УДК 681.7.068:528.88
DOI: 10.31673/2412-9070.2025.024101

В. Ф. ЗАЇКА, доктор техн. наук, професор;
ORCID: 0000-0002-2394-4317
М. П. ТРЕМБОВЕЦЬКИЙ, доктор техн. наук, професор;
ORCID: 0000-0002-5240-7131
Д. О. БИРГАЗОВ, аспірант,
ORCID: 0009-0005-7901-2382
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ПОТЕНЦІЙНІ ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОЇ ПАРАДИГМИ ПРОЄКТУВАННЯ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

У статті розглянуто використання зворотнього розсіювання світлових хвиль з оптичного волокна в системі розподіленого волоконно-оптичного зондування для вимірювання різних параметрів. Релеївське, Бріллюенівське та Раманівське зворотні розсіювання забезпечують різну чутливість до різних вимірюваних величин і привертають увагу дослідників.

Враховуючи можливості системи, що поєднує три вищезгадані принципи, вона може ефективно розділити вимірювання деформації і температури, а також забезпечити вимірювання як динамічних, так і статичних параметрів. Однак, комбінована система є надзвичайно складною, якщо три системи є незалежними одна від одної.

З метою моделювання концепції вимірювальної системи, в дослідженні використовувались два послідовних імпульси для реалізації Бріллюенівського підсилення Релеївського зворотного розсіювання світлових хвиль для об'єднання методів Релея і Бріллюена. Для демодуляції комбінаційного Раманівського розсіювання двох імпульсів використовували 3-бітний метод імпульсного кодування, що дозволяє інтегрувати в гібридну систему оптичну рефлектометрію комбінаційого розсіювання в часовій області.

По результатам роботи наведені переваги використання комбінованої вимірювальної схеми, яка реалізує одночасне вимірювання декількох параметрів і досягається сприятлива точність вимірювання.

Ключові слова: вимірювання оптоволокна, волоконно-оптична система зондування, розподілене вимірювання оптичного волокна, комбінаційне розсіювання, сенсорний датчик волокна.

Вступ

Оптоволоконний кабель в режимі реального часу може надавати інформацію про навколишнє середовище різних об'єктів, таких як: телекомунікаційні та залізничні транспортні системи, великі мости і будівлі, та оцінювати їх технічний стан, що важливо при побудові концепції розумного міста на основі Інтернету речей.

Існують три технології вимірювання, що використовують різні зворотньо розсіяні світлові хвилі, вони можуть бути підключені до оптичного волокна та можуть спростити вимірювання шляхом зондування. Така система вимагатиме лише одного джерела світла, двох приймальних кінців і одного доступу до волокна для передачі світлової хвилі. Таким чином, розподілену систему зондування можна використовувати для моніторингу великих споруд у режимі реального часу, автоматизованого управління та охорони периметра. Ця технологія може стати потужним інструментом для полегшення побудови розумних міст.

Серед різних волоконно-оптичних вимірювальних систем є прилади, які використовують зворотне розсіювання Релея (OTDR), це добре відома оптична рефлектометрія у часовій області, яка використовується для вимірювання оптичних параметрів та вібрації; оптичний аналіз у часовій області Бріллюена (BOTDR), який використовується для вимірювання температури

© Заїка В.Ф., Трембовецький М. П., Биргазов Д. О., 2025

та статичної деформації; Комбінаційне розсіювання Рамана (ROTDR) можна використовувати в комбінації оптичної рефлектометрії у часовій області для вимірювання розподіленої температури.

Постановка проблеми. Точний метод вимірювання в реальному часі вимагає одночасних тестів на великій відстані вздовж оптичного волокна, але більшість систем можуть вимірювати лише один тип параметрів, що обмежує їх використання.

Аналіз останніх досліджень. Розподілена сенсорна система може поєднувати три різні шаблони розсіювання та успішно працювати для вимірювання кількох параметрів одночасно, демонструючи свою здатність вимірювати температуру, деформацію та вібрацію вздовж одномодового волокна.

В оптичній рефлектометрії у часовій області найбільшим фактором втрат в оптичному волокні є розсіювання. У волокні світло розсіюється у всіх напрямках, зокрема частково розсіюється назад до джерела, система використовує це "назад розсіяне світло" для проведення вимірювань разом з відбитим світлом від з'єднувачів або сколених кінців волокна.

