КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ РАССЕЯНИИ МЕНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Т. П. Янукович, А. В. Поляков

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
E-mail: YanukovichTP@bsu.by

Рассмотрена математическая модель вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне. Модель построена на базе системы трех дифференциальных уравнений, описывающих распространение оптических волн накачки и стоксовой, а так жэе акустической волны. На основании полученного решения было выполнено численное моделирование распространения сигнала в оптическом волокне при различных разностях частот между волной накачки и стоксовой. Предложенная модель используется при оценке параметров оптоволоконных сенсоров.

Ключевые слова: вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна; оптическое волокно.

При разработке современных технических устройств все больше внимания уделяется автоматизации процессов. И в связи с этим важное значение приобретает создание систем сенсоров, позволяющих максимально автоматизировать любые процессы. Особое внимание уделяется возможности автономной работы в недоступных локациях. Для работы таких сенсоров используются различные явления.

В настоящей работе рассмотрено вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне. Эффект может быть описан как взаимодействие трех волн: оптической волны накачки, Стоксовой волны и акустической волны с характеристической частотой f_B, которая зависит от температуры и давления.

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна можно описать как трехволновое взаимодействие волны лазера накачки, Стоксовой волны и акустической волны [1]. Такая модель может быть записана с помощью трех дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t}+\frac{c}{n}\frac{\partial}{\partial z}+\frac{c}{n}\alpha\right]E_p = j\frac{n^2 p_{12}\pi c}{\lambda\rho_0}\rho E_s,$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t}-\frac{c}{n}\frac{\partial}{\partial z}+\frac{c}{n}\alpha\right]E_s = j\frac{n^2 p_{12}\pi c}{\lambda\rho_0}\rho^* E_p, \tag{1}$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t}+c_s\frac{\partial}{\partial z}+\gamma_s\right]\rho = j\frac{\varepsilon_0 n^5 p_{12}\pi}{2\lambda c_s}E_p E_s^*,$$

где E_p комплексная амплитуда электрической составляющей волны накачки, В/м; E_s комплексная амплитуда электрической составляющей Стоксовой волны, В/м; ρ комплексная амплитуда волны плотности, кг/м3; ρ_0 средняя плотность, кг/м3, p_{12} продольный коэффициент упругости, безразмерная величина; n коэффициент преломления волны в сердцевине волокна, безразмерная величина; α коэффициент ослабления, м-1; γ_s коэффициент ослабления акустической волны, с$^{-1}$; c_s скорость распространения звука в материале волокна, м/с; λ длина волны в вакууме, м, z координата (сенсор расположен по оси z), м.

Ось z выбрана таким образом, что $z = 0$ в том конце волокна, в который направлено излучение накачки. Первое уравнение описывает ослабление волны накачки при взаимодействии Стоксовой волны и акустической волны. Второе уравнение системы (1) описывает усиление Стоксовой волны при взаимодействии волны накачки и акустической волны. Третье уравнение системы (1) описывает инициацию акустической волны при противоположном распространении по волокну волны накачки и Стоксовой волны. Двухволновая модель рассеяния получается из (1) при условии $t >> \gamma_s^{-1} = 6.4$ нс.

Производные по времени и координате от ρ определяются из третьего уравнения системы (1). Затем производится подстановка ρ в первое и второе уравнение.

Интенсивности волны накачки и Стоксовой волны выражаются через амплитуды:

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{n}{2\mu_0 c}\left|E_p\right|^2 = \frac{n\varepsilon_0 c}{2}\left|E_p\right|^2 \\ I_s &= \frac{n}{2\mu_0 c}\left|E_s\right|^2 = \frac{n\varepsilon_0 c}{2}\left|E_s\right|^2 \end{aligned} \tag{2}$$

Трехволновая модель будет выполняться при условии, когда распределение мощности в волокне не сильно изменяется. Однако, в случае потерь волны накачки такое предположение не имеет силы.

