

- ния угловых параметров железнодорожного пути // CHIP NEWS. — 2003. — № 6 (79). — С. 49—53.
4. Сапожников Е. А., Глазков М. А. Принципы построения аппаратного комплекса для динамических измерений локальных неоднородностей рабочей поверхности рельсов и методы их реализации. Научная сессия МИФИ-2009. Сборник научных трудов. В 6 томах. Том II. Ядерная физика и энергетика. — М.: НИЯУ МИФИ, 2009. — 236с.
5. TORNADO-E2/6xxx 2nd Generation Stand-alone DSP Controllers with Ultra-High Performance TI TMS320C6xxx DSP User's Guide, MicroLAB Systems, Ltd. <http://www.mlabsys.com/>

6. Глазков М. А., Кулешов П. Н. Комплекс контрольно-вычислительной аппаратуры скоростного вагона-путеизмерителя // CHIP NEWS. — 2006. — №2 (105). — С. 49—53.
7. Сапожников Е. А., Глазков М. А., Волченков Ю. В. Повышение точности и скоростных характеристик измерения угловых перемещений с использованием фазовых методов. Научная сессия МИФИ-2008. Сборник научных трудов. — М.: Электронные измерительные системы. — 2008. — Т. 13. — С. 131.

Работа выполнена на кафедре “Электронные измерительные системы” Научно-исследовательского ядерного университета (МИФИ).

Егор Александрович Сапожников — аспирант;
☎ 8-903-613-69-76
E-mail: egor_sapozhnikov@mail.ru

Михаил Анатольевич Глазков — ст. преподаватель, нач. отдела ЗАО “ПИК ПРОГРЕСС”;
☎ 8-916-675-37-13
E-mail: mail-mag@mail.ru

Валерий Викторович Масленников — д-р техн. наук, профессор;
☎ 8-905-587-22-13
E-mail: vmaslennikov@mail.ru

Дмитрий Алексеевич Сысоев — студент.
☎ 8-916-837-93-38
E-mail: sysoevd@gmail.com □

УДК 621.3.083.7:621.317.412

К содержанию

ПЕРВЫЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ МАГНИТНЫЙ ТРЕКЕР ДЛЯ ЦЕЛЕУКАЗАНИЯ¹

М. В. Желамский

Представлены результаты разработки отечественной технологии активного магнитного позиционирования подвижных объектов. Приведен состав и описана работа научного макета магнитного трекера, реализующего новый способ магнитного позиционирования. Показаны результаты физического запуска макетного образца. Сформулирован прогресс, достигнутый в области нацеленного применения магнитного трекера. Представлена текущая спецификация параметров, достигнутых на макетном образце.

Ключевые слова: магнитный трекер, позиционирование, шлем, координаты, генератор поля, подвижный приемник, направление взгляда, калибровка.

ВВЕДЕНИЕ

Активное магнитное позиционирование решает задачу определения линейного положения и ориентации подвижного объекта в реальном времени. Технология включает генерирование магнитного поля с известным пространственным распределением в зоне перемещения подвижного объекта, измерение компонент генерируемого поля подвижным приемником, жестко связанным с подвижным объектом, вычисление координат подвижного объекта путем сравнения измеренных значений компонент поля с вычисленными для предполагаемых координат с уточнением последних итерационной процедурой.

Трекер (от английского tracker) устройство позиционирования, представляющее собой прецизионную измерительно-вычислительную систему ре-

ального времени, служащую для нахождения шести координат подвижного объекта — трех линейных и трех углов Эйлера. Сложная и наукоемкая технология магнитного позиционирования возникла в США [1—4] во второй половине прошлого века. В России магнитные трекеры не производятся.

Основы зарубежного подхода и ход реализации отечественного проекта по созданию технологии магнитного позиционирования описаны в работах [5—16]. Оригинальный метод работы над проектом предложен в статье [17]. Первый результат по активному магнитному позиционированию в отечественной практике был представлен в работе [13], где рассмотрена базовая конфигурация магнитного трекера, используемая в дальнейшем.

В настоящей работе описаны результаты физического запуска первого отечественного магнитного трекера для задачи целеуказания, который реализует новый способ магнитного позиционирования, предложенный автором.

¹ Работа выполнена в рамках инициативного проекта “МАИ-ТЕХ” (Магнитные Инструментальные Технологии).

