

А. А. ИГНАТЬЕВ, Г. М. ПРОСКУРЯКОВ

ГЕТЕРОМАГНИТОМЕТРИЯ:

Алгоритмы, методики,
калибровки блоков магнитометров

Саратов
Издательство Саратовского университета
2014

УДК 621.317.4
ББК 31.222
И26

Игнатъев, А. А.

И26 Гетеромагнитометрия : Алгоритмы, методики, калибровки блоков магнитометров / А. А. Игнатъев, Г. М. Проскуряков. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. – 152 с. : ил.
ISBN 978-5-292-04285-3

Рассмотрены основы гетеромагнитометрии, гетеромагнитных информационных технологий. Приведены алгоритмы и методики идентификации погрешностей блока магнитометров и пути их устранения. Разработаны алгоритмы и методики калибровки блока магнитометров.

Для научных работников и инженеров, работающих в области нового направления – гетеромагнитометрии, преподавателей вузов, а также студентов бакалавриата и магистратуры, аспирантов и докторантов.

Ил. 28. Табл. 34. Библиогр. : 46 назв.

Рецензенты :

кандидат физико-математических наук, профессор *М. Н. Куликов*
кандидат технических наук, доцент *Ю. А. Захаров*

*Работа издана по тематическому плану 2014 года
(утвержден Ученым советом Саратовского государственного университета,
протокол № 4 от 18 февраля 2014 г.)*

УДК 621.317.4
ББК 31.222

ISBN 978-5-292-04285-3

© Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., 2014
© Саратовский государственный университет, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

На основе системного подхода к оценке метрологических характеристик различных магнитометрических и инерциальных датчиков выявлено проявление у этих средств измерений (СИ) общего свойства, заключающегося в их способности реагировать на несколько разнородных по физической природе величин (геометрических, кинематических, динамических, магнитных и др.), и дестабилизирующих факторов (технологических и эксплуатационных). В соответствии с этим подходом предложено рассматривать инерциальные датчики и магнитометры различного назначения и принципа действия как многомерные многосвязанные датчики, реагирующие на несколько (n) измеряемых параметров и несколько (m) дестабилизирующих факторов. Такой подход соответствует принципу формирования и обработки *многомерной информации*.

Предложены новые датчики – гетеромагнитные, в основе построения которых лежат магниточувствительные автогенераторы векторного типа. Направление магнитометрии, в которой используется и реализуется данный принцип, будем называть *гетеромагнитометрией*.

С позиции гетеромагнитометрии любой блок магнитометров рассматривается как многомерный многосвязанный измеритель, на показания которого оказывают влияние параметры технологической и эксплуатационной среды.

Монография в основном посвящена вопросам разработки математического и алгоритмического обеспечения многомерных измерений с помощью векторных (компонентных) магнитометров, а также вопросам идентификации, учета и компенсации алгоритмическим путем их погрешностей (технологических, температурных, режимных и др.).

Представлены результаты выполненной теоретической и экспериментальной работы по разработке магниточувствительного электронного модуля (МЭМ) и исследованию инструментальных погрешностей блока магнитометров (БММ) с ортогональными осями чувствительностей.

Приведены материалы по алгоритмам паспортизации и последующей компенсации инструментальных погрешностей БММ, обусловленных влиянием технологически-конструктивных факторов (нарушением углов ортогональности между осями чувствительности, а также влиянием электромагнитных помех электроники, остаточных магнитных полей магнитно-мягких и магнитно-твердых масс отдельных элементов конструкции блока с уче-

том условий эксплуатации). Дана методика калибровки метрологических характеристик БММ на основе реализации разработанных алгоритмов паспортизации и компенсации выявленных инструментальных погрешностей блока.

С позиции предложенной в монографии новой n -мерной теории магнитометрии (гетеромагнитометрии) становятся совершенно ясными и очевидными пути дальнейшего развития и совершенствования схем и конструкций блоков магнитометров, методики и технологии их настройки и калибровки метрологических характеристик, разработки алгоритмов идентификации, компенсации погрешностей блоков и приведения их показаний в условиях выполнения бездевиационных работ, а также рациональной методики эксплуатации магниточувствительных блоков.

Достижение успеха в области гетеромагнитометрии гарантировано за счет последовательного учета алгоритмическим путем тех или иных факторов, проявляемых при магнитных измерениях.

В монографии впервые сформулированы в систематизированном виде **обратные задачи магнитометрии** как частные случаи обратных задач математической физики: задачи идентификации параметров магнитных полей основания, задачи курсоуказания подвижного объекта на основе магнитометрических данных, задачи выполнения однофакторных и многофакторных калибровок и юстировок прецизионных высокочувствительных блоков магнитометров.

В основу полного описания показаний блоков магнитометров положены широко используемые в научно-технической литературе уравнения Пуассона в векторно-матричной и скалярной формах. Математический аппарат монографии основан на использовании приемов линейной алгебры матриц и векторов, теории преобразований систем координат, методов линеаризации нелинейных функций, способов формирования и исследования функций чувствительностей, приемов декомпозиции и суперпозиции математических моделей.

Для математического описания магнитного поля Земли в работе использованы как упрощенная математическая модель магнитного диполя, так и точная стандартная модель *IGRF* (*International Geomagnetic Reference Field*), основанная на разложении геомагнитного потенциала в сферический гармонический ряд Гаусса.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитометрия как область науки и техники, связанная с магнитными измерениями, определением погрешностей и путей повышения чувствительности устройств и систем, зародилась на основе древнего ремесла мореплавателей – магнитно-компасного дела. Эта область со временем по мере совершенствования магнитных компасов (МК) и курсовых систем, а также развития теории их работы и технологии изготовления успешно развивалась в течение многих веков [1].

Создание во второй половине XX в. бесплатформенных инерциальных систем ориентации и навигации (БИСОН) и спутниковых навигационных систем (СНС), а также их практическое внедрение в дальнейшем ознаменовали яркие и значительные достижения научно-технического прогресса в передовых странах мира, в том числе и в России. Разработка интегрированных систем ориентации и навигации (комплексов БИСОН+СНС) не сняла полностью проблемы поиска рациональных схмотехнических решений по дальнейшему повышению точности, надежности, автономности и долговечности работы информационных и навигационных систем [2–5].

Идея комплексирования способов и технических средств навигации и ориентации различных объектов известна давно (комплексирование радиотехнических, астрономических, инерциальных, магнитометрических и других способов и средств).

В связи с появлением и совершенствованием астрономических (АНС), радиотехнических (РНС), инерциальных (ИНС) и спутниковых (СНС) навигационных систем дальнейшее развитие магнитно-компасного дела во многих странах мира, включая Россию, несколько замедлилось, а интерес к бортовым магнитным измерениям со стороны специалистов в области управления подвижными объектами незаслуженно стал предаваться забвению.

Сравнительный анализ информационных свойств геофизических полей показывает, что магнитное поле Земли (МПЗ) является более информативным по сравнению с другими геофизическими полями. Однако в настоящее время в области навигации и ориентации подвижных объектов (ПО) они используются недостаточно полно [6].

Исторически ситуация в области бортовой магнитометрии сложилась так, что информация о МПЗ сначала использовалась только в корабельных магнитных компасах с подвижными магниточувствительными частями. Разработанная девиационная теория работы морских, а в дальнейшем и авиационных магнитных компасов учитывала схемоконструктивные осо-

бенности самих компасов и сводила влияние пространственно (3D-системы) реализуемых дестабилизирующих факторов, учитывающих свойства ПО, к формированию эквивалентных погрешностей (девиаций), проявляемых в плоскости (2D-системы) отсчета или горизонта (круговых, полукруговых, четвертных магнитных девиаций, креновых и баллистических девиаций) [1].

Разработанные цифровые магнитные компасы (ЦМК) с использованием трехмерной (3D) магнитометрической информации, получаемой от трехосных блоков магнитометров, не содержащих подвижных частей, с учетом построения ЦМК в виде цифровых измерительно-вычислительных систем (ИВС) заставили разработчиков отказаться от устаревшей девиационной 2D-теории магнитных компасов и разработать бездевиационную 3D-теорию магнитного курсоуказания ПО.

В основу бездевиационной теории магнитного курсоуказания были положены принципы не одномерных, а *многомерных измерений* и принципы алгоритмической обработки многомерной информации. В соответствии с этими принципами каждый компонентный магнитометр того или иного типа (магниторезистивный, гальваномагнитный, феррозондовый, магнитогенераторный, феррорезонансный и др.) представляется как многомерный датчик, реагирующий не на одну физическую величину, а на несколько входных величин (подлежащих измерению) [7–14].

Такой подход оказался настолько плодотворным и эффективным с точки зрения обеспечения точности, чувствительности, автономности, безотказности работы средств магнитных измерений, что он был положен в основу нового научного направления – *гетеромагнитометрии* (от греч. «гетеро» – другой, разнообразный), т. е. другая магнитометрия, основанная на магниточувствительных преобразователях автогенераторного типа [11–14].

С позиции гетеромагнитометрии можно разработать и внести уточнения в оценку девиаций магнитных компасов и курсовых магнитных систем, определенных на основе использования аналитических и графоаналитических способов решения задачи курсоуказания в соответствии с плоской двумерной (2D) теорией магнитных измерений.

Это могут быть как девиации постоянных величин магнитной индукции в данной точке (области пространства), так и их переменные составляющие – спектры. Кроме того, на основе гетеромагнитных первичных преобразователей могут быть построены магнитные датчики угловых скоростей, датчики магнитной вертикали и другие измерители параметров механических величин. К многофакторным относятся возможности компьютерной корректировки температурной нестабильности показаний 3D-магнитометра, магнитной неортогональности осей, компенсации режимных нестабильностей и др.

Под **гетеромагнитометрией** понимается новое научное направление, в котором показания магнитометрических средств (модульных, компонентных, градиентных, дифференциальных, вариативных) рассматрива-

ются как многомерные с учетом влияния реально проявляемых технологических и эксплуатационных дестабилизирующих факторов [11–14].

Отметим, что традиционная магнитометрия как направление в области магнитных измерений отличается от гетеромагнитометрии именно подходом к формированию первичной информации:

– в магнитометрии применяется способ формирования *одномерных измерений* (один вход – x , один выход – u);

– а в гетеромагнитометрии используется организация *многомерных измерений* (несколько измеряемых величин на входе – вектор \mathbf{x} и на выходе – вектор \mathbf{u}).

Реализация принципов гетеромагнитометрии предполагает использование алгоритмического способа обработки многомерной информации. Вопросы получения и обработки многомерной магнитометрической информации в соответствии с принципами гетеромагнитометрии тем более важно и актуально решать в настоящее время, так как именно сейчас наблюдается некоторая недооценка необходимости использования магнитометрической информации при разработке и усовершенствовании информационных и навигационных систем.

В последние годы вновь наблюдается усиление внимания со стороны специалистов различных областей к проблемам измерений параметров МПЗ, а также значительное расширение масштабов использования полученной информации о геомагнитном поле для решения конкретных практических задач геофизики, геодезии и геологоразведки, персональной ориентации и навигации, поиска, разведки и идентификации точечных источников магнитных полей диполей (например, в военном деле или при проведении поисково-спасательных и аварийных работ в чрезвычайных ситуациях, при магнитном позиционировании), выявления и анализа градиентов и вариаций МПЗ (например, в геомагнетизме или при снятии цифровых магнитных карт местности в геодезии, или для определения прогноза метеоусловий по вариациям возмущаемости МПЗ и пр.), проведения индивидуальной калибровки метрологических характеристик магниточувствительных датчиков, а также в других смежных областях практики (при идентификации и позиционировании магистральных трубопроводов под землей и водой, в альпинизме, при путешествиях, проведении палеонтологических и археологических раскопок и пр.).

Накопленный в последние десятилетия опыт эксплуатации навигационных систем немагнитного типа (АНС, РНС, ИНС, СНС) выявил ряд их существенных принципиальных недостатков: низкая надежность и долговечность, принципиальная сложность построения и нетехнологичность изготовления, высокая стоимость и отсутствие автономности.

Кроме того, для СНС обнаружались недостатки, связанные с ограниченной пространственно-временной доступностью сигналов ($P \leq 0,95$), с невозможностью решения задачи ориентации подвижного объекта (ПО) на основе сигналов существующих СНС, а также с очень высоким уровнем ин-

тенсивности отказов ($\lambda \cong 0^{-2} \text{ ч}^{-1}$, вместо $\lambda_{\text{доп}} \cong 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ по стандарту *JSO – International Standards Organization*).

Сравнение комплексных информационно-метрологических свойств блоков магнитометров с соответствующими свойствами блоков инерциальных датчиков (акселерометров и гироскопов) показывает, что функциональные возможности блоков магнитометров перекрывают информационные и метрологические свойства акселерометров и гироскопов. Этот факт дает основание использовать на практике блоки магнитометров взамен блоков инерциальных датчиков (например, при косвенных измерениях углов поворота основания) или совместно с инерциальными блоками.

Одновременное использование акселерометров и гироскопов при измерении ими соответствующих векторных величин создает общую метрологическую основу для повышения эффективности работы магнитоинерциальных модулей с применением принципов комплексирования и комбинирования датчиков.

В настоящей работе показано, что при построении магнитоинерциальных измерительных модулей использование принципа комбинирования показаний магнитометров, акселерометров и гироскопов обеспечивает более эффективное повышение показателей точности, надежности, долговечности и отказоустойчивости работы модулей, чем применение принципа комплексирования этих же датчиков. Вместе с тем, следует иметь в виду, что как при комплексировании, так и при комбинировании показаний магнитометрических и инерциальных датчиков в составе измерительных модулей используется общий принцип организации косвенных измерений.

Применение принципов гетеромагнитометрии позволяет улучшить схемотехнические решения при разработке датчиков навигационных и ИВС, значительно расширить номенклатуру магниточувствительной аппаратуры и области ее практического применения, а также усовершенствовать методику и технологию настройки и калибровки магнитоизмерительной техники.

В настоящей монографии с позиции гетеромагнитометрии рассмотрены общие вопросы разработки и использования комплексных и комбинированных информационных систем, а также вопросы проведения однофакторных калибровок магниточувствительных электронных модулей в лабораторных условиях.

1. ГЕТЕРОМАГНИТНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1.1. Задачи и проблемы навигации и ориентации подвижных объектов

Навигация и ориентирование – два вида практической деятельности, которые существуют столько же, сколько существует и сам человек. Технические задачи, проблемы навигации и ориентации подвижных объектов непосредственно выросли из физиологических задач каждого человека и его потребности определять в каждый момент времени положение своего тела в пространстве относительно базовых ориентиров (дорог, пешеходных переходов, тропинок, препятствий и др.) и направлений (вертикали места, азимутов и пеленгов в плоскости горизонта и пр.). В основу работы технических средств получения первичной информации были положены различные методы навигации и ориентации:

- астрономический,
- угломерно-дальномерный,
- радиотехнический,
- инерциальный,
- спутниковый,
- интегрированный,
- геофизический,
- комплексный.

Исторически так сложилось, что первоначальное наблюдение за звездным небосводом древним человеком и его естественное восхищение красотой и постоянством звездных фигур (созвездий) привели его в конечном счете к тому, что на фоне древней мифологии о существовании на небе образов многих существ и богов зародился первый метод решения задач навигации и ориентации – **астрономический**. Этот метод обеспечивал решение задач навигации и ориентации с высокой и приемлемой для практики точностью определения параметров местоположения объекта и его ориентации. Однако метод не обладал помехозащищенностью относительно погодных условий и свойством автономности.

С изобретением лага и магнитного компаса был разработан **угломерно-дальномерный метод** навигации и ориентации, основанный на кинематическом счислении пройденного пути. Этот метод наряду с астрономическим методом навигации нашел широкое применение в практике морских путешествий и открытий в период XII–XIX вв. В отличие от астрономиче-

ского метода метод навигации и ориентации, основанный на применении лага и магнитного компаса (МК), является полностью **автономным**, обеспечивающим решение задач навигации и ориентации независимо от погодных условий и других дестабилизирующих факторов [1, 2].

Однако данный метод уступал астрономическому по показателю точности вследствие накопления погрешности в счислении пройденного пути, пропорциональной величине этого пути, и погрешности магнитного компаса. Для повышения точности работы МК был разработан в XIX в. **девиационный метод** компенсации погрешностей. Он используется в современных магнитных компасах и курсовых магнитных системах, применяемых в морском флоте и авиации.

Астрономический и угломерно-дальномерный методы навигации и ориентации с использованием магнитного компаса были единственными методами решения задач навигации и ориентации в течение достаточно длительного времени (до начала XX в.). Вместе с тем, и в наше время данные методы находят практическое применение, хотя и неширокое.

Существенный вклад в развитие методов, способов и средств решения задач навигации и ориентации внес XX в. Именно тогда были разработаны и внедрены в практику современные методы навигации и ориентации: радиотехнический, инерциальный, спутниковый, интегрированный, геофизический. В первой половине XX столетия в авиации и морском флоте нашел широкое применение **радиотехнический метод** навигации и ориентации. Однако он не является полностью автономным и помехозащищенным (хотя и в меньшей степени, чем астрономический метод) [2].

Как альтернатива радиотехническому методу в том же XX столетии был разработан и внедрен в практику **инерциальный метод** решения задач навигации и ориентации, уступающий радиотехническому по точности, однако обладающий свойством полной автономности [2, 4, 15, 16].

К концу XX в. стало ясно, что ИНС не могут в полной мере удовлетворить требованию точности решения задач навигации и ориентации. Поэтому был разработан **метод спутниковой навигации и ориентации**, являющийся дальнейшим развитием радиотехнического метода.

Основное достоинство СНС – высокая точность решения задачи навигации, к недостаткам следует отнести отсутствие автономности, помехозащищенности, недостаточную доступность, ограниченную покрываемость и сравнительно высокую стоимость.

Космический сегмент СНС GPS построен так, что навигационные спутники этой системы в основном «освещают» **экватор**. При этом сигналы с них недоступны во многих местах в области Средиземного моря, США и полярных областях.

Полная комплектация навигационных спутников в космическом сегменте отечественной СНС ГЛОНАСС была достигнута лишь через 10 лет после запуска *GPS* (в XXI в.). Космический сегмент отечественной СНС ГЛОНАСС построен несколько иначе и ориентирован в основном на об-

служивание более **полярных районов**. Сигналы со спутников СНС ГЛОНАСС недоступны в местах, близких к экватору. Но даже при штатной комплектности космической группировки (по 24 спутника в каждой СНС) обе системы не гарантируют стопроцентное обеспечение приема радионавигационных сигналов с четырех (минимум!) спутников в любое время и в любой точке околоземного пространства. Коэффициент доступности навигационной информации от спутников СНС гарантируется по времени на уровне не менее 97% для СНС ГЛОНАСС и не менее 98% для СНС *GPS*. На самом деле, на практике оказывается, что коэффициент доступности для *GPS* падает до 95% (т. е. в течение 72 минут в день СНС *GPS* не обеспечивает потребителей надежной навигационной информацией).