Оптична рефлектометрична система складається з потужного лазерного передавача, що надсилає світловий імпульс по оптоволокну. Зворотно-розсіяне та відбите світло повертається в прилад по волокну і прямує до чутливого приймача через відгалужувач на вході приладу. Для кожного вимірювання лазер посилає імпульс дуже високої потужності і вимірює світло, що повертається з плином часу. У будь-який момент часу фотоприймач бачить світло, розсіяне від імпульсу, що проходить через ділянку волокна. Оптичний імпульс як «віртуальне джерело», що створюється розсіюванням тестує все волокно між собою та приладом у міру його просування вниз по волокну. Оскільки можна калібрувати швидкість імпульсу при його проходженні по волокну за показником заломлення скла в серцевині волокна, оптична система може зіставити те, що вона бачить у зворотному розсіяному світлі, з фактичним розташуванням у волокні. Таким чином, система може відображати кількість розсіяного світла в будь-якій точці волокна по його довжині.

Основна частина

Дослідити комбіновані метдоди вимірювання розподіленої волоконно-оптичної системи. Виконати моделювання вимірювання отповолокна через залучення додаткових методів, таких як Бріллюенівськоий оптичний аналіз у часової області за допомогою Раманівського випромінювання з субметровою роздільною здатністю. Процес конфігурування нової концепції для вимірювання оптичних параметрів приведений нижче.

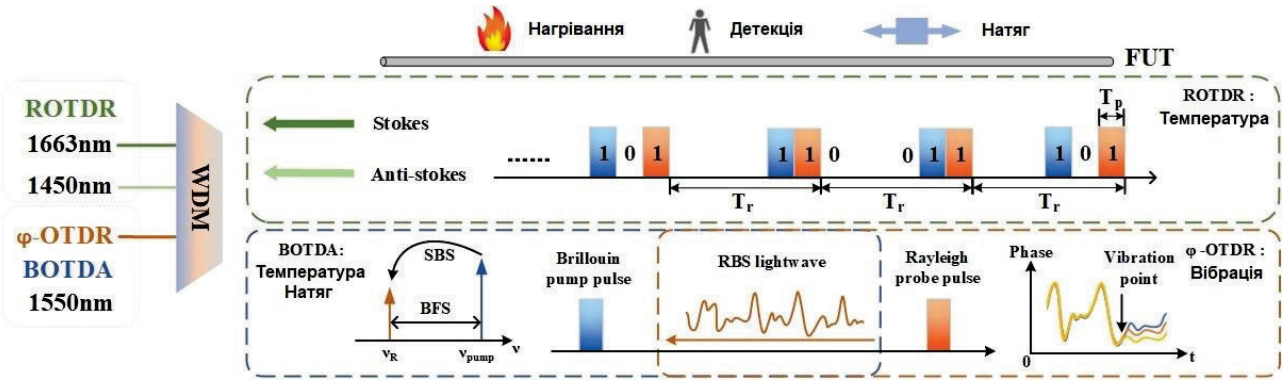

Рис. 1. Схема розподіленної вимірювальної системи

Просторова роздільна здатність BOTDA визначається довжиною імпульсів, що використовуються як сигнал накачування лазера, приблизно 1 метр на 10 нс. Більш короткі імпульси призводять до вищої роздільної здатності, однак цей підхід має внутрішнє обмеження щодо невизначеності. Причина полягає в тому, що спостережуваний спектр посилення Бріллюена розширюється для більш коротких імпульсів, це розширення призводить до більшої невизначеності у вимірюванні зсуву Бріллюена. Природну межу можна знайти, коли спектри імпульсу накачування та природного посилення Бріллюена показують порівнянну ширину смуги, що

відповідає імпульсам накачування тривалістю ~10 нс або ~1 метр. Це відоме як компроміс роздільної здатності та невизначеності. У системах дальнього радіусу дії цей компроміс погіршується додатковим шкідливим ефектом самомодуляції фази, яка вводить додаткове спектральне розширення імпульсів під час їхнього проходження по волокну.

