

На правах рукописи



Плотников Александр Михайлович

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
СИСТЕМ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ОБЩЕГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 05.12.04 — Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САМАРА – 2012

Работа выполнена на кафедре основ конструирования и технологий радиотехнических систем федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГОБУ ВПО ПГУТИ)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор *Вячеслав Александрович Неганов*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор *Марк Абрамович Минкин*
доктор технических наук,
профессор *Владимир Николаевич Нестеров*

Ведущая организация:

ФГУП НИИ «Экран», г. Самара

Защита состоится «16» марта 2012 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д219.003.01 при Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу:
443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОБУ ВПО ПГУТИ.

Автореферат разослан « » _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д219.003.01,
доктор физико-математических наук



О.В. Осипов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из наиболее перспективных и быстроразвивающихся в настоящее время технологий автоматической идентификации является радиочастотная идентификация (англ. Radio Frequency Identification, RFID). Однако, несмотря на лидирующую позицию на рынке средств автоматической идентификации, распространённость RFID-систем даже на мировом уровне носит весьма локальный характер в связи с высокой стоимостью идентификационных меток. Задача же глобализации внедрения этой технологии, например, для автоматической идентификации потребительских и других товаров может быть решена, только если цена на идентификационные метки составит менее некоторого критического значения. К тому же, с учётом тенденции к постоянному снижению этой стоимости, использование многих даже самых современных разработок не может позволить добиться повсеместного внедрения RFID-технологии.

Новый подход к решению задачи минимизации стоимости меток был развит в работе [Л1], где предложена мультислотная метка на основе частотного различия. Данная метка относится к классу т.н. «безчиповых» (англ. Chipless RFID), поскольку не имеет в своём составе интегральных схем (ИС), и может быть изготовлена инновационным методом предложенным в [Л2-Л4] и получившим название «Ink-Jet печати». Метка представляет собой набор полосок-резонаторов на диэлектрической подложке, каждый из которых при облучении электромагнитным полем (ЭМП) формирует максимальную амплитуду отклика на собственной частоте. Основным недостатком решения [Л1] является низкая добротность полосок. Известно [Л5], что разомкнутые резонансные элементы имеют менее выраженные частотно-селективные свойства, чем замкнутые, в связи с чем они имеют гораздо меньшую амплитуду поля резонансного рассеяния и, как следствие, большую подверженность различного рода внешним помехам. Принципиальным здесь является отсутствие сплошных металлических поверхностей объекта идентификации. В случае наличия таких поверхностей процесс идентификации может стать невозможным.

Очень важным является ограничение на использование решения [Л6], связанное с жёсткими требованиями к поляризации излучения опросного сигнала считывателя. Такая поляризационная зависимость может существенно ухудшить характеристики RFID-системы и привести к возрастанию ошибок при считывании меток.

Кроме того подчеркнём, что технологию антиколлизийного мультидоступа значительно проще реализовать в случае поляризационной независимости системы метка-считыватель. При этом использование решения [Л6] совместно с круговой поляризацией антенной системы считывателя является недопустимым, поскольку в этом случае существенную роль будет играть взаимное расположение меток относительно плоскости поляризации.

Из альтернативных решений можно выделить [Л7-Л8], где предложены RFID-метки на основе ИС и планарных антенн различных конфигураций. Общим недостатком всех решений является существенная неравномерность диаграмм направленности (ДН) и поляризационной характеристики (ПХ) применяемых антенн, что является очень нежелательным и может привести к резкому сокращению расстояния считывания и возникновению ошибок. Наконец, стоит отметить решение [Л9], свободное от перечисленных недостатков. Однако его использование также является нерациональным, поскольку применяется спиральная антенна с большим количеством витков, что исключает возможность размещения устройства для согласования импедансов ИС и антенны в исполнении [Л2-Л4].

Немаловажным требованием к любой разработке является максимальная доля теоретических исследований с изготовлением и тестированием лишь финального опытного образца изделия. Это позволяет существенно минимизировать затраты труда и материалов на опытное производство и экспериментальные исследования. При этом решающим фактором является разработка эффективных математических моделей и методов, поскольку именно они определяют требуемое расчётное время и точность получаемых результатов. В некоторых случаях разработчику бывает достаточно использовать существующие САПР, в большом изобилии имеющиеся на современном рынке, однако, когда речь идёт о больших объёмах вычислений при синтезе и оптимизации устройств, численные алгоритмы, используемые САПР могут оказаться малоэффективными за счёт большого расчётного времени. В этих случаях требуется разработка других алгоритмов для конкретной задачи с большим быстродействием за счёт максимального содержания аналитических решений.

Таким образом, задача по разработке и созданию инновационных систем радиочастотной идентификации с улучшенными технико-экономическими характеристиками по сравнению с известными российскими и зарубежными аналогами является, на наш взгляд, весьма актуальной.

Цель работы – теоретическая и экспериментальная разработка системы радиочастотной идентификации на основе частотного различения кода, а также разработка идентификационных меток с улучшенными характеристиками для систем с кодовым различением.

Основные задачи работы:

- разработка инновационных меток радиочастотной идентификации для использования в составе систем с частотным и кодовым различением и построение электродинамических моделей меток;
- техническая реализация идентификационных меток на основе частотного и кодового различений, экспериментальное исследование их характеристик и сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов;
- построение упрощённой электродинамической модели устройства для считывания меток с частотным различением;

- техническая реализация устройства для считывания меток с частотным различием, экспериментальное исследование его характеристик (совместно с метками) и сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов.

