EDN: JBHIFI DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.21.2.001

УДК 621.385.69 *2.2.8, 2.2.14*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЁХ ТИПОВ РЕЗОНАТОРНЫХ СВЧ-ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ СРЕД

Г.А. Морозов, А.Ф. Аглиуллин, И.Д. Касимов, Б.З. Шамсутдинов, А.Е. Косарев

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

Аннотация. Представлен сравнительный анализ трёх типов резонаторных СВЧ-датчиков для измерения диэлектрических свойств жидких сред: комплементарного кругового спирального резонатора (CCSR, Complementary Circular Spiral Resonator), комплементарного прямоугольного двойного кольцевого резонатора (CDSRR, Complementary Dual Split Ring Resonator) в составе микрополосковой патч-антенны при полном покрытии пробой, а также двухкольцевого щелевого планарного резонатора (DSRR) с интегрированным микрофлюидным каналом в вертикальной конфигурации над щелевыми зазорами – RGV). Для каждого датчика приведены конструкция, геометрические параметры, эквивалентная электрическая схема и аналитический расчёт индуктивности, ёмкости и резонансной частоты. Сравнение проведено в единых условиях: методом полноволнового электромагнитного моделирования в среде CST Studio Suite (решение в частотной области, диапазон 1–6 ГГц) рассчитаны характеристики рассеяния при загрузке датчиков пробами с относительной диэлектрической проницаемостью 1, 10, 25, 50 и 78 при двух уровнях тангенса угла диэлектрических потерь (0,01 и 0,10) — всего 30 расчётов. Для каждой точки определены резонансная частота, нагруженная добротность по уровню −3 дБ и чувствительность. Показано, что наибольшую чувствительность обеспечивает CDSRR, наибольшую и наиболее стабильную добротность – DSRR на подложке при низких потерях, а наилучшую повторяемость отклика к диэлектрическим потерям во всём диапазоне – CCSR. Полосовой отклик DSRR уменьшается при пробах с большими потерями, тогда как режекторные отклики CCSR и CDSRR сохраняются. Сформулированы рекомендации по применению каждого типа датчика.

Ключевые слова: СВЧ-датчик, резонаторный датчик, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, нагруженная добротность, чувствительность, сравнительный анализ, электромагнитное моделирование.

Введение

Измерение диэлектрических характеристик жидких сред в сверхвысокочастотном диапазоне востребовано в пищевой и химической промышленности, биомедицине, экологическом мониторинге и контроле качества технологических жидкостей. По сравнению с традиционными химическими методами микроволновые измерения являются неразрушающими, быстрыми, не требуют реагентов и допускают работу в реальном времени [1, 2]. Информативным параметром служит комплексная диэлектрическая проницаемость среды, действительная и мнимая части которой связаны с составом, концентрацией компонентов и наличием примесей. Регистрация этих величин и составляет физическую основу СВЧ-сенсорики жидкостей [3].

Среди известных подходов наибольшую чувствительность к малым изменениям проницаемости пробы обеспечивают резонаторные датчики, в которых электромагнитная энергия локализуется в малой области чувствительного элемента. К ним относятся разомкнутые кольцевые резонаторы и их комплементарные аналоги, кольцевые

и спиральные структуры, а также многокольцевые конфигурации [4-9]. Принцип действия таков: появление пробы в зоне сильного поля изменяет эффективную ёмкость резонатора, что смещает его резонансную частоту, изменяет глубину и добротность резонанса. Связь относительного сдвига частоты с возмущением ёмкости в первом приближении линейна:

$$\frac{\Delta f_r}{f_0} \approx -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C_0}. \quad (1)$$

Это соотношение показывает, что чем выше доля энергии поля, сосредоточенная в объёме пробы, тем сильнее отклик датчика. Ключевыми метрологическими показателями резонаторного датчика являются чувствительность, определяемая как модуль производной резонансной частоты по проницаемости пробы, а нагруженная добротность, вычисляемая по ширине резонансной кривой на уровне −3 дБ от экстремума. Высокая добротность повышает разрешающую способность датчика по диэлектрической проницаемости, поскольку минимально различимое изменение проницаемости обратно пропорционально добротности [10].

Несмотря на обилие публикаций по отдельным типам резонаторных СВЧ-датчиков, прямое сопоставление разнородных конструкций затруднено: в литературе они исследуются на разных подложках, частотах, пробах и при различных способах подвода жидкости, что делает заявленные значения чувствительности и добротности несопоставимыми между собой.

Цель настоящей работы — провести сравнительный анализ трёх конструктивно различных резонаторных СВЧ-датчиков в единых условиях тестирования, когда проба задаётся одними и теми же парами значений (ε_r, $tg\delta$), а каждый датчик сохраняет свою исходную геометрию и способ ввода пробы. В качестве объектов выбраны комплементарный круговой спиральный резонатор (CCSR) [11, 12], комплементарный прямоугольный двойной кольцевой резонатор (CDSRR) в составе патч-антенны [13-15] и двухкольцевой планарный резонатор с микрофлюидным каналом [16, 17].

В разделах 1–3 для каждого датчика рассмотрены конструкция, эквивалентная схема и аналитический расчёт сосредоточенных параметров; в разделе 4 приведены результаты численного моделирования и сравнительный анализ; в заключении сформулированы выводы и рекомендации.

1. Комплементарный круговой спиральный резонатор (CCSR)

Чувствительным элементом первого датчика служит комплементарный круговой спиральный резонатор, образованный системой концентрических щелевых вырезов в заземляющей плоскости двусторонней печатной платы [11, 12]. Структура получается применением принципа Бабине к спиральному проводящему резонатору: металлические дорожки и зазоры меняются ролями, вследствие чего магнитный отклик исходной спирали преобразуется в электрический отклик комплементарной структуры. Это позволяет возбуждать резонатор обычной микрополосковой линией, проходящей по верхней стороне платы. На резонансной частоте в области щелей формируется сильно локализованное электрическое поле, чувствительное к проницаемости пробы, размещаемой над щелями.

