

На правах рукописи



ГОРБУНОВА АНАСТАСИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ПОБОЧНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ
В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре теоретической радиотехники Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Юрий Владимирович Кузнецов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Владимир Борисович Авдеев
кандидат технических наук, профессор
Валентин Сергеевич Сперанский

Ведущая организация: ФГБУН Институт радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова Рос-
сийской академии наук

Защита диссертации состоится « 28 » октября 2014 г. в 14⁰⁰ часов на засе-
дании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном инсти-
туте (национальном исследовательском университете) по адресу:
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ma1.ru и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, д.т.н.



М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Средства вычислительной техники (СВТ), осуществляющие обработку, хранение и передачу информации, в процессе своего функционирования создают в окружающем пространстве электромагнитное поле информационного сигнала. Побочное электромагнитное излучение (ПЭМИ) СВТ может быть обнаружено на определённом расстоянии от технического средства (ТС) и протестировано для выделения информации с использованием специальной радиотехнической аппаратуры.

Для контроля защищённости СВТ от возможной утечки информации по каналу ПЭМИ используются характеристики его электромагнитного излучения, такие как напряжённость электрического и магнитного полей информативного сигнала, шумов и помех, которые определяются по результатам измерений в заданных точках. В качестве параметра, характеризующего защищённость СВТ, используется расстояние от устройства, за пределами которого выполняется условие защищённости. Для оценки этого параметра используется экспериментально-расчётный метод, в рамках которого измерения ПЭМИ проводятся на расстоянии 1–3 м от СВТ в экранированной камере. Измеренные уровни напряжённости электрического и магнитного полей в точке максимального излучения используются для расчёта характеристик ПЭМИ СВТ на границе контролируемой зоны с использованием модели излучения элементарного диполя. Недостатки такого подхода определяются тем, что дипольная модель является адекватной только для определённого частотного диапазона, что не позволяет обеспечить высокую достоверность оценки параметров защищённости на границе контролируемой зоны. Повышение достоверности может быть достигнуто за счет использования уточненных моделей ТС. С другой стороны, современной тенденцией развития методов исследования ЭМИ в смежных областях, таких как электромагнитная совместимость (ЭМС), является проведение измерений ЭМИ в ближней зоне объекта, которые, по сравнению с измерениями в дальней зоне, имеют преимущества по скорости и точности, а также обеспечивают возможность проведения без использования специализированных помещений. Данный подход может быть применён и в задаче контроля защищённости СВТ от возможной утечки информации по каналу ПЭМИ. Однако необходимо учи-

тывать, что ПЭМИ современных интерфейсов передачи данных являются маломощными, широкополосными случайными процессами. Это вызывает необходимость использования стохастического подхода к описанию пространственного распределения ПЭМИ СВТ.

Таким образом, задача развития технологии измерения стационарных стохастических ПЭМИ СВТ в ближней зоне и разработки алгоритмов идентификации параметров источников информационного излучения для формирования уточненной модели СВТ является актуальной.

Целью работы является повышение достоверности и эффективности контроля защищённости информации, обрабатываемой средствами вычислительной техники, путём развития технологии измерения стационарных стохастических побочных электромагнитных излучений технических средств в ближней зоне за счёт использования уточнённой модели технического средства и разработки алгоритмов идентификации параметров источников информационного излучения.

В работе решены следующие основные задачи:

1. Синтезирована математическая модель формирования ЭМИ СВТ, определены её основные параметры и выведены аналитические выражения для пространственно-частотной характеристики излучения в ближней и дальней зонах.

2. Обоснована структура и состав системы измерения стационарных стохастических ЭМИ СВТ в ближней зоне во временной области.

3. На основе предложенной распределённой дипольной модели разработан алгоритм идентификации параметров источников информационного стохастического ЭМИ СВТ и расчёта их пространственно-частотных характеристик излучения в дальней зоне.

4. Проведена экспериментальная верификация разработанной технологии измерения информационных стационарных стохастических ЭМИ СВТ в ближней зоне путём сопоставления рассчитанных и измеренных пространственно-частотных характеристик излучения в дальней зоне.

Методы исследований основываются на использовании параметрической идентификации систем, спектрального оценивания, методов цифровой об-

работки сигналов, корреляционного анализа, математического анализа, линейной алгебры, математического и компьютерного моделирования, а также теоретических основ статистической радиотехники.

Научная новизна результатов исследований состоит в следующем:

1. Синтезирована математическая модель формирования информационных ЭМИ СВТ в ближней и дальней зонах его излучения.

2. Разработана процедура идентификации параметров модели распределённого информационного источника ЭМИ СВТ в плоскости объекта, основанная на вычислении пространственных взаимно-корреляционных спектров сигналов, измеренных в ближней зоне излучения.

3. Предложен алгоритм локализации эффективных источников информационного ЭМИ СВТ в плоскости объекта, основанный на параметрических методах спектрального оценивания и позволяющий снизить вычислительные затраты за счёт уменьшения порядка модели.

4. Реализована система измерений ЭМИ СВТ в ближней зоне, позволившая провести экспериментальную верификацию предложенной методики расчёта пространственно-частотных характеристик информационных ЭМИ СВТ в дальней зоне.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что разработанные методы исследования стохастических ЭМИ и алгоритмы их обработки могут быть реализованы в автоматизированных программно-аппаратных комплексах контроля защищённости СВТ. Применение таких систем позволит существенно сократить временные затраты на проведение измерений, повысить достоверность результатов и обеспечит возможность проведения исследований в нормальных лабораторных условиях без использования специальных помещений. Также разработанный алгоритм локализации источников в составе ТС может эффективно применяться на стадии разработки и создания образцов защищённой техники для поиска источников информативного излучения и оценки уровней их ЭМИ.

Использованные в работе методы цифровой обработки и спектрального оценивания могут найти применение в различных областях науки, таких как радиотехника, радиолокация, антенные системы и др.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использованы и внедрены в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Гамма», что подтверждается актом о внедрении. Научные и практические результаты работы также отражены в отчётах по нескольким хоздоговорным НИР.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректностью исходных положений, приближений и преобразований, использованием апробированного адекватного математического и статистического аппарата, компьютерных программ и логической обоснованностью выводов. Полученные результаты многократно подтверждены физическими и вычислительными экспериментами.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные оценки на 9 международных и 4 всероссийских научно-технических конференциях.

Публикации. По основным результатам выполненных исследований опубликовано 19 печатных работ из них 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 4 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в международном научном издании, индексируемом в базе данных Web of Science, 13 тезисов докладов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сокращение временных затрат на проведение исследований ПЭМИ СВТ с целью контроля его защищённости от утечки информации в 8-10 раз достигается за счёт использования системы измерения ЭМИ в ближней зоне во временной области.

