

Повышение точности оценки распределённых нерегулярностей в оптических волокнах

И. В. Богачков, С. В. Овчинников, Н. И. Горлов ¹

В данной статье рассматривается явление бриллюэновского рассеяния в оптическом волокне (ОВ), приводятся результаты математического моделирования для участков ОВ, подверженных механическим напряжениям, а также рассматриваются вопросы, касающиеся повышения точности моделирования и практического применения полученных результатов.

Ключевые слова: бриллюэновское рассеяние (БР), математическое моделирование, оптическое волокно, ранняя диагностика.

1. Введение

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в настоящее время являются доминирующим видом высокоскоростных линий связи. Однако за последнее десятилетие проявилась проблема преждевременного старения и деградации оптических волокон (ОВ), которые находятся под воздействием повышенных механических напряжений.

Эта проблема привела к необходимости осуществления постоянного мониторинга и выявления проблемных участков оптического волокна (ОВ), в частности, отрезков ОВ, находящихся под повышенным механическим натяжением [1].

Для решения поставленной задачи разработаны и вводятся в эксплуатацию специализированные приборы, называемые *бриллюэновскими рефлектометрами*, которые способны предоставить точную информацию о распределении степени натяжения ОВ вдоль его длины.

Но эти приборы имеют весьма высокую стоимость, при этом математические модели распространения сигналов в ОВ с учётом нелинейных эффектов и методики испытаний существующих ВОЛС остаются несовершенными [1 – 3].

Задачей исследования является построение математической модели спектра бриллюэновского рассеяния в ОВ, возникающего в результате нелинейного взаимодействия светового импульса со средой, с учётом механических напряжений волокна.

2. Теоретические основы

Отклик кварцевого стекла на световое воздействие является *нелинейным*. Большинство нелинейных эффектов (НЭ) в ОВ возникают из-за нелинейного преломления [2].

К НЭ, имеющим место в ОВ и важным для дальнейшего анализа, относятся:

- вынужденное упругое рассеяние;
- вынужденное неупругое рассеяние.

¹ Госбюджетная НИР ОмГТУ 8.3500 Ф.

Первая группа НЭ связана с диэлектрической восприимчивостью третьего порядка χ^3 , то есть причиной их возникновения является эффект Керра: изменение коэффициента преломления материала под действием электрического поля. К этой категории относятся такие эффекты, как генерация третьей гармоники, четырёхволновое смещение и нелинейное преломление [2].

Второй класс НЭ вызван вынужденным неупругим рассеянием, при котором, в отличие от эффектов первой группы, оптическое поле передаёт часть своей энергии нелинейной среде. К НЭ этой группы относятся вынужденное комбинационное рассеяние и рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (или бриллюэновское рассеяние) [1, 2]. На уровне квантовой механики эффекты этого класса можно описать как уничтожение фотона накачки с одновременным появлением стоксова фотона и акустического фонона.

Эффект бриллюэновского рассеяния (БР), на примере которого будет строиться математическая модель, ранее применялся в комбинационных усилителях света [2], сопряжении оптических фаз. Применение для диагностики ВОЛС [3 – 8] становится возможным благодаря тому, что параметры волны обратного рассеяния связаны с физическими характеристиками ВОЛС. Различают два вида бриллюэновского рассеяния: вынужденное (SBS – Stimulated Brillouin Scattering) и спонтанное (SPBS – Spontaneous Brillouin Scattering). Первое наблюдается в случае, если превышен порог SBS, приблизительно равный 5 – 10 мВт для узкополосных источников света [4]. В случае SPBS эффекта мощность, вводимая в ОВ, не превышает порогового значения мощности SBS [5].

Если обратиться к вопросам практического применения, то рефлектометры, анализирующие спектр SPBS, являются более предпочтительными, так как в этом случае достаточно иметь доступ к одному концу ОВ [8], что является важным условием при проведении измерений на линии связи, находящейся в эксплуатации.

Работы по построению математических моделей ОВ с учётом бриллюэновского рассеяния существенно активизировались в XXI веке. Ранее этот эффект представлял интерес только для усиления света в ОВ [2].

В публикации [11] описывается численное моделирование одномодового ОВ с микроизгибами, приводится выражение для коэффициента пропорциональности между сдвигом частоты и величиной растяжения ОВ, которое в зависимости от его типа и принимает значения 500...600 МГц на 1% растяжения ОВ. Приведены результаты моделирования для отрезка линии с деформированным участком. В работе [12] обсуждается влияние эффекта френелевского отражения в бриллюэновской рефлектометрии, приводится математическое описание спектра бриллюэновского рассеяния в ОВ, а также рассматриваются некоторые результаты экспериментов.

В [13] рассматривается возможность использования техники импульсного кодирования для измерения распределения температуры и напряжения в ОВ, которое при мощности оптических импульсов 10 мВт обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум (ОСШ) на 7.4 дБ на входе приёмника, что позволяет определять изменения бриллюэновского сдвига частоты с высокой точностью.

В [14] демонстрируется высокоскоростное измерение распределённого натяжения в ОВ с высоким пространственным разрешением при доступе только с одного конца ВОЛС. Сообщается об улучшении пространственной точности, но при ухудшении отношения сигнал/шум.

В [15] рассматривается построение универсальной модели для разработки высокомоощных волоконно-оптических усилителей, работающих с одномодовым волокном с учётом свойства излучения накачки, длины ОВ и его температуры.