Геометрические и электрофизические параметры структуры приведены в работе [12] и сведены далее: внутренний радиус щелей r_1 = 2,0 мм, внешний радиус r_2 = 3,0 мм, ширина щелей 0,5 мм, число концентрических витков N = 2. Резонатор выполнен на подложке FR4 с относительной диэлектрической проницаемостью 4,4, толщиной 1,6 мм и тангенсом угла потерь 0,02; толщина медной металлизации 35 мкм, размеры платы 25 × 30 мм. Целевая рабочая частота датчика — 2,4 ГГц (диапазон ISM).

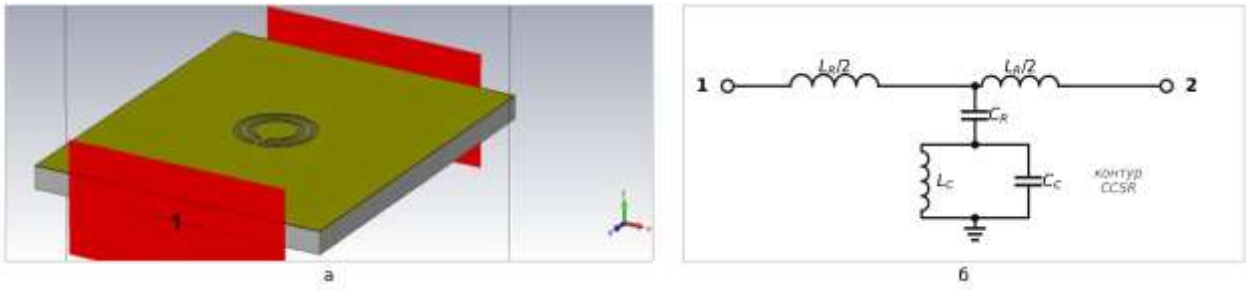


Рис. 1. CCSR-датчик, связанный с микрополосковой линией передачи:
а – модель в CST; *б* – эквивалентная электрическая схема

Внешний вид модели в CST и эквивалентная схема датчика показаны на рисунке 1 (*а, б*). Микрополосковая линия представлена двумя последовательными полуиндуктивностями $L_R/2$ и ёмкостью связи C_R между линией и заземляющей плоскостью; собственно резонатор моделируется параллельным колебательным контуром с эквивалентной индуктивностью L_C и ёмкостью C_C. На частоте собственных колебаний контура структура отбирает энергию из линии передачи, что проявляется как резкий провал коэффициента передачи S_{21} (режекторный отклик). Резонансная частота параллельного контура определяется выражением Томсона:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \tag{2}$$

где L и C — эквивалентные индуктивность и ёмкость.

Индуктивность спиральной структуры рассчитывается по модифицированной формуле Уилера для планарных индукторов [18, 19]:

$$L_C = \frac{K_1 \mu_0 N^2 d_{avg}}{1+K_2\rho}, \tag{3}$$

где $K_1 = 2{,}34$ и $K_2 = 2{,}75$ — эмпирические коэффициенты для круговой геометрии, μ_0 — магнитная постоянная, N — число витков.

А средний диаметр и коэффициент заполнения вводятся как:

$$d_{avg} = \frac{d_{out}+d_{in}}{2}, \quad \rho = \frac{d_{out}-d_{in}}{d_{out}+d_{in}}. \tag{4}$$

Для рассматриваемой геометрии ($d_{out} = 2r_2 = 6{,}0$ мм, $d_{in} = 2r_1 = 4{,}0$ мм) получаем d_{avg}= 5,0 мм и ρ = 0,2, что после подстановки в формулу (3) даёт L_C = 37,94 нГн. Эквивалентная ёмкость определяется из условия резонанса на целевой частоте:

$$C_C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_C} = 0{,}116 \text{ пФ}. \tag{5}$$

Подстановка этих значений в выражение (2) воспроизводит рабочую частоту 2,400 ГГц, согласующуюся с экспериментальными данными первоисточника [12]; независимый полноволновой расчёт пустого датчика даёт близкое значение около 2,2 ГГц. Анализ механизмов потерь показывает, что добротность структуры на подложке FR4 ограничивается преимущественно диэлектрическими потерями: расчётная ненагруженная добротность составляет около 43, нагруженная — около 26.

Таким образом, CCSR представляет собой компактный режекторный датчик с предсказуемым LC-описанием; его сильная сторона — высокая локализация поля в малом объёме пробы при умеренной добротности подложки FR4.

2. Комплементарный двойной кольцевой резонатор (CDSRR)

Второй датчик построен на комплементарном прямоугольном двойном кольцевом резонаторе, размещённом в заземляющей плоскости микрополосковой патч-антенны [13-15]. Резонатор представляет собой пару концентрических щелевых вырезов в форме разомкнутых прямоугольников; разрывы внешнего и внутреннего колец расположены на противоположных сторонах, что обеспечивает максимальную ёмкостную связь и сильную локализацию поля в зоне щелей. Из двух исследованных в первоисточнике схем размещения пробы в настоящей работе рассматривается исключительно конфигурация с полным покрытием антенны исследуемой жидкостью со стороны патча (Configuration 2): такая схема соответствует погружению датчика в проточную ячейку и обеспечивает максимальный коэффициент заполнения поля пробой.

Геометрия резонатора по данным [14]: длина стороны внешнего кольца – 7,0 мм, внутреннего — 5,0 мм, ширина щели, ширина разрыва и расстояние между кольцами равны 1,0 мм. Подложка — FR4 с проницаемостью 4,3, толщиной 1,6 мм и тангенсом угла потерь 0,019; толщина металлизации 35 мкм, размеры платы патч-антенны 58 × 76 мм. Отклик датчика регистрируется по коэффициенту отражения S_{11}, поскольку патч-антенна является однопортовой структурой.

