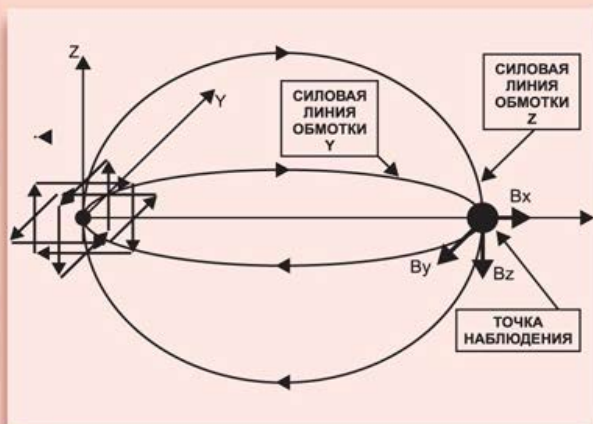


М. В. ЖЕЛАМСКИЙ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ



ЖЕЛАМСКИЙ Михаил Васильевич

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ
ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 537.67, 527.7, 527.62
ББК 22.336
Ж 50



Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 12-07-07007,
не подлежит продаже

Желамский М. В. **Электромагнитное позиционирование подвижных объектов.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 320 с. — ISBN 978-5-9221-1407-3.

Монография посвящена вопросам позиционирования — определения шести координат подвижного объекта по результатам магнитных измерений локального поля в реальном времени с частотой до сотен герц в диапазоне дальностей от долей до сотен метров, а также в закрытых пространствах. Рассмотрены вопросы позиционирования проводов линий электропередачи (ЛЭП), генерирующих вокруг себя недетерминированное электромагнитное поле. Цель работы — исследование возможности создания отечественной технологии полного активного магнитного позиционирования на малых расстояниях как в детерминированных, так и в недетерминированных полях. Описан новый метод активного магнитного позиционирования в детерминированных полях. Приведены результаты исследования первого макетного образца системы активного позиционирования для целеуказания, медицинского применения, измерений движений человека. Также представлены результаты разработки первого отечественного образца подвижного детектора ЛЭП, решающего задачу обнаружения и позиционирования ЛЭП на дальности до 1000 метров с транспортного средства.

Книга будет полезна специалистам, интересующимся современными информационными технологиями и желающим повысить свои знания в смежных областях науки и техники.

Рецензенты:

д.т.н. А. Г. Гречко, ОАО «Газпром»;
д.ф.-м.н., профессор В. Р. Романовский, НИЦ «Курчатовский институт»

На задней стороне обложки — рисунки художника Ю.А. Чичерина

ISBN 978-5-9221-1407-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2013

© М. В. Желамский, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>1. Детерминированные поля</i>	
Предисловие	6
Общие положения	8
О предполагаемом читателе	10
Глава 1. Состояние вопроса и постановка проблемы	12
1.1. Введение	12
1.1.1. Начальные соображения по сути рассматриваемых вопро- сов (12). 1.1.2. Выбор физического поля для активного позицио- нирования (16). 1.1.3. Базовые методы магнитного позициониро- вания (27).	
1.2. Состояние вопроса	31
1.2.1. САМП с дальностью действия до 1 м (31). 1.2.2. САМП с дальностью действия до 3 м (44). 1.2.3. САМП с дальностью действия до 100 м и дальше (49). 1.2.4. Базовые зарубежные аналоги САМП (55). 1.2.5. Выводы по состоянию вопроса (58).	
1.3. Постановка задачи	59
1.4. Состояние объекта исследования	62
1.4.1. Источники магнитного поля (62). 1.4.2. Магнитные изме- рения (68). 1.4.3. Постановка математической задачи активного магнитного позиционирования (89). 1.4.4. Предпосылки электро- магнитного позиционирования подвижных объектов в РФ (94).	
1.5. Заключение к главе 1	109
Глава 2. Магнитное позиционирование	112
2.1. Теоретические основы магнитного позиционирования	112
2.1.1. Описание нового способа и устройства для его реал- изации (112). 2.1.2. Генерирование магнитного поля (117). 2.1.3. Магнитные измерения (131). 2.1.4. Подход к решению математической задачи активного магнитного позиционирова- ния (148). 2.1.5. Выводы по теоретическим основам магнитного позиционирования (161).	
2.2. Разработка образца САМП	161
2.2.1. Синтез измерительного канала (162). 2.2.2. Измерительный алгоритм (168). 2.2.3. Измерительный преобразователь магнит- ного поля (170). 2.2.4. Расчет ГДМП в обоснование конструк- ции (178). 2.2.5. Контроллер (181). 2.2.6. Результаты разра- ботки интегрированного программно-математического обеспечения САМП (184). 2.2.7. Калибровки (188).	
2.3. Результаты исследования разработанного образца САМП.	192
2.3.1. Исследованные конфигурации САМП (204).	
2.4. Перспективы применения нового способа активного магнитного по- зиционирования	206

2.4.1. Дальность действия до 1 метра (206).	2.4.2. Дальность действия до 3 метров (208).	2.4.3. Возможное применение САМП в трубном зонде (208).	2.4.4. Глобальная система дополненной реальности (208).	2.4.5. Направленное бурение (209).	2.4.6. Дальность действия до 300 метров (209).
2.5. Выводы по главе 2	209				
Заключение	214				
Терминология	219				
Список литературы к части I	223				
<i>II. Недетерминированные поля</i>					
Предисловие	237				
Глава 1. Состояние вопроса и постановка проблемы	239				
1.1. Введение	239				
1.1.1. Обнаружение активных преград — комбинированное позиционирование (239).	1.1.2. Детектор перехода (239).	1.1.3. Специальная магнитометрия (240).			
1.2. Детектирование электромагнитно-активных преград с подвижных платформ	240				
1.2.1. Подход к преграде в виде ЛЭП (241).	1.2.2. ВЧ-детектирование ЛЭП (242).	1.2.3. Оптическое детектирование ЛЭП (243).	1.2.4. Электростатическое детектирование ЛЭП (243).	1.2.5. Магнитное детектирование ЛЭП (243).	1.2.6. Подземные активные преграды (245).
1.3. Выводы по состоянию вопроса	246				
1.4. Постановка задачи	246				
Глава 2. Состояние объекта исследования	248				
2.1. Источники электромагнитного поля	248				
2.2. Подвижный приемник	248				
2.3. Постановка математической задачи	248				
2.4. Новое рассмотрение проблемы подвижного детектора ЛЭП.	249				
Глава 3. Расчет электромагнитных полей ЛЭП	250				
3.1. Общая информация о ЛЭП	250				
3.2. Расчет магнитного поля ЛЭП на промышленной частоте	251				
3.2.1. Результаты расчета магнитного поля на промышленной частоте (253).					
3.3. Расчет электрического поля ЛЭП на промышленной частоте	256				
3.3.1. Результаты расчета электрического поля на промышленной частоте (259).					
3.4. Электромагнитные поля ЛЭП.	261				
3.5. ВЧ-связь по проводам ЛЭП	262				
3.6. Выводы по расчету полей ЛЭП	263				
Глава 4. Приемники полей ЛЭП.	264				
4.1. Магнитный приемник детектора ЛЭП	264				
4.2. Электрический приемник детектора ЛЭП.	265				

4.3. Приемник э/м поля ЛЭП	266
4.4. Калибровки ПДЛ	267
Глава 5. Алгоритмы оценок дальности и направления на ЛЭП	270
5.1. Обнаружение ЛЭП	270
5.2. Прямые оценки координат по магнитному полю	271
5.3. Прямые оценки координат по электрическому полю	272
5.4. Оценки дальности и направления на малых высотах	273
5.5. Итерационные вычисления координат при комбинированном позиционировании	274
5.6. Выводы по алгоритмам оценки дальности и направления на ЛЭП	275
Глава 6. Цифровая обработка сигналов при детектировании ЛЭП	276
6.1. Общие соображения	276
6.2. Интегратор	276
6.3. Децимация	277
6.4. Центрирование входной последовательности	277
6.5. Цифровая фильтрация	277
6.6. Спектральный анализ	280
6.7. Автокорреляция	281
6.8. Периодический накопитель	282
Глава 7. Описание образца ПДЛ	283
Глава 8. Описание ПМО для образца ПДЛ	286
Глава 9. Описание испытательного полигона	289
Глава 10. Основные результаты полевых работ	292
Глава 11. Анализ результатов разработки и испытаний ПДЛ	303
Глава 12. Выводы по результатам испытаний ПДЛ	310
Глава 13. Перспективы применения ПДЛ	312
Заключение	313
Терминология	315
Список литературы к части II	317

Часть I

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ПОЛЯ

*Светлой памяти родителей,
Василия Семеновича и Зинаиды
Даниловны, посвящается*

Предисловие

Движение — признак жизни — явление, составляющее суть диалектического состояния мира и являющееся предметом исследования в любом проявлении человеческой активности. Измерение движения представляет интерес во многих областях науки и техники.

