EDN: JWZJAR DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.21.2.002

УДК 621.386 *2.2.6, 2.2.8*

МАССИВ МИКРОВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ И ПРИНЦИПЫ ЕГО ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г.А. Морозов[1], А.Н. Пикулев[1], О.В. Никишина[1], С.В. Смирнов[2], И.А. Сушилов[1], А.С. Ошков[1], Х.Г. Асхадуллин[1], В.С. Паршин[1], А.А. Хузиахметов[1] А.Л. Тимерханов[1]

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

[2]Казанский юридический институт МВД России
Российская Федерация, 420064, г. Казань, ул. Оренбургский Тракт, 128

Аннотация. Планарные микроволновые резонаторы и их массивы являются одним из наиболее перспективных решений для создания компактных и недорогих систем мониторинга качества воды. Однако применение одиночных сенсоров сопряжено с проблемами неоднозначности интерпретации данных и высокой температурной зависимостью диэлектрической проницаемости воды, что вносит погрешность до 5–12% при изменении температуры на 10–15 °C. Целью данной работы является анализ современных подходов к формированию многочастотных массивов микроволновых датчиков и разработка оригинального метода термокомпенсации на базе линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток (ЛЧВБР). В исследовании рассмотрены и оптимизированы три типа резонансных структур: симметричный кольцевой резонатор, массив комплементарных квадратно-щелевых резонаторов на диэлектрической подложке и компактный дифференциальный компаратор, использующий резонанс Фано. Моделирование показало, что оптимизированный кольцевой резонатор обеспечивает глубину резонанса −23,5 дБ на частоте 2,449 ГГц, а массив из пяти комплементарных резонаторов формирует широкополосный отклик в диапазоне 1,4–9,4 ГГц. Это позволяет получать многомерный «диэлектрический отпечаток» воды, повышая селективность к различным примесям и компенсируя взаимное влияние элементов. Компараторная структура на основе резонанса Фано дополнительно обеспечивает высокую чувствительность и встроенную самокалибровку с выбором анализа различных примесей для каждого резонатора. Для устранения температурного дрейфа предложена схема оптической термокомпенсации с использованием трех ЛЧВБР: опорной (стабильная температура), температурно-чувствительной и чувствительной к показателю преломления жидкости. Экспериментальная оценка продемонстрировала температурную зависимость сдвига резонансной частоты на уровне −1 МГц/°C и −2 МГц/°C, что позволяет динамически корректировать данные с относительным разрешением 1×10^{-4}. Сочетание компараторного микроволнового резонатора и прецизионной оптической термокомпенсации формирует надежную, высокоточную и компактную платформу для непрерывного контроля состава и качества воды в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: микроволновые сенсоры, планарные резонаторы, мониторинг качества воды, массивы датчиков, резонанс Фано, линейно-чирпированные волоконные брэгговские решетки, термокомпенсация.

Введение

Сегодня планарные резонаторы и массивы из них считают самыми перспективными для компактных систем мониторинга качества воды [1-3]. Их изготавливают по печатной технологии на диэлектрической подложке; они компактны, дёшевы и удобно

интегрируются в резервуары с контролируемой жидкостью, например, водой. Основные типы планарных резонаторов [4]:

– микрополосковые кольцевые резонаторы: при попадании воды на поверхность резонатора, меняется его добротность и заметно сдвигается резонансная частота, при этом такие резонаторы имеют множество резонансных частот, а критерии выбора необходимой – прерогатива разработчика;

– комплементарные разделенные щелями кольцевые резонаторы: в таких резонаторах электрическое поле сильно концентрируется в области щелей, что придает им высокую чувствительность, которая необходима для обнаружения малых изменений состава воды.

Планарные резонаторы работают и при прямом контакте с водой, и через тонкую диэлектрическую стенку, что важно для проточных систем. У каждого резонатора свои сильные и слабые стороны, они и определяют область их применения. Один из самых перспективных путей развития микроволновых сенсоров последних лет – переход от отдельных чувствительных элементов к массивам. Так измерения становятся информативнее, а неоднозначность одиночных сенсоров частично снимается.

Разные примеси или их концентрации в воде могут вызывать близкие изменения диэлектрических свойств на одной и той же частоте. Результат толкуется неоднозначно. К тому же одиночный резонатор чувствителен только в узкой полосе около выбранного резонанса. Многочастотный массив решает обе проблемы: он использует сразу несколько элементов на разных резонансных частотах. Каждый элемент по-своему откликается на конкретный тип примеси и ее концентрацию, и вместе они дают многомерный «диэлектрический отпечаток» воды.

Преимущества массива микроволновых датчиков: выше селективность при определении разных примесей и их концентраций; возможность компенсации мешающих факторов – температуры и др.; широкополосность при сохранении чувствительности отдельных элементов; избыточность контроля; возможность эффективного применения технологий искусственного интеллекта для больших объемов данных.

Для мониторинга качества воды оптимален диапазон 1–10 ГГц. С одной стороны, здесь доступны сравнительно недорогие СВЧ-компоненты, с другой – этот диапазон охватывает широкий спектр откликов от различных примесей и их концентраций. Обычно в таких массивах до 10 элементов. Чувствительность современных планарных резонаторов к изменению диэлектрической проницаемости жидкости обычно составляет от 10 до 50 МГц на единицу изменения ε' – в зависимости от конструкции и рабочей частоты. Примеси сдвигают резонансную частоту (как правило, вниз) и снижают добротность резонатора из-за роста диэлектрических потерь. При разработке массива микроволновых датчиков для мониторинга качества воды нужно учитывать факторы, которые сильно сказываются на точности и стабильности результатов. Даже небольшое внешнее воздействие способно дать заметную погрешность в определении комплексной диэлектрической проницаемости.

