

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 528.835

Зин Мин Хтайк

**Беспроводные сенсорные идентификаторы на основе резонансных
рассеивающих структур УВЧ диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание степени магистра технических наук
по специальности 7-06-0713-03
«Радиосистемы и радиотехнологии»

_____Зин Мин Хтайк

Научный руководитель

Кирильчук Валерий Борисович

Кандидат технических наук, доцент

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

Современные беспроводные сенсорные сети (БСС) на основе технологии радиочастотной идентификации (RFID) ультравысокой частоты (УВЧ, 860–960 МГц) представляют собой перспективное направление в мониторинге окружающей среды и объектов (ОСнО). Изначально разработанная для отслеживания ресурсов, RFID-технология в УВЧ-диапазоне сегодня рассматривается как основа для создания экономичных, быстро развертываемых и энергоэффективных сенсорных систем. Области применения таких сетей охватывают экологию, промышленность, сельское хозяйство, здравоохранение, умные дома и офисы, что делает их разработку актуальной задачей.

Ключевой проблемой при построении крупномасштабных БСС является необходимость использования малогабаритных, дешевых сенсорных узлов (СУ) с минимальным энергопотреблением. Решение этой задачи возможно на основе пассивных и полупассивных RFID-транспондеров, работающих по стандарту EPCglobal Class 1 Gen 2 (ISO/IEC 18000-63). Однако существующие RFID-сенсорные чипы (например, EM4325, SL900A, ROCKY100 и др.), оснащенные цифровыми интерфейсами и микроконтроллерами, имеют высокую стоимость и повышенное энергопотребление, что ограничивает дальность связи и масштабируемость сетей, особенно в пассивном режиме работы.

Альтернативным подходом является применение антенно-сенсорных транспондеров (АСТ), в которых антенна одновременно выполняет функции сенсора, реагируя на изменения параметров окружающей среды через вариации своих электродинамических характеристик (входного импеданса, поля рассеяния, поляризации и др.). Такой метод позволяет отказаться от дополнительных датчиков и микроконтроллеров, снижая стоимость и энергопотребление системы.

В частности, использование диэлькометрического подхода на основе резонансных антенн с высокой добротностью обеспечивает высокую чувствительность к диэлектрической проницаемости контролируемых сред.

Целью диссертационной работы является разработка методов построения энергоэффективных RFID-сенсорных узлов УВЧ-диапазона на основе пассивных и полупассивных антенно-сенсорных транспондеров, обеспечивающих высокую точность мониторинга параметров окружающей среды при минимальной стоимости и энергопотреблении.

Научная новизна работы заключается в предложении новых схемотехнических и конструктивных решений для АСТ, оптимизированных

под задачи дистанционного сбора данных в условиях аппаратных ограничений пассивных RFID-систем.

Практическая значимость исследования связана с возможностью создания недорогих, масштабируемых сенсорных сетей для мониторинга в реальном времени, что актуально для задач безопасности, экологии, промышленности и умной инфраструктуры.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТА

Связь работы с крупными научными программами:

Тема диссертационной работы соответствует ГБЦ (№ 21-3160) «Разработка методов построения электронных средств дистанционного сбора, обработки, хранения и передачи информации на основе пассивных и полуактивных сенсорных элементов и устройств радиочастотной идентификации УВЧ диапазона», выполняемой в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (подпрограмма «Микро- и наноэлектроника», задание № 3.16). Исследование относится к области приборостроения и инновационных материалов (п. 4), а также обеспечения безопасности человека, общества и государства (п. 6).

Цель работы:

Разработка и исследование конструкции компактной резонансной дифракционных структуры, предназначенной для использования в качестве антенны сенсорного пассивного RFID транспондера УВЧ диапазона.

Задачи исследования:

- выбор и обоснование аналитической модели взаимодействия поля RFID считывателя и сенсорного идентификатора УВЧ диапазона;
- анализ методов построения сенсорных идентификаторов с использованием технологии RFID УВЧ диапазона;
- анализ конструкций компактных резонансных дифракционных структур пригодных для использования в качестве антенн сенсорных RFID идентификаторов УВЧ диапазона;
- выбор и обоснование компактной резонансной дифракционной структуры, предназначенной для использования в качестве антенны сенсорного RFID идентификатора УВЧ диапазона;
- разработка модели и численное моделирование характеристик, выбранной резонансной дифракционной структуры для использования в качестве антенны сенсорного RFID идентификатора УВЧ диапазона;

-разработка экспериментальной конструкции резонансной дифракционной структуры для реализации сенсорного RFID идентификатора УВЧ диапазона;

-разработка методики и экспериментальное исследование характеристик сенсорного RFID идентификатора УВЧ диапазона с использованием разработанной резонансной дифракционной структурой.

Объект исследования:

Резонансная дифракционная структура для пассивного сенсорного идентификатора УВЧ диапазона.

Предмет исследования:

Пространственные и импедансные характеристики разработанной компактной резонансной дифракционной структуры для пассивного сенсорного идентификатора УВЧ диапазона.

Положения, выносимые на защиту:

Методика измерения параметров окружающей среды, основанная на анализе фазочастотных характеристик поля рассеяния пассивных беспроводных резонансных радиочастотных идентификаторов УВЧ-диапазона (860-868 МГц).

Новые конструкции беспроводных сенсорных идентификаторов на основе кольцевых разомкнутых резонансных структур различной формы.

