

На правах рукописи



Скворцов Илья Вячеславович

**Локализация источников электромагнитного излучения
от печатной платы в ближней зоне**

Специальность: 01.04.03-радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань–2020

Работа выполнена на кафедре радиофизики Института физики
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель:	кандидат физико-математических наук, Латыпов Руслан Рустемович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Чермошенцев Сергей Федорович
Ведущая организация	кандидат технических наук Мерглодов Илья Владимирович Автономная некоммерческая организация высшего образования «Российский новый университет»

Защита состоится 19 ноября 2020 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета КФУ.01.06 при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», расположенном по адресу: 420008 г. Казань ул. Кремлевская, д. 16А, ауд. 1407.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета (Казань, Кремлевская, д. 35). Электронная версия размещена на официальных сайтах ВАК при Министерстве образования и науки РФ и Казанского (Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.ф.-м.н.



Акчурин А.Д.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В задачах электромагнитной совместимости (ЭМС) часто бывает необходимо определить наиболее активные области излучения радиотехнических устройств в частности, от печатных плат. Печатные платы в процессе своего функционирования создают в окружающем пространстве электромагнитное излучение. Обычно это излучение сформировано различными радиотехническими компонентами и печатными дорожками, которые функционируют в процессе работы и расположены на печатных платах. В настоящее время существуют различные системы автоматизированного проектирования (САПР), в которых реализованы численные методы моделирования излучения [1, 2]. Однако современные САПРы позволяют получить информацию лишь о суммарном распределении излучения от всех компонент излучающей структуры без возможности обнаружения и локализации самих источников излучения. По причине отсутствия возможности локализовать источники излучения, современные САПРы также не способны учесть взаимное влияние отдельных компонент излучающей структуры друг на друга и на результирующее излучение в целом. В редких случаях информации о суммарном распределении излучения от всех компонент излучающей структуры бывает достаточно для локализации источников излучения. Однако получение такой информации связано с большими затратами временных и вычислительных ресурсов. По этим причинам необходимо предложить экспериментально-теоретическое решение, позволяющее устранить недостатки, свойственные коммерческим САПР.

Наиболее простым и распространенным способом решения данного вопроса является сканирование поля в плоскости, параллельной плоскости исследуемого объекта при помощи измерительного пробника на основе стандарта IEC-61697-3 [3]. Для исследования излучения от печатных плат наиболее распространенным решением является проведение измерений в

ближней зоне [4]. Такой подход позволяет сократить затрачиваемые временные ресурсы, снижает требования к проведению измерений, а также имеет преимущества в точности. В настоящее время существуют различные экспериментальные установки, реализующие сканирование излучения от печатных плат [5, 6]. Представленные на рынке системы обычно имеют следующие недостатки: отсутствие системы позиционирования, позволяющей повторить измерения; отсутствие возможности менять шаг сканирования в широком диапазоне; возможность сканирования только одной компоненты излучения; низкая разрешающая способность измерений. По этим причинам реализация экспериментальной установки, позволяющей устранить существующие недостатки, является актуальной.

Однако результаты измерения, полученные в ходе эксперимента, позволяют лишь визуализировать распределение излучения, но не позволяют количественно оценить расположение и мощность излучения источников. В таких случаях обычно решаются обратные задачи с применением регуляризации [7, 8], где исходными данными являются результаты экспериментального измерения излучения. Методы, используемые в задаче локализации, не позволяют с достаточной степенью точности определить источники излучения. Таким образом, задача повышения точности локализации источников излучения является актуальной.

Целью работы является повышение точности локализации источников электромагнитного излучения от печатных плат по электромагнитному излучению, измеренному в ближней зоне.

Объектом исследования является электромагнитное излучение в ближней зоне от печатных плат.

Предметом исследования является напряжённость магнитного поля на различных частотах, формируемых токопроводящими компонентами на печатных платах.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

1. Разработка методики локализации источников излучения.
2. Разработка методики понижения размерности задачи локализации источников излучения.
3. Создание экспериментальной установки для измерения электромагнитного излучения от печатной платы.
4. Проведение измерений электромагнитного излучения от печатной платы и получение оценок влияния основных факторов (влияние пробников, металлических конструкций), искажающих исходное излучение при проведении измерений.

Методы исследований

Используются методы спектрального оценивания, математического моделирования, линейной алгебры, корреляционного анализа, математического анализа, основы статистической радиофизики, экспериментальные методы измерения электромагнитного излучения.

