

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОФОТОННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

*А.А. Потанин*

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

**Аннотация.** Проанализированы пути повышения разрешающей способности и точности волоконно-оптических расходомеров на основе волоконных брэгговских решёток за счёт применения радиотонных методов и современных адресных волоконно-брэгговских структур. Сформулированы задачи исследований, направленных на преодоление ограничений традиционных волоконно-оптических расходомеров в области малых расходов, температурной стабильности, устойчивости к помехам и долговременной работы в реальных полевых условиях.

**Ключевые слова:** радиотонный сенсор, волоконная брэгговская решётка, расходомер.

### Введение

Традиционные волоконно-оптические расходомеры (ВОР) на основе двух волоконных брэгговских решёток (ВБР) и дифференциальных методов измерений обладают рядом ограничений, в частности, невысокой разрешающей способностью и точностью, особенно в области малых расходов [1]. Повышение метрологических характеристик возможно за счёт применения радиотонных подходов, позволяющих перенести обработку информации в радиодиапазон, где погрешности могут быть на порядки ниже. Однако проблема разрешающей способности остаётся актуальной и требует поиска новых решений.

### Материалы и методы

Учитывая разработанные в Казанской школе радиотоники методы измерений предложено использовать в ВОР либо ВБР с фазовым сдвигом, либо адресные волоконно-брэгговские структуры (АВБС) [2, 3]. Поскольку и первые, и последние продолжают развиваться, могут быть найдены новые и более совершенные пути повышения эффективности мониторинга расхода жидкостей, в том числе с адресным радиотонным подходом по матрице датчиков, расположенных в поперечном сечении трубы, что позволит обрабатывать не только ламинарные, но и турбулентные потоки.

Волоконно-оптические технологии предоставляют многочисленные возможности для различных промышленных и муниципальных систем, в том числе мониторинга расхода жидкостей. Показана возможность радиотонных подходов, что позволит повысить точность измерений, которые будут проводиться по оптической информации, но в радиодиапазоне, где погрешность на несколько порядков ниже. При этом поставлена задача повышения разрешающей способности [4].

Увеличение разрешающей способности достигается использованием для анализа характерных сверхузкополосных особенностей спектра отражения ВРБ, применением узкополосных ВБР, построения интерферометров Фабри-Перо со сверхузкой полосой пропускания и т.д. Следует отметить, что в ВОР практически не используется такая структура, как ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом, отличающаяся наличием сверхузкополосной

зоной пропускания, размещённой при определённых условиях на центральной длине волны решётки. Реально достижимая полуширина резонансного спектра ВОР в конфигурации ИФП составляет по данным [4] 0,025 нм, а для ВБР – 0,5 нм. Это значит, что разрешающая способность ИФП ВОР в 20 раз лучше, чем у датчика на одной ВБР.

Развивая данный подход можно использовать для создания ВОР ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом, которая представляет собой простейший ИФП с длиной резонатора, не превышающей  $\lambda_v$ . Полуширина резонансного пика такого типа решёток может достигать 0,005 нм, что свидетельствует о возможном увеличении разрешающей способности измерений на два порядка по сравнению с датчиком на одной ВБР [4].

Кроме того, нами было найдено новое решение, основанное на применении вместо известных типов ВБР адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) [2, 3]. Основными их преимуществами являются возможность работы с 64 датчиками на одной длине волны, наличие в их структуре сверхузкополосных окон прозрачности, разностная частота между которыми соответствует уникальному адресу каждой АВБС, возможность радиотонного опроса каждой АВБС на частоте своего адреса и обработка информации в радиочастотной области, что существенно повышает метрологические характеристики разрабатываемого ВОР. При этом ширина полосы пропускания окна прозрачности на 2-3 порядка уже полосы пропускания/отражения ВБР, что говорит о высокой разрешающей способности измерительного преобразования по оценке сдвига центральной длины волны АВБС. В то же время применение АВБС является новой концепцией для исследователей и инженеров-электриков. Несмотря на то, что были предприняты значительные усилия в области измерения с помощью АВБС температуры, влажности и др., по-прежнему остаются нераскрытые области их применения. Кроме того, основные работы, выполняемые в лабораториях по малым и упрощённым моделям, далеки от реальных полевых условий.

## Результаты

Исследования стабильности волоконно-оптической сенсорной системы на АВБС в реальном ВОР должны быть сосредоточены на полевых исследованиях. Методы применения АВБС в ВОР следует оценивать с учётом высокого уровня электрических помех, способных вызвать нелинейные эффекты в волокне, а также существенных изменений температур жидкостей, которые могут превышать 300°C. Кроме того, ВОР обычно требуют длительной работы в жидкости, таким образом старение материала волокна является ещё одной важной проблемой, которую следует учитывать.

## Заключение

В данной работе проанализированы и оценены характеристики типовых и нетиповых ВОР на базе двух ВБР и дифференциальных методов измерений давления на них с компенсацией температуры. Как было показано в предыдущей работе они обладают малой разрешающей способностью и точностью измерений, особенно в области малых расходов [1]. Показано, что применение ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом и АВБС позволит на 1–2 порядка повысить разрешающую способность и точность измерений.

## Список литературы

1. Потанин, А.А. Волоконно-оптические дифференциальные расходомеры на двух волоконных брэгговских решетках. Определение направлений развития / А.А. Потанин // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2023. – Т. 3. – № 1. – С. 29-41.

2. 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.
3. 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. – Т. 2. – № 62. – С. 57-73.
4. Аглиуллин, А.Ф. Метод уточнения значения частотного сдвига спектра, полученного в условиях малой разрешающей способности анализатора / А.Ф. Аглиуллин, Т.А. Аглиуллин, Б.И. Валеев и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2022. – Т. 4. – № 56. – С. 63-74.

## CANTILEVER TYPE MICROWAVE PHOTONICS SENSOR FOR FLOW MEASUREMENT

*A.A. Potanin*

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

**Abstract.** The ways to improve the resolution and accuracy of fiber-optic flow meters based on fiber Bragg grating through the use of microwave photonics methods and advanced addressed fiber Bragg structures are analyzed. Research objectives aimed at overcoming the limitations of traditional FOFMs in the field of low flow rates, temperature stability, noise immunity, and long-term operation in real field conditions are formulated.

**Keywords:** microwave photonics sensor, fiber Bragg gratings, flowmeter.

Статья представлена в редакцию 23 декабря 2025г.