

Оптический журнал

Оптические приборы и методы измерений в физике, технике и природе
Optical devices and measurement methods in physics, engineering and nature

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-25-33

УДК 621.327.8:535.41

Моделирование работы распределённого оптоволоконного сенсора силы тока с использованием рассеяния Мандельштама–Бриллюэна

Татьяна Петровна Янукович^{1✉}, Анастасия Сергеевна Исмаилова²

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

¹YanukovichTP@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-1739-0941>

²anastasia.ismayilova.jb@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-4213-3468>

Аннотация

Предмет исследования. Распределённый оптоволоконный сенсор силы тока на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна при деформации волокна. **Цель работы.** Моделирование рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне при наличии деформации, вызванной силой Ампера, для расчёта параметров сенсора силы тока. **Метод.** Расчёт передаточной функции при трёхволновом взаимодействии волны накачки, пробной волны и акустической волны с учётом характеристических коэффициентов усиления вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. **Основные результаты.** Проведено моделирование работы сенсора силы тока на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Исследовано значение передаточной функции, рассмотрен эффект температурного воздействия при использовании оптического волокна с добавлением оксида германия. Проведено моделирование работы сенсора с предельным значением измеряемой силы тока в 50 кА, а также получением чувствительности в 72 А. Исследована возможность сокращения времени измерения при уменьшении диапазона изменения частоты модуляции. Выбран диапазон 100 кГц–300 МГц при пространственном разрешении в 0,5 м с инкрементом по частоте 100 кГц при длине волокна в 500 м. **Практическая значимость.** Проведено моделирование с оценкой параметров измерительной системы исходя из математической модели вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне. Пространственное разрешение сенсора при определении длины и местоположения участков волокна составляет 0,5 м при использовании амплитудной модуляции оптического сигнала в пределах от 100 кГц до 700 МГц при длине чувствительного волокна 500 м. Разрешающая способность сенсора составляет 72 А при разности частот излучения накачки и пробного $\Delta f = 500$ кГц, максимальное значение силы тока 50 кА при разности частот излучения накачки и пробного $\Delta f = 50$ МГц, что вдвое превышает предельное значение измеряемой силы тока в заявленных ранее сенсорах такого типа.

Ключевые слова: вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, оптическое волокно, сенсор силы тока

Ссылка для цитирования: Янукович Т.П., Исмаилова А.С. Моделирование работы распределённого оптоволоконного сенсора силы тока с использованием рассеяния Мандельштама–Бриллюэна // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 25–33. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-25-33>

Коды OCIS: 060.2370, 290.5830.

Operation simulation of a distributed fiber optic current sensor using Brillouin scattering

TATIANA P. YANUKOVICH¹✉, ANASTASIYA S. ISMAYILAVA²

Belorussian State University, Minsk, Republic of Belarus

¹YanukovichTP@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-1739-0941>

²anastasia.ismayilova.jb@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-4213-3468>

Abstract

Subject of study. Distributed fiber optic current sensor based on Brillouin scattering on the basis of fiber deformation. **Aim of study.** Simulation of Brillouin scattering in an optical fiber in the presence of deformation caused by the Ampere force to calculate the parameters of the current sensor. **Method.** Calculation of the transfer function for a three-wave interaction of a pump wave, a probe wave and an acoustic wave, taking into account the characteristic amplification factors of stimulated Mandelstam–Brillouin scattering. **Main results.** The operation of a current sensor based on Brillouin scattering was simulated. The value of the transfer function is studied, the effect of temperature exposure is considered when using optical fiber with the addition of germanium oxide. The operation of the sensor was simulated with a limiting value of the measured current of 50 kA, as well as obtaining a sensitivity of 72 A. The possibility of reducing the measurement time by reducing the range of modulation frequency changes. The range 100 kHz – 300 MHz with a spatial resolution of 0.5 m with an increment of frequency of 100 kHz with a fiber length of 500 m was chosen. **Practical significance.** A simulation was carried out to estimate the parameters of the measuring system based on the mathematical model of stimulated Mandelstam–Brillouin scattering in an optical fiber. The spatial resolution of the sensor when determining the length and location of fiber sections is 0.5 m when using amplitude modulation of the optical signal in the range from 100 kHz to 700 MHz with a sensitive fiber length of 500 m. The resolution of the sensor is 72 A at the difference between the pump and test radiation frequencies $\Delta f = 500$ kHz, maximum current value 50 kA at a difference in frequencies of pump and test radiation $\Delta f = 50$ MHz, which is twice the maximum value of the measured current in previously announced sensors of this type.