Модель датчика в CST и его эквивалентная схема показаны на рисунке 2 (а, б).

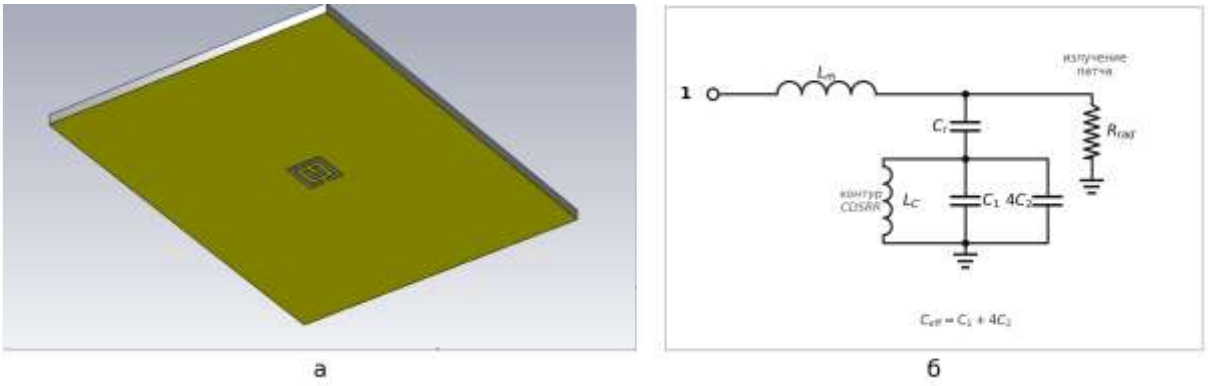


Рис. 2. CDSRR-датчик на основе патч-антенны (однопортовый, по S_{11}):
а – модель в CST; *б* – эквивалентная электрическая схема

Питающая микрополосковая линия моделируется индуктивностью L_m; излучение патча учитывается сопротивлением R_{rad}; собственно резонатор представлен параллельным контуром, образованным индуктивностью колец LC, распределённой ёмкостью разрывов C_1 и взаимной ёмкостью между кольцами C_2, и связан с линией через ёмкость C_r. Эффективная ёмкость контура с учётом двойной кольцевой топологии равна:

$$C_{eff} = C_1 + 4C_2, \tag{6}$$

где множитель 4 учитывает параллельное соединение четырёх участков взаимной ёмкости [13].

Распределённая ёмкость щели рассчитывается через полные эллиптические интегралы первого рода:

$$C_1 = 2\varepsilon_0\varepsilon_{eff}\,\ell\,\frac{K(k)}{K(k')}, \quad \varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_{r,sub}+1}{2}, \tag{7}$$

где ε_{eff} — эффективная проницаемость, учитывающая частичное прохождение поля через подложку и воздух, k — модуль интеграла, ℓ — длина щелей.

Индуктивность колец оценивается по приближению Уилера для квадратной петли [13, 15, 19] и составляет L_C = 14,91 нГн; расчётные ёмкости C_1 = 55,0 фФ и C_2 = 7,4 фФ дают суммарную эффективную ёмкость около 84,6 фФ. Прямой расчёт по формуле (2) приводит к завышенной резонансной частоте (около 4,5 ГГц), что обусловлено упрощениями модели (краевые эффекты, паразитные ёмкости, идеализация эффективной проницаемости). Для согласования с экспериментом вводится калибровочный коэффициент $k_{cal} \approx 3{,}73$ к суммарной ёмкости:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_C\, k_{cal}\, C_{eff}}}. \qquad (8)$$

После чего расчётная частота составляет 2,320 ГГц и совпадает с экспериментальной [14]. Численное моделирование конфигурации с полным покрытием показывает рабочий резонанс CDSRR-структуры в окрестности 2,7 ГГц с глубоким согласованием ($S_{11} \approx -30$ дБ) и чувствительностью около 8,8 МГц на единицу проницаемости в области высоких ε_r, характерных для воды; нагруженная добротность ограничена потерями FR4 и составляет порядка нескольких десятков. Таким образом, CDSRR в конфигурации полного покрытия обеспечивает большой коэффициент заполнения и, как следствие, высокую чувствительность; платой за это являются крупные габариты патч-антенны и многомодовость частотной характеристики.

3. Двухкольцевой планарный резонатор с микрофлюидным каналом (RGV)

Третий датчик представляет собой двухкольцевой планарный резонатор, расположенный на одной стороне подложки и связанный с двумя микрополосковыми линиями передачи через ёмкостные зазоры [16, 17]. Резонатор образован двумя концентрическими открытыми квадратными кольцами с разрывами на противоположных сторонах. В отличие от первых двух датчиков, конструкция возбуждается с двух сторон, поэтому отклик регистрируется по коэффициенту передачи S_{21} и имеет вид полосового максимума, а не провала. Проба подаётся через 3D-печатный микрофлюидный канал прямоугольного сечения, пересекающий щель внешнего кольца в вертикальном направлении (RGV), что обеспечивает бесконтактный режим измерений.

Геометрия по данным [17]: внешнее кольцо имеет внешнюю сторону 6,675 мм и внутреннюю 5,000 мм при ширине проводника 0,838 мм и щели 1,300 мм; внутреннее кольцо — внешнюю сторону 3,800 мм и внутреннюю 2,125 мм при той же ширине проводника и щели. Линии передачи шириной 1,0 мм подходят к боковым сторонам внешнего кольца с зазором связи 0,5 мм. Подложка — Rogers RT/duroid 5880 с проницаемостью 2,20, толщиной 0,79 мм и весьма малым тангенсом угла потерь 0,0009; размеры платы 30 × 40 мм, толщина металлизации 35 мкм. Канал сечением 3 × 1 мм и длиной 40 мм вмещает 0,12 мл пробы.