В [16] даётся описание эффекта обращения волнового фронта в многомодовом ОВ при достижении порога SBS, также проанализировано отклонение величины порога SBS, связанное с описанным явлением. В [17] анализируется работоспособность улучшенного многоволнового бриллюэновского лазера в различных рабочих состояниях.

В работе [18] даётся описание техники мониторинга ОВ, которая позволяет обнаруживать неполадки в разветвлённых пассивных оптических сетях из центрального пункта управления. При проведении мониторинга предполагается использование бриллюэновского рефлектометра. Также даются некоторые экспериментальные результаты, полученные с использованием описанной системы.

В работах [19 – 22] предлагается численный метод, который позволяет производить математическое моделирование распределения поля в оптическом волокне, при этом отличительной особенностью методики является снижение вычислительных затрат по сравнению с аналогами.

Для построения математической модели рассмотрим основные выражения, описывающие процесс распространения световых импульсов в ОВ.

3. Математическое описание распространения световых волн в ОВ

В общем случае волновое уравнение распространения света в ОВ можно записать в виде [1, 3]

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial^2 P_L}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где линейная P_L и нелинейная P_{NL} ($|P_{NL}| \ll |P_L|$) части индуцированной поляризации $P(r, t) = P_L(r, t) + P_{NL}(r, t)$, которые связаны с напряжённостью электрического поля E соотношениями (3) и (4).

$$P_L(r, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \chi^{(1)}(t - t') \cdot E(r, t') dt',$$

$$P_{NL}(r, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \chi^{(3)}(t - t_1, t - t_2, t - t_3) : E(r, t_1) E(r, t_2) E(r, t_3) dt_1 dt_2 dt_3, \quad (2)$$

где χ^j – тензоры нелинейной восприимчивости порядка j . Эти соотношения справедливы в приближении локального отклика среды и определяют общий формализм описания нелинейных эффектов низшего порядка в ОВ.

Уравнение распространения (1) – нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных, которое нельзя решить аналитически, за исключением некоторых частных случаев. Поэтому часто для изучения нелинейных эффектов в ОВ необходимо использование численных методов моделирования.

Для этой цели можно использовать множество численных методов, которые можно отнести к классам разностных или псевдоспектральных методов. Считается, что псевдоспектральные методы имеют лучшую сходимость при той же точности счёта [5].

Основным выражением, связывающим частоту бриллюэновского частотного f_B сдвига и степень натяжения ОВ, является формула [8]:

$$f_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2n v_A}{\lambda}, \quad (3)$$

где n – коэффициент преломления; v_A – скорость акустической волны; λ – длина волны падающего света. Величина бриллюэновского сдвига частоты, в свою очередь, входит в выражение для бриллюэновского коэффициента (БКУ) усиления [2]:

$$g_B = \frac{\hat{g}_B}{1 + \left(2 \frac{\Delta f - f_B}{\Delta f_B} \right)^2}, \quad \hat{g}_B = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c \lambda^2 \rho v_A \Delta f_B}, \quad (4)$$

где $\hat{g}_B$ – максимальный БКУ при $\Delta f = f_B$; Δf – разность между частотой вводимого в ОВ света и частотой наблюдения; Δf_B – ширина полосы бриллюэновского усиления (обычно принимаемая равной 70 МГц), p_{12} – продольный акустооптический коэффициент, равный 0.27, ρ – плотность кварцевого стекла. Примерное значение $\hat{g}_B$ равно 10^{-11} м/Вт.

Для получения спектра SPBS, связывающее спектр зондирующего импульса $S_P(f)$, форму спектра бриллюэновского рассеяния $S_B(f)$ и спектр источника излучения $S_L(f)$ (символ $\otimes$ обозначает операцию свёртки), используем выражение [12]:

$$S(f) = S_P(f) \otimes S_B(f) \otimes S_L(f). \quad (5)$$

4. Результаты моделирования

Для математического моделирования описанных явлений использовалось выражение (8). При этом в расчёт также принималось затухание света в ОВ.

Вид нормированного спектра SPBS $\hat{S}(f, l)$, полученного в результате моделирования, приведён на рис. 1, из которого видно, как изменение степени натяжения ОВ на небольшом отрезке ОВ приводит к сдвигу спектра.