Keywords: stimulated Brillouin scattering, optical fiber, current sensor

For citation: Yanukovich T.P., Ismayilava A.S. Operation simulation of a distributed fiber optic current sensor using Brillouin scattering [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 10. P. 25–33. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-25-33>

OCIS codes: 060.2370, 290.5830.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие автоматизированных и автономных систем приводит к необходимости контроля. В данной ситуации необходимы сенсоры, способные измерять различные физические величины. Зачастую эти измерения приходится проводить в сложных условиях: вредная для человека атмосфера, высокие температуры, внешние электромагнитные поля. Возникает необходимость контроля физических величин в различных участках пространства. Малый диаметр оптического волокна, его химическая устойчивость к агрессивным средам делает его подходящим для использования в схемах сенсоров. Оптическое волокно способно не только передавать сигнал, но и само

выступать в качестве чувствительного элемента. На его базе можно конструировать распределённые сенсоры.

При измерении силы тока, особенно больших его значений, стандартными измерителями возникает большая погрешность измерений из-за связи линии передачи тока с измерительным прибором. Использование оптических датчиков решает эту проблему.

Для создания оптоволоконных сенсоров силы тока используются различные эффекты. В первую очередь, сенсоры силы тока создавались на основе эффекта Фарадея.

Для создания такого типа сенсоров используются катушки оптического волокна, которые располагаются вокруг проводника с током.

Магнитное поле, образующееся вокруг проводника с током, приводит к появлению поворота плоскости поляризации оптического излучения, распространяемого в волокне.

Рециркуляционная схема существенно увеличивает чувствительность сенсора. Для волокна длиной 1000 м получена чувствительность 11,5 °/А, а для волокна длиной 500 м чувствительность составила 21,2 °/А [1].

Для измерения высоких значений электрической энергии и большей точности измерения силы тока используются катушки с меньшим диаметром кольца. Кроме этого, применяется оптическое волокно с большим двулучепреломлением. Так же исследуется работа сенсоров в диапазоне температур от –40 °С до 70 °С, рассматривается температурная компенсация. Проводится сравнение свойства сопротивления изгибу для скрученного волокна с большим двулучепреломлением и волокна с малым двулучепреломлением. Хорошие температурные характеристики, линейность и точность получены для измерения токов от 1 до 120 А. Погрешность измерений составила 0,2% [2].

Использование эффекта Фарадея в схеме сенсора с зеркалом для измерения силы тока в плазме проведено в работе [3].

При исследовании сенсоров силы тока детальное внимание необходимо уделять вопросу температуры. Прохождение токов по проводнику вызывает выделение тепла согласно закону Джоуля–Ленца. Это приводит к повышению температуры оптического волокна, которое используется в схеме сенсора. Зависимость линейного двулучепреломления от температуры приводит к увеличению погрешности измерений. Взаимосвязь температуры, двулучепреломления и погрешности исследована в работе [4]. Показано линейное изменение параметров.

Наиболее распространённые схемы волоконнооптических сенсоров на основе эффекта Фарадея предназначены для измерения постоянных токов. Сенсор, позволяющий проводить измерения на этом эффекте для переменных токов, представлен в работе [5]. Предлагается использовать отражённую моду и оптический поляризационный сплиттер. Рассмотрена работа сенсора при температурах от –45 °С до 85 °С, погрешность измерений составила 0,1%.

Ещё один метод создания волоконнооптических сенсоров основывается на эффекте Саньяка. Прототип сенсора на основе интерферометра рассмотрен в работе [6]. Продемонстрирована возможность применения данного сенсора при больших значениях силы тока, до 4000 А. Выполнялось тестирование работы сенсора для значений силы тока от 1 до 800 А. При этом полученное значение нелинейности было не более 0,5%.

Так же для создания волоконнооптических сенсоров тока используются решётки Брэгга [7]. Представленный в работе сенсор обладает внутренней температурной компенсацией. Сенсор оснащён подвижной и неподвижной металлическими деталями, между которыми возникает сила взаимодействия. Подвижная деталь прикреплена к свободному концу консоли, заключённой в соленоид. По соленоиду протекает измеряемый ток. Деформация консоли измеряется с помощью двух оптических волокон с решётками Брэгга. Применение дифференциального метода измерений позволяет обеспечить температурную компенсацию. С помощью подобного сенсора возможно измерять силу тока до 500 А. Смещение длины волны на решётке Брэгга составляет 382 пм.