Модель резонатора в CST и его эквивалентная схема приведены на рисунке 3 (*а, б*).

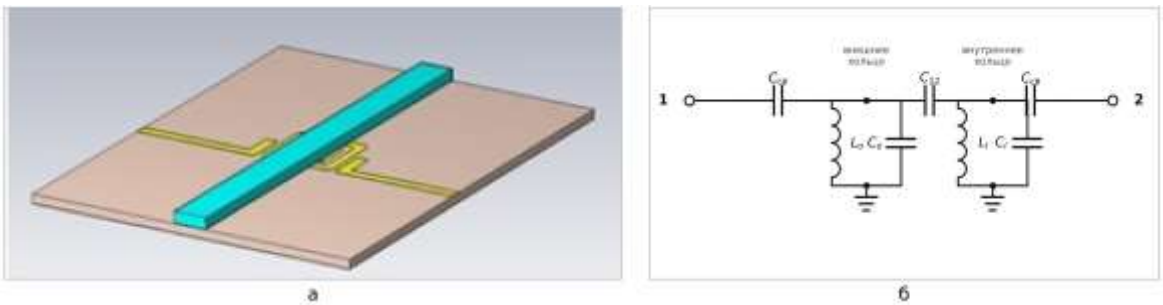


Рис. 3. Двухкольцевой резонатор (двухполюсный полосовой контур):
а – модель в CST; *б* – эквивалентная электрическая схема

Каждое кольцо моделируется параллельным контуром (внешнее — L_o, C_o; внутреннее — L_i, C_i); кольца связаны между собой и подключены к двум портам через ёмкости связи, что соответствует двухполюсному полосовому фильтру. Эффективная проницаемость микрополосковой структуры рассчитывается по полуэмпирической формуле Хаммерстада:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left(1+\frac{12h}{W}\right)^{-1/2}, \quad (9)$$

что для линии шириной 1,0 мм на данной подложке даёт ε_{eff} = 1,785.

Индуктивность квадратного контура оценивается по модификации формулы Гринхауса для микрополосковых петель [19] (выражение, аналогичное (6)) и составляет 10,80 нГн для внешнего кольца и 3,95 нГн для внутреннего. Эквивалентная ёмкость определяется из условия резонанса (формула 6) при базовой частоте 4,5 ГГц и для внешнего кольца равна 116 фФ. Эффективные диэлектрические параметры пробы в канале (вода с растворёнными примесями) описываются теорией смешения сред Максвелла–Гарнетта:

$$\varepsilon_{eff}^{mix} = \varepsilon_h \frac{\varepsilon_i+2\varepsilon_h+2f(\varepsilon_i-\varepsilon_h)}{\varepsilon_i+2\varepsilon_h-f(\varepsilon_i-\varepsilon_h)}, \quad (10)$$

где ε_h — проницаемость среды-носителя, ε_i — проницаемость включений, f — их объёмная доля.

Ненагруженная добротность складывается из долей проводниковых, диэлектрических и излучательных потерь:

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{rad}}. \quad (11)$$

С оценочными значениями $Q_c \approx 250$, $Q_d \approx 2500$ и $Q_{rad} \approx 600$, получим ненагруженную добротность около 160 и нагруженную около 115 для пустого канала. Благодаря подложке с малыми потерями Rogers двухкольцевой резонатор обладает существенно более высокой добротностью, чем датчики на FR4; вместе с тем при заполнении канала водой добротность резко падает (по данным [17] до уровня порядка десяти) из-за доминирования диэлектрических потерь жидкости.

Таким образом, двухкольцевой резонатор на подложке с низкими потерями обеспечивает наибольшую добротность и удобный бесконтактный ввод пробы; его особенностью является полосовой характер отклика, чувствительный к потерям в пробе.

4. Сравнительный анализ резонаторов в единых условиях

Для объективного сопоставления все три датчика исследованы методом полноволнового электромагнитного моделирования в среде CST Studio Suite [19] с использованием решателя в частотной области в диапазоне 1–6 ГГц при 5000 частотных точках. Каждый датчик сохранял свою исходную геометрию и способ ввода пробы; варьировались только диэлектрические параметры материала пробы. Использовалась прямоугольная сетка из пяти значений проницаемости $\varepsilon_r \in \{1, 10, 25, 50, 78\}$ и двух значений тангенса угла потерь $tg\delta \in \{0{,}01; 0{,}10\}$, что в сумме дало 30 расчётов (по 10 на датчик). Точка $\varepsilon_r = 1$ соответствует пустому датчику. Для каждого расчёта по экспортированной частотной характеристике определялись резонансная частота (положение экстремума «родного» S-параметра), нагруженная добротность по уровню −3 дБ от экстремума и чувствительность как модуль отношения приращения частоты

к приращению проницаемости между соседними значениями ε_r. Сводка конструктивных параметров датчиков приведена в таблице 1.

Таблица 1. Конструктивные и электрофизические параметры исследуемых резонаторов

Параметр	CCSR	CDSRR (Config 2)	Двухкольцевой (RGV)
Топология	спиральные щели в земле	двойное кольцо в патч-антенне	два кольца, 2 линии
Отклик	провал S_{21}	провал S_{11}	пик S_{21}
Подложка	FR4	FR4	Rogers RT/duroid 5880
ε_rподложки	4,4	4,3	2,20
Толщина h, мм	1,6	1,6	0,79
$tg\delta$ подложки	0,02	0,019	0,0009
Габариты платы, мм	25 × 30	58 × 76	30 × 40
L, нГн	37,94	14,91	10,80 / 3,95
C	0,116 пФ	84,6 фФ	116 фФ
Базовая f_0 (CST), ГГц	2,12	4,98	5,23

Зависимости резонансной частоты от проницаемости пробы для всех трёх датчиков приведены на рисунке 4. Во всех случаях частота монотонно убывает с ростом ε_r, что соответствует увеличению эффективной ёмкости. Существенно, что кривые для двух уровней $tg\delta$ практически совпадают: положение резонанса определяется действительной частью проницаемости и слабо зависит от потерь, что важно для раздельного определения ε' и ε''. Кривые подтверждают также различие рабочих диапазонов: CCSR работает ниже 2,2 ГГц, CDSRR — в полосе 2,7–5,0 ГГц, двухкольцевой резонатор — в области 3,6–5,2 ГГц.

