

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ: ПРЕИМУЩЕСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Электромагнитные системы позиционирования (ЭМСП) успешно применяются в различных областях современного наукоемкого бизнеса. Во многих приложениях использование ЭМСП – единственный способ определить линейное положение и ориентацию подвижного объекта. О работе ЭМСП в нацеленных системах целеуказания мы рассказывали в предыдущей публикации [1]. В данной статье описано, как применяют магнитное позиционирования в медицине, биомеханике, анимации, подземной навигации и для решения других задач.

ОСНОВНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭМСП

Известны три основные конфигурации, которые позволяют позиционировать подвижный объект магнитным методом [2–5]:

- генератор поля включает три независимых источника, а подвижный приемник – три отдельных детектора. В дальнейшем будем обозначать такую конфигурацию как [3×3];
- генератор поля включает шесть источников, приемник состоит из одного детектора – [6×1];
- генератор содержит один источник, а приемник шесть детекторов – [1×6].

Современные коммерческие ЭМСП чаще всего используют синусоидальное (АС–системы – от англ. alternating current) или импульсное (DC–системы – от англ. direct current) магнитное поле. В любой конфигурации произведение количества источников и детекторов не должно быть меньше числа искоемых координат подвижного объекта.

Конфигурация [3×3] дает максимальные возможности позиционирования по диапазонам перемещений и устойчивости к внешним помехам [6, 7]. Вторая конфигурация [6×1] характерна для медицинских систем позиционирования [4], где подвижный приемник должен иметь минимальные размеры для расположения на теле или внутри тела пациента.

М.Желамский, к.т.н.
zhelamsk@rambler.ru

Третья базовая конфигурация [1×6] типична для систем подземной навигации [5, 8], которые применяют, например, для управления горизонтальным бурением.

"ДАЛЬНЯЯ" МАГНИТНАЯ НАВИГАЦИЯ

Первые образцы ЭМСП создавались в 70-х годах прошлого века для систем посадки самолетов [2, 3]. В дальнейшем это направление развивалось [7, 9, 10] и остается актуальным по сей день. Интерес к применению ЭМСП в данном классе задач вызван тем, что радиолуч стандартной посадочной системы подвержен влиянию погоды, почвы, отражающих объектов. В результате на последних 60 метрах (по высоте) глиссады перед взлетно-посадочной полосой (ВПП) стандартные радиосистемы не всегда обеспечивают точность, необходимую для контроля снижения самолета [9]. Низкочастотное магнитное поле практически не чувствует указанных факторов из-за их низкого влияния на магнитную проницаемость среды.

Типичная магнитная система посадки самолетов (рис.1) [7] использует наземный излучатель, который содержит две ортогональных обмотки. Подвижный приемник установлен на борту летательного аппарата. Дополнительно на земле устанавливают стационарный приемник-монитор для контроля работы излучателя.

Одна из основных проблем в "дальней" магнитной навигации – выделение полезного сигнала из атмосферных шумов. Основными источниками таких шумов служат грозовая активность атмосферы и распределенные радиопередатчики, в первую очередь линии электропередач (ЛЭП). Атмосферные шумы содержат преобладающую горизонтальную компоненту магнитного поля, которая расположена в диапазоне частот 2–1000 Гц [8, 11]. Спектральная плотность шумов может достигать величины ~ (0,05–0,07) мкА/м [2, 3] и падает с ростом частоты. Кроме шумов, точность вычисления координат ограничивают помехи от питающих сетей с частотами 50, 60, 400 Гц. В результате на частотах (3–4) кГц ЭМСП "дальней" навигации действует на расстоянии до 2 км.

Магнитные системы посадки самолетов применяют, например, в аэропорту "Heathrow" (Лондон).