ИЗВЕСТНЫЕ МЕТОДЫ МАГНИТНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

До настоящего времени были известны два способа магнитного позиционирования: АС-позиционирование (alternating current) [1, 2], и DC-позиционирование (direct current) [3, 4], отличающиеся характером генерируемого магнитного поля. АС-метод построен на одновременном и непрерывном генерировании трех синусоидальных полей на разных частотах, DC-метод предполагает генерирование последовательности импульсных полей разной ориентации. Последний метод свободен от действия вихревых токов в окружающем интерьере, которые наводятся синусоидальным полем и ограничивают точность позиционирования.

На рис. 1 показано изменение токов, возбуждающих три ортогональные обмотки генератора импульсного магнитного поля. Видна пауза, когда все обмотки обесточены. Пауза необходима для измерения проекций магнитного поля Земли на подвижный приемник, которое векторно складывается с генерируемым рабочим полем, и последующей компенсации его влияния. Подвижный приемник содержит, как правило, три ортогональных измерителя индукции магнитного поля, которые выполняют измерения на вершине каждого импульса и во время паузы токов. Таким образом, за период работы системы набирается 12 измерений, которые поступают в вычислитель для определения координат подвижного приемника за специально предусмотренное время. Система работает в дискретно-периодическом режиме с фиксированной частотой замены выходных данных.

На рис. 2 приведена общая для всех методов схема магнитного трекера. Активная система магнитного позиционирования включает фиксированный генератор магнитного поля 1 (ГМП) и подвижный приемник 2 (УИП) закрепленный на

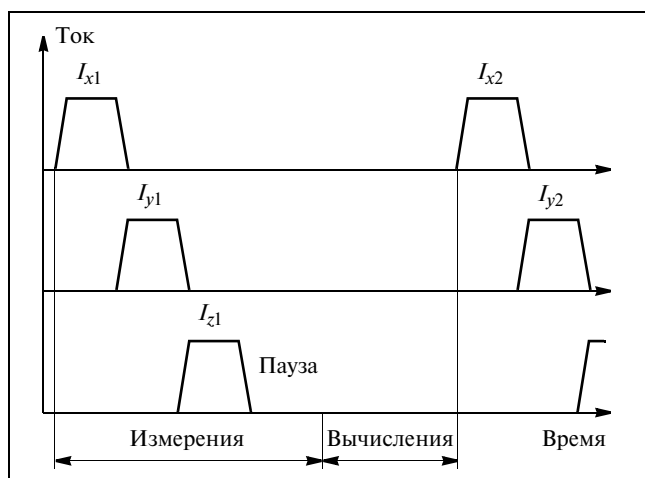


Рис. 1. Токи, действующие в обмотках генератора поля DC-метода

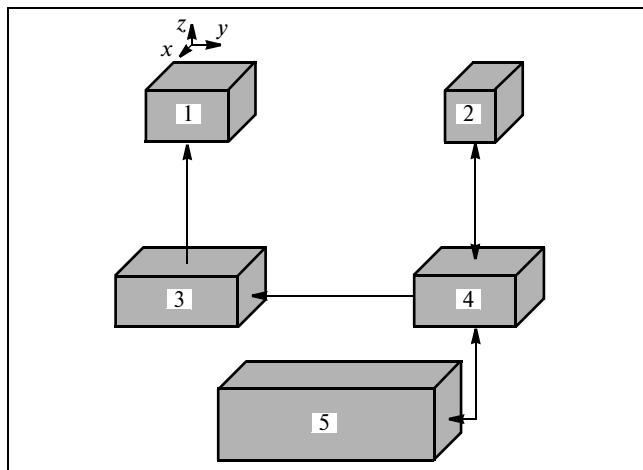


Рис. 2. Состав современного магнитного трекера

подвижном объекте. ГМП служит для генерирования магнитного поля с известным пространственным распределением в зоне перемещения подвижного объекта. УИП минимального веса и объема устанавливается на подвижном объекте. Контроллер 3 управляет формой, амплитудой и частотой следования импульсов тока через обмотки ГМП. Интерфейс 4 предназначен для ввода аналоговой информации в вычислитель и выдачи цифровых управляющих сигналов. Вычислитель 5 решает три математические задачи позиционирования — измерение, управление, вычисление координат.