Научная новизна:

Предложена новая методика измерения параметров окружающей среды, основанная на анализе фазочастотных характеристик поля рассеяния пассивных беспроводных резонансных радиочастотных идентификаторов УВЧ-диапазона (860-868 МГц), Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что предложенная конфигурация резонансных рассеивающих структур позволяет регистрировать изменение диэлектрической проницаемости в широком диапазоне (от 1 до 2) с разрешающей способностью $\Delta\epsilon \approx 0,001$ в случае контроля фазовой характеристики поля рассеяния (ПР) и обеспечить контроль амплитудно-частотных характеристик ПР с разрешением по частоте не хуже 1 МГц в диапазоне частот 860-960 МГц.

Личный вклад соискателя ученой степени:

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании метода измерений, проведении численного моделирования и постановке экспериментов по исследованию характеристик, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем-Кандидатом технических наук, доцентом Кирильчуком В.Б .

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на республиканской научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии» (г. Минск 2024 г.); 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск 2025 г.).

Публикации и выступления на конференциях:

1. Зин М. Х. Сенсорный RFID транспондер УВЧ диапазона на основе кольцевого разомкнутого резонатора/ Зин М. Х // материалы открытой республиканской научно-практической интернет-конференции (Республика Беларусь, Минск, 21–22 ноября 2024 года), Минск: БГУИР, 2024. – С. 83-89.

2. Зин М. Х. Базовые конфигурации резонансных дифракционных структур для сенсорных УВЧ RFID приложений/ Зин М. Х // сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Респ. Беларусь, Минск, 22–23 апр. 2025 г.), Минск, БГУИР, 2025.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка, восьми приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 119 страниц, из них 74 страниц текста, 114 рисунков на 38 страницах, 8 таблиц на 4 страницах, список использованных библиографических источников 34 наименований на 2 страницах, список публикаций автора по теме диссертации 2 наименования на 1 странице.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, отмечается новизна и кратко излагается содержание диссертации, а также назначение, задачи, структура разрабатываемого специального программного обеспечения и основные научные результаты исследований.

В **первой главе** рассматриваются теоретические основы и аналитические модели систем радиочастотной идентификации УВЧ диапазона с пассивными транспондерами. В разделе 1.1 анализируются особенности функционирования таких систем, включая принципы энергоснабжения пассивных меток и характеристики их работы в сложной электромагнитной обстановке. Раздел 1.2 посвящен изучению базовой конфигурации RFID-систем, где подробно рассматриваются компонентный состав (считыватели, метки, системный контроллер) и механизмы их взаимодействия.

В разделе 1.3 представлены фундаментальные уравнения дальности связи, описывающие зависимость рабочих характеристик системы от ключевых параметров. Особое внимание уделяется анализу дифракционного множителя для многолучевой модели линии связи (раздел 1.4), где сравниваются характеристики распространения сигнала в линейном (1.4.1) и круговом (1.4.2) поляризационных базисах. Завершает главу представление результатов численного моделирования на рабочей частоте 867 МГц, демонстрирующих практическую применимость разработанных теоретических моделей.

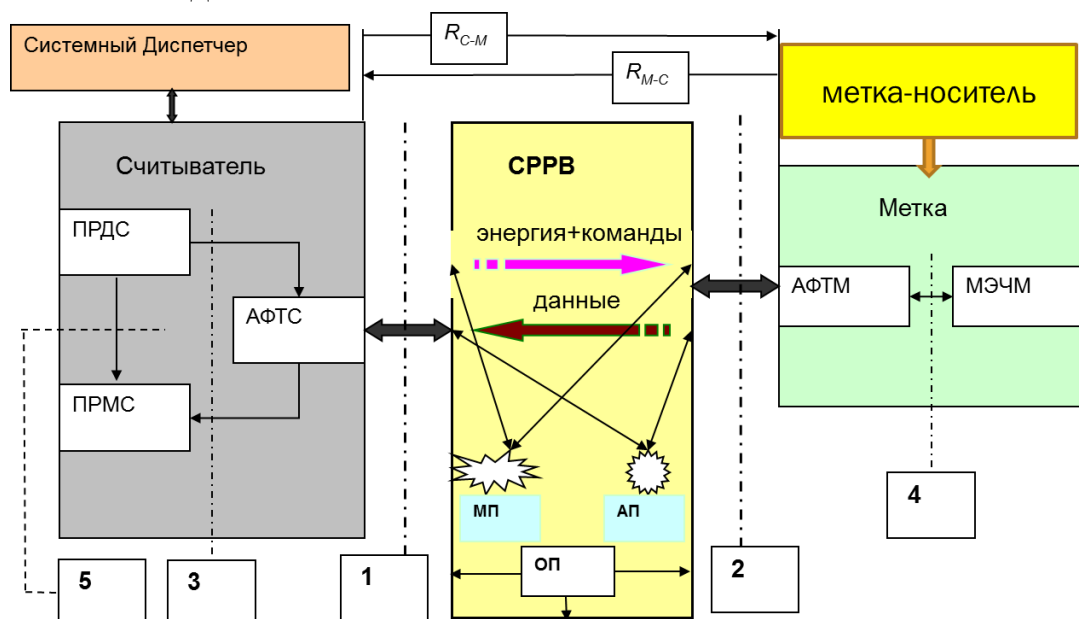


Рисунок 1.1.-Базовые компоненты RFID-системы УВЧ диапазона

В второй главе рассматриваются принципы построения и теоретические основы систем беспроводного мониторинга окружающей среды на базе технологии RFID УВЧ диапазона. Основное внимание уделяется анализу конфигурации системы и математическим моделям, описывающим процессы взаимодействия между компонентами системы.

