

Машкин Сергей Викторович

**МЕТОД МАГНИТНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ВИДЕНИЯ  
И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ижевск – 2012

Работа выполнена на кафедре компьютерных систем и телекоммуникаций  
ФГБОУВПО “Пермский государственный национальный исследовательский  
университет”

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор  
Марценюк Михаил Андреевич

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Сметанин Анатолий Михайлович

Кандидат физико-математических наук  
Дроздов Александр Юрьевич

**Ведущая организация:** ФГАОУ “УрФУ имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина”

Защита состоится «11» мая 2012 г. в 15.00 часов в ауд. № 2, корп. 4 на  
заседании диссертационного совета ДМ 212.275.03 в Удмуртском  
государственном университете по адресу: 426034, г. Ижевск,  
ул. Университетская, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского  
государственного университета

Автореферат разослан « 10 » апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент

Крылов П.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

В последнее время активно развиваются системы компьютерного видения (КВ). В большинстве систем КВ основным переносчиком информации являются видимое, инфракрасное или рентгеновское излучение и ультразвук. Если в качестве переносчика информации используется магнитное поле, получим систему *магнитного компьютерного видения (МКВ)*.

Системы МКВ, соответствующие “видению”, дают возможность дистанционно измерять не только пространственное положение объектов, но и определять ориентацию их магнитных моментов, что значительно повышает информативность систем МКВ по сравнению с системами КВ. Это свойство МКВ используется для решения различных прикладных задач: управления манипуляторами, локации роботов, эндоскопии и др. В большинстве перечисленных случаев интерпретация данных измерений требует решения обратной задачи для точечного диполя (ОЗД), которая заключается в восстановлении местоположения и других параметров наблюдаемого диполя по данным измерений создаваемого им поля.

В настоящее время системы МКВ, и особенно их практические приложения, активно исследуются у нас в стране и за рубежом. Однако остаются не решенными следующие проблемы: отсутствует метод решения ОЗД по дискретному набору точек, произвольно расположенных в области измерения; не произведен детальный учёт погрешностей, влияющих на точность решения ОЗД; не предложен алгоритм, позволяющий решить ОЗД в так называемой “нулевой” плоскости (плоскости, содержащей диполь и перпендикулярной ему).

Целью работы является исследование возможных приложений систем МКВ для физических измерений. Это требует тщательного анализа метода обработки и интерпретации данных измерения компонент магнитного поля, создаваемого наблюдаемым объектом, установления размеров области чувствительности, выяснения точности измерений пространственных координат и других параметров. В качестве модели источника поля в работе рассматриваются точечные магнитные диполи. Поэтому в основе предлагаемого метода МКВ лежит решение обратной задачи для одного (ОЗД) или нескольких (ОЗД-N) точечных магнитных диполей.

### Задачи работы:

- Разработка метода и алгоритма решения ОЗД и ОЗД-N по данным измерения компонент вектора индукции поля в дискретном наборе конечного числа точек, расположенных в компактной и относительно малой, по сравнению с расстоянием до диполя, области.
- Создание экспериментального аппаратно-программного комплекса (АПК-МКВ) для натурного моделирования и оценки возможностей системы МКВ, основанной на методах решения ОЗД и ОЗД-N.
- Создание пакета программ для проектирования систем МКВ (ППМКВ), позволяющего оценить возможности разрабатываемой системы МКВ.
- Исследование посредством ППМКВ влияния основных технических параметров системы МКВ на возможности этой системы по решению задач МКВ.
- Компьютерное и натурное моделирование некоторых приложений системы МКВ, таких как дистанционный бесконтактный измеритель магнитного момента дипольных источников, датчик положения и ориентации объекта, плоский и

объёмный дигитайзеры, навигация автономного агента, обнаружение и идентификация объектов из магнитных материалов по наведённому магнитному полю, измеритель деформации.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- Предложен метод и разработан алгоритм решения ОЗД по данным измерения компонент вектора индукции магнитного поля в дискретном наборе конечного числа точек, расположенных в малой, по сравнению с расстоянием до диполя, области. На основе этого метода также предложен метод и разработан алгоритм решения ОЗД-N;
- Создана действующая физическая модель системы МКВ (АПК-МКВ) и с ее помощью получены результаты экспериментов, подтверждающие правильность предложенных методов и разработанных алгоритмов решения ОЗД и ОЗД-N и основанных на них приложений МКВ: дистанционного измерения магнитного момента, 5D-локации, навигации автономного агента, обнаружения и измерения параметров объектов из магнитных материалов, бесконтактного измерения деформаций;
- Создан пакет программ ППМКВ, основанный на разработанных алгоритмах решения ОЗД и ОЗД-N и предназначенный для предварительной оценки возможностей систем МКВ при решении практических задач.
- На основе экспериментальных данных и численного моделирования произведена оценка влияния основных технических параметров системы МКВ (чувствительность датчиков, количество и расположение датчиков в пространстве, величина шума измерений) на возможности этой системы по решению задач МКВ (точность определения местоположения и магнитного момента источника, размеры области видимости источника и области действия системы).

**Автором выносятся на защиту:**

- Метод и алгоритм решения ОЗД по данным измерения компонент вектора индукции поля в дискретном наборе конечного числа точек, расположенных в компактной (по сравнению с расстоянием до диполя) области, и, основанный на нём, метод и алгоритм решения ОЗД-N;
- Разработка и создание действующего экспериментального макета системы МКВ и результаты исследования его основных характеристик;
- Разработка и создание пакета программ (ППМКВ), основанного на алгоритмах решения ОЗД и ОЗД-N и результатах испытаний АПК-МКВ. Пакет предназначен для предварительной оценки возможностей систем МКВ и компьютерного моделирования их работы;
- Результаты компьютерных и натуральных экспериментов по моделированию некоторых приложений системы МКВ: дистанционного измерения магнитного момента; задачи 5D-локации; дигитайзера плоских и объёмных объектов; системы навигации автономного агента; системы обнаружения и идентификации объектов из магнитных материалов по наведенному магнитному полю; системы измерения деформаций;
- Результаты исследования влияния основных технических параметров системы МКВ, таких как чувствительность датчиков, их число и расположение в пространстве, величина шума измерений на возможности систем МКВ решения поставленных задач, таких как точность определения местоположения, величины и ориентации магнитного момента источника, размеры области видимости источника и области действия системы.