2. Повышение достоверности экспериментально-расчётного метода контроля защищённости СВТ от утечки информации по каналу ПЭМИ обеспечивается за счёт использования распределённой дипольной модели СВТ, параметры которой определяются по измеренным пространственным корреляционным характеристикам тангенциальных компонент ЭМИ в ближней зоне путём решения обратной задачи.

3. Локализация эффективных источников ПЭМИ СВТ в плоскости объекта с использованием метода параметрической идентификации приводит к по-

вышению точности оценки их параметров в 5-10 раз и позволяет производить расчёт пространственно-частотных характеристик их излучения для заданного информационного сигнала.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа изложена на 154 машинописных страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Иллюстративный материал представлен в виде 69 рисунков. Список литературы включает 93 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** проведён аналитический обзор существующих методов исследования ЭМИ ТС в отечественной и зарубежной практике. Показано, что задача определения пространственно-частотного распределения мощности излучения объектов, являющаяся основой контроля защищённости СВТ от утечки по каналу ПЭМИ, решается также и в других областях, таких как антенные измерения и тестирование устройств на обеспечение ЭМС.

Рассмотрен классический подход к контролю защищённости СВТ, основанный на проведении измерений характеристик излучения ТС в дальней зоне и последующем их пересчёте для оценки максимально возможной зоны перехвата информации. Недостатками такого подхода являются невысокая точность, а также значительные временные затраты.

Показано, что современной тенденцией исследования характеристик направленности ЭМИ в антенной технике и в задачах обеспечения ЭМС заключается в проведении измерений в ближней зоне излучения объектов.

В главе предложено использование метода измерений в ближней зоне для контроля защищённости СВТ с целью повышения достоверности результатов, снижения временных затрат, а также требований к условиям проведения измерений и измерительной аппаратуре. Другим достоинством такого подхода является возможность использования результатов измерения для локализации источников ПЭМИ с целью последующего принятия мер по снижению его уровня, а также определения характеристик их парциального излучения.

В главе 2 предложена модель формирования ПЭМИ СВТ (рис. 1), которая рассматривает компоненты электромагнитного поля $\vec{E}_u(f, \vec{r})$ и $\vec{H}_u(f, \vec{r})$ излучения СВТ в точке \vec{r} как произведение спектра тока, формирующего ПЭМИ $I_u(f)$, на частотную характеристику излучения $\vec{K}_{\{E,H\}}(f, \vec{r})$:

$$\vec{E}_u(f, \vec{r}) = I_u(f) \cdot \vec{K}_E(f, \vec{r}) \quad \text{и} \quad \vec{H}_u(f, \vec{r}) = I_u(f) \cdot \vec{K}_H(f, \vec{r}) \quad (1)$$



Рисунок 1 – Модель формирования ПЭМИ СВТ.

Спектр тока $I_u(f)$ определяется на выходе преобразователя (рис. 2) для известного информационного сигнала $s_u(t)$, обрабатываемого СВТ. Преобразователь включает в себя кодер сигнала $s_u(t)$, формирующий сигналы в шине интерфейса передачи данных $s_1(t), \dots, s_N(t)$ по известному алгоритму, линейный сумматор и размерный весовой коэффициент a .

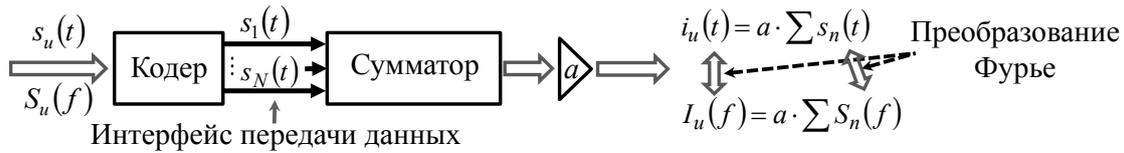


Рисунок 2 – Структурная схема преобразователя.

Для построения модели ТС в главе рассматривались три варианта его эквивалентного замещения: модель элементарного диполя, модель антенны бегущей волны и распределённая дипольная модель (рис. 3).

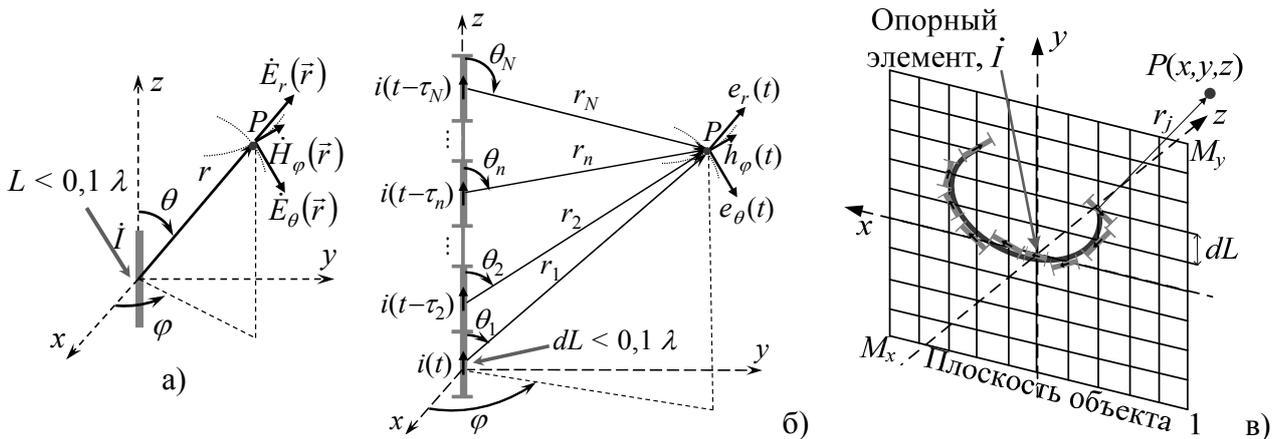


Рисунок 3 – Модели ТС: а) – модель элементарного диполя; б) – модель антенны бегущей волны; в) – распределённая дипольная модель.

Простейшей моделью при исследовании ЭМИ объектов малой электрической длины является модель элементарного диполя (рис. 3а), частотные характеристики излучения которой для каждой компоненты электрического и маг-

нитного поля, формируемых такой системой в точке P на расстоянии r , определяются выражениями:

$$\begin{aligned} K_{H_\varphi}(f, \vec{r}) &= \frac{jkL \sin \theta}{4\pi r} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) \cdot e^{-jkr}, & K_{E_r}(f, \vec{r}) &= \frac{\eta L \cos \theta}{2\pi r^2} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) \cdot e^{-jkr}, \\ K_{E_\theta}(f, \vec{r}) &= \frac{j\eta k L \sin \theta}{4\pi r} \left(1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2}\right) \cdot e^{-jkr}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\eta = 120 \pi$ [Ом] – волновое сопротивление свободного пространства.