Конфигурация системы мониторинга включает следующие ключевые элементы:

1. Базовые станции (считыватели), оснащенные передатчиками и приемниками с квадратурной обработкой сигнала
2. Сенсорные транспондеры (СТ) пассивного или полупассивного типа
3. Хост компьютер обработки и сбора данных с специализированным программным обеспечением

Теоретические основы функционирования системы базируются на следующих положениях:

1. Энергетический баланс в системе описывается уравнениями (2.3)-(2.7), связывающими параметры передатчика, приемника и сенсорных транспондеров:

$$P_{rCTN} = p_N(\xi) \frac{P_{TX} G_{TX}}{4\pi r_{0N}^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{CTN}(\xi), \quad (2.3)$$

где $G_{CTN}(\xi)$ и $p_N(\xi)$ - коэффициент усиления антенны СТ с порядковым номером N и коэффициент поляризационного рассогласования в зависимости от контролируемого параметра среды (ξ) соответственно; G_{TX} - коэффициенты усиления антенн считывателя; r_{0N} - расстояние между антеннами считывателя и СТ с порядковым номером N ; p - коэффициент поляризационных потерь; λ -длина рабочей волны считывателя.

Мощность переданную в чип N-го СТ с учетом контролируемого параметра среды (ξ) можно найти через коэффициент передачи мощности $T_{AqCTN}(\xi)$ из антенны СТ в чип СТ:

$$P_{rAqCTN} = P_{rCTN} T_{AqCTN}(\xi) , \quad (2.4)$$

$$\text{где } T_{AqCTN}(\xi) = 1 - |\Gamma_{mN}(\xi)|^2 = \frac{4R_{ACTN}(\xi)R_{qCTN}}{|\dot{Z}_{ACTN}(\xi) + \dot{Z}_{qCTN}|^2};$$

$\left| \dot{I}_{mN}(\xi) \right| = \frac{\dot{Z}_{qCTN} - \dot{Z}_{ACTN}(\xi)}{\dot{Z}_{qCTN} + \dot{Z}_{ACTN}(\xi)}$ - коэффициент отражения от СТ, который зависит от рассогласования импедансов чипа $\dot{Z}_{qCTN} = R_{qCTN} + jX_{qCTN}$ и антенны $\dot{Z}_{ACTN}(\xi) = R_{ACTN}(\xi) + jX_{ACTN}(\xi)$ N-го СТ.

С учетом (2.3) и (2.4) мощность переданная в чип N-го СТ составит:

$$P_{rqCTN} = p_N(\xi) \frac{P_{TX} G_{TX}}{4\pi r_{0N}^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{CTN}(\xi) T_{ACTN}(\xi), \quad (2.5)$$

Рассеянную в направлении считывателя N-м СТ мощность несложно определить через P_{rCTN} и коэффициент отражения его антенны:

$$P_{OPCTN} = P_{rCTN} G_{CTN}(\xi) \left| \dot{I}_{mN}(\xi) \right|^2 \quad (2.6)$$

Мощность отклика N-го СТ на входе приемника считывателя с учетом (2.6) и (2.2) можно определить по формуле:

$${}^{1,0}P_{RXN} = \left({}^{1,0}I_{ACN}^2 + {}^{1,0}Q_{ACN}^2 \right) / Z_0 = \frac{1}{4\pi r_{0N}^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{TX} {}^{1,0}P_{OPCTN} = p_N^2(\xi) \frac{P_{TX} G_{TX}^2}{256\pi^4} \frac{\lambda^4}{r_{0N}^4} G_{CTN}^2 \left| {}^{1,0}\dot{I}_{mN}(\xi) \right|^2, \quad (2.7)$$

2. Метод модуляции обратного рассеяния (МОР) анализируется через дифференциальную эффективную площадь рассеяния (формулы 2.8-2.9)

3. Чувствительность системы определяется пороговыми характеристиками компонентов (уравнения 2.10-2.11)

Методы измерения параметров среды включают:

1. Анализ частотной зависимости пороговой чувствительности транспондера

2. Обработку квадратурных составляющих отраженного сигнала (формулы 2.12-2.15):

На рис. 2.2. качественно показаны значения дифференциальной векторной ЭПР на комплексной плоскости модифицированной диаграммы Смита (для коэффициента отражения (Γ)) для двух режимов работы сенсорной метки при изменении резонансной частоты ее антенны за счет изменения диэлектрической проницаемости среды в области концентрации электрического поля. Первое и второе состояние работы сенсорной метки можно характеризовать с помощью дифференциальных ЭПР для двух значений диэлектрической проницаемости:

$$\begin{aligned}\sqrt{\Delta\delta_{\varepsilon 1}} &= [\dot{\Gamma}_1^{\varepsilon 1} - \dot{\Gamma}_1^{\varepsilon 2}] \\ \sqrt{\Delta\delta_{\varepsilon 2}} &= [\dot{\Gamma}_0^{\varepsilon 1} - \dot{\Gamma}_0^{\varepsilon 2}]\end{aligned}\quad (2.12)$$

Где $\dot{\Gamma}_1^{\varepsilon 1} = a_1^{\varepsilon 1} + jb_1^{\varepsilon 1}$; $\dot{\Gamma}_1^{\varepsilon 2} = a_1^{\varepsilon 2} + jb_1^{\varepsilon 2}$; $\dot{\Gamma}_0^{\varepsilon 1} = a_0^{\varepsilon 1} + jb_0^{\varepsilon 1}$; $\dot{\Gamma}_0^{\varepsilon 2} = a_0^{\varepsilon 2} + jb_0^{\varepsilon 2}$ - комплексные коэффициенты отражения для двух значений диэлектрической проницаемости и бинарных состояний передачи данных.