### **Апробация результатов работы**

Результаты исследований и экспериментов докладывались на конференции молодых учёных “Неравновесные процессы в сплошных средах”, (Пермь, 26-27 дек. 2003 г.); международной научно-практической конференции “Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики” (30 сентября 2005 г.) Новочеркасск; международной научно-практической конференции “Компьютерное моделирование 2007” (22 июня 2007 г.), СПбГПУ, Санкт-Петербург; международной научно-практической конференции “Компьютерное моделирование 2009” (23-24 июля 2009 г.), СПбГПУ, Санкт-Петербург; всероссийской конференции “Необратимые процессы в природе и технике”, МГТУ им. Баумана, Москва (26-28 января 2011 г.). Материалы работы неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах кафедры компьютерных систем и телекоммуникаций ПГУ (г. Пермь).

На программные реализации алгоритмов решения ОЗД и ОЗД-N получены свидетельства о регистрации программ [6,13]. Доклад на 10-ой международной научно-технической конференции “Компьютерное моделирование 2009” (Санкт-Петербург, 23-24 июля 2009 г.) был отмечен грамотой.

### **Достоверность результатов**

Работоспособность и применимость разработанных методов подтверждена в ходе численного и натурального моделирования и сравнением соответствующих результатов между собой с учётом анализа погрешностей измерений.

### **Публикации**

Материалы, отражающие основное содержание диссертации, опубликованы в семи статьях [2,3,4,9,7,12,14], одна из которых [9] в журнале, входящем в перечень ВАК, трёх тезисах докладов конференции [1,5,10], одном учебно-методическом пособии к лабораторной работе [8]. Кроме того, имеется 2 свидетельства о регистрации программного комплекса системы МКВ [6,13], подано 2 заявки в РОСПАТЕНТ на регистрацию способов и установок приложений систем МКВ - на момент представления диссертации эти заявки проходят экспертную оценку.

### **Личный вклад автора**

Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами. Разработка АПК-МКВ, пакета ППМКВ, а также большинство результатов натуральных экспериментов и численных расчётов выполнены соискателем самостоятельно.

### **Практическая ценность**

Результаты, полученные в ходе численного и натурального моделирования, а также рекомендации, сформулированные на их основе, могут быть использованы при построении систем МКВ, которые расширят приборный инструментарий экспериментальной физики.

На основе метода решения ОЗД были экспериментально апробированы следующие практические приложения: система магнитной локации (также может служить основой для 5D-манипуляторов, систем определения положения кончика катетера при инвазивном медицинском обследовании), дистанционный измеритель магнитного момента дипольных источников, система навигации автономного агента, 2D- и 3D- дигитайзеры, система обнаружения и идентификации объектов из магнитных материалов по наведенному магнитному полю. Метод решения ОЗД-N может быть использован при создании систем бесконтактного измерения деформации.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, включающего обзор литературы, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы (115 наименований) и приложений. Общий объём диссертации составляет 200 страниц, включая 98 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** вводится понятие магнитного компьютерного видения (МКВ). Кратко рассматриваются области применения систем МКВ и близких к ним средств измерений. Описываются цели и задачи работы, обосновывается актуальность работы. Также приводится краткое содержание работы.

**В первой главе** понятие МКВ рассматривается в более развёрнутом виде. МКВ отличается от “обычного” компьютерного видения (КВ) тем, что в качестве переносчика информации используется не световое излучение, а магнитное поле; в качестве датчика выступает не фотоматрица, а система датчиков магнитного поля; объект наблюдения является источником магнитного поля.

Также обсуждается понятие “видения”, которое заключается в том, что характерный размер получаемого “изображения” много меньше расстояния от датчика до объекта.

Главной целью МКВ является определение местоположения и других параметров источника по данным измерения создаваемого им магнитного поля. Подчёркивается, что в данной работе решается частный (но наиболее важный) случай этой задачи, в котором предполагается, что объектом наблюдения является точечный магнитный диполь. Решаемая задача, соответственно, является обратной задачей для точечного магнитного диполя (ОЗД).

Далее рассматриваются существующие средства и методы измерения магнитных полей - с точки зрения применения их в системах МКВ. В частности показано, что для решения задач МКВ в случае постоянного магнитного поля лучше всего подходят датчики Холла, магниторезистивные и ферромагнитные датчики.

Большую часть первой главы занимает обзор существующих систем измерения физических величин, в которых магнитное поле является переносчиком информации. Эти системы используются в таких приложениях, как магнитная интроскопия, магнитный поиск, магнитная энцефалография и кардиография, магнитное позиционирование (локация). Дается описание этих систем и приложений с точки зрения МКВ, при этом наибольшее внимание уделяется используемым в этих системах средствам и методам решения обратных задач. В частности показано, что во многих реализациях систем, близких к системам МКВ, имеет место решение ОЗД. При этом, для регуляризации этой обратной задачи также как и в данной работе делается предположение о типе (модели) наблюдаемого источника поля.

Решение ОЗД чаще всего основано на составлении и решении систем нелинейных уравнений, связывающих данные измерений в дискретном наборе точек и неизвестные параметры источника в соответствии с дипольной моделью поля этого источника. Показано, что данный метод не всегда сходится к приемлемому решению.