Заменяя непрерывное движение последовательностью дискретных состояний, можно говорить о наборе координат, характеризующих мгновенное положение и ориентацию твердого тела. Три линейные координаты и три угла Эйлера полностью описывают состояние подвижного объекта в данный момент времени. Частота обновления координат при этом должна быть согласована с динамическими характеристиками подвижного объекта.

Линейное позиционирование на открытом пространстве в больших объемах успешно осуществляется спутниковыми системами позиционирования типа GPS, ГЛОНАСС и др. Такие системы требуют прямой видимости спутников и не работают в закрытых пространствах — в помещениях, под землей. Спутниковые технологии не позволяют также определять ориентацию неподвижного пользователя. Относительно размеров человека точность позиционирования низка. Например, свободное движение руки человека с приемником GPS не удастся измерить с помощью спутниковых технологий с приемлемой точностью даже по линейным координатам, не говоря об ориентации. Частота измерений линейных координат составляет доли герца и существенно повышена быть не может. Состояние атмосферы влияет на точность применения спутниковых систем.

Таким образом, на сегодняшний момент не является до конца решенной задача полного позиционирования подвижного объекта по шести координатам одновременно, в реальном времени, в диапазоне дальностей от долей до сотен метров, а также в закрытых пространствах. Такие ведущие технологии локального позиционирования, как оптическое и инерциальное [1.3–1.6], также не дают полного ответа.

Позиционирование подвижных объектов с описанными особенностями востребовано во многих областях техники [1.4, 1.30, 1.47, 1.58, 1.164]: медицина, строительство, виртуальная (virtual reality — VR) и дополненная реальности (augmented reality — AR), последний этап посадки самолетов; биомеханика, спортивный тренинг, анимация, на-шлемные системы целеуказания и индикации, подземная навигация при направленном бурении и другие. Специальный термин «целеуказание» определяет принципиальную важность измерения движения с указанными особенностями и в военных применениях.

Виртуальная и дополненная реальности являются целями развития современных информационных технологий, чему уделяется значительное внимание в зарубежной практике [1.47]. VR & AR-системы объединяют визуализацию синтезируемых изображений и позиционирование свободно перемещающихся пользователей. Для эффективного управления синтезированными изображениями необходимо знать взаимное линейное положение и ориентацию пользователя и наблюдаемого им объекта. И здесь актуальны обозначенные выше особенности полного позиционирования. Современный мегаполис содержит сложные чередующиеся структуры из металла, железобетона, композитных и слоистых материалов, закрытые помещения. Недоступные и непрозрачные пространства все больше становятся типичной средой обитания человека. Такая среда не прозрачна для привычных радиочастотного и оптического полей, что определяет необходимость поиска нового информационного поля для решения задачи позиционирования в закрытых пространствах. Судя по стремительному технологическому росту цивилизации, можно предположить, что ближайшие потомки откроют путь и безграничные возможности для развития подземных и подводных сооружений, поселений, инфраструктуры и коммуникаций. Не вызывает сомнения, что позиционирование в закрытых пространствах будет востребовано уже в самом ближайшем будущем. Что мы можем предложить нашим славным потомкам для осуществления глобального позиционирования в новой среде обитания? В противном случае у людей не будет возможности развиваться в новых условиях, так как позиционирование и связь — основы современного высокотехнологичного общества.

Решаемая в монографии научная проблема состоит в создании новой отечественной технологии позиционирования подвижных объектов на малых дальностях в реальном времени, действующей в закрытых пространствах, в полном диапазоне углов ориентации, с перспективой неограниченного перемещения подвижного объекта, а также в недетерминированных полях.

В основу решения в настоящей работе положены методы активного магнитного позиционирования — технологии, возникшей в США во второй половине прошлого века. Принцип включает генерирование локального магнитного поля с известным пространственным распределением, измерение его компонент подвижным приемником, сравнение

измеренных значений с вычисленными для предполагаемых координат, итерационную подгонку координат под реальные значения. За рубежом магнитное позиционирование развивается уже более 30 лет. В России разработок в данном направлении до описанных в настоящей работе не было. Отечественная теория, практика и литература по данной теме отсутствует.

В монографии установлена аналогия нескольких известных задач. Специальная магнитометрия [1.10], активное магнитное позиционирование [1.7, 1.8] имеют схожие постановки задач.

Рассмотрены предпосылки возникновения отечественной технологии электромагнитного позиционирования, выразившиеся в виде результатов многолетних работ в крупных проектах. Приведена хронология разработки отечественной технологии электромагнитного позиционирования подвижных объектов. Дана терминология. Рассмотрена мировая история вопроса, даны теоретические основы электромагнитного позиционирования, предложена и описана отечественная технология, устраняющая недостатки зарубежных прототипов, описаны результаты создания и исследования первых отечественных образцов обозначенных систем, определены перспективы их применения и развития. Читатель впервые ознакомится с результатами, полученными в ходе разработки отечественной технологии полного магнитного позиционирования подвижных объектов.

Назначение книги, в попытке наверстать упущенное, состоит в ознакомлении отечественной научно-технической общественности с основами инновационной технологии, не имеющей аналогов в России. Кроме того, приводится первый опыт и знания, полученные при создании отечественной технологии. Автор надеется, что монография позволит зафиксировать достигнутые результаты и ключевые понятия; по сути это первый отечественный справочник по указанному предмету.

Общие положения

В качестве подвижного объекта будем понимать твердое тело, имеющее неизменную форму, к которому можно присоединить некий элемент системы позиционирования — приемник или излучатель, предназначенный для измерения движения. Под данное определение подходят объекты в виде человека, самолета, корабля, автомобиля, экскаватора и т. д.

Не будем здесь рассматривать в качестве подвижного объекта, например, плазму в вакуумной камере термоядерной установки, удерживаемую в требуемом положении при помощи магнитного поля. Также не подходит под данное определение пучок заряженных частиц в апертуре магнитной системы ускорителя, поток газов из сопла реактивного двигателя, положение резистивного участка — «нормальной фазы» в обмотке сверхпроводящего магнита и др. Место возникновения механического или теплового возмущения в нагружаемых конструкциях

также не будем рассматривать как подвижный объект, хотя позиционирование таких объектов актуально в соответствующих областях техники, широко обсуждается в специальной литературе и будет кратко рассмотрено ниже.

Таким образом, рассмотрение будем вести для ограниченного класса подвижных объектов, которые могут быть носителями элемента системы позиционирования, координаты которого и будем отождествлять с подвижным объектом. Естественно, что размеры устанавливаемого элемента системы должны быть минимальны по сравнению с подвижным объектом. Будем считать также, что подвижный объект не содержит магнитомягких материалов.