Научная новизна

1. Впервые применена регрессия LASSO для локализации источников электромагнитного излучения в ближней зоне от печатных плат.
2. Впервые разработана методика понижения размерности задачи локализации источников электромагнитного излучения от печатных плат на основе вейвлет-преобразования, что позволяет ускорить проведение вычислений. Особенность методики заключается в представлении источников излучения набором вейвлет-коэффициентов, в котором лишь немногие отличны от нуля. Данный подход позволяет решать задачу локализации с применением регрессии LASSO для разреженной матрицы, чем и объясняется быстрое действие алгоритма.
3. Реализован аппаратно-программный комплекс (экспериментальная установка), позволяющий проводить измерения всех компонент электромагнитного излучения в ближней зоне от печатной платы с

использованием системы 3-х взаимно-перпендикулярных пробников. Получена предельная разрешающая способность системы пробников при заданной длине волны и размерах пробников.

4. Получены оценки влияния основных факторов (пробники, металлические конструкции) на исходное излучение от печатной платы.

Практическая значимость результатов работы

Полученные результаты работы могут быть использованы для решения задач ЭМС с целью практического определения наиболее активных областей излучения. Применение реализованных в работе методик повышает точность определения источников излучения и сокращает временные и вычислительные затраты.

Достоверность полученных результатов

Достоверность представленных в настоящей работе результатов обуславливается использованием физически обоснованных методов измерения электромагнитного поля, восстановления источников излучения и большой статистики наблюдений. Полученные экспериментальные результаты и модельные расчеты находятся в качественном и количественном соответствии с исследованиями, опубликованными в работах других авторов.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные оценки на: Международной конференции «Излучение и распространение электромагнитных волн-2017», г. Геленджик, 2017; Международной конференции «Физика.СПб/2017», г. Санкт-Петербург, 2017; Международной конференции «Физика.СПб/2018», г. Санкт-Петербург, 2018; Международной конференции «Международная конференция по вычислениям, электромагнетизму и машинному интеллекту-2018», г. Стелленбош, 2018; 26-ой Всероссийской открытой научной конференции "Распространение радиоволн", г. Казань, 2019.

Публикации

По основным результатам работы опубликовано 7 печатных работ, из них 5 публикаций, индексируемые в БД Scopus и Web of Science, 2 публикации в журналах ВАК.

Личный вклад автора

Содержание научной работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Описанные в настоящей работе результаты получены в составе научного коллектива, в который кроме автора входили В.В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов, О.Н. Шерстюков.

Автором была разработана методика локализации источников электромагнитного излучения от печатных плат с применением регрессии LASSO. Автором была разработана методика понижения размерности задачи восстановления источников излучения с применением вейвлет-преобразования и регрессии LASSO. Экспериментальная установка, позволяющая сканировать электромагнитное излучение от печатных плат также реализована автором. Автор принимал активное участие в составе научного коллектива в подготовке и проведении экспериментов по измерению электромагнитного излучения от излучающих объектов и решении задачи локализации источников излучения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика локализации источников электромагнитного излучения от печатной платы с использованием регрессии LASSO восстанавливает распределение мощности излучателей с ошибкой 1,1 %. Ошибка восстановления методом регуляризации Тихонова составляет 29,1 %.

2. Методика понижения размерности задачи локализации источников электромагнитного излучения от печатной платы с использованием вейвлет-преобразования позволяет сократить временные расчеты в 4,2 раза при регрессии LASSO и в 1,9 раза при регуляризации Тихонова.

3. Экспериментальная установка, реализующая измерение электромагнитного излучения в ближней зоне от исследуемого объекта (печатной платы) в автоматическом режиме, позволяет сканировать полный вектор излучения с разрешающей способностью не хуже 4 мм на частоте 100 МГц при диаметре магнитного пробника 1 см.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 112 источников отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор работ, посвященных проблеме локализации источников электромагнитного излучения от печатной платы. Обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна проведенных исследований. Показана практическая значимость работы полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Обоснована достоверность полученных результатов.

Первая глава

Приведен аналитический обзор существующих методов исследования электромагнитного излучения (ЭМИ) на практике. Приводится описание существующих норм по измерениям ЭМИ от печатных плат. Показано, что наиболее простым и точным методом измерения ЭМИ от печатной платы является планарный способ сканирования излучения. В данном способе измерение излучения происходит с помощью сканирующего пробника. Сканирующий пробник может быть представлен как монополярная антенна, измеряющая электрическое поле, или петлевая антенна, измеряющая магнитное поле. Сканирование производится в плоскости, параллельной плоскости исследуемого объекта в ближней зоне. Преимущества использования измерений в ближней зоне заключаются в отсутствии необходимости использовать безэховую камеру, а также точности измерений.