Щоб уникнути неминучих фізичних обмежень, пов'язаних із скороченням імпульсу накачування в установках з високою роздільною здатністю, може бути використана техніка диференціальної широтно-імпульсної пари. Ця техніка дозволяє підвищити роздільну здатність волоконних датчиків BOTDA без розширення спектру підсилення та уникнути проблеми самофазової модуляції, принцип роботи заснований на відніманні між трасами посилення, отриманими з дещо різною шириною імпульсу. Тоді просторова роздільна здатність визначається диференціальною шириною між імпульсами, тоді як розширення коефіцієнта підсилення залишається обмеженим, оскільки використовувані імпульси завжди набагато довші, ніж час життя фонограми, зазвичай у 4-6 разів більше. Ефект самофазової модуляції в цих схемах також повинен бути залишковим для типових рівнів потужності, що використовуються.

Звичайні конфігурації BOTDA також мають обмеження щодо робочого діапазону. Затухання волокна неминуче зменшує посилення вздовж волокна, що призводить до втрати контрасту та збільшення невизначеності на дальньому кінці. Дальні вимірювання, понад 60 км у датчиках BOTDA переважно виконуються за допомогою слабкого розподіленого підсилення вздовж чутливого волокна, яке зазвичай досягається за допомогою стимульованого комбінаційного посилення. Раманівська технологія допомагає забезпечувати хороший спосіб підтримання рівеня потужності імпульсу накачування вздовж волокна, а отже, досягнутий контраст підсилення Бріллюена. Однак він також має неминучі обмеження, а саме пов'язані з передачею шуму відносної інтенсивності (ШВІ) від накачки Рамана до зонда Бріллюена. Наскільки нам відомо, найкраща роздільна здатність, продемонстрована на даний момент у датчиках із діапазоном ≥100 км, була порядку 2 метрів. Хоча цієї продуктивності достатньо для більшості застосувань, розширення роздільної здатності до субметрових значень у конфігураціях за допомогою вимірювання Рамана також бажано.

У новому дослідженні можна використовувати нову техніку з усунення шумів у розподіленому сенсорі Бріллюена з підтримкою технології вимірювання Рамана та продемонструвати можливість досягнення субметрової роздільної здатності в датчику з діапазоном 100 км.

Експериментальна модель процедури дешумування ШВІ зображена на рис. 2. Це дуже схоже на схему BOTDA за допомогою технології Рамана описану вище, за винятком кількох відмінностей. Перша відмінність полягає в тому, що елементом, який створює імпульс накачування є напівпровідниковий оптичний підсилювач замість електрооптичного модулятора та нелінійного дзеркала оптичної петлі. Це полегшує роботу установки, в той час як коефіцієнт загасання залишається дуже високим >50 дБ. Це також дозволяє зменшити один каскад підсилення в гілці накачування, що трохи покращує відношення сигнал/шум. Крім того, високий коефіцієнт загасання цих імпульсів допомагає покращити спектральну чистоту у вимірюваннях, виконаних за допомогою конфігурації усунення шумів.

Друга відмінність походить від використання лазера з довжиною хвилі 1548,5 нм, коротшу ніж лазер, використаний за допомогою Рамана. По суті, це не має жодного впливу на експеримент, за винятком того, що фільтрація також зсувається, а крива зсуву Бріллюена зсувається вгору відносно значень для котушок волокна. Інша ключова відмінність від установки попередньої роботи, полягає в процедурі шумозаглушення, яка може бути запропонована для максимального усунення ефекту передачі ШВІ від оптичного лазера Рамана до зонда Бріллюена. Використання цього алгоритму є виправданим, оскільки зазвичай ці датчики не призначені для виявлення будь-яких періодичних коливань деформації або температури. Зазвичай вони пристосовані для виявлення та вимірювання гарячих точок або особливо напружених ділянок малої довжини (наприклад, витоків трубопроводу, тріщин у конструкціях тощо), або у будь-якому разі неперіодичних змін у зсуві Бріллюена. Тому різкі піки в спектрах слідів, що відпові-

дають періодичним коливанням слідів, можна безпечно виявити та усунути на етапі обробки, не впливаючи на результати вимірювань.