Позиционирование, или нахождение координат подвижного объекта, определяющих его положение и ориентацию, будем считать основной задачей данного рассмотрения. Рассматриваем позиционирование подвижных объектов в реальном времени и с априори неизвестной траекторией движения. В общем случае будем говорить о движущихся объектах. Позиционирование производится путем расчета координат подвижного объекта исходя из измеренных параметров физического поля. Позиционирование производится в свободном пространстве, вне источников используемого физического поля. Однолинейное позиционирование подразумевает отказ от пространственного разнесения компонентов системы, как в задаче триангуляции. Позиционирование подвижного объекта подразумевает определение его линейного положения и угловой ориентации в неподвижной системе координат [1.1], как показано на рис. 1.1. Положение подвижного объекта в 3D-пространстве будем характеризовать декартовыми координатами x , y , z выбранной реперной точки на объекте и взятыми по осям неподвижной системы. Ориентацию подвижного объекта будем определять углами

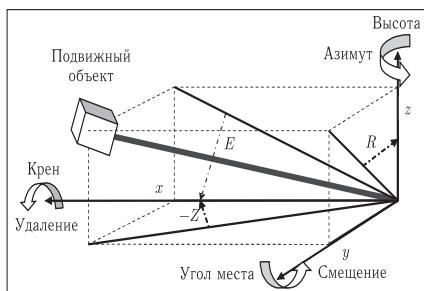


Рис. 1.1. Положение и ориентация подвижного объекта в декартовой системе координат. Здесь x , y , z — линейные координаты подвижного объекта; Z , E , R — углы Эйлера: азимут, угол места и крен соответственно

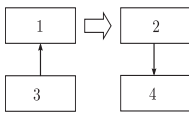


Рис. 1.2. Структура активной системы позиционирования подвижных объектов

Эйлера, отражающими последовательные повороты объекта вокруг координатных осей — азимут (вокруг оси z), угол места (вокруг оси y), крен (вокруг оси x). Положительное направление углов будем определять в направлении правого винта вокруг положительных направлений соответствующих осей декартовых координат. Отсчет угла будем начинать на векторе и заканчивать на оси координат.

Дистанционное позиционирование ведется при помощи системы, структура которой приведена на рис. 1.2. Из рассмотрения исключаются тривиальные методы прямых измерений координат.

Источник физического поля 1 может быть как локальным, так и распределенным, как в GPS/ГЛОНАСС. В геодезии источником служит Солнце, в магнитной навигации — токи в ядре Земли, создающие защитное магнитное поле планеты. Генерирующее оборудование 3 решает задачу возбуждения физического поля. Подвижный приемник 2 устанавливается на объект позиционирования. Вычислительное оборудование 4 решает измерительную и вычислительную задачи. Указанной структурой обладают все современные системы позиционирования, включая GPS и ГЛОНАСС.

О предполагаемом читателе

Вопросы, затронутые в монографии, могут быть интересны для многих профессий. Врач, перемещающий зонд внутри тела пациента, хотел бы знать его точное положение, не имея прямой видимости. Для управления бортовым оборудованием летчик заинтересован в получении координат цели, выбранной только поворотом головы. В направленном бурении знание текущих координат инструмента позволяет эффективно управлять траекторией скважины. Разработчики систем виртуальной реальности используют позиционирование для совмещения компьютерных образов с наблюдаемыми объектами реального мира. Защита от столкновений с проводами ЛЭП актуальна в авиации.

В России работа будет интересна специалистам по информационным технологиям, по авиационному приборостроению, разработчикам систем виртуальной и дополненной реальности, специалистам в области биомеханики, горным инженерам, специалистам по электрофизике, студентам и аспирантам, обучающимся по информационным дисциплинам.

Цель монографии состоит в привлечении внимания специалистов в разных областях науки и техники к одной из современных наукоемких технологий — электромагнитному позиционированию подвижных объектов на относительно малых расстояниях, от долей метра до 2–3 км, в том числе и в закрытых пространствах.

Данная работа не является руководством по изготовлению систем позиционирования, да это и невозможно, так как ограниченный объем монографии позволяет описать только фундаментальные вопросы по основным специальностям, тогда как работа конкретной системы определяется бесчисленным множеством особенностей.

Особенностью работы является широкий спектр научно-технических направлений, объединенных в рамках одного проекта, среди которых:

- датчики физических величин,
- электродинамика,
- магнитная технология,
- магнитные и электромагнитные измерения,
- аналоговая и цифровая обработка сигналов,
- импульсная силовоточная электротехника,
- радиоконструирование,
- вычислительная математика,
- аналитическая геометрия,
- программирование систем реального времени,
- теплофизика,
- полупроводниковые технологии,
- метрология и многое другое.

Автор надеется, что предложенная работа будет интересна специалистам, интересующимся современными информационными технологиями и желающим повысить свои знания в смежных областях науки и техники. В работе отражены лишь концептуальные вопросы, которые должны позволить восстановить все многочисленные детали, не описанные здесь, но имеющие принципиальное значения в работе с конкретным пользователем или заказчиком.

Первая отечественная монография на данную тему, естественно, будет содержать некоторый минимум опечаток и неточностей. Заранее соглашаясь с этим фактом, автор рассчитывает на благосклонность и доброжелательность читателя. Замечания, предложения, а также сообщения об обнаруженных опечатках и неточностях просьба направлять в редакцию.

Глава 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

1.1. Введение

1.1.1. Начальные соображения по сути рассматриваемых вопросов. Позиционирование подвижных объектов в реальном времени является технологией приборостроения, областью применения измерительной техники, в частности — средствами исследования движения тела человека, оборудования или инструмента в различных областях науки и техники.

Координаты подвижного объекта всегда дискретны для стороннего наблюдателя, благодаря наличию двух самостоятельных и разделенных во времени процедур — подстройки измерителя под смещающийся объект и считыванию координат. По дискретным значениям координат можно построить траекторию движения, рассчитать мгновенное положение и ориентацию объекта в произвольный момент времени между измерениями, используя методы интерполяции, предсказать будущее положение объекта с помощью методов оптимальной фильтрации [1.2]. Так и в нашем случае будем рассматривать дискретно-периодический процесс позиционирования, когда процесс вычисления координат чередуется с измерениями компонент физического поля подвижным приемником.

Для потребителя существенной является частота выдачи выходных данных — координат, определяемая как измерительными средствами, так и применяемыми математическими процедурами:

$$f_0 = 1/(T_{\text{и}} + T_{\text{в}}),$$

где f_0 — частота выдачи выходных данных, $T_{\text{и}}$ — время измерений компонент физического поля, $T_{\text{в}}$ — время вычисления координат.

Будем считать, что за время измерения объект не изменяет своих координат, что выполняется при достаточно высокой частоте измерений, и позволяет рассматривать движение как последовательность

статических положений, мгновенно сменяющих друг друга. Специфическая динамическая ошибка позиционирования движущегося объекта, связанная с конечной величиной времени измерения, появляется только в ограниченном числе задач, которые будут рассмотрены ниже.

Под полным позиционированием будем понимать одновременное определение линейных и угловых координат подвижного объекта в заданной системе координат, выполняемое одной информационно-измерительной системой.

Будем также разделять позиционирование на пассивное и активное. Пассивное позиционирование осуществляется без локального источника поля или при использовании естественного поля Земли — магнитного, гравитационного, электрического. На таких полях построена магнитная навигация, инерциальное позиционирование. Визуальная геодезия использует прямую видимость объектов чаще всего в солнечном свете. Пассивные методы не позволяют выполнить полное позиционирование в реальном времени.

Активное позиционирование. Активное позиционирование подразумевает создание локального физического поля с известным пространственным распределением в зоне перемещения подвижного объекта. Примерами являются такие известные технологии, как GPS, ГЛОНАСС, радиолокация, акустическое зондирование, оптические сканирующие системы [1.3, 1.4, 1.5]. Отдельно стоит магнитное позиционирование, которому посвящена настоящая работа.

Наиболее близка к активному позиционированию задача определения расстояния до объекта, знание которого вместе с направлением на объект позволяют определить его линейное положение в системе координат наблюдателя.

Известны три основных принципа бесконтактного получения информации о расстоянии от заданной точки до удаленного объекта [1.6]:

- измерение времени распространения энергии с известной скоростью между излучателем с известными координатами и интересующим объектом;

- измерение направления на объект из двух фиксированных и разнесенных точек пространства с последующим решением треугольника по одной стороне и двум углам (триангуляция);

- использование априорной зависимости выбранного параметра поля, генерируемого излучателем, от расстояния до объекта.