Описываются методы моделирования электромагнитных (ЭМ) полей от исследуемых объектов: расчет с помощью численных методов, использующихся в основном в коммерческих пакетах, аналитические модели и модели, построенные из результатов сканирования в ближней зоне. Указываются достоинства, и недостатки существующих методов моделирования полей. Показано, что наиболее распространенным методом моделирования ЭМ полей от печатной платы является метод эквивалентного моделирования на основе диполей. В такой модели печатная плата представляет собой сетку, в узлах которой расположены диполи Герца, уравнения для которых в ближней и дальней зонах хорошо известны. Для этой цели реализуются различные экспериментальные установки, позволяющие сканировать электромагнитное излучение. Основными из них являются электромагнитный сканер и набор пробников с анализатором цепей. Такие решения не лишены недостатков. В первом решении отсутствует возможность выбрать размер сетки и шаг ее разбиения, во втором отсутствует система позиционирования, что приводит к отсутствию повторяемости эксперимента. Другой подход, реализующий автоматическое сканирование излучения, позволяет устранить недостатки, свойственные основным решениям. Однако для сканирования всех компонент излучения необходимо повторно выполнить эксперимент, так как установка позволяет измерить только одну компоненту излучения. По этим причинам необходимо реализовать экспериментальную установку, позволяющую измерять полный вектор излучения и устранить недостатки, свойственные основным решениям.

Распределение электромагнитного излучения, полученное экспериментальным путем, является первичной информацией для последующего решения задачи локализации. Данная задача особенно актуальна в области ЭМС. Задача локализации является обратной и некорректной. Для таких задач применяется процедура регуляризации. В настоящее время используется регуляризация Тихонова. Данный алгоритм

имеет явное решение и не позволяет отбирать коэффициенты регрессии, что может привести к достаточно большой ошибке решения.

При решении задачи локализации часто приходится иметь дело с матрицами достаточно больших размеров, что неизбежно приводит к повышению затрат временных и вычислительных ресурсов. По этим причинам использование методов сокращения размерности является актуальным. Основными методами сокращения размерности в задаче локализации источников излучения являются метод главных компонент и преобразование Фурье. Метод главных компонент пренебрегает некоторой частью информации, а преобразование Фурье не позволяет представить источники в виде Фурье-образа с разреженной матрицей.

Вторая глава

Реализована методика локализации источников излучения от печатной платы в ближней зоне на основе измерений электромагнитного излучения, полученных с помощью экспериментальной установки, описанной в главе 4. Излучение от печатной платы заменяется эквивалентной моделью на основе диполей (Рисунок 1).

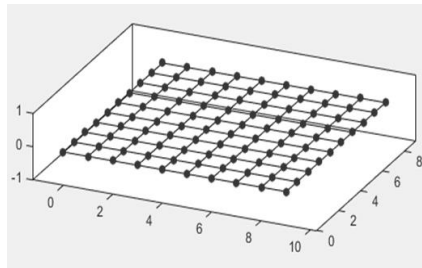


Рисунок 1. Эквивалентная модель печатной платы

Таким образом, считается, что печатная плата представляет собой совокупность диполей. Уравнение, описывающее излучение от диполей имеет вид [9]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = j\omega \left(jk + \frac{1}{r} \right) \cdot (\mathbf{p} \times \mathbf{l}_r) \cdot G(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $G(\mathbf{r}) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}$ – функция Грина в свободном пространстве, $\mathbf{p} = p_x \cdot \mathbf{l}_x + p_y \cdot \mathbf{l}_y + p_z \cdot \mathbf{l}_z$ – магнитный дипольный момент, $\mathbf{l}_r = \frac{\mathbf{r}}{r}$ – единичный радиальный

вектор. По полученным измерениям изучения необходимо определить месторасположение источников на плате. Данная задача является обратной и некорректной. Для таких задач обычно используется процедура регуляризации. Классическим способом определения локализации источников излучения от печатной платы является регуляризация по Тихонову [10]. Функционал Тихонова имеет следующий вид:

$$\Omega(p, \lambda) = \|A \cdot p - H\|_2^2 + \lambda \|p\|_2^2, \quad (2)$$

где H – напряженность магнитного поля, p – дипольное распределение, A – матрица перехода от p к H , λ – параметр регуляризации, подбор которого осуществляется путем минимизации выражения с использованием нормы l_2 :

$$\min(\|p_\lambda - p_0\|_2), \quad (3)$$

Данная задача имеет явное решение:

$$p_\lambda = (A^H A + \lambda^2 I)^{-1} A^H \cdot H. \quad (4)$$

Особенностью регуляризации Тихонова является то, что в функционале используется l_2 норма, которая не позволяет отбирать коэффициенты регрессии. По этой причине предлагается использовать регрессию Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) для определения локализации источников на плате. Особенность регрессии LASSO заключается в том, что решение представляется в виде набора, в котором лишь немногие коэффициенты регрессии отличны от нуля, что и определяет набор источников излучения. Отбор коэффициентов осуществляется благодаря использованию l_1 нормы. Функционал LASSO имеет вид [11]:

$$\Omega(p, \lambda) = \|A \cdot p - H\|_2^2 + \lambda \|p\|_1 \quad (5)$$

Рассмотрим модель с 2-мя точечными источниками излучения с координатами $A_1(1,96; 2,94)$ и $A_2(1,96; 3,92)$ и мощностью излучения 6 и 8 условных единиц. Распределение излучения от источников представлено на рисунке 2.

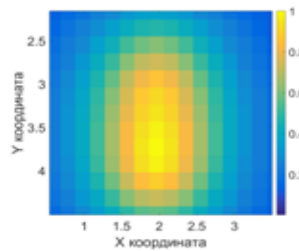


Рисунок 2. Модуль напряженности магнитного поля от двух близко расположенных источников

Для решения обратной задачи и определения положения источников использовалась регуляризация Тихонова и регрессия LASSO. Полученные двумя способами оценки распределения мощности источников излучения показаны на рисунках 3А, 3Б. На рисунке 3В показаны вертикальные срезы распределений с рисунков 3А, 3Б.

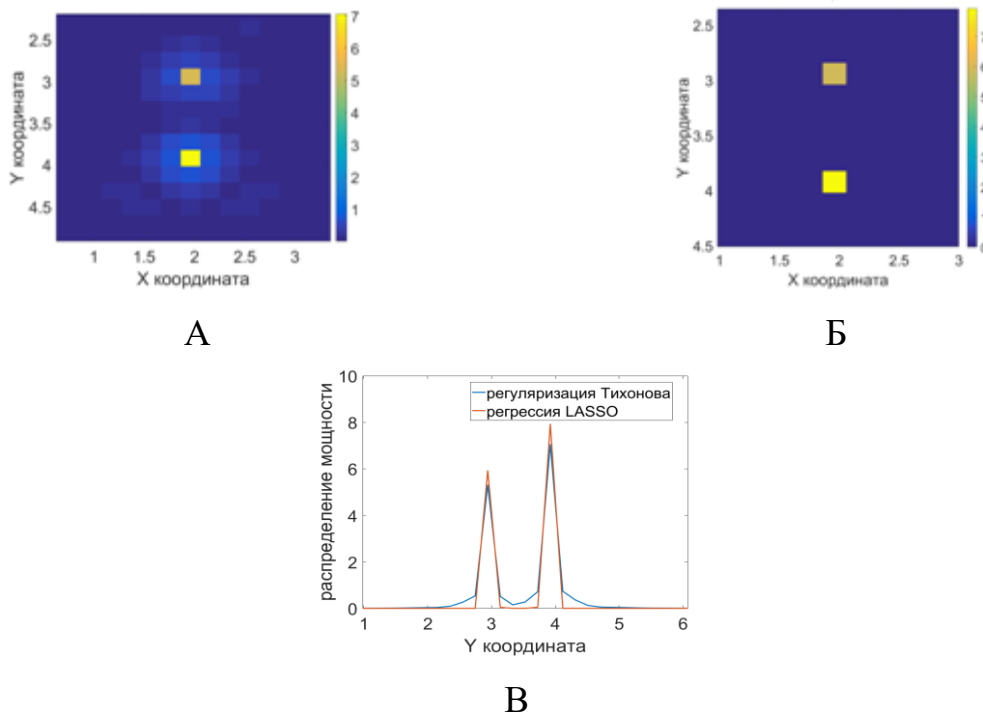


Рисунок 3. Распределение мощности источников при использовании: А) регуляризации по Тихонову, Б) регрессии LASSO, В) срез вдоль координаты $X=1,96$ см

Из рисунка 3 видно, что некоторая часть мощности точечных источников при регуляризации Тихонова распределена по координатной сетке, а при регрессии LASSO мощность источников сконцентрирована в

точках расположения источников. Модель с 2-мя точечными излучателями показала, что доля мощности, приходящаяся на точку расположения восстановленного источника при использовании регуляризации Тихонова равна 88,5 % для 1-го источника и 88,2 % для 2-го. При использовании регрессии LASSO 98,9 % для 1-го источника и 99,1 % для 2-го источника. Ошибка восстановления при использовании регуляризации Тихонова равна 29,1 %, а при регрессии LASSO 1,1 %. Также алгоритмы оценивались на устойчивость к шумовому воздействию при разных шагах сетки. Регрессия LASSO демонстрирует стабильные результаты при разных шагах сетки, а регуляризация Тихонова демонстрирует значительные отклонения от заранее заданных значений параметров точечных источников.