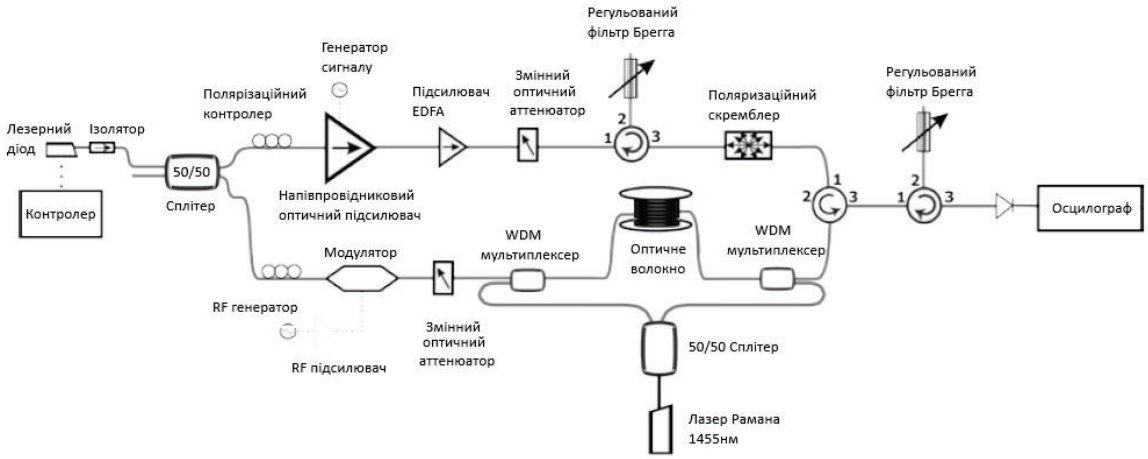

Рис. 2. Експериментальна модель дешумування

Спектр інтенсивності шуму волоконних лазерів Рамана, що може бути використаний в експерименті повинен бути потужностью 500 мВт. Оскільки оптичний лазер Рамана показує ланцюжок мод у спектрі, його вихід відображає деякі квазіперіодичні збурення інтенсивності на багатьох частотах вільного спектрального діапазону лазера. Ці квазіперіодичні збурення передаються в сигнал зонда, і їх може бути нелегко усереднити в процедурі збору даних, якщо період запуску збору є кратним часу обігу резонатора. У спектрі трасування цей ефект проявляється як дискретні «піки», які можна легко видалити за допомогою техніки цифрового фільтрування.

У нашому випадку процедура видалення квазіперіодичного шуму з рефлектограми може бути реалізована наступним чином: на початковому етапі виконується швидке перетворення Фур'є (ШПФ) вихідної рефлектограми, а також її попередньої та наступної рефлектограм у частотній розгортці. Ці спектри усереднюються для отримання «середнього» спектра траси. До цього «середнього» спектру застосовується алгоритм пошуку піків, який виявляє частотні позиції, що демонструють набагато більшу енергію в чотирьох найближчих частотних діапазонах. Поріг для такої класифікації встановлений на рівні 1% від нульової складової ШПФ. Ці частотні позиції (і відповідні їм симетричні в спектрі) прирівнюються до нуля в трасі ШПФ. Після цього траса знову відновлюється за допомогою зворотного ШПФ. Ця процедура вносить додатковий числовий шум у трасу. Однак цей шум дуже малий, і загальним результатом є покращення якості сигналу. Крім того, на відміну від інших методів, ця процедура не впливає на фазу і позиційна інформація траси повністю збережена. Для максимального придушення позасмугового шуму на трасі виконується додаткова низькочастотна фільтрація на частоті зрізу детектора, щоб забезпечити максимальне придушення позасмугового шуму при реєстрації.