Первый принцип составляет суть активной локации удаленных объектов, которая может быть электромагнитной, оптической или акустической. Второй метод — триангуляционный, является основой геодезии, сейсмологии, широко применяется в астрометрии. Третье направление требует калиброванных зависимостей параметров выбранного физического поля от расстояния. В любом случае используется некое физическое поле, обеспечивающее связь приемника с излучателями.

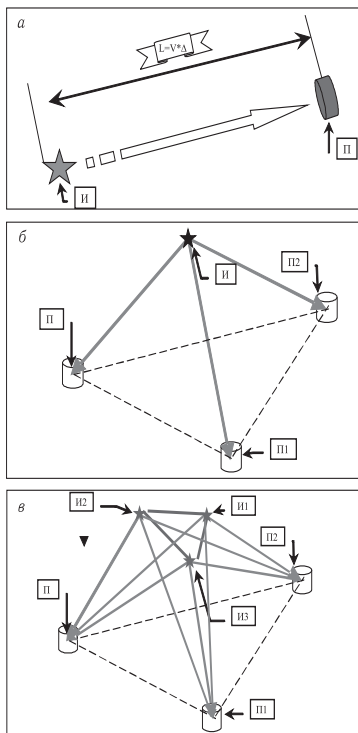


Рис. 1.3. Схемы позиционирования: *a* — один излучатель и один приемник — дают только расстояние; *б* — один подвижный излучатель и три разнесенных в пространстве приемника (или наоборот) позволяют определять линейное положение движущегося объекта (ГЛОНАСС); *в* — три приемника и три излучателя дают все шесть координат — положение и ориентацию

Первые два метода можно применить для полного позиционирования подвижного объекта путем создания многоканальных систем с разнесенными в пространстве приемниками и излучателями (см. рис. 1.3, *a*). Для определения только линейных координат подвижного объекта требуется один подвижный излучатель и три разнесен-

ных стационарных приемника [1.12], как показано на рис. 1.3, б. На рис. 1.3, в показаны уже три неподвижных излучателя и три связанных приемника на подвижном объекте, дающие возможность полного позиционирования. Увеличение пространственного разнесения элементов в схеме 1.3, в будет способствовать повышению точности позиционирования. Однако такой подход не всегда годится в связи с существующими габаритными ограничениями, как правило, на подвижном объекте. Кроме того, для работы такой системы необходима прямая видимость между всеми элементами, что не всегда возможно. Сложности возникают, когда размеры подвижного объекта сравнимы с расстоянием между приемником и излучателем. В этом случае сам объект закрывает прямую видимость между парами — излучатель–приемник при значительных углах ориентации. Прямая видимость нарушается также при наличии границы раздела сред между парой приемник–излучатель, когда объект позиционирования находится под землей, под водой, в закрытом пространстве.

В двух первых методах решается задача определения линейного положения подвижного объекта, а под ориентацией понимают направление движения — траектория, определяемая из результатов последовательных измерений линейных координат. Лишь третий метод позволяет обойти обозначенные трудности при соответствующем выборе физического поля, обеспечивающего прозрачность как объекта позиционирования, так и границ раздела сред в подавляющем большинстве практических случаев.

Именно примером третьего подхода из указанных выше могут служить технологии магнитного позиционирования [1.7, 1.8], детектирование активных преград [1.9], специальная магнитометрия [1.10]. Все три приведенные задачи решаются на основе использования априорной зависимости выбранного параметра поля, генерируемого излучателем. Во всех случаях имеют место разновидности решения обратной задачи магнитостатики — по результатам магнитных измерений определяют параметры источника магнитного поля [1.11]. Во втором случае используются результаты дополнительных измерений. Третий случай (СП) подразумевает накопление дополнительной информации по мере движения наблюдателя относительно искомого объекта.

Решение задачи полного позиционирования подвижного объекта «в точке» в реальном времени на малых расстояниях с минимизацией влияния окружающего интерьера было выполнено лишь во второй половине прошлого века [1.13, 1.14]. Специальные системы — трекеры (tracker) используют, как будет показано ниже, различные физические поля — гравитационное, оптическое, магнитное как порознь, так и в комбинациях. Особенности построения современных трекеров посвящена настоящая работа.

Во второй части монографии на примере ЛЭП рассмотрена технология обнаружения активных преград, генерирующих электромагнитные поля в окружающем пространстве — ЛЭП-детектор. Данный случай

также относится к активному позиционированию в недетерминированных полях.

Детектор перехода. В магнитной технологии, затрагивающей явление сверхпроводимости, существует термин: квенч-детектор, от английского quench — переход [1.15]. Имеется в виду переход сверхпроводника из сверхпроводящего состояния в нормальное — резистивное. Такие переходы связаны с ростом температуры проводника и представляют определенную угрозу для магнитной системы, изготовленной из сверхпроводящего кабеля, в связи с интенсивным выделением тепла на участке проводника, перешедшем в нормальное состояние, что требует защитных мероприятий во избежание теплового повреждения обмотки. Таким образом, ясно, что квенч-детектор является функциональным аналогом ЛЭП-детектора, также выполняя функцию начального обнаружения и позиционирования потенциального источника опасности.

Специальная магнитометрия. Известно направление специальной магнитометрии [1.10], направленной на обнаружение и классификацию скрытых объектов, искажающих однородность магнитного поля Земли. Специальная магнитометрия (СМ) — комплекс средств и методов прикладной магнитометрии, использующий высокочувствительные и точные приборы, позволяющие измерять с движущегося носителя составляющие и модуль вектора индукции слабого стационарного или медленно меняющегося (до сотен Гц) магнитного поля на уровне магнитного поля Земли с погрешностью менее единиц нТл в космосе, океане или других средах. Технология СМ создавалась в военных целях на конкурентной основе в ведущих странах мира во второй половине прошлого века, в основном для поиска пассивных ферромагнитных объектов, скрытых под водой — подводных лодок и других объектов, и здесь достигнуты впечатляющие результаты. В СССР на данную задачу работал большой коллектив людей, объединенных в отдельную отрасль промышленности. Как будет показано ниже [1.35], СМ-технология реализована в магнитном позиционировании в виде метода постоянного магнитного поля. Таким образом, и здесь видна аналогия с указанными технологиями как по задачам, так и по составу оборудования и по методам решения.

Итак, просматривается функциональная аналогия задач активного магнитного позиционирования, детектирования источника опасности, включая ЛЭП, и задач специальной магнитометрии по научным целям, средствам и результатам. Указанные задачи составляют общее научное направление, которое должно развиваться с учетом совместных достижений для получения оптимального практического результата.

1.1.2. Выбор физического поля для активного позиционирования. Для активного позиционирования понадобится поле, у которого известны пространственное распределение и скорость распространения. Активные методы используют различные виды управляемой энергии (поля или волны), генерируемой источниками с фиксированным

положением, или самим подвижным объектом. Исключим из рассмотрения поле проникающего излучения, как противоречащее соображениям здравого смысла. Также не будем рассматривать механические системы позиционирования, требующие прямого контакта с объектом и имеющие ограниченное применение в некоторых областях, связанных, чаще всего, с исследованием движения в весьма ограниченной зоне перемещения.

По происхождению и степени обусловленности физические поля можно разделить на следующие классы:

- естественное, присущее нашей среде обитания;
- искусственное, создаваемое специальными устройствами — генераторами;
- детерминированное, для которого свойства полностью известны в любой момент времени;
- недетерминированное — где свойства источника неизвестны полностью на момент начала решения задачи позиционирования.

Как показано ниже, основным вариантом будет искусственное детерминированное поле, но и другие варианты рассмотрены в необходимых случаях. Наиболее известны и применяются в позиционировании следующие физические поля: акустическое, оптическое, гравитационное, магнитное, электрическое, электромагнитное распространяющееся, тепловое. Выбор конкретного типа физического поля, позволяющего наилучшим образом решить конкретную задачу позиционирования, рассмотрен ниже.

