

БАЗОВЫЕ КОНФИГУРАЦИИ РЕЗОНАНСНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СЕНСОРНЫХ УВЧ RFID ПРИЛОЖЕНИЙ

Зин Мин Хтайк, магистрант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Кирильчук В.Б. – канд. технических наук

Аннотация. Технология беспроводных датчиков предоставила промышленности эффективный инструмент для точного мониторинга и автоматического контроля любой конкретной физической величины. В ситуациях, когда необходимо развернуть множество датчиков, недорогое решение играет решающую роль. Одним из путей снижения затрат на построение крупномасштабных беспроводных сенсорных сетей в настоящее время рассматривается технология радиочастотной идентификации (RFID-Radio Frequency Identification). В этом случае значительный интерес представляют разработки пассивных (безбатарейных) RFID-сенсорных меток. Конструкция пассивных сенсорных меток зависит от принципа передачи данных, используемого считывателем, который можно классифицировать по временным и частотным режимам. Частотный опрос упрощает конструкцию метки, оставляя большую часть сложности и обработки данных считывателю. В этом режиме информация, переносимая сенсорной меткой, может быть извлечена из амплитудно-частотных или фазо-частотных характеристик поля рассеяния антенны сенсорной метки, которая выполняет одновременно роль датчика и устройства электромагнитной связи. Для повышения разрешающей способности контролируемого параметра сенсорной метки в ней необходимо использовать резонансные антенны (дифракционные структуры), обладающие высокой добротностью. В данной работе рассматриваются варианты дифракционных структур, которые могут быть использованы в качестве антенн сенсорных RFID меток.

Ключевые слова. Radio Frequency Identification (RFID), резонансные антенны, RFID сенсоры Split-Ring Resonator(SRR), беспроводной датчик, емкостное зондирование, малые антенны, метаматериалы, разрезной кольцевой резонатор,

Введение

Сенсорная технология радиочастотной идентификации (RFID) стала незаменимой во многих отраслях промышленности благодаря своей способности обеспечивать беспроводной мониторинг окружающей среды и объектов без использования элементов питания (батарей). Эти системы особенно ценны в следующих областях:

(1) отслеживание скоропортящихся товаров, где контроль температуры/влажности предотвращает порчу,

(2) управление промышленными активами для обнаружения вибрации/деформации в оборудовании и

(3) интеллектуальное сельское хозяйство, позволяющее контролировать состояние почвы. Широкое распространение этой технологии обусловлено тремя фундаментальными преимуществами: полной энергетической автономией благодаря радиочастотному излучению, чрезвычайно низкими производственными затратами при массовом производстве и уникальной возможностью считывать данные с сотен датчиков одновременно в пределах поля зрения считывателя.

Внедрение RFID-датчиков включает в себя множество технологических подходов, включая модуляцию обратного рассеяния (импедансную модуляцию), рефлектометрию во временной области и гибридные оптико-радиочастотные системы. Среди них измерение резонансной частоты стало особенно надежным методом благодаря его совместимости с пассивным режимом работы и простой интерпретацией сигнала. Этот метод может быть реализован с использованием различных конструкций антенн (патч-антенны, диполи, меандровые линии) и микроволновых структур, каждая из которых предлагает различные компромиссы с точки зрения чувствительности, занимаемой площади и сложности изготовления. Подход, основанный на использовании резонансной частоты, использует четко определенную взаимосвязь между электромагнитными характеристиками конструкции и воздействиями окружающей среды - физические изменения вызывают измеряемые смещения резонансного пика, которые могут быть обнаружены удаленно без необходимости использования дополнительных активных компонентов или сложной обработки сигнала.