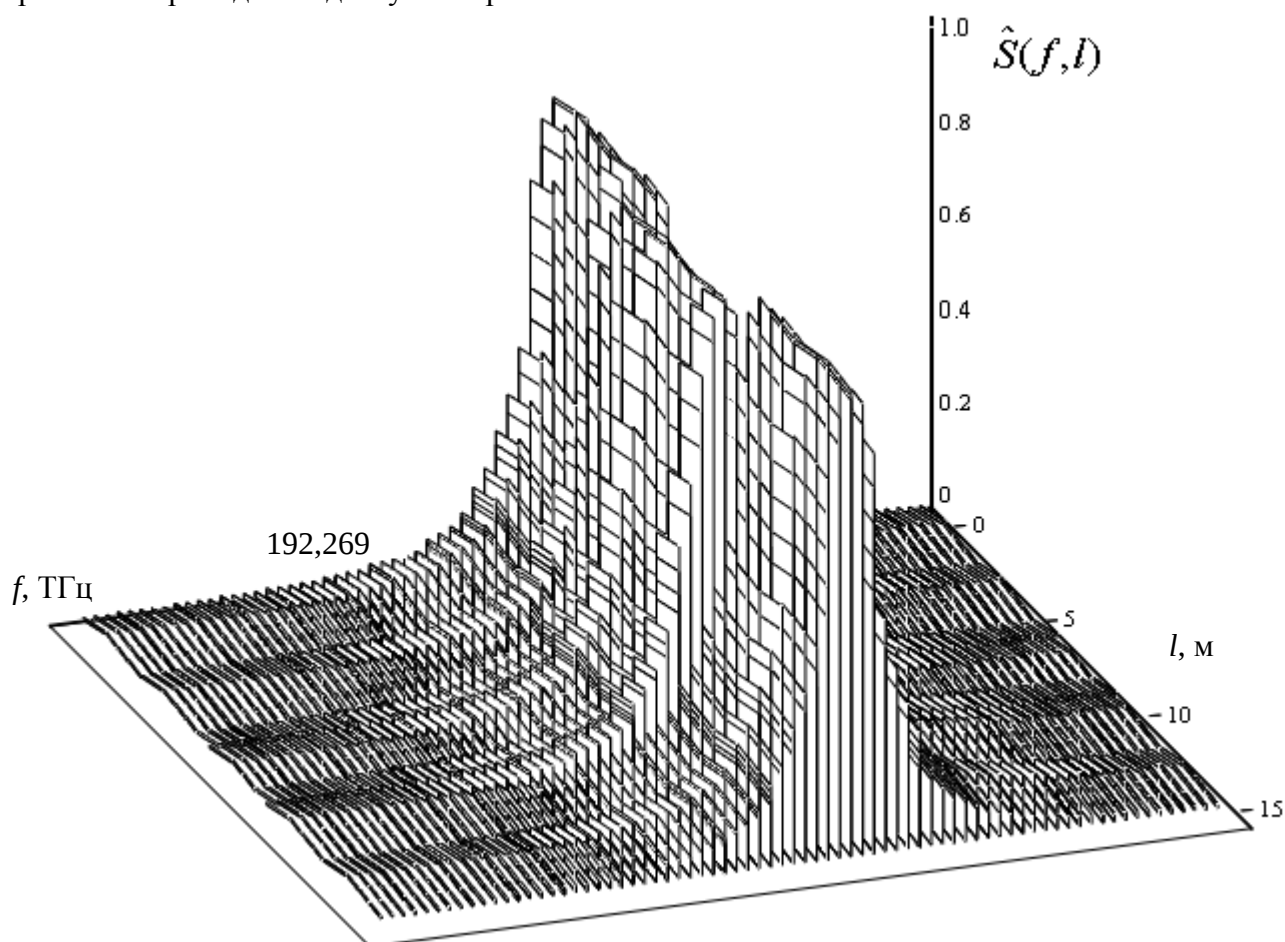


Рис. 1. Вид нормированного спектра SPBS $\hat{S}(f, l)$

Как отмечалось ранее, для определения величины натяжения ОВ необходимо проводить измерения спектра обратной волны в некотором диапазоне частот. Поясним это, воспользовавшись результатами вычислений, проведённых с использованием выражений, указанных выше.

Рассмотрим рис. 2, на котором изображён профиль нормированного спектра SPBS $\hat{S}(f, l)$ на некотором участке ОВ, измеренный на частоте, отстоящей от частоты несущей ($\lambda_0 = 1550$ нм) на 10.6 ГГц, что соответствует случаю отсутствия механического напряжения в ОВ.

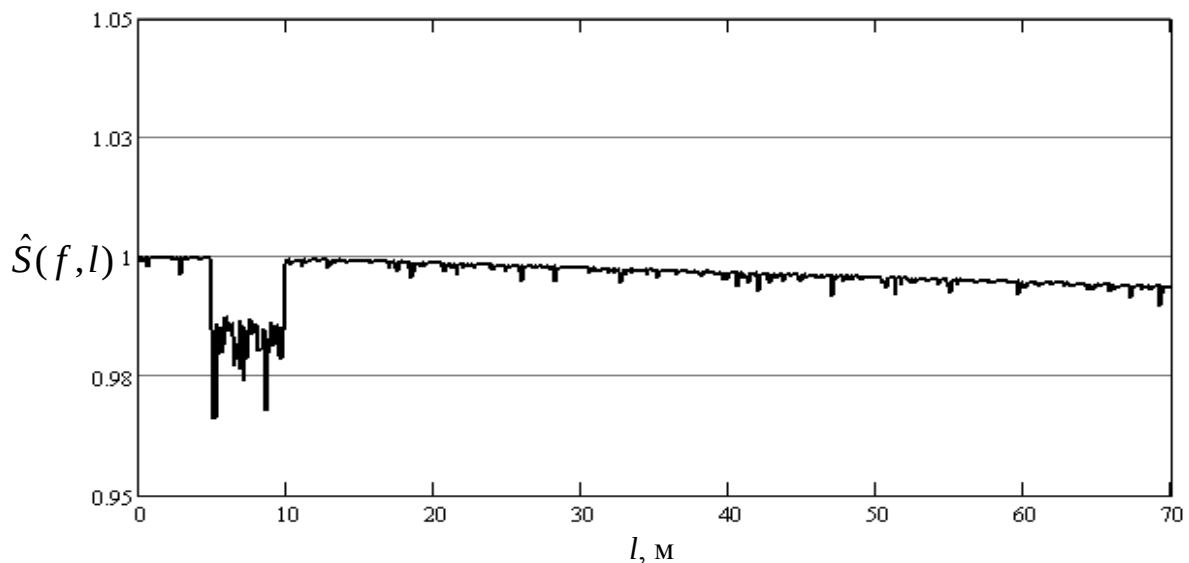


Рис. 2. Профиль нормированного спектра SPBS $\hat{S}(f, l)$ на участке ОВ

На рис. 3 показан график степени натяжения ОВ (выраженный посредством изменения модуля Юнга E) на том же участке, для которого был приведён профиль спектра на рисунке выше.