Ещё один эффект, позволяющий создавать сенсоры силы тока, — магнитострикция. Так, в работе [8] представлена схема сенсора, позволяющего измерять как силу тока, так и температуру при помощи фиксированной на магнитостриктивном стержне решётки Брэгга. Исследована гибридная схема сенсора. С увеличением силы тока увеличивается смещение длины волны на решётке Брэгга. Тарфелон, из которого изготовлена решётка, имеет положительный коэффициент магнитострикции. Изменение силы тока на 27 А привело к смещению длины волны 0,449 нм, в то время как изменение температуры привело к изменению длины волны на 0,417 нм. Авторы исследовали возможности температурной компенсации.

Изучение вынужденного рассеяния Манделштама–Бриллюэна привело к появлению нового класса волоконнооптических сенсоров. Явление имеет характеристическую частоту, на которой наблюдается максимальное рассеяние. Эта частота изменяется при изменении температуры и давления. Кроме того, этот класс сенсоров позволяет создавать распределённые сенсоры, то есть измерять не только

величину воздействия, но и определять положение этого воздействия [9].

Существующие сенсоры, основанные на использовании вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, используют метод оптического временного домена. Однако возможно применение также и оптического частотного домена, что сокращает время измерения и повышает чувствительность сенсора [10]. Использование анализа бриллюэновского оптического частотного домена позволяет существенно увеличить соотношение сигнал/шум. Использование частотного анализа исключает сигналы, связанные со спонтанным рассеянием, которые в данном случае являются паразитными [11]. Согласно исследованиям, подобный сенсор способен регистрировать акустические волны [12].

Целью данной работы было моделирование рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне при наличии деформации, вызванной силой Ампера, для расчёта параметров сенсора силы тока.

ПРИНЦИП РАБОТЫ СЕНСОРА

Для демонстрации принципа работы сенсора получим связь между силой тока I и относительной деформацией оптического волокна ε . Работа сенсора силы тока основана на взаимодействии токов в проводниках. Проводник с током окружён магнитным полем. Воспользовавшись значением индукции магнитного поля, рассчитанным для длинного проводника, запишем значение силы Ампера F_A , возникающей между проводниками с током I и i :

$$F_A = iBl = \frac{\mu_0 I i l}{2\pi r}, \quad (1)$$

где B — индукция магнитного поля, Тл; l — длина проводника, м; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м; r — расстояние между проводниками, м.

Если токи I и i сонаправлены или направлены противоположно, сила Ампера будет направлена перпендикулярно каждому из параллельных проводников. В первом случае она будет являться силой притяжения, во втором — отталкивания. Если проводники не могут двигаться, то важно статическое действие силы, приводящее к деформации. Учитывая значение силы Ампера и закон Гука, получа-

ем связь силы тока I и относительной деформации:

$$I = \frac{2\pi r d E}{\mu_0 i} \varepsilon, \quad (2)$$

где d — диаметр оптического волокна; E — модуль Юнга материала образца; ε — относительная деформация образца.

Выражение (2) демонстрирует линейную зависимость силы тока от деформации, что удобно при проведении расчётов и снятии показаний сенсора [13].

На рис. 1 продемонстрировано размещение чувствительного элемента сенсора — участка оптического волокна с проводящей оболочкой.

Таким образом, одномодовое оптическое волокно с проводящей оболочкой используется в качестве чувствительного элемента сенсора силы тока.

Использование оптического частотного домена в принципиальной схеме сенсора продемонстрировано на рис. 2. Излучение узкополосного лазера мощностью 10 мВт направляется на сплиттер, позволяющий ввести его с разных концов оптического волокна. Так в первой ветви сплиттера формируется излучение накачки с постоянной мощностью $P_p(0)$, которое вводится в оптическое волокно при координате $z = 0$. Излучение из второй ветви сплиттера ослабляется с помощью аттенюатора и формирует пробное излучение. Затем его частота изменяется с помощью электрооптического модулятора, устанавливается переменная разность частот $\Delta f = f_p - f_s$ между излучением накачки и пробным излучением.