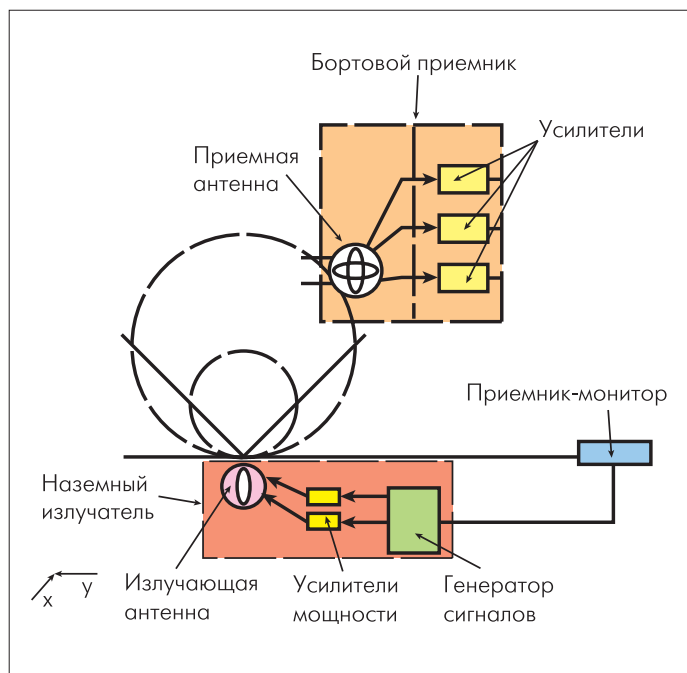


Рис. 1. Структура ЭМСП для посадки самолетов

ИНВАЗИВНАЯ МЕДИЦИНА

Медицина выявляет важное преимущество магнитного метода позиционирования: он не требует прямой видимости между генератором поля и подвижным приемником. В медицине магнитный метод – вне конкуренции по возможностям позиционирования в закрытом трехмерном пространстве тела пациента.

Точное положение инвазивного инструмента в 3D-пространстве – необходимое условие многих современных медицинских процедур. Пример, иллюстрирующий требования к точности и надежности позиционирования – введение катетера в сердце [12].

В медицине ЭМСП работают в относительно малой зоне: как правило, не более одного метра. Приемник ЭМСП перемещают внутри тела пациента вместе с инвазивным инструментом. Чаще всего используют одноосные индукционные приемники [13]. Электрическая пассивность такого приемника (отсутствие питающих токов и напряжений) – дополнительное преимущество для инвазивного применения. Генерирующие катушки размещают стационарно на разных расстояниях с минимальной симметрией. Типичная конфигурация содержит несколько групп 2D-излучателей (ортогональных катушек с общим центром) и 1D-приемник (рис.2) [4].

В последние годы возникло новое направление в медицинском применении магнитного позиционирования: в тело пациента внедряется пассивный маркер, который генерирует сигнал, позволяющий детектировать его присутствие и определять местоположение [14, 15]. Маркер представляет собой миниатюрный резонансный транспондер, возбуждаемый внешней системой, которая обнаруживает ответный сигнал маркера и вычисляет его координаты.

БИОМЕХАНИКА

Магнитное позиционирование широко используется для оцифровывания движений человека, например в различных программах реабилитации. Наблюдение движения в реальном времени используется и в спорте для того, чтобы оптимизировать тренировочный процесс. В биомеханике подвижные приемники ЭМСП располагают на теле человека. Зона перемещения в данном случае составляет 2–3 метра.

Технологии ЭМСП объединяют с современным специализированным программным обеспечением и средствами визуализации движений в реальном времени (рис.3) [16]. Аппаратные комплексы и программные продукты такого рода за рубежом являются эффективным бизнес-направлением в сфере биомеханики и спортивного тренинга.

АНИМАЦИЯ

Магнитные системы позиционирования широко используются в ТВ-анимации (capture motion) и компьютерной графике для цифровой записи движений актеров, имитирующих поведение сюжетных персонажей [16]. Записанные данные затем применяют для управления компьютерной моделью персонажа. В результате созданная компьютерная модель героя анимации движется в соответствии с движениями датчиков ЭМСП на живом актере. При этом не нужно рисовать кадры как в традиционной анимации (неважно, на бумаге или на компьютере). Технология позволяет существенно сократить трудоемкость и стоимость процесса анимации – создания художественного произведения.