После четверти века практики и экспериментов использования СНС, взаимодействующих с приемной аппаратурой потребителя (АП) различных ПО, уровень (интенсивность) отказов оказался достаточно высоким – $\lambda \cong 10^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Это далеко от требований стандартов для *JLS* – $\lambda \leq 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$. Глобальные СНС в принципе очень ненадежны (из-за сложности). Для обеспечения надежности и точности решения задачи позиционирования на основе использования спутниковой навигационной информации каждая из СНС имеет по две рабочие частоты (L_1 и L_2), которым соответствует две длины волны (~19 см и ~86 см для *GPS*). Наличие двух измерительных каналов СНС (военный/гражданский) соответствует построению и использованию двух шкал отсчета (двух линеек) – грубого и точного.

Таким образом, в структуре построения СНС используется принцип структурно-функциональной избыточности информации (как по числу доступных навигационных спутников в одном сеансе радиосвязи, так и по числу измерительных радиоканалов – по два канала от каждого спутника).

Для повышения точности получения спутниковой навигационной информации (на один-два порядка) необходимо предусмотреть работу СНС в **дифференциальном режиме**. Для этого космический сегмент мобильных навигационных станций, размещенных на спутниках, дополняется наземным (стационарным) сегментом наземных навигационных систем. СНС, работающая в дифференциальном режиме, называется **дифференциальной спутниковой навигационной системой** – ДСНС (например, *DGPS*). Если же ошибка позиционирования (Δx , Δz) в несколько метров также не удовлетворяет требованиям решения задачи локальной навигации, то ДСНС дорабатывается так, что в дополнение к измерениям псевдодальностей и псевдоскоростей и их разностей необходимо обеспечить **фазовые измерения** (т. е. измерения фазы несущей частоты радиосигнала). Дополнительное измерение фазы несущей частоты обеспечивает разрешение псевдодальностей (с погрешностями до нескольких миллиметров) и псевдоскоростей (с погрешностями до нескольких миллиметров в секунду). Фазовые измерения характеризуются высокой точностью измерения псевдодальностей – менее 1/10 от длины волны ($\lambda_1 = 19\text{--}24 \text{ см}$).

Если на основе информации, получаемой с помощью СНС, требуется одновременно с решением задачи навигации обеспечить **решение задачи ориентации** ПО, то аппаратура потребителя (АП) должна быть усложнена за счет использования многоантенного приемного устройства [2, 5].

Значительной проблемой является крайне низкий уровень **целостности** (integrity) и надежности СНС. Под целостностью системы понимается обеспечение заданной вероятности P обнаружения ошибки в установленный период времени с момента ее появления (время подачи сигнала тревоги). Решение **проблемы целостности** системы в АП на этой основе получило наименование автономного отслеживания целостности в приемнике (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring – RAIM*).

Работа над радиотехническими, инерциальными и спутниковыми системами навигации и ориентации создала в конце XX столетия условия, при которых решение задач навигации и ориентации на основе использования средств для бортовых магнитных измерений (в том числе и магнитных компасов) незаслуженно стало отодвигаться на задний (второстепенный) план и даже предаваться забвению.

Вместе с тем, в области бортовой магнитометрии последние два десятилетия ознаменовались рядом существенных научно-технических достижений [11–14, 17–29]:

- наряду с двумерной (плоской) теорией магнитных измерений разработана более точная трехмерная (пространственная) теория бортовой магнитометрии;

- появились более точные цифровые магнитные компасы (ЦМК), построенные на основе современных информационно-компьютерных технологий и не содержащие подвижных частей;

- усовершенствованы теория, технология и методика проведения девиационных работ, разработана бездевиационная теория бортовых магнитных измерений, а также соответствующие технология и методика;

- разработаны высокоточные и прецизионные модульные, векторные и компонентные магнитометры (протонные, с частотной модуляцией, феррозонды, СКВИДы и др.);

- созданы бортовые цифровые магнитометры навигационного класса.

Разработка новых теорий бортовых магнитных измерений, использование современных информационно-компьютерных технологий, цифровых вычислительных средств, создание высокочувствительных и прецизионных магнитометров и магнитометрических датчиков – все это способствует развитию теории и практики бортовых магнитных измерений в целях решения задач навигации и ориентации на более высоком уровне [11].

Идея комплексирования способов и технических средств навигации и ориентации известна давно (комплексирование астрономических, радиотехнических, инерциальных, магнитных и других способов и средств получения информации). С точки зрения обеспечения относительной простоты (технической, технологической и эксплуатационной) решения задачи комплексирования

рования способов и средств навигации и ориентации особого внимания заслуживает способ комплексирования с использованием **метода навигации и ориентации по геомагнитному полю**.

Сравнительный анализ информационных свойств геофизических полей показывает, что магнитное поле Земли является более информативным, нежели поле тяжести Земли (ПТЗ), поле вращения Земли (ПВЗ) и другие геофизические поля (ГФП). Вместе с тем, геомагнитное поле более подвержено действию разнообразных возмущений, нежели другие ГФП [6].

Метод навигации и ориентации по геофизическим полям (в частности, с использованием электронных карт местности и цифровых карт ГФП) не является новым. На практике в основном находят применение корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС), работающие по аномальным ГФП. Вместе с тем, ждет своего часа решение задач навигации и ориентации путем использования геофизической информации, получаемой на основе наблюдения за нормальными составляющими геофизических полей.

Метод геофизической навигации и ориентации можно считать достойной альтернативой методу спутниковой навигации и ориентации.

1.2. Информационно-компьютерные технологии и многомерные измерения

Успешное решение задач, связанных с управлением летательными, наземными, плавающими, баллистическими и космическими аппаратами, во многом определяется уровнем развития информационно-измерительной техники и информационно-компьютерных технологий. Дальнейшее развитие авиации, морского флота, наземной транспортной и ракетно-космической техники невозможно без совершенствования их информационного обеспечения.

Основная научно-техническая проблема в области разработки и применения бортовых датчиков первичной информации (ДПИ) и измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) заключается в непрерывном повышении точности, быстродействия, надежности, долговечности и экономичности их работы. Для удовлетворения этим всевозрастающим и противоречивым требованиям в практике разработки и эксплуатации бортовых приборов и приборных комплексов имеется достаточно широкий арсенал принципов построения, методов, способов и конкретных приемов, использование которых чаще всего приводит к существенному улучшению одних показателей при одновременном снижении значения других показателей [9, 10].

Системный анализ информационного и метрологического обеспечения современных СИ показывает, что измерительная техника и технология технических измерений в настоящее время базируются на **концепции одномерных измерений**. ИЗМЕРЕНИЕ – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических

средств (ГОСТ 16237-70. ГСИ). Основы концепции одномерных измерений были заложены еще Л. Эйлером почти три века назад.

Для любых измерений, проводимых с борта подвижных аппаратов с целью определения основных характеристик (точности, надежности, долговечности, быстродействия и др.) бортовых измерителей (инерциальных, гравиметрических, аэродинамических, магнитометрических, радиотехнических и др.), разработчику необходимо, прежде всего, построить модели, адекватно отражающие реальные процессы взаимодействия ДПИ с внешней средой [30, 31].

Общие схемы информационного взаимодействия средств измерений с объектом, на котором они установлены, и с окружающей средой, в которой они находятся и работают, представлены на рис. 1.1.

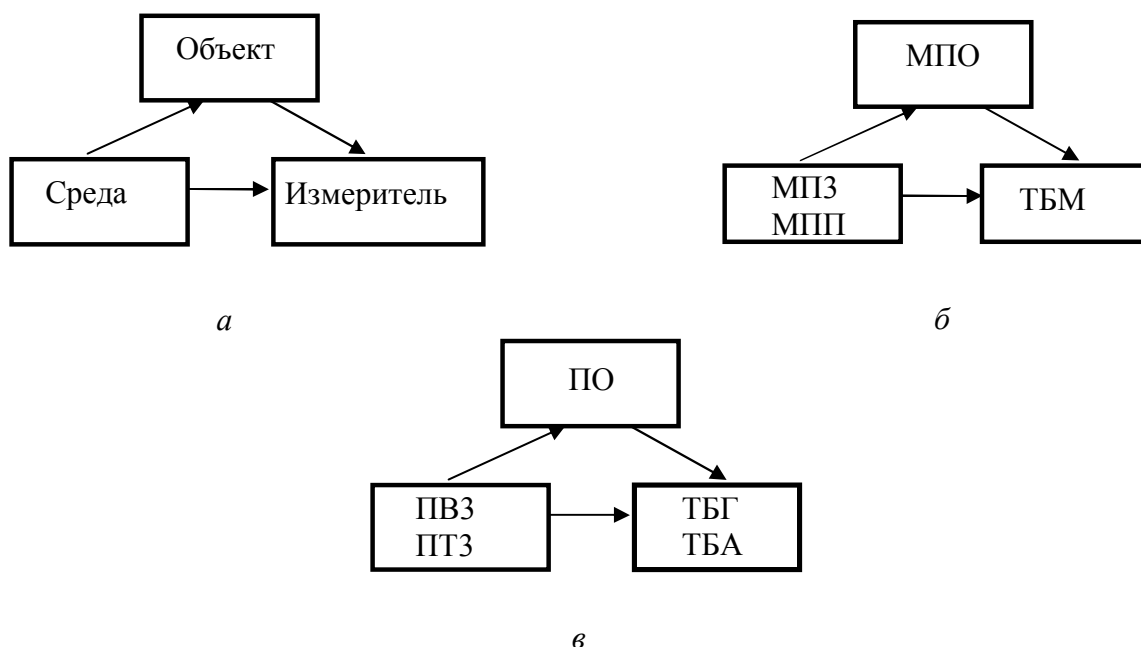


Рис. 1.1. Схемы информационного взаимодействия средств измерений с объектом: *а* – измерителя с объектом и средой; *б* – магнитометрического измерителя с магнитными полями; *в* – инерциальных измерителей с объектом и геофизическими полями

Существующая в России государственная система измерений (ГСИ) (ГОСТ 8.009-84, ГОСТ 8.508-84 и др.), а также соответствующая международная система (*ISO 9000* и др.) регламентируют нормируемые метрологические характеристики (НМХ) средств измерений, рассматривая эти СИ в отрыве от среды и ПО, с которыми они взаимодействуют. При этом НМХ (статические и динамические) СИ строятся на основе принципов неинвазивности (отсутствия взаимного влияния), одномерности и однозначности измерений.

С точки зрения системного анализа такая «идеализация» НМХ СИ не соответствует реальной корректной постановке задачи измерений. Метро-

логические характеристики СИ в первую очередь определяются математической моделью измерений в виде системы «измеритель–среда», которая в общем случае является многомерной и многосвязанной.

Концепция многомерных измерений базируется на следующих принципах [7–12, 19–21]:

- построение и использование ДПИ как многомерных многосвязанных измерителей;
- решение обратных задач измерений;
- алгоритмическая обработка многомерной многосвязанной информации с использованием информационно-компьютерных технологий;
- параметрическая идентификация конструктивных параметров и технологических погрешностей ДПИ;
- структурная и функциональная избыточность информации.

В соответствии с концепцией многомерных измерений под измерением понимается процесс отображения свойств среды и объекта наблюдения из пространства состояния в информационное пространство.

Результаты сравнительного анализа концепции одномерных и многомерных измерений приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Концепции одномерных и многомерных измерений

Свойства измерителя (ДПИ)	Концепции измерений	
	одномерных	многомерных
Математическая модель ДПИ	Статическая (эталонная) характеристика для описания статических свойств ДПИ; динамическая характеристика для описания динамических свойств ДПИ	Функциональная (эталонная) характеристика учитывает реальные свойства ДПИ как многомерных измерителей в статических и динамических условиях
Многомерность	Проявляются погрешности от перекрестных связей	Ошибки от перекрестных связей исключаются, обеспечивается свойство многокомпонентности ДПИ
Динамичность (инерционность)	Обуславливает проявление динамических ошибок в форме амплитудных и временных (запаздывание) искажений	Свойство динамичности учитывается при построении функциональной характеристики ДПИ и исключении динамических ошибок
Нелинейность	При линеаризации статических характеристик проявляются ошибки от нелинейности (нестабильности) масштабного коэффициента	Ошибки от нелинейности исключаются за счет учета нелинейности при построении функциональной характеристики

Свойства измерителя (ДПИ)	Концепции измерений	
	одномерных	многомерных
Технологическое несовершенство изготовления ДПИ	Проявляются технологические (инструментальные) погрешности	Влияние технологического несовершенства и условий эксплуатации ДПИ учитывается алгоритмически при построении функциональной характеристики ДПИ
Влияние эксплуатационных факторов	Проявляются эксплуатационные (инструментальные и методические) погрешности	
Методы и способы повышения точности, надежности и долговечности ДПИ	Используется комплекс методов, способов и приемов конструктивно-технологического совершенствования показателей ДПИ. Усложнение схемы и конструкции ДПИ, проявление противоречий между требованиями к отдельным показателям качества работы	На основе реализации принципов информационно-компьютерной технологии удается обеспечить одновременно улучшение показателей точности, быстродействия, надежности и долговечности ДПИ (алгоритмическим и программным путем)

Метод многомерных измерений (ММИ) может быть реализован на практике с помощью двух типов способов: девиационных (с вычислением вектора погрешностей $\Delta \mathbf{u}$ и последующим введением поправки $\delta \mathbf{u} = -\Delta \mathbf{u}$, т. е. компенсацией вектора ошибок) и бездевиационных (обеспечивающих оценку вектора $\hat{\mathbf{u}}$ без вычисления поправки $\delta \mathbf{u}$).

На основе метода многомерных измерений с учетом принципов алгоритмической обработки информации и параметрической идентификации удастся существенно повысить точность измерений вектора \mathbf{x} , расширить диапазон измерений фазовых координат и функциональные возможности ДПИ, повысить их быстродействие до уровня, ограничиваемого быстродействием работы бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) [19–21].

Это совершенствование НМХ ДПИ возможно за счет использования в качестве метрологических характеристик функциональных характеристик (взамен статических и динамических), учитывающих одновременно статические и динамические режимы работы датчиков.

С учетом использования принципа функциональной избыточности информации ММИ позволяет существенно улучшить показатели надежности, долговечности и экономичности ИВК с использованием многомерных ДПИ [4, 19–21, 32].

В области метрологии и измерительной техники в настоящее время наблюдается процесс интеграции измерительных частей СИ, предназначенных для получения первичной информации, и вычислительных частей, используемых для обработки полученной информации. Современные приборы и датчики разрабатываются и используются на практике в соответст-

вии с современными требованиями информационно-компьютерных технологий (ИКТ). С точки зрения современных ИКТ все преобразователи информации, начиная с чувствительных элементов (измерительных преобразователей ИП) и кончая датчиками, приборами и целыми комплексами (информационными и навигационными), рассматриваются как измерительно-вычислительные системы (ИВС) [2, 7–9, 30–32].

Такой подход к ДПИ соответствует процессу создания так называемых **интеллектуальных СИ** (ИП, датчиков, приборов и комплексов). Разработка интеллектуальных СИ соответствует, по-существу, созданию соответствующих ИВС на разных уровнях интеграции (рис. 1.2).

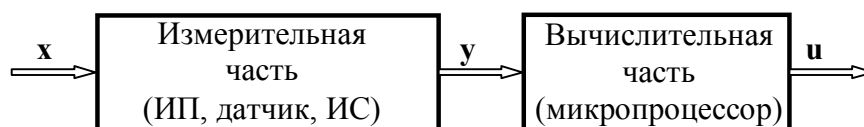


Рис. 1.2. Схема формирования интеллектуальных средств измерения

В соответствии с требованиями современных ИКТ разработка любого интеллектуального СИ на любом уровне интеграции включает в свой состав следующие общие этапы:

- информационное обеспечение (ИО);
- математическое обеспечение (МО);
- алгоритмическое обеспечение (АО);
- программное обеспечение (Про);
- техническое обеспечение (ТО);
- методико-технологическое обеспечение (МТО).

Плавный переход от аналоговой одномерной измерительной техники к цифровой многомерной измерительно-вычислительной технике, произошедший во второй половине XX в., означал не только качественное изменение формы сигнала (носителя информации), но и количественное изменение размерности входной (x) и выходной (u) информации, а также связанные с этим изменения схмотехнических решений построения цифровых СИ и методико-технологического обеспечения разработки и эксплуатации данных СИ.

В микропроцессорной части любой современной цифровой ИВС происходит обработка многомерной (а не одномерной) информации. Переход от аналоговой техники к цифровым интеллектуальным СИ одновременно означал переход от двухточечного сигнального соединения «вход–выход» в СИ, характеризующего концепцию одномерных ($u-x$) измерений (рис. 1.3, а), к многоточечному цифровому соединению «многомерный вход–многомерный выход» в СИ, соответствующему концепции многомерных ($u\sim x$) измерений (рис. 1.3, б).



Рис. 1.3. Схемы информационных связей в средствах измерений: *a* – одномерных; *б* – многомерных

Символ S_1 (см. рис. 1.3, *a*) обозначает масштабный коэффициент или крутизну одномерной метрологической характеристики (МХ) СИ:

$$u = S_1 \cdot x + u_0, \quad (1.1)$$

где u_0 – смещение нуля МХ, или нулевой сигнал СИ.

Символ S_1 (см. рис. 1.3, *б*) означает матрицу масштабных коэффициентов всех измерительных контуров функциональной метрологической характеристики (ФМХ) многомерного СИ:

$$\mathbf{u} = \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{u}_0, \quad (1.2)$$

где \mathbf{u}_0 – вектор смещения нуля ФМХ, или вектор нулевого сигнала многомерного СИ.

Если векторно-матричное уравнение (1.2) привести к скалярному виду, то для каждого i -го канала измерения можно написать

$$u_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot x_j + u_{i0}, \quad (i, j = \overline{1, n}), \quad (1.3)$$

где S_{ij} – масштабные коэффициенты j -х контуров, входящих в i -й измерительный канал.

В соответствии с описанием функциональных метрологических характеристик в виде выражений (1.1) и (1.2) сделаем заключение о том, что каждое многомерное и многосвязанное СИ можно представить как **многоканальный и многоконтурный измеритель**.