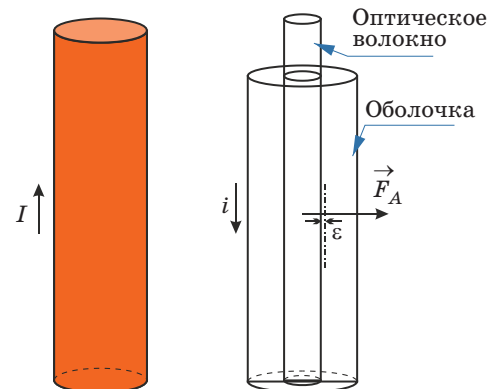


Рис. 1. Возникновение деформации оптического волокна под действием силы Ампера

Fig. 1. The occurrence of deformation of an optical fiber under the action of the Ampere force

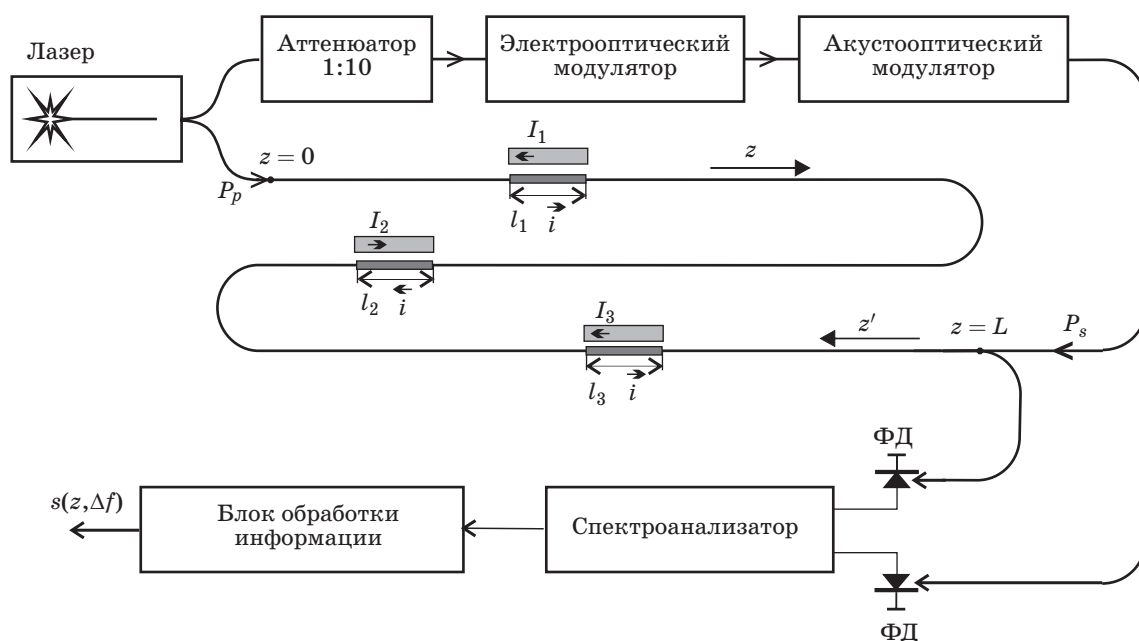


Рис. 2. Схема установки для измерений силы тока методом анализа бриллюэновского оптического частотного домена

Fig. 2. Setup for measuring current using the Brillouin optical frequency domain analysis method

Изменение частоты необходимо для получения вынужденного рассеяния. Затем излучение подвергается модуляции акустооптическим модулятором по гармоническому закону для создания частотного домена.

Модуляция мощности излучения производится по гармоническому закону. Пределы частот модуляции, а также шаг изменения частоты модуляции определяет пространственное разрешение сенсора. Полученное излучение мощностью $P_s(L)$ вводится с другой стороны оптического волокна при координате $z = L$.

Распространяясь навстречу друг другу, излучение накачки и пробное излучение испытывают нелинейное взаимодействие, в результате которого происходит образование акустической волны внутри оптического волокна, что приводит к тому, что излучение накачки теряет часть мощности и становится модулированным с той же частотой, что и пробное излучение. Величина этого ослабления зависит от разности частот излучений и близости его к значению характеристической частоте рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Необходимо отметить, что данное взаимодействие имеет резонансный характер. Оно описывается с помощью коэффициента усиления, который имеет гауссовскую зависимость. Максимум

коэффициента усиления достигается при совпадении разности частот излучений и характеристической частоты рассеяния. При этом излучение накачки будет иметь минимальное значение.

Для регистрации мощности излучения накачки, прошедшего по оптическому волокну, используются фотодиоды. Регистрация и дифференциальная обработка сигнала фотодиодов производится с помощью супергетеродина. опорным сигналом служит детектированное пробное излучение. Затем производится конвертация с помощью обратного преобразования Фурье, что позволяет сформировать передаточную функцию $s(z, \Delta f)$ [14].