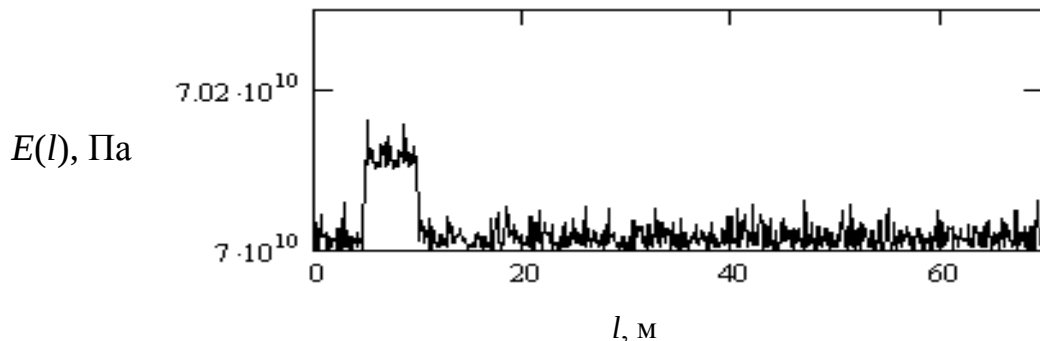


Рис. 3. Степень натяжённости ОВ

Согласно математическому описанию явления SPBS, спадам в графике на рис. 3 соответствуют напряжённые участки ОВ, так как в этом случае изменяется величина бриллюэновского сдвига f_B и БКУ становится максимальным на другой частоте. Вторым фактором, который необходимо учитывать, является затухание в ОВ. Этот вклад в изменение мощности SPBS возможно учитывать в том случае, если величина коэффициента затухания неизменна вдоль линии или же известно, как затухание изменяется на различных участках линии.

В данном конкретном случае при построении модели на участке от 15 до 115 м коэффициент затухания был увеличен в два раза. Если бы этот фактор не был учтён, то измерения интенсивности впоследствии привели бы к ошибке в вычислении степени натяжения ОВ, приблизительно равной 0.1 %. Следует также иметь в виду, что подобный эффект будет накапливаться по мере движения вдоль ОВ и приводить к новым ошибкам. Вследствие этого, современные бриллюэновские рефлектометры производят измерения в некотором диапазоне частот для обнаружения максимального значения спектра SPBS с целью избежать такого рода ошибок.

5. Алгоритм определения напряжённых участков ОВ

Экспериментальные измерения спектра SPBS [6] показывают, что форма спектра бриллюэновского рассеяния не изменяется вдоль ОВ. Это позволяет сделать предположение о возможности несколько иного способа измерения степени натяжения ОВ: возможно оценивать степень натяжения ОВ на одной частоте – достаточно использовать известные зависимости мощности SPBS на этой частоте от растягивающей нагрузки [5 – 8]. Для получения более точных результатов можно в типовых условиях измерить параметры спектров рассеяния для образцов конкретной марки ОВ. Проблема неучтённого затухания, описанная выше, решается за счёт того, что необходимо измерять суммарную мощность БР и нормировать полученные характеристики.

Можно предположить, что такие допущения приведут к снижению точности измерения степени удлинения ОВ. Однако с практической точки зрения не так важно определять точное значение механического напряжения ОВ, находящегося в эксплуатации, сколько знать, что не превышен некоторый допустимый порог этой величины. В связи с этим некоторая потеря точности, обусловленная тем, что определяется не точный профиль спектра БР, а лишь точные значения в наиболее важных точках с последующей интерполяцией, может быть оправдана.

Основываясь на данном предположении, расширим математическую модель, вычислив образцы рефлектограмм, которые могут быть получены при проведении измерений на реальной линии связи с использованием нового метода.

Последовательность расчёта приобретает следующий вид:

1. Нахождение спектра БР (было показано выше).
2. Расчёт мощности на выходе нормирующего фильтра.
3. Расчёт отношения сигнал/шум для отдельных блоков схемы и системы в целом.
4. Расчёт рефлектограммы на основе полученных значений.
5. Получение семейства рефлектограмм, их усреднение для уменьшения влияния шумов.

В качестве примера ниже приведён результат моделирования отрезка ОВ длиной 100 м.

Для сравнения входных и выходных данных и последующего определения погрешности измерений приведём графики для модуля упругости и коэффициента затухания на заданном отрезке линии (рис. 4 и 5).

