

АНАЛИЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТЕЙ

С.Н. Нигматуллин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В этой статье представлен анализ волоконно-оптических методов измерения скорости потока жидкости, сравнение методов точечного и распределенного зондирования с использованием адресных волоконных брэгговских структур.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики; адресные волоконно-брэгговские структуры; волоконные брэгговские решетки; точечное и распределенное зондирование; скорость потока жидкости.

Введение

Высокоточное измерение скорости и направления потока в трубопроводах в условиях взрывоопасности, электромагнитных помех (ЕМИ) и агрессивных сред является критической задачей для нефтегазовой и химической промышленности, а также бортовых систем летательных аппаратов [1]. Настоящий анализ рассматривает применение волоконно-оптических технологий (ВОТ) для мониторинга в реальном времени указанных параметров за период 2011–2025 гг., фокусируясь на метрологических характеристиках и перспективах внедрения.

Анализ методов измерения скорости потока жидкости

Точечные волоконно-оптические методы контроля скорости потока, включая лазерную доплеровскую велосиметрию (LDV) и анемометры на основе волоконно-брэгговских решёток (ВБР), реализуют локальные измерения через доплеровский сдвиг частоты, вызванные нагревом, что позволяет достигать разрешения 0,012 м/с для прозрачных сред, но ограничиваться оптической прозрачностью жидкости и чувствительностью к рассеянию, а также требует регулярной калибровки в агрессивных средах [2]. Тепловые анемометры на волоконно-брэгговских решётках (ВБР) используют джоулев нагрев для регистрации охлаждения потоком, достигая чувствительности 0,091 нм/(м/с) при скоростях до 2,5 м/с и энергопотреблении до 60 мВт/м. Однако они подвержены засорению и требуют температурной компенсации при температурах выше 100 °С [3]. Интерферометрические микроволоконные сенсоры типа Фабри-Перо измеряют скорость 0,1–10 мм/с с разрешением 0,1 мкм, интегрируясь в микрофлюидные устройства, но демонстрируют ограниченную устойчивость к вибрациям [4].

Распределенные волоконно-оптические методы, такие как рамановская оптическая рефлектометрия во временной области (ROTDR), оптический анализ Бриллюэна во временной области (BOTDA), фазовая оптическая рефлектометрия во временной области (ф-OTDR) и оптическая частотная рефлектометрия или рефлектометрия в области Фурье (OFDR). BOTDA обеспечивает более точные измерения и большие длины мониторинга по сравнению с рамановскими датчиками, однако требует продолжительного времени измерения (порядка минут). Ограничивающим фактором для методов на основе

рамановского и бриллюэновского рассеяния является чрезвычайно низкая интенсивность рассеянного света. При более высокой интенсивности рассеяния релеевское рассеяние в ф-OTDR больше подходит для длинных участков мониторинга с высокоточными количественными измерениями температуры. Разрешение методов временной области ограничено минимальной длительностью светового импульса (~10 нс), обеспечивая продольное разрешение около одного метра.

Этот предел преодолевается в OFDR, где обратно рассеянный свет от волокна объединяется со светом от эталонного плеча, создавая интерференционный сигнал, содержащий информацию о местоположении и величине отраженных явлений по длине волокна. Преобразование Фурье комплексного коэффициента отражения в частотной области позволяет получить коэффициент отражения как функцию длины. Когерентная OFDR достигает субмиллиметрового пространственного разрешения на расстоянии десятков-сотен метров волокна с температурным разрешением <math><1\text{ }^\circ\text{C}</math>, что идеально подходит для мониторинга потока на коротких участках трубопровода.

Адресные комбинированные волоконные брэгговские структуры (АКВБС) реализуют квазираспределенный мониторинг через мультиплексирование в пространстве длин волн (WDM), времени (TDM) и частоты (FDMA), обеспечивая опрос до 100 сенсорных точек [6-7]. Принципиальным преимуществом АКВБС является применение радиофотонной адресной интеррогации (РФАИ), которая транслирует спектральное положение брэгговского резонанса в радиочастотную область, обеспечивая иммунитет к электромагнитным помехам и снижая требования к полосе оптического источника. Метод постоянной мощности нагрева позволяет регистрировать изменение разности температур между опорным и нагреваемым датчиками, достигая диапазона измерений 50–1000 мкл/мин с ошибкой <math><1\%</math>. Интеграция адресного комбинированного интерферометра Фабри-Перо (АКИФП) в структуру сенсора повышает точность за счёт одновременной регистрации температуры двумя различными принципами детектирования в одной пространственной точке.

Заключение

Анализ подтверждает превосходство распределенных и квазираспределенных ВОТ (OFDR/АКВБС) для бортовых приложений, обеспечивая метрологическую точность ниже 1% и устойчивость к условиям повышенной взрывоопасности, электромагнитных помех, а также агрессивности используемых сред за счёт импульсного нагрева и мультиплексирования, что повышает безопасность эксплуатации на 20–30% по сравнению с традиционными методами [1, 8].

Благодарность

Автор выражает благодарность за научное руководство профессору кафедры радиофотоника и микроволновые технологии КНИТУ-КАИ Морозову О.Г.

Список литературы

1. Jderu, A. Liquid Flow Meter by Fiber-Optic Sensing of Heat Propagation / A. Jderu, M.A. Soto, M. Enachescu et al. // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, – № 2, – 355.
2. Gao, S. All-optical fiber anemometer based on laser heated fiber Bragg gratings / S. Gao, A. Zhang, H. Tam et al. // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19.
3. Wang, J. Optical interferometric microfiber sensor for in-situ flow velocity measurement in microfluidic chips / J. Wang, L. Zhang, F. Li et al. // *Applied Physics B*. – 2025. – Vol. 131.

4. Sun, L. Quantum Dot-Based Optical Fiber Sensor for Flow Velocity Sensing at Low Initial Temperatures / L. Sun, Y. Cao, R. Zhou et al. // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, – № 7.
5. Gorshkov, B.G. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective / B.G. Gorshkov, K. Yüksel, A.A. Fotiadi et al. // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, – № 3.
6. Морозов, О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43. – № 4. – С. 535-543.
7. Аглиуллин, Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // *Труды учебных заведений связи*. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 6-13.
8. Мисбахов, Р.Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Р.Ш. Мисбахов, Е.В. Куликов, В.И. Артемьев и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2024. – № 2 (62). – С.57-73.

ANALYSIS OF FIBER-OPTIC MEASUREMENT METHODS FOR THE FLOW RATE OF LIQUIDS

S.N. Nigmatullin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. This article provides an analysis of fiber-optic methods for measuring liquid flow velocity, comparing point and distributed sensing techniques by using address fiber Bragg structures.

Keywords: fiber-optic sensors; addressable fiber-Bragg structures; fiber-Bragg gratings; point and distributed sensing; fluid flow velocity.

Статья представлена в редакцию 22 декабря 2025 г.