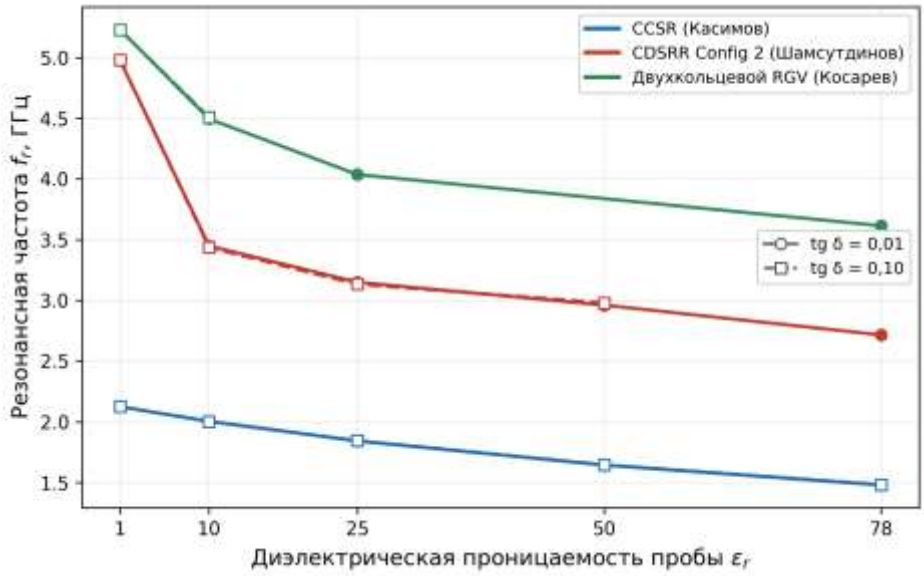


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от диэлектрической проницаемости пробы

Поведение нагруженной добротности показано на рисунке 5 в логарифмическом масштабе. Двухкольцевой резонатор на подложке Rogers сохраняет наибольшую и наиболее стабильную добротность (около 90–140) при малых потерях пробы, что является прямым следствием низких потерь подложки. Добротность CCSR плавно снижается с ростом ε_r и заметно падает при повышении $tg\delta$, оставаясь, однако, конечной

и измеримой. Для CDSRR добротность изменяется немонотонно: при ε_r = 78 и малых потерях провал S_{11} вновь становится глубоким и узким за счёт улучшения согласования патч-антенны, что повышает добротность — это особенность однопортовой антенной структуры, у которой глубина резонанса зависит от условий согласования. Значения добротности при ε_r = 1 ограничены разрешением частотной сетки и носят характер нижних оценок.

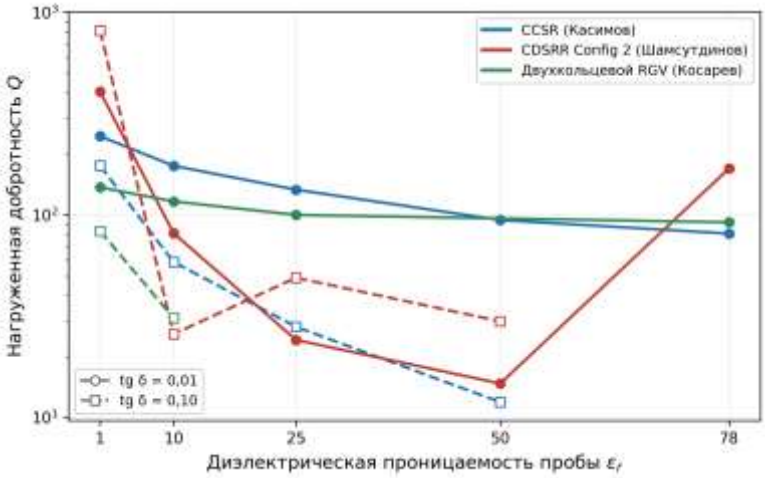


Рис. 5. Зависимость нагруженной добротности от диэлектрической проницаемости пробы (логарифмический масштаб)

Чувствительность датчиков, рассчитанная по соседним интервалам ε_r, приведена на рисунке 6. CDSRR в конфигурации полного покрытия демонстрирует рекордную чувствительность при малых и умеренных значениях ε_r (до ~170 МГц на единицу проницаемости в интервале 1–10), что объясняется большим коэффициентом заполнения поля пробой. Двухкольцевой резонатор также показывает высокую чувствительность на низких ε_r (до ~80 МГц/ед.). Чувствительность CCSR умеренная (около 13 МГц/ед.), но почти не зависит от уровня потерь и наиболее стабильна по диапазону. В области высоких ε_r , характерной для водных сред, чувствительности всех трёх датчиков сближаются и составляют 6–9 МГц на единицу проницаемости.