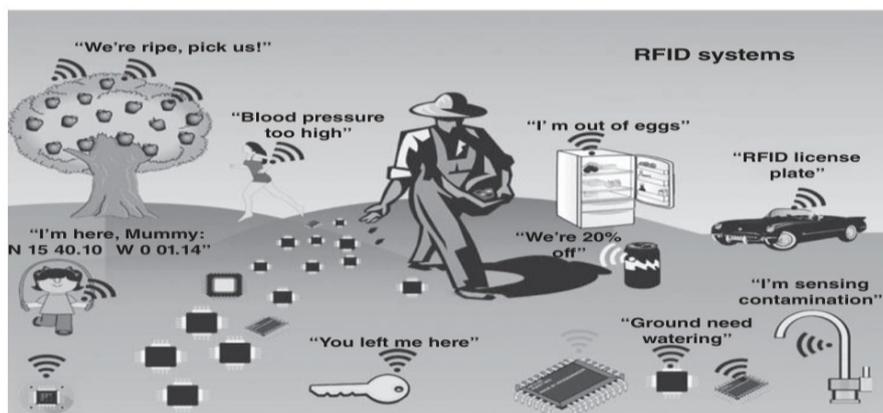


Рис (1) Области применения технологии RFID,

1. Принцип работы и компоненты RFID-систем

Пассивная сверхвысокочастотная RFID-система работает за счет обратного рассеяния, при котором энергия и данные передаются по беспроводной сети между считывателем и меткой с помощью электромагнитных волн [1]. Процесс включает в себя три ключевых этапа:

А) Передача энергии: Считыватель передает непрерывный радиочастотный сигнал (обычно 860-960 МГц). Антенна метки принимает падающую радиочастотную мощность и преобразует ее в постоянный ток с помощью встроенного умножителя напряжения [2].

Минимальная мощность активации метки : от -18 до -22 дБм (в зависимости от чувствительности микрочипа).

Б) Передача данных в метку (нисходящий линия связи):

Считыватель модулирует колебание несущей частоты, используя метод ASK или PSK для отправки команд в метку (например, инвентаризация, чтение/запись и т. д.). Метка демодулирует эти команды с помощью детектора огибающей.

2. Передача данных из метки, используя метод модуляции обратного рассеяния (восходящая линия связи):

Антенны метки рассеивает часть мощности колебания несущей частоты, излучаемого антенной считывателя, характеризуемого коэффициентом отражения (Γ), за счет изменения импеданса нагрузки (Z_t) антенны метки, которое обеспечивается микрочипом. Методы кодирования данных: модуляция FMO или Миллера [3]. На рис(2) приведена базовая конфигурация пассивной RFID-сенсорной системы.

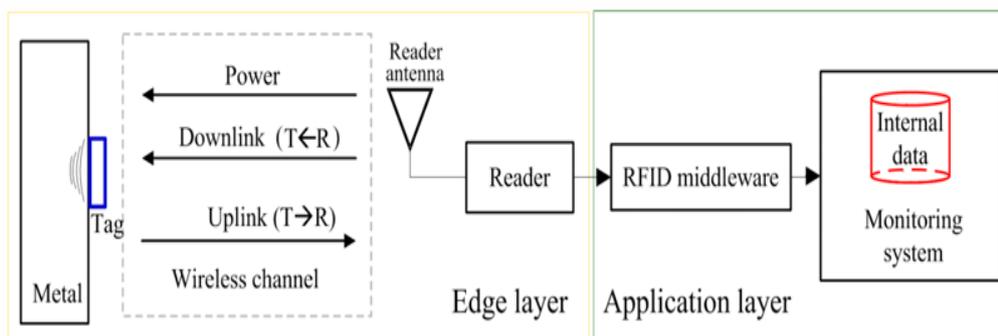


Рис (2.) Конфигурация пассивной RFID-сенсорной системы.

Источник: NDT and E International (Jun Zhang, Gui Yun Tian, Ao Bo Zhao)

Эффективность передачи энергии между считывателем и меткой определяется формулой Фрииса:

$$P_{tag} = P_{reader} \cdot G_{reader} \cdot G_{tag} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot \tau \quad (1)$$

где

$$\tau = 1 - |\Gamma|^2$$

- коэффициент передачи мощности из антенны метки в микрочип.