Третья глава

Реализована методика понижения размерности задачи локализации источников электромагнитного излучения от печатной платы в ближней зоне с использованием вейвлет-преобразования. Основная идея такого подхода заключается в том, что задача локализации решается не для самих источников, а для их вейвлет-образов. Вейвлет-образ источников представлен разреженной матрицей, что приводит к сокращению временных и вычислительных ресурсов. Восстановление вейвлет-образа осуществляется с применением регуляризации:

$$\tilde{F}(\tilde{w}, \lambda) = \min(\|H - \tilde{A} \cdot w\|_2^2 + \lambda \|w\|_l), \quad (6)$$

где w – вейвлет-образ источников, $\tilde{A} = A \cdot \tilde{W}$, $\tilde{W}$ – матрица двумерного вейвлет-преобразования с применением вейвлета Хаара, l – норма.

Зададим модель дипольного распределения с помощью матрицы вейвлет-коэффициентов w . В матрице w зададим только 2 ненулевых коэффициента, расположенных на разных позициях. После чего выполним обратное вейвлет-преобразование $p = W' \times w$ и получим сами источники излучения, вид которых изображен на рисунке 4А. Излучение от источников изображено на рисунке 4Б.

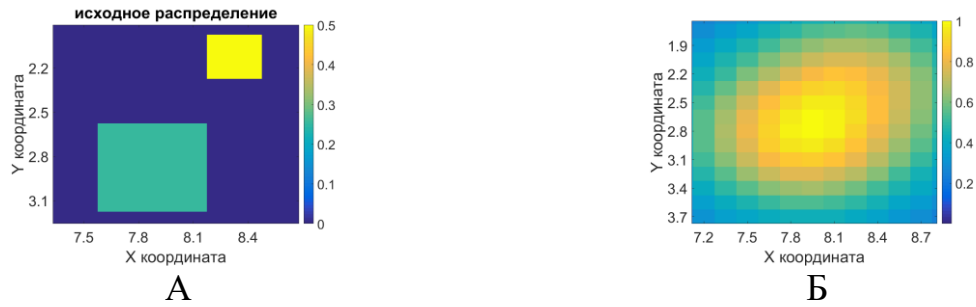


Рисунок 4. А) Дипольное распределение двух распределенных источников, Б) Модуль напряженности магнитного поля от двух близкорасположенных источников

На рисунке 4А изображено 2 распределенных источника излучения, которые состоят из некоторого количества точечных излучателей. Например, 1-ый источник, имеющий наименьшую мощность, состоит из 16-ти точечных излучателей, а 2-ой, имеющий наибольшую мощность, состоит из 4-х точечных излучателей.

Результаты восстановления источников для регуляризации Тихонова и регрессии LASSO без вейвлет-преобразования и с вейвлет-преобразованием представлены на рисунке 5.