Нахождение координат подвижного объекта производится путем решения в реальном времени следующего итерационного уравнения: $x^k = x^{k-1} + \text{step} \cdot \text{grad}(F)$, где x^k — текущий вектор координат; x^{k-1} — вектор координат, действовавший на предыдущем шаге (начальное приближение); step — шаг итерационного процесса, определяющий скорость схождения оптимизационного процесса; $\text{grad}(F)$ — градиент целевой функции

F , подлежащей минимизации, $F = \sum_{i=1}^n (B_{mi} - B_{ci})^2$;

B_{ci} — независимые измерения генерируемого магнитного поля; B_{mi} — расчетные значения магнитных полей, соответствующие сделанным независимым измерениям; n — число независимых измерений, используемых в системе позиционирования.

НОВЫЙ МЕТОД МАГНИТНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

В настоящем проекте реализован новый, третий в мире метод, реализующий отечественную концепцию активного магнитного позиционирования подвижных объектов [14].

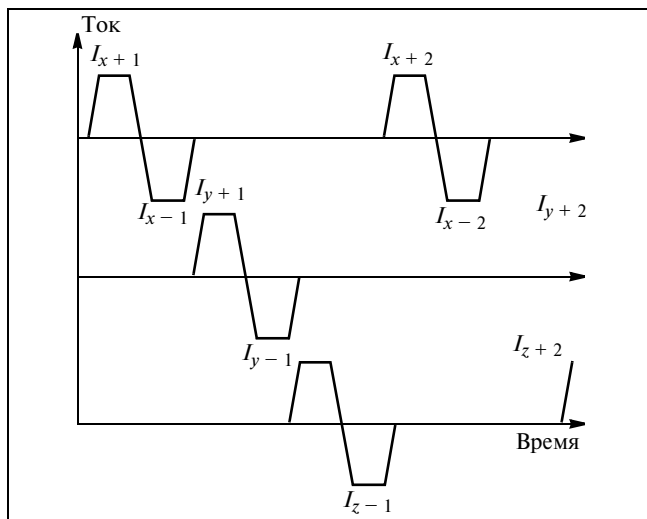


Рис. 3. Токи, действующие в обмотках генератора поля по методу ADC-позиционирования

В новом способе магнитного позиционирования обмотки генератора магнитного поля возбуждаются знакопеременными импульсами тока с плоскими вершинами, как показано на рис. 2. По аналогии с описанными выше зарубежными аналогами новый способ можно назвать “ADC-позиционирование” от английского “alternating — direct current”.

Из графиков токов, приведенных на рис. 3, видно, что пауза токов исключена, а компенсация магнитного поля Земли возможна после каждого переключения ориентации генерируемого магнитного поля, что в сравнении с зарубежными аналогами создает следующие технические преимущества:

- более высокую помехозащищенность магнитных измерений к внешним полям вследствие лучшей компенсации влияния мешающих воздействий;
- меньшую величину динамической погрешности позиционирования за счет более точных разностных магнитных измерений;
- более высокую частоту смены выходной информации благодаря тому, что математическая задача решается после каждого переключения ориентации генерируемого магнитного поля;
- более высокую точность позиционирования в дальней зоне по причине удвоения разностной амплитуды измеряемого поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ADC-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Метод ADC-позиционирования реализован в виде образца, результаты физического запуска которого описаны ниже. На рис. 4 показан внешний вид и габариты основных компонентов системы позиционирования, осуществляющих генерирование и измерение рабочего магнитного поля.

ГМП, показанный слева, имеет кабель для подключения к контроллеру длиной не менее 6 м, УИП (на рис. 3 справа) подключается к стационарной части системы при помощи специального кабеля длиной более 10 м. УИП имеет крепежные отверстия, пластиковый корпус. Диаметр сигнального кабеля 4 мм. Вычислитель и контроллер не показаны.

ГМП создает вокруг себя импульсное магнитное поле. Рабочей зоной перемещения подвижного объекта является сфера радиусом 1 м с центром на ГМП. УИП крепится на подвижный объект и свободно перемещается в пределах рабочей зоны. В качестве вычислителя в макете применен стандартный персональный компьютер с тактовой частотой 1 ГГц. Интерфейс — модифицированная плата ввода/вывода PCI-1716 от “Advantech”.