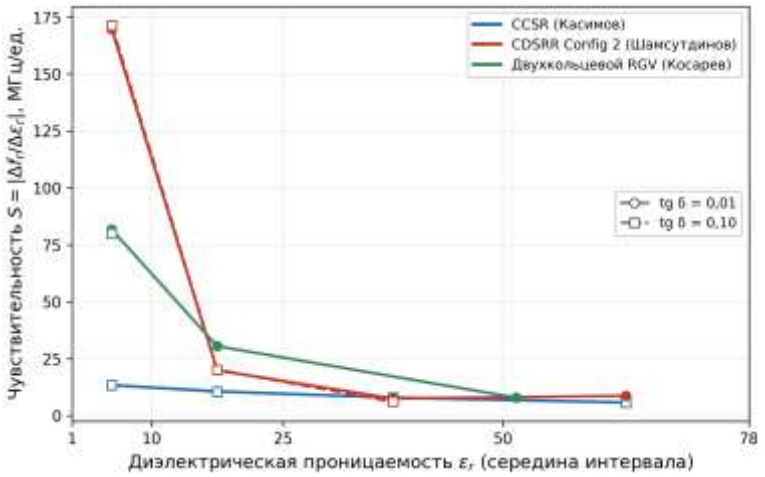


Рис. 6. Зависимость чувствительности от диэлектрической проницаемости пробы (по середине интервалов)

Сравнение «родных» частотных характеристик трёх датчиков для умеренной пробы (ε_r = 25, $tg\delta$ = 0,01) приведено на рисунке 7. Хорошо видны три различных типа отклика: режекторные провалы CCSR (около 1,84 ГГц) и CDSRR (около 3,15 ГГц) и полосовой пик двухкольцевого резонатора (около 4,04 ГГц). На характеристике CCSR помимо рабочего провала присутствует паразитная мода в районе 5,6 ГГц, а характеристика CDSRR является многомодовой; это потребовало отслеживания именно рабочей моды каждого датчика при обработке данных.

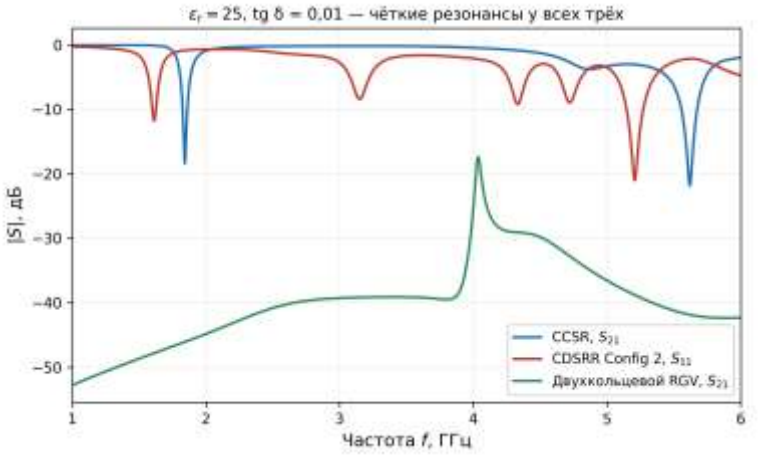


Рис. 7. Сравнение частотных характеристик датчиков при ε_r = 25, $tg\delta$ = 0,01

Принципиальное различие между датчиками проявляется при высокой проницаемости и больших потерях (ε_r = 78, $tg\delta$ = 0,10), что моделирует реальную сильнополярную жидкость с высокими собственными потерями (Рис. 8). В этих условиях полосовой пик двухкольцевого резонатора полностью подавляется: добротность падает настолько, что выраженный максимум исчезает. При обработке всей сетки это проявилось в отсутствии надёжно определяемого резонанса для четырёх из десяти точек двухкольцевого датчика (при $tg\delta$ = 0,10 для ε_r = 25, 50, 78 и при $tg\delta$ = 0,01 для ε_r = 50). Напротив, режекторные провалы CCSR и CDSRR в тех же условиях сохраняются, хотя и становятся менее глубокими и более широкими. Это указывает на качественно разную устойчивость топологий к диэлектрическим потерям пробы: режекторные структуры остаются работоспособными в среде с высокими потерями, тогда как полосовая структура теряет рабочий резонанс.

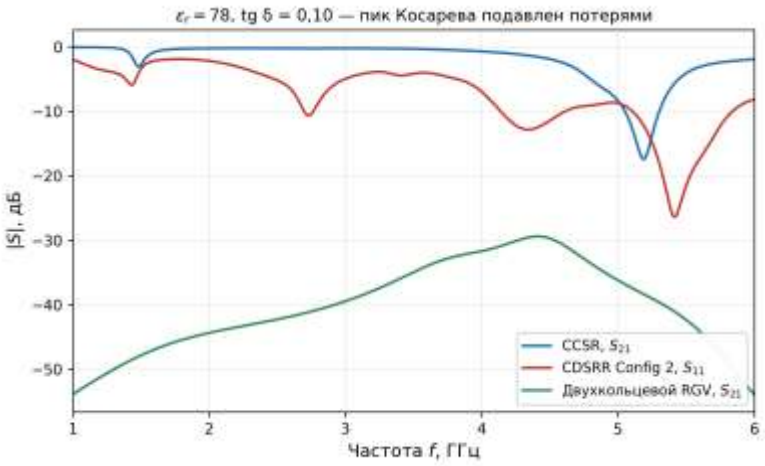


Рис. 8. Сравнение частотных характеристик датчиков при ε_r = 78, $tg\ \delta$ = 0,10 (подавление пика двухкольцевого резонатора)

Обобщённые количественные результаты моделирования сведены в табл. 2. Для каждого датчика приведены базовая частота, частота при ε_r = 78, полный частотный сдвиг в диапазоне, интервал нагруженной добротности, максимальная чувствительность (при низких ε_r) и чувствительность в области высоких ε_r, а также число точек с подавленным резонансом.