Скорость акустической волны в чистом кварцевом стекле (SiO_2) равняется приблизительно 5960 м/с при комнатной температуре для фиксированной частоты.

При длине волны в вакууме для лазера накачки 1319 нм, температуре 23°C для недеформированного стандартного мономодового волокна $f_B = f_{B,0} = 12{,}80$ ГГц [2]. Используем выражение для характеристической частоты Бриллюэновского рассеяния f_B [3]:

$$f_B = \frac{2nc_s}{\lambda_p}, \qquad (3)$$

где λ_p - длина волны лазера накачки в вакууме, скорость распространения звука $c_s = \sqrt{E/\rho_0}$, E постоянный модуль Юнга среды. Значение коэффициента преломления $n = 1{,}47$, скорость распространения звука c_s = 5743 м/с. Скорость звука зависит от температуры и относительной деформации. Таким образом, получаем зависимость характеристической частоты Бриллюэновского рассеяния от температуры и деформации:

$$f_B = f_{B,0} + \varepsilon \frac{\partial f_B}{\partial \varepsilon} + \left(T - 23°C\right) \frac{\partial f_B}{\partial T}, \qquad (4)$$

где $\partial f_B / \partial T = 1{,}2$ МГц/°С – температурный коэффициент и $\partial f_B / \partial \varepsilon = 500$ МГц - коэффициент деформации характеристической частоты Бриллюэновского рассеяния.

На вход оптоволокна вводится постоянное во времени излучение лазера накачки с амплитудой электрического поля

$$E_p\left(t,0\right) = E_{p0}. \qquad (5)$$

В выход волокна вводится излучение пробного лазера с модулированной амплитудой:

$$E_R\left(t\right) = E_s\left(t,L\right) = E_{s0}\cos\left(\omega_E t\right), \qquad (6)$$

где ω_E - частота модуляции.

Амплитуда электрического поля волны пробного лазера $E_R\left(t\right)$ даст амплитуду Стоксовой волны $E_s\left(t,z\right)$, которая распространяется по оптоволокну и взаимодействует с волной накачки. Взаимодействие двух волн вызовет появление акустической волны или волны плотности $\rho\left(t,z\right)$. Причиной этого взаимодействия является то, что постоянная по времени амплитуда волны накачки $E_p\left(t,z\right)$ получает часть модуляции от распространяющейся в обратном направлении волны Стокса. Кроме того, модулированная амплитуда Стоксовой волны будет усиливаться за счет Бриллюэновского взаимодействия.

Таким образом, решая последовательно уравнения системы (1), получаем выражения для акустической волны, волны Стокса и накачки.

Значение интенсивности излучения накачки, прошедшего через оптическое волокно, при $z = L$ принимает следующий вид с учетом малой глубины модуляции

$$\tilde{I}_p\left(t,L,\omega_E\right) = \hat{I}_p\left(\omega_E\right)\cos\left(2\omega_E t + \Phi_H\left(\omega_E\right)\right) \qquad (7)$$

где

$$\hat{I}_p(\omega_E) = I_{p0}\exp\left\{-2\alpha L - \gamma\hat{g}_B \frac{I_{s0}}{\delta} e^{\delta L/2} \operatorname{sh}\left(\frac{\delta L}{2}\right)\right\}\cdot$$

$$\cdot\frac{\gamma\hat{g}_B I_{s0}}{\sqrt{\delta^2+(4k_E)^2}} e^{\delta L/2}\sqrt{\operatorname{sh}^2\left(\frac{\delta L}{2}\right)+\sin^2(2k_E L)}, \quad (8)$$

$$\Phi_H(\omega_E) = \pi - 2k_E L + \operatorname{arctg}\left(\frac{4k_E}{\delta}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}(2k_E L)}{\operatorname{th}(\delta L/2)}\right).$$

Полученное выражение для интенсивности излучения накачки используется при численном моделировании рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне и позволяет построить передаточную функцию функции $s(z,\Delta f)$, зависящую от расстояния и разности частот излучений накачки и пробного Δf, Гц [1].