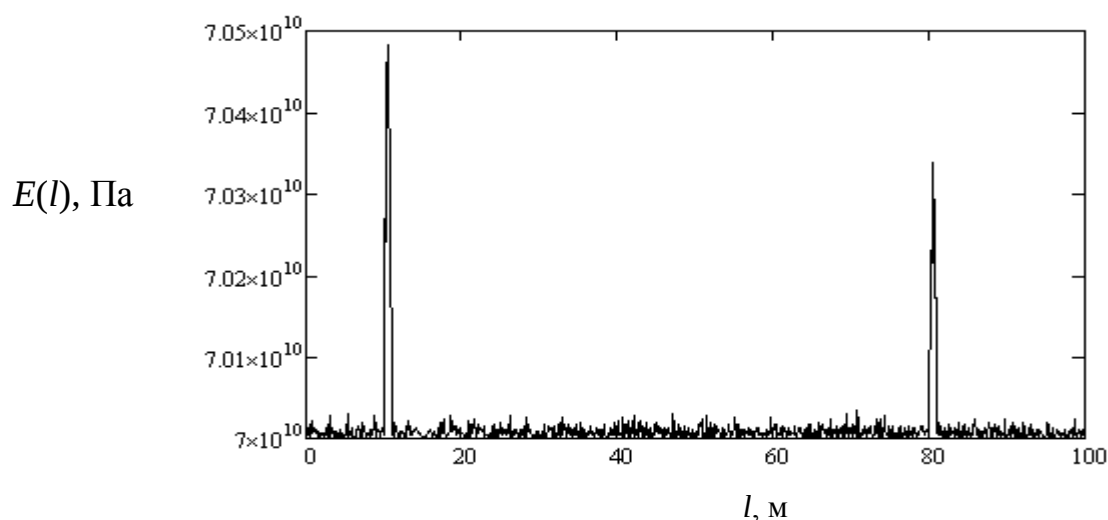


Рис. 4. Модуль упругости на отрезке линии

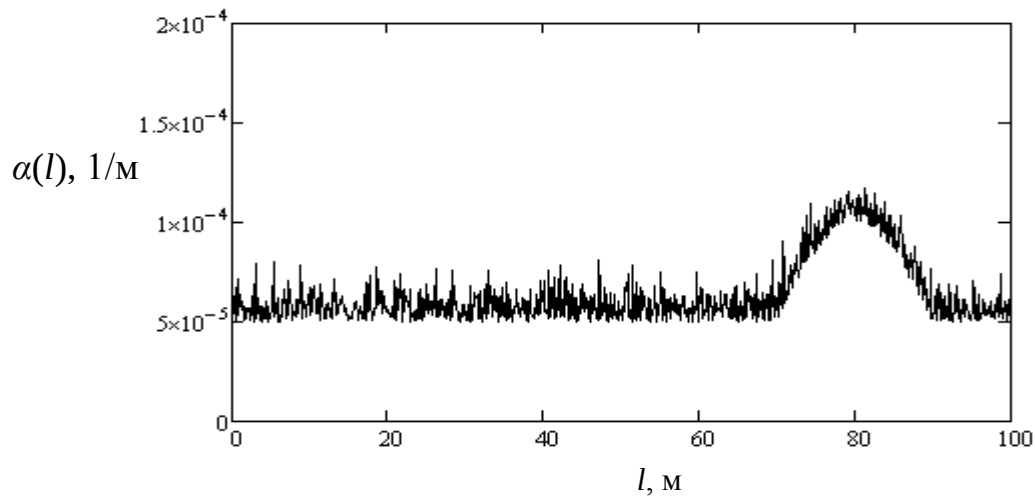
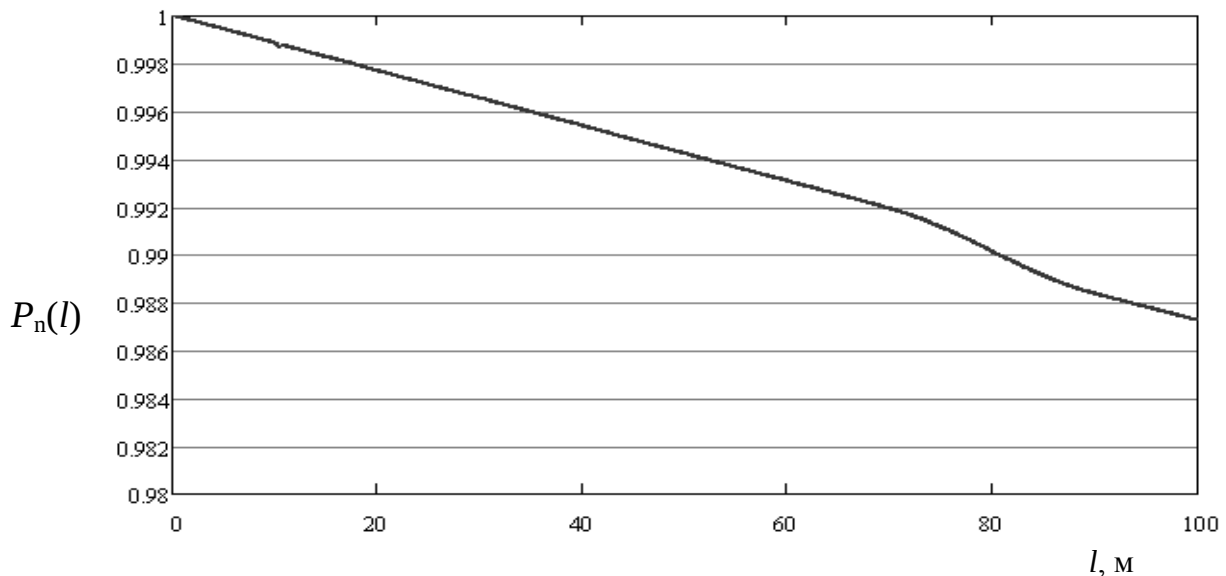


Рис. 5. Коэффициент затухания на отрезке линии

По графикам видно, что моделируемая линия имеет отрезок с повышенным затуханием в районе 70 – 90 м, а также есть два напряжённых участка в области 10 – 11 м и 80 – 81 м.