Методы исследований. Первую часть работы составляют методы математического моделирования: математический аппарат электродинамики, аппарат теории сингулярных интегральных уравнений (СИУ), численные методы решения интегральных уравнений. Численные результаты получены с использованием вычислительных алгоритмов, реализованных на ПЭВМ.

Другая часть работы основана на экспериментальных исследованиях. Использовано оборудование для антенных измерений: генераторы Г4-78 (1.16... 1.78 ГГц), Г4-79 (1.78... 2.56 ГГц), Г4-80 (2.56... 4.00 ГГц); усилитель измерительный У2-8, антенны измерительные: П6-23А (1-18ГГц), LX-1080 (1-8ГГц, A-info Inc.) антенна, предложенная в [Л10]; анализатор параметров электрических цепей Agilent FieldFox N9912A.

Научная новизна работы.

- разработаны конструкции и экспериментальные образцы меток с частотным различием без использования ИС, имеющие низкую стоимость изготовления, простой производственный цикл и улучшенные технические характеристики в сравнении с аналогами.
- предложены конструкции и меток с кодовым различием на основе ИС и антенны особой формы, обладающие улучшенными технико-экономическими характеристиками в сравнении с аналогами.
- построены электродинамические модели, на основе теории СИУ разработаны методы анализа меток с частотным и кодовым различием, отличающиеся высоким быстродействием по сравнению с аналогами (FDTD и др.), приведён приближённый метод конструкторского синтеза мультислотных меток.
- предложена методика считывания меток с частотным различием кода для разработки новых считывателей.
- разработан приближённый метод электродинамического анализа считывателей вида «на прохождение» и «на отражение» для систем с частотным различием, приведены конструкции и экспериментальные образцы считывателей, адаптированные для производственных линий промышленных предприятий.

Обоснованность и достоверность. Все результаты, полученные в рамках теоретического подхода, с хорошей точностью подтверждены экспериментально. Используемые приближенные методы решения СИУ корректны с формальной математической точки зрения. Контроль результатов на разных этапах осуществлялся: сравнением данных, полученных теоретически в рамках предлагаемых подходов с данными, полученными альтернативными, в основном, численными методами (FDTD, FEM и др.); исследованием внут-

ренной сходимости численных алгоритмов; сравнением теоретических и экспериментальных результатов.

Практическая ценность работы. В работе рассмотрены задачи разработки, реализации и модернизации систем радиочастотной идентификации СВЧ-диапазона: систем с частотным различием кода, включая теоретическую и экспериментальную разработку меток и устройств считывания; систем с кодовым различием, включая теоретическую и экспериментальную разработку меток и определение требований к считывающим устройствам.

Результаты, полученные в работе, имеют большое теоретическое и практическое значение, связанное с вопросами расчета характеристик, конструирования, адаптации под необходимые производственные и другие промышленные условия, а также непосредственно практического применения в тестовой и коммерческой эксплуатации рассмотренных типов идентификационных систем.

Разработанные в диссертации методики, модели и методы расчёта использованы в научно-исследовательских проектах по созданию инновационной технологии радиочастотной идентификации, разработке меток низкой стоимости и устройств для их считывания.

В подтверждение практического применения результатов получено 2 акта внедрения по результатам совместных исследовательских проектов с корпорацией Самсунг Электроникс Ко., Лтд. (1-я и 2-я главы) и 1 акт внедрения на предприятии ФГУП НИИ «Экран» (3-я глава).

Результаты диссертационной работы могут быть в дальнейшем использованы в качестве основы для многих перспективных разработок в области систем радиочастотной идентификации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы электродинамического анализа меток с частотным и кодовым различием, отличающиеся высоким быстродействием в сравнении с существующими аналогами и метод приближённого конструкторского синтеза меток с частотным различием.

2. Конструкции, экспериментальные образцы меток без ИС и устройств считывания меток для систем радиочастотной идентификации с частотным различием кода.

3. Конструкции и экспериментальные образцы меток радиочастотной идентификации с кодовым различием, имеющие улучшенные характеристики в сравнении с существующими аналогами.

4. Инновационная система радиочастотной идентификации на основе частотного различия для использования на производственных линиях промышленных предприятий.

Личный вклад автора. В совместных работах научному руководителю принадлежит общая постановка задач и определение направлений ведения исследований. Непосредственно идеи, разработки, реализации, подробное проведение рассуждений, доказательств, расчетов, изготовление и тестирование экспериментальных образцов, а также анализ результатов принадлежат соискателю.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях:

- X МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникации». — Самара, 2009;
- IX МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». — Челябинск, 2010;
- X МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». — Самара, 2011;
- XII МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». — Казань, 2011;
- V Межрегиональный экономический форум «Самарская инициатива: кластерная политика – основа инновационного развития национальной экономики», Самара, 2011.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК, а также 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 89 наименований, приложения, и содержит 133 страницы текста, в том числе 33 рисунка и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определена цель диссертационной работы, показана ее актуальность и практическая значимость, определена новизна и обоснована достоверность полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** «Разработка меток радиочастотной идентификации СВЧ-диапазона на основе частотного различия кода» предложены мультичастотные метки резонансного типа (рисунок 1) для радиочастотной идентификации объектов, имеющие очень низкую стоимость изготовления и простой производственный цикл по сравнению с аналогичными разработками.