В соответствии с выражениями (2) параметром модели элементарного диполя является его длина L .

Частотная граница адекватности использования модели излучения элементарного диполя для описания объекта с характерным размером L определяется из условия $L \leq 0,1 \lambda$: $f \leq 0,3 \cdot 10^8 / L$.

В главе показано, что для описания ЭМИ линий передачи с электрической длиной более нескольких длин волн, характерной для интерфейсных кабелей, шин и печатных проводников, может использоваться модель антенны бегущей волны (рис. 3б). Излучение антенны бегущей волны может рассматриваться как суперпозиция излучений N элементарных диполей длиной $dL \leq 0,1 \cdot \lambda_{\min}$, где λ_{\min} – длина волны, соответствующая максимальной частоте анализируемого диапазона F_{\max} . Ток в n -ом сегменте представляет собой задержанную на время $\tau_n = (n-1) \cdot dL/c$ копию тока в первом сегменте. В этом случае частотные характеристики излучения определяются выражениями:

$$\begin{aligned} K_{H_\varphi}(f, \vec{r}) &= \frac{jk dL}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{\sin \theta_n}{r_n} \left(1 + \frac{1}{jkr_n}\right) \cdot e^{-jk(r_n + (n-1)dL)}, \\ K_{E_r}(f, \vec{r}) &= \frac{\eta dL}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{\cos \theta_n}{r_n^2} \left(1 + \frac{1}{jkr_n}\right) \cdot e^{-jk(r_n + (n-1)dL)}, \\ K_{E_\theta}(f, \vec{r}) &= \frac{j\eta k dL}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{\sin \theta_n}{r_n} \left(1 + \frac{1}{jkr_n} - \frac{1}{(kr_n)^2}\right) \cdot e^{-jk(r_n + (n-1)dL)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где r_n – расстояние от n -го сегмента до точки наблюдения \vec{r} .

Из выражения (6) следует, что параметрами модели антенны бегущей волны являются длина одного сегмента dL и количество сегментов N .

С целью обобщения модели антенны бегущей волны на плоские излучающие структуры в работе в качестве модели СВТ было предложено использовать распределённую дипольную модель, которая рассматривает излучающую

структуру как совокупность $M_x \times M_y$ произвольно ориентированных элементарных электрических диполей длиной dL , расположенных в узлах фиксированной сетки (рис. 3в). В рамках этой модели, излучающая структура представляется плоской поверхностью, распределение токов на которой создается одним источником, расположенным в опорной точке. Ток в j -ом диполе представляет собой задержанную на время τ_j копию тока в опорном элементе, где τ_j определяется конфигурацией диполей и направлениями протекания тока. В работе показано, что частотные характеристики излучения для трех компонент вектора напряженности магнитного поля в этом случае определяются выражениями:

$$\begin{aligned} K_{H_x}(f, \vec{r}) &= \sum_{j=1}^{M_x \cdot M_y} \frac{e^{-j(kr_j + 2\pi f \tau_j)}}{4\pi r_j^2} \left(jk + \frac{1}{r_j} \right) \cdot (z - z_j) \cdot \Delta l_{y_j}, \\ K_{H_y}(f, \vec{r}) &= - \sum_{j=1}^{M_x \cdot M_y} \frac{e^{-j(kr_j + 2\pi f \tau_j)}}{4\pi r_j^2} \left(jk + \frac{1}{r_j} \right) \cdot (z - z_j) \cdot \Delta l_{x_j}, \\ K_{H_z}(f, \vec{r}) &= \sum_{j=1}^{M_x \cdot M_y} \frac{e^{-j(kr_j + 2\pi f \tau_j)}}{4\pi r_j^2} \left(jk + \frac{1}{r_j} \right) \cdot \left[(y - y_j) \cdot \Delta l_{x_j} - (x - x_j) \cdot \Delta l_{y_j} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где r_j – расстояние от j -го диполя с координатами до точки наблюдения \vec{r} , $\Delta l_{\{x,y\}_j}$ – проекции вектора ориентации дипольного момента j -го диполя.

Из выражения (4) следует, что параметрами распределённой дипольной модели являются количество диполей $M_{\{x,y\}}$, задержки τ_j и вектор ориентации элементарного диполя $\vec{\Delta l}_j$ в каждом элементе сетки в области объекта.

Предложенная распределённая дипольная модель может использоваться как для описания ПЭМИ элементов малых электрических размеров и длинных линий передачи, так и плоских излучателей с произвольной конфигурацией.

Полученные в главе частотные характеристики излучения для любой из рассмотренных моделей определяются параметрами её элементов, не зависящими от частоты. Таким образом, в рамках предложенной модели ПЭМИ СВТ, задача оценки характеристик излучения в любой точке пространства разделяется на выбор соответствующей модели ТС, определение её параметров на одной из частот излучения и формирование спектра ЭМИ ТС во всем диапазоне исследуемых частот для заданной модели сигнала.

В главе 3 рассмотрены характеристики стационарного стохастического излучения, характерного для ПЭМИ СВТ. Показано, что стационарные стохастические ЭМИ ТС характеризуются своими корреляционными характеристиками, оценки которых определяются по временным реализациям принимаемых сигналов. В связи с этим предложена концепция построения системы измерения ПЭМИ СВТ в ближней зоне, представленная на рис. 4.

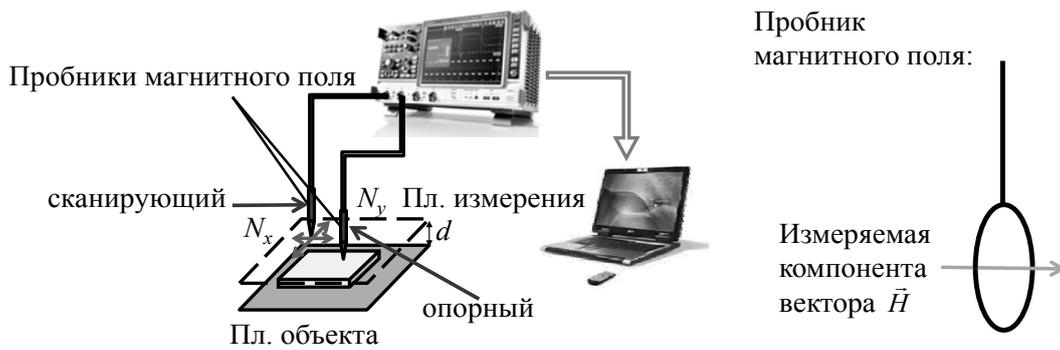


Рисунок 4 – Система измерения ПЭМИ СВТ в ближней зоне.