Рис. 4. Электрофизические компоненты магнитного трекера наשלемного применения

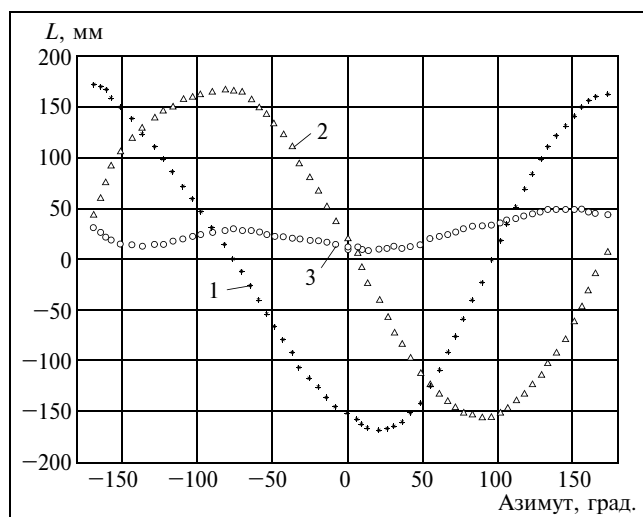


Рис. 5. Экспериментальная зависимость линейных координат УИП, вычисляемых трекером в ходе поворота на заданные азимуты на определенном радиусе:

1 — удаление; 2 — смещение; 3 — высота

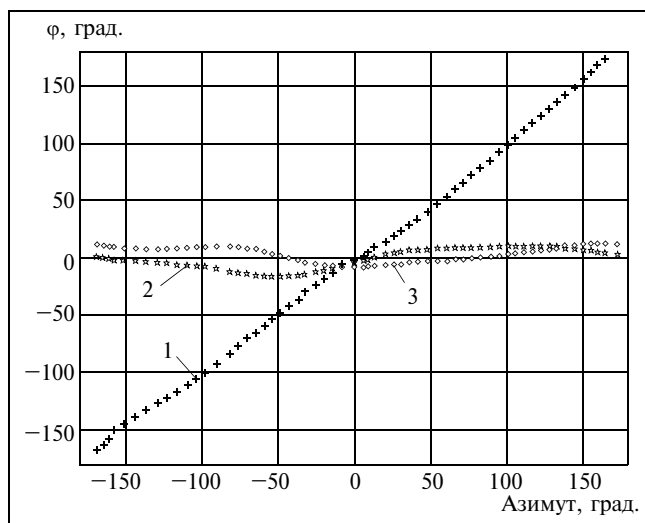


Рис. 6. Экспериментальная зависимость углов ориентации УИП, вычисляемых трекером в ходе поворота на заданные азимуты на определенном радиусе:

1 — азимут; 2 — угол места; 3 — крен

На рисунках 5 и 6 приведены результаты статического позиционирования, полученные в ходе физического экспериментального запуска научного макета магнитного трекера для целеуказания. На макете моделируется движение головы оператора в режиме поиска цели путем изменения направления линии визирования. При измерениях создавалось круговое движение УИП с радиусом поворота 140 мм, что соответствует среднему размеру шлема. Поворот осуществлялся в азимутальной плоскости. Удаление центра поворота от ГМП составляло 450 мм. На графиках рис. 5 по горизонтальной оси — азимут, задаваемый устройством макета, по вертикальной оси — вычисляемые линейные координаты L , на рис. 6 по горизонтальной оси — азимут, задаваемый устройством макета, по вертикальной оси — вычисляемые углы ориентации φ .

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Для определенности, после запуска базовой системы [13], работы по проекту фокусировались на нашлемном целеуказании, которое требует позиционирования направления линии визирования на визуально выбранную цель. Такая задача стоит в системах дополненной и виртуальной реальности, некоторых тренажерах, компьютерных играх и др. Под шлемом в данной работе будем понимать любое устройство, позволяющее жестко крепить подвижный приемник трекера на голове оператора, не нарушая свободу поворота и перемещения.

Известна зарубежная практика применения магнитного трекера в реабилитирующих меди-

цинских технологиях [11, 12], когда например, пациентам, перенесшим инсульт, предлагается тренировать двигательную активность путем отслеживания предметов, движущихся по экрану специального монитора. На рис. 7 приведена конфигурация УИП на специальных очках, предназначенных для рассматривания экрана монитора. Устройство одевается на голову пациента, который поворотом головы выбирает на экране меняющиеся изображения предметов. Информация с трекера используется для управления движением объектов, синтезируемых на экране.