Основной источник погрешности – температура. Диэлектрическая проницаемость чистой воды (ε') падает с её ростом. В диапазоне 1-10 ГГц при температуре 20-25 °С коэффициент температурной зависимости составляет примерно −0,4…−0,5 единиц ε' на 1 °С. С нагревом уменьшается и время релаксации (τ), поэтому максимум диэлектрических потерь (ε'') смещается к более высоким частотам. Без температурной компенсации погрешность измерения ε' достигает 5-12 % при изменении температуры на 10-15 °С [4]. Для компенсации обычно применяют отдельный температурный датчик (термистор или

термопару) и корректирующие полиномы или дифференциальную схему измерения (референсный канал с дистиллированной водой).

Вторым по значимости является эффект взаимной связи резонаторов. Плотно расположенные резонаторы электромагнитно связаны между собой. Коэффициент связи соседних элементов не должен превышать −15…−20 дБ. При более сильной связи резонансные пики расщепляются, а добротность падает.

Целью данной работы является анализ современных решений, применяемых в Казанской школе микроволновых технологий с позиции образования массивов и функционального наполнения различных чувствительных элементов на базе резонаторов, обозначенных выше, и применения оригинального метода термокомпенсации с использованием волоконно-оптических технологий. При этом чувствительный элемент компенсационного датчика температуры строится на базе линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток (ЛЧВБР), опрос которых производится оптическим излучением лазером с прямой модуляцией. Модуляция лазера осуществляется по закону линейной частотной модуляции (ЛЧМ-опрос), соответствующему закону ЛЧМ-опроса резонансных датчиков в радиодиапазоне.

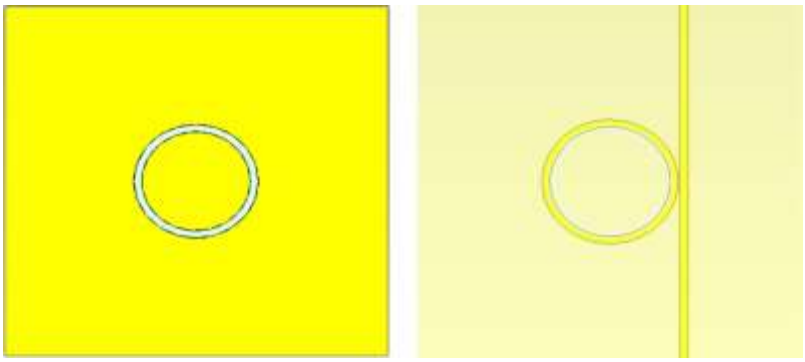
В первом разделе рассмотрены три типа резонаторов – кольцевой, многоэлементный и дифференциальный резонатор компараторного типа. Во втором разделе представлена структурная схема термокомпенсации на ЛЧВБР по температуре и по показателю преломления.

1. Моделирование и оптимизация геометрических параметров микроволновых резонаторов

1.1 Кольцевой резонатор

Интересуемые параметры моделируемого резонатора – это основная резонансная частота, добротность и значение коэффициента передачи на резонансной частоте (амплитуда резонанса) при различных физических размерах, а также диэлектрической проницаемости при заданной чистоте воды.

В качестве чувствительного элемента было предложено использовать ближнеполевые резонансные структуры в полосковом исполнении. Для того чтобы избежать больших потерь в воде, в конструкции резонатора должен быть применен метод возмущения. Резонансная структура данного датчика представляет собой кольцевой резонатор на основе симметричной полосковой линии [5, 6] (рис. 1).



а) *б*)

Рис. 1. Симметричная полосковая линия:
а) верхний экран, *б*) полосок и контур между экранами в диэлектрике [6]

В верхнем экране моделируемого датчика будет реализована щель. Данный элемент необходим для лучшей связи с водой. Для достижения лучшего эффекта в ходе моделирования резонатора исследуется наиболее подходящие значения разности между диаметрами кольцевой щели и кольцевого резонатора. Между верхним и нижним экраном симметричной полосковой линии расположен полосковый кольцевой резонатор. На расстоянии от кольцевого резонатора в одной плоскости расположен полосок. Волновое сопротивление возбуждающей резонатор линии составляло 50 Ом. В качестве верхнего и нижнего диэлектриков симметричной полосковой линии выступали листы фторопласта толщиной 1 мм. Геометрические параметры итогового датчика будут результатом программно-математического расчёта [7].

Чтобы добиться максимального резонанса рассматривались различные варианты расстояния между полосковым кольцевым резонатором и полоском. Значения варьировались от 0,1 до 1 мм с шагом 0,1 мм. Максимальный резонанс достигается при размерах щели 0,35 мм. Далее, для того, чтобы добиться резонанса на нужной частоте, менялся размер кольцевого резонатора, а именно размер средней линии кольца. Размеры менялись в диапазоне от 12 до 14 мм с шагом 0,2 мм. Наиболее подходящим явился внешний диаметр кольца 13,3 мм. Изменение разности между диаметрами кольцевой щели и кольцевого резонатора влияет как на величину резонанса, так и на частоту, на которой происходит этот резонанс. Также процесс оптимизации данного параметра усложняет то, что изменения, наблюдаемые на графиках S_{21}, носят нелинейный характер. При более тонком расчете было выявлено, что оптимальная разность между диаметрами кольца резонатора и кольцевой щели составляет 1,93 мм.