На рисунке отмечены три области оптического волокна длиной l_1 , l_2 , l_3 , где оптическое волокно в проводящей оплетке закреплено вдоль токовой шины на некотором расстоянии и подвергается воздействию силы Ампера со стороны проводника с током.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЕНСОРА

Моделирование работы волоконнооптического сенсора проводилось для одномодового оптического волокна, диаметр которого 125 мкм (диаметр сердцевин 9 мкм). Модель построена

на основании трёхволнового взаимодействия, описанного в работе [14]. Оболочка волокна выполнена из металла, по которой пропускается ток i . Рассматривались различные покрытия с учётом проводимости, удельного сопротивления, теплоёмкости. Предпочтение отдано алюминиевому покрытию. В модели рассматривалось расположение закреплённого чувствительного оптического волокна на различных расстояниях проводника с измеряемой силой тока. Анализировалось расстояние для подбора предела измерений силы тока, а также увеличения чувствительности сенсора. При проведении моделирования рассматривалось наличие воздействия на трёх участках волокна. Проводился анализ длины взаимодействия.

Результат расчёта передаточной функции s в зависимости от координаты волокна z и разности частот лазеров Δf представлен на рис. 3. Значение передаточной функции на неподверженных внешнему воздействию участках волокна плавно уменьшается при увеличении длины волокна. Такое поведение функции отклика наиболее заметно для разности частот излучений, совпадающей с $f_{B,0}$ — характеристической частотой рассеяния в оптическом волокне, не подверженном внешнему воздействию. Но при некоторых значениях координаты z происходит скачкообразное изменение

значения передаточной функции. Изменение характеристической частоты вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна f_B на этих участках приводит к тому, что максимальное рассеяние происходит при других значениях разности частот излучения накачки и пробного излучения. Обнаружение участков с изменённой характеристической частотой позволяет обнаружить участки волокна, на которых произошло воздействие. Последующее исследование зависимости передаточной функции от разности частот излучений и определение минимума функции позволяет выяснить значение разности частот излучений с максимальным рассеянием. Найденное значение частоты используется для вычисления силы измеряемого тока.

Сила тока определяется зависимостью:

$$I = c(\Delta f - f_{B,0}), \quad (3)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

В данной модели, согласно (2):

$$c = \frac{2\pi r d E}{\mu_0 i f_\varepsilon},$$

где $f_\varepsilon = 500$ МГц — коэффициент деформации характеристической частоты рассеяния Мандельштама–Бриллюэна.

Значение коэффициента пропорциональности определяется как параметрами оптического волокна, так и характеристиками используемой принципиальной схемы сенсора. Если значения диаметра волокна, его модуль Юнга, коэффициент деформации характеристической частоты являются величинами постоянными для данного типа одномодового волокна, то силу тока в проводящей оболочке и расстояние r можно изменить.

При проведении моделирования учитывалось, что электрооптический модулятор позволяет получить минимальную разность частот между излучением накачки и пробным излучением $\Delta f = 0,5$ МГц. Используя значения расстояния $r = 0,5$ см и значение силы тока $i = 1,5$ А, получено значение коэффициента пропорциональности $c = 0,144 \times 10^{-3}$ А/Гц. В этом случае разрешающая способность измерений силы тока составляет 72 А. Максимальное значение измеренной силы тока зависит как от возможностей электрооптического

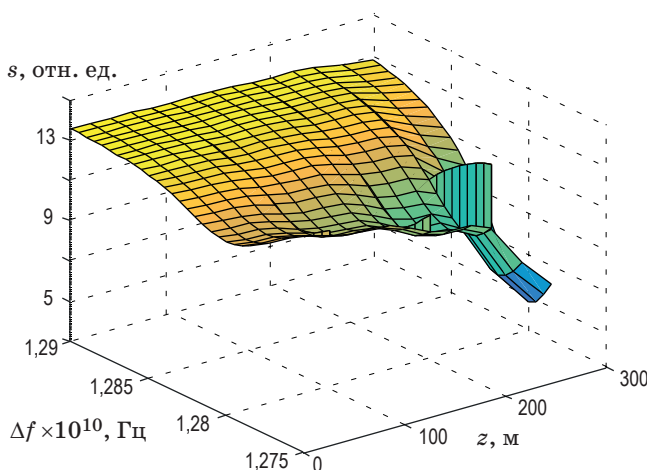


Рис. 3. Зависимость передаточной функции s от координаты оптического волокна z и от разности частот излучений Δf