Дальнейшая задача состоит в выборе искусственного детерминированного физического поля, которое наилучшим образом соответствует следующим требованиям:

- время распространения физического поля между элементами системы позиционирования должно быть много меньше периода обновления координат во всем диапазоне линейных перемещений подвижного объекта,
- интерьер, среда распространения и присутствие подвижного объекта не должны оказывать существенного влияния на пространственное распределение физического поля в зоне перемещения или это влияние должно быть малым и воспроизводимым,
- для обеспечения требуемой чувствительности к линейным перемещениям физическое поле должно иметь достаточные линейные градиенты компонент в пределах зоны перемещения,
- поле должно достаточно легко и точно измеряться в каждой точке внутри зоны перемещения,
- окружающая среда должна содержать минимум шумов и помех аналогичной природы как естественного, так и искусственного происхождения,
- физическое поле не должно оказывать вредного влияния на человека и окружающую среду.

Проведем далее сравнительный анализ существующих физических полей на предмет соответствия сформулированным требованиям.

Акустическое поле — АП. АП является динамическим процессом и может существовать только в виде упругой волны [1.16, 1.17], характеризующейся частотой, амплитудами колебания давления среды, перемещения и колебательной скорости, которые однозначно связаны друг с другом через упругие свойства среды распространения. АП на нулевой частоте невозможно, так как при окончании действия источника все волновые процессы в среде распространения затухают во всем объеме. При отсутствии упругой среды распространения (в вакууме) акустическое поле существовать не может.

Акустические волны в газах характеризуются скалярным потенциалом ϕ , позволяющим рассчитать амплитуду скоростей колебательного движения частиц $v = \text{grad } \phi$. В случае акустических волн в твердых телах необходимо дополнительно учитывать векторный потенциал акустического поля, характеризующий поперечные упругие волны [1.18].

Для плоских волн волновое уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \left(\frac{1}{c^2} \right) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2},$$

где c — скорость распространения волны.

Решение волнового уравнения выражается в виде синусоидальной волны, бегущей, скажем, в направлении x :

$$p = p_0 \exp(-\delta x) \sin(\omega t + kx + \varphi),$$

где p_0 — амплитуда волны, δ — коэффициент поглощения волны средой распространения, $k = 2\pi/\lambda$ — волновой коэффициент,

В воздухе и жидкости деформации сдвига нет, поэтому в большинстве практических случаев АП в таких условиях существует в виде продольной волны, характеризующейся одномерным распределением колебательных составляющих. На больших расстояниях от излучателя такую акустическую волну можно рассматривать как плоскую волну.

Время распространения из-за малой величины скорости звука в воздухе время пробега акустической волны расстояния в 1 метр (средний размер зоны перемещения в большом количестве применений) уже сравнимо с периодом обновления данных в задаче позиционирования. При большем удалении от излучателя задержка недопустимо возрастает.

Влияние интерьера приводит к отражению акустической волны, эффективность которого R определяется соотношением волновых сопротивлений среды ρc_1 и интерьера ρc_2 :

$$R = \left(\frac{\rho c_2 - \rho c_1}{\rho c_2 + \rho c_1} \right)^2.$$

Учитывая, что $\rho c_2 \gg \rho c_1$, коэффициент отражения акустического поля в воздухе от твердой преграды R стремится к 100%, что приводит в замкнутом объеме к длительно затухающей реверберации.

Влияние окружающей среды — скорость звука в воздухе обратно пропорциональна плотности:

$$c = \sqrt{K/\rho}, \quad (1.1)$$

где K — модуль объемной упругости, ρ — плотность невозмущенной среды.

Зависимость плотности воздуха от температуры определяет сильное влияние температуры на скорость звука:

$$c = (c_0 + 0,6T) \text{ [м/с]},$$

где $c_0 = 331,6$ м/с — скорость звука в воздухе при 0°C , T — температура по Цельсию.

Зависимость скорости звука от давления гораздо ниже, чем от температуры, в силу пропорционального изменения обоих компонент правой части в формуле (1.1), данной выше, от давления. Поэтому в диапазоне давления воздуха, обеспечивающего выживаемость человека, влиянием давления на скорость звука можно пренебречь.

Линейные градиенты. Амплитуда волны p_0 изменяется с расстоянием в соответствии с коэффициентом поглощения звука в среде распространения. Для продольных волн в воздухе коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты [1.16] и имеет пренебрежимо низкое значение на гиперзвуковых частотах, когда длина волны становится сравнима с межатомным расстоянием. Таким образом, акустическое поле в воздухе на ультразвуковых частотах является слабоградиентным.

Измеряемость. Акустические излучатели и приемники, выполняемые, чаще всего, на основе кварца или пьезокерамики, например типов ЦТС-19, ЦТС-23, могут иметь минимальные размеры масштаба нескольких миллиметров.

Шумы окружающей среды. Интенсивный широкополосный акустический шум является типичным атрибутом современной жизни. В авиации шум двигателя достигает болевого предела.

Из сказанного следует, что акустическое позиционирование возможно только по методу измерения времени пробега волны между излучателем и приемником. При этом для полного позиционирования необходимы минимум три излучателя и три приемника, как показано выше. Скорость распространения низкая. Несмотря на приемлемую измеряемость, поле имеет малые линейные градиенты, сильное влияние интерьера и окружающей среды. Высокая отражающая способность подвижного объекта требует прямой видимости между приемником и излучателем акустической системы позиционирования, что сокращает

диапазоны углов ориентации, обеспечиваемые такой системой позиционирования. В результате акустическое позиционирование не находит широкого применения в задачах позиционирования на малых расстояниях.

Оптическое поле. Видимый свет есть электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda = 0,4-0,8$ мкм [1.19]. Поэтому для анализа оптического поля применимы те же уравнения Максвелла, что и для электромагнитного поля. Свет переносится частицами — фотонами, которые поглощаются или излучаются целиком, не имеют массы покоя, распространяются в вакууме со скоростью около $3 \cdot 10^8$ м/с. С пренебрежением волновыми эффектами (т.е. считая $\lambda \rightarrow 0$) имеет место геометрическая оптика, которая позволяет давать упрощенное трактование оптических эффектов. Однако существующие в реальности дифракция и интерференция подтверждают волновую природу света.

Влияние интерьера. Элементы интерьера, включая сам подвижный объект, как правило, не прозрачны для света. Поэтому между элементами оптической системы позиционирования необходима прямая видимость. При падении на преграду свет преломляется и отражается, создавая «блики». Коэффициент отражения определяется степенью черноты отражающей поверхности и может стремиться к 100%.

Влияние окружающей среды. Наличие тумана, дыма, пыли могут полностью перекрыть оптическую видимость. Таким образом, окружающая среда сильно влияет на работу системы позиционирования.

Линейные градиенты. Оптическое поле слабоградиентное, так как в чистом воздухе затухание света пренебрежимо мало.

Измеряемость. Измерительные и генерирующие оптические элементы имеют рекордно низкие размеры, находящиеся на уровне десятка микрон.

Шумы окружающей среды. Воздействие прямого солнечного света прекращает работу оптических систем позиционирования.

Таким образом, в основе оптического позиционирования лежит измерение направлений, т.е. триангуляция подвижного излучателя несколькими разнесенными в пространстве приемниками, или наоборот [1.20]. Простота решения триангуляционной математической задачи и высокая скорость распространения поля выдвигают оптические методы позиционирования на передовые позиции по быстродействию, на порядок превосходя остальные методы. Приемлемая измеримость является дополнительным преимуществом. Необходимость прямой видимости снижает диапазоны углов ориентации. Сильное влияние внешних засветок ограничивает применение оптического поля для позиционирования подвижных объектов. Так, известны оптические наשלменные системы позиционирования, включая отечественную систему «Щель» [1.5]. Недостатками технологии являются ограниченные диапазоны углов из-за закрытия шлемом видимости датчиков, влияние

прямого солнечного света, относительно большие габариты бортового оборудования. Увеличение числа стационарных приемников-видеокамер, принятое в современных системах оптического позиционирования [1.21], неприемлемо для бортовых систем и усложняет использование оптического принципа в игровых технологиях.

Гравитационное поле. Потенциальное (аналог электростатического) гравитационное поле выражается в силе тяжести, действующей на все тела и направленной к центру масс Земли.

Время распространения. Рассуждения о скорости распространения гравитационных волн лишены смысла. Генерировать поле тяжести сколько-нибудь существенной величины на настоящем этапе не представляется возможным, поэтому речь может идти только о пассивном позиционировании в существующем поле тяжести.