График коэффициента передачи после оптимизации геометрических параметров показан на рис. 2.

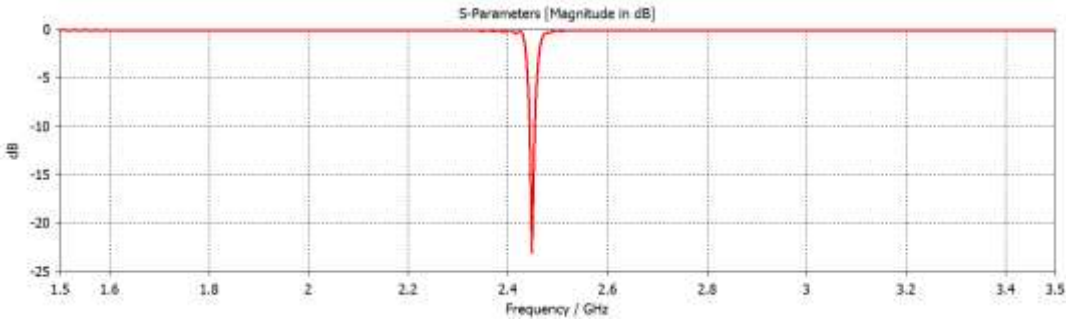


Рис. 2. График коэффициента передачи после оптимизации геометрических параметров

Резонанс оптимизированного датчика проходит на частоте 2,449 ГГц и достигает –23,5 дБ при дистиллированной воде.

Для объединения в многочастотный массив были выбраны комплементарные квадратные щелевые резонаторы, которые проще в изготовлении.

1.2 Массив из квадратных кольцевых комплементарных резонаторов

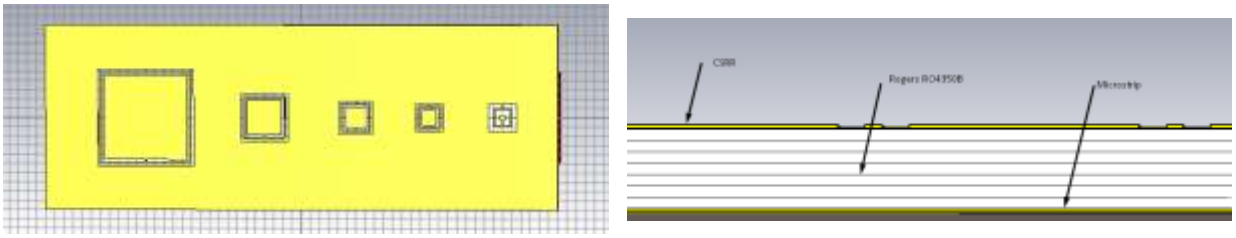
Каждый элемент массива состоит из трёх основных элементов: диэлектрической подложки, микрополосковой линии передачи и массива комплементарных резонаторов CSRR в заземляющем слое [8]. Материалом подложки выбран высокочастотный диэлектрик Rogers RO4350B. Его широко применяют при разработке микроволновых

устройств: у него стабильные электромагнитные характеристики, низкие диэлектрические потери и хорошая повторяемость параметров в широком диапазоне частот.

Размеры подложки выбраны так, чтобы разместить пять резонаторов разного размера на одной плате и сохранить достаточное расстояние между соседними элементами для межэлементной развязки. На верхней стороне подложки размещена микрополосковая линия передачи: она возбуждает резонансные элементы и передаёт электромагнитную энергию вдоль структуры. Чтобы линия согласовывалась с измерительным оборудованием, её волновое сопротивление должно быть близко к стандартным 50 Ом. Ширину линии рассчитали по классическим выражениям для микрополосковых структур и уточнили встроенным калькулятором CST Studio Suite. Получены: ширина проводника 1,68 мм, волновое сопротивление около 49,53 Ом – отклонение от 50 Ом меньше 1 %. Длину линии приняли равной длине подложки – 56 мм. Таким образом все резонаторы массива возбуждаются равномерно, а модель строится проще.

На нижней стороне подложки лежит сплошной проводящий слой – заземление. В нём вытравливают чувствительные элементы сенсора, комплементарные резонаторы с разрезом. Эта конфигурация сохраняет непрерывность микрополосковой линии передачи и при этом эффективно возбуждает резонансные структуры через электромагнитную связь между линией и резонаторами.

Геометрическая модель сенсора представлена на рис. 3.



а) *б*)

Рис. 3. Общий вид (*а*) массива (вид снизу) и его поперечный разрез (*б*)

Чтобы получить нужный набор резонансных частот, размеры резонаторов последовательно уменьшали от первого элемента к последнему (от 10 до 3 мм). Самый большой резонатор работает в области минимальных частот, самый маленький – в области высоких. Резонансные частоты и их коэффициент отражения S_{21} приведены в табл. 1.

Таблица 1. Резонансные частоты разработанного массива

Резонатор	Резонансная частота, ГГц	S_{21}, дБ
S1	1,4	–28
S2	3,4	–35
S3	5,5	–38
S4	7,4	–33
S5	9,4	–53

Таким образом, сформирована многочастотная сенсорная структура для дальнейшего электродинамического моделирования и исследования того, как параметры воды влияют на характеристики ее передачи. Однако, размеры такой структуры достигают 60×25 мм^2.