Изменение значения диэлектрической проницаемости можно охарактеризовать новым вектором изменения разностной дифференциальной ЭПР (РДЭПР):

$$\begin{aligned}\sqrt{\Delta\delta_{\varepsilon}} &= \sqrt{\Delta\delta_{\varepsilon 2}} - \sqrt{\Delta\delta_{\varepsilon 1}} = [\dot{\Gamma}_1^{\varepsilon 1} - \dot{\Gamma}_1^{\varepsilon 2}] - [\dot{\Gamma}_0^{\varepsilon 1} - \dot{\Gamma}_0^{\varepsilon 2}] = \\ &= \sqrt{\Delta\delta_{\varepsilon}} = \left\{ \begin{aligned} &(a_1^{\varepsilon 1} - a_1^{\varepsilon 2}) + j(b_1^{\varepsilon 1} - b_1^{\varepsilon 2}) \\ &(a_0^{\varepsilon 1} - a_0^{\varepsilon 2}) + j(b_0^{\varepsilon 1} - b_0^{\varepsilon 2}) \end{aligned} \right\}^{\frac{1}{2}}.\end{aligned}\quad (2.13)$$

Статические значения коэффициентов отражения в АФТ метки $\dot{\Gamma}_{1,0}^{\varepsilon} = \frac{\dot{Z}_{\text{чМ}}^{1,0} - \dot{Z}_{\text{АМ}}(\varepsilon)}{\dot{Z}_{\text{чМ}}^{1,0} + \dot{Z}_{\text{АМ}}(\varepsilon)}$ определяется соответствующими значениями входного импеданса интегральной схемы метки $\dot{Z}_{\text{чМ}}^{1,0} = R_{\text{чМ}}^{1,0} + X_{\text{чМ}}^{1,0}$ в режиме модуляции цифровым потоком данных (рис.1.5) и комплексным импедансом $\dot{Z}_{\text{АМ}}(\varepsilon) = R_{\text{АМ}}(\varepsilon) + X_{\text{АМ}}(\varepsilon)$ антенны СТ в зависимости от величины относительной диэлектрической проницаемости в сенсорной зоне антенны.

Изменение РДЭПР проявляется в изменении переменных составляющих напряжений на выходе квадратурных каналов $\Delta U_{I_{\text{ACN}}}(\Delta\varepsilon)$ и $\Delta U_{Q_{\text{ACN}}}(\Delta\varepsilon)$ приемника считывателя и, следовательно, позволяет определить изменение диэлектрической проницаемости материала за счет изменения амплитуды напряжения

$$|\Delta U(\Delta\varepsilon)| = \left[\left(\Delta U_{I_{\text{ACN}}}(\Delta\varepsilon) \right)^2 + \left(\Delta U_{Q_{\text{ACN}}}(\Delta\varepsilon) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

или разности фаз

$$\Delta\phi_{\text{RXN}} = \arctg \left(\Delta U_{Q_{\text{ACN}}}(\Delta\varepsilon) / \Delta U_{I_{\text{ACN}}}(\Delta\varepsilon) \right) \quad (2.15)$$

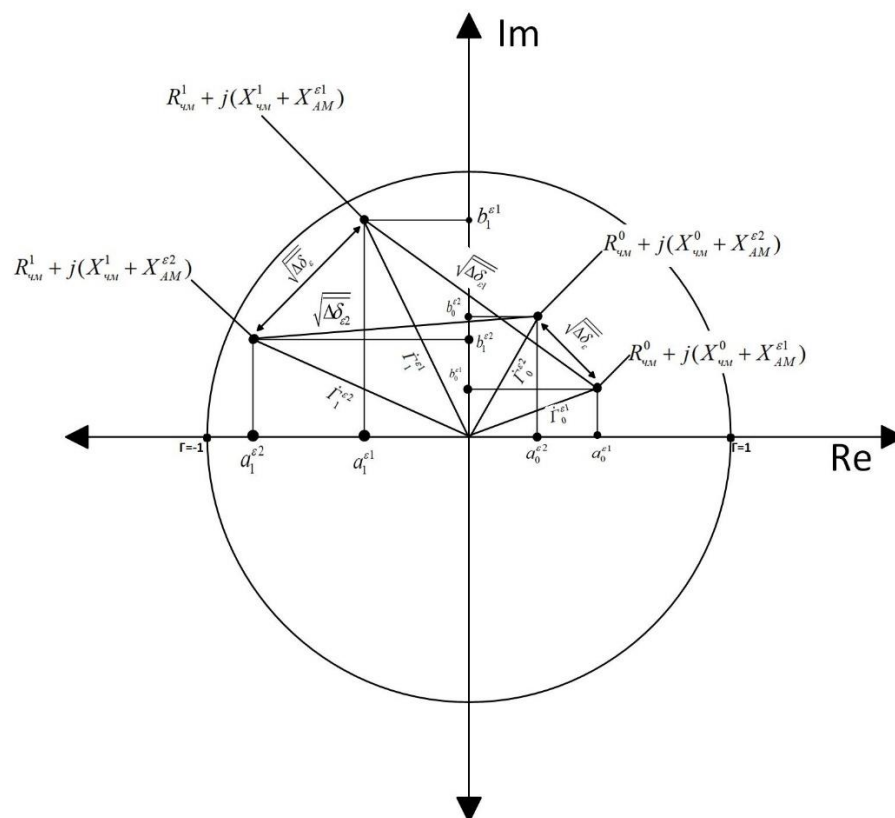


Рисунок 2.2. Представление дифференциальной ЭПР сенсорной метки на модифицированной диаграмме Смита для двух значений диэлектрической проницаемости

Таким образом, регистрацию физического параметра ОСиО можно осуществить двумя методами: основываясь на анализе частотной зависимости пороговой чувствительности сенсорного транспондера (линия связи считыватель - СТ) или амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик комплексного сигнала отклика СТ (линия связи СТ-считыватель).