Предложенная система реализует принцип двухточечного плоского сканирования тангенциальных компонент магнитного поля и состоит из двух пробников, подключённых к двум каналам цифрового осциллографа. Один пробник является опорным, второй осуществляет сканирование по узлам плоской сетки, расположенной в ближней зоне излучения объекта на расстоянии d . Размеры $L_x \times L_y$ плоскости измерения выбираются исходя из размеров объекта с небольшим запасом для приёма излучений источников, находящихся на границах исследуемого устройства. Шаг сканирования Δ определяется исходя из условий выполнения теоремы Котельникова для пространственной дискретизации: $\Delta_{\{x,y\}} \leq \lambda_{\min}/2$. Приёмное устройство осуществляет одновременную фиксацию дискретных отсчётов сигналов двух пробников с частотой дискретизации, удовлетворяющей теореме Котельникова: $F_d \geq 2 \cdot F_{\max}$.

Для пересчёта характеристик ПЭМИ СВТ из ближней зоны в любую точку пространства в главе предлагается использовать метод эквивалентного моделирования источника (рис. 5), который позволяет проводить расчет в широком диапазоне частот и пространственных координат. В рамках этого метода исследуемая структура заменяется некоторым набором эквивалентных источников, параметры которых определяются по результатам измерений в ближней зоне и

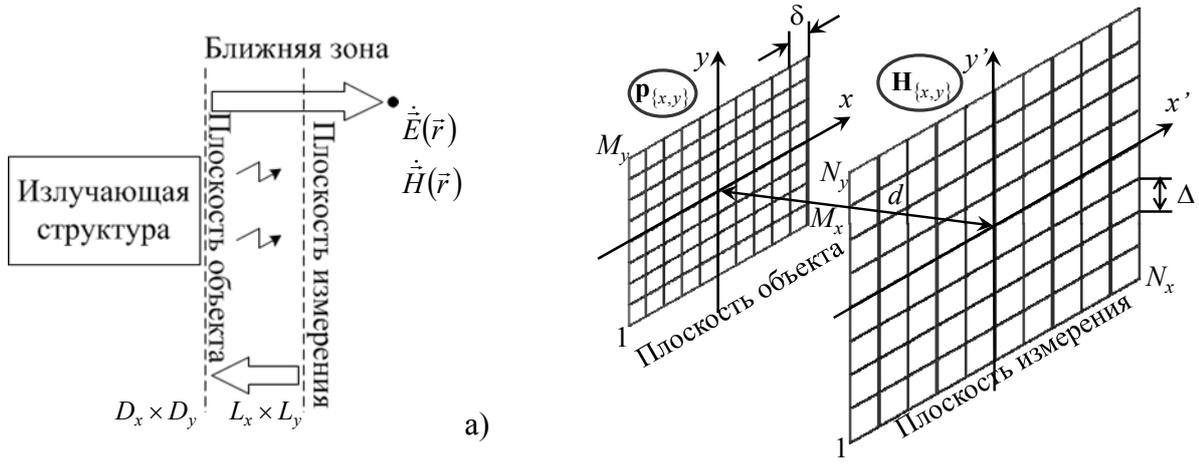


Рисунок 5 – Расчёт ЭМИ с использованием метода эквивалентного моделирования источника и схема расположения плоскостей измерения и объекта.

используются для расчета характеристик излучения в любой точке пространства. В качестве эквивалентной модели СВТ в главе предложено использовать распределенную дипольную модель, рассмотренную в **главе 2**, параметрами которой являются электрические дипольные моменты в узлах сетки в плоскости объекта $p_{\{x,y\}j}$. Расчет тангенциальных компонент вектора дипольных моментов $\mathbf{p}_{\{x,y\}}$ и определение компонент вектора напряженности магнитного поля в точке \vec{r} для случая детерминированного ЭМИ производится в соответствии с выражениями:

$$\mathbf{A}_{\{x,y\}} \cdot \mathbf{p}_{\{y,x\}} = \mathbf{H}_{\{x,y\}} \Rightarrow \mathbf{p}_{\{y,x\}} = \mathbf{A}_{\{x,y\}}^+ \mathbf{H}_{\{x,y\}} \Rightarrow \begin{aligned} \dot{H}_{\{x,y\}}(\vec{r}) &= \mathbf{a}_{\{x,y\}}(\vec{r}) \cdot \mathbf{p}_{\{y,x\}} \\ \dot{H}_z(\vec{r}) &= \mathbf{a}_{zy}(\vec{r}) \cdot \mathbf{p}_y - \mathbf{a}_{zx}(\vec{r}) \cdot \mathbf{p}_x \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{A}_{\{x,y\}}$ и $\mathbf{a}_{\{x,y,zy,zx\}}$ – матрицы и вектора преобразования соответственно, $()^+$ – псевдообращение Мура-Пенроуза.

В главе предложено обобщение метода эквивалентного моделирования источника на случай исследования характеристик стационарного стохастического ПЭМИ СВТ, формируемого одним распределённым источником. В этом случае оценка распределения дипольных моментов в плоскости объекта может быть получена путем решения линейного матричного уравнения вида:

$$\mathbf{W}_{\{x,y\}} = \mathbf{A}_{\{x,y\}} \cdot \hat{\mathbf{p}}_{\{y,x\}}, \quad (6)$$

где $\mathbf{W}_{\{x,y\}}$ ($N_x \cdot N_y \times 1$) – вектор отсчетов взаимно-корреляционного спектра во всех точках сканирования на одной частоте f_m , $\mathbf{A}_{\{x,y\}}$ ($N_x \cdot N_y \times M_x \cdot M_y$) – матрица коэффициентов, $\hat{\mathbf{p}}_{\{y,x\}}$ ($M_x \cdot M_y \times 1$) – оценка вектора тангенциальных компонент дипольных моментов.

В главе 4 рассмотрены предлагаемые алгоритмы обработки результатов измерения тангенциальных компонент вектора напряжённости ЭМИ ТС в ближней зоне во временной области.

Предложенный алгоритм локализации источников ПЭМИ СВТ, блок-схема которого представлена на рис. 6, позволяет определить распределение дипольных моментов на частоте f_m и параметры распределённой дипольной модели в плоскости объекта, а также эффективных источников ПЭМИ, количество которых существенно меньше размерности дипольной модели.

Локализация источников стохастического ПЭМИ СВТ проводится путем обработки дискретных сигналов, полученных одновременно в одной из $N_x \times N_y$ точек в плоскости измерения, расположенной в ближней зоне излучения исследуемого объекта, и фиксированной опорной точке для каждой из двух тангенциальных компонент магнитного поля, и состоит из следующих этапов:

1. Оценка взаимно-корреляционного спектра сигналов в двух точках в плоскости измерения по измеренным отсчётам цифрового сигнала с использованием периодограммы Уэлча, которая представляет собой результат усреднения произведения спектров перекрывающихся сегментов исходных сигналов, взвешенных оконной функцией.