После расчёта спектра бриллюэновского рассеяния производится расчёт мощности на выходе нормирующего фильтра. Изменение величины нормированной мощности $P_n(l)$ вдоль линии показано на рис. 6. Увеличение коэффициента затухания в районе 70 – 90 м привело к более крутому виду характеристики на этом участке.

Рис. 6. Нормированная мощность $P_n(l)$ вдоль линии

С учётом полученных значений производится нормирование рефлектограммы, которая несёт информацию только о смещении спектра БР без учёта влияния затухания. Результат вычисления приведён на рис. 7. Пунктирной линией на этом рисунке показано, как могло выглядеть изменение спектра БР без внесения корректировки [10].

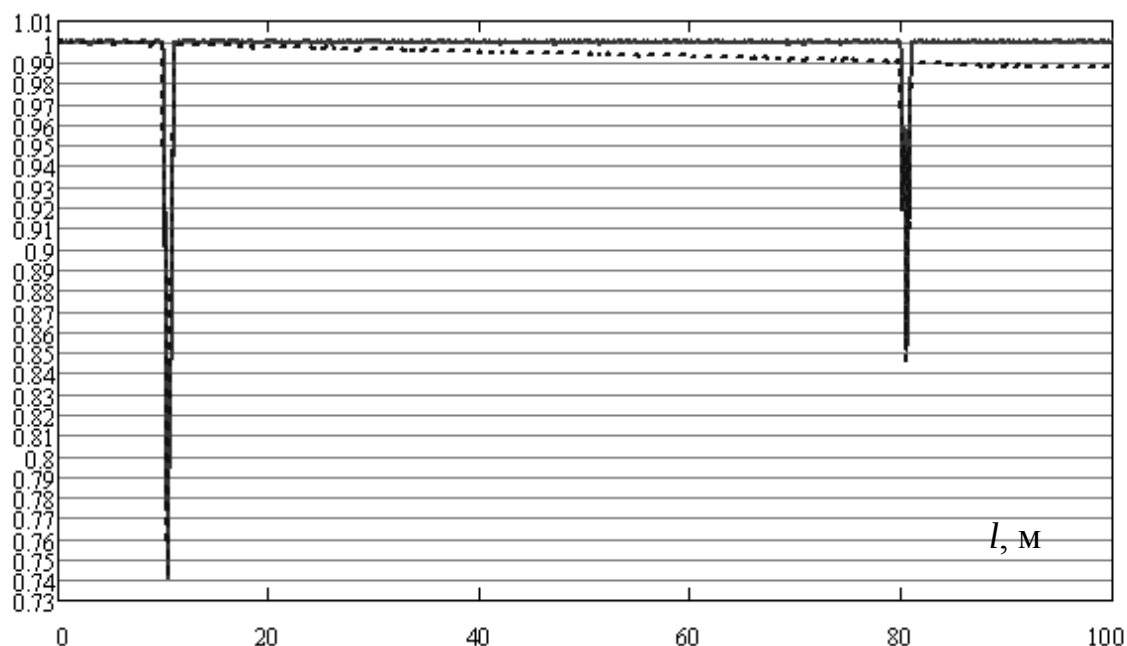


Рис. 7. Нормированная рефлектограмма

Однако приведённый выше график ещё не отражает влияния шумов. Для расчёта ОСШ отдельных блоков (приёмной и передающей части) и системы в целом использовалась методика, предложенная в [10, 23, 24].

В результате вычисленная рефлектограмма, построенная по результатам одного измерения, с учётом её зашумлённости показана на рис. 8.