Основные конфигурации сенсорных транспондеров

В этом разделе рассматриваются ключевые архитектурные решения для сенсорных RFID-транспондеров. Анализируются:

- Пассивные и полупассивные конфигурации
- Варианты интеграции сенсорных элементов
- Особенности электропитания и энергосбережения
- Оптимальные топологии для различных применений

Алгоритм определения резонансной частоты сенсорного транспондера

Представлен инновационный алгоритм определения резонансных характеристик, основанный на:

- Измерении пороговой чувствительности транспондера

- Анализе частотной зависимости параметров отклика
- Корреляционном анализе сенсорных показателей
- Цифровой обработке сигналов в реальном времени

Резонансные дифракционные структуры для электромагнитных сенсорных УВЧ RFID транспондеров

- Диэлектрические резонаторные антенны (DRA)
- Классификация и характеристики DRA
- Детально исследованы три основных типа DRA:
 1. Прямоугольные DRA - простая конструкция, поддержка TE/TM мод
 2. Цилиндрические DRA - симметричная конструкция для двухполюсных решений
 3. Полусферические DRA - пониженная добротность, расширенная полоса пропускания

Кольцевые резонаторные антенны с разомкнутым контуром

Систематизированы четыре типа резонаторов:

1. Круговые (Circular Open-Loop)
2. Треугольные (Triangular Open-Loop)
3. Прямоугольные (Rectangular Open-Loop)
4. Многоугольные (Polygonal Open-Loop)

Для каждого типа приведены:

1. Электродинамические характеристики
2. Параметры добротности
3. Особенности поляризации
4. Чувствительность к параметрам среды

В **третьей главе** представлены результаты разработки и моделирования сенсорных транспондеров с разомкнутыми кольцевыми резонаторами. Исследованы четыре геометрические конфигурации резонаторов: круглые, прямоугольные, треугольные и эллиптические. Для каждой конструкции проведено:

- Разработка электродинамической модели, учитывающей:
 1. геометрические параметры
 2. свойства материалов
 3. взаимодействие с RFID-чипом

Проведенные исследования демонстрируют существенные различия в характеристиках резонаторных антенн в зависимости от их геометрической формы:

- (1) КНД обладает резонаторная антенна треугольной формы. Однако у нее наблюдается и наибольшая частотная зависимость. Анализ показывает, что наилучшая равномерность КНД относится к ККРР при среднем значении 1,5дБи. Наименьшим КНД обладает эллиптическая конструкция. КНД прямоугольного КРР имеет несколько большую величину КНД в сравнении с эллиптической формой и имеет незначительную частотную зависимость. РИС (3.57)
- (2) Добротность обладает прямоугольный КРР (114), а наименьшей – эллиптический резонатор (99,95). Круглый и треугольный резонаторы имеют примерно равные значения добротности порядка 102. РИС (3.58)
- (3) Результаты анализа показывают, что КРР круглой, треугольной и эллиптической форм обладают хорошим фазовым профилем для целей сенсорных приложений. РИС (3.59)
- (4) Вы можете увидеть результаты численного моделирования КРР с сенсорным образцом материала на рисунке (3.68, 3.69, 3.70 и 3.71).

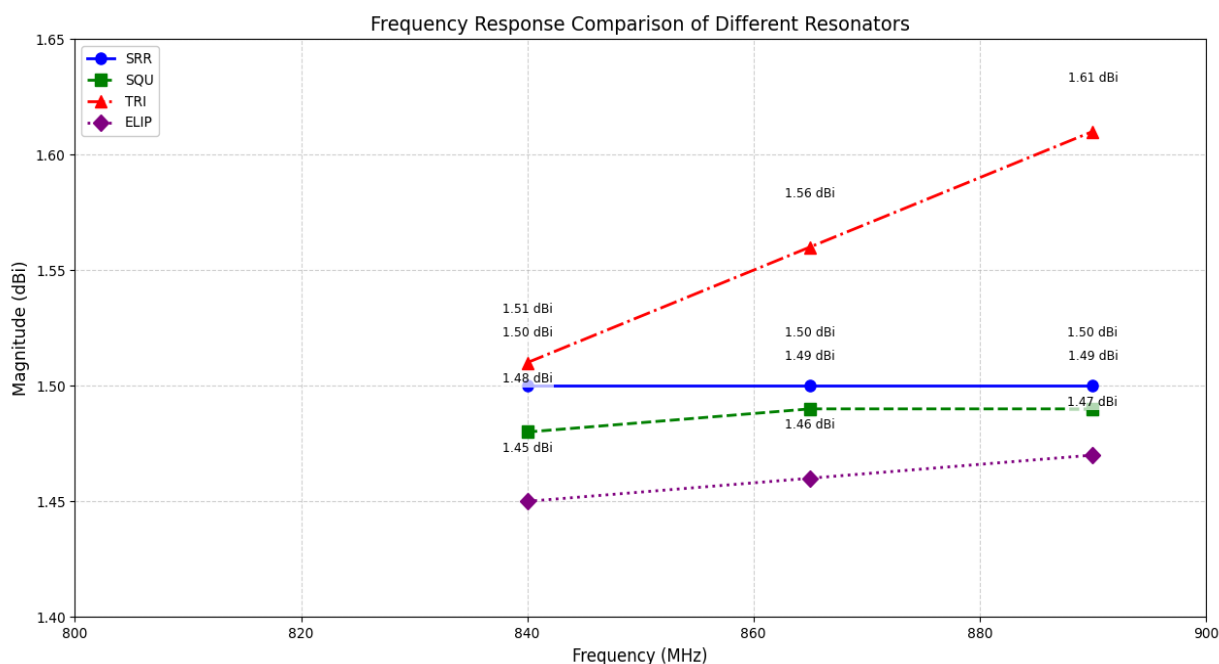


Рисунок 3.57 Частотные зависимости коэффициентов направленного действия для КРР различной формы.