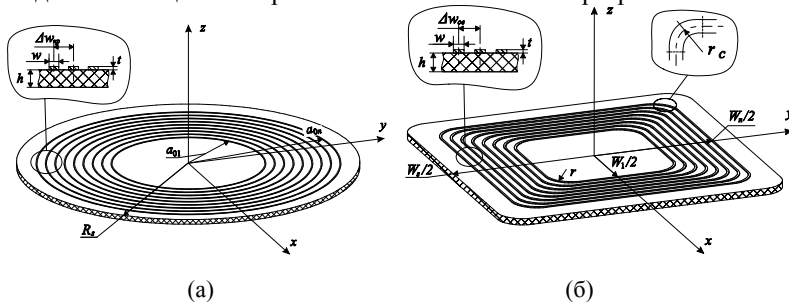


Рисунок 1 – Геометрия предлагаемых RFID-меток: с резонаторами круглой (а) и прямоугольной (б) формы

Изготовление метки может производиться на основе технологии [Л2-Л4]. При необходимости метка может быть напечатана непосредственно на упаковке товара, либо самой продукции. Диссертант является соавтором полученного патента РФ на метки [6].

Построена электродинамическая модель метки с резонансными элементами в виде планарных идеально проводящих колец шириной $w = 2l$, лежащих в плоскости xOy , рисунок 2. Радиус образующей кольца a , центр совмещен с началом координат.

Кольцо предполагается бесконечно тонким и достаточно узким ($2l \ll a$, $2l \ll \lambda$, где λ – длина волны).

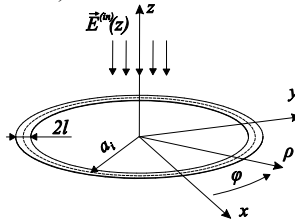


Рисунок 2 – Модель i -го кольцевого резонатора метки

Под действием вектора напряжённости стороннего электрического поля $E^{(in)}$ падающей против оси Oz линейно-поляризованной плоской электромагнитной волны (ПЭМВ)¹ на кольце возникает вектор поверхностной плотности тока $\eta(\rho, \varphi)$, имеющий только одну (азимутальную) составляющую $\eta_\varphi(\rho, \varphi)$, определенную в области $S: \varphi \in [-\pi; \pi]$, $\rho \in [a-l; a+l]$, распределение которой ищется в виде:

$$\eta_\varphi(\rho, \varphi) = \frac{\sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m \exp(-im\varphi)}{\pi \sqrt{((a+l)-\rho)(\rho-(a-l))}}, \quad (1)$$

где используется квазистатическое приближение для плотности тока в поперечном сечении полоски.

Далее (1) подставляется в выражение для напряжённости электрического поля, наведённого токами кольца:

$$E_\varphi(\rho, \varphi) = \frac{Z_0}{ik} \left(k^2 A_\varphi(\rho, \varphi) + (\nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{A}))_\varphi \right), \quad (2)$$

$$\mathbf{A}(\rho, \varphi) = \int_{-\pi a-l}^{\pi a+l} \int \eta_\varphi(\rho', \varphi') \begin{pmatrix} \sin(\varphi - \varphi') \\ \cos(\varphi - \varphi') \end{pmatrix} G(\rho, \rho'; \varphi, \varphi') d\rho' d\varphi',$$

где Z_0 – сопротивление среды, k – волновое число, \mathbf{A} – векторный потенциал, G – функция Грина в цилиндрической системе координат:

¹ ПЭМВ имитирует возбуждение метки полем опросного сигнала считывателя.

$$G(\rho, \rho'; \varphi, \varphi') = \frac{1}{4\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} g_m(\rho, \rho') \exp(-im(\varphi - \varphi')),$$

$$g_m(\rho, \rho') = \int_0^{\infty} \frac{\chi \rho' J_m(\chi \rho) J_m(\chi \rho')}{\sqrt{\chi^2 - k^2}} d\chi. \quad (3)$$

С другой стороны, поле связано граничным условием с электрическим полем ПЭМВ:

$$E_{\varphi}(\rho, \varphi) + E_{\varphi}^{(in)}(\rho, \varphi) = 0. \quad (4)$$

После разложения полей (4) в ряды Фурье и выделения асимптотики $\rho \rightarrow \rho'$ в формуле (3) из системы интегральных уравнений (1), (2), (4) получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

В случае N колец соотношение (4) с учётом принципа суперпозиции переписываем в виде:

$$\sum_{n=1}^N E_{nm} + E_m^{(in)} = 0,$$

где n – номер кольца, $m = 1$ – номер Фурье-гармоники, единственной в силу аксиальной симметрии структуры относительно Oz .

Учёт влияния подложки осуществлён для локальной области из 3-х соседних колец, для которой рассчитана эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{eff} = K_s^2$, K_s – коэффициент укорочения. При этом структура рассматривалась в приближении компланарной линии передачи (КПЛ) без экрана.

Задача синтеза геометрии метки по заданному набору резонансных частот отклика была сведена к нахождению рекуррентных выражений для длины образующих колец. Для линейного радиального распределения образующих ($\Delta l = const$):

$$l_{i+1} = l_i + \Delta l, \quad \Delta f_i = \frac{c}{K_s} \left(\frac{1}{l_{i+1}} - \frac{1}{l_i} \right), \quad i = \overline{2, n},$$

где l_i – длина образующей i -го кольца, Δl – интервал между длинами образующих соседних колец, Δf_i – интервал между резонансными частотами i -го и $i+1$ колец, K_s – коэффициент укорочения, c – скорость света в вакууме.