Работа пассивной RFID-системы, в основном основана на согласовании импедансов и модуляции обратного рассеяния, где резонансные характеристики антенны определяют производительность системы. Для обнаружения на основе резонансной частоты - когда изменения окружающей среды вызывают измеримые сдвиги резонансной частоты f_0 – для достижения высокой чувствительности обнаружения требуются антенны с высокой добротностью (Q). Три основные архитектуры антенн стали доминирующими решениями для применения в системах прецизионного УВЧ RFID зондирования:

1.Патч-антенны (микрополосковые антенны) широко используются в УВЧ RFID-системах благодаря своей плоской структуре и предсказуемым характеристикам излучения. Резонансная частота в первую очередь определяется размерами патча и свойствами подложки [4]:

$$f_r = \frac{c}{2(L + 2\Delta L)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{2}$$

где

L = Физическая длина пути

ΔL = Эффективное увеличение длины за счет окаймляющих полей

ϵ_{eff} = Эффективная диэлектрическая проницаемость подложки.

Таблица (1) Сравнительные характеристики вариантов патч-антенн[5]

Параметр	Один Патч	Сложенный Патч	Слот-Заружен
Резонансная частота	915 МГц	915 МГц	915 МГц
Добротность	45	110	38
Полоса Пропускания	1.8%	0.7%	4.2%
Усиление	6.2dBi	7.8dBi	5.5dBi

различные типы патч-антенн, которые мы можем увидеть в разделе Диагностика (3)

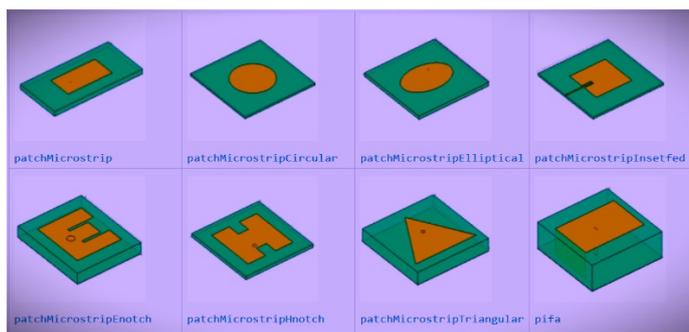
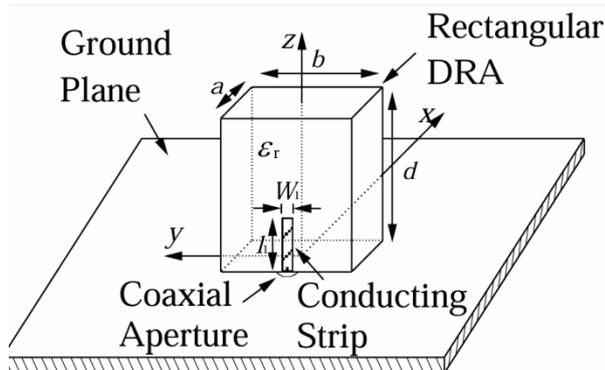


Рис (3.) Типы патч-антенн

2.Диэлектрические резонаторные антенны (ДРА) :В качестве основного излучающего элемента в диэлектрических резонаторных антеннах (DRA) используются резонансные моды диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью, а не металлических проводников [6]. Основная резонансная частота прямоугольного DRA определяется формулой:

$$f_r = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2} \tag{3}$$

где c - скорость света, ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость.



Рис(4) Прямоугольный ДРА с параметрами a,b и d

Таблица (2) показатели эффективности[7]

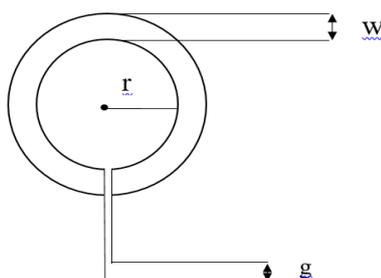
Параметр	Обычный ДРА	Гибридный ДРА	ДРА Напечатанный на 3D-принтере
Добротность	220	650	180
Полоса Пропускания	0.4%	0.15%	0.6%
Температурная стабильность	±5 ppm/°C	±2 ppm/°C	±15 ppm/°C
Стоимость изготовления	\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$

3.Круглый разомкнутый кольцевой резонатор (Circular Open-Loop Ring Resonator)

Круглый резонатор с разомкнутым контуром (COLR) представляет собой плоскую резонансную конструкцию, производительность которой в решающей степени определяется тремя геометрическими параметрами: радиусом контура (r), шириной зазора (g) и шириной проводника (w). Радиус контура (r) определяет основную резонансную частоту (fr), как описано соотношением:

$$f_r \propto \frac{1}{r\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{4}$$

Где; ϵ_{eff} представляет собой эффективную диэлектрическую проницаемость подложки.