Диференціальні вимірювання з просторовою роздільною здатністю 1 метр отримані шляхом віднімання трас, отриманих з імпульсами накачування 65 і 55 нс, роздільна здатність 0,8 і 0,5 метра отримана шляхом віднімання трас, отриманих з імпульсами накачування 65 і 57 нс та 65 і 60 нс відповідно. У всіх випадках час спаду імпульсів накачування, який, як відомо, впливає на роздільну здатність, не перевищує 2 нс. При таких налаштуваннях час спаду імпульсів накачки не повинен мати значного впливу на досяжну роздільну здатність. Проста процедура нормалізації гарантує, що віднімання коефіцієнта підсилення є стійким до малих коливань потужності накачки (траси підсилення нормалізуються до відповідної тривалості імпульсів). Ця процедура є коректною доти, доки ефекти виснаження накачки можна вважати незначними. У нашому випадку потужність зонда має бути встановлена нижче 90 мкВт, що у випадку симетричних бічних смуг у зонді забезпечує відсутність виснаження навіть для цієї дуже великої довжини.

У результаті високої роздільної здатності за допомогою Раманівського випромінювання в BOTDA ділянка 100-кілометрового волокна складається з чотирьох котушок SMF по 25 км з ефективною площею 70 мкм^2 і аналогічним зсувом частоти Бріллюена, розташованим приблизно на 10,7 ГГц для довжини хвилі лазера ~1548,5 нм. Пікова потужність лазера накачки та зонда становить 6 мВт і 81 мкВт відповідно, із 500 мВт загальної потужності лазера Рамана, ~250 мВт на кожну сторону. З точки зору потужності лазера Бріллюена, ми могли б підвищити рівень потужності до значення приблизно в 3 рази вище, ніж значення, використані в інших дослідженнях для 2-метрової конфігурації на тому ж діапазоні 100 км. Це пояснюється тим, що ефект самомодуляції фази масштабується протилежно ширині імпульсу накачування. Оскільки імпульси в 3 рази довші, потужність можна збільшити в 3 рази без додавання додаткового спектрального розширення. Поєднуючи збільшення пікової потужності та збільшення ширини імпульсу, значення підсилення приблизно в 10 разів перевищують попередні роботи, потужність зонда також збільшується. Це підкоряється ретельному налаштуванню робочої точки модулятора, щоб мінімізувати дисбаланс потужності між двома бічними смугами. З ідеально симетричними бічними смугами потужність зонда теоретично може бути підвищена до значення, близького до порогового значення стимульованого Брюллієновського розсіювання, без виникнення небажаних проблем виснаження. Ці зміни призводять до збільшення SNR трасування >10 дБ.

Висновки

Сенсорне, комбіноване вимірювання отповолокна стає можливим через залучення додаткових методів, таких як Бріллюенівськоий оптичний аналіз у часової області за допомогою Раманівського випромінювання з субметровою роздільною здатністю.

Оптичний аналіз у часовій області Бріллюена (BOTDA) дозволяє розподілено вимірювати температуру та деформацію на звичайних одномодових волокнах. Необхідним фізичним явищем для розробки BOTDA є нелінійний оптичний ефект, який називається стимульованим розсіянням Бріллюена, який створює зустрічне вузькосмугове посилення пробного сигналу всередині волокна коли інтенсивне когерентне світло накачки вводиться через один із кінців волокна. Розподілені вимірювання стають можливими завдяки пульсуванню сигналу накачування та вимірюванню зміни сигналу зонда як функції часу проходження імпульсу накачування в волокні.

З використанням метдода Раманівського накачування сигналу на основі напівпровідникового лазера на кінці зонда та процедурою усунення шумів від оптичного лазера Рамана до зонда Бріллюена отримуєм сенсорні датчики для виявлення та вимірювання гарячих точок або особливо напружених ділянок волокна.

Використання ціх алгоритмів є виправданим, оскільки ці отпичні сенсорні датчики можуть бути призначені для виявлення будь-яких періодичних коливань деформації або температури на ділянці оптоволоконного кабелю. Зазвичай вони пристосовані і для виявлення та вимірювання гарячих точок або особливо напружених ділянок малої довжини (наприклад, витоків трубопроводу, тріщин у конструкціях тощо).

Ця методика має потенціал для забезпечення хороших результатів у субметровому діапазоні, особливо коли використовуються вимірювання Рамана в налаштуванні за допомогою напівпровідникових лазерів отпичної рефлектометрії. У дослідженні може використовуватись звичайне одномодове волокно, як датчик для отримання інформації про температуру, деформацію та вібрацію оптичного волокна довжиною до 100 кілометрів.