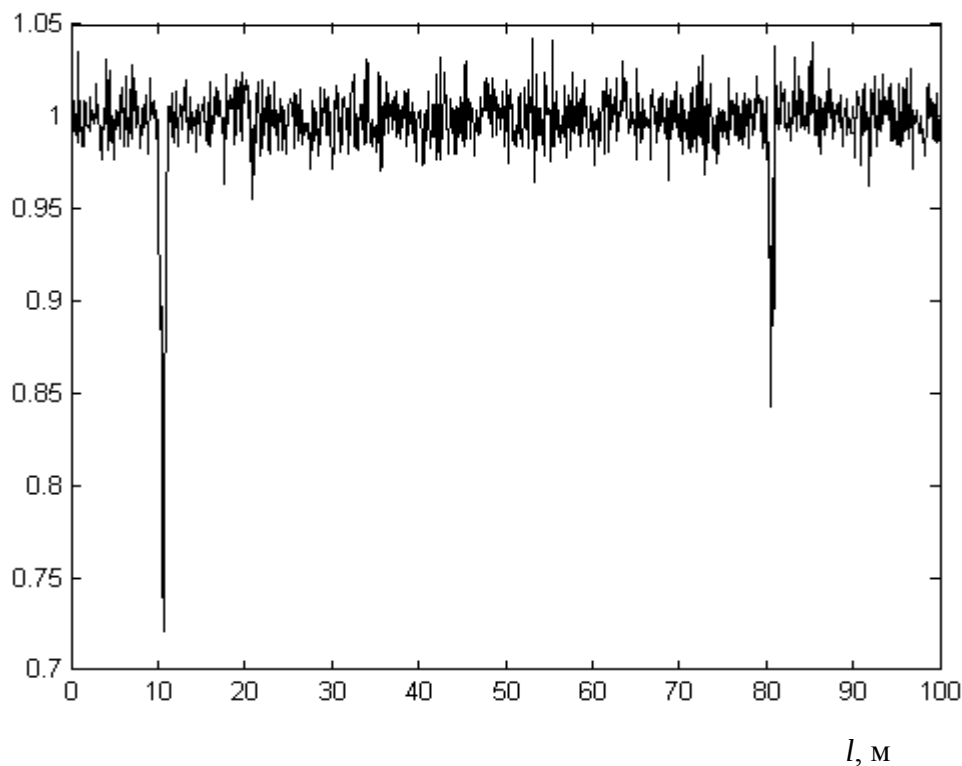


Рис. 8. Рефлектограмма с учётом шума

Как можно видеть по графику, вычисление произошло с ошибками, что соответствует случаю проведения измерений в реальных условиях. Средняя величина ошибки, определяемая как разность между идеальной рефлектограммой и зашумлённой, в данном случае равна 1%,

что указывает на необходимость повторных измерений и усреднения результатов. После проведения серии из 10 экспериментов величина ошибки уменьшилась и её среднее значение стало равным уже 0.34%. Для дальнейшего повышения точности вычислений необходимо увеличение числа измерений. Обычно на практике достаточной считается точность измерения величины натяжения ОВ в 0.1%.

Для определения степени натяжения ОВ необходимо вычислить эталонные значения нормированной рефлектограммы. Для этого в модели устраняются флуктуации модуля Юнга и коэффициента затухания, которые всегда присутствуют в ОВ, не вносятся шумы, а также задаётся участок линии, на котором степень натяжения ОВ изменяется по известному закону, например, линейно. Результаты вычислений приведены на графике (рис. 9) и отражают зависимость уровня нормированной рефлектограммы от степени натяжения ε ОВ.

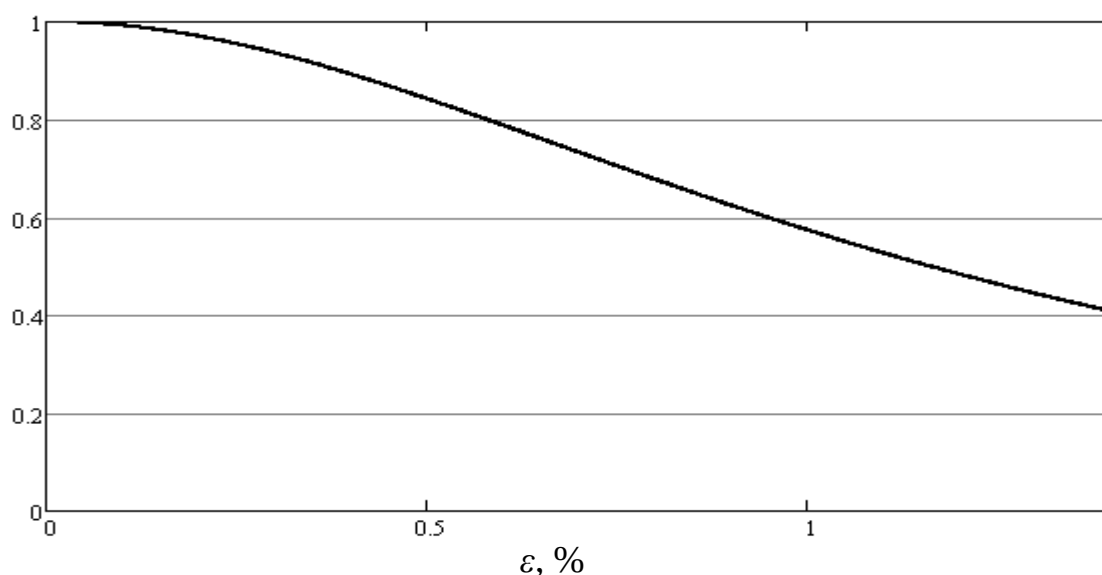


Рис. 9. Зависимость уровня нормированной рефлектограммы от степени натяжения ОВ

На основании полученной зависимости производится перерасчёт значений рефлектограммы в значения степени натяжения ОВ [23, 24].

Заключение

В данной статье было рассмотрено предложение по решению задач диагностики и мониторинга ВОЛС с применением средств математического моделирования, приведена область практического применения, где могут быть задействованы полученные результаты.

На основе полученных результатов можно сказать, что значимость построенной математической модели заключается в том, что получение аналогичных результатов экспериментальным путём является значительно более трудоёмкой задачей.

Кроме того, возможно применение результатов при создании виртуальных лабораторных работ, подготовке специалистов соответствующего профиля, прогнозировании и моделировании неисправностей ВОЛС, разработке новых приборов и методик измерений и т.п.