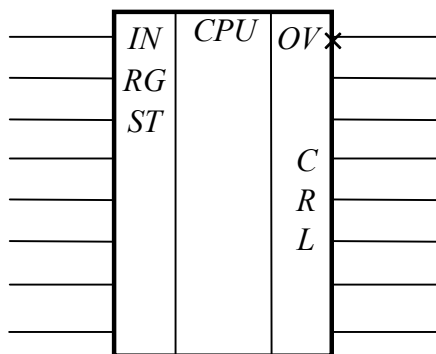


Рис. 1.4. Пример графического изображения ИС

Как известно, любая интегральная схема (ИС), а тем более БИС и СБИС, имеет несколько входов и несколько выходов (рис. 1.4). Это соответствует условию получения и обработки многомерной (\mathbf{x} , \mathbf{u}) информации. Само условное графическое изображение ИС, БИС и СБИС (пример ИС представлен на рис. 1.4) отражает свойство многомерности и многосвязности сигналов при обработке информации (ГОСТ 2.743–82).

Таким образом, сама микроэлектроника подсказала традиционной области приборостроения эффективный путь дальнейшего совершенствования и развития – путь освоения и внедрения в практику **принципа многомерных измерений** [7, 11, 30–32].

Из анализа цепи последовательного выполнения этапов разработки таких новых интеллектуальных СИ, как ИВС (ИО–МО–АО–ПрО–ТО–МТО) видно, что для всех СИ первый шаг (этап ИО) предполагает в соответствии с требованиями современных ИКТ и микроэлектроники формирование многомерной (а не одномерной!) первичной информации.

Вместе с тем, детальный и системный анализ работы любого СИ (ИП, датчика, прибора или измерительного комплекса) с учетом его реальных метрологических свойств показывает, что на самом деле это СИ является многомерным (а не одномерным!) измерителем, так как в соответствии с физическим принципом действия, положенным в основу его работы, оно реагирует не на одну физическую величину (см. рис. 1.3, *а*), а на целый вектор x входных величин (см. рис. 1.3, *б*).

Текущее состояние любого СИ, рассматриваемого как многомерная ИВС, с учетом инерционности и динамики процессов, происходящих в нем, описывается в линеаризованной форме (в малом) с помощью системы линейных дифференциальных уравнений, которые можно привести к компактной векторно-матричной форме Коши.

С физической точки зрения собственная матрица многомерного СИ характеризует наличие и проявление обратных и перекрестных связей в контурах измерений. Нулевые элементы собственной матрицы СИ соответствуют отсутствию обратных (для диагональных элементов) или перекрестных (для недиагональных элементов) связей между контурами. Если некоторые элементы собственной матрицы будут мало отличаться от нуля, то соответствующие им обратные и перекрестные связи малоэффективны (квазиобратные и квазиперекрестные связи).

1.3. Автономные измерения

Акселерометры, гироскопы и магнитометры относятся к такой группе датчиков, которые обеспечивают на борту подвижного объекта (ПО) автономные измерения, т. е. такие измерения, которые способствуют формированию необходимой информации непосредственно на ПО с созданием информационных каналов их связей с ПО и окружающей средой, но без организации явных каналов энергетического взаимодействия датчиков с объектами окружающей среды.

Магнитометры, акселерометры и гироскопы составляют особую группу датчиков, которые способны реагировать на векторы и их компоненты (векторные датчики). Учитывая данный факт, можно установить, что с помощью этих датчиков можно при определенных условиях измерить параметры соответствующих геофизических полей (табл. 1.2, где a , w – век-

торы абсолютного и кажущегося ускорений ПО; \mathbf{g} – вектор ускорения свободно падающего тела на Земле; $\boldsymbol{\omega}$ – вектор абсолютной угловой скорости вращения ПО; $\boldsymbol{\Omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли; \mathbf{T} – вектор напряженности магнитного поля).

Следовательно, используя принцип комплексирования магнитометров и инерциальных датчиков, можно на основе соответствующей обработки многомерной информации (\mathbf{T} , \mathbf{g} , $\boldsymbol{\Omega}$) алгоритмическим путем решать задачи ориентации и навигации ПО.

Таблица 1.2

Автономные измерения

Параметры, характеристики	Инерциальные датчики		магнитометр
	акселерометр	гироскоп	
Изменяемые параметры	$\mathbf{a}; \mathbf{g}; \mathbf{w}$	$\boldsymbol{\omega}; \boldsymbol{\Omega}$	\mathbf{T}
Соответствующее ГФП	ПТЗ	ПВЗ	МПЗ
Диапазоны изменения геофизических величин	0...10 м/с ² (g)	0...15 град/ч (Ω)	0...10 ⁵ нТл (T _{МПЗ})
СКО (σ _x)	(10 ⁻⁴ ...10 ⁻⁶) g	(10 ⁻¹ ...10 ⁻³) град/ч	(1...200) нТл
Типы датчиков	Массо-пружинный, маятниковый, кварцевый, пьезоэлектрический, магнитоупругий, струнный, поплавковый, МЭМС-акселерометр	Лазерный, волоконно-оптический, роторный, поплавковый, вибрационный, электростатический, твердотельно-волновой, ДНГ	Феррозондовый, феррорезонансный гальваномагнитный, магнито-резистивный, автогенераторный, квантовый, СКВИД

С учетом достигнутых к настоящему времени величин погрешностей в измерениях параметров геофизических полей можно говорить о минимально допустимых погрешностях в определении угловых параметров ориентации (ψ , ϑ , γ) и навигации (ϕ , λ) на основе:

– гравиметрических измерений

$$\Delta\psi = \Delta\vartheta = \Delta\gamma = \Delta\phi = \Delta\lambda = \frac{\Delta g}{g} = \frac{10^{-6} g}{g} = 10^{-6} \text{ рад} = 0,22'' ; \quad (1.4)$$

– тахометрических измерений

$$\Delta\psi = \Delta\vartheta = \Delta\gamma = \Delta\phi = \Delta\lambda = \frac{\Delta\Omega}{\Omega} = \frac{10^{-2} \text{ град/ч}}{15 \text{ град/ч}} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ рад} = 2,5' ; \quad (1.5)$$

– магнитометрических измерений

$$\begin{aligned} \Delta\psi = \Delta\vartheta = \Delta\gamma = \Delta\phi = \Delta\lambda = \\ = \frac{\Delta T}{T} = \frac{200 \cdot 10^{-9} \text{ Тл}}{0,303 \text{ Тл}} = 700 \cdot 10^{-9} \text{ рад} = 0,17'' . \end{aligned} \quad (1.6)$$

При более скромном уровне достигаемых в перспективе погрешностей определения Ω по тахометрическому каналу ($\Delta\Omega'_{min} \leq 10^{-6}$ град/ч) имеем

$$\Delta\psi = \Delta\vartheta = \Delta\gamma = \Delta\phi = \Delta\lambda = \frac{\Delta\Omega'_{min}}{\Omega} = \frac{10^{-6} \text{ град/ч}}{15 \text{ град/ч}} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ рад} = 0,015' . \quad (1.7)$$

Это соответствует погрешностям в определении местоположения объекта в линейной мере, не превышающим следующей величины:

$$\begin{aligned} \Delta x(\text{м}) = \Delta z(\text{м}) = 30,9(\text{м/угл.мин}) \cdot \Delta\phi(\text{угл.мин}) = \\ = 30,9(\text{м/угл.мин}) \cdot \Delta\lambda(\text{угл.мин}) = 30,9 \cdot 0,015(\text{м}) = 0,46 \text{ м} = 46 \text{ см}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Оценка погрешностей определения параметров ориентации и навигации комплексным векторным методом на основе измерений параметров ГФП (\mathbf{g} , Ω , \mathbf{T}) приведена в табл. 1.3.

Следовательно, для обеспечения на основе измерений параметров ГФП (\mathbf{g} , Ω , \mathbf{T}) решения задач ориентации с минимально достижимыми погрешностями ($\Delta\psi = \Delta\vartheta = \Delta\gamma \leq 0,01''$) и геофизической навигации с минимально достижимыми погрешностями ($\Delta x = \Delta z < 0,5 \text{ м}$) необходимо, чтобы измерения этих параметров были выполнены с погрешностями, не превышающими следующих значений:

$$\begin{aligned} \Delta g_{min} &\leq 10^{-6} g, \\ \Delta\Omega_{min} &\leq 10^{-6} \text{ град/ч}, \\ \Delta T_{min} &\leq 15 \text{ нТл}. \end{aligned}$$

При таком уровне погрешностей системы ориентации и навигации (СОН) на основе геофизических измерений она становится вполне конкурентоспособной по сравнению с СНС. Проведенный сравнительный анализ точностных характеристик систем ориентации и навигации по геофизическим полям (СОН-ГФ) и спутниковых систем ориентации и навигации (ССОН) показывает, что канал ориентации СОН-ГФ превосходит по точности канал ориентации ССОН (с учетом работы ССОН в дифференциальном многоантенном фазовом режиме), а каналы навигации систем СОН-ГФ и ССОН по точностным показателям равноправны (десятки сантиметров).

Таблица 1.3

**Погрешность определения параметров ориентации и навигации
комплексным векторным методом на основе измерения параметров ГФП**

Измерительный канал	Достижимый уровень			Перспективный уровень		
	Минимально достижимая			Требования		
	разрешающая способность датчиков		погрешность определения углов ориентации ($\Delta\psi$, $\Delta\theta$, $\Delta\gamma$) и навигации ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$)	к минимально предельно достижимым погрешностям ориентации и навигации	к разрешающей способности датчиков	
	абсолютная	относительная, %			абсолютная	относительная, %
Гравиметрический	$\Delta g_{min} = 10^{-6}g$	$\delta g_{min} = 10^{-4}$	$\leq 0,22''$	0,01"	$\Delta g'_{min} = 4,6 \cdot 10^{-8}g$	$\delta g'_{min} = 4,6 \cdot 10^{-6}$
Тахометрический	$\Delta \Omega_{min} = 10^{-2}$ град/ч	$\delta \Omega_{min} = 0,07$	$\leq 2,5'$	1"	$\Delta \Omega'_{min} = 0,7 \cdot 10^{-4}$ град/ч	$\delta \Omega'_{min} = 5 \cdot 10^{-3}$
Магнитометрический	$\Delta T_{min} = 200$ нТл	$\delta T_{min} = 7 \cdot 10^{-5}$	$\leq 0,15''$	0,01"	$\Delta T'_{min} = 14$ нТл	$\delta T'_{min} = 5 \cdot 10^{-6}$

Следует иметь в виду, что подвижное основание, на которое устанавливаются трехосные блоки акселерометров, гироскопов и магнитометров (ТБА, ТБГ и ТБМ), оказывает существенное влияние на их показания:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= [a_x \ a_y \ a_z]^T = \mathbf{w} + \mathbf{g}, \\ \boldsymbol{\omega} &= [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T = \boldsymbol{\omega}_r + \boldsymbol{\Omega}, \\ \mathbf{T} &= [T_x \ T_y \ T_z]^T = \mathbf{T}_{МПЗ} + \mathbf{T}_{МПО} + \mathbf{T}_{МПД} = (\mathbf{T}_{МПЗ}^H + \mathbf{T}_{МПЗ}^a + \delta \mathbf{T}_{МПЗ}), \end{aligned} \quad (1.9)$$

где \mathbf{a} , $\boldsymbol{\omega}$, \mathbf{T} – векторы показаний ортогональных блоков ТБА, ТБГ и ТБМ соответственно; \mathbf{w} , $\boldsymbol{\omega}_r$ – кажущееся ускорение и относительная составляющая вектора угловой скорости вращения ПО.

Для обеспечения корректности измерений с помощью СОН-ГФ

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \mathbf{g}, \\ \boldsymbol{\omega} &= \boldsymbol{\Omega}, \\ \mathbf{T} &= \mathbf{T}_{МПЗ} \end{aligned} \quad (1.10)$$

необходимо выполнение следующих условий:

- неподвижность основания ($\mathbf{w} = \boldsymbol{\omega}_r = 0$);
- идентификация магнитных помех (определение $\mathbf{T}_{МПО}$, $\mathbf{T}_{МПД}$).

Проведенный ретроспективный анализ в области магнитометрии показывает, что практическое использование результатов бортовых магнитных измерений имело большое значение не только в прошлом – на заре становления и развития магнито-компасного дела, но и играет важную роль в настоящем для решения задач геофизической навигации и ориентации, используя современные комплексированные бортовые магнитометрические средства.

Сведения об основных технических характеристиках и параметрах существующих в настоящее время наиболее распространенных инерциальных датчиков (акселерометров и гироскопов) приведены в табл. 1.4–1.9.

Использование акселерометров, гироскопов и магнитометров для решения задач ориентации и навигации, геофизики и геологической разведки, военной разведки и магнитного дистанционного поиска, а также других практических задач имеет те преимущества, которые связаны, в первую очередь, с обеспечением малых габаритов комплексов и автономностью их работы.

Геометрия пространственного состояния ПО может быть описана с помощью следующих матричных выражений [33]:

$$A = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi = [a_{ij}]_3^3, \quad (1.11)$$

где A – матрица ориентации ПО в пространстве (3×3); A_γ , A_ϑ , A_ψ – матрицы углов крена (γ), тангажа (дифферента) (ϑ) и курса (ψ); a_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$) – направляющие косинусы матрицы A .

Таблица 1.4

Миниатюрные акселерометры компенсационного типа

Характеристика	ДЛУММ	ДЛУВД	ДА-9	А-12	АЛ-1	АТ-1104	КХ67-041
Диапазон измерения линейных ускорений, g	$\pm 3-50$	$\pm 3-60$	± 12	± 25	± 7	± 10	
Порог чувствительности, g	$0,001 \cdot a_{\text{изм}}$	–	$1 \cdot 10^{-6}$	$(0,1 \dots 5) \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Смещение нуля	$\leq 30 \text{ мВ}$	$0,001 \cdot a_{\text{изм}}$	2'	$1 \cdot 10^{-5} \text{ g}$	$2 \cdot 10^{-5} \text{ g}$	$5 \cdot 10^{-3} \text{ g},$ $\pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ g}$	$5 \cdot 10^{-3} \text{ g}$
Нелинейность характеристики, %	–	0,1	–	0,02	–	< 0,05	$\pm 0,01$
Масштабный коэффициент	4–27 мА/g	–	$0,75 \pm 0,025 \text{ м/с}^2$	1,5 мА/g	1,2 В/g	0,5 В/g; 1 мА/g	–
Рабочий диапазон температур, °С	От –60 до +80	От –50 до +70	От –60 до +85	От –50 до +70	От –50 до +85	От –50 до +120	От –10 до +50
Температурная погрешность	–	–	–	–	$5 \cdot 10^{-6} \text{ g/}^\circ\text{C}$	1%	–
Время готовности, с	1	1	–	–	60	–	–
Время наработки на отказ, $\times 10^3$ час	3	3	3	5	10	–	∞

Окончание табл. 1.4

Характеристика	ДЛУММ	ДЛУВД	ДА-9	А-12	АЛ-1	АТ-1104	КХ67-041
Питание	12,6 В, 6 мА	1 Вт	2,5 В, 20 мА	–	–	12 В, 20 мА	–
	27 В, < 80 мА		19,5 кГц				
Габариты, мм	35×30×21		Ø24×18	24×24×18	20×20×40	20×26	–
Масса, г	55	40	38	38	220	35	29
Полоса пропускания, Гц	–	500	–	–	100		300
Разработчик, изготовитель	ОКБ «Темп», г. Арзамас Нижегородской обл.		Приборостроительная компания, г. Пермь	ПКБ, Раменское Московской обл.	НПО МИЭА «Авиаприбор» г. Москва	ОКБ «Темп», г. Арзамас Нижегородской обл.	ПО «Корпус», г. Саратов

Таблица 1.5

Микромеханические акселерометры

Характеристика		АЛЕ 037	АЛЕ 038	АЛЕ 051	АЛЕ 044	АЛЕ 050	АЛЕ 049	МТА
Диапазон измерения линейных ускорений, g		±90	±220	±90	±90	±90	±1400	–
Порог чувствительности, g		±0,18	±0,18	±1,4	±11	±5,6	±5,6	–
Нелинейность характеристики, %		0,02		0,01	0,2		–	–
Масштабный коэффициент, мВ/g		66,7	27,3	66		4,286	5(10 ⁻² ...1)	–
Рабочий диапазон температур, °С		От –50 до +50		От –50 до +125	От –50 до +50		–	–
Температурная погрешность	смещение нулевого сигнала, мВ/°С	1–0,1		0,1	1	1–3		–
	нестабильность масштабного коэффициента, %/°С	0,01		0,008	0,02	0,01		–
Потребляемый ток, мА		30	60	25	5	10	20	–
Напряжение питания		±15	28	±12	28	±12	28	–
Габариты, мм		35×35×35		32×2×6	35×29×15		35×35×22	19,4×14,2×7,5
Разработчик, изготовитель		ФГУП «НИИ физических измерений», г. Пенза						ГНЦ НПК «Технологический центр», г. Москва

Таблица 1.6

Прецизионные акселерометры

Характеристика	Автогенераторные			Электростатические	
	на ПАВ	струнные		ТЭА	ТЕА
	ПАВ-А	КИНД 280-015	НИИ ПМ		
Конструктивные особенности	Резонатор, линия задержки, стоячие ПАВ	С алгоритмической обработкой информации		Трехосный шаровой ИП, электростатический подвес, встроенная калибровка	Трехкоординатные измерения
Диапазон измерения линейных ускорений	$\pm 5 g$	$\pm 25 g$	$\pm 25 g$	$10^{-3}-10^{-8} \text{ м/с}^2$	$10^{-3}-10^{-8} \text{ м/с}^2$
Порог чувствительности, g	–	–	$5 \cdot 10^{-6}$	$< 3 \cdot 10^{-9}$	$< 3 \cdot 10^{-9}$
Смещение нуля	$10^{-3} \cdot a_{\text{изм}}$	Нестабильность положения измерительной оси $< 0,6'$	$4 \cdot 10^{-7} g$	$< 0,5\%$	$< 0,1\%$
Нелинейность характеристики, %	0,01	Нестабильность в течение 5 лет $< 10^{-3}$	–	$< 0,1\%$	$< 0,1\%$
Масштабный коэффициент	4 кГц/g	$10(\text{Гц} \cdot \text{с}^2/\text{м}) \pm 0,02\%$	–	–	–
Рабочий диапазон температур, °С	От –40 до +85	От –40 до +120	–	Космические условия	
Погрешности	Температурная $2 \cdot 10^{-5} g/^\circ\text{C}$	$< 750 \text{ мг/}^\circ\text{C}$, $< 5 \cdot 10^{-6} g/^\circ\text{C}$	$\sigma_g < 2 \cdot 10^{-3} g$ (в запуске и между запусками)	Случайная составляющая $< 0,1\%$	
Время готовности, с	1	–	–	$< 1,5$	< 2
Время наработки на отказ, час	10000	–	30000	∞	∞
Габариты, мм	$\varnothing 30 \times 25$	$\varnothing 31 \times 38$	–	$\varnothing 114 \times 120$	–
Масса, г	40	40	350	1600	–
Разработчик, изготовитель	НИИ «Гранит», г. С.-Петербург	НИИ ПМ, г. Москва		НПО ЭМ, г. Миасс Челябинской области	Фирма ONERA, Франция