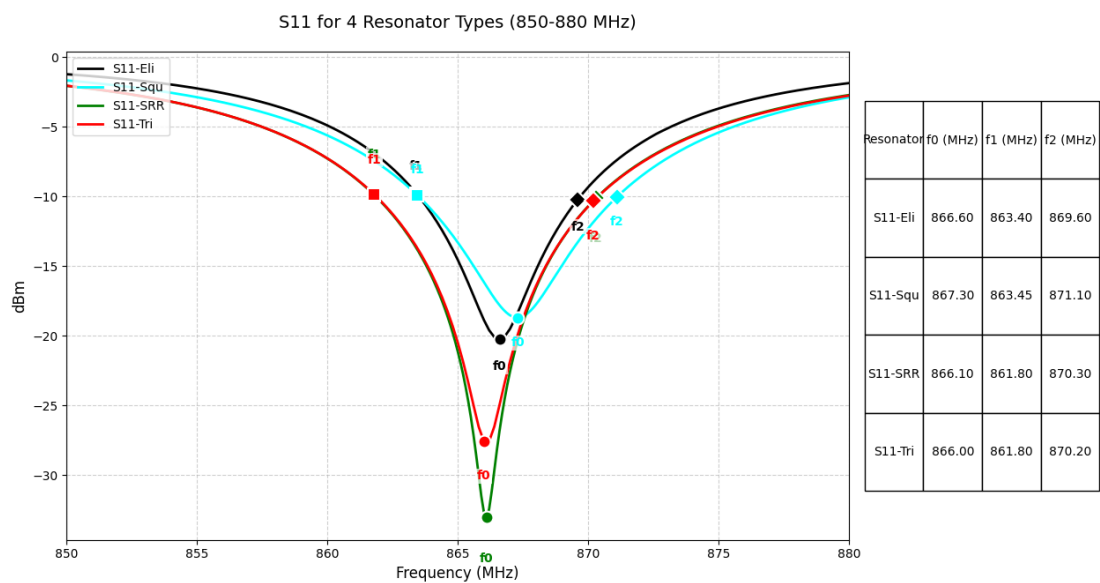


Рисунок 3.58 Частотные зависимости модуля коэффициента отражения (S_{11}) для КРР различной формы.

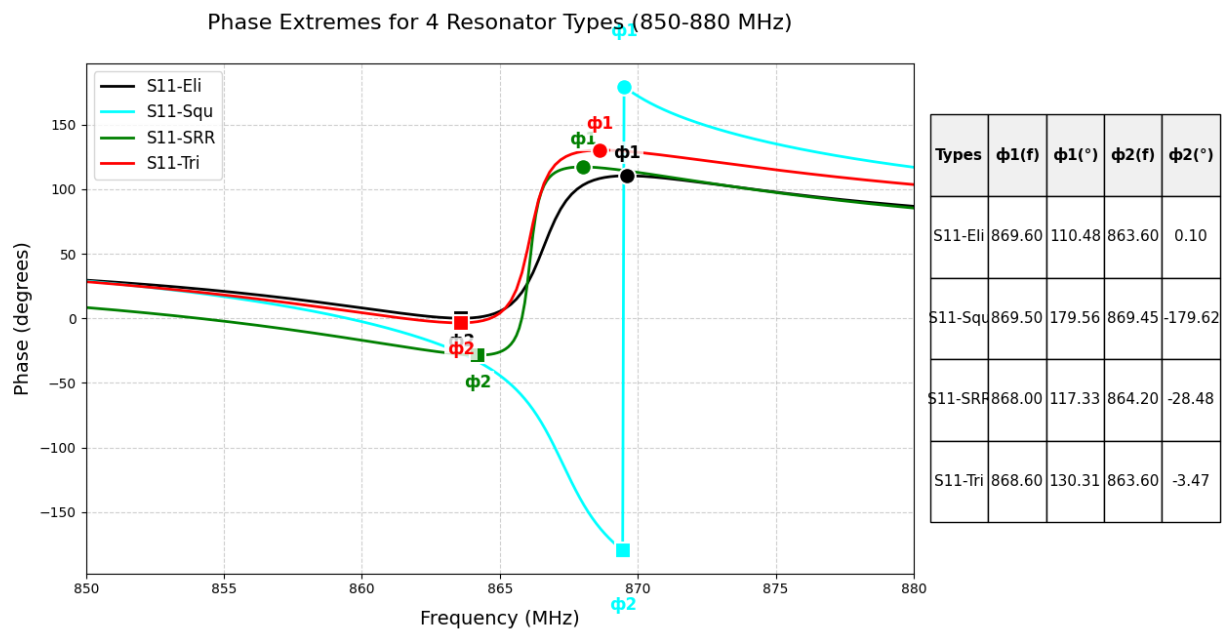


Рисунок 3.59 Частотные зависимости фазы коэффициента отражения (S_{11}) для КРР различной формы.