2. Оценка распределения дипольных моментов в плоскости объекта на частоте f_m путем регуляризации по Тихонову решения линейного матричного уравнения (6). Параметр регуляризации λ в отсутствие априорной информации о шумах наблюдения предлагается определять с помощью метода L -кривой. Таким образом, на данном этапе определяются оценки тангенциальных компонент дипольных моментов $\hat{\mathbf{p}}_x$ и $\hat{\mathbf{p}}_y$ в каждой точке сетки в области объекта. Полученные оценки используются для формирования векторного распределения дипольных моментов $\vec{\mathbf{P}}$ путём преобразования векторов $\hat{\mathbf{p}}_{\{x,y\}}$ размерности $(M_x \cdot M_y \times 1)$ в матрицы $\hat{\mathbf{P}}_{\{x,y\}}$ размерности $(M_x \times M_y)$.

При наличии априорной информации о среднеквадратическом значении тока \bar{I} в выбранном опорном элементе на частоте f_m , по полученным оценкам

компонент вектора $\vec{\hat{p}}$ могут быть определены параметры распределённой дипольной модели (4):

$$\tau_j = -\arg\left(j2\pi f_m \hat{p}_j\right) / 2\pi f_m, \quad \Delta l_{\{x,y\}_j} = \left|j2\pi f_m \hat{p}_{\{x,y\}_j}\right| / \bar{I}. \quad (7)$$

Полученные параметры распределённой дипольной модели могут быть использованы для расчёта пространственно-частотных характеристик ПЭМИ исследуемого СВТ для любого сигнала, формирующего излучение, в соответствии с выражениями (1, 4).

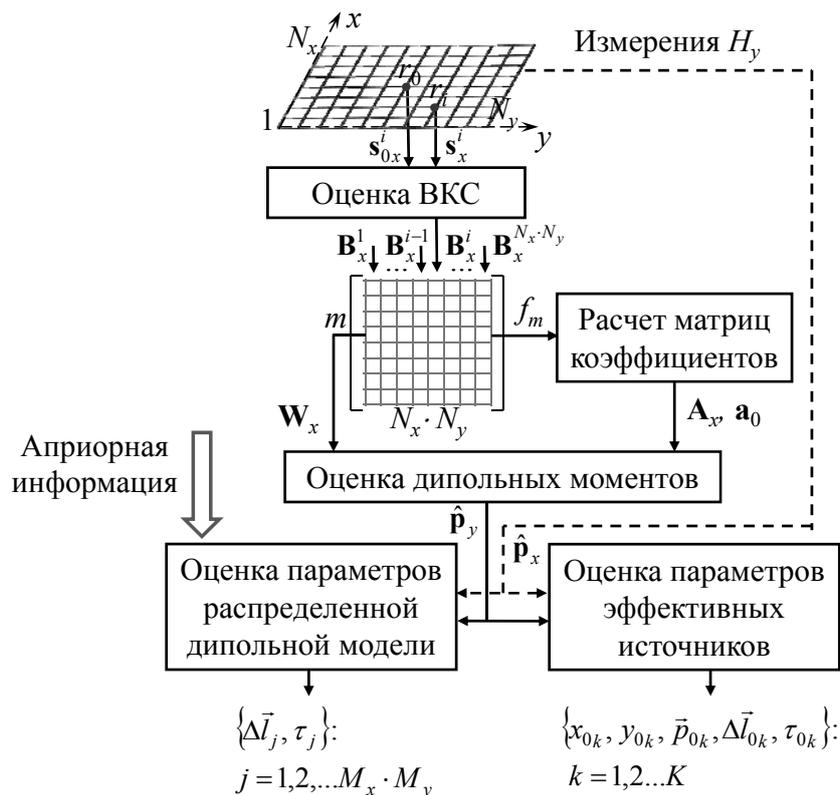


Рисунок 6 – Алгоритм локализации источников.

3. Параметрическая идентификация эффективных источников ПЭМИ СВТ, которая заключается в определении их количества $K \ll M_x \cdot M_y$, координат в плоскости объекта (x_{0k}, y_{0k}) и дипольных моментов \vec{p}_{0k} . Исходными данными для определения координат эффективных источников ЭМИ является тангенциальная компонента векторного распределения дипольных моментов $\hat{\mathbf{P}}_{\text{танг}}$ в плоскости объекта на частоте f_m , которая в предположении ограниченного числа источников может быть представлена в виде:

$$\dot{g}[i, j] = \hat{\mathbf{P}}_{\text{танг}} = \sum_{k=1}^K \dot{\alpha}_{0k} \cdot \delta(x_i - x_{0k}, y_i - y_{0k}) + \eta[i, j], \quad i = 1, 2, \dots, M_x; \quad j = 1, 2, \dots, M_y, \quad (8)$$

где $\dot{\alpha}_{0k}$ – комплексная амплитуда k -го источника излучения, $\eta[i, j]$ – двумерный гауссовский шум.

Порядок модели (8) в работе предложено определять в спектральной области с использованием информационного критерия MDL. Координаты эффективных источников в алгоритме локализации определяются с использованием двумерного метода матричных пучков, который, как показали проведенные ранее исследования, обеспечивает точность оценки параметров модели (8) в 5–10 раз выше по сравнению с классическим непараметрическим подходом.

Компоненты вектора дипольных моментов эффективных источников \vec{p}_{0k} определяются для каждой из компонент векторного распределения дипольных моментов $\hat{\mathbf{P}}_{\{x,y\}}$ путём решения методом наименьших квадратов системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$DFT_{2D} \left\{ \dot{\hat{\mathbf{P}}}_{\{x,y\}}[m, n] \right\} = \sum_{k=1}^K \dot{\alpha}_{\{x,y\}k} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi x_{0k} m}{D_x} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi y_{0k} n}{D_y} \right\}, \quad (9)$$

где $DFT_{2D}\{\}$ – оператор двумерного дискретного преобразования Фурье.

По полученному набору значений $x_{0k}, y_{0k}, \vec{p}_{0k}$ могут быть также определены параметры $\Delta \vec{l}_{0k}, \tau_{0k}$ эффективных источников в соответствии с (7).

В главе рассмотрен алгоритм пересчёта ЭМИ ТС, позволяющий определить все компоненты электромагнитного поля излучения СВТ на частоте f_m в любой точке пространства, как по распределению дипольных моментов в плоскости объекта, так и по определённым параметрам эффективных источников. Также предложенный алгоритм позволяет для заданного спектра тока, формирующего излучение распределённого источника в плоскости объекта, определить характеристики его ПЭМИ в произвольной точке, как в частотной, так и во временной области по параметрам распределённой дипольной модели, определённым на одной опорной частоте.

В главе 5 представлены результаты экспериментальных исследований ПЭМИ двух СВТ: ноутбука и платы монитора, с использованием предлагаемого метода измерения тангенциальных компонент вектора напряжённости магнитного поля в ближней зоне (рис. 7а) на расстоянии $d = 3$ см, а также классического метода измерения в дальней зоне (рис. 7б).