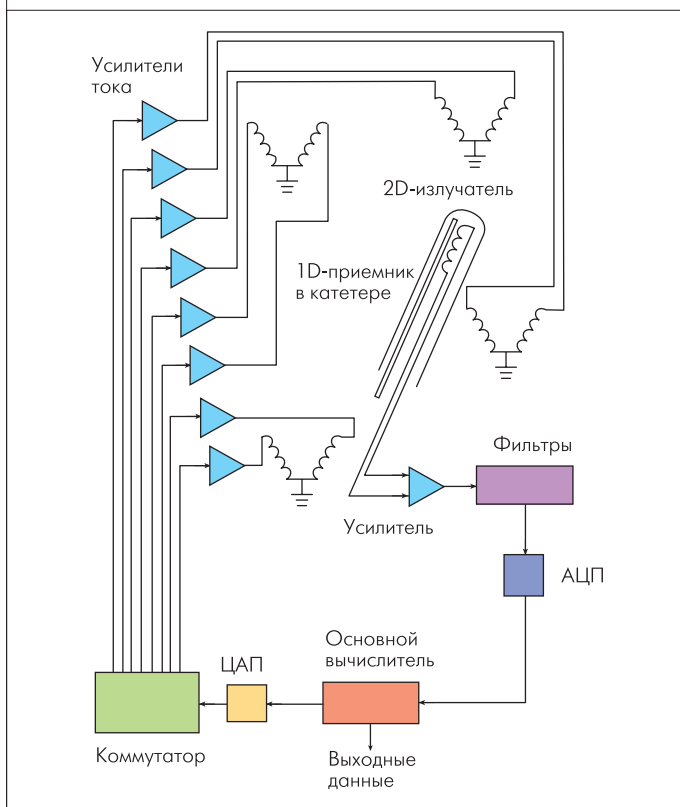


Рис.2. Структура ЭМСП для хирургической навигации

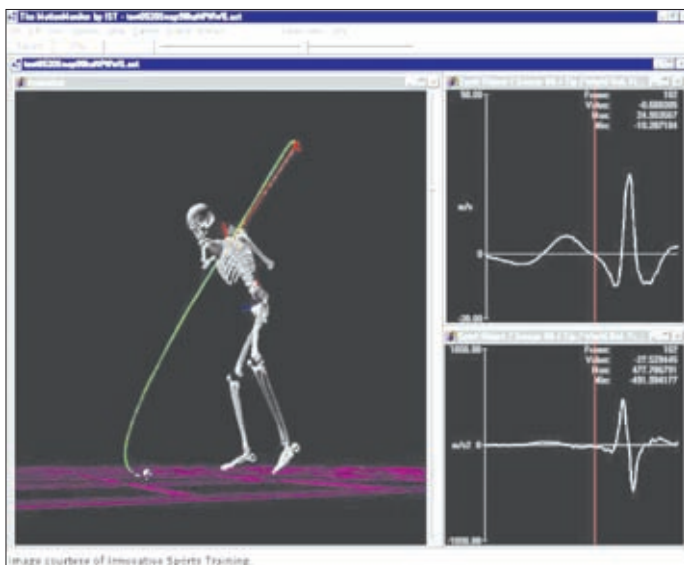


Рис.3. Пример визуализации спортивных движений с использованием ЭМСП

В анимации успешно применяются как импульсные DC-системы, так и непрерывные AC-системы позиционирования. При установке системы на сцене следует лишь удалить крупные металлические объекты на расстояние не меньшее, чем между приемником и излучателем. Это особенно важно для AC-метода. Излучатель ставят, как правило, на деревянный пьедестал. При работе системы в зоне перемещения не должны работать мобильные телефоны.

ПОДЗЕМНАЯ НАВИГАЦИЯ

Начиная с 70-х годов прошлого века магнитное позиционирование широко применяется в подземной геодезии [5, 11, 17–20], решая две задачи:

- позиционирование инструмента, находящегося под землей [17];
- предотвращение столкновения инструмента с подземной преградой [11, 17].

Чаще всего при позиционировании инструмента под землей располагается излучающая антенна в виде одноосного соленоида с ферромагнитным сердечником [5]. Она может

работать непосредственно во время бурения и питаться от батарей. 2D- и 3D-излучатели в скважинах не применяют из-за ограничений размеров и потребляемой мощности. Если в скважине размещать приемник, то точность измерений снижается из-за помех и вибраций, создаваемых бурильным инструментом. Однако, известна система [20], которая включает генератор поля в виде двух перпендикулярных соленоидов на поверхности земли и один 3D-приемник, установленный на инструменте. При такой конфигурации измерения проводят во время пауз, необходимых для наращивания бурильного столба (через каждые 10 метров бурения). Преимуществом данной системы является уменьшенный уровень атмосферных шумов под землей благодаря экранирующему действию проводящего грунта.