Таблица 1.7

Поплавковые гироскопы

Характеристика		IR IG (КК «Apollo»)	КИ99-110	КИ79-132	КИНД 99-003	КХ 79-060
Диапазон измерения угловой скорости, град/с		–	±6	±15	±0,5	±36 (±72)
Порог чувствительности, град /ч		–	0,014	0,006	0,003	±0,013
Рабочий диапазон температур, °С		57±3,6·10 ⁻⁵ (термостабилизация)	–	–	–	0–40 (безобогревная стабилизация)
Масштабный коэффициент		–	0,2–2 угл.с/бит			2 мА/(град/с)
Нестабильность и нелинейность масштабного коэффициента,%		–	0,01 ±(1–3)·10 ⁻³	0,01 ±(1–3)·10 ⁻³	(1–3)·10 ⁻³ ±3·10 ⁻³	±0,02 ±0,03
Случайный дрейф	в запуске	не зависящий от перегрузки	0,014 °/ч	0,006 °/ч	0,003 °/ч	±0,08 "/с
		зависящий от перегрузки				±0,22 "/с
	между запусками	не зависящий от перегрузки	±(0,03–0,05) °/ч			–
		зависящий от перегрузки	±0,15 угл.мин/мин	±0,2 °/ч		
Дрейф, зависящий от квадрата перегрузки		0,015 "/с/g ²	±0,03 °/ч/g ²			–
Питание		$P = 5 \text{ Вт}$ $I_{\text{возб}} = 0,1 \text{ А}$	< 3 Вт	< 3 Вт	< 1,8 Вт	10 В, 10 кГц 40 В, 500 Гц
Габариты, мм		–	–	–	–	∅53×110,5
Масса, г		–	1200	850	300	–
Ресурс, ч		–	100000			–
Разработчик, изготовитель		Лаборатория Дрейпера Массачусетского университета NASA, США	НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова, г. Москва			ФГУП ПО «Корпус», г. Саратов

Таблица 1.8

Волоконно-оптические гироскопы

Характеристика		ВГ-915	ВГ-941-3	ВГ-9413AS	ОИУС 2000	ОИУС 1000	ОИУС 500	КХ 34-015	КХ 34-018	
Диапазон измерения угловой скорости, град/с		±300	±500	±600	±40	±90	±250	±10	±30	
Смещение нуля	при $t = \text{const}$, град/ч	0,01	–	–	< 0,002	≤ 0,01	≤ 0,1	–	–	
	при $t = \text{var}$, град/ч	0,01	–	–	0,02	≤ 0,1	< 0,5	–	–	
Рабочий диапазон температур, °С		От –40 до +70			–	–	–	–	–	
Масштабный коэффициент, мВ/g		26,7	16	13,3	–	–	–	–	–	
Нестабильность и нелинейность масштабного коэффициента, %		0,1	0,5	0,2	< 0,005	≤ 0,01	≤ 0,1	0,1	0,05	
Дрейф	постоянная составляющая, град/ч	0,01	–	–	–	–	–	0,14	–	
	случайная составляющая, град/ $\sqrt{\text{ч}}$	–	50	86	–	0,1	1	1	0,1	
Питание		±12 В, ± 5 В	–	–	18–36 В или 5±0,1 В, < 7 Вт			–	–	
Габариты, мм		Ø70×15	–	–	Ø250×45	Ø150×38	Ø100×30	–	–	
Масса, г		70	50	30	1700	900	350	1300	1300	
Полоса пропускания, Гц		100	–	–	> 50		> 100	–	–	
Разрешение		0,025 угл. с								
Разработчик, изготовитель		НПО (АО) «Физоптика», г. Москва			Фирма «Оптолинк», Россия, г. Саратов			ФГУП ПО «Корпус», Россия, г. Саратов		

Таблица 1.9

Микромеханические гироскопы

Характеристика	ДУС-ММ-400	7ПСК(У)	ММГ ЭП	ADXRS 150	ADXRS 300	ADJS16355	Gyrostar ENV-05 D-02
Диапазон измерения угловой скорости, град/с	±400	±360	±1000	±150	±300	±75 (150; 300)	±90
Порог чувствительности, град/с	–	0,15	–	–	–	0,015	–
Масштабный коэффициент, град/с на каждый импульс	–	–	–	–	–	0,01832 (0,03663)	–
Нелинейность и нестабильность масштабного коэффициента, %	0,7	0,5	0,1	–	–	0,1	0,5
Смещение нуля (дрейф)	–	–	0,1–0,01 град/с	–	–	0,05 град/с·g 0,01 град/с·g	36 град/ч
Питание	–	–	U = 5 В, I = 5 мА			–	75 мВт, 25 кГц
Полоса пропускания, Гц	–	–	40			350	–
Габариты, мм				7×7×3		–	18×30×41
Масса, г	–	–	–	0,5		–	50
Спектральная плотность составляющей дрейфа, град/с·√Гц	0,4	0,0013	–	–	–	σ 0,05	–
Ресурс, ч	–	–	–	–	–	–	–
Конструктивные особенности	Планарные конструкции, интегральные микросхемы						Пьезоэлектрическая вибрационная призма на растяжках
Технология изготовления	Планарная MEMS-технология, встроенная электроника						Микросборка
Разработчик, изготовитель	ЗАО «Гироптика», г. С.-Петербург	ЦНИИ «Электроприбор», г. С.-Петербург	Фирма Analog Devices, США				Фирма Murata, Япония

Если принять для оценки угловой ориентации ПО в пространстве геометрическую схему Эйлера–Крылова (ГОСТ 20058-80), то для направляющих косинусов a_{ij} можно написать

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \cos\vartheta \cdot \cos\psi, \\
 a_{12} &= \sin\vartheta, \\
 a_{13} &= \cos\vartheta \sin\psi, \\
 a_{21} &= -\sin\vartheta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\psi - \sin\psi \sin\gamma, \\
 a_{22} &= \cos\vartheta \cdot \cos\gamma, \\
 a_{23} &= \cos\psi \sin\gamma - \sin\vartheta \cdot \cos\gamma \sin\psi, \\
 a_{31} &= \sin\vartheta \cdot \sin\gamma \cdot \cos\psi - \sin\psi \cos\gamma, \\
 a_{32} &= -\cos\vartheta \cdot \sin\gamma, \\
 a_{33} &= \sin\vartheta \sin\gamma \cdot \sin\psi + \cos\psi \cos\gamma.
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Матрица A является ортогональной, невырожденной и хорошо обусловленной.

Кинематические свойства ПО во вращательном движении могут быть описаны с помощью кинематических уравнений Пуассона [33]

$$\dot{A} = [\omega_r]^T \cdot A = -[\omega_r] \cdot A \tag{1.13}$$

или уравнений Эйлера в векторно-матричной форме

$$\begin{aligned}
 \omega = \omega_r + \omega_\ell = (A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi \cdot \dot{\Psi} + A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot \dot{\vartheta} + A_\gamma \cdot \dot{\gamma}) + \\
 + (A \cdot \Omega + A \cdot A_1 \Omega_{\text{орб}} + A \cdot A_2 \Omega_{\text{прец}} + A \cdot A_3 \Omega_{\text{нут}}),
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

где ω , ω_r , ω_ℓ – вектор абсолютной угловой скорости вращения ПО и его переносная и относительная составляющие; $\dot{\Psi}$, $\dot{\vartheta}$, $\dot{\gamma}$ – векторы относительных составляющих угловых скоростей вращения ПО по рысканию, тангажу (дифференту) и крену; Ω , $\Omega_{\text{орб}}$, $\Omega_{\text{прец}}$, $\Omega_{\text{нут}}$ – векторы составляющих угловых скоростей вращения ПО в переносном собственном движении (Ω), в орбитальном ($\Omega_{\text{орб}}$), прецессионном ($\Omega_{\text{прец}}$) и нутационном ($\Omega_{\text{нут}}$) движениях; A_1 , A_2 , A_3 – матрицы ориентации векторов $\Omega_{\text{орб}}$, $\Omega_{\text{прец}}$, $\Omega_{\text{нут}}$ относительно географической системы координат.

Динамические свойства ПО могут быть описаны с помощью динамического уравнения его поступательного движения

$$\mathbf{w} = \ddot{\mathbf{r}} + 2\omega\dot{\mathbf{r}} + [\dot{\omega} \times \mathbf{r}] + [\omega \times (\omega \times \mathbf{r})] - \mathbf{g}, \tag{1.15}$$

где \mathbf{w} – вектор кажущегося ускорения ПО; $\ddot{\mathbf{r}}$ – вектор абсолютного ускорения; \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения тел. Причем

$$\mathbf{g} = G \frac{M_1 \cdot \mathbf{r}}{r^3}, \quad (1.16)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор, характеризующий положение ПО относительно Земли; M_1 – масса Земли.

Магнитные свойства ПО могут быть описаны с помощью уравнений Пуассона в векторно-матричной форме [11, 17, 25]

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} + \mathbf{T}_{\text{МПО}} = (\mathbf{S} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\Pi} + \mathbf{F} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}})', \quad (1.17)$$

где \mathbf{T} – вектор напряженности результирующего магнитного поля; $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$, $\mathbf{T}_{\text{МПО}}$, $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\Pi}$ – векторы напряженностей МПЗ, МПО и постоянной составляющей МПО; \mathbf{S} , \mathbf{F} – матрицы коэффициентов индуктивной, вихревой составляющих МПО; \mathbf{E} – единичная матрица. Причем

$$\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\Pi} = [P \ Q \ R]^T, \quad (1.18)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & k \end{bmatrix}, \quad (1.19)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ d_1 & e_1 & f_1 \\ g_1 & h_1 & k_1 \end{bmatrix}.$$

Объединение математических моделей датчиков в одну единую систему уравнений, которую с учетом инерционности датчиков можно записать в линеаризованной векторно-матричной форме Коши, соответствует формированию математической модели единого магнито-инерциального модуля (МИМ), состоящего из блоков гироскопов, акселерометров и магнитометров. Причем вектор входных измеряемых параметров \mathbf{x} для интегрированного модуля формируется в соответствии с выражением

$$\mathbf{x} = [\mathbf{r} \ \dot{\mathbf{r}} \ \ddot{\mathbf{r}} \ \boldsymbol{\omega} \ \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} \ A]. \quad (1.20)$$

Матрицы монтажа B_{Γ} , B_a , B_M могут быть сформированы в соответствии с принятой схемой Эйлера–Крылова для отсчета технологических погрешностей, характеризующих нарушение условия ортогональности осей чувствительностей датчиков, и приведены к следующей обобщенной форме:

$$B = \begin{bmatrix} \cos\Delta\alpha_x \cdot \cos\Delta\beta_x & \sin\Delta\alpha_x & -\cos\Delta\alpha_x \cdot \sin\Delta\beta_x \\ -\sin\Delta\alpha_y & \cos\Delta\alpha_y \cdot \cos\Delta\beta_y & \cos\Delta\alpha_y \cdot \sin\Delta\beta_y \\ \cos\Delta\alpha_z \cdot \sin\Delta\beta_z & -\sin\Delta\alpha_z & \cos\Delta\alpha_z \cdot \cos\Delta\beta_z \end{bmatrix}. \quad (1.21)$$

С учетом выражений (1.11)–(1.13), (1.21) уравнение Пуассона (1.17) может быть преобразовано и приведено к следующему виду:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} = B_M \cdot \left[(\mathbf{S} + E - \mathbf{F} \cdot [\boldsymbol{\omega}_r]) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}} + \right. \\ \left. + \mathbf{F} \cdot (P_1 \cdot \mathbf{v} + R_1 \boldsymbol{\omega}_r + \delta \dot{\mathbf{T}}_{\text{МПЗ}}^{\text{век}} + \delta \dot{\mathbf{T}}_{\text{МПЗ}}^{\text{МВ}}) \right], \end{aligned} \quad (1.22)$$

где $[\boldsymbol{\omega}_r]$ – тензор относительной составляющей угловой скорости вращения ПО относительно Земли; $\boldsymbol{\omega}_r = [\omega_{rx} \ \omega_{ry} \ \omega_{rz}]^T$ – вектор угловой скорости вращения ПО относительно Земли; P_1, R_1 – квадратные матрицы (3×3), элементы которых зависят от градиентов МПЗ, направляющих косинусов матрицы A и положения блока магнитометров на ПО; \mathbf{v} – вектор абсолютной скорости поступательного движения точки установки блока магнитометров на ПО; B_M – матрица технологических геометрических погрешностей монтажа магнитометров в блоке, определяемая по формуле (1.21); $\delta \dot{\mathbf{T}}_{\text{МПЗ}}^{\text{век}}$, $\delta \dot{\mathbf{T}}_{\text{МПЗ}}^{\text{МВ}}$ – скорости изменения векторов низкочастотных (вековых) и высокочастотных (магнитных возмущений) составляющих вариаций МПЗ. Причем

$$\begin{aligned} \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} &= \tilde{\mathbf{v}} + [\boldsymbol{\omega}_r \cdot \boldsymbol{\rho}] = \tilde{\mathbf{v}} + [\boldsymbol{\omega}_r] \cdot \boldsymbol{\rho} = \tilde{\mathbf{v}} + [\boldsymbol{\rho}] \cdot \boldsymbol{\omega}_r = \\ &= \begin{bmatrix} \tilde{v}_x \\ \tilde{v}_y \\ \tilde{v}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{rz} & \omega_{ry} \\ \omega_{rz} & 0 & -\omega_{rx} \\ -\omega_{ry} & \omega_{rx} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho_x \\ \rho_y \\ \rho_z \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \tilde{v}_x \\ \tilde{v}_y \\ \tilde{v}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\rho_z & \rho_y \\ \rho_z & 0 & -\rho_x \\ -\rho_y & \rho_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{rx} \\ \omega_{ry} \\ \omega_{rz} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1.23)$$

где $v_x, v_y, v_z, \tilde{v}_x, \tilde{v}_y, \tilde{v}_z$ – проекции векторов абсолютной \mathbf{v} и переносной $\tilde{\mathbf{v}}$ скоростей движения ПО; $\boldsymbol{\rho}$ – радиус-вектор положения точки измерения МПЗ относительно центра масс ПО; $[\boldsymbol{\rho}]$ – тензор радиуса-вектора $\boldsymbol{\rho}$ в связанном трехграннике XYZ ; ρ_x, ρ_y, ρ_z – проекции радиуса-вектора $\boldsymbol{\rho}$ на оси XYZ .

При таком дифференциальном подходе удастся скомпенсировать недостатки измерительной части цифрового датчика соответствующими достоинствами вычислительной части и, наоборот, ограничения и недостатки вычислительной части восполнить соответствующими достоинствами измерительной части.

Основой встраиваемого в первичный преобразователь интеллекта является микроконтроллер. Применение микроконтроллеров, встраиваемых в первичные преобразователи, обеспечивает им значительное расширение функциональных возможностей при достаточно низкой стоимости, простоте и надежности их аппаратной реализации.

Для успешной реализации на практике концепции разработки интеллектуальных сенсоров предполагается выполнение нескольких условий, связанных:

- с совершенствованием *измерительной части* интеллектуальных сенсоров (с формированием адекватной и точной модели первичного преобразователя и датчика; с разработкой и реализацией спектра требований, предъявляемых к измерительной части сенсора; с созданием соответствующего технического и методико-технологического обеспечения реализации разработанной модели сенсора с учетом предъявляемых к измерительной части сенсора требований);

- с совершенствованием *вычислительной части* интеллектуальных датчиков (с разработкой математического, алгоритмического, программного и технического обеспечения для выбора и реализации вычислительной (микропроцессорной) части сенсора с учетом требований, предъявляемых к ней).

Схема, иллюстрирующая процесс формирования в выходных сигналах ТБМ $\mathbf{u}_M = [u_{Mx} \ u_{My} \ u_{Mz}]^T$ многомерной магнито-инерциальной информации, представлена на рис. 1.5.

Нормальная и аномальная составляющие МПЗ являются функциями радиуса-вектора \mathbf{r} точки расположения ТБМ на ПО относительно системы координат $X_g Y_g Z_g$, связанной с Землей (ГОСТ 20058-80):

$$\mathbf{T}_{МПЗ}^H(\mathbf{r}) = \mathbf{T}_{МПЗ}^H(\varphi, \lambda, r) = [T_{xg}^H \ T_{yg}^H \ T_{zg}^H]^T, \quad (1.24)$$

$$\mathbf{T}_{МПЗ}^a(\mathbf{r}) = \mathbf{T}_{МПЗ}^a(\varphi, \lambda, r) = [T_{xg}^a \ T_{yg}^a \ T_{zg}^a]^T. \quad (1.25)$$

Из анализа выражений (1.21)–(1.25) можно сделать общий вывод о том, что любой ТБМ с любыми компонентными измерительными преобразователями может быть представлен как **гетеромагнитный модуль** (многомерный магниточувствительный блок), реагирующий на несколько разнородных по физической природе величин и факторов – эксплуатационных (геометрических, кинематических, динамических, магнитных, температурных, режимных, частотных) и технологических (геометрических, магнитных, режимных, частотных) [11, 12].

В соответствии с этим на основе принципов гетеромагнитометрии с учетом комплексирования гетеромагнитного модуля с инерциальными блоками можно рассматривать выполнение единым расширенным многомерным модулем различных функций:

- локальной геомагнитной навигации;
- решения задачи ориентации;

- курсоуказания;
- идентификации параметров магнитного поля объекта;
- идентификации составляющих МПЗ;
- решения задачи магнитного поиска и др.