В случае логарифмического распределения ($\Delta f = const$):

$$f_{i+1} = f_i - \Delta f, \quad \Delta l_i = \frac{c}{K_s} \left(\frac{1}{f_i} - \frac{1}{f_{i+1}} \right), \quad i = \overline{2, n},$$

где f_i – резонансная частота i -го кольца, Δf – интервал между резонансными частотами соседних колец, Δl_i – интервал между длинами образующих i -го и $i+1$ колец.

На рисунках 3 и 4 приведены некоторые численные результаты в сравнении с экспериментальными. Меридиональные ДН метки на резонансной частоте

9-го кольца показаны на рисунке 3. Частотная зависимость отклика метки приведена на рисунке 4. Для лучшей наглядности на графиках ДН использован логарифмический масштаб по оси ординат. На графике отклика – линейный масштаб по оси ординат и логарифмический по оси абсцисс. Значения шкалы частот на рисунке 4 получены с помощью алгоритма конструкторского синтеза.

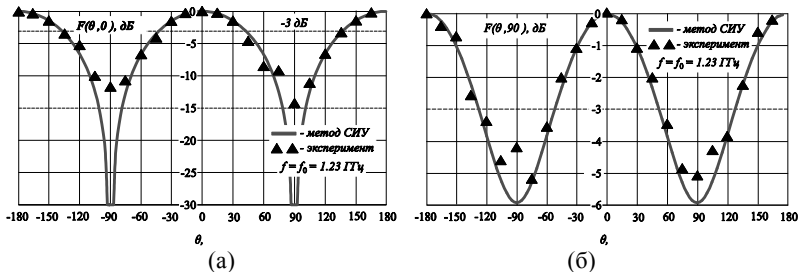


Рисунок 3 – Резонансная диаграмма направленности метки

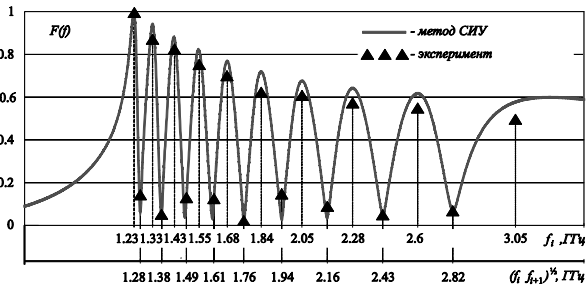


Рисунок 4 – Частотная зависимость отклика метки с кодом 111111111

в точке $r = 1$, $\theta_0 = 0$, $\varphi_0 = 0$

Нормированные характеристики рассчитаны по формулам:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|\mathbf{E}(f_m, r_0, \theta, \varphi)|}{|\mathbf{E}(f_m, r_0, \theta_0, \varphi_0)|},$$

$$F(f) = \frac{|\mathbf{E}(f, r_0, \theta_0, \varphi_0)|}{|\mathbf{E}(f_m, r_0, \theta_0, \varphi_0)|},$$

где $|\mathbf{E}(f_m, r_0, \theta_0, \varphi_0)|$ – максимальное значение поля \mathbf{E} , которому соответствуют координаты $r_0 = 1$, $\theta_0 = 0$, $\varphi_0 = 0$ и частота $f_m = 1.23 \text{ ГГц}$.

Как видно из рисунка 3, излучение метки имеет осевой характер с максимумами, лежащими на оси Oz при $\theta_0 = 0$ и $\theta_0 = \pi$. Рисунок 4 иллюстрирует резонансный характер отклика метки, где максимумы поля рассеяния соответствуют излучению колец вблизи собственных частот. Из рисунков следует хорошее согласование теоретических и экспериментальных результатов.

Во **второй главе** «Разработка считывающего устройства для меток радиочастотной идентификации на основе частотного различия кода» предложена конструкция устройства для считывания мультисигнальных меток (считыва-

вателя), приведена модель, позволяющая рассчитывать основные характеристики RFID-системы на основе частотного различия и приведены результаты теоретического и экспериментального исследования RFID-системы. Диссертант является соавтором заявки на изобретение по методике считывания мультисигнатурных меток и конструкций считывателей [7].

На рисунке 5 показана общая блок-схема считывателя, адаптированного для производственных промышленных предприятий.

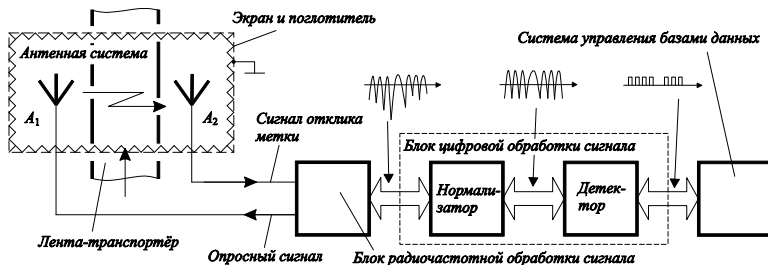


Рисунок 5 – Общая схема считывателя

Антенная система, состоящая из передающей и приёмной антенн, осуществляет передачу опросного сигнала метке и приём отклика. Блок радиочастотной обработки производит демодуляцию и аналогово-цифровое преобразование сигнала отклика. Блок цифровой обработки проводит распознавание кода метки из цифровых данных отклика. В системе управления базами данных происходит сопоставление кода метки и наименования товара.