В случае горизонтального бурения 3D-приемники располагаются на поверхности симметрично в нескольких зонах предполагаемой траектории движения бура [18] (рис.4). Траектория делится на сегменты, каждый из которых обслуживается парой приемников (их можно переставлять по ходу движения бура).

Подвижный излучатель может генерировать магнитное поле на двух и более частотах [19]. Стационарные приемники при этом рассчитывают дальность до излучателя по разности фаз разночастотных принимаемых сигналов.

На нефтедобывающих установках сигналы ЭМСП малы из-за сравнительно больших удалений излучателя от наземных приемников, и поэтому магнитные измерения очень чувствительны к атмосферным шумам. Для выделения полезных сигналов используются современные методы цифровой обработки. Кроме того, приемную антенну экранируют от ветра для того, чтобы минимизировать дополнительные шумы, порождаемые вибрацией приемной катушки в магнитном поле Земли. При заданной частоте измерений ошибки позиционирования определяются отношением $R = \text{сигнал/шум}$ [18] и составляют ~1% для $R=40$ дБ, и ~10% для $R=20$ дБ.

Дальность действия подземной навигации на переменном магнитном поле составляет в среднем 150–300 метров [20].

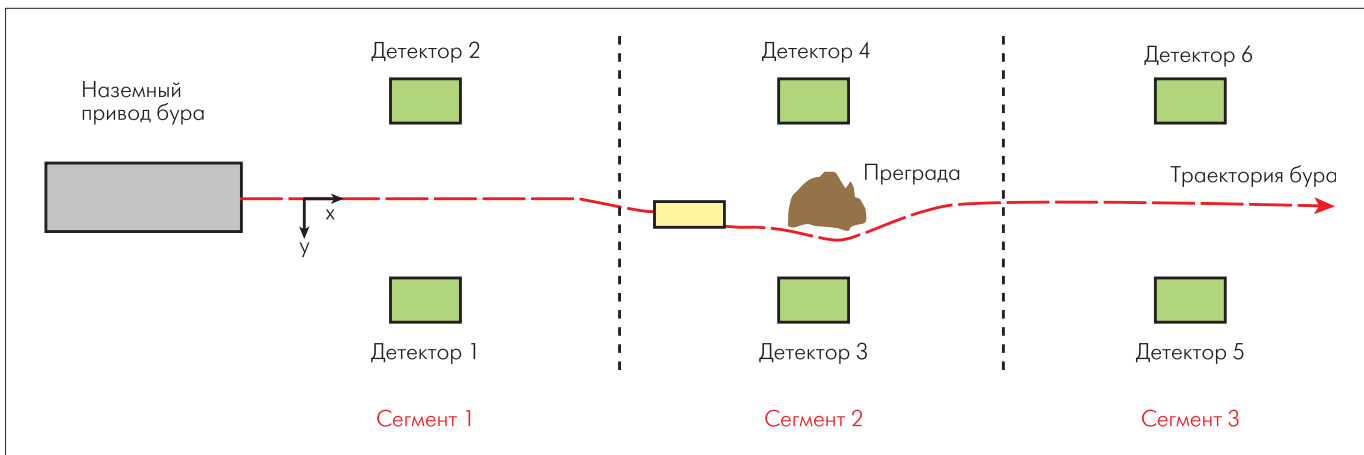


Рис.4. Компонентная структура электромагнитной системы позиционирования для горизонтального бурения

ЗАЩИТА ИНСТРУМЕНТА

При работе экскаваторов, бульдозеров, канавокопателей, бурильных установок в промышленных районах с интенсивными подземными коммуникациями (оптические линии в металлических экранах, электрические кабели связи, силовые кабели, водопроводы и канализация) чрезвычайно важно предупредить столкновение инструмента с подземной преградой [11, 17]. Для того чтобы снизить риск столкновения с подземными преградами, непосредственно на исполнительные механизмы строительной техники устанавливаются детекторы (рис.5), которые измеряют:

- локальные искажения магнитного поля Земли скрытым подземным ферромагнитным объектом;
- искажения магнитного поля, подаваемого на объект бортовым генератором транспортного средства;
- магнитное поле, генерируемое подземными объектами, например подземными линиями электропередач.