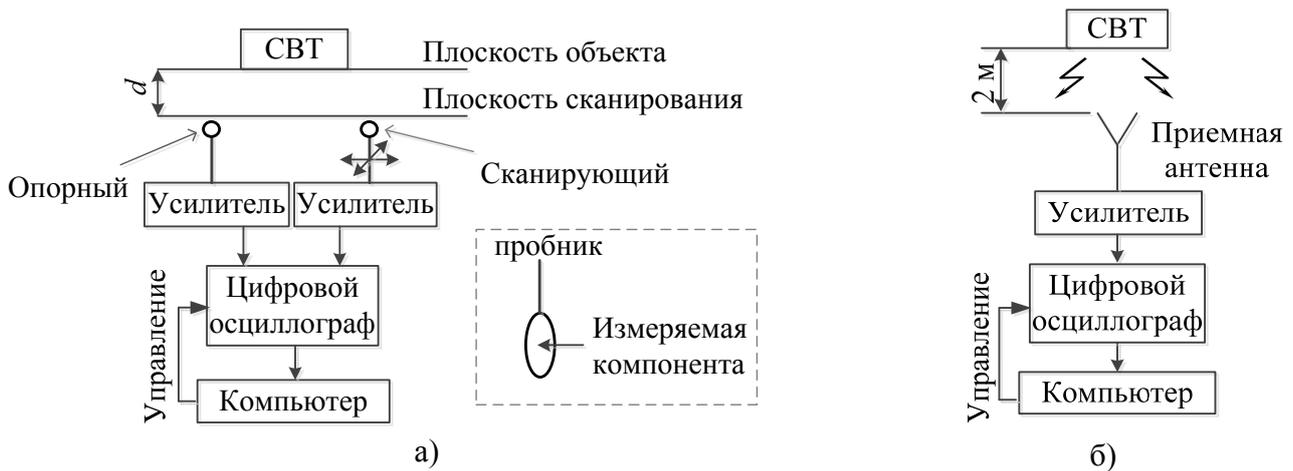


Рисунок 7 – Схема стэнда измерения ЭМИ ТС в ближней (а) и в дальней (б) зонах.

На рис. 8 представлен результат обработки ЭМИ ноутбука на двух частотах 32,37 МГц и 32,5 МГц.

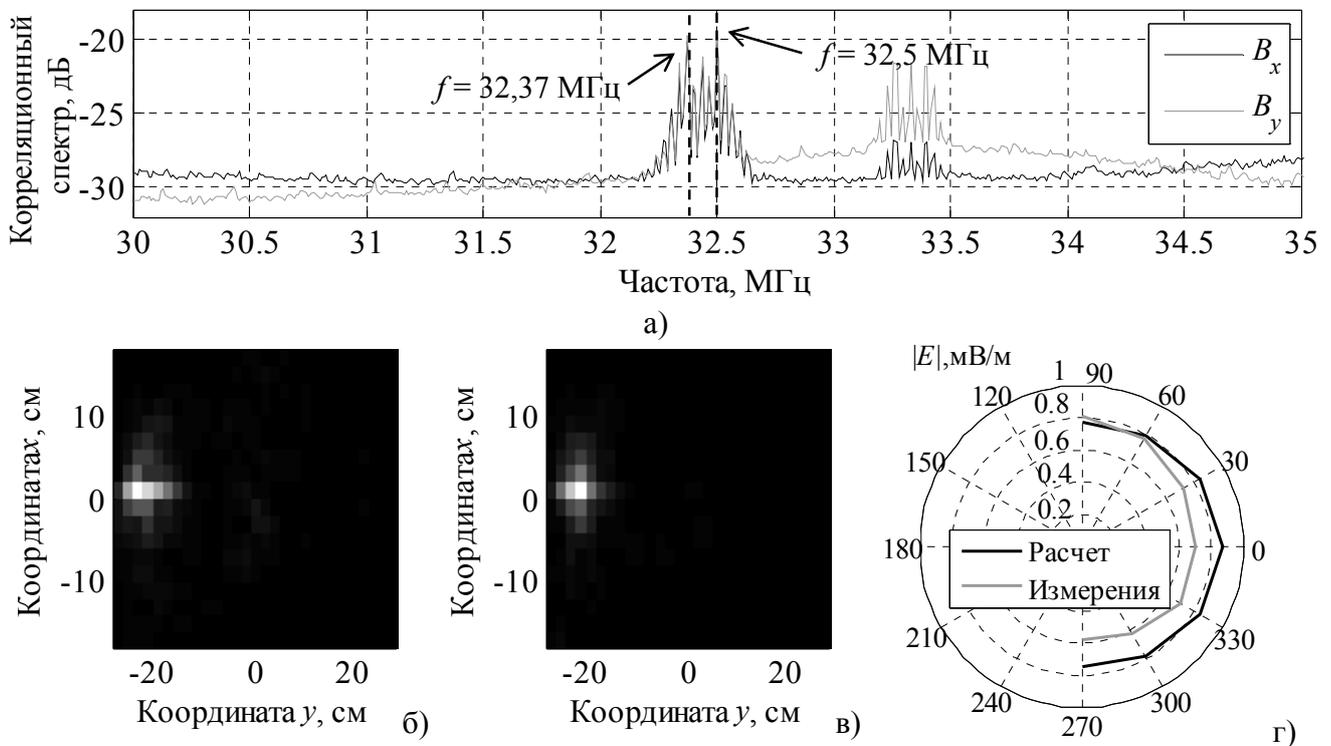


Рисунок 8 – Корреляционные спектры двух тангенциальных компонент ЭМИ (а), распределение дипольных моментов в плоскости объекта на частотах 32,37 МГц (б) и 32,5 МГц (в) и сечение диаграммы напряженности электрического поля на частоте 32,5 МГц (г).

Взаимно-корреляционные спектры сигналов в двух пробниках для тангенциальных компонент магнитного поля (рисунок 8а)) показывают, что излучение в полосе 32,3 – 32,6 МГц формируется одним информационным сигналом, на разных частотах которого может быть получено одно и то же распределение дипольных моментов (рис. 8 б) и 8 в)), характеризующее его источник.

На рисунке 8г) представлена диаграмма напряжённости электрического поля на частоте 32,5 МГц для разных ракурсов на расстоянии 2 м от СВТ, измеренная в дальней зоне (рисунок 7б), в сравнении с результатами расчёта с использованием алгоритма, рассмотренного в главе 4, которая демонстрирует согласование полученных зависимостей с точностью 10%.

На рис. 9 представлены результаты исследования ПЭМИ ноутбука на трёх частотах 468 МГц и 534,6 МГц и 601,5 МГц, принадлежащих трём эквидистантным компонентам спектра его излучения (рис. 9а).