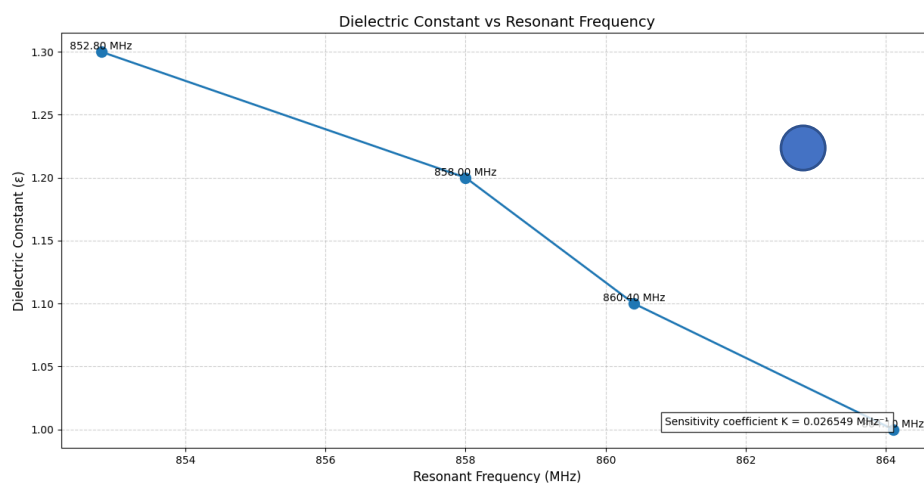


Рисунок 3.68 График зависимости резонансной ККРР от величины диэлектрической проницаемости образца сенсорного материала (

$$K_{|S_{11}|/\Delta\epsilon}^{KPP} = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta f_{резон}} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{1+\Delta\epsilon}}{f_{вер} - f_{низ}})$$

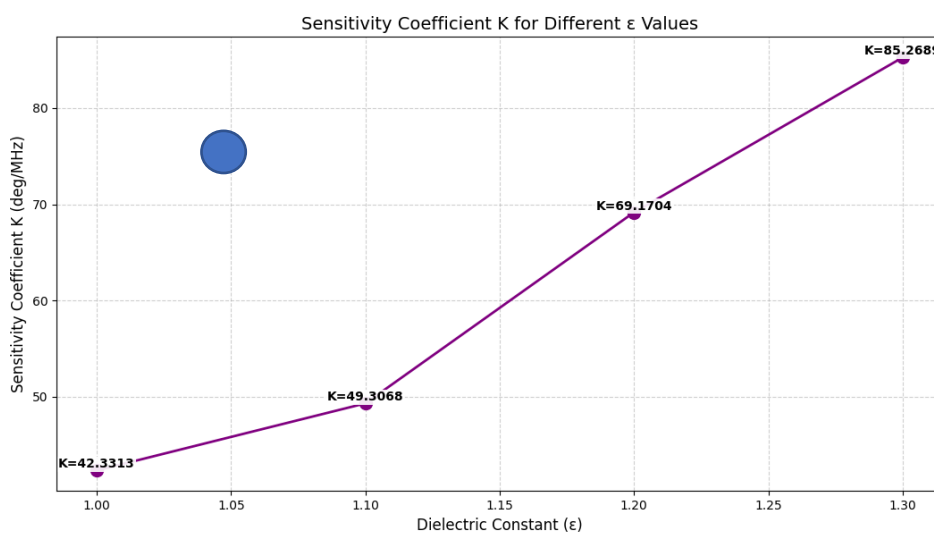


Рисунок 3.69 График зависимости фазовой чувствительности резонансной ККРР от величины диэлектрической проницаемости образца сенсорного материала (

$$K_{\varphi_{\epsilon 1}}^{KPP} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta f} = \frac{\varphi_{маж} - \varphi_{мин}}{f_{вер} - f_{ни}})$$

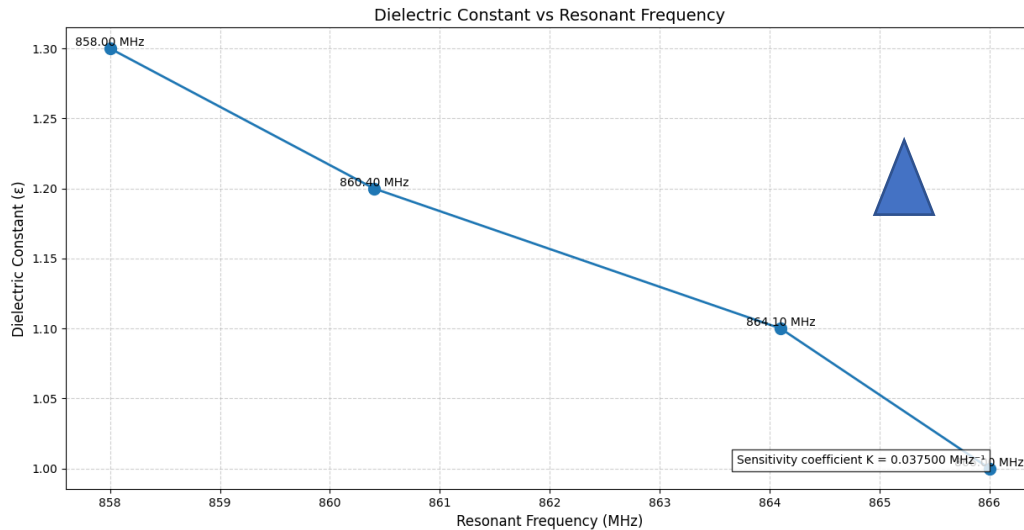


Рисунок 3.70 График зависимости резонансной ТКРР от величины диэлектрической проницаемости образца сенсорного материала

$$(K_{|S_{11}|/\Delta\epsilon}^{Tpe} = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta f_{резон}} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{1+\Delta\epsilon}}{f_{вер} - f_{низ}})$$