Литература

1. Новые задачи мониторинга и ранней диагностики разветвленных волоконно-оптических сетей / И. В. Богачков, В. А. Майстренко, Н. И. Горлов, С. В. Овчинников // Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 11 / Под ред. В. В. Ромашова, В. В. Булкина. – М: «Радиотехника», 2009. – С. 295 – 300.

2. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
3. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Волоконно-оптические линии передачи: методы и средства измерений параметров. – М.: Радиотехника, 2009. – 188 с.
4. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Измерение характеристик волоконно-оптических линий связи с помощью импульсно-рефлектометрических методов: монограф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 160 с.
5. Моделирование бриллюэновского рассеяния для оценки распределённых нерегулярностей в оптоволокне / *И. В. Богачков, С. В. Овчинников, Н. И. Горлов* // Тр. X междунар. конф. IEEE АПЭП, Т. 2. Новосибирск, 2010. – С. 98–100.
6. Результаты испытаний бриллюэновского рефлектометра / *В. В. Григорьев, О. В. Лященко, А. К. Митюрев, А. Н. Наумов* // Фотон-экспресс. – 2005. – №5. – С. 36–37.
7. *Клюев В. Г.* Нелинейные явления в оптоволоконных системах: учебное пособие для вузов. – Воронеж: ИПЦ Воронежского государственного университета, 2008. – 59 с.
8. *Листвин А. В., Листвин В. Н.* Рефлектометрия оптических волокон связи. – М.: ЛЕСА-Рарт, 2005. – 208 с.
9. Искажения в оптических сетях / *С. Н. Песков, З. А. Зима, С. Ю. Колгатин* // Теле-Спутник. – 2005. – №5 (115). – С. 58–61.
10. *Фриман Р.* Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003. – 496 с.
11. *Янукович Т. П., Поляков А. В.* Использование метода анализа бриллюэновского оптического частотного домена для регистрации микроизгибов оптического волокна // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – №1. – С. 51–55.
12. *Iida D., Ito F.* Detection sensitivity of Brillouin scattering near fresnel reflection in BOTDR measurement // *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 417–424, February 2008.
13. *Soto M. A., Bolognini G., Di Pasquale F.* Enhanced simultaneous distributed strain and temperature fiber sensor employing spontaneous Brillouin scattering and optical pulse coding // *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 21, no 7, April 2009.
14. *Mizuno Y., He Z., Hotate K.* One-end-access high-speed distributed strain measurement with 13-mm spatial resolution based on Brillouin optical correlation-domain reflectometry // *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 21, no 7, April 2009.
15. *Liu A., Chen X., Li M.-J., Wang J., Walton D. T., Zenteno L. A.* Comprehensive modeling of single frequency fiber amplifiers for mitigating stimulated Brillouin scattering // *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, no.13, July 2009.
16. *Massey S. M., Russell T. H.* The effect of phase conjugation fidelity on stimulated Brillouin scattering threshold // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 15, no 2, March/April 2009.
17. *Al-Mansoori M. H., Mahdi M. A., Premaratne M.* Novel multiwavelength L-band Brillouin–Erbium fiber laser utilizing double-pass Brillouin pump preamplified technique // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 15, no 2, March/April 2009.
18. *Honda N., Iida D., Izumita H., Azuma Y.* In-service line monitoring system in PONs using 1650-nm Brillouin OTDR and fibers with individually assigned BFSs // *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, no. 20, October 2009.
19. *H.M. Masoudi, M.S. Akond.* Efficient iterative time-domain beam propagation methods for ultra short pulse propagation: analysis and assessment // *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, no 16, 2011.
20. *H.M. Masoudi, M. A. AlSunaidi, J.M. Arnold.* Time-domain finite-difference beam propagation method // *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, no. 10, October 1999.
21. *H.M. Masoudi, M.A. Al-Sunaidi, J.M. Arnold.* Efficient time-domain beam-propagation method for modeling integrated optical devices // *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 19, no. 5, May 2001.
22. *H.M. Masoudi.* A novel time-domain technique for nonparaxial ultra short optical pulses // *Microwave and Optical Technology Letters* / Vol. 49, no. 10, October 2007.

23. The Brillouin backscattering modeling for analysis of distributed irregularities in optical fibers / I. V. Bogachkov, S. V. Ovchinnikov, N. I. Gorlov // IEEE 2010 10th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. – V. 1. – P. 30–31.

24. Богачков И. В., Горлов Н. И. Новые задачи технической эксплуатации разветвлённых волоконно-оптических сетей // Омский научный вестник. – Вып. 1 (77). – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – С. 195 – 198.

*Статья поступила в редакцию 11.04.2011;
переработанный вариант — 21.09.2012*

Богачков Игорь Викторович

К.т.н., доцент; доцент кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета.

тел.: (3812)-658560, e-mail: bogachkov@mail.ru.

Овчинников Сергей Владимирович

Магистр техники и технологии, ст. преподаватель кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета.

e-mail: zerg_87@list.ru.

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Линии связи» Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики, действительный член Метрологической академии.

Accuracy of estimate enhancement of distributed irregularity in optical fibers

I.V. Bogachkov, S.V. Ovchinnikov, N.I. Gorlov

This article considers the phenomena of Brillouin scattering in optical fiber, the results of mathematical modeling for optical fiber segment subject to mechanical damage are presented, problems concerning accuracy of modeling enhancement and practical application of results are also considered.

Keywords: Brillouin scattering, mathematical modeling, optical fiber, early detection.