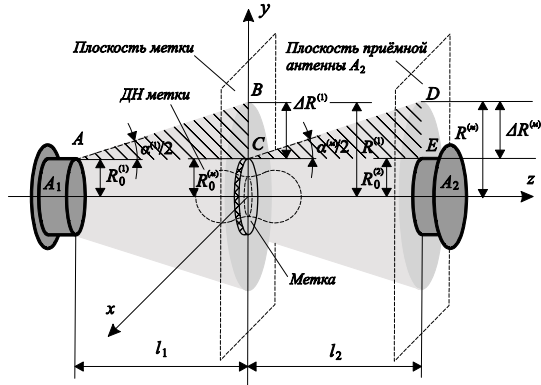
Схема считывателя может быть реализована в двух вариантах, рисунок 6, отличающихся конструктивно. Схема «на прохождение» производит т.н. «сквозное» считывание метки, а схема «на отражение» – считывание отклика, отражённого от плоскости-рефлектора.

На основе эффективных (эквивалентных) параметров, используемых в теории излучающих структур, и принципов геометрической оптики построена упрощённая модель для расчёта модулей калибровочного и резонансного коэффициентов передачи S_{21} в RFID-системе:

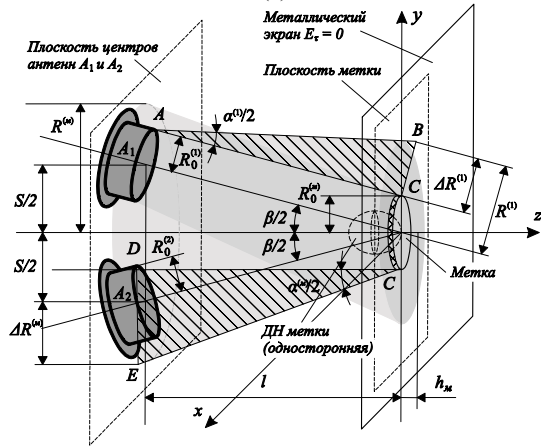
$$\left| S_{21i}^{(cal)} \right| = \lambda^2 D_{0i}^{(1)} / \left(4\pi^2 \left(R_{0i}^{(1)} + \Delta R_i^{(1)} \right)^2 \cos(\beta/2) \right), \quad (5)$$

$$D_{0i}^{(1)} = 4\pi / \oint_{\Omega=4\pi} \left(F_i^{(1)}(\theta, \varphi) \right)^2 d\Omega, \quad \Delta R_i^{(1)} = l \operatorname{tg}(\alpha_i^{(1)}/2),$$

где i – индекс кольца метки, $\left| S_{21i}^{(cal)} \right|$ – модуль калибровочного коэффициента передачи, $D_{0i}^{(1)}$ – КНД антенны 1, $\left(R_{0i}^{(1)} + \Delta R_i^{(1)} \right)$ – радиус пятна, создаваемого антенной 1 на расстоянии l вдоль Oz ; $F_i^{(1)}(\theta, \varphi)$ – нормированная ДН антенны 1, $\alpha_i^{(1)}$ – угловая апертура антенны 1, β – угол наклона оси антенн 1 и 2 к оси Oz .



(а)



(б)

Рисунок 6 – Варианты конструкции считывателя: «на прохождение»(а) и «на отражение» (б)

Для схем «на прохождение» и «на отражение» согласно (5):

$$|S_{21k}^{(\Sigma)}| = |S_{21i}^{(cal)}| \lambda^2 D_{0k}^{(M)} / \left(4\pi^2 (R_{0k}^{(M)} + \Delta R_k^{(M)})^2 \right), \quad (6)$$

$$D_{0i}^{(M)} = 4\pi \int_{\Omega=4\pi} (F_i^{(M)}(\theta, \varphi))^2 d\Omega,$$

где $|S_{21k}^{(\Sigma)}|$ – суммарный коэффициент передачи, $D_{0i}^{(M)}$ – КНД метки, $(R_{0i}^{(M)} + \Delta R_i^{(M)})$ – радиус пятна, создаваемого меткой на расстоянии l_2 вдоль Oz , $F_i^{(M)}(\theta, \varphi)$ – нормированная ДН метки; $\alpha_i^{(M)}$ – угловая апертура метки.

Величины $\Delta R_i^{(1)}$, $\Delta R_i^{(M)}$ для схемы «на прохождение»:

$$\Delta R_i^{(1)} = l_1 \operatorname{tg}(\alpha_i^{(1)}/2), \Delta R_i^{(M)} = l_2 \operatorname{tg}(\alpha_i^{(M)}/2);$$

для схемы «на отражение» $\Delta R_i^{(1)}$ находится с учётом (5), а $\Delta R_i^{(M)}$ из:

$$\Delta R_i^{(M)} = l_2 \operatorname{tg}(\alpha_i^{(M)}/2).$$

Зависимости $F_i^{(1)}(\theta, \varphi)$, $F_i^{(M)}(\theta, \varphi)$, $\alpha_i^{(1)}$, $\alpha_i^{(M)}$ определяются с помощью численных методов (FDTD, и др.).

На рисунке 7 показаны характеристики излучения антенн [Л10] и метки.