1.3 Компактный дифференциальный компаратор с выбором частоты по примеси

В [9] авторы предлагают структуру компараторного микроволнового датчика на основе микрополосковых линий, выполненную с использованием расщепленных кольцевых резонаторов, для диэлектрического анализа характеристик материалов. С помощью такого датчика можно получить данные об изменении диэлектрической проницаемости исследуемого материала (рис. 4).

Принцип работы микроволнового датчика основан на преобразовании моды, которое происходит, когда чувствительное плечо контура контактирует с другим материалом, что нарушает баланс системы. В результате датчик демонстрирует два различных режима работы. Первый режим – это сбалансированная конфигурация. Он возникает, когда оба плеча нагружены одним и тем же материалом, и разность фаз между двумя трактами равна нулю. В этом случае в передаточной характеристике наблюдается только один резонансный пик, соответствующий собственному резонансу структуры кольцевого резонатора с щелью. Несбалансированный режим возникает, когда чувствительное плечо контактирует с одним материалом, а опорное с другим, разница между ними регистрируется за счет преобразования моды. Это преобразование вызвано разностью фаз между волнами, проходящими по двум трактам. В таком режиме в передаточной характеристике появляется второй нулевой минимум. Изменение относительной диэлектрической проницаемости исследуемого материала можно измерить по разнице между двумя нулями передачи.

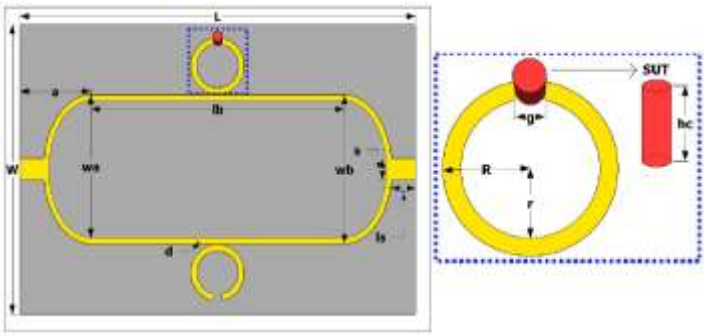


Рис. 4. Структура компараторного микроволнового датчика на основе микрополосковых линий, выполненного с использованием расщепленных кольцевых резонаторов [9]

Такой подход обеспечивает самокалибровку датчика. Подобно другим компараторным датчикам, этот датчик устойчив к внешним помехам, таким как колебания температуры или влажности, и обеспечивает высокую точность измерений. Однако высокие линейные размеры и сложность конфигурации ставят задачу поиска более компактных вариантов.

В [10] авторы предлагают объединить два подхода к проектированию сенсоров с целью повышения чувствительности, а именно: механизм взаимодействия двух резонаторов Лоренца, приводящий к формированию резонанса Фано [11-13] и компараторное детектирование [9]. На рис. 5 [10] представлена концепция механизма компараторного детектирования и её развитие, начиная от простого одношлейфового резонатора Лоренца до четырехшлейфового компараторного резонатора Фано.

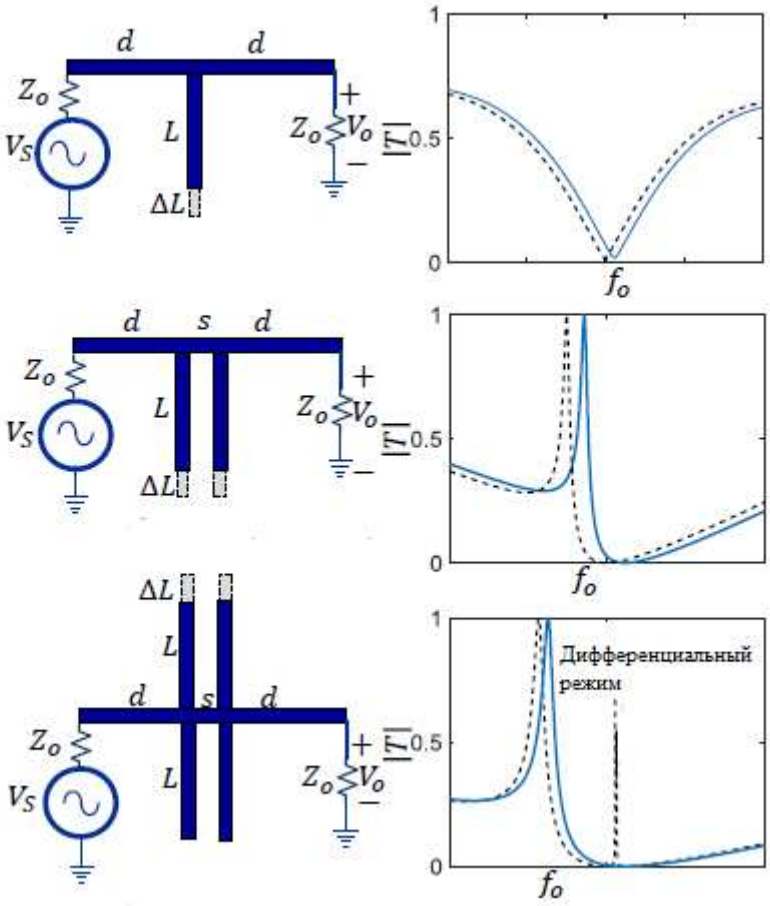


Рис. 5. Одношлейфовый резонатор Лоренца, двухшлейфовый резонатор Фано, и четырёхшлейфовый компараторный резонатор Фано (сверху вниз) [10]

Концепция детектирования объясняется путём рассмотрения увеличения эффективной длины (ΔL) открытых шлейфов, что соответствует изменению их диэлектрического окружения. Сдвиг резонансной частоты отражает степень изменения диэлектрической проницаемости. Четырёхшлейфовая компараторная структура способна различать диэлектрическую проницаемость верхних и нижних шлейфов, связывая её с амплитудой компараторного пика.