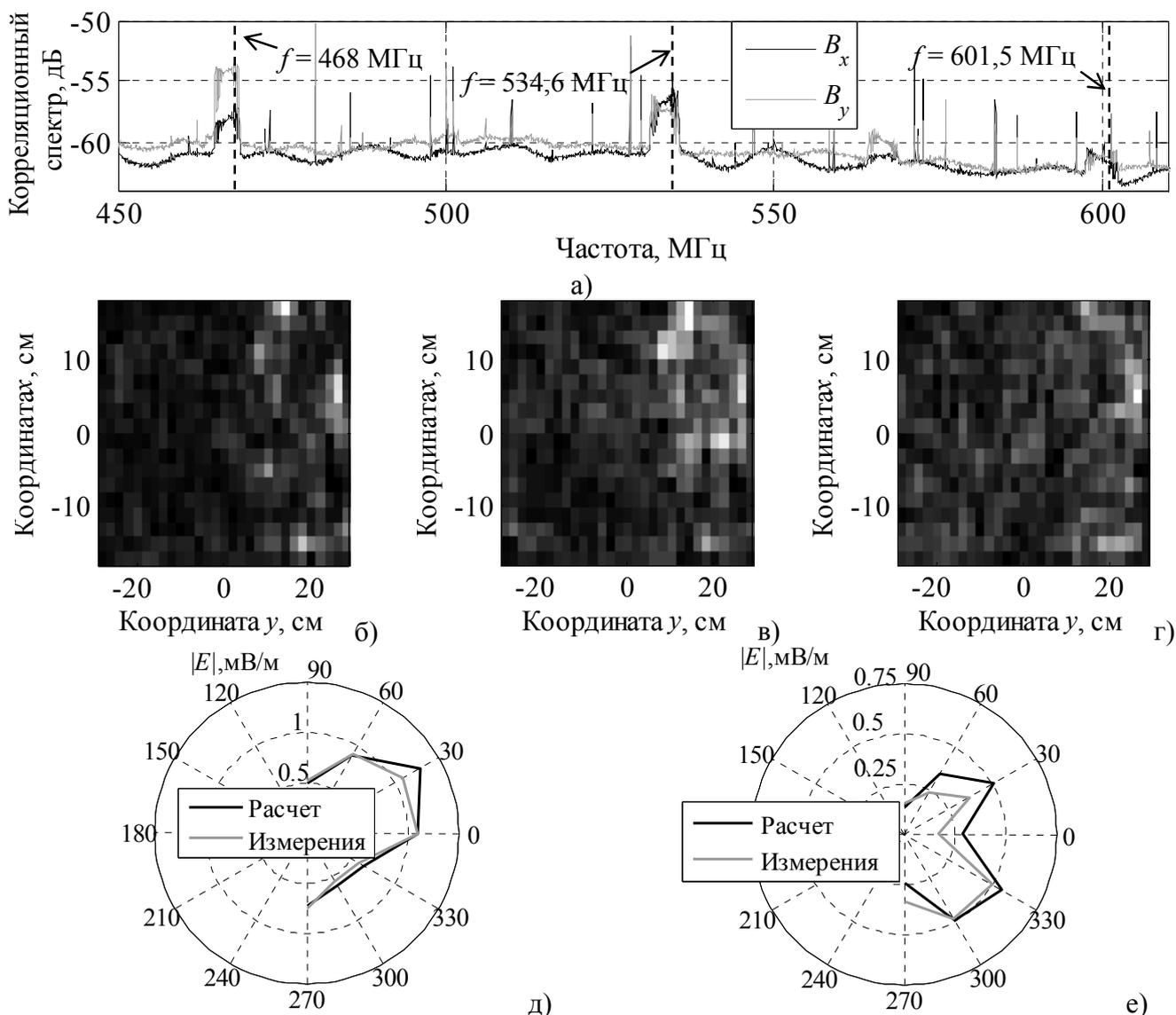


Рисунок 9 – Корреляционные спектры двух тангенциальных компонент ЭМИ ноутбука (а); распределение дипольных моментов в плоскости объекта на частотах 468 МГц (б), 534,6 МГц (в) и 601,5 МГц (г) и сечения диаграммы напряжённости электрического поля на частотах 534,6 МГц (д) и 601,5 МГц (е).

Из рис. 9 б) – г) следует, что ПЭМИ на рассматриваемых частотах формируется одним источником, распределённым по поверхности ноутбука. Наиболее

чёткая картина распределения источников наблюдается на частоте 534,6 МГц, поскольку обе тангенциальные компоненты ЭМИ в корреляционном спектре существенно превышают уровень шумов и помех.

Представленные на рис. 9 д) и 9 е) экспериментальные и расчетные зависимости напряженности электрического поля от ракурса ТС на частотах 534,6 МГц и 601,5 МГц одного информационного излучения имеют ярко выраженные направленные свойства, и также демонстрируют высокую согласованность по форме и по уровням.

Для иллюстрации процедуры параметрической идентификации эффективных источников была проведена обработка ЭМИ платы монитора на частоте 80 МГц, формируемого центральным процессором, расположенным в середине платы. График информационного критерия MDL (рис. 10а)) показывает, что количество эффективных источников, формирующих ПЭМИ на этой частоте равно 17. На рис. 10б) представлено распределение тангенциальной составляющей дипольных моментов эквивалентной модели, а также распределение эффективных источников, полученных с помощью параметрической идентификации.

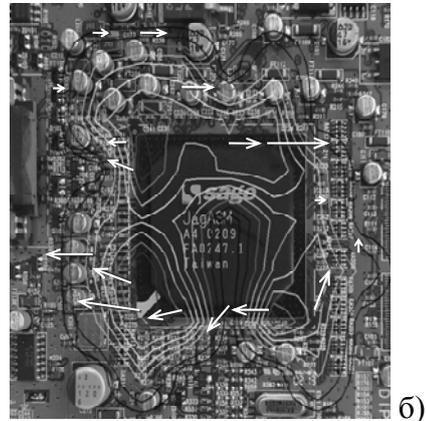
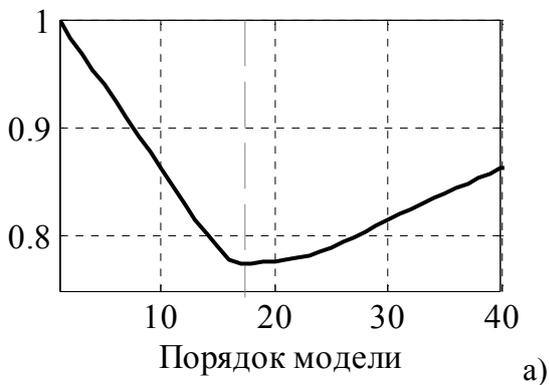


Рисунок 10 – Параметрическая идентификация эффективных источников ЭМИ платы монитора на частоте 80 МГц: тангенциальная компонента пространственного корреляционного спектра ЭМИ (а); информационный критерий MDL (б); распределение дипольных моментов и результат параметрической идентификации (в).