Для наведения на более удаленную цель необходима жесткая связь УИП с направлением взгляда оператора. В качестве шлема в этом случае может выступать конфигурация, показанная, например, на рис. 8. Жесткий головной убор типа “бейсболки” обеспечивает соответствие оси козырька и направления прямого взгляда — не хуже $\sim 1\text{--}2^\circ$ в конусе с углом раскрытия до 60° . Такой жесткости достаточно для реализации управления



Рис. 7. Устройство для выбора и позиционирования объектов на столе или на экране



Рис. 8. Головной убор с макетом УИП на голове оператора

взглядом по заранее определенным целям. Например, наведение прямого взгляда оператора на различные бытовые приборы в пределах квартиры позволяет включать и выключать их путем удержания взгляда в течение установленного времени. Предварительно все интересующие внешние приборы “привязываются” к системе координат ГМП. Управление внешними приборами осуществляется через цифровые выходы, имеющиеся в системе и управляемые программой при попадании вычисляемых координат линии визирования на пятно, соответствующее заданному прибору. Очки, показанные на фотографии, моделируют коллиматорный прицел. Разработанный научный макет подтвердил возможность такого использования системы позиционирования. Точность наведения на цель — не хуже $\pm 2^\circ$. Время включения — единицы миллисекунд. С помощью действующего макета возможно управлять до ~10 приборами при помощи разовых команд.

Для систем виртуальной и дополненной реальности требуется объединение разработанного трекера с системой визуализации. Исследования показали возможность удаления УИП на длину кабеля до 10 м, что достаточно для включения трекера в состав большого числа тренажеров. Дальность функционирования трекера в этом режиме увеличивается до 3 м.

Задача целеуказания появляется также при сканировании 3D-поверхностей, например в археологии, реставрационных работах. На рис. 9 показан эпизод снятия профиля 3D-поверхности. Зонд в руке, жестко связанный с УИП, прикасается к поверхности в требуемой точке или последовательности точек. В этом режиме трекер выдает линейные координаты точки соприкосновения конца зонда с исследуемой поверхностью, по которым строится профиль исследованной поверхности. Длина зонда ограничена лишь требуемой точностью линейного позиционирования (не хуже $\pm 0,5$ мм по каждой координате). Использование методов аналитической геометрии в реальном времени позволило исключить влияние ориентации зонда на точность линейного сканирования 3D-поверхности. Возможно сканирование через непрозрачные преграды или в недоступных местах.

Для применения трекера на борту транспортных средств необходима его адаптация к интерьеру кабины. Первые результаты такой адаптации показывают удовлетворительную работу системы позиционирования, например, на борту автомобиля. Трекер вычисляет направление линии визирования оператора на внешнюю цель, вычисляемую в системе координат транспортного средства. Решаются задачи контроля засыпания водителя, линейного управления оборудованием транспортного средства и др.



Рис. 9. Дигитайзер 3D-поверхности, УИП на удлинителе, на конце которого тонкий щуп касается поверхности сканируемого изделия в требуемой точке, ГМП не показан

Проводились также начальные работы по дальнему позиционированию при направленном бурении [16], которые подтвердили возможность качественного увеличения дальности действия магнитного трекера. Дальность позиционирования оценивается не хуже 100 м при времени накопления информации до 100 с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показывают устойчивое функционирование трекера в полном диапазоне азимутальных направлений. Наблюдаемая на данном этапе неточность вычисляемых координат зависит от качества начальной калибровки системы и установки элементов станда. Мероприятия по достижению высокой точности позиционирования определяются в каждом конкретном случае задачей пользователя, т. е. диапазонами углов, числом вычисляемых координат, размерами зоны линейного перемещения и окружающим интерьером. Разработанные методы индивидуальной калибровки и опыт работы с действующим оборудованием магнитного позиционирования показали обоснованность достижения точности позиционирования не хуже десятых долей градуса и единиц миллиметров. Собственная технологическая погрешность, достигаемая без индивидуальной калибровки, оценивается величиной в единицы градусов. Динамические свойства разработанного трекера допускают движение шлема с угловой скоростью до 100 град. в секунду.