Таблица 2. Сводные результаты электромагнитного моделирования

Показатель	CCSR	CDSRR (Config 2)	Двухкольцевой (RGV)
f_0 при ε_r= 1, ГГц	2,12	4,98	5,23
f_0 при ε_r= 78, ГГц	1,48	2,72	3,62
Полный сдвиг Δf_0, МГц	645	2261	1615
Диапазон Q	12–244	14–405	92–137*
S макс. (низкие ε_r), МГц/ед.	13,4	170	82
S при высоких ε_r, МГц/ед.	5,9	8,8	8,0
Подавленные точки	0	1	4

Анализ результатов позволяет выделить сильные и слабые стороны каждого датчика по отдельным показателям. Наибольшая чувствительность достигается CDSRR в конфигурации полного покрытия: максимальный коэффициент заполнения поля пробой обеспечивает наибольший частотный сдвиг, особенно при низких и умеренных ε_r ; недостатками являются крупные габариты патч-антенны и многомодовость отклика. По нагруженной добротности и, следовательно, по разрешающей способности при пробах с малыми потерями все датчики превосходит DSRR на подложке Rogers; его слабая сторона — полосовой отклик, подавляемый в сильнополярных средах с высокими потерями, а также наиболее высокая рабочая частота. По устойчивости отклика к диэлектрическим потерям и предсказуемости поведения во всём диапазоне лучшим является CCSR: его рабочий провал прослеживается монотонно во всех 30 точках, частота практически не зависит от потерь, а компактная двусторонняя печатная плата технологична в изготовлении; платой за это является умеренная чувствительность и невысокая добротность подложки FR4.

При выборе из трех датчиков по общности параметров следует учитывать целевое назначение — измерение диэлектрических свойств жидких сред, которые в большинстве своём полярны и обладают значительными потерями (как, например, вода и водные растворы в диапазоне нескольких гигагерц).

В этих условиях DSRR, несмотря на высокую добротность при малых потерях, теряет рабочий резонанс именно в наиболее практически важной области сильнополярных жидкостей с высокими потерями, а высокая чувствительность CDSRR сосредоточена в области низких ε_r, где жидкие среды встречаются редко. CCSR же сохраняет надёжный, монотонный и слабо зависящий от потерь отклик во всём исследованном диапазоне при наименьших габаритах.

Поэтому правило выбора по совокупности устойчивости, предсказуемости и технологичности для задач характеризации жидких сред для универсальных применений указывает на CCSR, тогда как CDSRR остаётся предпочтительным при необходимости максимальной чувствительности, а DSRR — при работе с жидкостями с малыми потерями, где требуется высокая добротность.

Заключение

Проведён сравнительный анализ трёх конструктивно различных резонаторных СВЧ-датчиков — комплементарного кругового спирального резонатора (CCSR), комплементарного прямоугольного двойного кольцевого резонатора (CDSRR) в конфигурации полного покрытия пробой и двухкольцевого планарного резонатора (DSRR) с микрофлюидным каналом (RGV) — в единых условиях тестирования. Для каждого датчика рассмотрены конструкция, эквивалентная схема и аналитический расчёт индуктивности, ёмкости и резонансной частоты, а сопоставление выполнено по результатам полноволнового моделирования 30 идентичных тестовых точек ($\varepsilon_r \in$ {1, 10, 25, 50, 78}, $tg\delta \in$ {0,01; 0,10}).

По итогам сравнения наибольшие: чувствительность достигается CDSRR (до ~170 МГц на единицу проницаемости при низких ε_r); нагруженная добротность и стабильность добротности — DSRR на подложке с низкими потерями (Q ≈ 90–140 при малых потерях); устойчивость резонансного отклика к диэлектрическим потерям и предсказуемость — CCSR, рабочий провал которого прослеживается во всех точках, а частота практически не зависит от $tg\delta$. С учётом того, что жидкие среды преимущественно полярны и обладают существенными потерями, общее правило выбора необходимого датчика по совокупности устойчивости, предсказуемости и технологичности начинается с CCSR; при этом DSRR оказался наименее устойчивым в сильнополярных средах с большими потерями, где его рабочий пик подавляется.

На основании полученных результатов можно сформулировать следующие рекомендации по применению. CCSR целесообразно использовать как универсальный компактный датчик для рутинного контроля диэлектрических свойств жидкостей, в том числе сильнополярных и с большими потерями, когда важны устойчивость и технологичность. CDSRR в конфигурации полного покрытия предпочтителен в задачах, требующих максимальной чувствительности и допускающих погружение датчика в пробу. DSRR с микрофлюидным каналом RGV оптимален для прецизионных измерений проб с малыми потерями и многопараметрического анализа, где критична высокая добротность и бесконтактный ввод пробы.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить по двум направлениям. Первое направление акцентировано на экспериментальную верификацию полученных численных результатов на изготовленных прототипах, оптимизацию геометрии CCSR с целью повышения добротности, а также на разработку алгоритмов совместного определения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости по совокупности измеряемых параметров отклика (частоты, глубины резонанса и добротности). Второе – определяет применение разработанных и верифицированных резонаторных СВЧ-датчиков в различных средах, отличных от жидкостей [20-22], комплексирования их с достижениями, полученными в волоконно-оптических и радиофотонных технологиях [23, 24], применения новых, более совершенных методов контроля их резонансной частоты и добротности [25].

Список литературы

1. Bao J.Z. Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol / J.Z. Bao, M.L. Swicord, C.C. Davis // Journal of Chemical Physics. – 1996. – Vol. 104, № 12. – P. 4441–4450.
2. Chretiennot T. A microwave and microfluidic planar resonator for efficient and accurate complex permittivity characterization of aqueous solutions / T. Chretiennot, D. Dubuc, K. Grenier // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2013. – Vol. 61, № 2. – P. 972–978.