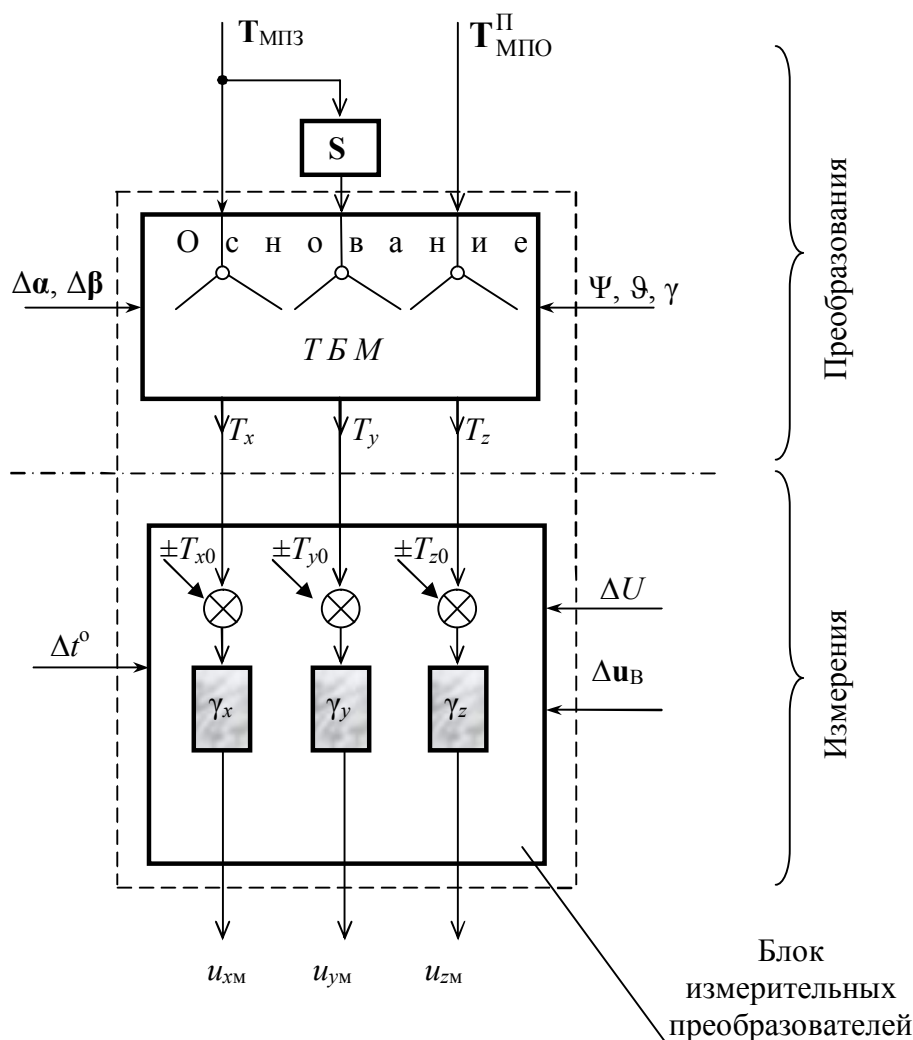


Рис. 1.5. Схема измерений с помощью трехосного блока магнитометров

Для реализации расширенных функций обработки многомерной магнитометрической и инерциальной информации возможно использование наряду с компонентной $\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T$ магнитометрической информацией информации о модулях и градиентах МПЗ:

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2}, \quad (1.26)$$

$$T_{\text{МПЗ}} = (T_{\text{МПЗ } x}^2 + T_{\text{МПЗ } y}^2 + T_{\text{МПЗ } z}^2)^{1/2}, \quad (1.27)$$

$$\nabla \mathbf{T} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \nabla T_{xx} & \nabla T_{yx} & \nabla T_{zx} \\ \nabla T_{xy} & \nabla T_{yy} & \nabla T_{yz} \\ \nabla T_{xz} & \nabla T_{yz} & \nabla T_{zz} \end{bmatrix} = [\nabla \mathbf{T}_x \ \nabla \mathbf{T}_y \ \nabla \mathbf{T}_z], \quad (1.28)$$

$$\nabla \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} = \frac{\partial \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}}{\partial \mathbf{r}} = [\nabla \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{xg} \ \nabla \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{yg} \ \nabla \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{zg}]. \quad (1.29)$$

На основе уравнения (1.22) в соответствии с выражениями (1.26)–(1.29) можно составить градиентное уравнение

$$\nabla \mathbf{T} = B_M \cdot [(\mathbf{S} + E) \cdot A] \cdot \nabla \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}. \quad (1.30)$$

Градиентные измерения МПЗ сглаживают высокочастотные и низкочастотные неоднородности и вариации МПЗ. Кроме того, градиентные измерения МПЗ позволяют полностью исключить влияние на результаты многомерных измерений постоянных составляющих $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{п}} = [P \ Q \ R]^T$ (что одновременно дает возможность исключить влияние и электромагнитной составляющей $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{эм}} = [P_{\text{э}} \ Q_{\text{э}} \ R_{\text{э}}]^T$, связанной с включением или выключением электронагрузок на ПО), а также медленно изменяющихся (низкочастотных) составляющих МПЗ (аномалий и вариаций).

Предполагая, что дестабилизирующие факторы (Δt^0 , ΔU , $\Delta \mathbf{u}_B$) изменяются при эксплуатации на достаточно малые величины относительно своих номинальных значений, можно правые части метрологических характеристик разложить в ряды Тэйлора по степеням вариаций дестабилизирующих факторов и привести к полуразвернутой векторно-матричной форме (рис. 1.6) [12]:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\gamma_x + \Delta\gamma_x) \cdot T_x \\ (\gamma_y + \Delta\gamma_y) \cdot T_y \\ (\gamma_z + \Delta\gamma_z) \cdot T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{x0} \pm \Delta u_{x0} \\ u_{y0} \pm \Delta u_{y0} \\ u_{z0} \pm \Delta u_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a_{xi} \cdot \Delta t^i \\ \sum_{i=1}^n a_{yi} \cdot \Delta t^i \\ \sum_{i=1}^n a_{zi} \cdot \Delta t^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m b_{xj} \cdot \Delta U^j \\ \sum_{j=1}^m b_{yj} \cdot \Delta U^j \\ \sum_{j=1}^m b_{zj} \cdot \Delta U^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{\ell} c_{xk} \cdot \Delta u_{yb}^k + \sum_{k=1}^p d_{xk} \cdot \Delta u_{zb}^k \\ \sum_{k=1}^{\ell} c_{yk} \cdot \Delta u_{xb}^k + \sum_{k=1}^p d_{yk} \cdot \Delta u_{zb}^k \\ \sum_{k=1}^{\ell} c_{zk} \cdot \Delta u_{xb}^k + \sum_{k=1}^p d_{zk} \cdot \Delta u_{yb}^k \end{bmatrix}. \quad (1.31)$$

Причем входные сигналы $\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T$ формируются в соответствии с уравнением Пуассона (1.22), которое можно привести к упрощенному виду

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = B \left((\mathbf{S} + \mathbf{E}) \cdot A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi \cdot \begin{bmatrix} T_{xg}(\varphi, \lambda, r) \\ T_{yg}(\varphi, \lambda, r) \\ T_{zg}(\varphi, \lambda, r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \right). \quad (1.32)$$

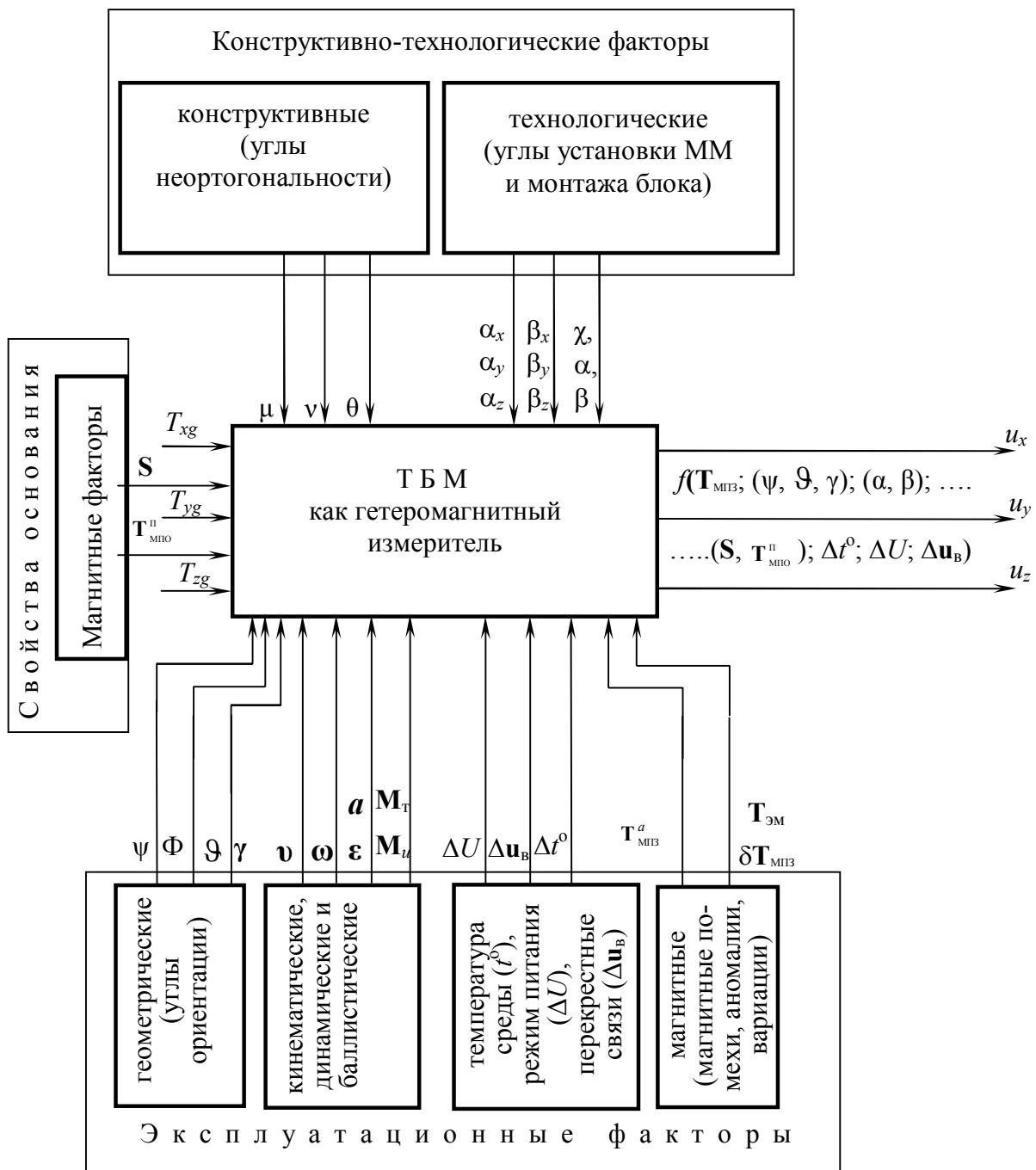


Рис. 1.6. Схема формирования дестабилизирующих факторов

Результаты сравнительного анализа классических магнитометров приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Сравнительный анализ классических магнитометров

Магниточувствительный преобразователь	Минимальное разрешение, мкТл	Число одновременно регистрируемых параметров МПЗ	Динамический диапазон, мТл	Потребляемая мощность, мВт
Элемент Холла	1 ... 10	1 ... 3	± 100	10 ... 50
Тонкопленочный магниторезистор	0,4 ... 0,85	1 ... 2	$\pm (0,2 \dots 1)$	30 ... 90
Магнитоиндукционный датчик	$(1 \dots 2) \cdot 10^{-2}$	1	$\pm (1 \dots 200)$	1 ... 5
Феррозонд	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	1	$\pm 0,1$	5 ... 50

Сведения о серийно выпускаемых феррозондовых магнитометрах, применяемых в геологоразведке, навигации, ориентации и других отраслях практики, указаны в табл. 1.11.

Таблица 1.11

Феррозондовые магнитометры

Параметры	Тип (марка) датчика		
	однокомпонентный (ДФО-1)	двухкомпонентный (ДФДМ-1)	магнитоградиентометрический (МФ-24ФМ)
Диапазон измерения, нТл: по горизонтали по вертикали	± 60000 ± 64000		$\pm 2 \cdot 10^6$
Погрешность измерения: по горизонтали по вертикали	≤ 50 нТл (2σ) (до 40000 нТл) ≤ 150 нТл (2σ) ($4 \dots 6$) 10^4 нТл ≤ 1000 нТл (2σ)		$\leq 5\%$
Разрешающая способность	2 нТл		—
Питание	$\left(27_{-9}^{+4}\right)$ В постоянного тока $\left(36_{-3,6}^{+1,8}\right)$ В, 400 ± 20 Гц		2 батарейки типа АА или сеть 220 В
Мощность, Вт	≤ 10 по постоянному току $\leq 0,1$ по переменному току		—

Окончание табл. 1.11

Параметры	Тип (марка) датчика		
	однокомпонентный (ДФО-1)	двухкомпонентный (ДФДМ-1)	магнитогра- диентометри- ческий (МФ-24ФМ)
Габариты, мм: преобразователя блока электроники феррозонда	56×23×23	Ø 98×79	100×12
	360×194×92	360×194×92	36×83×160
	45×12,5×11 (Ф3-1)	45×12,5×11 (Ф3-1)	–
Масса, кг: преобразователя блока электроники	0,2	1,2	–
	Не более 4,7		0,25
Температурный диапазон, °С	От –60 до +150		±40
Выходной сигнал	Цифровой / аналоговый Крутизна 8 мкв/нТл		Цифровая индикация
Частота опроса датчиков, Гц	≤ 0,1		–

1.4. Современные и перспективные требования к автономным измерениям

Средства автономных измерений (акселерометры, гироскопы и магнитометры) привлекают внимание разработчиков информационных и навигационных систем, в первую очередь, благодаря их уникальному свойству автономности, которое характеризуется способностью работать независимо (по получаемой информации, энергии и располагаемому времени) от взаимодействия с внешними источниками информации (радиотехническими, астрономическими и др.) и энергии (аккумуляторами и пр.).

Проявление свойства автономности инерциальных и магнитометрических датчиков, прежде всего, важно использовать при разработке навигационных систем (НС): инерциальных (ИНС), корреляционно-экстремальных (КЭНС) и др. [5, 16, 34–37].

Для обеспечения выполнения требования автономности (хотя бы частично) с учетом сохранения других достоинств НС (точности и др.) в конце XX столетия были разработаны и нашли практическое применение так называемые интегрированные системы (ИНС + СНС, ИНС + КЭНС и др.). Однако в таких комплексных НС еще в большей мере обострились недостатки, связанные со сложностью и нетехнологичностью, с низким уровнем надежности и долговечности, с высокой стоимостью и неполной автономностью систем.

Свойство автономности НС, с одной стороны, предопределяется требованием ограничения времени автономной работы ПО и НС, а с другой стороны, зависит от метрологических характеристик основных датчиков

ИНС (гироскопов и акселерометров). Стандартные требования, предъявляемые к инерциальным датчикам НС трех классов автономности, приведены в табл. 1.12 [34]:

- I класс для НС и ПО с информационной автономностью навигационного обеспечения $t_{\text{авт}} \geq 1$ сутки;
- II класс для НС и ПО с $t_{\text{авт}}$ в несколько часов;
- III класс для НС и ПО с $t_{\text{авт}}$ без существенных ограничений по информационной автономности.

Таблица 1.12

Стандартные требования, предъявляемые к инерциальным датчикам НС трех классов автономности

Характеристика	Класс ПО и НС		
	I	II	III
Нестабильность дрейфа гироскопов, град/ч	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	$(3-5) \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}-10^{-1}$
Погрешности (нулевые сигналы) акселерометров, м/с ²	$(2-3) \cdot 10^{-4}$	$(3-5) \cdot 10^{-4}$	10^{-3}

Решение задач геомагнитной ориентации и навигации на основе использования сигналов, получаемых с помощью бортовых компонентных магнитометров, не приводит к накоплению погрешностей во времени, как это характерно для решения аналогичных задач на основе использования в ИНС инерциальных датчиков (гироскопов и акселерометров).

К началу XXI в. гироскопы и акселерометры становятся базовыми датчиками для построения навигационных систем (инерциальных автономных и интегрированных полуавтономных) широкого спектра практического использования в коммерческих, промышленных и военных целях с разными масштабами применения (тактическими, навигационными и стратегическими). Сведения о градациях современных требований, предъявляемых к инерциальным датчикам с учетом различных целей и масштабов применения, приведены в табл. 1.13 [34].

Таблица 1.13

Современные требования, предъявляемые к инерциальным датчикам

Параметры датчика	Цель применения			
	коммерческая	тактическая	навигационная	стратегическая
Минимальный дрейф гироскопа	>1 град / с	~1 град / ч	10^{-2} град / ч	$\sim 10^{-3}$ град / ч
Порог чувствительности акселерометра	>50 мг	~1 мг	25 мкг	~1 мкг

Так как современные инерциальные и магнитометрические датчики в соответствии с информационными ИТ-технологиями выполняются, как правило, цифровыми, т. е. измерительные преобразователи интегрируются с микропроцессорными элементами обработки информации, то в связи с такой интеграцией возникают вопросы, связанные с оценкой и обеспечением требований, предъявляемых к измерительной и вычислительной частям этих интеллектуальных датчиков. Современные микропроцессорные средства обработки информации обладают достаточно высокими показателями быстродействия, объема памяти и обрабатываемой информации, точностью (определяемой длиной разрядной сетки и используемым программно-алгоритмическим обеспечением). Поэтому применительно к задачам разработки современных интеллектуальных цифровых сенсоров (преобразователей и датчиков) с повышенными технико-эксплуатационными показателями разработки придерживаются обычно принципа ИТ-технологии по рациональному распределению требований по этим показателям между измерительной (снижение порога чувствительности, расширение диапазона измерений, обеспечение стабильности во времени метрологических характеристик, простота конструкции, технологии и микроминиатюрное исполнение) и вычислительной (обеспечение высоких показателей, связанных с обработкой информации) частями.

Современные требования, предъявляемые к гироскопам (датчикам угловых скоростей (ДУС) навигационных систем), с учетом трех уровней точности указаны в табл. 1.14 [34].