Список літератури

1. Wang, B. Z. et al. High-sensitivity distributed dynamic strain sensing by combining Rayleigh and Brillouin scattering. Opto-Electronic Advances 3, 20001301-20001315 (2020). doi: 10.29026/oea.2020.200013

2. Sun, X. Z. et al. Ultra-long Brillouin optical time-domain analyzer based on distortion compensating pulse and hybrid lumped-distributed amplification. APL Photonics 7, 126107 (2022). doi: 10.1063/5.0126068

3. Zan, M. S. D. B., Tsumuraya, T. & Horiguchi, T. The use of Walsh code in modulating the pump light of high spatial resolution phase-shift-pulse Brillouin optical time domain analysis with non-return-to-zero pulses. Measurement Science & Technology 24, 094025 (2013).

4. X. Angulo-Vinuesa, S. Martin-Lopez, J. Nuno, P. Corredera, J. D. Ania-Castañón, L. Thévenaz, and M. Gonzalez-Herraez, "Raman assisted Brillouin distributed temperature sensor over 100 km featuring 2 m resolution and 1.2 °C uncertainty," J. Lightwave Technol. 30(8), 1060–1065 (2012).

5. A. Minardo, R. Bernini, and L. Zeni, "Numerical analysis of single pulse and differential pulse-width pair BOTDA systems in the high spatial resolution regime," Opt. Express 19(20), 19233–19244 (2011).

6. F. Rodriguez-Barrios, S. Martin-Lopez, A. Carrasco-Sanz, P. Corredera, J. D. Ania-Castañón, L. Thévenaz, and M. Gonzalez-Herraez, "Distributed Brillouin fiber sensor assisted by first-order Raman amplification," J. Lightwave Technol. 28(15), 2162–2172 (2010).

V. Zaika, M. Trembovetskyi, D. Byrgazov

POTENTIAL PROBLEMS OF USING THE MODEL-ORIENTED PARADIGM FOR MOBILE NETWORK DESIGN

The article discusses the use of backscattering of light waves from an optical fiber used in a distributed fiber-optic sensing system to measure various parameters. Rayleigh, Brillouin, and Raman backscattering provide different sensitivity to different measured quantities and attract the attention of researchers. Moreover, using a fiber optic cable in real time can provide information about the environment of various objects, such as: telecommunications and rail transport systems, large bridges and buildings, and assess their technical condition, which is important when building a smart city concept based on the Internet of Things.

Considering the capabilities of a system that combines the three principles mentioned above, it can effectively separate the measurement of strain and temperature, and provide measurements of both dynamic and static parameters. However, the combined system is extremely complex if the three systems are independent of each other.

In order to simulate the concept of the measurement system, the study used two consecutive pulses to implement Brillouin amplification of Rayleigh backscattering of light waves to combine the Rayleigh and Brillouin methods. For the demodulation of the Raman scattering of the two pulses, a 3-bit pulse coding method was used, which allows integrating optical Raman reflectometry in the time domain into the hybrid system.

Herein, we propose a hybrid distributed fiber-optic sensing system that combines systems using three different scattered lightwaves via a single-end scheme. Two successive pulses are launched into the system to realise Brillouin amplification of the Rayleigh backscattering lightwave: a Rayleigh probe pulse of φ-OTDR for vibration measurement, followed by a Brillouin pump pulse of a single-end Brillouin reflectometry system for strain/temperature measurement. The Rayleigh backscattering lightwave of the probe pulse serves as a continuous probe wave for the single-end Brillouin reflectometry. For Raman reflectometry, a wavelength division multiplexer (WDM) is used to obtain Stokes and anti-Stokes Rayleigh scattering lightwaves. Because a pulse pair is used in the system and the frequency deviation is not sufficiently large to be distinguished in the Raman reflectometry system, a 3-bit pulse coding method is employed to demodulate the Rayleigh scattering lightwave of the two pulses.

The results of the work show the advantages of using a combined measuring scheme, how it implements simultaneous measurement of several parameters and achieves favorable measurement accuracy.

Keywords: fiber optic measurement, fiber optic sensing system, distributed fiber optic measurement, Raman scattering, fiber sensor.