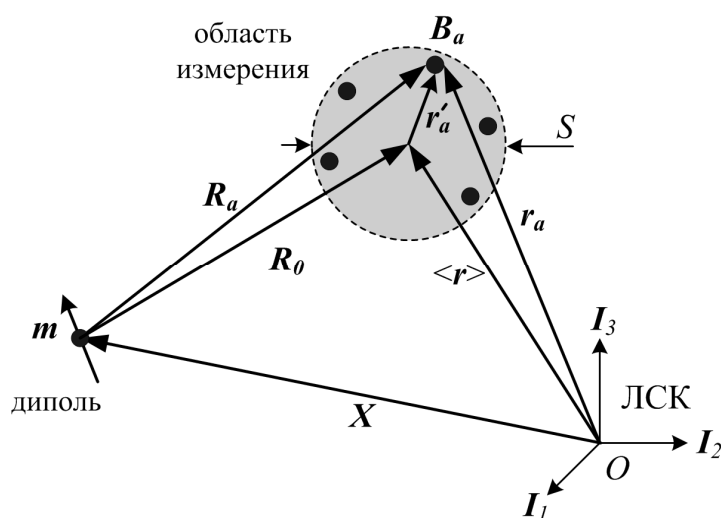
Другим основным подходом к решению ОЗД является использование соотношения между полем и тензором его градиента, что подразумевает необходимость измерения градиента с высокой точностью. На практике для вычисления градиента используют либо соответствующий аппаратный датчик, либо метод, когда численная оценка тензора градиента производится по данным измерения вектора индукции поля в специально выбранных точках измерения. Следует также отметить, что многие авторы не рассматривают особенность решения в так называемой “нулевой” плоскости (плоскости, содержащей диполь и перпендикулярной ему) – в этой плоскости определитель тензора градиента поля обращается в нуль и, соответственно, решение не может быть найдено обычным способом.

В заключительном разделе первой главы очерчивается область применения метода МКВ, предлагаемого в данной работе, даются рекомендации по выбору датчиков магнитного поля для построения систем МКВ.

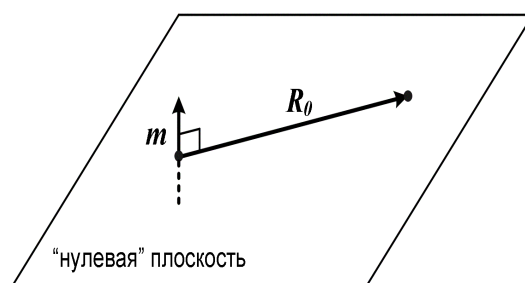
**Во второй главе** рассматриваются предлагаемый метод и разработанный алгоритм решения ОЗД, основанные на нём метод и алгоритм решения обратной задачи для нескольких слабо взаимодействующих магнитных диполей (ОЗД-N). Также рассматриваются погрешности, имеющие место при решении ОЗД, некоторые частные случаи решения ОЗД. В заключение указывается на принципиальную возможность распространения методов МКВ на случаи немагнитных физических полей.

В первом разделе второй главы формулируется ОЗД.

Точечный магнитный диполь  $\mathbf{m}$  (рис. 1) расположен в точке  $X$  лабораторной системы координат (ЛСК). Он создаёт вокруг себя статическое магнитное поле  $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ . Цель решения ОЗД заключается в том, чтобы определить пространственные координаты  $X$ , задающие положение диполя, а также величину и ориентацию его магнитного момента  $\mathbf{m}$  по данным измерения создаваемого им магнитного поля  $\mathbf{B}(\mathbf{r}_a)$  в  $N$  точках пространства  $\mathbf{r}_a$  ( $a=1, \dots, N$ ), при этом считается, что область измерения поля имеет характерный размер  $S$ , много меньший, чем расстояние  $R_0 = |\mathbf{R}_0|$  до диполя:  $S \ll R_0$ .



**Рис. 1.** Обратная задача для точечного магнитного диполя



**Рис. 2.** “Нулевая плоскость”

Предлагается решение ОЗД на основе метода наименьших квадратов и соотношениях между полем и его производными.

1. Выбирается модель источника (в рамках данной работы - дипольная), создающего поле в точке наблюдения  $\mathbf{R}_a$ :

$$B_{ak} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{R_a^5} \cdot \left[ 3R_{ak} (m_j R_{aj}) - R_a^2 m_k \right], \quad a = 1, \dots, N \quad (1)$$

2. Производится разложение поля (1) в степенной ряд в окрестности центра области измерения  $\mathbf{R}_0$ :

$$B_{ak} \equiv B_k(\mathbf{R}_0 + \mathbf{r}'_a) \approx B_k(\mathbf{R}_0) + \left. \frac{\partial B_k(\mathbf{R}_a)}{\partial R_{ai}} \right|_{\mathbf{R}_a=\mathbf{R}_0} \cdot r'_{ai} + \frac{1}{2} \cdot \left. \frac{\partial^2 B_k(\mathbf{R}_a)}{\partial R_{ai} \partial R_{aj}} \right|_{\mathbf{R}_a=\mathbf{R}_0} \cdot r'_{ai} \cdot r'_{aj} + \dots \quad (2)$$

3. Делается предположение относительно модели измеряемого поля (выбирается аппроксимация поля требуемого порядка):

$$B_{ak} = B_{0k} + T_{ki} \cdot r'_{ai} + Q_{kij} \cdot r'_{ai} \cdot r'_{aj} + \dots \quad (3)$$

Здесь  $B_{0k}$ ,  $T_{ki}$ ,  $Q_{kij}$  не зависят от номера  $a$  точки измерения. Эти тензоры находят по данным измерения поля  $\{B_{ak}\}$  методом наименьших квадратов.