Таблица 1.14

Обобщенные требования к датчикам угловых скоростей

Требования к параметрам и техническим характеристикам	Низкоскоростные		Широкодиапазонные
	прецизионные (поплавковые, ДНГ, ЛГ, ВОГ, ВТГ)	средней точности (поплавковые, ВОГ)	низкой точности (поплавковые, ДНГ, ЛГ, ВОГ, ТВГ, ММГ)
Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с	10	30	$\leq 10^3$
Порог чувствительности, °/ч	–	–	–
Допустимая нелинейность и нестабильность метрологической характеристики, °/с	10^{-5}	$(1...5) \cdot 10^{-5}$	$(1...5) \cdot 10^{-3}$
Погрешность измерения угловой скорости (СКО), °/ч	10^{-2}	10^{-1}	1
Рабочий диапазон температур, °С	От – 6 0 до + 6 0		
Время наработки на отказ, ч	5000		10^4
Надежность работы P_H в течение 5000 ч	0,98	0,99	0,999

Окончание табл. 1.14

Требования к параметрам и техническим характеристикам	Низкоскоростные		Широкодиапазонные
	прецизионные (поплавковые, ДНГ, ЛГ, ВОГ, ВТГ)	средней точности (поплавковые, ВОГ)	низкой точности (поплавковые, ДНГ, ЛГ, ВОГ, ТВГ, ММГ)
Средний срок службы не менее, лет	8	10	12
Коэффициент оперативной готовности и доступности сигналов при рабочих условиях применения за 2000 ч	$P \geq 0,9995$		
Условия транспортировки	Любым видом транспорта в течение срока гарантии		

Аналогичные требования, предъявляемые к системам ориентации на основе курсовертикалей, указаны в стандарте ARINC-705 [35].

Требования к системам ориентации и навигации, указанные в международном стандарте ARINC-704, приведены в табл. 1.15.

Таблица 1.15

Требования к ИНС (международный стандарт)

Основные характеристики	ARINC-704
Погрешность определения координат за 1 час полета, км (2σ)	3,7
Погрешность определения путевой скорости, км/час (2σ)	21,6
Время готовности, мин	10
Погрешность выдачи сигналов по крену и тангажу, град (угл. мин)	0,1 (6')
Погрешность выдачи сигналов истинного курса, град (угл. мин)	0,4 (24')
Формирование пилотажной и навигационной информации в течение ≥ 10 час полета, число параметров	32
Масса ИНС, кг	20
Потребляемая мощность, В·А	200
Наработка на отказ, ч	5000
Виброустойчивость, g	0,5
Рабочий диапазон температур, °С	От -15 до +55
Вероятность исправной работы в течение 5000 ч (надежность)	$P_H \geq 0,99$

В связи с особенностями работы инерциальных датчиков в условиях космического пространства (невесомость, глубокий вакуум) высокочувствительные бортовые акселерометры начинают реагировать даже на действия микровозмущений (табл. 1.16).

Ориентировочные значения требований, предъявляемых к блокам компонентных магнитометров, применяемых в составе бортовых систем ориентации и навигации, представлены в табл. 1.17.

Таблица 1.16

Ускорение от действий микровозмущений в космосе

Негравитационные микровозмущения	Значение ускорения, м/с ²
Сопrotивление верхних слоев атмосферы орбитальному движению космического аппарата (аэродинамическое торможение)	$10^{-6}-10^{-9}$
Давление солнечных лучей на аппарат	10^{-8}
Давление лучей теплового излучения Земли	10^{-9}
Альбедо Земли	$10^{-8}-10^{-9}$
Реакция аппарата на сокращения сердца космонавта	$5 \cdot 10^{-8}-2 \cdot 10^{-10}$

Таблица 1.17

Требования к блокам магнитометров

Параметры и характеристики	Значение
Диапазон измерений, нТл	$0-10^5$
Диапазон рабочих температур, °С	От -60 до +60
Порог чувствительности, нТл	0,1-1, 1-10
Погрешность от нелинейности и нестационарности измерения σ , нТл	1-10
Допустимые погрешности в углах ориентации осей чувствительностей магнитометров: при монтаже магнитометров при установке блока	До 6'
	До 10'
Питание	Стационарное или автономное
Возможность автономной работы от источника постоянного тока (аккумулятора) $U_{\text{пит}}$, В	5, 12, 24
Наработка на отказ (гарантийный ресурс), ч	10^4
Коэффициент оперативной готовности и доступности сигналов при рабочих условиях за 2000 ч	$P_H \geq 0,9995$
Средний срок службы до списания, лет	Не менее 10
Транспортировка	Любым видом транспорта

Различные области практического применения магнитометров и разнообразие масштабов задач, решаемых блоками ММ по грациям, приведены в табл. 1.18.

Современные требования к датчикам первичной информации с учетом достижимых показателей точности решения задач ориентации и навигации приведены в табл. 1.19.

Таблица 1.18

Области практического применения магнитометров

Градации требований к характеристикам	Параметры магнитометров		
	порог чувствительности, нТл	диапазон измерений, нТл	погрешность измерения СКО, %
Коммерческие цели	10	0–10 ⁹	2–5
Магнитный поиск объекта и позиционирование	1	0–10 ⁹	0,1
Задачи ориентации	1–5	0–10 ⁵	≤ 1
Задачи навигации	10 ⁻¹	0–10 ⁵	10 ⁻²
Стратегические задачи	10 ⁻² –10 ⁻¹	0–10 ⁶	5·10 ⁻²
Задачи геофизики и геологоразведки	10 ⁻³ –10 ⁻²	0–10 ⁵	10 ⁻³

Таблица 1.19

Показатели точности решения задач ориентации и навигации

Показатели	Последнее десятилетие XX в.	Первое десятилетие XXI в. (и в перспективе)
Погрешности бортовых измерений параметров МПЗ, нТл	$\Delta T_g \leq 5$ $\Delta T_{xg} \leq 20$ $\Delta T_{yg} \leq 40$ $\Delta T_{zg} \leq 50$	$\Delta T_g \leq 1$ $\Delta T_{xg} = \Delta T_{yg} = \Delta T_{zg} \leq 20$
Минимальный дрейф гироскопов, град/ч	0,1 ... 0,01	10 ⁻⁴ (ЛГ; ВОГ), 10 ⁻⁸ (АГ), 10 ⁻¹¹ (ЭСГ), 10 ⁻¹⁴ (АИ) (в перспективе)
Минимальная погрешность акселерометров, g	(10 ⁻⁴ ... 10 ⁻⁵)	10 ⁻⁶ и менее
Минимальная погрешность определения углов ориентации объектов	1' ... 2'	1" ... 2" (доли угловых секунд в перспективе)
Минимальная погрешность позиционирования объекта с помощью СНС	Несколько метров (предельно до 1 м)	До 1 см (в перспективе до длины волны радиосигнала)

Микропроцессорная (вычислительная) часть интеллектуальных (цифровых) датчиков может выполнять следующие функции:

- преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму;
- обработка многомерной информации в цифровой форме по дискретным алгоритмам;
- обмен многомерной информацией в цифровой форме между отдельными каналами обработки информации;

- хранение многомерной информации в ячейках памяти;
- выдача информации по запросам;
- обратное цифроаналоговое преобразование сигналов для выполнения функций индикации, управления, регистрации.

Разрабатываемые на основе математического обеспечения (МО) алгоритмы функционирования интеллектуальных датчиков должны быть положены в основу разработки программного обеспечения (ПО) микропроцессорных частей датчиков.

Дискретная обработка информации в микропроцессорной части датчика в соответствии с разработанным АО и ПО приводит к неизбежной аппроксимации непрерывных процессов дискретными, т. е. к **квантованию** непрерывных процессов по уровню и по времени (дискретизация) или замене непрерывного во времени и в пространстве сигнала последовательностью чисел, характеризующих адекватное представление значения аналогового сигнала в определенные моменты времени.

При переходе от аналоговых датчиков к дискретным и цифровым в 70-е гг. прошлого столетия родилась очень продуктивная идея разбиения всего вычислительного процесса на части, выполняемые с разным периодом квантования по времени (или с разной частотой обработки данных). Эта идея заключается в том, что основной объем вычислительных операций выполняется со сравнительно низкой частотой вычисления, а малочисленный комплекс упрощенных алгоритмов, предназначенных для предварительной обработки сигналов датчиков первичной информации, – с высокой частотой.

Применительно к задачам ориентации и навигации ПО, решаемым с помощью бесплатформенных инерциальных систем ориентации и навигации, первичная основная информация которых формируется на основе сигналов акселерометров и гироскопов (инерциальных цифровых датчиков), численные алгоритмы и вычислительные процессы, воспроизводимые в микроконтроллерах систем и датчиков, реализуются, как правило, по трехконтурным и даже многоконтурным схемам [36, 37]:

- *контурам опроса датчиков*, работающим с малым значением такта τ_1 съема первичной информации (с большой частотой опроса датчиков f_1);
- *контурам ориентации* ПО, работающим со средним значением такта τ_2 обработки вторичной информации об ориентации и вращении объекта (со средней частотой вычислительного процесса f_2);
- *контурам навигации* ПО, работающим с большим значением такта τ_3 обработки вторичной навигационной информации (с малой частотой вычислительного процесса f_3 , определяемой частотой реальных процессов навигации).

В соответствии с теоремой Котельникова для исключения явлений поглощения и искажения рабочих частот при восстановлении аналогового сигнала минимально допустимая частота дискретизации сигнала по времени

$$f \geq 2 f_{max}, \quad (1.33)$$

где f_{max} – максимально возможная частота изменения аналогового сигнала в данном масштабе решаемых задач.

С учетом собственных частотных свойств, присущих инерциальным датчикам (акселерометрам и гироскопам), для которых рабочий диапазон частот изменения измеряемых аналоговых величин составляет несколько десятков – сотен герц (f_{max} порядка $10-10^2$ Гц), обычно частоту опроса датчиков (частоту съема первичной информации) в современных БИСОН выбирают в пределах $f_1 \leq (1-3) \cdot 10^3$ Гц [36].

Такт τ_2 решения «быстрых» задач в БИСОН определяется, во-первых, возможностью восстановления с требуемой точностью информации об аналоговых параметрах углов поворота объекта, т. е. динамических параметрах, изменяющихся с частотами качки ПО относительно плоскости горизонта и частотами рыскания объекта, и, во-вторых, требованиями к дискретности выдачи информации об этих параметрах потребителям, в качестве которых в большинстве случаев выступают бортовая система автоматического управления объектом, автопилот, система встроенного контроля и телеметрии и пр. Для многих классов ПО (самолетов, вертолетов и надводных кораблей) частота f_2 решения «быстрых» задач обычно лежит в пределах от 100 до 300 Гц [36, 37].

Частота f_3 решения «медленных» задач, включающих в себя алгоритмы навигации, наведения, траекторного управления (т. е. алгоритмы управления переносным движением центра масс ПО по траектории), зависит от типа подвижного объекта и для многих типов летательных и плавающих аппаратов выбирается, как правило, в пределах до $f_3 \leq 10$ Гц [36, 37].

1.5. Комплексование, резервирование и комбинирование магнитометров

Из анализа выражений (1.11)–(1.22), характеризующих метрологические свойства инерциальных и магнитометрических датчиков, видно, что эти датчики являются многомерными и многосвязанными, а их показания – комплексными, так как характеризуют комплексные свойства ПО и окружающей среды. Комплексность информации, содержащейся в показаниях инерциальных и магнитометрических датчиков, указывает на возможность комплексования и самих средств информации. Комплексование различных СИ обычно выполняется с целью повышения показателей эффективности их работы: точности, надежности, долговечности, а также обеспечения у СИ таких свойств, как самопроверяемость, отказоустойчивость, живучесть.

Комплексование СИ связано с процессом расширения информации. При измерении, обработке, хранении, передаче и получении информации могут быть искусственным путем созданы условия для формирования избыточной информации. Для достижения этих целей на практике используются различные способы обеспечения избыточной информации (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Способы создания избыточности информации

Под *структурной избыточностью информации* понимаются схемотехнические решения, обеспечивающие расширение информации, формируемой, передаваемой и обрабатываемой в ИВС за счет расширения аппаратных средств. Структурная избыточность информации может быть достигнута двумя способами:

- резервированием (за счет использования однородных средств измерений – СИ);
- комплексированием (за счет использования разнородных СИ).

Резервирование возможно в различных масштабах и на разных уровнях в ИВС. Различают *раздельное* и *общее* резервирование. При *раздельном* осуществляют резервирование простейших элементов на микроуровне (преобразователей, датчиков). При этом обычно все резервированные преобразователи и датчики размещают в одном корпусе. При таком резервировании кратность резервирования элементов зависит от их надежности.

Если вероятность отказов всех элементов ИВС одинакова и равна q , а кратность резервирования всех элементов также одинакова ($m_1 = m_2 = m$), то

$$P_H = (1 - q^m)^n. \quad (1.34)$$

Ниже представлены схемы построения магнитометрических ИВС со структурной избыточностью информации, разработанные на основе принципа резервирования по датчикам (рис. 1.8) и по базисам (рис. 1.9).

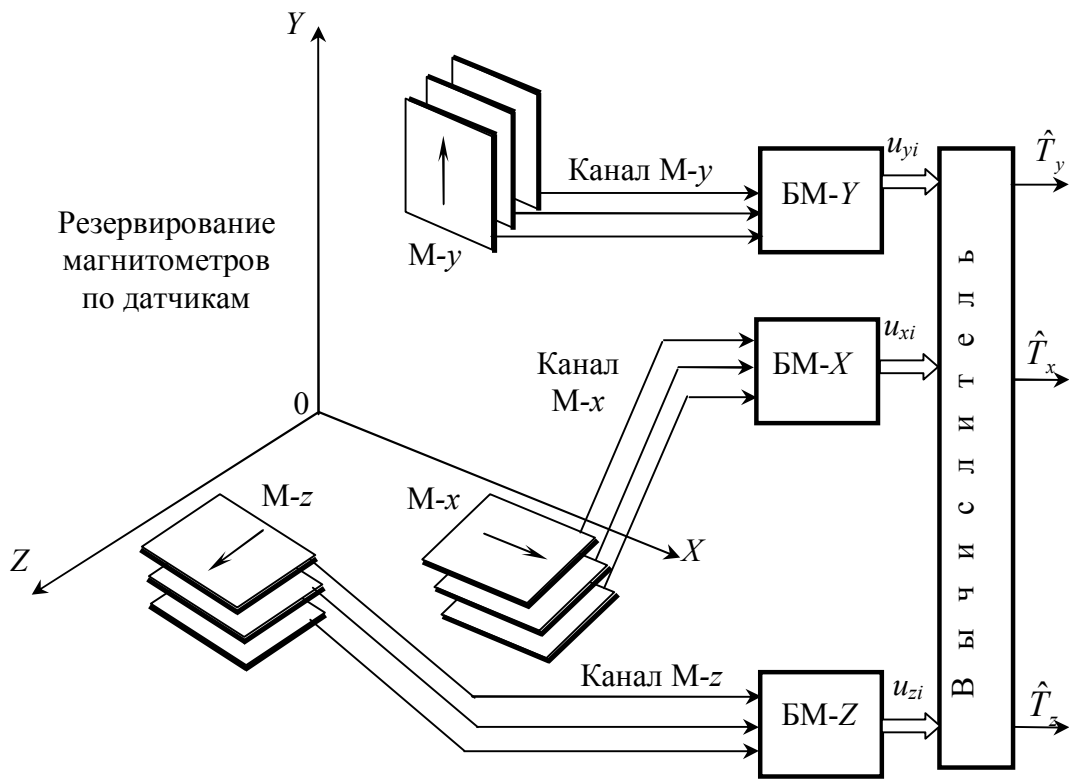


Рис. 1.8. Схема построения резервированных магнитометрических датчиков

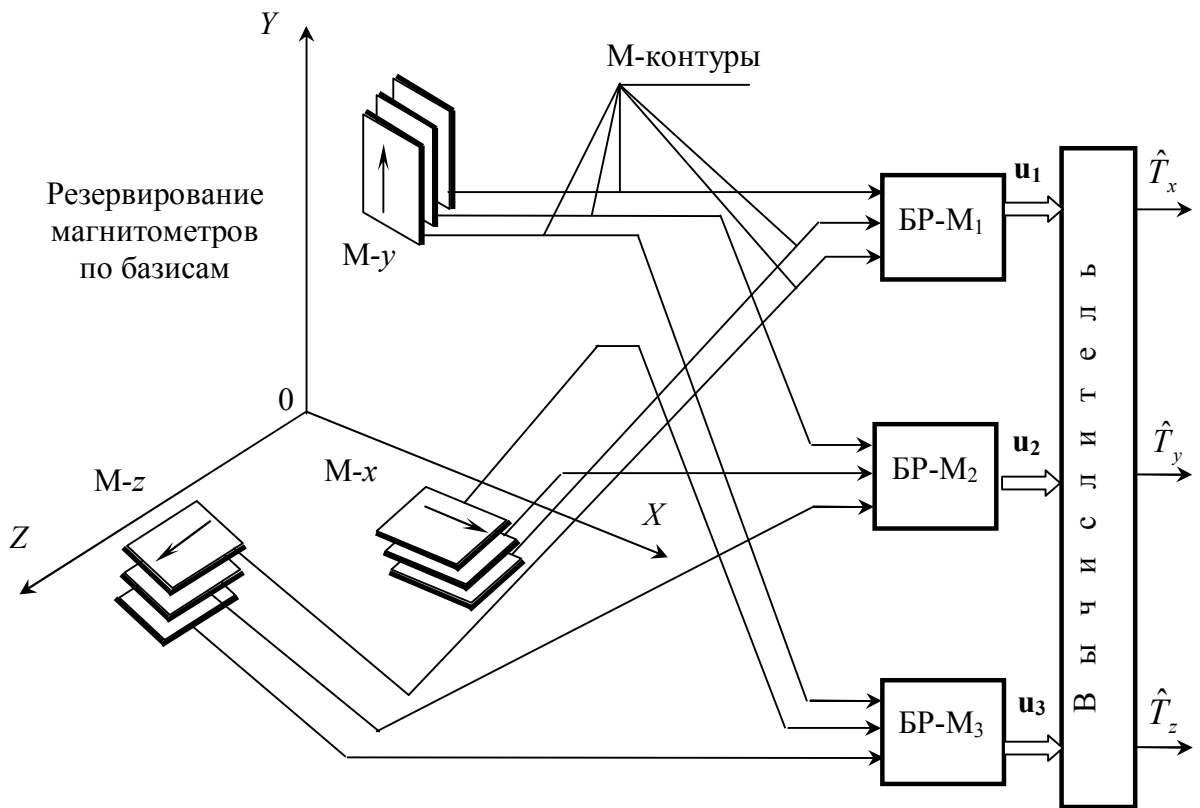


Рис. 1.9. Схема построения резервированных магнитометрических базисов

При *общем резервировании* осуществляют резервирование целых контуров, каналов измерений и даже всей ИВС целиком.

Если все элементы системы имеют одинаковую вероятность безотказной работы $p = 1 - q$, то

$$Q_p = (1-p^n)^m, \quad (1.35)$$

где Q_p – вероятность риска, вероятность наступления отказов элементов системы.