Fig. 3. Dependence of the transfer function s on the optical fiber coordinate z and on the radiation frequency difference Δf

модулятора, так и от величины деформации оптического волокна. При моделировании принималось, что деформация не превышает предел пропорциональности. Максимальное значение силы тока, которое может измерять с помощью данной принципиальной схемы, составило 50 кА. Такое максимальное значение может быть достигнуто при значении расстояния $r = 2,0$ см, значение силы тока $i = 1$ А. В таком случае значение коэффициента пропорциональности составляет $c = 0,864 \times 10^{-3}$ А/Гц. Пространственное разрешение сенсора определяется частотой модуляции интенсивности пробного излучения. При использовании частот модуляции в пределах от 10 Гц до 80 МГц получено пространственное разрешение в 0,06 м. Однако при столь малых размерах области воздействия возможно существенное влияние краевых эффектов с переменной деформацией оптического волокна. Область воздействия следует делать длиннее. Следовательно, и частоты модуляции пробного излучения изменяются в меньшем диапазоне, что существенно сокращает время измерений. Так, при длине области взаимодействия в 0,5 м, частоты модуляции изменяются в пределах от 30 кГц до 70 МГц.

ДЕФОРМАЦИОННОЕ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Существенным неудобством использования вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна для измерений деформаций и связанной с ней силы тока, является зависимость характеристической частоты от температуры.

Изменение характеристической частоты вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна при изменении температуры и деформации вычисляется по формуле:

$$f_B = f_{B,0} + \epsilon f_\epsilon + f_T(t - t_0),$$

где $f_T = 1,18$ МГц/°C — температурный коэффициент характеристической частоты рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, t — температура среды, °C, $t_0 = 23$ °C.

Как показали предыдущие исследования, оптическое волокно на основе оксида кремния имеет одинаковый коэффициент усиления стоксовой волны при различных температурах и деформациях. Изменяется только значе-

ние частоты, на которой достигается максимум этого коэффициента. Изменение температуры волокна вносит значительные изменения в значение характеристической частоты, а температурное и деформационное воздействие различить невозможно.

Для оптических волокон с добавлением оксида германия при воздействии температуры и деформации происходит не только изменение характеристической частоты, но и величина рассеяния зависит от вида и степени воздействия. Так, при увеличении деформации рассеяние уменьшается, а при увеличении температуры растёт [15].

С учётом значений коэффициента усиления для германиевого оптического волокна проведено моделирование передаточной функции сенсора. Результат представлен на рис. 4.

Проанализировано значение передаточной функции на одном и том же участке при моделировании измерения силы тока и температурного воздействия. При воздействии, приводящем к одинаковому смещению частоты, значения передаточной функции различны, что позволяет разделить сигнал измеряемой силы тока от температурного, который в данном случае является паразитным.

При покрытии чувствительного волокна металлической оболочкой и пропускании через неё электрического тока волокно будет прогреваться. Моделирование работы сенсора проведено с учётом прогрева волокна. Изменение

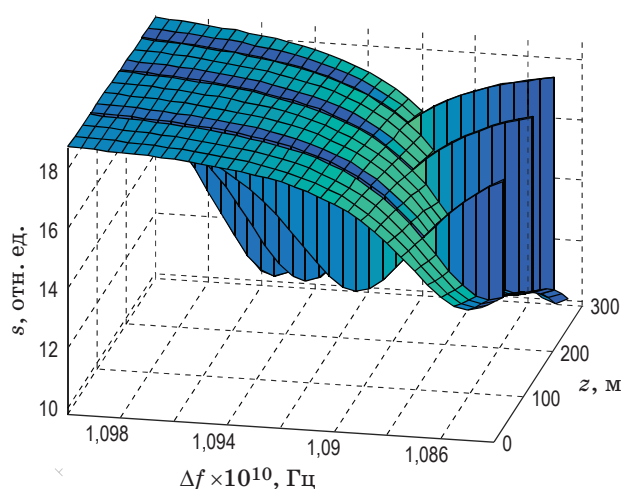


Рис. 4. Моделирование передаточной функции при температурном и деформационном воздействии

Fig. 4. Modeling of the transfer function under temperature and deformation influences