4. Как можно убедиться, сопоставляя между собой выражения (2) и (3), между производными поля имеет место соотношение

$$T_{ki} R_{0i} = -3 \cdot B_{0k}, \quad (4)$$

$$Q_{kij} R_{0j} = -2 \cdot T_{ki}. \quad (5)$$

5. Соотношения (4), (5), (4) и (5) образуют систему уравнений, из которой можно найти искомые величины  $R_{0k}$  и  $m_k$ , значения которых и являются целью решения ОЗД.

В 3D-случае решение имеет особенность в так называемой “нулевой” плоскости, т.е. плоскости, перпендикулярной вектору диполя  $\mathbf{m}$  и проходящей через его центр (Рис.2). В этой плоскости или вблизи неё определитель тензора  $\mathbf{T}$  близок к нулю, поэтому система уравнений (4) близка к вырожденной, а значит, ее решение не существует или неустойчиво. Для преодоления указанной особенности решения предлагается три способа.

Первый заключается в совместном использовании соотношений (4) и (5) между производными поля. Недостатком этого способа является необходимость использовать производные поля высоких порядков, что на практике трудно сделать с достаточной точностью.

Второй способ заключается в использовании “специальное” решения в окрестности “нулевой” плоскости. Этот способ требует ввода критерия перехода в “нулевую” плоскость. В качестве такого критерия предлагается использовать априорный параметр  $\Omega$ :

$$\Omega \equiv |\det \mathbf{T}| / \left( \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^3 |T_{ki}| \right)^3. \quad (6)$$

Если  $\Omega \leq \Omega_c$  ( $\Omega_c$  - некоторое пороговое значение), задача решается не “общим”, а “специальным” способом. Недостатком этого критерия является то,



что при наличии шумов измерения трудно точно определить значение  $\Omega$ , а значит, критерий будет давать “сбой”.

Также предлагается использовать апостериорный критерий, который подразумевает одновременное решение ОЗД как “обычным” способом, так и “специальным” способом в окрестности “нулевой” плоскости. Из двух решений выбирается то, которое даёт меньшее отклонение поля от измеренного:

$$g = \frac{\sum_{a=1}^N |B_a^{(comp)} - B_a|}{\sum_{a=1}^N |B_a|}. \quad (7)$$

Здесь  $B_a^{(comp)}$  - поля, вычисленные в точках измерения для найденных в ходе решения ОЗД диполей “общим” и “специальным” способами.

Третий способ преодоления особенности “нулевой” плоскости заключается в определении  $R_0$  следующим образом:

Умножая соотношение (3) на  $R_0$  и подставляя (4) в полученное выражение, получаем находим:

$$(B_{ak} - B_{0k})R_{0k} \cong -3B_{0k} \cdot r'_{ak}. \quad (8)$$

Выражение (8) можно рассматривать как линейную связь между переменными  $B_{ak} - B_{0k}$  и  $r'_{ak}$ , где  $R_{0k}$  - пока неизвестные коэффициенты. При этом массивы значений  $B_{ak}$ ,  $r'_{ak} = r_{ak} - \langle r \rangle_k$  — известны (это результаты измерений), а  $B_{0k}$  равно среднему по точкам наблюдения от  $B_{ak}$ . Для неизвестного вектора  $R_{0k}$  после усреднения по массиву точек наблюдения получаем систему уравнений

$$\left[ \sum_a (B_{aj} - B_{0j})(B_{ak} - B_{0k}) \right] R_{0k} \cong -3 \left[ \sum_a (B_{aj} - B_{0j}) r'_{ak} \right] B_{0k}, \quad (9)$$

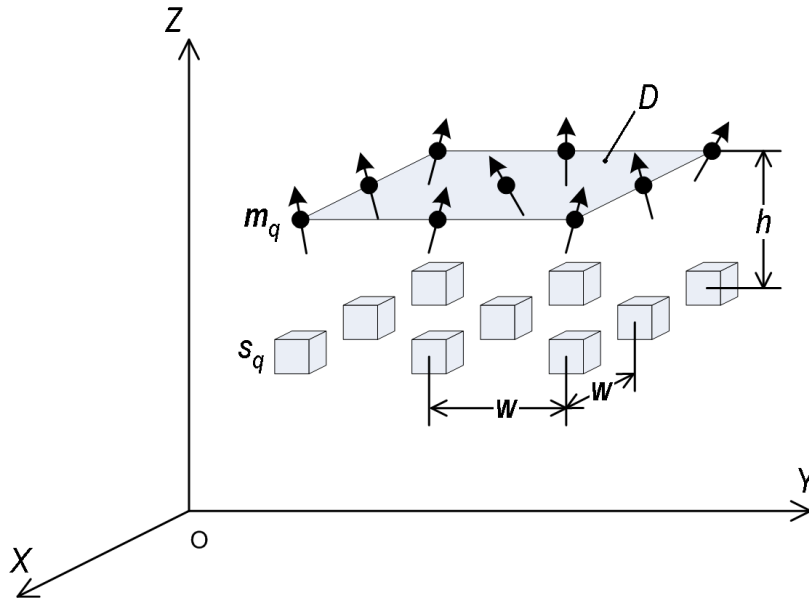
решение которой позволяет найти искомый вектор  $R_{0k}$ .

На основании всех приведённых рассуждений было построено множество модификаций алгоритма решения ОЗД в 3D-случае.

*Во втором разделе* главы рассматривается 2D-случай решения ОЗД, когда вектор магнитного момента  $m$  источника и его центр, а также все точки измерения лежат в одной плоскости. Показано, что в этом случае особенность “нулевой” плоскости отсутствует, а в остальном алгоритм решения задачи аналогичен 3D-варианту.

*В третьем разделе* рассматриваются основные виды погрешностей, возникающих при решении ОЗД (ошибки измерения, приближения и дискретизации); предлагаются различные методы оценки точности решения ОЗД по исходным данным измерений поля.