Измерительно-вычислительные системы (ИВС) со структурной избыточностью информации, построенные по принципу общего резервирования, носят специальные названия:

– двухканальные (дуплексные) при однократном резервировании ($m = 2$);

– трехканальные (триплексные, троированные) при двукратном резервировании ($m = 3$) (рис. 1.10);

– четырехканальные (квадруплексные) при трехкратном резервировании ($m = 4$) (рис. 1.11);

– пятиканальные (пентаплексные) при четырехкратном резервировании ($m = 5$).

По таким схемам резервирования выполнены БСУ в самолетах Ту-154 (АБСУ-154, $m = 2$) и Ту-144 (БСУ-144, $m = 3$). Однако по экономическим соображениям (ограничения себестоимости) разработчики БСУ вынуждены ограничиваться схемами однократного резервирования (САУ-1Т самолета ИЛ-62; САУ космического корабля Apollo, $m = 1$) или даже схемами без резервирования всей системы (автопилоты АП-28, АП-40, АП-34, $m = 0$).

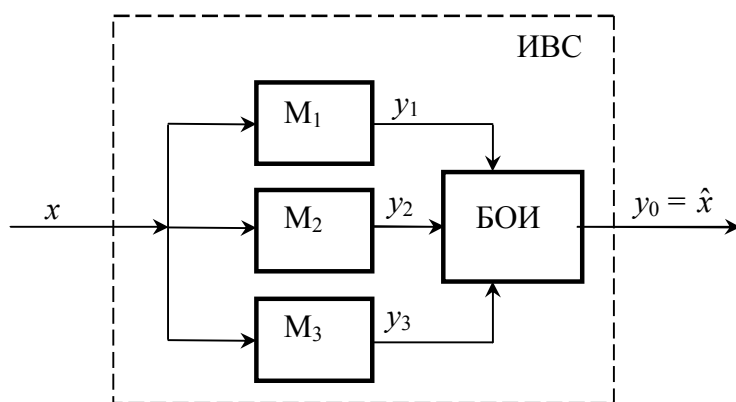


Рис. 1.10. Схема построения резервированных трехканальных ИВС

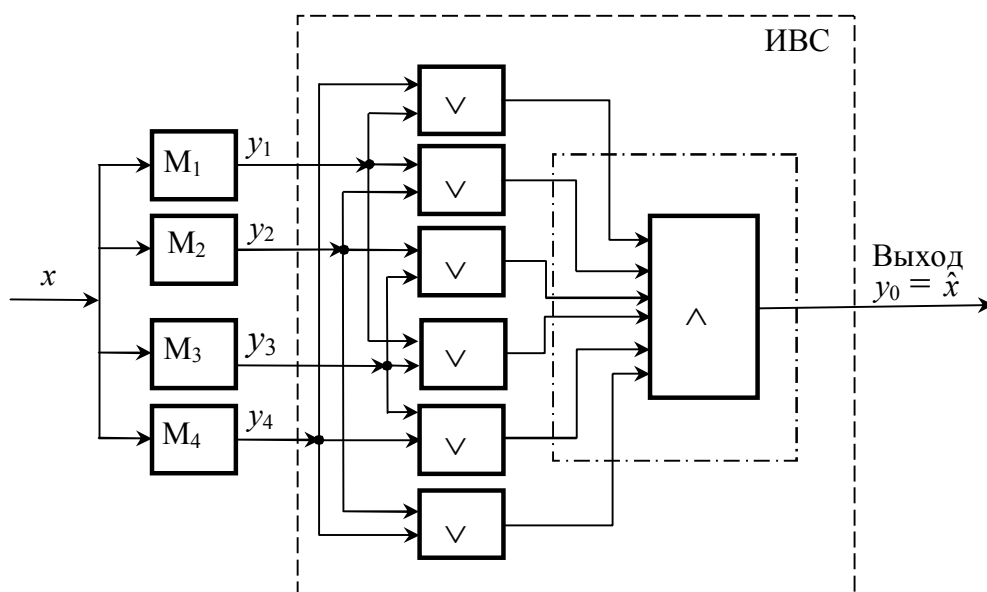


Рис. 1.11. Схема построения резервированных четырехканальных ИВС

Вместе с тем, перспектива развития транспортной техники ставит разработчиков БСУ перед необходимостью выполнения условий комфортности, безопасности, надежности, долговечности и даже условий отказоустойчивости, самопроверяемости и живучести комплексов за счет повышения степени избыточности информационных каналов ($m \geq 4$ и даже больше).

Неотвратимость в ближайшие 10 лет практического освоения планет солнечной системы и околоземного космического пространства (в первую очередь, Марса и Луны), перспектива развития межпланетных космических аппаратов, длительность полета которых может исчисляться месяцами и даже годами, могут привести разработчиков БСУ космического аппарата к необходимости создания и практического применения ИВС с высокой степенью структурной избыточности информации ($m \geq 10$ и более). В этих случаях экономические ограничения не могут сдерживать развитие ИВС для удовлетворения основных требований по показателям точности, надежности, долговечности и безопасности. Такая технико-экономическая дилемма заставляет разработчиков ИВС изыскивать и реализовывать более эффективные в техническом, экономическом и технологическом отношении методы повышения показателей точности, надежности и долговечности работы систем и способы схемотехнических решений.

Среднее время безотказной работы резервированной ИВС (среднее время наработки на отказ) определим путем интегрирования функции надежности $P_H(t)$:

$$T = \int_0^{\infty} P_H(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\Lambda t})^m] dt \approx (1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{m}) T_0 = S_T T_0, \quad (1.36)$$

причем коэффициент

$$S_T = 1 + 2^{-1} + \dots + m^{-1} > 1, \\ \lim_{m \rightarrow \infty} S_T \rightarrow e = 2,71. \quad (1.37)$$

Следовательно, среднее время безотказной работы резервированной ИВС T при постоянном резервировании ($m = \text{const}$) всегда больше среднего времени безотказной работы нерезервированной системы $T_0 = \Lambda^{-1}$. Можно показать, что

$$Q_p(t) = (1 - e^{-\Lambda t})^m \approx \frac{Q_{p0}^m}{k^{m-1}}. \quad (1.38)$$

Тогда степень снижения риска, связанного с уменьшением в k^{m-1} раз вероятности отказа ИВС при постоянном резервировании, может быть оценена с помощью коэффициента

$$S_Q = \frac{Q_{p0}}{Q_p} = \frac{k^{m-1}}{Q_{p0}^{m-1}} = \left(\frac{k}{Q_{p0}} \right)^{m-1}. \quad (1.39)$$

Таким образом, резервирование датчиков и ИВС выгодно по следующим причинам:

- повышается надежность датчиков или системы в $S_p \approx 1 - (1 - e^{-\Lambda t})^{m-1}$ раз;
- снижается степень риска, связанного с возможностью наступления внезапного отказа в системе в S_Q раз;
- повышается в S_T раз долговечность работы системы.

Если задана допустимая степень риска $Q_{\text{доп}}$, связанного с вероятностью возможного наступления отказа в резервированной ИВС, то можно найти минимально допустимое число, характеризующее кратность резервирования системы:

$$m \geq m_{\min} = \frac{\lg Q_{\text{доп}}}{\lg q}. \quad (1.40)$$

Использование оценки m_{min} по формуле (1.40) дает возможность оценить другие показатели, характеризующие работоспособность ИВС в условиях постоянного резервирования.

Под *комплексированием* СИ (датчиков или ИВС) понимается такой способ схемотехнического решения, при котором одна и та же физическая величина x измеряется с помощью нескольких (n) СИ, основанных на различных физических принципах действия и сигналы которых обрабатываются в специальном блоке, формирующем достоверное значение (оценку) входного сигнала (\hat{x}).

Таким образом, если при резервировании обеспечивается параллельная работа n однотипных СИ, работающих на одном принципе действия, то при комплексировании обеспечивается работа n параллельных СИ, работающих на разных физических принципах действия, но выполняющих ту же информационную функцию. С этой точки зрения все соотношения (1.34)–(1.40), которые позволяют оценивать вероятностные характеристики надежности, степени риска, долговечности датчиков и ИВС в условиях их резервирования, остаются справедливыми и для комплексированных датчиков, и ИВС. Однако в последнем случае следует говорить о двухканальных, трехканальных, четырехканальных и m -канальных комплексированных системах с m -кратным комплексированием. Например, для определения курса летательного, плавающего или наземного аппарата обычно используется курсовая система, которая по существу представляет собой ИВС, построенную по принципу комплексирования различных каналов определения курса: магнитного, гироскопического, индукционного, астрономического, радиотехнического, спутникового. Оптимальная обработка сигналов различных по физическому принципу компасов позволяет определить достоверное значение истинного курса ПО в каждый момент времени.

Ниже представлены схемы построения гиромангнитных ИВС на основе принципа комплексирования компонентных магнитометров и гироскопов по датчикам (рис. 1.12) и по трехосным базисам (рис. 1.13).

Данные сравнительного анализа построения ИВС с использованием различных принципов обеспечения избыточности информации представлены в табл. 1.20.

К середине 70-х гг. прошлого столетия завершился процесс формирования предпосылок для перехода от аналоговых датчиков и ИВС к цифровым датчикам и аналого-цифровым системам. В связи с таким переходом при оценке информационных свойств датчиков выяснилось, что все датчики по числу измеряемых величин можно разделить на однокомпонентные ($rasm\ x = 1$) и многокомпонентные, многомерные ($rasm\ x = r$).

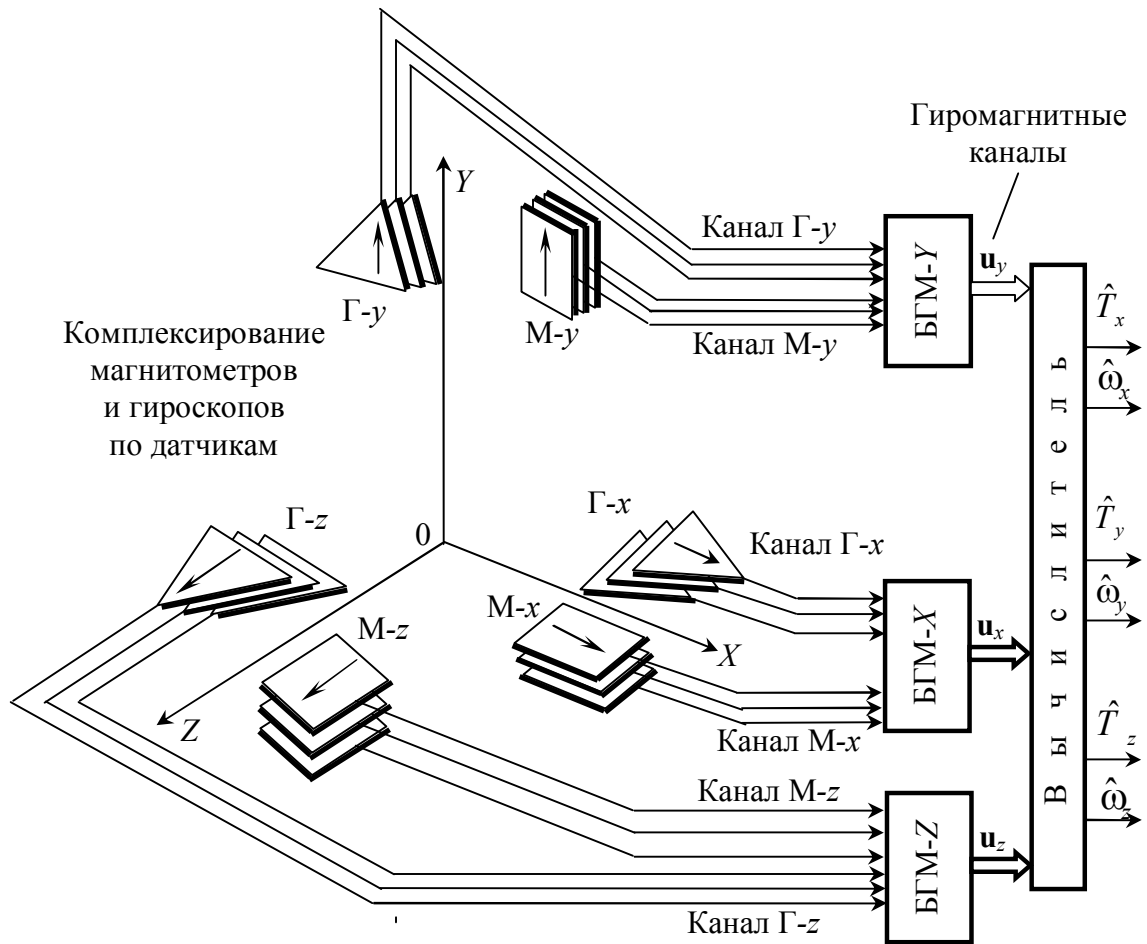


Рис. 1.12. Схема построения комплексированных гиромагнитных ИВС по датчикам

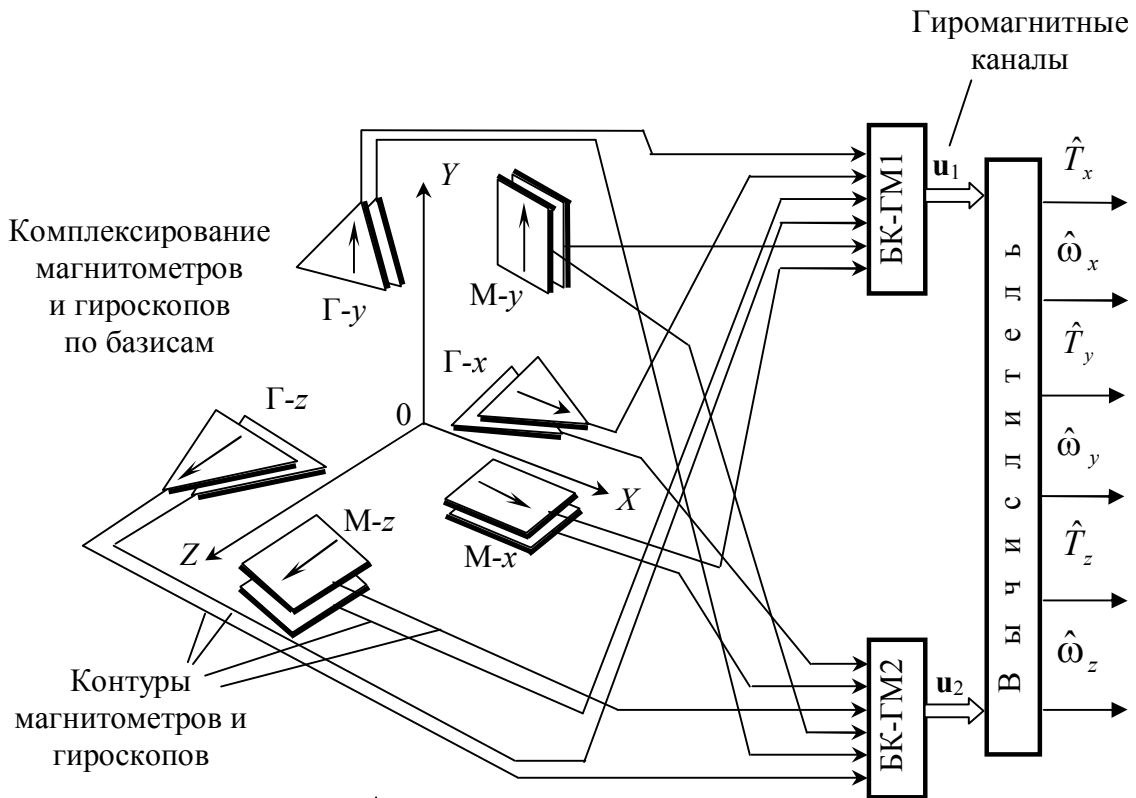


Рис. 1.13. Схема построения комплексированных гиромагнитных ИВС по базисам

Таблица 1.20

ИВС с избыточной информацией

Характеристика		Структурная (аппаратная) избыточность		Функциональная (информационная) избыточность	
		Резервирование	Комплексирование	Комбинированное комплексирование	Комбинирование
1		2	3	4	5
Свойства датчиков	магнитометров	Однотипность, монофункциональность	Многотипность, монофункциональность		Однотипность, многофункциональность
	гироскопов	–			–
	акселерометров	–			–
Свойства ИВС		Монофункциональность		Многофункциональность, многомерность	
		Моноструктурная одномерность	Полиструктурная многомерность	Полиструктурность	Моноструктурность
Безотказность n -датчиков		$P_1 = P_2 = \dots = P_n$	$P_1 \neq P_2 \neq P_3 \neq \dots \neq P_n$		$P_1 = P_2 = \dots = P_n$
Надежность (безотказность) всей ИВС		$P = \prod_{i=1}^n P_i = (1 - q^m)^n$ (при раздельном резервировании) $P = 1 - Q = 1 - (1 - p^n)^m$ (при общем резервировании)	$P = \prod_{i=1}^n P_i = (1 - q_1^{m_1})(1 - q_2^{m_2}) \dots (1 - q_n^{m_n}) \approx (1 - q_{\text{прив}}^m)^n$ $P(t) = e^{-\Lambda t}; Q(t) = 1 - e^{-\Lambda t}$		$P = (1 - q^m)^n$ (при раздельном комбинировании) $P = 1 - (1 - p^n)^m$ (при общем комбинировании)

Окончание табл. 1.20

1		2	3	4	5
Долговечность всей ИВС		$T_{\text{гар}} \leq T = \Lambda^{-1}$ (задание гарантированного срока) $K_{\text{гар}} = T/T_{\text{гар}} = (T_{\text{гар}} \cdot \Lambda)^{-1} > 1$ (запас по сроку гарантии)			
Измеряемый вектор \mathbf{x}		\mathbf{x}_1	\mathbf{x}_2	\mathbf{x}_3	\mathbf{x}_4
Размерность измеряемых векторов $\mathbf{r} = \text{rasm } \mathbf{x}$		3	12	15(27)	18
		Одномерные измерения	Многомерные измерения		
Минимальное число датчиков в ИВС	магнитометров (n_m^{min})	3	3	$\overline{3,6}$	18
	гироскопов (n_g^{min})	0	$\overline{1,3}$	$\overline{3,6}$	0
	акселерометров (n_a^{min})	0	$\overline{1,3}$	$\overline{3,6}$	0
Общее минимальное число датчиков	всего в ИВС	3	12	15	18
	на одну ось измерения	1	$\overline{2,6}$	1 (неортогональный)	
Число базисов в ИВС	ортогональных трехосных триэдров	$N_{\text{резерв}} = \prod_{i=1}^3 n_i$	$N'_{\text{компл}} = \prod_{i=1}^3 n_i$	$N'_{\text{кк}} = N'_{\text{комб}} = C_{n_{\text{маг}}}^3$	
	информационных r -мерных базисов		$N''_{\text{компл}} = C_{n_{\text{маг}}}^{12}$	$N''_{\text{кк}} = N''_{\text{комб}} = C_{n_{\text{маг}}}^{18}$	

Примечания. $\mathbf{x}_1 = [T_x \ T_y \ T_z]^T$, $\text{rasm } \mathbf{x}_1 = 3$; $\mathbf{x}_2 = [T_x \ T_y \ T_z \ [a_{ij}]_3^3]^T$, $\text{rasm } \mathbf{x}_2 = 12$;

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_3 &= [T_x \ T_y \ T_z \ [a_{ij}]_3^3 \ \Omega_x \ \Omega_y \ \Omega_z]^T \\ \mathbf{x}'_3 &= [T_x \ T_y \ T_z \ [a_{ij}]_3^3 \ g_x \ g_y \ g_z]^T \end{aligned} \right\}, \text{rasm } \mathbf{x}_3 = \text{rasm } \mathbf{x}'_3 = 15;$$

$\mathbf{x}_4 = [T_x \ T_y \ T_z \ [a_{ij}]_3^3 \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z \ \varphi \ \lambda \ r]^T$, $\text{rasm } \mathbf{x}_4 = 18$.