Внешнее возмущение можно смоделировать как пропорциональное изменение длины волны (ΔL), которое приводит к спектральному сдвигу, соответствующему диэлектрическим свойствам возмущения. В двухшлейфовой структуре два резонатора Лоренца взаимодействуют конструктивно, создавая острый асимметричный резонанс Фано, который более чувствителен к внешним возмущениям, по сравнению с классическим резонансом Лоренца.

Рассмотрим четырёхшлейфовую конфигурацию, работающую в сбалансированном режиме. При отсутствии возмущений сигналы от двух резонаторов накладываются на выходе, формируя одиночный спектральный профиль линии Фано. Когда один из двухшлейфовых резонаторов даже слегка возмущается, четырёхшлейфовая структура переходит в компараторный режим, что проявляется в появлении еще одного острого пика Фано на рис. 5 на частоте, превышающей основную резонансную частоту.

Таким образом, выбирая эквивалент нагрузки для одного плеча компаратора, соответствующий предельно-допустимой концентрации (ПДК) какой-либо конкретной

примеси и получив второй резонанс Фано, можно судить о том, что ПДК превышена. Массив таких сенсоров с различными нагрузками по примесям даст возможность построить компактную многопримесную систему контроля качества воды.

Стоит также отметить, что предлагаемый сенсор на основе резонанса Фано предоставляет две степени свободы для обнаружения внешних изменений: сдвиг частоты резонанса Фано и компараторный пик, который незначительно смещается от своего спектрального положения. Поскольку измерения проводятся в очень узком спектральном диапазоне, определение компараторного показателя включает интегрирование спектральной мощности в меньшем диапазоне частот. Компараторное детектирование не только подавляет шумы схемы, но также компенсирует влияние внешних факторов, таких как температура. Однако степень подавления остается недостаточной [1-3].

2. Термокомпенсированный микроволновый резонатор с использованием опорных линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток

Схема экспериментальной установки для измерения диэлектрической постоянной воды с помощью массива микроволновых резонаторов любого ранее рассмотренного типа представлена на рис. 6. Массив датчиков предназначен для подключения к коммерческому коаксиальному кабелю (например, RG-58/U).

Основным элементом системы является векторный анализатор цепей ЭВАЦ FHS8. Подключение массива микроволновых сенсоров осуществляется через адаптер SMA (субминиатюрная версия А). Анализ резонансных частот при ЛЧМ возбуждении массива осуществляется по классической методике. Вода находится в пластмассовой емкости.

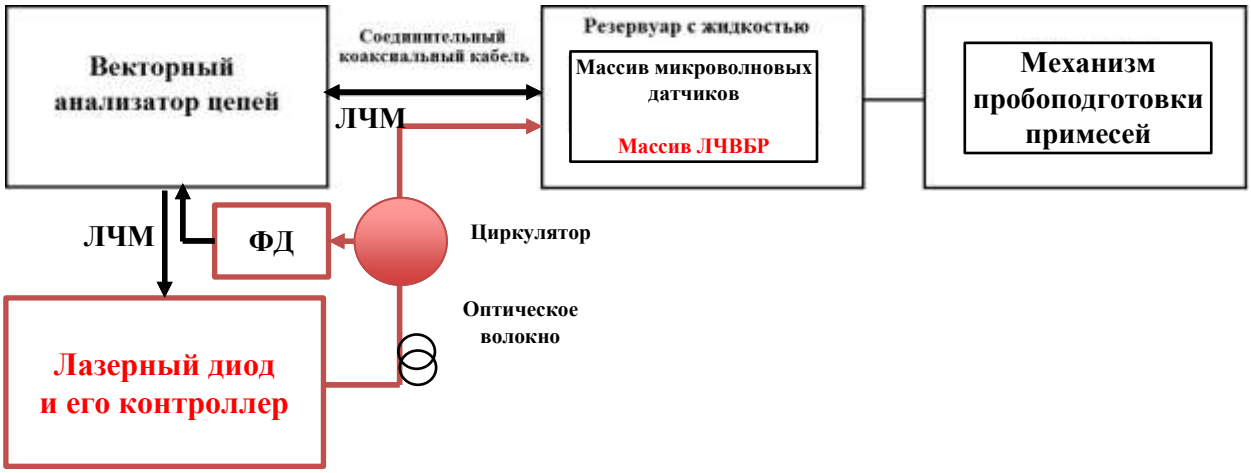


Рис. 6. Структурная схема термокомпенсированного измерителя диэлектрической проницаемости

В данном методе термокомпенсации на лазерном диоде (ЛД) генерируется оптический ЛЧМ сигнал от того же источника, который опрашивает массив микроволновых резонаторов, что осуществляется путем подачи сигнала пилообразной формы на драйвер ЛД или непосредственно на ЛД с прямой модуляцией.