*В четвертом разделе* рассматривается метод решения ОЗД-N, которая формулируется следующим образом. Задана система произвольно ориентированных диполей  $m_q$ ,  $q = 1, 2, \dots, N$  (рис. 3), расположенных примерно в одной плоскости  $D$  с пространственным шагом  $w$ . Предположим также, что у всех диполей модули магнитных моментов  $|m_q|$  примерно одинаковы и направлены примерно нормально к  $D$ .



**Рис. 3.** Постановка ОЗД-N

Каждому диполю поставим в соответствие область измерения  $s_q$ , расположенную примерно под ним. Все области измерения находятся примерно в одной плоскости, отстоящей от плоскости диполей  $D$  на расстоянии  $h$ . Характерный размер областей измерения считаем достаточно малым (в отношении точности решения ОЗД). Предположим также, что расстояние  $h$  между диполем и соответствующей ему областью измерения меньше характерного расстояния  $w$  между диполями.

Данные предположения позволяют считать, что поле в некоторой области измерения  $s_p$  складывается из поля  $\mathbf{B}_p$  диполя  $\mathbf{m}_p$ , находящегося над этой областью, и полей  $\mathbf{B}_q$  соседних диполей  $\mathbf{m}_q$  ( $q \neq p$ ); при этом  $|\mathbf{B}_p| > \sum_{q \neq p} |\mathbf{B}_q|$ . Такой набор назовем *системой слабо взаимодействующих диполей*.

Процедура решения сформулированной ОЗД-N состоит в следующем.

1. Сначала по данным измерения магнитного поля  $\mathbf{B}_q$  для каждой пары диполь  $\mathbf{m}_q$  – область измерения  $s_q$  решается ОЗД и находится решение (нулевое приближение):  $\mathbf{m}_q^{(0)}$ ,  $\mathbf{X}_q^{(0)}$  – магнитный момент и местоположение диполя ( $q = 1, 2, \dots, N$ , где  $N$  – число диполей/областей измерения).

2. Далее, из индукции магнитного поля  $\mathbf{B}_q$ , измеренной в данной области измерения  $s_q$ , вычитаются вклады  $\mathbf{B}_p^{(0)}$  ( $q \neq p$ ) – индукции магнитных полей, создаваемых в данной области  $s_q$  всеми остальными диполями:

$$\mathbf{B}_q^{(1)} = \mathbf{B}_q - \sum_{p \neq q} \mathbf{B}_p^{(0)}. \quad (10)$$

Здесь величины  $\mathbf{B}_p^{(0)}$  вычисляются на основе модели поля точечного источника и найденных значений  $\mathbf{m}_q^{(0)}$ ,  $\mathbf{X}_q^{(0)}$ .

3. Полученные уточненные значения величин  $\mathbf{B}_q^{(1)}$  используются для повторного решения ОЗД для областей  $s_q$  и диполей  $\mathbf{m}_q$  (нахождение первого, второго и следующих приближений):  $\mathbf{m}_q^{(1)}$ ,  $\mathbf{X}_q^{(1)}$ . Можно ожидать, что после достаточного числа

итераций  $R$  решение  $m_q^{(R)}$ ,  $X_q^{(R)}$  приблизится к искомому решению задачи  $m_q^{(true)}$ ,  $X_q^{(true)}$ , что и было показано в дальнейшем.

В соответствии с предлагаемым методом был разработан алгоритм решения ОЗД-Н.

В заключение главы указывается на принципиальную возможность распространения методов МКВ на случаи немагнитных физических полей. В частности, на примере задачи о сфере, помещённой в однородное поле, показано, что разработанный метод решения ОЗД может использоваться не только в магнитных, но и тепловых, электрических, электротокowych системах поиска / интроскопии.

**Третья глава** состоит из двух основных разделов. В первом разделе приводятся описание и результаты натуральных испытаний созданного аппаратно-программного комплекса “система МКВ” (АПК-МКВ), предназначенного для проведения натуральных экспериментов по решению простейших задач МКВ. Во втором разделе главы приводится описание натуральных и компьютерных экспериментов, целью которых было показать работоспособность созданных методов и алгоритмов решения ОЗД и ОЗД-Н и оценить возможности разработанного макета системы МКВ при решении различных практических задач.

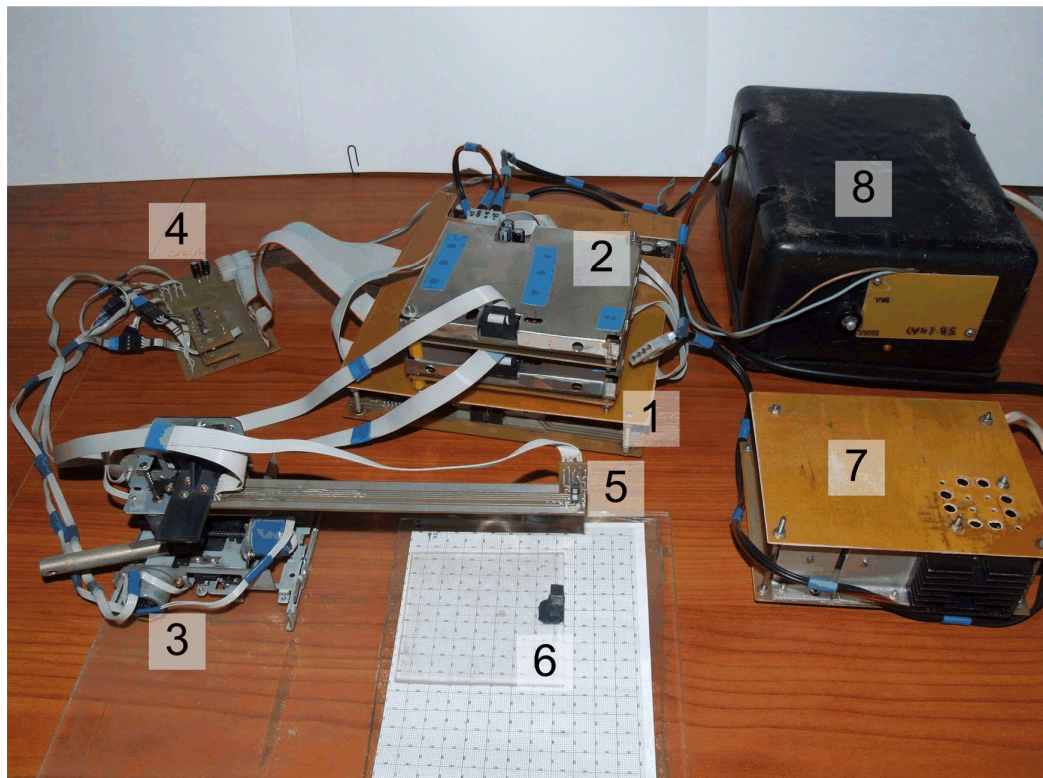
В соответствии с выработанными в первой главе требованиями к системам МКВ был построен АПК-МКВ, предназначенный для решения различных задач МКВ. Он позволяет в ручном и автоматическом режимах производить измерение неоднородных магнитных полей с высокой точностью и пространственным разрешением, накапливать и обрабатывать данные, самостоятельно их интерпретировать или передавать на персональный компьютер для дальнейшего анализа и обработки.