Влияние интерьера и окружающей среды исключено.

Линейные градиенты. Потенциал поля тяготения φ выражается через отношение потенциальной энергии тела mgh к его массе m : $\varphi = gh$. Напряженность поля тяжести, как для всех потенциальных полей, имеет вид: $g = -\text{grad} \varphi$. С другой стороны, напряженность гравитационного поля, или ускорение свободного падения g , есть отношение силы, действующей на тело F , к его массе m : $g = F/m$, одинаково для всех тел и зависит от географической широты φ и высоты над уровнем моря h [1.18]:

$$g = 9,78049 (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi) - 0,0003086h. \quad (1.2)$$

На полюсе вес тела на $\sim 0,5\%$ больше, чем на экваторе. На высоте 1000 метров вес уменьшается в среднем на 3%. Из (1.2) видно, что градиент силы тяжести по поверхности Земли находится в пределах 1%, что недостаточно для позиционирования подвижных объектов на сформулированных дальностях и с требуемой точностью.

Измеряемость. Прибором, предназначенным для измерений в поле гравитации, является инклинометр — устройство, регистрирующее отклонение выбранного направления от направления действия силы тяжести. В результате гравитационное позиционирование объективно может дать только одну координату подвижного объекта — угол отклонения от направления в зенит. Но это измерение лишено влияния шумов, интерьера и окружающей среды. Другими приборами, используемыми инерциальные свойства материи, являются гироскопы и акселерометры, комбинации которых используются в инерциальном позиционировании [1.22]. Статические измерения координат таким методом невозможны из-за присутствующего дрейфа. Таким образом, гравитационное поле приемлемо для частичного позиционирования. Отсутствие влияния интерьера и окружающей среды, приемлемая измеряемость

определяют преимущества метода. Вместе с тем малые пространственные градиенты исключают линейное позиционирование на поверхности Земли.

Стационарное магнитное поле. Связь индукции магнитного поля со свойствами источников описывается уравнением Максвелла:

$$\int (H dl) = \mu_0 I,$$

которое говорит, что магнитное поле в любой точке зоны перемещения определяется током, протекающим через удаленный источник. Пропорциональность поля и тока в отсутствии ферромагнетиков является важным свойством стационарного магнитного поля, позволяющим вводить нормировку измеряемых значений на ток питания электромагнита для любых координат подвижного приемника.

Влияние интерьера и окружающей среды определяется материальным уравнением Максвелла, которое характеризует влияние среды [1.11]:

$$B = \mu_0 H,$$

являющееся пренебрежимо малым в чистом окружающем пространстве, свободном от намагничиваемого металла. Например, земной грунт имеет магнитную проницаемость на уровне $\mu = 1,003$; воздух, вода и диэлектрики — еще меньше, дюралюминий имеет $\mu = 1,0008$. Магнитная проницаемость тела человека также близка к единице. Таким образом, человек, как и любой немагнитный интерьер (включая электропроводящие материалы), прозрачен для стационарного магнитного поля и не создает преград для его свободного проникновения. Отражений и преломлений силовых линий не происходит. Стационарное магнитное поле может проникать практически в любую среду, включая подземные сооружения и закрытые объемы зданий, непрозрачные для других полей. Приведенные цифры определяют минимальное влияние окружающего интерьера на распределение стационарного магнитного поля, и его инвариантность к погодным условиям.

Линейные градиенты. Пространственное распределение магнитного поля вокруг вызывающего его элемента тока определяет закон Био–Савара–Лапласа [1.23]:

$$dB = \mu\mu_0 \cdot I \left(\frac{dl}{R^2} \right) \sin \varphi. \quad (1.3)$$

Выражение (1.3) показывает, что магнитное поле, создаваемое элементом тока, является сильноградиентным, так как достаточно быстро падает при удалении от источника. Закон падения поля с расстоянием изменяется от гиперболы для линейных токов до обратной кубической зависимости для малых дипольных источников. Существующая теория позволяет точно рассчитать распределение магнитного поля в сво-

бодном пространстве без ферромагнетиков при любом распределении токов.

Время распространения. Распространение магнитного поля от источника происходит со скоростью света $3 \cdot 10^8$ м/с, т. е. практически мгновенно для рассматриваемых расстояний. Таким образом, задержка на распространение поля пренебрежимо мала по сравнению с требуемым периодом обновления данных.

Измеряемость. Как будет показано ниже, средства измерения индукции магнитного поля достаточно развиты. Размеры чувствительного элемента могут быть доведены до величин, сопоставимых с современными оптическими элементами, — десятки микрон.

Шумы окружающей среды. Сильное падение стационарного магнитного поля с расстоянием определяет скрытность источников такого физического поля. Действительно, магнитные шумы в свободном пространстве на значительных расстояниях могут создаваться только объектами крупного масштаба, к которым может быть отнесены, например, линии электропередач (ЛЭП), генерирующие магнитное поле на сравнительно больших расстояниях. Поэтому атмосферные магнитные шумы находятся на пренебрежимо малом уровне.

Влияние на человека и окружающую среду. Использование стационарного магнитного поля на уровне естественного магнитного поля Земли не имеет медицинских противопоказаний. Таким образом, стационарное магнитное поле чрезвычайно удобно для решения задачи полного позиционирования в отсутствии магнитомягких материалов.

Электростатическое поле. Источником электростатического поля служат заряды:

$$\operatorname{div} D = \rho.$$

Если в магнитоэлектростатике стационарные токи не изменяются при добавлении или удалении части из них, то в электростатике ситуация другая — добавление любого нового стационарного заряда вызывает перераспределение всех существующих зарядов благодаря емкостным связям между ними. Поэтому с точки зрения позиционирования распределение электростатического поля в зоне перемещения определяется интерьером, на элементы которого будет наводиться заряд от источника поля.

Влияние окружающей среды. Электрическое смещение D и напряженность электрического поля E связаны через диэлектрическую проницаемость среды:

$$D = \epsilon_0 \epsilon E.$$

Качественная разница во влиянии окружающей среды на электростатическое поле по сравнению с магнитоэлектростатическим полем выражается в том, что диэлектрическая проницаемость элементов интерьера гораздо больше отличается от соответствующей величины для свобод-

ного пространства, чем магнитная проницаемость. Так, относительная диэлектрическая проницаемость воды и человеческого тела может достигать $\varepsilon = 8-10$, а диэлектрических конструкционных материалов — до сотен единиц. Минимальная электрическая проводимость элементов интерьера, включая земную поверхность, достаточна для стекания статических зарядов и выравнивания удаленных потенциалов. В результате на проводящей поверхности тангенциальная компонента напряженности E равна нулю, т. е. такая поверхность эквипотенциальна, и силовые линии электрического поля всегда входят перпендикулярно земной поверхности. Таким образом, интерьер существенно исказит распределение электрического поля в зоне перемещения, расчетная модель поля станет невозможной в таких условиях, так как будет в сильной степени определяться атмосферными условиями — влажностью, достаточной для стекания зарядов по поверхностям интерьера. Подвижный объект и его положение также станут влиять на распределение потенциала в рабочей зоне за счет изменения заряда, наведенного от источника через емкостную связь. Электрическое поле на подвижном объекте будет иметь преимущественно радиальное направление, а наведенный потенциал будет представлять неудобства для оператора. В любом объеме, включая и зону объемных зарядов, для электростатического поля выполняется условие $\text{rot } E = 0$ [1, 23], означающее, что электростатическое поле имеет пространственное распределение, качественно отличающееся от распределения магнитного поля — поле имеет безвихревой, потенциальный характер, а электрические силовые линии имеют начало и конец. Отсюда следует, что электростатическое поле в принципе будет замыкаться через интерьер и избежать его влияния не удастся.