Далее полученный сигнал поступает на три идентичные ЛЧВБР с разным коэффициентом отражения, где первая ЛЧВБР1 используется в качестве опорной для измерения в условиях неизменной температуры, вторая ЛЧВБР2 – в качестве

чувствительного элемента температуры в жидкости, а третья с вытравленной оболочкой – для контроля показателя преломления жидкости [14, 15].

В процессе термокомпенсации на основе корреляции между Δf и температурой, показанной на рис. 7, температурная зависимость Δf в терминах «сдвига резонансный частоты на градус» составила –1 МГц/°С для ЛЧВБР2 и –2 МГц/°С для ЛЧВБР3.

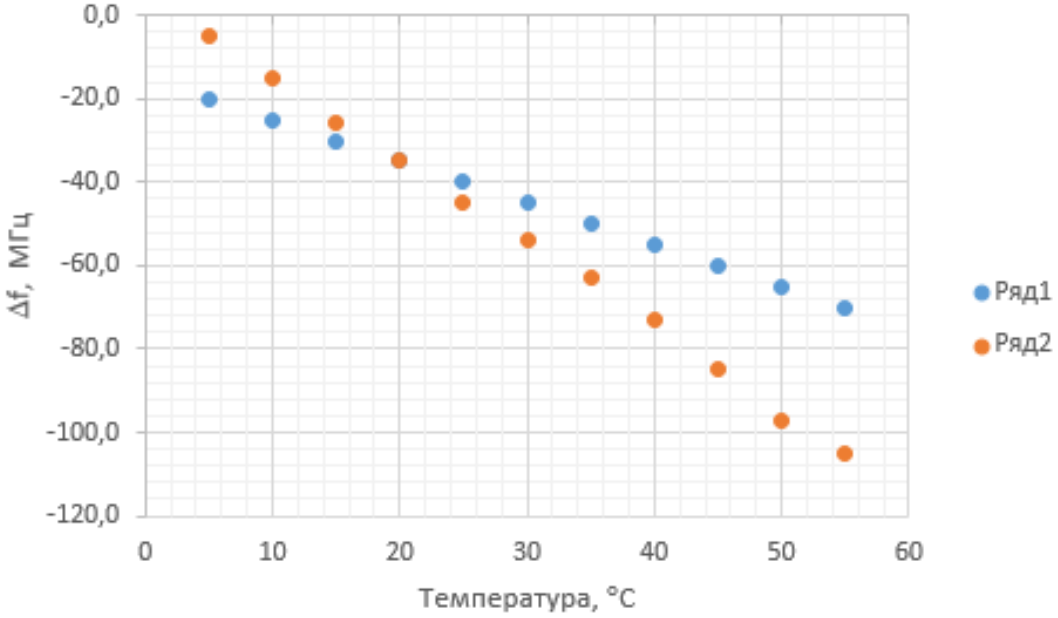


Рис. 7. Зависимость сдвига резонансной частоты от температуры термокомпенсирующих ЛЧВБР:
ряд 1 – ЛЧВБР2; ряд 2 – ЛЧВБР3

Поскольку в обоих ЛЧВБР использовалось одно и тоже волокно, но разный диаметр оболочки, что вызвало наличие резонансных частот, отличающихся примерно в 2 раза, можно сказать, что сравнение температурной чувствительности между двумя ЛЧВБР определяется скорее разницей в резонансной частоте, чем материальными и конструктивными параметрами. Стандартное отклонение измеренных данных соответствует относительному разрешению измерения 1×10^{-4}.

При термокомпенсации основная погрешность измерения как радиочастотной, так и оптической части будет определяться погрешностью ЭВАЦ. Как и любой векторный анализатор цепей рассмотренная схема обладает систематической погрешностью измерения коэффициента отражения для электронной части, обусловленной неидеальностью направленных ответвителей, взаимным влиянием сигналов и т.д. Для устранения погрешности требуется проводить калибровку измерителя, заключающуюся в последовательном подключении к выходу анализатора образцовых нагрузок: согласованной нагрузки, холостого хода и короткого замыкания. Далее по полученным измерениям и сигнальному ориентированному графу, учитывающим влияние погрешности, определяют корректирующие поправки, аналогично работам [16-19].

Для калибровки АЧХ каждой ЛЧВБР на ее вход подается зондирующий двухчастотный сигнал [20-25].

На рис. 8 показана АЧХ, полученная после его отражения от ЛЧВБР.