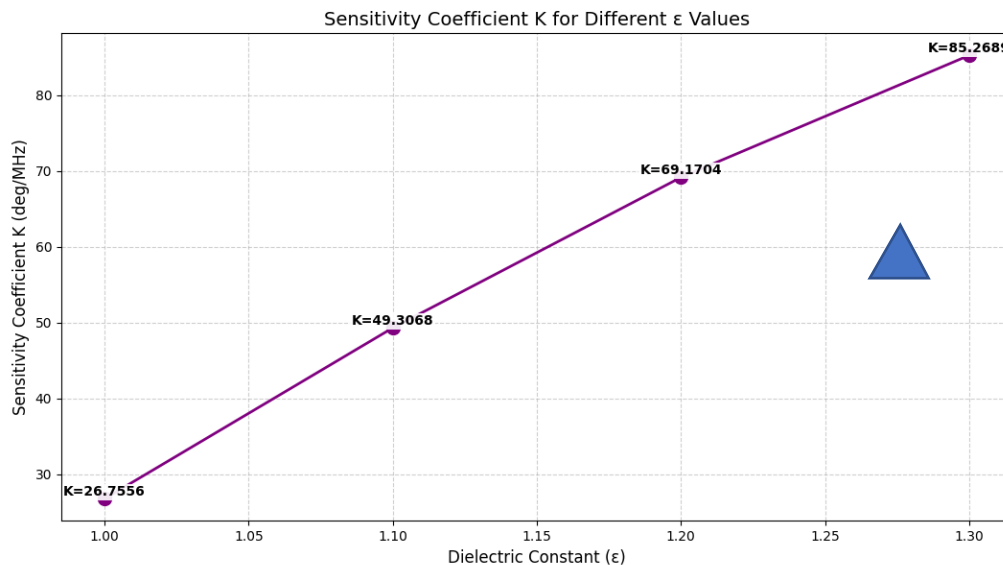


Рисунок 3.71 График зависимости фазовой чувствительности резонансной ТКРР от величины диэлектрической проницаемости образца сенсорного материала

$$(K_{\varphi_{\epsilon 1}}^{Tpe} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta f} = \frac{\varphi_{маж} - \varphi_{мин}}{f_{вер} - f_{ни}})$$

В четвертой главе представлены разработанные конструкции макетных образцов сенсорных транспондеров, основанных на разомкнутых кольцевых резонаторных антеннах (РКРА). Рассмотрены различные геометрические конфигурации резонансных структур, включая треугольную, квадратную и круглую формы. Особое внимание уделено материалам

подложек, металлизации и технологическим особенностям изготовления. Проведен анализ влияния конструктивных параметров (ширина проводника, зазор в разомкнутом контуре, размеры резонатора) на резонансные характеристики антенн.

Описана экспериментальная установка для исследования характеристик сенсорных транспондеров. В состав установки входят:

- Векторный анализатор цепей (ВАЦ) типа PicoVNA для измерения S-параметров;
- Камера с контролируемыми условиями (температура, влажность, внешние электромагнитные помехи);
- Набор калибровочных эталонов для устранения систематических погрешностей измерений;

Для исследования частотных характеристик сенсорного транспондера с треугольной формой кольцевой разомкнутой резонансной структуры: проведенный анализ частотных зависимостей демонстрирует, что на резонансной частоте **851 МГц** коэффициент стоячей волны (КСВ) достигает значения **1,18**, что свидетельствует о хорошем согласовании импедансов в исследуемой системе. Фазовый угол коэффициента отражения в точке минимального КСВ составляет приблизительно **-10°**, что подтверждает слабую реактивную составляющую в рабочей полосе частот.

После внесения тестового образца материала в сенсорную зону транспондера наблюдаются значительные изменения частотных характеристик (рис. 4.6 и 4.7). Резонансная частота смещается до **841 МГц**, а КСВ возрастает до **1,251**, что указывает на изменение электромагнитных параметров системы вследствие взаимодействия с исследуемым материалом. При этом фаза коэффициента отражения увеличивается до **20,78°**, что может быть связано с изменением реактивной составляющей импеданса из-за влияния диэлектрических свойств образца.

При исследовании дифференциальной схемы измерения рассеянного поля сенсорного транспондера применялись два идентичных устройства с треугольными резонаторами, работающих в дифференциальном режиме: опорное и измерительное (с образцом). Анализ разности их сигналов в I/Q каналах показал, что данная схема эффективно фиксирует изменения параметров диэлектрика, подтверждая перспективность подхода для создания помехоустойчивых сенсорных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Беспроводные сенсорные технологии на основе RFID представляют собой экономичное и масштабируемое решение для автоматизированных систем мониторинга. В ходе данного исследования была разработана и протестирована пассивная (не требующая источника питания) RFID-метка с использованием резонансных сенсорных технологий. Особое внимание уделено выбору оптимальных дифракционных структур для UHF RFID-транспондеров, их проектированию и экспериментальной проверке. Полученные результаты убедительно демонстрируют, что предложенная технология одновременно повышает точность измерений, энергоэффективность и простоту системы. Мы считаем, что данное исследование создает прочную основу для будущего развития IoT-технологий и решений для "умного" производства. Проведенные эксперименты с треугольными резонаторами показали изменение КСВ с 1.18 до 1.251 и фазового угла от -10° до $+20.78^{\circ}$ при внесении образца, что подтверждает высокую чувствительность системы. Эти результаты открывают новые возможности для создания масштабируемых сетей промышленного мониторинга.