Измеряемость. В рабочей зоне перемещения, не содержащей объемных зарядов, скалярный потенциал электростатического поля в произвольной точке наблюдения удовлетворяет уравнению Лапласа $\text{div grad } U = 0$ и рассчитывается как линейный интеграл вектора напряженности E , взятый по произвольному пути от точки A до точки нулевого потенциала:

$$U_A = \int (E dl) = U_B - U_A.$$

Напряженность электростатического поля в точке наблюдения рассчитывается как градиент скалярного потенциала по выбранному направлению:

$$E = -\text{grad } U = -\nabla U, \text{ или } E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}.$$

С другой стороны, можно измерять потенциал локального электрического поля, наводимого генератором такого поля на подвижный приемник. В этом случае измеряемой величиной будет сигнал с дели-

теля, составленного из емкостей измерительного преобразователя к источнику, и к базовой поверхности, относительно которой ведется измерение. В обоих случаях электрическое поле измерять сложнее, чем магнитное, размеры чувствительных элементов, соответственно, больше. Кроме того, емкостной принцип измерения обостряет высокочастотные компоненты шума.

Линейные градиенты. Дальность влияет на интенсивность электрического поля так же, как и для магнитного поля.

Шумы — электрическое поле на частоте 50 Гц генерируется вокруг ЛЭП, а планета Земля имеет естественное электростатическое поле, напряженность которого достигает 180 В/м у поверхности, падает с высотой и испытывает возмущения в связи с грозовой активностью. Стеkanie зарядов с заряженных поверхностей приводит к образованию интенсивных электрических помех. Таким образом, электрических шумов в природе больше, чем магнитных, настолько, что даже магнитный датчик будет чувствовать электрические помехи без принятия необходимых защитных мер. Таким образом, электростатическое поле менее удобно для решения задачи полного позиционирования в основном из-за сильного влияния интерьера и окружающей среды. Время распространения и линейные градиенты аналогичны параметрам для магнитного поля. Измеряемость — достаточно сложная, шумы окружающей среды — более высокие.

Электромагнитное распространяющееся поле. При повышении частоты изменения магнитного поля в пространстве возникают токи смещения, которые, в свою очередь, создают собственное магнитное поле, поддерживающее ток смещения. В результате образуется электромагнитная волна, которая распространяется в пространстве на более значительные расстояния по сравнению со стационарными полями. Пространственное уменьшение амплитуды распространяющейся электромагнитной волны гораздо меньше, чем для стационарных магнитного и электрического полей. Именно поэтому радиосвязь, радиовещание и телевидение основаны на излучении и приеме распространяющихся электромагнитных волн. Нижняя граница радиодиапазона находится в районе 3 кГц. За верхнюю границу принято значение 3000 ГГц [1.24]. Выше находятся световые волны, рентгеновское излучение и γ -излучение, где становятся существенными эффекты квантовой электродинамики. Скорость распространения э/м полей любой частоты равна скорости света. Почему бы и позиционирование не построить на распространяющихся волнах, обоснованно надеясь на увеличение зоны действия такой системы?

Влияние интерьера и окружающей среды. Связь между амплитудами магнитного H_m и электрического E_m полей в распространяющейся волне осуществляется, в общем случае, через волновое сопротивление среды распространения Z_c [1.25], которое содержит комбина-

цию магнитной μ_a и диэлектрической ε_a проницаемостей, являющихся в данном случае комплексными величинами: $Z_c = E_m/H_m = \sqrt{\mu_a/\varepsilon_a}$. Токи смещения, преобладающие в распространяющейся волне над токами проводимости, определяются, в основном, диэлектрическими свойствами среды распространения. Поэтому на распространение э/м поля влияет как состояние атмосферы, так и тело оператора, интерьер, земная поверхность [1.26]. В отличие от статических распространяющееся поле отражается, преломляется, проявляя в этом смысле недостатки, схожие с описанными выше в акустическом и оптическом полях.

Линейные градиенты. Зависимость интенсивности радиочастотного поля от дальности в свободном пространстве более сложная, чем для стационарных полей:

— дальняя зона: $kr \gg 1$, поле падает по закону $1/r$ как для B , так и для E ;

— ближняя зона: $kr \ll 1$, $1/(kr)^3$ для E и $1/(kr)^2$ для B ; действует закон Био-Савара;

— промежуточная зона $kr \cong 1$, переход между двумя зависимостями.

Здесь $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu} = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda$. Например, для частоты 50 кГц размер промежуточной зоны составляет 1 км.

Измеряемость. Измеряться может как электрическая, так и магнитная компоненты распространяющегося поля. Разделение компонент требует принятия специальных конструктивных мер и зависит также от интерьера и окружающей среды. Итак, радиочастотное распространяющееся электромагнитное поле не лучшим образом подходит для решения задачи позиционирования из-за сильного влияния интерьера и среды распространения, типичного для всей радиосвязи. Шумы окружающей среды содержат весь известный радиодиапазон.

Выводы по выбору физического поля. Проведенный анализ показывает, что наиболее подходящим для активного позиционирования является стационарное магнитное поле, обладающее максимальной скоростью распространения, высокими линейными градиентами, низкими шумами, малыми размерами измерительных средств. Только магнитное поле позволяет работать в закрытых пространствах в связи с минимальным влиянием интерьера и окружающей среды. Поэтому данное поле менее других подвержено потере обусловленности при закрытии подвижным объектом прямой видимости между излучателем и приемником. В частности, магнитное поле не видит преграды в виде головы пилота в наשלемых системах, что и определяет более широкие диапазоны углов Эйлера, обеспечиваемые данным методом. Таким образом, по совокупности параметров стационарное магнитное поле наилучшим образом удовлетворяет сформулированным требова-

ниям. Итак, дальнейшее рассмотрение посвятим системам активного магнитного позиционирования.

1.1.3. Базовые методы магнитного позиционирования. Известна технология активного магнитного позиционирования (МП) подвижных объектов, основанная на генерировании магнитного поля с известным пространственным распределением в зоне перемещения подвижного объекта. Компоненты данного поля, измеренные подвижным приемником, сравниваются с вычисляемыми значениями для предполагаемых координат подвижного приемника, в результате чего координаты подвижного приемника вычисляются в реальном времени как результат итерационного приближения предполагаемых координат к реальным.

В мировой практике известны следующие способы магнитного позиционирования подвижных объектов, отличающихся характером генерируемого магнитного поля:

- 1) системы постоянного поля, использующие магниты или электромагниты для генерирования стационарного во времени магнитного поля [1.35];
- 2) системы, использующие непрерывные синусоидальные магнитные поля ортогональной ориентации, генерируемые на разных частотах — АС-способ [1.7] (англ. alternating current);
- 3) системы, использующие импульсные магнитные поля чередующейся ориентации — DC-способ [1.8] (англ. direct current).

Системы постоянного поля чувствительны к магнитному полю Земли (МПЗ), не производят полного позиционирования и поэтому не нашли широкого применения к настоящему времени. Два оставшихся способа позволяют определять шесть координат подвижного объекта — три линейных координаты и три угла, определяющих ориентацию объекта — азимут, угол места и крен. Блок-схема современной системы активного магнитного позиционирования (САМП) приведена на рис. 1.4. В двух последних системах неподвижный в заданной системе координат генератор детерминированного магнитного поля (ГДМП) 1 содержит, как правило, три обмотки с током, объединенные с разной ориентацией. Подвижный приемник 2 содержит, чаще всего, три ортогональных датчика магнитного поля, как будет разъяснено ниже.

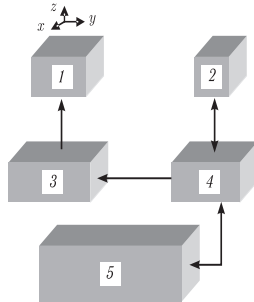


Рис. 1.4. Блок-схема современной САМП

Контроллер 3 управляет работой генератора магнитного поля. Аналого-цифровой интерфейс 4 преобразует аналоговые сигналы от подвижного приемника в коды и вырабатывает цифровые сигналы, необходимые для работы контроллера. Вычислитель 5 управляет работой всей системы и решает математическую задачу нахождения координат подвижного приемника относительно зафиксированного генератора поля. На рис. 1.5, а приведена диаграмма полей, генерируемых АС-системой.