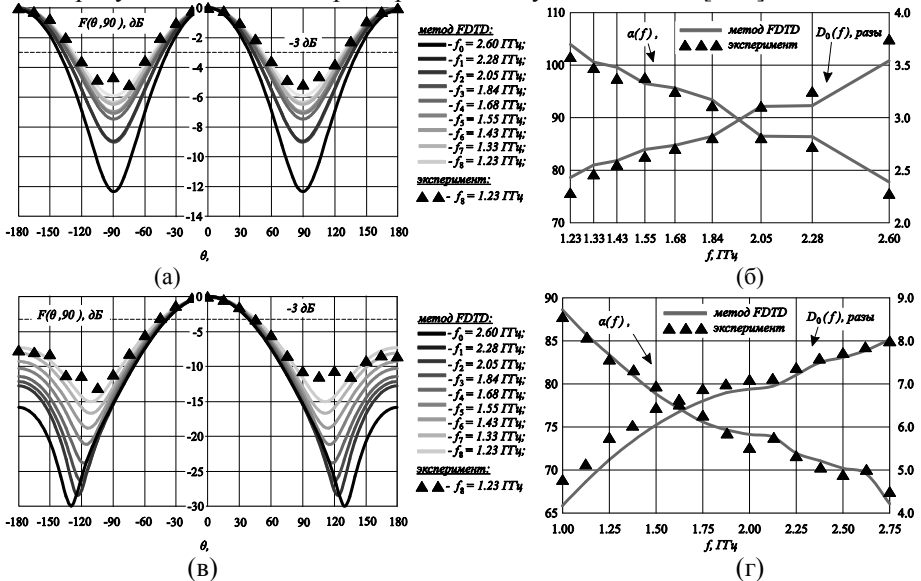


Рисунок 7 – Характеристики метки (а,б) и антенн (в,г): ДН (а,в), частотная зависимость резонансной угловой апертуры и КНД (б,г)

На рисунке 8 приведены графики зависимостей модуля коэффициента передачи S_{21} в радиоканале считывателя от положения метки для схем «на прохождение» и «на отражение».

Из графиков (а) очевидно, что минимальные значения ослабления наблюдаются при приближении метки к антенне 1 или 2. Максимальный уровень наблюдается при расположении метки приблизительно на равных расстояниях между антеннами.

По графикам (б) можно сказать, что малые значения ослабления наблюдаются при приближении метки к плоскости антенн. При удалении метки от антенной плоскости, амплитуда ослабления монотонно возрастает.

Для исключения влияния на процедуру идентификации внешних излучений и помех в конструкции считывателя использованы модули из широкополосного радиопоглощающего материала, рисунок 5.

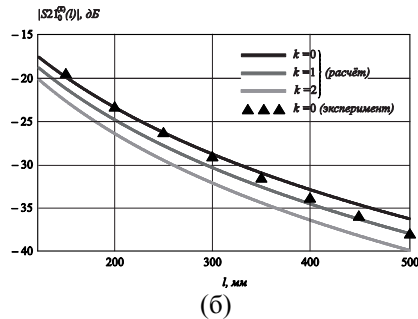
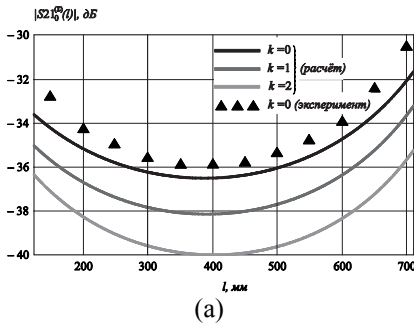


Рисунок 8 – Графики модуля коэффициента передачи S_{21} в радиоканале считывателя: для схемы «на прохождение» (а), «на отражение» (б)

Однако сильное влияние также может оказывать сам объект идентификации, содержащий большие металлические поверхности. Для минимизации этого влияния предлагается использовать малоотражающие и защитные покрытия [3,4] на основе киральных метаструктур, содержащих элементы Телледжена [Л11]. Теоретически установлено, что подобные покрытия способны концентрировать внутри себя падающее на их поверхность рассеянное электромагнитное излучение радиоволнового диапазона (например, СВЧ). По аналогии с этим можно добиться уменьшения паразитного рассеяния опросного сигнала на металлических поверхностях объекта идентификации на величину больше 20дБ, что немаловажно для повышения помехоустойчивости.

Третья глава «Разработка идентификационных меток СВЧ-диапазона с кодовым различием» посвящена разработке меток радиочастотной идентификации диапазона СВЧ на основе ИС, рисунок 9.

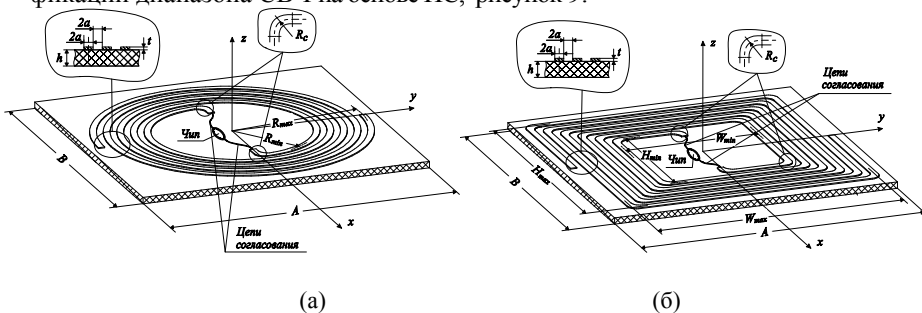


Рисунок 9 – Геометрия антенн круглой (а) и прямоугольной (б) формы

Предложена антенна метки, представляющая собой двухзаходную спираль Архимеда круглой или прямоугольной формы, главной особенностью которой является малое количество витков в плечах. За счёт этого обеспечивается большая свободная площадка в центре антенны, которую предлагается использовать для размещения согласующей структуры в исполнении печатного монтажа. Материалы по разработке антенны вошли в заявку на изобретение, соавтором которой является соискатель [8].