Разработанный трекер позволяет рассматривать многочисленные направления применения, известные из литературы:

- медицинские реабилитирующие технологии [11, 12];
- дискретное управление взглядом по заранее определенным целям [10, 11];

- системы дополненной и виртуальной реальности [12];
- транспортные средства и тренажеры [10];
- сканирование скрытых поверхностей [9—12];
- дальнее позиционирование в строительстве [11, 16].

К настоящему времени:

- проведена конструктивная и схемотехническая оптимизация аппаратной части трекера, направленная на минимизацию случайных погрешностей позиционирования;
- повышена температурная стабильность работы элементов системы позиционирования;
- уменьшены масса и габариты электрофизических элементов системы;
- доработано программно-математическое обеспечение проекта для достижения устойчивого позиционирования;
- развита калибровочная база, позволяющая минимизировать систематические ошибки позиционирования.

Основные технические характеристики магнитного трекера для нагнетного применения

Дальность функционирования, м, не менее . . . 1	
Амплитуда рабочего поля в рабочей зоне	Не превышает магнитного поля Земли
Диапазон углов функционирования, град:	
по азимуту	$\pm 180^\circ$
по крену	$\pm 180^\circ$
по углу места	$\pm 90^\circ$
СКО вычисляемых линейных координат, мм	0,5 на 100 измерений
СКО вычисляемых углов ориентации, град	0,2 на 100 измерений
Частота смены выходных данных, Гц	25; 50; 100
Габариты, мм:	
генератора магнитного поля	$100 \times 100 \times 100$
подвижного приемника	$26 \times 36 \times 50$
Потребляемая мощность (кроме компьютера), Вт	100

Выходными параметрами системы являются 6 координат УИП в системе координат ГМП и 10 цифровых ТТЛ-сигналов, соответствующих попаданию линии визирования УИП на заданное “пятно” выбранной цели.

Научные результаты разработки, полученные на данном этапе, состоят в верификации следующих базовых решений, полученных в ходе выполнения работы:

- научно обоснованы критерии проектирования магнитной системы позиционирования для целеуказания;
- получены алгоритмы и базовое программно-математическое обеспечение, дающее устойчивое и однозначное решение задач позиционирования в реальном времени;
- определены методы калибровки и адаптации магнитного трекера к окружающему интерьеру.

В результате достигнута предельная чувствительность магнитных измерений (< 1 мГс за 2 мс) при нелинейности $< 0,3\%$ в динамическом диапазоне не менее 60 дБ на генераторах Холла и стандартной элементной базе. Впервые установлена связь между точностью позиционирования и точностью индивидуальной калибровки системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена важная научно-техническая задача создания отечественной технологии магнитного позиционирования для целеуказания. Разработан первый отечественный прототип магнитного трекера. Получен научный результат, продолжающий цикл научно-исследовательских работ, выполняемых автором в области магнитного позиционирования. Полученное базовое решение положено в основу создания опытного образца системы магнитного позиционирования для целеуказания. Описанные результаты являются достаточными для начала коммерциализации проекта.

В последующих работах внимание будет сфокусировано на следующих вопросах:

- компоновка элементов системы в применении к защитному шлему оператора, приобретение опыта позиционирования линии визирования;
- достижение предельной точности позиционирования в режиме целеуказания;
- обеспечение двухзадачного режима работы трекера на одном вычислителе для работы совместно с задачей пользователя;
- экспериментальное подтверждение возможности создания глобальной системы позиционирования в закрытых помещениях [15];
- дальнейшее повышение чувствительности магнитных измерений на других типах первичных преобразователей при заданных габаритах УИП;
- повышение дальности позиционирования для применения в строительстве;
- начало коммерциализации проекта во всех областях применения.

Представление работы на международной конференции по смешанной реальности: ISMAR — International Symposium on Mixed and Augmented Reality [18].

Разработанная отечественная технология магнитного позиционирования подвижных объектов кроме технических особенностей, указанных выше, имеет также и коммерческие преимущества перед зарубежными аналогами, такими как более низкая цена, отечественный сервис, русскоязычный интерфейс, доступность первичных кодов.