Рис(5) Круговой разомкнутый кольцевой резонатор (Circular Open-Loop Ring Resonator)

Таблица(3) Сравнительные характеристики вариантов SRRs[8]

Параметр	Обычный SRR	SRR,Напечатанный на струйном принтере	Графен SRR
Добротность	85	62	45

Инструмент для изготовления	$\pm 3\mu\text{m}$	$\pm 20\mu\text{m}$	$\pm 5\mu\text{m}$
Стоимость	\$0.12	\$0.04	\$1.20
Температурная стабильность	$\pm 50\text{ppm}/^\circ\text{C}$	$\pm 200\text{ppm}/^\circ\text{C}$	$\pm 500\text{ppm}/^\circ\text{C}$

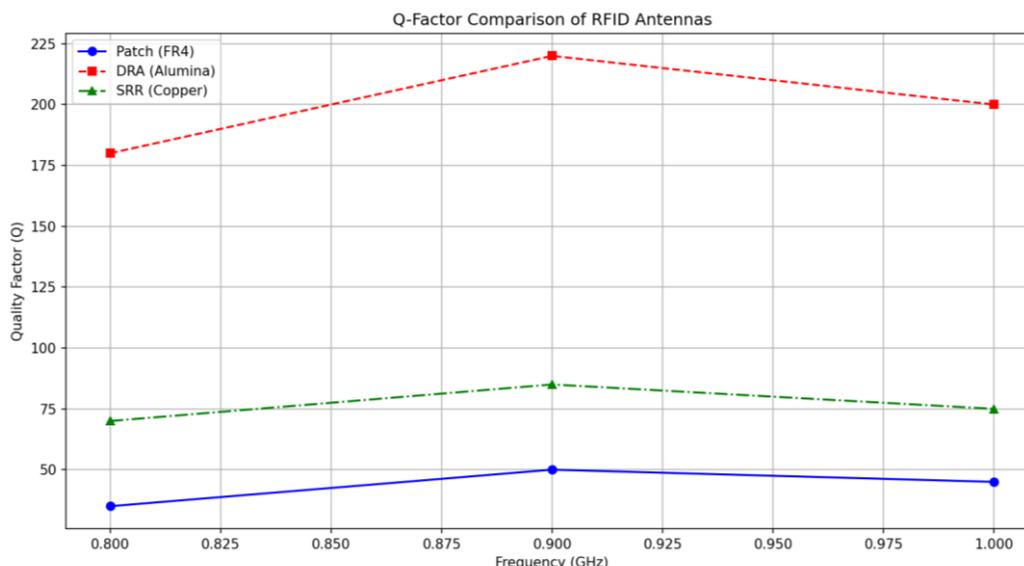
3. Добротность (Q) некоторых дифракционных структур

Высокая добротность $Q = f_0/\Delta f$ имеет решающее значение для сенсорных приложений RFID, использующих метод измерения резонансной частоты.

где

f_0 = Резонансная частота

Δf = Полоса пропускания



Рис(6) Сравнение добротности некоторых RFID-антенн

Таблица (4) Анализ пригодности для радиочастотного зондирования

антенна	Добротность	использование	Ограничение
ДРА	150-500	Сверхточное зондирование (напри- $\pm 0.1^\circ\text{C}$ температура)	Высокая стоимость
SRR	50-150	Низкая стоимость зондирования(напри-метки влажности)	Узкая полоса пропускания
Патч	30-80	Промышленный мониторинг (напри-вибрация и деформация)	Умеренное разрешение

Для сенсорных RFID систем, использующих круглый разомкнутый кольцевой резонатор, в качестве сенсора, изменение резонансной частоты за счет изменения диэлектрической проницаемости вблизи его зазоров, например, влажности воздуха, (ϵ_{air}) определяется из формулы:

$$\Delta f_0 \approx -\frac{f_0}{2} \cdot \frac{\Delta \epsilon_{air}}{\epsilon_{air}} \tag{5}$$