АПК-МКВ состоит из двух основных частей – аппаратной и программной. Аппаратная часть обеспечивает измерение (и генерацию) магнитного поля, усиление сигналов с датчиков и преобразование их в цифровой вид (подробная схема устройства представлена в приложении 1). Программная часть комплекса позволяет управлять аппаратной частью, производить накопление и обработку данных измерений, решать задачи МКВ.

АПК-МКВ обладает следующими основными характеристиками (при использовании магнитных датчиков 2SA-10 фирмы SENTRON):

- Область измерения поля: 15 x 15 x 15 мм;
- Малый чувствительный объём датчика магнитного поля: 0.2 мм;
- Высокое пространственное разрешение:  $\approx 0.095$  мм;
- Возможность измерять три компоненты поля в одной точке;
- Высокая линейность датчиков: нелинейность менее 0.2 %;
- Диапазон измеряемого поля:  $\pm 45$  мТл;
- Высокое разрешение по полю: порядка 2 мкТл.

Фотография АПК-МКВ представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Внешний вид системы МКВ: 1 – плата сбора и обработки информации; 2 – входные усилители; 3 – система позиционирования; 4 – плата управления системой позиционирования; 5 – датчики магнитного поля; 6 – источник магнитного поля (постоянный магнит); 7,8 – источники питания

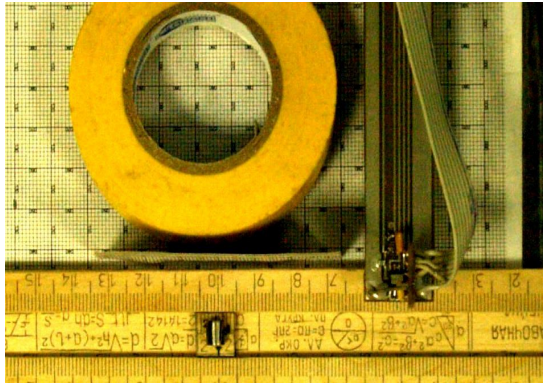
Программная часть комплекса состоит из двух частей: программы микроконтроллера главного модуля установки (“MCVS”) и Windows-приложения на персональном компьютере (“MCVS\_terminal”).

При выполнении работы посредством построенного АПК-МКВ были проведены натурные эксперименты по моделированию таких практических задач как дистанционное измерение магнитного момента; магнитное позиционирование; навигация автономного агента; магнитный дигитайзер; обнаружение и идентификация объектов по наведённому магнитному полю; измерение деформации.

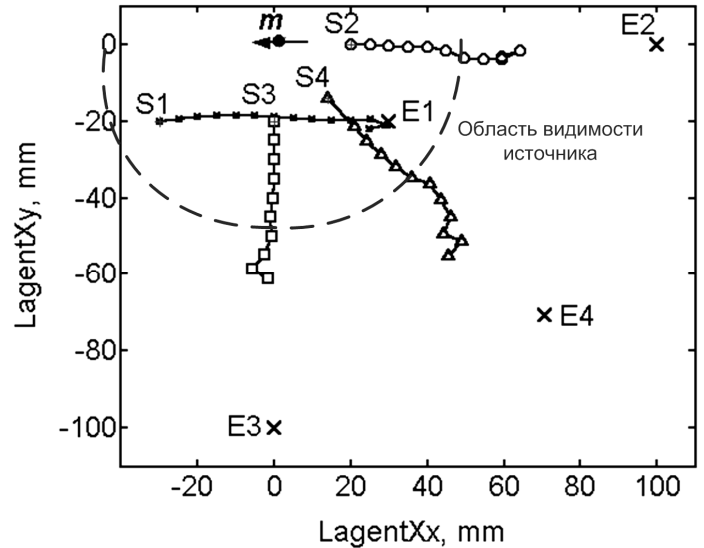
*Задачу магнитного позиционирования* можно сформулировать следующим образом. Имеется некоторый твердый объект из немагнитного материала. С этим объектом жестко связан точечный магнитный диполь (компактный постоянный магнит). Требуется, измеряя поле этого диполя, определить местоположение и, если необходимо, ориентацию искомого объекта.

В рамках данной работы было проведено два натурных эксперимента по решению задачи магнитной локации: (2+1)D и (3+2)D. “(2+1)D” означает, что определяется местоположение (2 декартовы координаты) и ориентация (1 угол, определяющий направление) объекта, перемещающегося по плоскости. “(3+2)D” означает, что определяется положение (3 декартовы координаты) и ориентация (2 угла) объекта в пространстве. Фото (3+2)D эксперимента представлено на рис. 5.