3. Withayachumnankul W. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization / W. Withayachumnankul, K. Jaruwongrungsee, A. Tuantranont et al. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2013. – Vol. 189. – P. 233–237.
4. Ebrahimi A. High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization / A. Ebrahimi, W. Withayachumnankul, S. Al-Sarawi, D. Abbott // IEEE Sensors Journal. – 2014. – Vol. 14, № 5. – P. 1345–1351.
5. Abdolrazzaghi M. Strongly enhanced sensitivity in planar microwave sensors based on metamaterial coupling / M. Abdolrazzaghi, M. Daneshmand, A.K. Iyer // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2018. – Vol. 66, № 4. – P. 1843–1855.
6. Salim A. Complementary split-ring resonator-based microwave sensor for ethanol detection in mixtures / A. Salim, S. Lim // Sensors. – 2016. – Vol. 16, № 11. – P. 1802.
7. Saadat-Safa M. A CSRR-based sensor for full characterization of magneto-dielectric materials / M. Saadat-Safa, V. Nayyeri, M. Khanjarian et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Vol. 67, № 2. – P. 806–814.
8. Dong Y. Miniaturised patch antennas loaded with complementary split-ring resonators / Y. Dong, H. Toyao, T. Itoh // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 60, № 2. – P. 772–785.
9. Naoui S. Equivalent circuit model of double split-ring resonator for metamaterial-inspired antenna design / S. Naoui, L. Latrach, A. Gharsallah // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2018. – Vol. 28, № 5. – P. e21238.
10. Mohan S.S. Simple accurate expressions for planar spiral inductances / S.S. Mohan, M.Hershenson, S.P.Boyd, T.H. Lee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1999. – Vol. 34, № 10. – P. 1419–1424.
11. Zhang X. High-sensitivity microwave sensor for liquid characterization using a complementary circular spiral resonator / X. Zhang, C. Ruan, ul Haq T., K.Chen // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 4. – P. 787.
12. Vargas M.P. Planar Metamaterial Based Microwave Sensor Arrays for Biomedical Analysis and Treatment. Cham: Springer, 2014. – 178 p.
13. Ong J.J. Design of microwave sensor based on rectangular double split-ring resonator for water quality monitoring / J.J. Ong, H.Y. Yee, A.Y.I. Ashyap, M.R. Kamarudin // 2020 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD). – 2020. – P. 280–284.
14. Harnsoongnoen S. Microwave sensor for nitrate and phosphate concentration sensing S.Harnsoongnoen, A. Wanthong, U. Charoen-In, A. Siritaratiwat // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2018. – Vol. 271. – P. 300–308.
15. Zarifi M.H. High resolution microwave microstrip resonator for sensing applications / M.H.Zarifi, T. Thundat, M. Daneshmand // Sensors and Actuators A: Physical. – 2015. – Vol. 233. – P. 224–230.
16. Mohammadi S. Real-time and hazard-free water quality monitoring based on microwave planar resonator sensor / S. Mohammadi, A.V. Nadaraja, D.J. Roberts, M.H. Zarifi // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Vol. 303. – P. 111663.
17. Vélez P. Microwave microfluidic sensor based on a microstrip splitter/combiner configuration and split ring resonators for dielectric characterization of liquids/ P. Vélez, L. Su, K.Grenier et al. // IEEE Sensors Journal. – 2017. – Vol. 17, № 20. – P. 6589–6598.
18. Pozar D.M. Microwave Engineering/ D.M. Pozar // 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. – 752 p.
19. 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).
20. Морозов Г.А. Микроволновые технологии. Результаты и новые задачи / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2006. – Т. 9. – № 3. – С. 82-91.

21. Анфиногентов В.И. Выбор оптимальной структуры построения СВЧ-комплекса обработки термоактивных композитных материалов / В.И. Анфиногентов, 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. 525-528.
22. Морозов Г.А. Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Р.Р. Самигуллин, А.Р. Насыбуллин, А.С. Шакиров // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 3 (13). – С. 13-24.
23. Насыбуллин А.Р. Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле / А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов, А.А. Севастьянов // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 3. – С. 8.
24. Фархутдинов Р.В. Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном волноводе как датчик контроля диэлектрических параметров жидких сред / Р.В. Фархутдинов, А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2019. – Т. 22. – № 4-2. – С. 114-120.
25. Морозов О.Г. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Д.А. Веденькин, А.А. Севастьянов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (20). – С. 76-86.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THREE TYPES OF MICROWAVE RESONATOR SENSORS FOR MEASURING THE DIELECTRIC PROPERTIES OF LIQUID MEDIA

G.A. Morozov, A.F. Agliullin, I.D. Kasimov, B.Z. Shamsutdinov, A.E. Kosarev

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

Abstract. A comparative analysis of three types of microwave resonator sensors for measuring the dielectric properties of liquid media is presented: a complementary circular spiral resonator (CCSR), a complementary rectangular double split-ring resonator (CDSRR) integrated into a microstrip patch antenna with the sample fully covering the antenna, and a double-ring planar resonator with an integrated microfluidic channel (RGV configuration). For each sensor, the structure, geometric parameters, lumped-element equivalent circuit and analytical calculation of the inductance, capacitance and resonant frequency are given. The comparison is carried out under identical conditions: by means of full-wave electromagnetic simulation in CST Studio Suite (frequency-domain solver, 1–6 GHz), the scattering characteristics are computed for samples with relative permittivity of 1, 10, 25, 50 and 78 at two loss tangent levels (0.01 and 0.10), giving 30 simulations in total. For each point, the resonant frequency, the loaded quality factor from the −3 dB level, and the sensitivity are determined. It is shown that the CDSRR provides the highest sensitivity, the double-ring resonator on a low-loss substrate provides the highest and most stable quality factor, while the CCSR provides the best robustness of the response to dielectric losses and the best predictability over the whole range. The band-pass response of the double-ring resonator is suppressed at high sample losses, whereas the band-stop responses of the CCSR and CDSRR are preserved. Recommendations on the application of each sensor type are formulated.

Keywords: microwave sensor, resonator sensor, dielectric permittivity, loss tangent, loaded quality factor, sensitivity, comparative analysis, electromagnetic simulation.

Статья поступила в редакцию 02.06.2026г.