Диэлектрическая проницаемость влажного воздуха;

$$\epsilon_{air}(RH) = 1 + \left(\frac{P_{dry} RH + P_{sat}}{P_{atm}} \right) \cdot (\epsilon_{water} - 1) \quad (6)$$

- $P_{dry}=1.00058$ (диэлектрическая проницаемость сухого воздуха)
- $P_{sat}=0.0196$ (коррекция насыщения при 25°C)
- $\epsilon_{water}=80$ (диэлектрическая проницаемость воды)

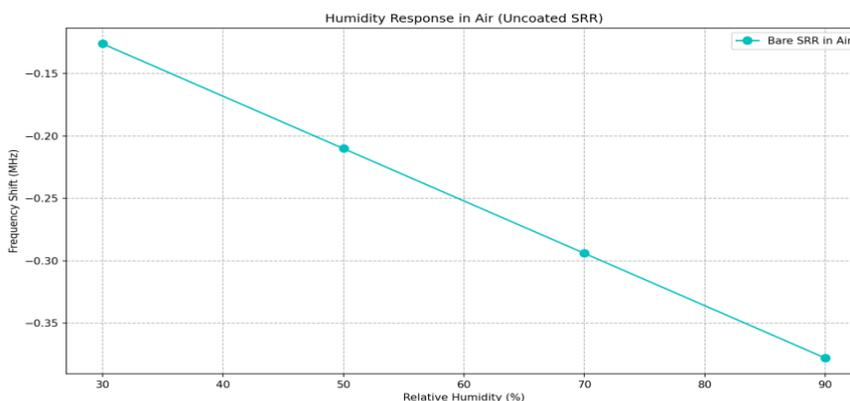
Для SRR без покрытия на воздухе

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = -0.5 \left(\frac{\epsilon_{air}(RH)}{1} \right) \quad (7)$$

Конструкция SRR: Материал: Чистая медь на подложке FR4. Зазор (g): 100 мкм (оптимальный для взаимодействия с воздухом). Резонанс: 915 МГц . Данные калибровки (25°C):

Таблица (5) Зависимость смещения резонансной частоты относительной влажности воздуха

Относительная Влажность Воздуха	ϵ_{air}	Δf_0 (кГц)
30%	1.00072	-126
50%	1.00080	-210
70%	1.00088	-294



Рис(7). Зависимость смещения резонансной частоты относительной влажности воздуха

Заключение

В работе выполнен сравнительный анализ трех типов резонансных антенн, которые пригодны для использования в сенсорных RFID приложениях. Показано что наибольшей добротностью обладают диэлектрические резонаторные антенны. Дифракционные рассеивающие структуры на основе кольцевых разомкнутых резонаторов (SRR) характеризуются меньшей, чем ДРА добротностью, однако они более технологичны, а следовательно, более дешевы в изготовлении. SRR имеют меньшую дальность считывания (3-5 м), чем патч-антенны, их добротность (50-150) остается достаточной для большинства приложений Интернета вещей, где доминирующими требованиями являются

миниатюризация и стоимость. Этот компромисс делает SRRs оптимальным выбором для одноразовых сенсорных сетей высокой плотности в интеллектуальной упаковке и носимых системах.

Список использованных источников

1. Finkenzeller, K. (2010). *RFID Handbook* (3rd ed.). Wiley.
2. Nikitin, P. V., et al. (2005). *Power Reflection Coefficient Analysis for Complex Impedances in RFID Tag Design*. IEEE T-MTT.
3. ISO/IEC 18000-63. (2015)
4. Balanis, C.A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley
5. Nikitin, P.V., & Rao, K.V.S. (2008). *Performance Benchmarks for RFID Antennas*. IEEE T-AP.
6. Mongia, R.K., & Bhartia, P. (1994). *Dielectric Resonator Antennas - A Review*. IEEE T-AP
7. ITU-R Report SM.2392-0 (2022). *Performance Metrics for UHF RFID Antennas*
8. RFID Journal White Paper (2023). *SRR Tags: Performance Benchmarking*