Радиус области видимости источника (цилиндрического магнита из материала NdFeB с магнитным моментом около  $0.108 \text{ A} \cdot \text{м}^2$ ) составил примерно 40 мм, ошибка определения местоположения не превысила 2 мм, а максимальная ошибка определения модуля вектора магнитного момента не превысила  $0.036 \text{ A} \cdot \text{м}^2$ .



**Рис. 5.** Фото эксперимента по моделированию  $(3+2)D$  локации

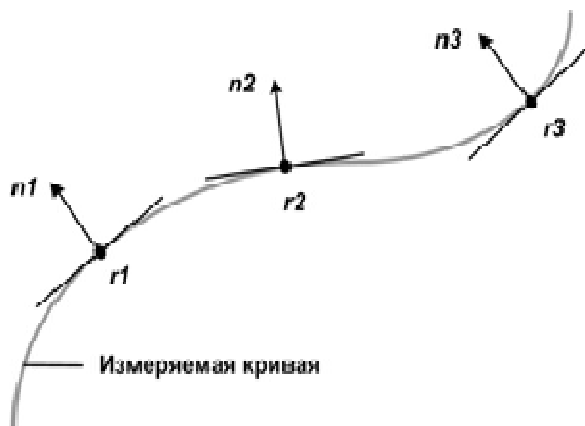


**Рис. 6.** Результаты натурного моделирования задачи навигации автономного агента.

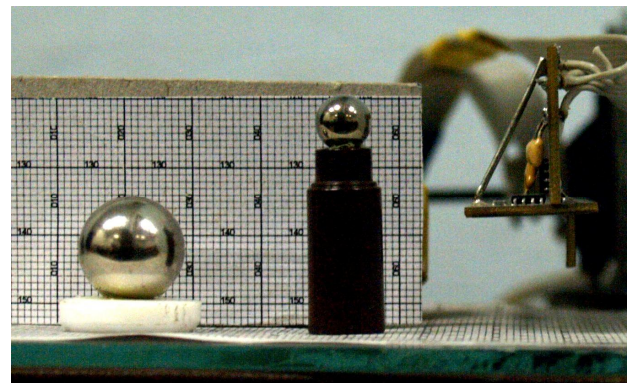
Задача дистанционного измерения магнитного момента заключается в том, чтобы при произвольном положении искомого дипольного источника поля определить значение вектора или модуля его магнитного момента. Эксперименты по моделированию этой задачи, по сути, совпадали с экспериментами 3D-магнитной локации, поэтому отдельно не рассматриваются.

Задача навигации автономного агента (Рис. 6) заключается в том, что он должен определить своё местоположение и ориентацию в лабораторной системе координат посредством измерения поля источника-ориентира  $m$ . Считается, что агенту известны положение, ориентация, величина магнитного момента источника в лабораторной системе координат. Ориентируясь в пространстве посредством системы МКВ, агент может перемещаться по заданной траектории из начальной точки  $S$  в конечную точку  $E$ .

В ходе натурного моделирования задачи 2D-навигации было показано, что агент может уверенно ориентироваться только в пределах области видимости ориентира.



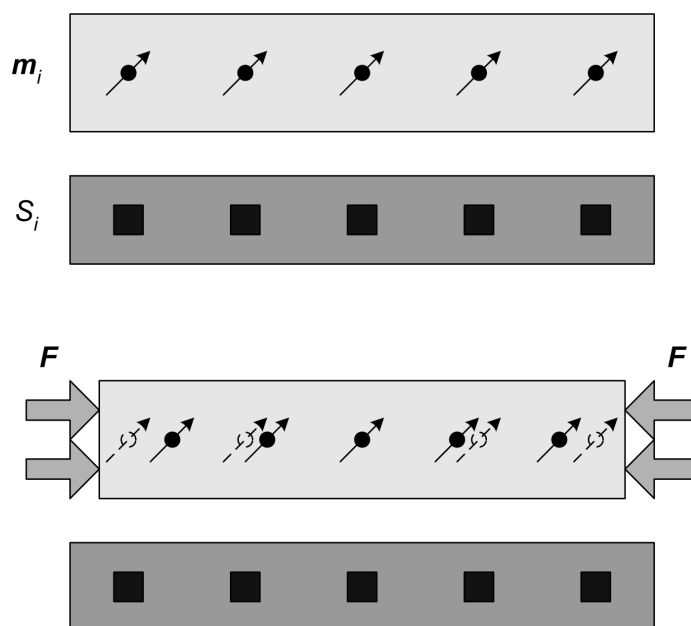
**Рис. 7.** Постановка задачи магнитного 2D-дигитайзера



**Рис. 8.** Определение местоположения ферромагнитного объекта по наведённому полю



Посредством натурального эксперимента также была решена (для 2D-случая) задача *магнитного дигитайзера*, которая состоит в оцифровке некоторой кривой (см. рис.7). Дополнительное знание об ориентации источника, перемещаемого вдоль искомой кривой, может быть использовано для уменьшения необходимого числа измерений.



**Рис. 9.** Измерение деформаций посредством системы МКВ (ОЗД-N).

$m_i$  – магнитные моменты диполей;  $S_i$  - области измерений, расположенные примерно напротив диполей;  $F$  – воздействие, вызывающее деформацию среды.

Также был проведён эксперимент по моделированию задачи *определения местоположения и параметров ферромагнитного объекта по наведённому магнитному полю*. Фотография эксперимента показана на рис. 8.

В заключение третьей главы посредством натурального эксперимента была продемонстрирована работоспособность предложенного метода решения ОЗД-N. Показано, каким образом данный метод может быть использован для реализации способа *измерения деформаций объектов из немагнитных материалов*.

Суть способа состоит в том, что набор диполей–магнитиков наклеивается на поверхность исследуемого объекта или внедряется в объем материала (рис. 9). Измеряя поле диполей в соответствующих им областях и решая по полученным данным ОЗД-N, можно определять положения и ориентации диполей до и после деформирования объекта, что позволяет определять параметры деформации.