Построена электродинамическая модель антенны, представляющая собой совокупность элементарных смыкающихся дуг одинаковой ширины. Получена система СИУ на основе (1)-(4). Однако, в отличие от симметричного кольца, где интеграл от экспоненты от 0 до π давал символ Кронекера и снимал суммирование по Фурье-гармоникам, в выражениях для спиральной антенны возникает коэффициент:

$$D_{m,n,d} = e^{i(n-m)\varphi_d} \begin{cases} \frac{2 \sin((n-m)\alpha)}{(n-m)}, & n \neq m; \\ 2\alpha, & n = m; \end{cases} \approx 2\alpha e^{i(n-m)\varphi_d}, \quad \alpha \rightarrow 0,$$

где α – угловой размер дуг, на которые разбивается антенна.

Из выражений (2) с помощью формулы Якоби-Ангера были получены расщеления поля в дальней зоне излучения антенны в аналитическом виде:

$$\mathbf{E}(r, \theta, \varphi) = -2ikZ_0 \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \begin{pmatrix} A_p(\theta, \varphi) \cos \theta \\ A_\varphi(\theta, \varphi) \end{pmatrix},$$

$$A(\theta, \varphi) = \pi \sum_{m=0}^1 \sum_d I_{m,d} a_d \left(\begin{pmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix} J_0(ka_d \sin \theta) + \begin{pmatrix} \sin \varphi \\ -\cos \varphi \end{pmatrix} J_2(ka_d \sin \theta) \right),$$

Предложенная модель в одинаковой степени справедлива как для круглой, так и для прямоугольной формы витков спиралей и обеспечивает высокое быстродействие при моделировании по сравнению с аналогами (FDTD и др.).

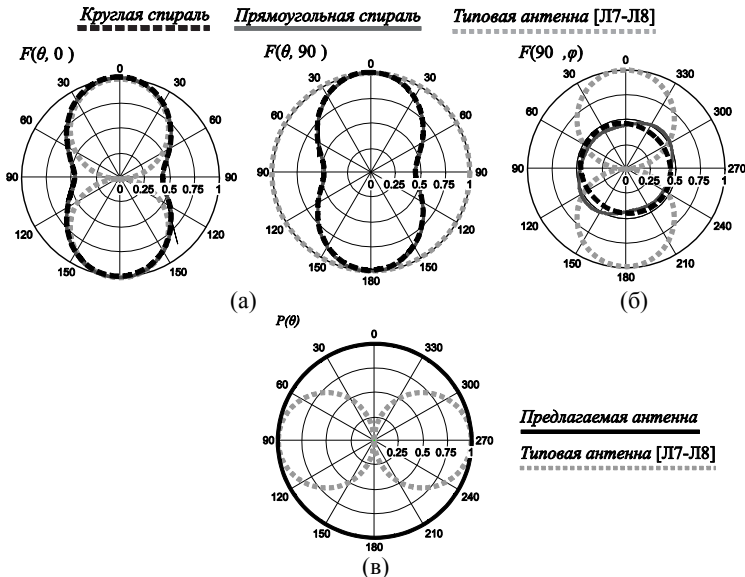


Рисунок 10 – Рассчитанные характеристики антенн: меридиональные ДН (а), азимутальные ДН (б), ПХ (в)

Учёт влияния подложки проведён по аналогии с главой 1. Реализация согласующего устройства выполнена в соответствии с [Л11].

На рисунке 10 приведены ДН и ПХ предлагаемых антенн.

Установлено, что форма ДН и ПХ в дальней зоне для спиралей с круглой и овальной формой витков при эквивалентных (равных) длинах витков и их количестве одинаковы. Однако, размеры антенны с овальной формой витков меньше, чем с круглой, поэтому её использование является более предпочтительным.

Из данных рисунка 10 видно, что ДН является достаточно однородной, поэтому считывание метки будет возможно под произвольными углами. Однако, наиболее важным достоинством наряду с наличием свободной площадки для размещения согласующего устройства является комбинация удовлетворительной равномерности ДН и однородности ПХ, которые, используясь раздельно во многих решениях [Л6-Л8], обычно отсутствуют в комбинации.

В **заключении** сделаны соответствующие выводы, сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены мультимастотные метки радиочастотной идентификации. На базе теории СИУ разработаны методы электродинамического анализа мультимастотных меток на основе планарных замкнутых кольцевых структур и меток с ИС на основе двухзаходных спиральных антенн особой формы, отличающиеся высоким быстродействием по сравнению с аналогичными решениями (FDTD и др.).

2. Разработаны, изготовлены и протестированы мультимастотные метки радиочастотной идентификации без ИС, имеющие низкую стоимость, простой производственный цикл и улучшенные эксплуатационные характеристики по сравнению с аналогичными решениями.

3. Предложен приближённый численно-аналитический метод для конструкторского синтеза мультимастотных меток.

4. Разработаны, изготовлены и протестированы экспериментальные образцы считывателей вида *«на прохождение»* и *«на отражение»*, имеющих модульную конструкцию и адаптированных для использования на производственных линиях промышленных предприятий.

5. Разработаны, изготовлены и протестированы метки радиочастотной идентификации с ИС, построенные на основе двухзаходных спиральных антенн особой формы, имеющие улучшенные технические характеристики по сравнению с аналогичными решениями.