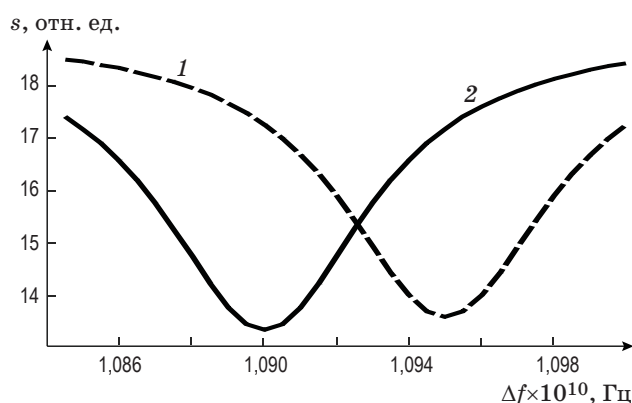


Рис. 5. Зависимость передаточной функции от разности частот накачки и пробного сигнала в случае деформационного (1) и температурного (2) воздействия

Fig. 5. Dependence of the transfer function on the frequency difference pumping and test signal in the case of deformation (1) and temperature (2) influence

температуры волокна происходит одновременно с его деформацией.

Совместное воздействие приводит к изменению разности частот излучений Δf , которое происходит с учётом роста температуры волокна и деформации, вызванной действием силы Ампера. Выполненное моделирование вызывает необходимость осуществлять дифференциальное измерение: при включённом токе в оболочке и при выключенном. Первое позволит зафиксировать минимум передаточной функции при разности частот Δf с суммарным сдвигом частот (рис. 5а), второе позволит

зафиксировать значение разности частот, соответствующее изменению только температуры (рис. 5б). Разность значений даст возможность вычислить силу тока по формуле (3).

В данной модели получена температура $t = 65^\circ\text{C}$, вычислена сила тока, равная $I = 7,3\text{ кА}$, что соответствовало заданному при моделировании значению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование работы сенсора силы тока на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Исследовано поведение передаточной функции в зависимости от длины оптического волокна и разности частот пробного излучения и излучения накачки. Применение в качестве чувствительного волокна с оксидом германия позволяет разделить температурный и деформационный сигнал. Проведено моделирование работы сенсора с предельным значением измеряемой силы тока в 50 кА, что вдвое превышает предельное значение измеряемой силы тока в заявленных ранее сенсорах такого типа, а также получением чувствительности в 72 А. Выбор диапазона изменения частоты модуляции 100 кГц — 300 МГц позволяет сократить время измерений при пространственном разрешении в 0,5 м. По результатам моделирования предложен дифференциальный способ измерений, позволяющий избегать погрешности измерений, связанной с увеличением температуры оптического волокна.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Du J., Tao Y., Liu Y. et al. Highly sensitive and reconfigurable fiber optic current sensor by optical recirculating in a fiber loop // *Opt. Express*. 2016. V. 24. № 16. P. 17980–17988. <https://doi.org/10.1364/OE.24.017980>
2. Yang F., Hou X., Huang Y. et al. Optical fiber current sensor with small size for the high voltage watt-hour meter // *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2016*. SPIE. Beijing, China. October 25, 2016. V. 10158. P. 172–177. <https://doi.org/10.1117/12.2246745>
3. Wuilpart M., Vanus B., Andrasan A. et al. Study of a fibre optics current sensor for the measurement of plasma current in ITER // *Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors*. Limerick, Ireland. May 31 — June 3, 2016. *Proc. SPIE*. V. 9916-OL. P. 78–81. <https://doi.org/10.1117/12.2236814>
4. Song C., Zhizhong G., Guoqing Z. et al. The analysis on temperature characteristic of fiber optic current sensor ratio error // *2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*. IEEE. Qinhuangdao, China. September 18–20, 2015. P. 781–785. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2015.171>
5. Prakash A., Das S., Kumar M. et al. Development of fiber optic current sensor for electric power industry application // *International Conference on Fibre Optics and Photonics*. Chennai, India. December 9–12, 2012. TPo. 26. <https://doi.org/10.1364/PHOTONICS.2012.TPo.26>
6. Bohnert K., Frank A., Yang L. et al. Polarimetric fiber-optic current sensor with integrated-optic polarization splitter // *Journal of Lightwave Technology*. 2019. V. 37. № 14. P. 3672–3678. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2919387>
7. Yao Y., Zhou C., Zhang et al. A fiber Bragg grating direct current sensor with temperature compensation based on electromagnetic force // *Advances in Mechanical Engineering*. 2015. V. 7. № 3. P. 1687814015572516. <https://doi.org/10.1177/1687814015572516>
8. De Nazaré F.V., Werneck M.M., de Oliveira R.P. et al. Development of an optical sensor head for current and