Автор выражает благодарность ЗАО “Транзас” за поддержание неагрессивной среды, которая способствовала продвижению работы. Выражается глубокая признательность Наталье Поляковой за поддержку проекта на завершающем этапе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Raab F. H. Remote object position and orientation lacater. — US patent N 4314251, G01S 5/02, 1982.
 2. <<http://polhemus.com/>>
 3. Blood E. Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields. — US patent N 4849692, G01B 7/14, 1989.
 4. <<http://www.ascension-tech.com/>>
 5. Годунов В. А., Степанов Д. В., Третьяков Д. А. и др. Современные наשלменные системы целеуказания и индикации // Авиакосмическое приборостроение. — 2003. — № 5.
 6. Годунов В. А., Желамский М. В., Степанов Д. В., Третьяков Д. А. Вопросы теории позиционирования подвижного объекта в магнитном поле // Авиакосмическое приборостроение. — 2003. — № 8.
 7. Желамский М. В. Увеличение чувствительности магнитных измерений в авионике // Авиакосмическое приборостроение. — 2004. — № 12.
 8. Желамский М. В. Полное позиционирование подвижных объектов при помощи одной измерительной системы // Авиакосмическое приборостроение. — 2006. — № 8.
 9. Годунов В., Желамский М., Метелкина Т. и др. К вопросу достижения предельной точности позиционирования линии визирования цели на подвижных платформах // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2007. — № 3.
 10. Желамский М. В. Магнитное позиционирование в наשלменных системах // Электроника — НТБ. — 2006. — № 7.
 11. Желамский М. Электромагнитное позиционирование — преимущества и области применения // Электроника — НТБ. — 2007. — № 3.
 12. Желамский М. Магнитное позиционирование в системах виртуальной и дополненной реальности // Электроника — НТБ. — 2007. — № 5.
 13. Желамский М. Первая отечественная система магнитного позиционирования в полном объеме технических требований. Этап 1 — физический пуск // Датчики и системы. — 2009. — № 1.
 14. Заявка на изобретение № 2008136343 “Способ определения линейного положения и ориентации подвижного объекта” от 09.09.2008 г.
 15. Желамский М. Глобальная система виртуальной и дополненной реальности для закрытых пространств // Датчики и системы. — 2009. — № 7.
 16. Желамский М. В., Морозов Ю. Т., Калинин А. Г. и др. Новый метод позиционирования бурильного инструмента, основанный на отечественной магнитной технологии // Инженер - нефтяник. — 2009. — № 3.
 17. Желамский М. Откуда что возьмется? // Управление проектами. — 2009 № 17 (декабрь).
 18. <http://www.ismar10.org/index.php/Main_Page>
- Михаил Васильевич Желамский — канд. техн. наук, научн. руководитель инициативного проекта “МАИТЕХ” (Магнитные инструментальные технологии).
- ☎ 8-921-786-35-66
- E-mail: zhelamsk@rambler.ru, MAITECH@rambler.ru □

УДК 53.082.9

К содержанию

ГРАДИЕНТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМИ МИКРО- И НАНОГРАНУЛАМИ В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ

В. В. Амеличев, Т. Н. Герасименко, П. А. Поляков, С. И. Касаткин

Представлены результаты теоретического анализа управления движением магнитных микро- и наногранул в градиентном магнитном поле в вязкой среде. Данная задача имеет важное практическое значение для разработки магниторезистивного биосенсора.

Ключевые слова: магнитная микро- и наногранула, магниторезистивный биосенсор, градиентное магнитное поле.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой интерес вызывает использование магнитных микро- и наногранул (НГ) в различных областях медицины, биофизики и химии [1]. Это направление науки и техники привело к созданию относительно нового раздела гидродинамики — феррогидродинамики [2, 3]. Одной из важных практических задач является управление поведением таких НГ. Одно из решений этой задачи — использование градиентного магнитного поля, которое создается либо постоянными токами, либо магнитами.

Одним из важных приложений являются магниторезистивные (МР) биосенсоры, в которых производится управление осаждением НГ с антигенами на подложку, покрытую антителами, в жидком растворе [4]. Ввиду микроскопических размеров всей системы, процесс осаждения микроранул может занимать достаточно длительное время, за которое физические параметры раствора могут измениться (например, часть жидкости испариться). В связи с этим возникает проблема ускорения процесса осаждения НГ. Данная работа посвящена теоретическому исследованию возмож-