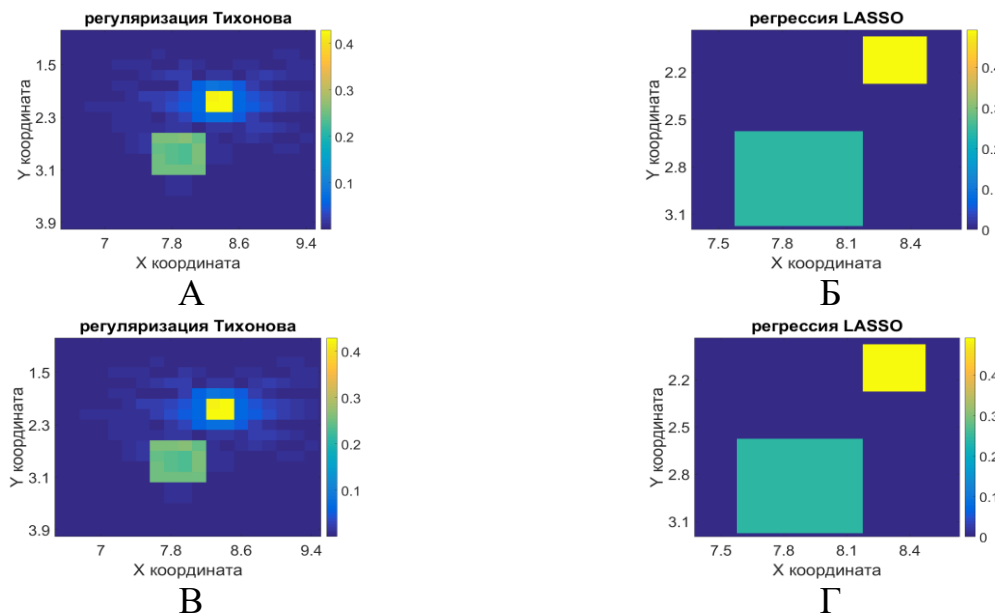


Рисунок 5. Распределение мощности распределенных источников: А) регуляризация по Тихонову (без вейвлет-преобразования), Б) регрессия LASSO (без вейвлет-преобразования), В) регуляризация по Тихонову (с применением вейвлет-преобразования), Г) регрессия LASSO (с применением вейвлет-преобразования)

Алгоритмы восстановления распределения без вейвлет-преобразования и с вейвлет-преобразованием показывают одинаковую ошибку восстановления, что означает отсутствие потерь при использовании прямого вейвлет-преобразования (в случае представления источников в виде вейвлет-образов) и обратного (в случае нахождения источников по восстановленному вейвлет-образу). Критерий оценки решения определяется как норма разности исходного распределения и восстановленного, деленная на норму исходного распределения. Ошибка восстановления с применением вейвлет-преобразования составляет 28,5 % для регуляризации Тихонова и 1,7 % для регрессии LASSO. Временные расчеты сократились в 4,2 раза для регрессии LASSO и в 1,9 раз для регуляризации Тихонова.

Четвертая глава

Описывается экспериментальная установка для измерения ЭМ излучения от печатной платы. В данной установке реализован планарный способ сканирования. Измерение излучения от платы осуществляется с помощью системы из 3-х взаимно перпендикулярных пробников, которая способна измерять полный вектор излучения. Схема установки и система пробников изображены на рисунке 6.



Рисунок 6. А) Схема экспериментальной установки, Б) Система 3-х взаимно-перпендикулярных пробников

Система пробников изображена на рисунке 6 Б. В данной системе каждый пробник изготовлен на основе симметричной полосковой линии, имеет диаметр петли 1 см и сопротивление 50 Ом.

Приводится учет основных ошибок и погрешностей при измерениях: влияние пробника на исходное излучение, которое составило 6,2 %, влияние каркаса, на котором расположены основные элементы установки, на исходное излучение составляет 2,8 %. Разрешающая способность системы пробников составляет 4 мм при диаметре каждого пробника 1 см.

Приводятся экспериментальные результаты измерений излучения от печатной платы. Результаты распределения модуля напряженности поля и восстановление источников излучения на примере H_x компоненты приведены на рисунках 8,9. Частота излучения 100 МГц. Расстояние от платы до системы пробников 15 мм.

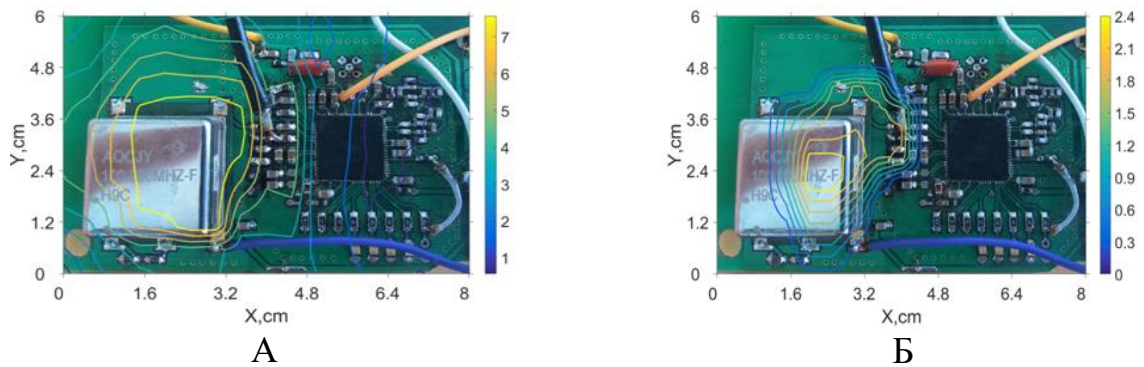


Рисунок 8. А) Модуль напряженности H_x компоненты (мА/м), Б) восстановленное распределение (регуляризация Тихонова)