**В четвертой главе** приводится описание разработанного автором пакета программ (ППМКВ), предназначенного для детального исследования предлагаемых методов и алгоритмов решения ОЗД, моделирования приложений МКВ, проектирования систем МКВ и оценки возможностей. Основное содержание главы состоит из описаний результатов численных экспериментов, демонстрирующих различные аспекты разработанных методов МКВ: зависимость точности определения координат и магнитного момента от взаимного расположения источника и области измерения, конфигурации точек измерения, размера области измерения, величины шума измерения, используемого порядка приближения поля и др. Детально была рассмотрена

особенность решения ОЗД в “нулевой” плоскости и показана работоспособность способов её преодоления. Листинг программы представлен в приложении 2.

Также была произведена численная оценка параметров системы МКВ, аналогичной по своим характеристикам установке АПК-МКВ. Результаты этой оценки согласуются с реальными данными.

В заключение приводятся результаты исследования метода решения ОЗД-N. В частности показано, что предложенный метод не сходится к решению при значениях  $h/w > 0.45$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Предложен метод и разработан алгоритм решения ОЗД по данным измерения вектора индукции поля в дискретном наборе точек, расположенных в относительно малой, по сравнению с расстоянием до диполя, области. Метод включает несколько вариантов преодоления особенности решения в “нулевой” плоскости. На основе данного метода также решена ОЗД-N и разработан соответствующий алгоритм.
- Создана действующая экспериментальная установка АПК-МКВ, предназначенная для натурального моделирования и оценки возможностей систем МКВ, основанных на методах решения ОЗД и ОЗД-N.
- Создан пакет программ ППКВ, предназначенный для проектирования систем МКВ и численного моделирования задач МКВ.
- Посредством ППКВ исследовано влияние основных технических параметров системы МКВ на возможности этой системы по решению задач МКВ. В частности продемонстрирована устойчивость метода решения ОЗД при наличии шумов измерения. Также определены границы устойчивости метода решения ОЗД-N
- Посредством численного и натурального моделирования исследована возможность использования системы МКВ для решения таких практических задач как дистанционное измерение магнитного момента дипольных источников, определение положения и ориентации объектов, оцифровка кривых и поверхностей, навигация автономного агента, обнаружение и определение параметров объектов из магнитных материалов по наведённому магнитному полю, бесконтактное измерение деформации.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Машкин С.В., Марценюк М.А.* Анализ температурных и магнитных полей с помощью магнитотепловых аналогий // Тез. докл. конф. мол. уч. “Неравновесные процессы в сплошных средах”. Пермь. 26, 27 дек. 2003 г. С 67 – 68.
2. *Марценюк М.А., Машкин С.В.* Моделирование системы магнитного компьютерного видения // Вестник Перм. ун-та. Физика. 2004. Вып. 1. С. 112 – 128.
3. *Машкин С.В.* Аппаратно программный комплекс магнитного компьютерного видения // Вестник Перм. ун-та. Инф. сист. и техн. 2005. Вып. 4. С. 66 – 80.
4. *Марценюк М.А., Машкин С.В., Селиверстов Е.В.* Моделирование навигации автономного агента посредством системы магнитного компьютерного видения // Вестник Перм. ун-та. Инф. сист. и техн. 2005. Вып. 4. С. 11 – 25.
5. *М.А. Марценюк, С.В. Машкин.* Навигация автономного агента посредством системы магнитного компьютерного видения. // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики. Материалы VI междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 30 сентября 2005 г. С.83-86

6. *Марценюк М.А., Машкин С.В.* Программный комплекс установки магнитного компьютерного видения (Magnetic Computer Vision System). // Свид-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610006. РОСПАТЕНТ.
7. *Марценюк М.А., Машкин С.В.* “Магнитное компьютерное видение: моделирование и физический эксперимент”. // “Компьютерное моделирование 2007” Тр. междунар. науч.-тех. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007 г. С.
8. *Марценюк М.А., Машкин С.В., Новиков С.В. и др.* Компьютерное зрение: Учебно методическое пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та. 2007. 215 с.
9. *Машкин С.В., Марценюк М.А.* “Метод измерения механических деформаций посредством системы магнитного компьютерного видения” // Науч.-тех. ведомости СПбГПУ. №4(88), 2009 С. 151-158
10. *Марценюк М.А., Машкин С.В.* “Решение обратной задачи для группы слабо взаимодействующих магнитных диполей”. // Тезисы X международной науч.-тех. конф. “Компьютерное моделирование 2009” СПбГПУ, 23-24 июня 2009 г. С.
11. *Сивков В.Г., Марценюк М.А., Машкин С.В.* Лабораторный практикум “Моделирование устройств записи и хранения информации” // Вестник Перм. ун-та. Инф. сист. и техн. 2010. Вып. 2. С. 11 – 25.
12. *Машкин С.В., Марценюк М.А.* Практические приложения системы магнитного компьютерного видения // Труды VI всероссийской конф. “Необратимые процессы в природе и технике”, г. Москва, 26-28 января 2011 г. Ч.2. С. 303 – 306.
13. *Марценюк М.А., Машкин С.В.* Программа для решения обратных задач для одного и нескольких слабо взаимодействующих точечных магнитных диполей // Свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616795. РОСПАТЕНТ.
14. *Машкин С.В., Марценюк М.А., Архангельский П.В.* Приложения системы магнитного компьютерного 3D-видения // Вестник Перм. ун-та. Инф. сист. и техн. 2011. Вып. 12 (38). С. 35 – 46.

Подписано в печать 06.04.2012. Формат 60x84/16

Усл. печ. л. 0.93. Тираж 100 экз. Заказ № 107.

Типография Пермского государственного национального  
исследовательского университета  
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.