Критерием обнаружения скрытого подземного ферромагнитного объекта является искажение магнитного поля Земли. Влияние ориентации транспортного средства на измерение магнитного поля Земли компенсируется с помощью дополнительных датчиков угла места и крена. Система определяет ориентацию детектора по отношению к скрытому подземному объекту (крен, угол места), а также оценивает расстояние до него.

Наличие подземных преград из немагнитных электропроводящих материалов не может быть обнаружено по искажению поля Земли. Такую задачу решают путем подачи на объект переменного магнитного поля от автономного генератора, входящего в состав системы. Другой детектор анализирует поле, создаваемое генератором, и обнаруживает искажения, которые возникают при наличии скрытого электропроводящего, но немагнитного подземного объекта (трубы, экрана и др.). Частота генератора перестраивается в пределах 1–300 кГц. Система определяет направление на преграду и дистанцию до нее.

Детекторы третьего типа регистрируют поля, излучаемые подземными объектами на промышленных частотах (в основном 50/60 Гц), и обнаруживают подземные линии электропередач и линии связи.

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Теперь кратко опишем комбинированные системы – гибридные продукты, использующие магнитные измерения как составную часть технологии. С помощью таких комбинаций можно расширить зону действия системы и улучшить ее технические характеристики.

В работе [21] описана пассивная система позиционирования, не имеющая собственного источника поля. Азимутальная ориентация в ней определяется по горизонтальной компоненте магнитного поля Земли. В качестве магнитного датчика

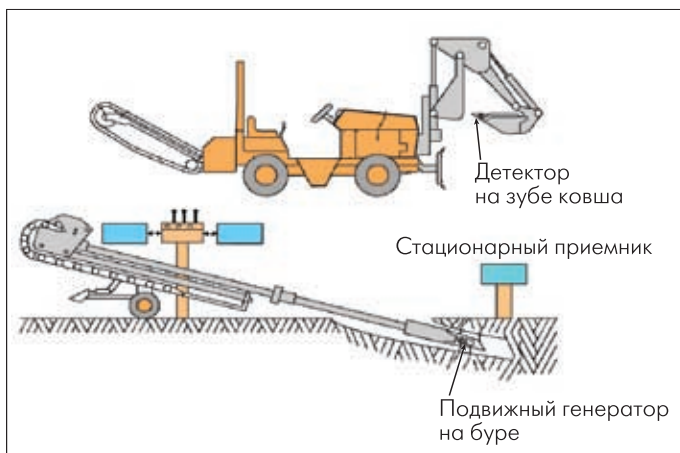


Рис.5. Компоновка детекторов подземной преграды на экскаваторе и бурильном инструменте

применяют феррозонд с тороидальным сердечником. Для определения угла места объекта используют гравитационный датчик отклонения от вертикали. Он выполнен в виде сферы, заполненной газом и жидкостью. Граница их раздела всегда занимает горизонтальное положение в гравитационном поле Земли. На сфере друг напротив друга установлены светодиод и фотоприемник, которые позволяют регистрировать изменение коэффициента отражения света на границе раздела "газ-жидкость" при наклоне датчика. Точность позиционирования данной системы существенно ниже, чем у активных систем, линейные координаты не определяются. Для того чтобы повысить точность, к системе можно добавлять угловой датчик другого типа, например на базе акселерометра [22].

Акселерометры используются и в активных системах позиционирования [23]. Показания акселерометра не зависят от магнитных помех, но обладают дрейфом, магнитные измерения стабильны во времени, но на них влияют возмущения поля. Поэтому совместные измерения магнитных полей и ускорений повышают надежность вычисления координат. Данные с разных датчиков обрабатываются одновременно, в общем процессоре, для определения положения и ориентации подвижного приемника.