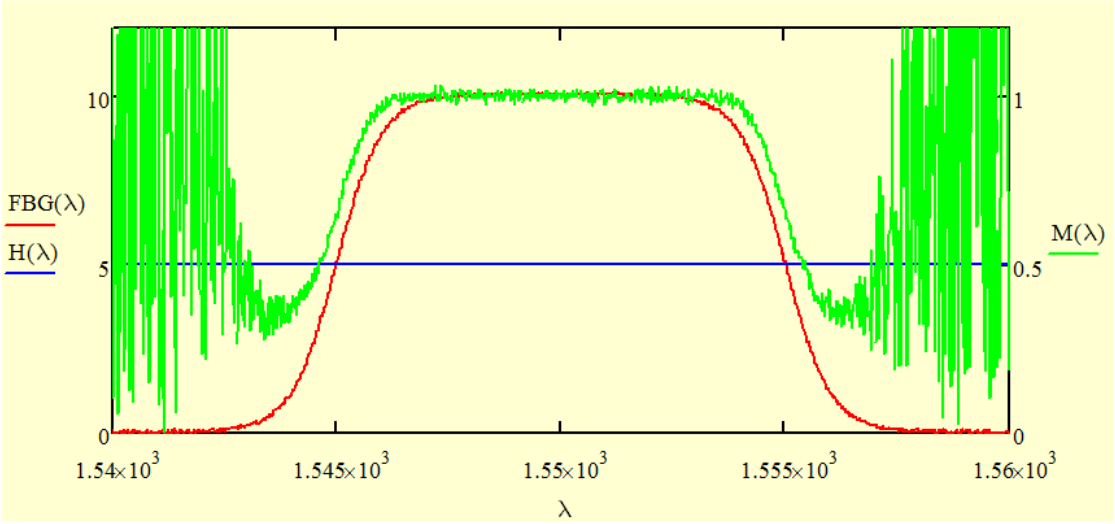


Рис. 8. АЧХ ЛЧВБР после калибровки (FBG(λ)),
коэффициент модуляции огибающей биений двухчастотного сигнала (M(λ)),
полувысота ЛЧВБР (H(λ)). λ измеряется в нм

Устройство управления и вычислитель всей системы могут быть физически воплощены в одном устройстве, реализованным, например, на ПЛИС или микропроцессоре. В другом варианте основные функции управления и вычисления может выполнять персональный компьютер, а цепь измерения подключаться к нему через дополнительную схему по одному из распространенных интерфейсов передачи данных. Поправки, полученные в термокомпенсирующих ЛЧВБР могут быть внесены с учетом различных методов термокомпенсации и компенсации по показателю преломления: отдельно или совместно. Опорным показателем для термокомпенсации является измерение стабильной температуры с помощью ЛЧВБР1 [14, 15].

Заключение

Использование волоконных ЛЧВБР в системах термокомпенсации микроволновых кольцевых планарных резонаторов для контроля качества воды имеет следующие ключевые преимущества:

- ВБР не подвержены влиянию микроволнового излучения резонатора, в отличие от электронных термодатчиков, что гарантирует стабильность и достоверность измерений;
- обеспечивается прецизионное измерение температуры, необходимое для коррекции температурного дрейфа резонансной частоты резонатора;
- оптическое волокно можно встроить в подложку резонатора или разместить в зоне измерения, не искажая его электромагнитное поле и гидродинамику потока воды;
- кварцевое волокно химически инертно и устойчиво к влаге, что критически важно для длительного мониторинга в водных средах;
- на одном оптическом волокне можно разместить несколько ЛЧВБР для контроля температурных градиентов по площади резонатора или объему пробы и дополнительно для контроля градиентов показателя преломления в оптическом диапазоне;
- позволяет динамически корректировать данные о диэлектрической проницаемости воды, повышая точность определения ее состава (соленость, наличие примесей) независимо от температурных колебаний.

Проведенный нами предварительно анализ типов микроволновых резонаторов для формирования массива, необходимого для решения задач мониторинга качества воды,

позволил выбрать компараторный тип резонатора, который дополнительно реализует условия стабильных к изменению температуры измерений.

Список литературы

1. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности факторов среды обитания для человека. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. — 312 с.
2. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. — Введ. 1999-07-01. — М.: Госстандарт России, 1998.
3. Никишина О. В. Оценка качества питьевой воды на основе микроволновых систем /О. В. Никишина. – Текст: электронный // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 4. – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_44__5_nikishina_red.pdf (дата обращения: 15.05.2026).
4. Pozar D.M. Microwave Engineering. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. – 752 p.
5. Zhang K. Planar microwave sensors for complex permittivity characterization of materials / K. Zhang et al. // IEEE Sensors Journal. — 2020. — Vol. 20, № 12. — P. 6390–6400.
6. Ivanov A. Design and Characterization of a Microwave Planar Sensor for Dielectric Assessment of Vegetable Oils / A. Ivanov, T. Agliullin, D. Laneve et al. // Electronics. – 2019. – V. 8(9). – P.1030, https://doi.org/10.3390/electronics8091030
7. CST Studio Suite: 3D EM Analysis Software. Dassault Systèmes, 2024. URL: https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite (дата обращения: 15.05.2026).
8. Amineh R. K. Detection of water pollutants with a nonuniform array of microwave sensors / R. K. Amineh, M. Ravan, D. Tandel // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – P. 6004011.
9. Zapata-Londoño J. Differential microwave sensor based on microstrip lines loaded with a split-ring resonator for dielectric characterization of materials / J. Zapata-Londoño, F. Umaña-Idárraga, J. Morales-Guerra et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021.– Vol. 2118. – P. 12004.
10. Amin M. A highly sensitive biosensing method using differential detection of Fano resonance line shape / M. Amin, D.A. Sehrai, O. Siddiqui, R. Ramzan, A. Ehsan, H. Abutarboush // Journal of Lightwave Technology. – 2024. – Vol. 42, No.19. – P. 6948-6957.
11. Сахабутдинов А.Ж. Характеризация резонанса Фано в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе кольцевых волоконных брэгговских решеток с π-сдвигом. Постановка задач моделирования / А.Ж. Сахабутдинов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, Г.И. Ильин // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2 (49). – С. 36.
12. Сахабутдинов А.Ж. Характеризация резонанса Фано в рефрактометрических датчиках на основе кольцевых волоконных брэгговских решеток с π-сдвигом. Результаты моделирования / А.Ж.Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2 (49). – С. 38.
13. Morozov O.G. Problem of Fano resonance characterization in ring π-shift fiber Bragg grating biosensors / O.G. Morozov, I.I. Nureev, A.Z. Sahabutdinov, R.R. Gubaidullin, G.A. Morozov // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO, 2019. – 2019. – P. 8814206.
14. Салихова М.А. Радиофотонная система сбора информации о положении пациента в инвалидной коляске на основе адресных линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток с двумя фазовыми π-сдвигами / М.А. Салихова, О.А. Степущенко, Р.А. Эшпай, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 5. – С. 34-37.

