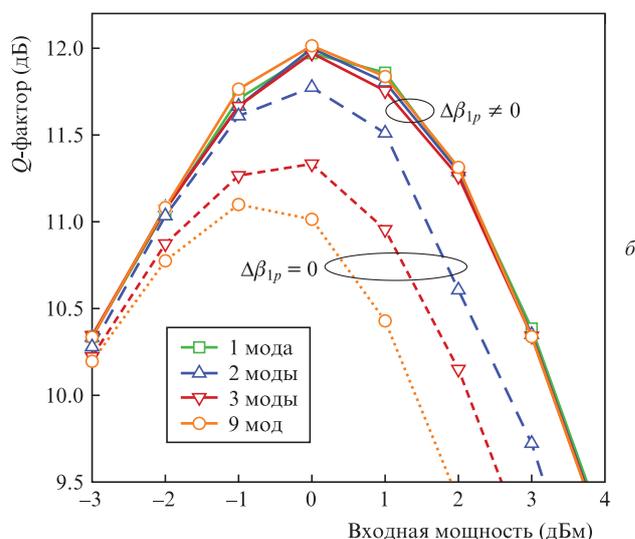
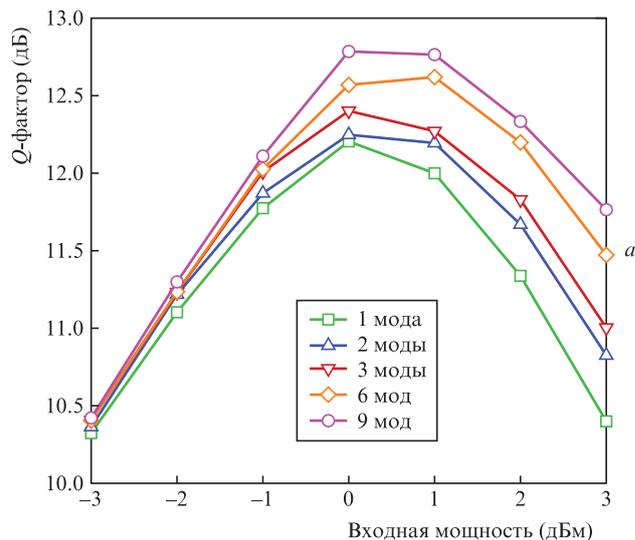


Рис.3. Зависимость Q -фактора, усредненного по всем модам (а) и вычисленного только для моды LP₀₁ (б), от начальной мощности сигнала для GCCT-волокна.

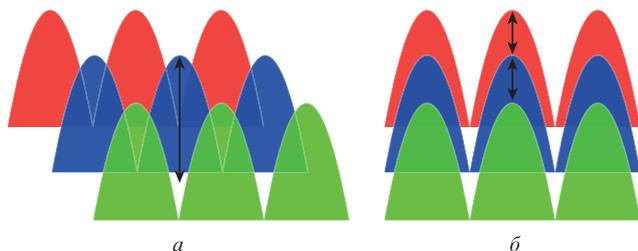


Рис.4. Распространение различных мод в многомодовом волокне с разными (а) и с одинаковыми (б) скоростями.

LP₀₁ как функция от начальной мощности сигнала при передаче данных по одной, двум, трем и девяти модам. В данном случае при всех расчетах вычислялось не среднее значение *Q* по всем модам, а лишь его значение для моды LP₀₁. Как видно из рисунка, если групповые скорости всех мод разные (сплошные линии, Δβ_{1p} ≠ 0), значение *Q*-фактора для моды LP₀₁ практически не меняется при добавлении новых мод. Это объясняется тем, что для используемого волокна сигналы в модах распространяются с немного различающимися скоростями, поэтому импульсы в разных модах движутся относительно друг друга и нелинейное межмодовое взаимодействие между ними практически не оказывает влияния на качество передаваемого сигнала в моде LP₀₁ даже при увеличении числа используемых мод. Иллюстрация данного эффекта приведена на рис.4,а. Если же все моды движутся с одинаковой скоростью (пунктирные линии, Δβ_{1p} = 0), то сигнал для моды LP₀₁ при добавлении новых мод значительно ухудшается, что обусловлено дополнительным нелинейным межмодовым взаимодействием (рис.4,б).