Представленные в главе результаты экспериментальных исследований показали, что ПЭМИ СВТ обладает ярко выраженными направленными свойствами, которые определяются соотношением размеров его излучающей поверхности и длины волны и проявляются при увеличении площади источника и частоты излучения.

Представленный в главе расчёт временных затрат показал, что, время, затрачиваемое на проведение исследований ПЭМИ одного СВТ с размерами 50 см×30 см×3 см в диапазоне частот до 2 ГГц составляет: 20,7 мин при измерении в дальней зоне в частотной области; 5,2 мин при измерении в ближней зоне в частотной области; 2÷2,5 мин при измерении в ближней зоне во временной области.

Заключение

По результатам исследований, проведённых в рамках данной диссертации, получены следующие основные результаты:

1. Предложено использование метода измерений ПЭМИ в ближней зоне во временной области для контроля защищённости СВТ с целью повышения достоверности результатов, снижения временных затрат, а также требований к условиям проведения измерений и измерительной аппаратуре.

2. Предложена концепция построения системы измерения стохастических стационарных ПЭМИ СВТ в ближней зоне во временной области, реализующая принцип двухточечного плоского сканирования тангенциальных компонент магнитного поля.

3. Синтезирована модель формирования ПЭМИ СВТ, которая описывает характеристики излучения ТС в каждой точке пространства как произведение спектра тока, формирующего ПЭМИ, и частотной характеристики излучения устройства.

4. В качестве модели СВТ в диссертации предложена распределённая дипольная модель, описывающая ПЭМИ СВТ на каждой частоте как излучение одного информационного сигнала, распределённого в плоскости объекта.

5. Разработана процедура идентификации параметров модели распределённого информационного источника ЭМИ СВТ в плоскости объекта, основанная на вычислении и обработке пространственных взаимно-корреляционных спектров сигналов, измеренных в ближней зоне излучения.

6. Предложен алгоритм локализации эффективных источников информационного ЭМИ СВТ в плоскости объекта, основанный на параметрических методах спектрального оценивания и позволяющий снизить вычислительные затраты за счёт уменьшения порядка модели.

7. Реализована система измерений ЭМИ ТС в ближней зоне и проведена экспериментальная верификация предложенной методики исследования информационных стационарных стохастических ЭМИ СВТ путем сопоставления рассчитанных и измеренных пространственно-частотных характеристик излучения в дальней зоне, продемонстрировавшая высокую адекватность полученных результатов.

8. Проведен расчёт временных затрат на проведение исследований ПЭМИ одного СВТ с целью контроля его защищённости от утечки информации, который показал, что предложенная концепция построения системы измерения ПЭМИ СВТ в ближней зоне во временной области позволяет сократить временные затраты в 8–10 раз по сравнению с измерениями в дальней зоне в частотной области и в 2–2,5 раза по сравнению с измерениями в ближней зоне в частотной области.

Публикации по теме диссертации:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2013612093 от 20.12.2012 г., «Программа моделирования параметрической идентификации радиолокационного изображения объектов», автор Горбунова А.А.

2. M. Konovalyuk, A. Gorbunova, A. Baev, Y. Kuznetsov, “Parametric reconstruction of radar image based on Multi-point Scattering Model”, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2014, First View Article, pp. 1–6.

3. Горбунова А.А., Локализация источников широкополосного стохастического электромагнитного излучения по результатам измерений в ближней зоне // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – № 1. – С. 25–32.

4. Горбунова А.А., Алгоритм пространственной локализации источников стохастического электромагнитного излучения по результатам двухточечного сканирования в ближней зоне // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. – № 73. – С. 1–23.

5. Горбунова А.А., Коновалюк М.А., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Модель электромагнитных излучений проводных интерфейсов передачи данных средств вычислительной техники // Специальная техника. – 2013. – № 5. – С.

26–36.

6. Горбунова А.А., Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплексному радиолокационному изображению // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2011. – № 45. – С. 1–21.

7. Горбунова А.А., Алгоритм пространственной локализации источников стохастического электромагнитного излучения по результатам двухточечного сканирования в ближней зоне // 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2013», М.: МАИ, 2013, с. 449–450.

8. Горбунова А.А., Локализация источников широкополосного стохастического электромагнитного излучения по результатам измерений в ближней зоне // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике-2013», М.: МАИ, 2013, с. 220–221.

9. Горбунова А.А., Оценка параметров источников стохастического электромагнитного излучения в составе технических средств // 15-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA), Москва, 2013, с. 341–347.

10. A. Gorbunova, A. Baev, M. Konovalyuk, Y. Kuznetsov, J.A. Russer, A. Gorbunova, A. Baev, M. Konovalyuk, Y. Kuznetsov, J.A. Russer, “Stochastic EMI Sources Localization Algorithm Based on Time Domain Planar Near-Field Scanning”, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2013, pp. 972–976.

11. A. Baev, A. Gorbunova, M. Konovalyuk, J.A. Russer, Y. Kuznetsov, “Planar stochastic sources localization algorithm in EMC problems”, *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2013, pp. 440–443.

12. M. Konovalyuk, A. Baev, A. Gorbunova, Y. Kuznetsov, J.A. Russer, “Stochastic EMI Sources Localization Based on Ultra Wide Band Near-Field Measurements”, *European Microwave Conference (EuMC)*, 2013, pp. 1131–1134.

13. Горбунова А.А., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Коновалюк М.А., Определение параметров источников широкополосного стохастического электромагнитного излучения по результатам измерений в ближней зоне // 1-я Всероссийская Микроволновая конференция, М., 2013, с. 1.

14. Y. Kuznetsov, A. Gorbunova, A. Baev, “System identification procedure in

microwave structure modeling applications”, *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2012, pp. 566–569.

15. Коновалюк М.А., Горбунова А.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Вторичная обработка комплексных изображений для идентификации многоточечных объектов // 5-я всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», М.: ИРЭ РАН, 2011, с. 1–3.

16. Горбунова А.А., Кузнецов Ю.В., Определение порядка модели доплеровского спектра цели // 12-я международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка и её применение», М.: РНТОРЭС, 2010, с. 6–9.

17. A. Gorbunova, Y. Kuznetsov, “Model Order Selection of the Target Doppler Spectrum”, *18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)*, 2010, pp. 1–4.

18. Горбунова А.А., Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплексному радиолокационному изображению // II-ой межотраслевой молодёжный научно-технический форум, М.: ВВЦ, 2010, с. 1.

19. Горбунова А.А., Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Алгоритм извлечения информации из комплексного радиолокационного изображения сложной цели // 4-я всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», М.: ИРЭ РАН, 2010, с. 175–179.