Оригинальная система точных измерений быстрых движений предложена в [24]. На теле оператора устанавливают множество измерительных устройств различных типов – акселерометры, гироскопы, акустические, магнитные, оптические, GPS датчики и т.д. (рис.6). Во время движения записывают зависимости выходных сигналов от времени для всех типов датчиков. Затем, в режиме off-line, эти сигналы совместно обрабатывают по специальному алгоритму и восстанавливают траектории движения.

В биомеханике, анимации, системах виртуальной реальности часто требуется, чтобы оператор перемещался в большом диапазоне расстояний. В стандартных ЭМСП (стационарный излучатель и подвижные приемники) даже с "большой" излучающей антенной дальность позиционирования не превышает 3–5 м из-за падения магнитного



Рис.6. Некоторые датчики на теле оператора при электромагнитном позиционировании спортивных движений. 6DOF E – электромагнитный датчик, обеспечивающий позиционирование по шести степеням свободы (DOF – degree of freedom); 6DOF A – датчик на акселерометрах, обеспечивающий позиционирование по шести степеням свободы

поля в "дальней" зоне. Данное обстоятельство ограничивает свободное движение оператора. Для решения этой проблемы можно разместить несколько приемников на руках и ногах оператора, а излучатель малой дальности – в области поясницы [25, 26] (рис.7). В результате приемники всегда находятся в зоне действия подвижного излучателя, а металлические объекты интерьера максимально удалены от оператора. Дополнительно на ногах оператора установлены датчики давления, позволяющие считать шаги. Это дает возможность вычислять движение оператора во внешней

Таблица 1. Импульсные ЭМСП [16]

Тип	Дальность, мм	Частота, Гц	Некоторые применения
pciBIRD	203–762	до 105	1–4
pcBIRD	203–3050	до 144	1–4
miniBIRD	203–762	до 120	1, 2, 5, 6, 7, 8
microBIRD	203–580	до 90	5–9
Flock of Birds	203–3050	до 144	1–4
Neste of Birds	203–3050	до 105	1–4
Motion Star	203–3050	до 100	1, 9

Таблица 2. ЭМСП переменного поля [27]

Тип	Дальность, мм	Частота, Гц	Некоторые применения
Fastrak	762	до 120	1, 3, 4
Liberty	900	240	1, 3, 9
Patriot	1067	60	1, 3, 4

Примечание к табл. 1, 2. 1 – позиционирование тела человека в системах виртуальной реальности (например, на тренажерах транспортных средств); 2 – позиционирование инструмента; 3 – биомеханические системы реабилитации; 4 – 3D управление графикой; 5 – инвазивная медицина; 6 – точное позиционирование датчика УЗИ на теле пациента; 7 – лапароскопия, эндоскопия; 8 – точное взятие проб на биопсию; 9 – спортивный тренинг.

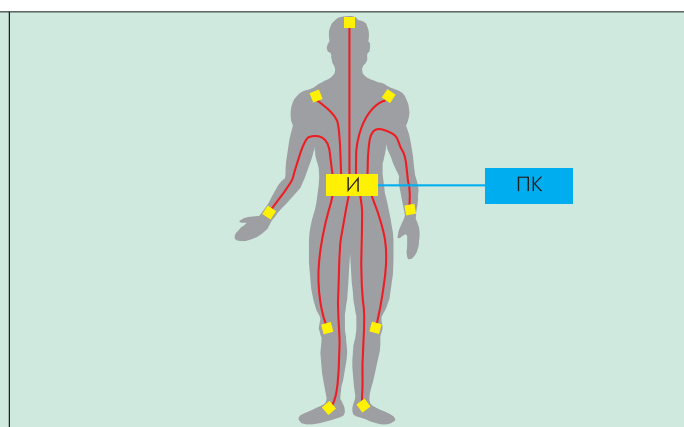


Рис.7. Компоновка системы свободного движения. Датчики 6DOF изображены в виде квадратов. И – подвижный источник магнитного поля, ПК – персональный компьютер, соединенный с подвижным оборудованием оператора при помощи гибкого кабеля

системе координат. Оптическая система позиционирования, установленная на голове оператора, также служит для определения положения нательного излучателя относительно выбранной неподвижной системы координат. На основе информации этих и других дополнительных датчиков определяют положение подвижного излучателя во внешней системе координат и реконструируют движения оператора в реальном времени в большом диапазоне перемещений.