15. Салихова М.А. Система сбора информации о положении пациента в инвалидной коляске на основе линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток с фазовым π-сдвигом / М.А. Салихова, О.А. Степущенко, Р.А. Эшпай, О.Г. Морозов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 5. – С. 30-33.
16. Морозов О.Г. Резонансный метод мониторинга технологического процесса отверждения полимеров / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Р.Р. Самигуллин, А.С. Шакиров, А.Р. Насыбуллин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 1 (15). – С. 67-74.
17. Морозов Г.А. Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин, А.С. Шакиров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1-2. – С.568-572.
18. Кувшинов Н.Е. Радиофотонная система измерений распределения температур и интенсивности электромагнитного поля в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона / Н.Е. Кувшинов, Р.Ш. Мисбахов, Р.Ш. Мисбахов и др.// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 3 (51). – С. 77-92.
19. Куприянов В.Г. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга / В.Г. Куприянов, О.А. Степущенко, В.В. Куревин, О.Г. Морозов, И.Р. Садыков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4-4. – С. 1087-1091.
20. Natanson O.G. Development Problems of Frequency Reflectometry for Monitoring systems of Optical Fiber Structures / O.G. Natanson, O.G. Morozov, R.A. Akhtiamov, V.F. Gusev // Proc. of SPIE. – 2005. – V. 5854. – P. 215-223.
21. Морозов О.Г. Определение характеристик спектра усиления Мандельштама–Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Талипов, В.Г. Куприянов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 95-100.
22. Morozov O.G. Optical Vector Network Analyzer Based on Amplitude-Phase Modulation / O.G. Morozov, G.A. Morozov, I.I. Nureev et al. // Proc. of SPIE. – 2016. – V. 9807. – P. 980717.
23. Айбатов Д.Л. Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха-Цендера и ROF-фильтр на его основе / Д.Л. Айбатов, О.Г. Морозов, Т.С. Садеев // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8. – № 5. – С. 302-309.
24. Талипов А.А. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа / А.А. Талипов, О.Г. Морозов, Г.И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 3-12.
25. Sadeev T.S., Investigation and analysis of Electro-optical Devices in Implementation of Microwave Photonic Filters / T.S. Sadeev, O.G. Morozov et al. // Proc. of SPIE. – 2012. – V. 8410. – P. 841007.

A MICROWAVE RESONATOR ARRAY FOR WATER QUALITY MONITORING AND ITS THERMAL COMPENSATION PRINCIPLES BASED ON FIBER-OPTIC TECHNOLOGIES

G.A. Morozov[1], A.N. Pikulev[1], O.V. Nikishina[1], S.V. Smirnov[2], I.A. Sushilov[1], A.S. Oshkov[1], Kh.G. Askhadullin[1], V.S. Parshin[1], A.A. Khuziakhmetov[1] A.L.Timerkhanov[1]

[1]Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

[2]Kazan Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia
Russian Federation, 420064, Kazan, Orenburgsky Trakt St., 128

Abstract. Planar microwave resonators and their arrays are one of the most promising solutions for creating compact and inexpensive water quality monitoring systems. However, the use of single sensors is associated with ambiguous data interpretation and the high temperature dependence of water's permittivity, which introduces errors of up to 5–12% for every 10–15°C temperature change. The aim of this study is to analyze modern approaches to the formation of multi-frequency microwave sensor arrays and develop an original temperature compensation method based on linearly chirped fiber Bragg gratings (LCFBGs). This study examined and optimized three types of resonant structures: a symmetric ring resonator, an array of complementary square-slot resonators on a dielectric substrate, and a compact differential comparator using Fano resonance. Simulations showed that the optimized ring resonator provides a resonance depth of -23.5 dB at 2.449 GHz, while an array of five complementary resonators produces a broadband response in the 1.4–9.4 GHz range. This enables the acquisition of a multidimensional "dielectric fingerprint" of water, increasing selectivity for various impurities and compensating for the mutual influence of elements. The comparator structure based on the Fano resonance additionally ensures high sensitivity and built-in self-calibration, allowing for the selection of various impurities for each resonator. To eliminate temperature drift, an optical temperature compensation scheme is proposed using three FBG-based frequency-dependent resonators: a reference (stable temperature), a temperature-sensitive resonator, and one sensitive to the refractive index of the liquid. Experimental evaluation demonstrated a temperature dependence of the resonant frequency shift at levels of -1 MHz/°C and -2 MHz/°C, enabling dynamic data correction with a relative resolution of 1×10^{-4}. The combination of a comparator microwave resonator and precision optical temperature compensation creates a reliable, highly accurate, and compact platform for continuous monitoring of water composition and quality under real-world operating conditions.

Keywords: microwave sensor, planar resonator, water quality monitoring, sensor array, Fano resonance, linear-chirped fiber Bragg grating, temperature compensation.

Статья представлена в редакцию 06.06.2026