- temperature measurements in power systems // Journal of Sensors. 2013. V. 2013. Электронный ресурс URL: <https://www.hindawi.com/journals/js/2013/393406> (accessed 02/09/2021). <https://doi.org/10.1155/2013/393406>
9. Polyakov A.V., Ksenofontov M.A. High-voltage monitoring with a fiber-optic recirculation measuring system // Measurement Techniques. 2020. V. 63. № 2. P. 117–124. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01759-3>
10. Soto M.A., Chin S., Thévenaz L. Double-pulse Brillouin distributed optical fiber sensors: analytical model and experimental validation // OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. Beijing, China, October 17, 2012. Proc. SPIE. V. 8421. P. 842124. <https://doi.org/10.1117/12.974964>
11. Thévenaz L., Soto M.A. Rating the performance of a Brillouin distributed fiber sensor // OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, Beijing, China, November 7, 2012. Proc. SPIE V. 8421. P. 8421A7. <https://doi.org/10.1117/12.975290>
12. Bao X., Zhou Z., Wang Y. Distributed time-domain sensors based on Brillouin scattering and FWM enhanced SBS for temperature, strain and acoustic wave detection // PhotoniX. 2021. V. 2. P. 1–29. <https://doi.org/10.1186/s43074-021-00038-w>
13. 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. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252>
Yanukovich T.P., Polyakov A.V. Simulation of distributed current sensor based on optical fiber deformation // Devices and Methods of Measurements. 2019. V. 10. № 3. P. 243–252. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252>
14. Янукович Т.П., Поляков А.В. Компьютерное моделирование взаимодействия при вынужденном рассеянии Мендельштама–Бриллюэна в оптическом волокне // Тез. докл. II Международной научно-практической конференции “Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA’2020)”. Минск, Республика Беларусь 23–24 апреля 2020. С. 116–120. Yanukovich T.P., Polyakov A.V. Computer simulation of interaction during stimulated Mendelshtam–Brillouin scattering in an optical fiber [in Russian] // II International Scientific and Practical Conference Computer Technologies and Data Analysis (CTDA’2020) (Abstracts of reports). Minsk, Republic of Belarus. April 23–24. 2020. P. 116–120.
15. Янукович Т.П., Исмаилова А.С. Моделирование работы оптоволоконного сенсора температуры и деформации с использованием рассеяния Мендельштама–Бриллюэна // Тез. докл. III Международной научно-практической конференции “Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA’2022)”. Минск, Республика Беларусь. 21–22 апреля 2022. С. 257–260. Yanukovich T.P., Ismayilova A.S. Modeling the operation of a fiber optic temperature and strain sensor using Mandelstam–Brillouin scattering [in Russian] // III International Scientific and Practical Conference Computer Technologies and Data Analysis (CTDA’2022) (Abstracts of reports). Minsk, Republic of Belarus. April 21–22 2022. P. 257–260.

АВТОРЫ

Татьяна Петровна Янукович — канд. физ.-мат. наук, доцент, заместитель декана факультета радиопизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета, Минск, 220050, Республика Беларусь; Scopus ID: 55965684500; <https://orcid.org/0000-0003-1739-0941>; YanukovichTP@bsu.by

Анастасия Сергеевна Исмаилова — ассистент кафедры физики и аэрокосмических технологий факультета радиопизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета, Минск, 220050, Республика Беларусь; <https://orcid.org/0009-0007-4213-3468>; anastasia.ismayilova.jb@gmail.com

AUTHORS

Tatiana P. Yanukovich — PhD in Physics and Mathematics, Docent, Deputy dean at Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belorussian State University, Minsk, 220050, Republic of Belarus; Scopus ID: 55965684500; <https://orcid.org/0000-0003-1739-0941>; YanukovichTP@bsu.by

Anastasiya S. Ismayilova — Assistant Lecturer at Department of Physics and Aerospace Technologies Faculty of Radiophysics and Computer Technologies Belorussian State University, Minsk, 220050, Republic of Belarus; <https://orcid.org/0009-0007-4213-3468>; anastasia.ismayilova.jb@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13.11.2023
Одобрена после рецензирования 15.05.2024
Принята к печати 30.08.2024

The article was submitted to the editorial office 13.11.2023
Approved after review 15.05.2024
Accepted for publication 30.08.2024