В заключение приведем основные характеристики и примеры применения ряда конкретных ЭМСП (табл. 1, 2). Все ЭМСП разработаны за рубежом. К сожалению, до настоящего времени в России такие системы практически не создавались. Сейчас работа по их разработке ведется, но об этом – в отдельных статьях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Желамский М. Магнитное позиционирование в наשלемых системах. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №1, с.86.
2. Raab F.H., Blood E.B., Stainer T.O. et al. Magnetic position and orientation tracking system. – IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, September 1979, Vol. AES-15, No. 5.
3. Raab F.H. Remote object position locator. – Патент N 4054881, США, G01S 3/02, The Austin Company, 1977
4. Schneider M. Measuring position and orientation using magnetic fields. – Патент N 6073043, США A61B 5/05, CorMedica Corporation, 2000.
5. Rorden L.H. et al. Method and apparatus employing received independent magnetic field components of a transmitted alternating magnetic field for determining location. – Патент N 4710708, США, G01B 7/14, Develco, San Jose, Calif. 1987.
6. Gilboa P. Three dimensional tracking system employing a rotating field. – Патент N 5646525 США, G01B 7/14, Elbit Ltd., 1997.
7. Raab F.H. Remote object position and orientation locator. –



Патент N 4314251, США G01S 5/02, The Austin Company, 1982.

8. **Morio M.** Bore location system Патент N 6922056, США, E21B 47/022, Marlin Technology Inc., 2004.

9. **Foster J.V.** Magnetic position detection method and apparatus. – Патент США N 3624598 G08G 5/00., NASA, 1969.

10. Авионика в России: Энциклопедический справочник/ Под ред. С.Д.Бодрунова. Изд. первое. – СПб., 1999.

11. **Gard M.F.** System and method for detecting an underground object using magnetic field sensing. – Патент N 7038454, США, G01V3/08, Charles Machine Works, 2006.

12. **Osadchy D.** et al. Detection of metal disturbance – Патент N 6147480 США G01R 19/00 Biosense, 2000.

13. **Bladen J.S.** Surgical navigation. – Патент N 6522907 США, A61B5/06, British Telecomm, 2003.

14. **Gilboa P.** Six-degree of freedom tracking system having a passive transponder on the object being tracked. – Патент N 6380732, США, F41G3/22, Super Dimension Ltd. 2002.

15. **Dimmer S.** System for excitation of a leadless miniature marker. – Патент N 6812842, США, A61B19/00, 2003.

16. <http://www.ascension-tech.com/>.

17. **Card M.F.** et al. System and method for determining orientation to an underground object. – Патент N 6411094 США G01V 03/28, The Charles Machine, 2002.

18. **Brune G.W.** et al. Establishing positions of locating field

detectors and path mapping in underground boring tool applications. – Патент N 7021403, США, E21B47/022, 2004.

19. **Brune G.W.** et al. Multi-frequency boring tool locating system and method. – Патент N 7015697, США, E21B47/02, 2004.

20. **Kuckes A.F.** Two solenoid guide system for horizontal boreholes. – Патент N 6814163, США, E21B47/022, Vector Magnetics LLC, 2004.

21. **Donahue M. J.** Sourceless orientation sensor. – Патент N 5526022, США G09G 05/00, Virtual I/O, Inc. 1993.

22. **Foxlin E.M.** Inertial orientation tracker apparatus having automatic drift compensation for tracking human head and other similarly sized body. – Патент N 5645077, США, A61B 5/03, MIT, 1997.

23. **Moriya N.** et al. System for three dimensional positioning and tracking. – Патент N 6691074 США H03F 1/26, Netmore Ltd. 2004.

24. **Kramer J.F.** Accurate, rapid, reliable position sensing using multiple sensing technologies. – Патент N 5930741 США, G01B 21/00, Virtual Technologies Inc., 1999.

25. **Hansen P.K.** Magnetic motion tracker with transmitter on tracked object. – Патент N 5744953, США G01B 7/14, Ascension, 1998.

26. **Hansen P.** Hybrid motion tracker. – Патент N 5831260 США, A61B 5/11; G01S 5/16, Ascension Tech Corp. 1998.

27. <http://www.polhemus.com/>