В ходе исследования было проверено, что данное наблюдение выполняется для каждой из распространяющихся мод. Таким образом, нелинейные искажения сигнала в каждой моде обусловлены только первым членом правой части уравнения (1), перед которым стоит коэффициент *f_{pppp}*. Однако, как видно из табл.2, с ростом порядка моды эти коэффициенты уменьшаются. Следовательно, каждый раз при добавлении новой моды более высокого порядка она испытывает меньшее нелинейное искажение и значение ее *Q*-фактора будет выше, чем у предыдущих мод. Поэтому усредненное по всем модам значение *Q*-фактора растет с увеличением числа задействованных мод, что видно из рис.3,а.

На рис.5 изображена зависимость *Q*-фактора, усредненного по всем используемым модам, от начальной мощности сигнала при его распространении по многомодовому волокну GCCT по одной, двум, трем, шести или девяти модам в случае, когда сигналы в разных модах движутся с одной скоростью (Δβ_{1p} = 0). Видно, что с ростом числа используемых мод до трех значение *Q*-фактора ожидаемо уменьшается (см. рис.3,б), так как все моды подвержены более сильному влиянию межмодовой нелинейности. Однако при дальнейшем увеличении числа мод *Q*-фактор незначительно возрастает, так как для мод более высокого порядка нелинейные коэффициенты *f_{mmp}*, отвечающие за межмодовое взаимодействие, и *f_{pppp}* малы, и моды меньше подвержены влиянию нелинейных эффектов. Стоит отметить, что уже при использовании пяти мод добавление каждой следующей моды практически не влияет на результат.

В работе также исследовалось волокно со ступенчатым профилем показателя преломления с параметрами

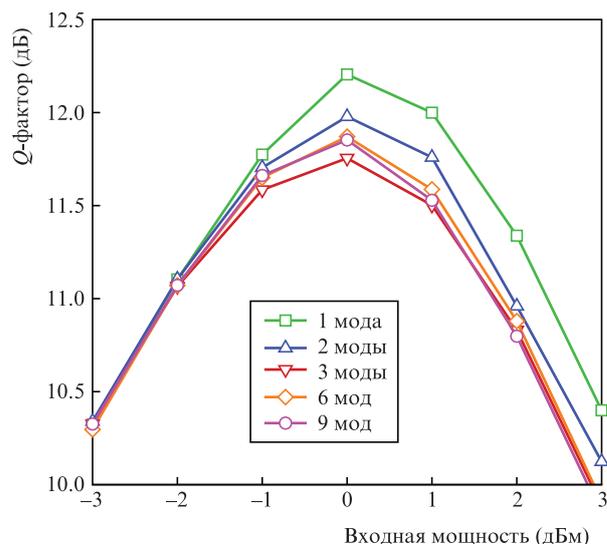


Рис.5. Зависимость *Q*-фактора от начальной мощности сигнала для GCCT-волокна при Δβ_{1p} = 0.

n_{co} = 1.454, *n_{cl}* = 1.444, *a*₁ = 7 мкм. Такое волокно поддерживает распространение четырех мод (LP₀₁, LP₁₁, LP₀₂, LP₂₁). Дифференциальная модовая задержка, дисперсия и эффективная площадь моды для каждой моды такого волокна представлены в табл.3. Коэффициенты нелинейной связи между всеми пространственными модами волокна со ступенчатым профилем показателя преломления приведены в табл.4.

На рис.6 изображена зависимость *Q*-фактора, усредненного по всем используемым модам, от начальной мощности сигнала при распространении оптических сигналов по волокну со ступенчатым профилем показателя преломления по одной, двум, трем или четырем модам. Как видно из рисунка, для случаев одной и двух мод *Q*-фактор примерно одинаков, однако при добавлении сигнала, распространяющегося по третьей моде (LP₀₂), качество передачи значительно ухудшается. Это связано с тем, что для моды LP₀₂ значение дисперсионного параметра мало (3.34 пс/(км·нм)) и сигнал, распространяющийся в этой моде, испытывает меньшее дисперсионное уширение, а следовательно, больше подвержен нелинейным искажениям. Таким образом, вклад моды LP₀₂ в усредненное по всем используемым модам значение *Q*-фактора ухудшает качество сигнала. Ситуацию немно-

Табл.3. Дифференциальная модовая задержка, дисперсия и эффективная площадь моды для «ступенчатого» волокна.

Мода	DMD (пс/км)	<i>D</i> (пс/(км·нм))	<i>A_{eff}</i> (мкм ²)
LP ₀₁	0	22.5	102
LP ₁₁	4.2	23.2	103
LP ₀₂	6.1	3.3	121.4
LP ₂₁	7.9	17.2	122

Табл.4. Коэффициенты нелинейной связи между пространственными модами для «ступенчатого» волокна.