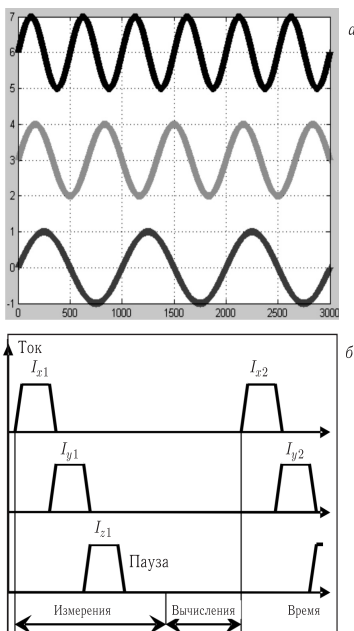


Рис. 1.5. Диаграмма изменения магнитных полей, действующих в АС/DC-системе магнитного позиционирования

Независимые поля в АС-системе имеют разные, как правило, кратные частоты и генерируются одновременно. Использование синусоидального поля позволяет достичь большей частоты измерений за счет одновременности действия всех полей. Метод имеет возможность при-

менить селективный прием, повышающий чувствительность измерений. Основным недостатком АС-способа является сильная зависимость точности позиционирования от наличия любого металла в окружающем интерьере. Синусоидальные магнитные поля наводят вихревые токи в электропроводящих элементах, которые существенно влияют на измеряемые поля и ограничивают применение метода в ряде областей, например в авиации, где в замкнутом объеме металлической кабины летательного аппарата невозможно получить требуемую точность позиционирования данным методом.

Для работы в сложных интерьерах, содержащих электропроводящие и магнитные элементы, более прогрессивным является ДС-способ, составляющий суть импульсной системы позиционирования и заключающийся в генерировании последовательности импульсных магнитных полей различной ориентации, разделении последовательности паузой, когда все источники выключены, измерении компонент каждого магнитного поля в точке наблюдения, вычислении координат подвижного тела. Применение импульсного поля позволяет устранить влияние вихревых токов, наводимых в металлических элементах интерьера, на точность позиционирования. Вихревые поля имеют возможность затухнуть каждый раз до начала измерений в течение импульса поля, длительность которого выбирают по возможности большей, чем время затухания вихревых токов в окружающем интерьере. Работа импульсной системы магнитного позиционирования поясняется графиками, приведенными на рис. 1.5, б. По управляющим сигналам, получаемым от вычислителя через интерфейс, контроллер последовательно запитывает обмотки генератора поля импульсами тока с плоской вершиной I_x , I_y , I_z . Подвижный приемник, удаленный от генератора магнитного поля, каждый раз измеряет векторную сумму магнитного поля, генерируемого тем или иным источником и МПЗ в данной точке. В общем случае ориентация подвижного приемника на момент измерения неизвестна. Поэтому для выделения информационных полей, генерируемых источниками, необходимо компенсировать влияние МПЗ. Для измерения МПЗ, как видно из рисунка, предназначена пауза после завершения последовательности работы источников поля. Во время паузы все источники выключены, ток по обмоткам не протекает. В этом случае подвижный приемник измеряет только компоненты МПЗ в текущей ориентации. Пауза токов, когда все источники выключены, является обязательным условием для правильного функционирования импульсной системы магнитного позиционирования. Таким образом, в системе магнитного позиционирования, содержащей три источника в генераторе и три датчика в приемнике, за полный цикл работы системы производится в общей сложности 12 измерений компонент магнитного поля в точке нахождения подвижного приемника — 3 раза по 3 измерения от каждого источника и еще три измерения во время паузы токов. Затем измеренные за время паузы токов компоненты МПЗ последовательно вычитаются из суммарных полей, полученных при

включенных источниках магнитного поля. Полученные таким образом данные — 9 результатов вычитания, свободны от влияния МПЗ и используются для вычисления координат подвижного приемника. После завершения серии работы источников поля и паузы предусматривается дополнительное время, необходимое для решения математической задачи вычисления координат подвижного приемника, как следует из рисунка. Данная задача, чаще всего, сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений, которое, как правило, производится итерационными численными методами сравнения измеряемых значений поля с величинами, получаемыми из математических моделей источников поля для предполагаемых координат приемника. После решения математической задачи последовательность работы источников тока генератора магнитного поля повторяется, обеспечивая тем самым непрерывно-дискретную работу импульсной магнитной системы позиционирования.

Сравнение базовых методов. Преимуществом АС-метода по сравнению с ДС-методом является более высокая частота обновления выходных данных, не связанная с необходимостью быстрого переключения сильных токов, как в ДС-методе; отсутствие влияния магнитного поля Земли; узкополосный прием, дающий преимущества в подавлении магнитных помех. В результате в чистом окружающем пространстве АС-системы выигрывают по точности, дальности и частоте обновления информации. Для ДС-метода характерны меньшее влияние вихревых токов, но влияние МПЗ. Множество конфигурации САМП, используемых в разных областях применения, отличаются, в основном, количеством генераторов и приемников и их конструктивным оформлением [1.164].

Выводы по базовым методам активного магнитного позиционирования. Итак, преимущества активного магнитного позиционирования проявляются в следующем:

- обеспечиваются измерения координат подвижного объекта, имеющего шесть степеней свободы, что недостижимо для конкурирующих принципов — оптического и инерциального;
- обеспечивается работоспособность без прямой видимости между элементами системы;
- система не требует пространственного разнесения элементов, как в задачах триангуляции, имеет место «однолинейность» — лишь одна линия между компонентами системы;
- имеет место минимальное влияние окружающей среды и интерьера среди других возможных видов физического поля;
- задержка выдачи выходных данных составляет не более периода частоты обновления выходных данных.

Хотя САМП сложны и дороги, но широкий спектр практических применений с успехом компенсирует трудности их производства, по крайней мере, за рубежом, где магнитное позиционирование давно

и успешно применяется во многих областях современного наукоемкого бизнеса.

В дальнейшем будем рассматривать магнитный, импульсный принцип магнитного позиционирования в качестве прототипа.

1.2. Состояние вопроса

1.2.1. САМП с дальностью действия до 1 м. Поскольку эвристические решения зачастую уступают по эффективности оптимальным структурам, прошедшим проверку временем, то перед выбором направления работы целесообразно рассмотреть основные мировые достижения в области позиционирования для уточнения концепции собственной разработки.

Наиболее известным в РФ и продвинутом в мире применением магнитного позиционирования, показывающим хронологию развития технологии, является нашлаемая система целеуказания и индикации (НСЦИ). В зарубежных авиационных бортовых системах управления вооружением принцип магнитного позиционирования рассматривается с 70-х годов прошлого века, а идея развивается с послевоенного времени [1.27, 1.28]. При этом генератор поля фиксируется в кабине, а подвижный приемник располагается на шлеме пилота [1.29, 1.30]. Первый интерес в РФ к магнитному позиционированию связан, безусловно, с НСЦИ, хотя таких систем нет до сих пор в российских ВВС. Хотя в применении к летательным аппаратам (ЛА) приемлемой точностью обладают оптические принципы позиционирования [1.3–1.5], сосредоточимся на магнитном позиционировании, как на наиболее перспективном способе для данного применения. Рассмотрим данный вопрос более подробно для установления общих тенденций.

Некоторые проекты НСЦИ с магнитным позиционированием.

НСЦИ является обязательной принадлежностью современных зарубежных самолетов и вертолетов и предназначена для автоматического определения и ввода в реальном времени в бортовое радиоэлектронное оборудование направления на выбранную пилотом цель (линии визирования — ЛВ) с одновременной индикацией пилоту знакографической и видеoinформации, поступающей от бортовых систем. Основными выходными параметрами авиационной системы позиционирования являются азимут и угол места линии визирования в связанной системе координат летательного аппарата. Информация о крене головы пилота используется для стабилизации проецируемого в глаза пилоту изображения от бортовых систем, чтобы облегчить работу вестибулярного аппарата человека, находящегося в экстремальных условиях управления ЛА.

Широкое применение НСЦИ началось после выполнения за рубежом таких ключевых проектов, как «VIEW», «SUPER COCKPIT», «IHADSS», «VISTA SABRE» [1.31], которые дали существенный вклад