Моделирование передаточной функции $s(z,\Delta f)$ представлено на рисунке. Максимальное ослабление интенсивности излучения накачки наступает при разности частот излучений, равное $f_{B,0}$. Подобный результат получаетя, если оптическое волокно, по которому проходит излучение, не подвержено изменениям температуры и давления. При изменении параметров передаточная функция будет иметь минимум при других разностях частот излучений Δf.

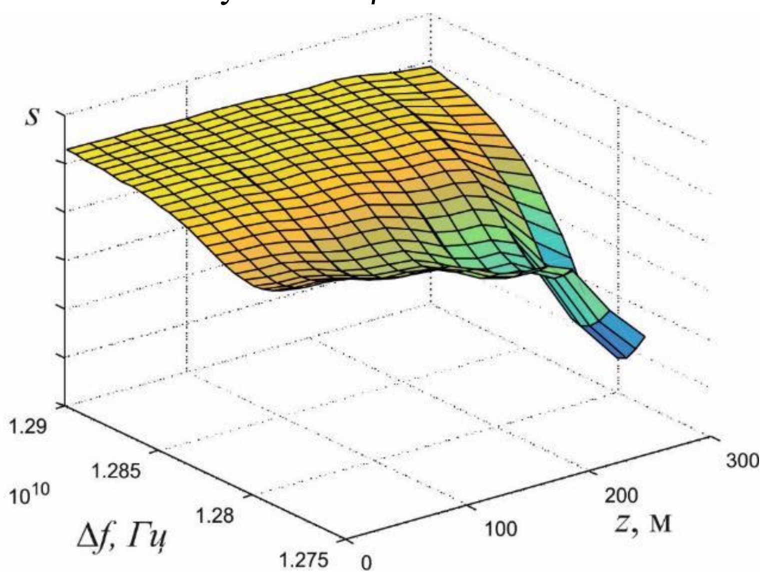

Рис. Моделирование передаточной функции

Рассмотрена трехволновая модель вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. На ее основе выполнена модель прохождения излучения по оптическому волокну. Компьютерное моделирование используется для предварительной оценки параметров работы сенсоров [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Янукович Т. П. Численная модель трехволнового рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 7. С. 49–54.
2. D. Garus, T. Godolla, K. Krebber, F. Schliep. Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements // J. Lightwave Technology. – 1997. – Vol. 15, № 4. – P. 654–662.
3. Hereth R. Stimulierte Brillouin-Streuung in Lichtleitfaser-Ringresonatoren: Dissertation Ruhr-Universitat: Elektronik Nr. 140. Bochum. 1992. 178 p.
4. Янукович Т. П., Поляков А. В. Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 3. С. 243–252.

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н. Н. Яцков, В. В. Апанасович

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
E-mail: yatskou@bsu.by

Предложен комплексный подход на основе методов интеллектуального анализа данных и имитационного моделирования для исследования биофизических систем, позволяющий определить параметры биофизических и оптических процессов в молекулярных соединениях. Рассмотрено применение разработанного подхода при исследовании бимолекулярных соединений с помощью метода флуоресцентной спектроскопии с временным разрешением.

Ключевые слова: биофизическая система; имитационное моделирование; интеллектуальный анализ данных; флуоресцентная спектроскопия.

Развитие биофизических технологий напрямую связано с разработкой эффективных методов и алгоритмов обработки большого объема информации, получаемой с помощью современного высокопроизводительного экспериментального оборудования [1]. Современные вычислительные подходы, например, на основе методов системного анализа, для обработки и количественной интерпретации многомерных экспериментальных данных востребованы в области исследований биофизических систем с помощью методов флуоресцентной спектроскопии [2]. Возможным направлением разработки является интеграция методов интеллектуального анализа данных и имитационного моделирования биофизических процессов при исследовании бимолекулярных соединений в флуоресцентной спектроскопии, позволяющее автоматизировать анализ