Мода	LP ₀₁	LP ₁₁	LP ₀₂	LP ₂₁
LP ₀₁	1	0.6294	0.6871	0.4068
LP ₁₁		0.9932	0.3283	0.5585
LP ₀₂			0.8474	0.2934
LP ₂₁				0.8425

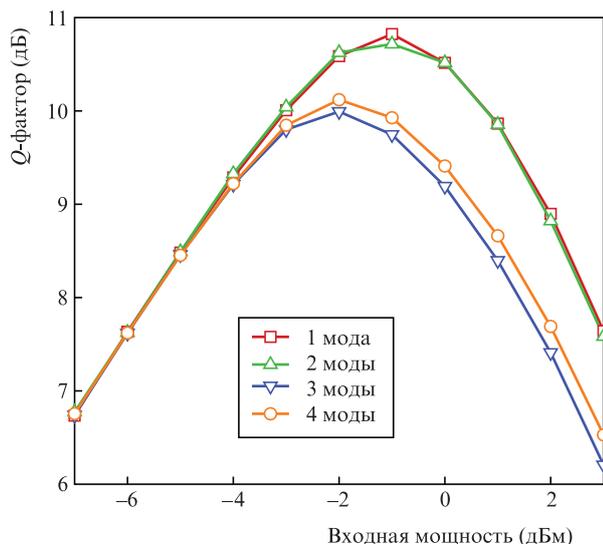


Рис.6. Зависимость Q -фактора от начальной мощности сигнала для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления.

го исправляет добавление 4-й моды (LP_{21}) с достаточно большим дисперсионным параметром. В этом случае значение Q -фактора больше, чем в случае трех мод.

4. Заключение

В работе выполнено математическое моделирование эволюции оптических сигналов в многомодовых волокнах в рамках модели, основанной на уравнениях Манакова, в режиме слабой связи мод. Для этого реализован численный алгоритм на основе метода расщепления по физическим процессам.

Исследовано влияние нелинейных эффектов на качество передачи сигнала для системы оптической связи, осно-

ванной на многомодовом волокне с градиентным профилем показателя преломления и с «траншеей» в оболочке. Для данного волокна продемонстрирован и обоснован рост Q -фактора при увеличении числа задействованных мод. Рассмотрен также случай, когда все моды движутся с одинаковой скоростью, и показано ухудшение качества передаваемого сигнала с ростом числа используемых мод за счет межмодовой нелинейности.

Исследовано волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, поддерживающее распространение моды с малым дисперсионным параметром. Показано, что сигнал, распространяющийся в этой моде, больше подвержен нелинейным искажениям, а наличие такой моды может значительно ухудшать среднее значение Q -фактора.

Работа А.А.Р. поддержана Российским научным фондом (проект № 14-21-00110), работа О.С.С. – фондом Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (грант № МК-9240.2016.9).

1. Tkach R. *Bell Labs Tech. J.*, **14**, 4 (2010).
2. Ryf R. et al. *Proc. OFC/NFOEC* (Los Angeles, CA, USA, 2011, paper PDPB10).
3. Marcuse D. *Theory of Dielectric Optical Waveguides* (New York: Acad., 1991).
4. Ho K. et al. *J. Lightwave Technol.*, **29**, 21 (2011).
5. Rademacher G. et al. *Photon. Technol. Lett.*, **24**, 21 (2012).
6. Ryf R. et al. *Proc. OFC/NFOEC* (Anaheim, CA, USA, 2013, paper PDP5A.1).
7. Sillard P. et al. *Proc. OFC/NFOEC* (Los Angeles, CA, USA, 2015, paper M2C.2).
8. Brehler M. et al. *Proc. OFC/NFOEC* (Anaheim, CA, USA, 2016, paper W4I.3).
9. Rademacher G. et al. *Opt. Express*, **23**, 1 (2015).
10. Nguyen T. et al. *IEEE Photon. J.*, **8**, 2 (2016).
11. Mumtaz S. et al. *J. Lightwave Technol.*, **31**, 3 (2013).
12. Inan B. et al. *Proc. OFC/NFOEC* (Los Angeles, CA, USA, 2012, paper OW3D.4).
13. Ferreira F.M. et al. *J. Lightwave Technol.*, **32**, 3 (2014).