6. Разработана система радиочастотной идентификации на основе частотного различия, имеющая низкую эксплуатационную стоимость и предназначенная для использования на промышленных производственных линиях.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Неганов В.А.* Электродинамический анализ резонансных меток для радиочастотной идентификации объектов методом сингулярных интегральных уравнений [Текст] / *В.А. Неганов, А.М. Плотников, Д.П. Табаков* // Радиотехника и электроника. — 2012 (в печати).
2. *Неганов В.А.* Метки радиочастотной идентификации низкой стоимости на основе метода частотного различения [Текст] / *В.А. Неганов, А.М. Плотников* // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2011. — Т.14. — №2. — С.46-52.
3. *Осинов О.В.* Использование эффекта азимутального рассеяния электромагнитных волн метаструктурой на основе элементов Телледжена в прикладных задачах электродинамики [Текст] / *О.В. Осинов, А.М. Плотников* // Инфокоммуникационные технологии. — 2012. — Т.10. — №1(в печати).
4. *Осинов О.В.* Электродинамические свойства проводящих киральных микроэлементов и метаматериалов на их основе / *О.В. Осинов, А.М. Плотников* // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: тезисы пленарных докладов XII МНТК, 17-19 ноя., 2011 г., г. Казань. — Казань, 2011. — С.20-25.
5. *Подобед И.М.* Электродинамический анализ мультичастотной метки резонансного типа [Текст] / *И.М. Подобед, О.В. Осинов, А.М. Плотников* // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. 2012. №1. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/101-5479>
6. *Неганов В.А.* Мультичастотная радиометка резонансного типа / *В.А. Неганов, А.М. Плотников, Сеоно Ким (KR)* // Патент РФ №2402812. Приоритет от 18.11.2009.
7. *Неганов В.А.* Способ и устройство считывания мультичастотных радиометок резонансного типа / *В.А. Неганов, А.М. Плотников, И.М. Подобед, Сеоно Ким (KR)* // Заявка на изобретение №2011107701. Дата регистрации 01.03.2011.
8. *Неганов В.А.* Метка радиочастотной идентификации с произвольным углом и поляризацией считывания / *В.А. Неганов, А.М. Плотников* // Заявка на изобретение № 2011148337. Дата регистрации 23.11.2011.
9. *Неганов В.А.* Пассивная метка радиочастотной идентификации на основе метода частотного различения [Текст] / *В.А. Неганов, А.М. Плотников* // Физика и техн. приложения волновых процессов: тезисы докладов IX МНТК, 13-18 сен., 2010 г., г. Миасс. — Челябинск, 2010. — С.52-53
10. *Неганов В.А.* Считывающее устройство для меток радиочастотной идентификации на основе метода частотного различения [Текст] / *В.А. Неганов, А.М. Плотников* // Физика и техн. приложения волновых процессов: тезисы докладов IX МНТК, 13-18 сен., 2010 г., г. Миасс. — Челябинск, 2010. — С.53-53
11. *Неганов В.А.* Пассивная метка радиочастотной идентификации (RFID) на основе антенны бегущей волны [Текст] / *В.А. Неганов, А.М. Плотников* //

Физика и техн. приложения волновых процессов: тезисы докладов IX МНТК, 13-18 сен., 2010 г., г. Миасс. — Челябинск, 2010. — С.71-72.

12. *Неганов В.А.* Метод двоичного кодирования и считывания кода метки радиочастотной идентификации на основе метода частотного различения [Текст] / *В.А. Неганов, А.М. Плотников* // Физика и техн. приложения волновых процессов: тезисы докладов IX МНТК, 13-18 сен., 2010 г., г. Миасс. — Челябинск, 2010. — С.52-53.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Radio Frequency Identification System and Method / *Otto J.A.* US Patent 6732923. Date of a Patent: May. 11, 2004.
2. *Woo K., and others.* Ink-Jet Printing of Cu-Ag-Based Highly Conductive Tracks on a Transparent Substrate // *Langmuir*, 2009, 25. pp.429-433.
3. *Azucenal O., and others.* Inkjet Printing of Passive Microwave Circuitry // *Proc. IEEE*, 2008. pp.1075-1078.
4. Inkjet Printing of Silver Inks for RFID, Solar cells and Printed Electronics // [Электронный ресурс]: сайт. 2011. URL: www.microfab.com/equipment/technotes/Silver_Ink_Printing.pdf (дата обращения: 15.12.2011)
5. *Johnson R.C.* Antenna Engineering Handbook, 3rd ed. McGraw-Hill, Inc., 1993. — 1512p.
6. RFID-system utilizing parametric reradiated technology / *Pettus M.G.* US Patent 7498940. Date of a Patent: Mar. 3, 2009.
7. Small planar antenna with enhanced bandwidth and small strip radiator / *Tikhov Y. and others* US patent 20060038725. Issued Feb. 26, 2006.
8. RFID antenna and RFID tag / *Kwon H.I.* US patent 7828221. Issued Nov. 9, 2010.
9. Dispersive antenna for RFID-tags / *Rossmann K. and others.* US Patent 20090284351. Publication date: Nov. 19, 2009.
10. *Nakano H. and others.* Cavity-backed Archimedean spiral antenna with strip absorber // *IET Microw. Antennas Propag.*, 2008, Vol. 2, No. 7, pp.725–730.
11. *Kamenetskii E.O. and others.* Tellegen particles and magnetoelectric metamaterials // *Journal Applied Physics*, 2009. — V.105. — No. 1. — pp.013537 – 013537-15.