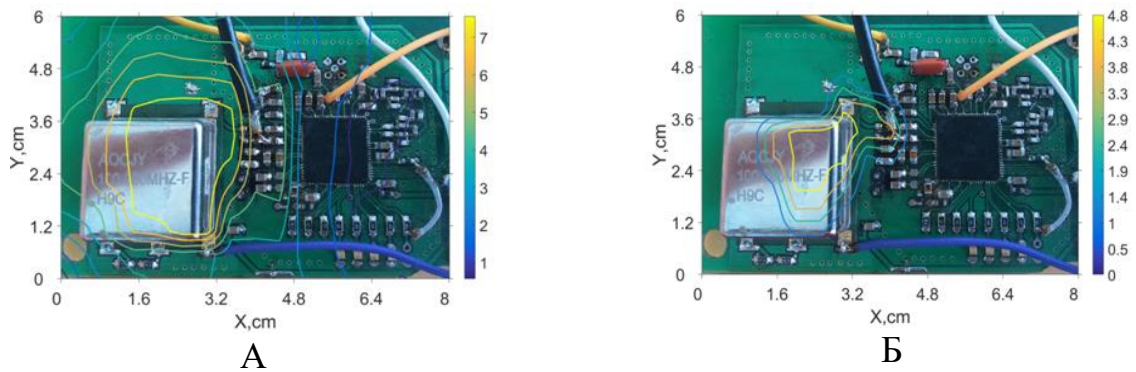


Рисунок 9. А) Модуль напряженности H_x компоненты (мА/м), Б) восстановленное распределение (регрессия LASSO)

Из полученных результатов следует, что некоторая часть мощности распределена по печатной плате при регуляризации Тихонова, что объясняется особенностью работы алгоритма и было показано на примере восстановления модели точечных источников. Однако мощность

распределена в тех областях, где отсутствуют элементы. Регрессия LASSO показывает более точные результаты восстановления. Мощность излучения сконцентрирована в области кварцевого генератора и вывода, следующему к аналоговому каскаду. Именно генератор и вывод являются источниками излучения на частоте 100 МГц.

Заключение

В рамках диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Разработана методика локализации источников излучения от печатной платы с применением регрессии LASSO. Проведено сравнение с классическим алгоритмом Тихонова, который обычно используется в задаче локализации источников излучения. Ошибка восстановления составляет 29,1 % при регуляризации Тихонова и 1,1 % при регрессии LASSO. Алгоритмы исследовались на устойчивость к шумовому воздействию при разных шагах сетки. При разреженной сетке (шаг сетки $\Delta > 0,03 \cdot d$, где d –наименьшее значение длины или ширины платы) ошибки восстановления при регуляризации Тихонова и регрессии LASSO близки, а при густой сетке (шаг сетки $\Delta < 0,03 \cdot d$, где d –наименьшее значение длины или ширины платы) ошибка восстановления при регуляризации Тихонова существенно увеличивается по сравнению с регрессией LASSO. Проведено исследование на устойчивость к шумовому воздействию (нормальный закон распределения) обоих алгоритмов регуляризации. Алгоритмы наиболее устойчивы к фоновому шуму, что соответствует добавлению шума к напряженности магнитного поля H . Граничное значение шум-фактора, величина обратная соотношению сигнал-шум, составляет 10^{-1} . При граничном значении шум-фактора восстановление источников с применением регрессии LASSO еще возможно, а при регуляризации Тихонова источники начинают сливаться. Граничное значение шум-фактора

в случае систематической ошибки (при добавлении шума к дипольному распределению p , матрице перехода A) составляет 10^{-2} .

2. Разработана методика понижения размерности задачи восстановления источников излучения с применением вейвлет-преобразования и регрессии LASSO. Проведено сравнение с классическим подходом применения регуляризации Тихонова. Использование вейвлет-преобразования позволяет сократить временные расчеты при решении задаче локализации в 4,2 раза в случае регрессии LASSO и в 1,9 раза при регуляризации Тихонова.

3. Реализована экспериментальная установка для измерения электромагнитного излучения. Основной особенностью является наличие системы из 3-х взаимно перпендикулярных пробников, позволяющих сканировать все компоненты излучения одновременно. Максимальная разрешающая способность системы пробников составляет 4 мм на частоте $f=100$ МГц при диаметре петли магнитного пробника 1 см. Оценка систематической ошибки между модельными и экспериментальными результатами (на примере микрополосковой линии) составляет 12,1 %. Получены экспериментальные результаты измерений излучения аналого-цифровой печатной платы. По результатам измерений была решена задача локализации источников излучения на частоте 100 МГц в ближней зоне.

4. Получены оценки основных факторов, искажающих исходное излучение. Искажение исходного излучения системой пробников составляет 6,2 %. Влияние каркаса, на котором закреплены основные компоненты установки, составляет 2,8 %.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых источниках, рекомендованных ВАК РФ

1. Скворцов, И.В. Экспериментальная установка для измерения электромагнитного излучения от излучающей структуры в ближней зоне

[Текст] / И.В. Скворцов, Р.Р. Латыпов, О.Н. Шерстюков, Р.Ф. Бабаев // Журнал радиоэлектроники.– 2019.– № 11.– с.1-13.

2. Скворцов, И.В. Методики оценок влияния основных факторов и погрешностей на измерение электромагнитного излучения от печатной платы в ближней зоне [Текст] / И.В. Скворцов, Р.Р. Латыпов, О.Н. Шерстюков // Журнал радиоэлектроники.– 2019.– № 12.– с. 1–14.

Прочие публикации, индексируемые в БД Scopus/Web of Science

3. Skvortsov, I.V. Method of measurement of electromagnetic radiation from printed circuit board in the near field / I.V. Skvortsov, R.R. Latypov // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia.– 2017.– pp. 423-424.

4. Skvortsov, I.V Estimation of localization of point sources from printed circuit board in the near field / I.V. Skvortsov, V.V. Bochkarev, R.R. Latypov // Journal of Physics Conference Series.–2018.– vol. 1038.– pp. 1-5.

5. Skvortsov, I.V. Localization of distributed radiation sources from from printed circuit board in the near field using wavelet transform / I.V. Skvortsov, V.V. Bochkarev, R.R. Latypov // Journal of Physics Conference Series.–2018.– vol. 1135.– pp. 1-5.

6. Skvortsov, I.V. Localization of stochastic electromagnetic sources from PCBs in the near field / I.V. Skvortsov, V.V. Bochkarev, R.R. Latypov // International Workshop on Computing, Electromagnetics, and Machine Intelligence, Stellenbosch, South Africa.–2018.– pp. 39-40.

7. Skvortsov, I.V. Evaluation of Electromagnetic Radiation from a Radiating Structure in the Near Field / I.V. Skvortsov, R.R. Nasertdinov, R.R. Latypov, R.F. Babaev // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia.–2019.–pp. 353-356.

Цитируемая литература

1. Jakobus, U. Method of moments accelerations and extensions in FEKO / U. Jakobus, M. Bingle, W. Burger, D. Ludick // 2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Torino, Italy.– 2011.– pp.62-65.
2. Гринев, А.Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики [Текст] / А.Ю. Гринев. – М:Радиотехника.–2012.– 336 с.
3. Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz–Part 3:Measurement of radiated emissions–Surface scan method, IEC 61967-3:2005.–2005.–ANSI.– 55 p.
4. Thomas, D.W.P. Measurement and simulation of the near-field emissions from microstrip lines / D.W.P. Thomas, K. Biwojno, X. Tong, A. Nothofer, P. Sewell, C. Christopoulos //Proc. EMC Europe 2008, Detroit, USA.– 2008.– pp.1-6.
5. EMxpert 20 MHz - 1 GHz [Электронный ресурс] URL: http://dev.ccontrols.pl/cms/upload/content/news/EMxpert_Datasheet.pdf (дата обращения: 11.10.2019)
6. Aprel EM-ISight 10 kHz- 40 GHz [Электронный ресурс] URL: <https://www.aprel.com/em-isight> (дата обращения: 11.10.2019)
7. Горбунова, А.А. Идентификация параметров источников побочных электромагнитных излучений по измерениям в ближней зоне [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 05.04.12 / Горбунова А.А.–М, 2014.–154 с.
8. Tong, X. Simplified equivalent modeling of electromagnetic emissions from printed circuit boards: PhD thesis / X.Tong.– Nottingham, 2010.– 241 p.
9. Sophocles, J. Electromagnetic Waves and Antennas / J. Sophocles.– Rutgers University.–2002.–778 p.
10. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач [Текст] / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин.– М.: Наука,1979.–283 с.
11. Tibshirani, R. Regression Shrinkage and Selection via the lasso / R. Tibshirani // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. Wiley.–1996.– 58 (1).– pp. 267–88.