Создание условий для расширения информации и обеспечения избыточной информации в новых условиях стало возможно двумя путями:

- аппаратными средствами, т. е. за счет структурной избыточности информации;
- информационными средствами, т. е. программно-алгоритмическим путем.

Последний характеризуется как путь обеспечения *функциональной избыточности информации*. Результаты сравнительной оценки подходов к одномерным и многомерным измерениям приведены в табл. 1.1. На практике давно используются многокомпонентные датчики (например, двухкомпонентные двухосные гировертикали, двухосные четырехкомпонентные и пятикомпонентные поплавковые гиротахоакселерометры и др.).

Под функциональной избыточностью информации понимается такой прием схемотехнических решений при построении ИВС, при котором формирование расширенной информации обеспечивается за счет того, что каждый векторный датчик (магнитометр, гироскоп, акселерометр) реагирует не на одну измеряемую величину (x), а на несколько величин, образующих в совокупности многомерный вектор измерения $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$. Функциональная избыточность информации может быть достигнута двумя способами (см. табл. 1.20):

- *комбинированием*, когда каждый векторный датчик (например, компонентный магнитометр) устанавливается в блоке или на основании так, чтобы ось его чувствительности не совпадала ни с одной осью базовой (приборной) системы координат (неортогональная ориентация датчика);
- *комбинированным комплексированием*, когда совокупность нескольких векторных датчиков, ориентированных по ортогональным или неортогональным схемам, обеспечивает измерение вектора \mathbf{x} на основе принципа многомерных измерений.

Таким образом, при комбинированном комплексировании реализуется принцип многомерных измерений, а при комплексировании – одномерных измерений – только этим они и отличаются. При комбинировании векторных СИ (датчиков) также реализуется принцип многомерных измерений, однако он реализуется с помощью системы неортогонально ориентированных однотипных векторных датчиков. Ниже представлены схемы комбинированных многомерных неортогональных блоков магнитометров (рис. 1.14), комбинированного односвязанного комплексирования векторных датчиков (рис. 1.15), комбинированного многосвязанного комплексирования векторных датчиков (рис. 1.16).

Ниже представлены более конкретные сведения о вариантах построения структурно и функционально избыточных ИВС, реализующих принципы комплексирования (табл. 1.21), комбинированного комплексирования (табл. 1.22) и комбинирования (табл. 1.23).

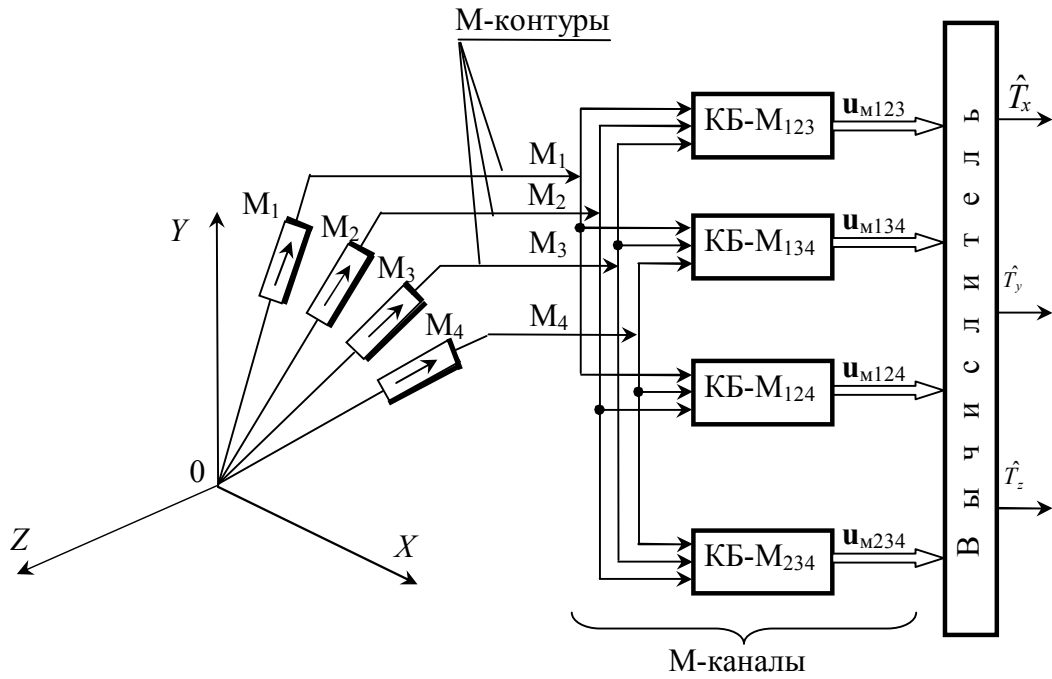


Рис. 1.14. Схема комбинированного многомерного неортогонального блока магнитометров

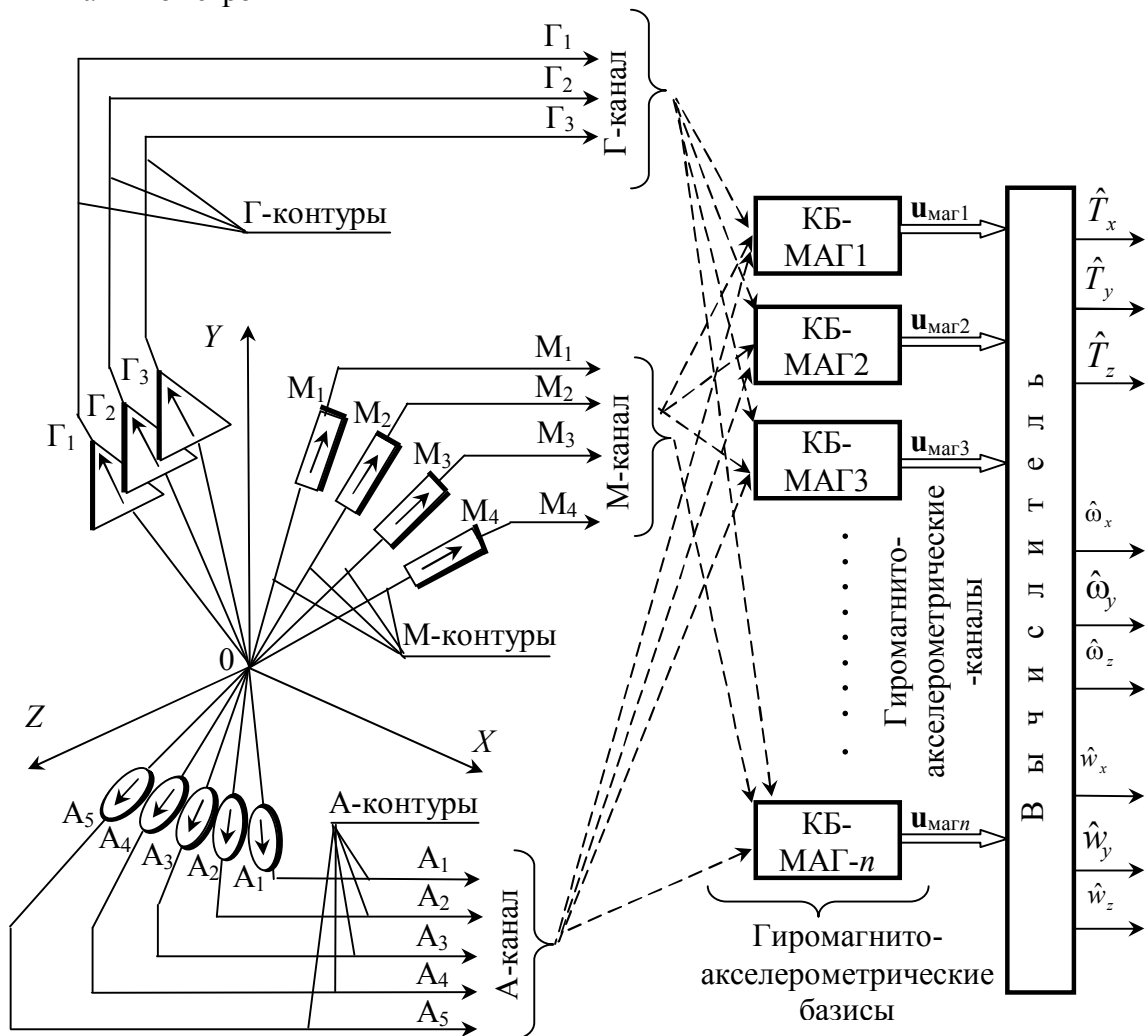


Рис. 1.15. Схема комбинированного односвязанного комплексирования векторных датчиков

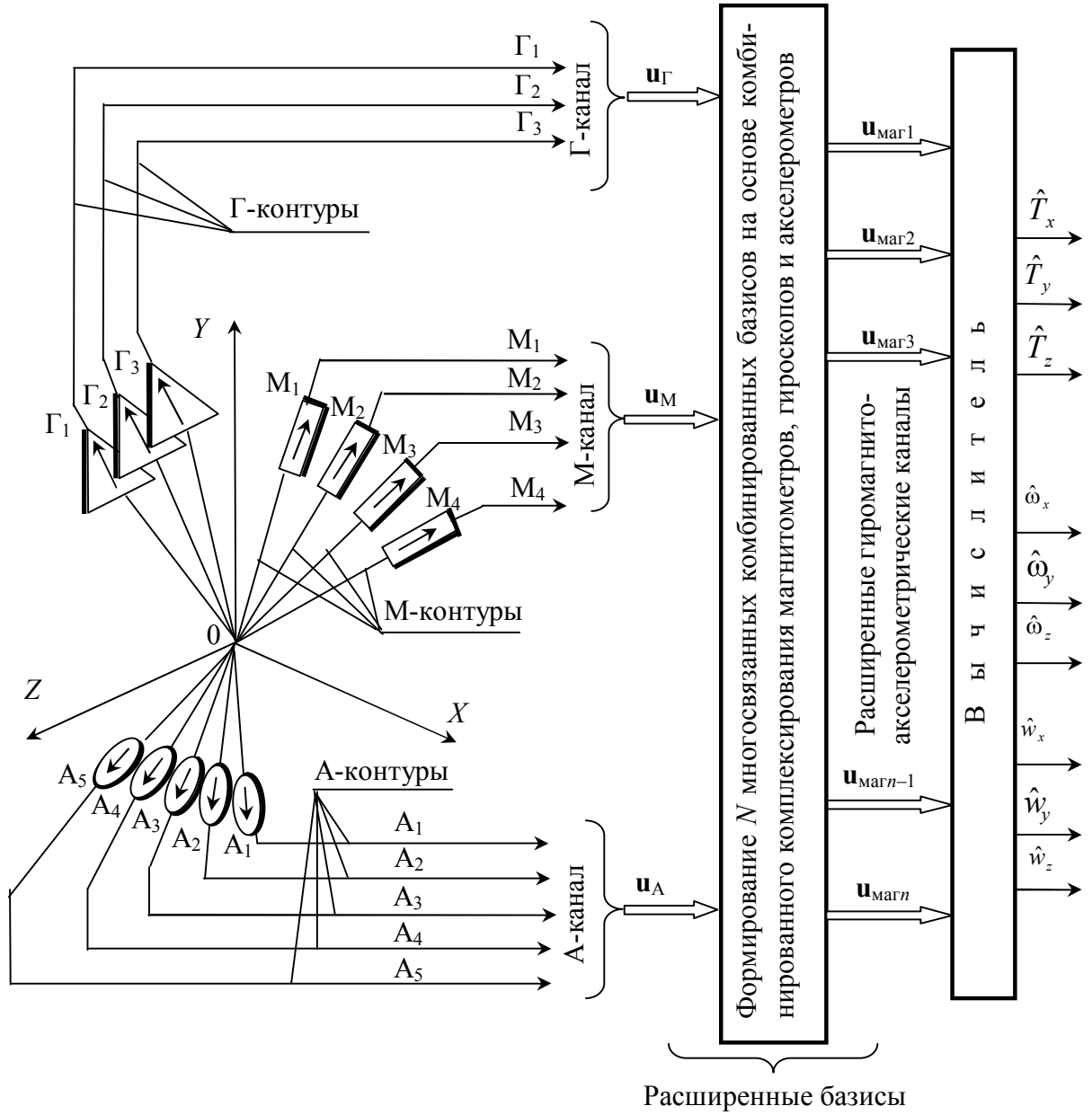


Рис. 1.16. Схема комбинированного многосвязанного комплексирования векторных датчиков

Таблица 1.21

**Построение структурно и функционально избыточных ИВС,
реализующих принципы комплексирования**

Параметры и характеристики	Значения					
Суммарное число магнитоинерциальных датчиков ($n_{\text{МАГ}}$) в ИВС	< 12	12	13	14	15	16
Число трехосных ортогональных базисов (триэдров) $N'_{\text{компл}}$ (задача 1)	$N'_{\text{компл}} = \prod_{i=1}^3 n_i$, где n_i – суммарное число магнитоинерциальных датчиков по i -й оси					
Число информационных базисов с 12-мерным вектором наблюдения $N''_{\text{компл}} = C_{n_{\text{МАГ}}}^{12}$ (задача 2)	0	1	13	91	455	1820
Характеристика решаемой задачи 2	Не корректна	Без структурной избыточности	Со структурной избыточностью равной $(N''_{\text{компл}} - 1)$			

Таблица 1.22

**Построение структурно и функционально избыточных ИВС,
реализующих принципы комбинированного комплексирования**

Параметры и характеристики	Значения					
Суммарное число магнитоинерциальных датчиков ($n_{\text{МАГ}}$) в ИВС	< 15	15	16	17	18	19
Число трехосных ортогональных базисов (триэдров) $N'_{\text{кк}}$ (задача 1)	–	455	560	680	816	969
Число информационных базисов с 15-мерным вектором наблюдения $N''_{\text{кк}} = C_{n_{\text{МАГ}}}^{15}$ (задача 2)	0	1	16	136	816	3876
Характеристика решаемой задачи 2	Не корректна	Без функциональной избыточности	С функциональной избыточностью равной $(N''_{\text{кк}} - 1)$			

**Построение структурно и функционально избыточных ИВС,
реализующих принципы комбинирования**

Параметры и характеристики	Значения					
Суммарное число магнитометров (n_M) в ИВС	< 18	18	19	20	21	22
Число трехосных ортогональных базисов (триэдров) $N'_{\text{комб}} = C_{n_M}^3$ (задача 1)	–	816	969	1140	1330	1540
Число информационных базисов с 18-мерным вектором наблюдения $N''_{\text{комб}} = C_{n_M}^{18}$ (задача 2)	0	1	19	190	1330	7225
Характеристика решаемой задачи 2	Не корректна	Без функциональной избыточности	С функциональной избыточностью равной ($N''_{\text{комб}} - 1$)			

Из анализа табл. 1.21–1.23 видно, что на основе принципов комплексирования и комбинирования векторных датчиков можно создать высокоинформативные ИВС с достаточно большим числом построения ортогональных трехосных и информационных N -мерных ($N = 12, 15, 18$) базисов, причем совершенно не обязательно реализовывать на практике все возможные варианты их построения.

Три магнитометра, оси чувствительностей которых не коллинеарны и не компланарны, образуют неортогональный комбинированный базис магнитометров (КБ- M_{ijk}) (см. рис. 1.14), где i, j, k принимают несовпадающие значения от 1 до 4. Аналогичным образом можно сформировать неортогональные трехосные базисы акселерометров (КБ- A_{ijk}) и гироскопов (КБ- G_{ijk}). Любая ИВС с избыточной информацией, построенная на основе использования принципов резервирования, комплексирования или комбинирования, в общем случае является многомерной многосвязанной системой, МО которой приводит к математической модели размерности $n \times n$. При любом способе построения ИВС с избыточной информацией систему можно представить состоящей из измерительной и вычислительной части.

При разработке новой ИВС необходимо по заданной безотказности системы $P_{\text{треб}}$ (либо по допустимой вероятности отказов системы $Q_{\text{доп}}$, либо по допустимой интенсивности отказов $\Lambda_{\text{доп}}$) определить требования к характеристикам безотказности составляющих ее элементов.

Для ИВС с экспоненциальным законом распределения безопасности во времени можно написать выражения потребных характеристик элементов системы [32]:

$$p_{\text{тр}} = \sqrt[n]{P_{\text{тр}}}, \quad (1.41)$$

$$q_{\text{доп}} \approx \frac{Q_{\text{доп}}}{n}, \quad (1.42)$$

$$k_i = \frac{q_i}{q_{\text{доп}}}, \quad (1.43)$$

$$\Lambda_{\text{доп}} = \left| \frac{\ln P_{\text{тр}}}{T_{\text{тр}}} \right|, \quad (1.44)$$

$$\lambda_{\text{доп}} = \frac{\Lambda_{\text{доп}}}{n}, \quad (1.45)$$

$$m \geq m_{\text{min}} \frac{\lg Q_{\text{доп}}}{\lg q}, \quad (1.46)$$

где для одного датчика и ИВС: $p_{\text{тр}}$, $P_{\text{треб}}$ – требуемый уровень безотказности (надежности); n – число датчиков в ИВС; $q_{\text{доп}}$, $Q_{\text{доп}}$ – допустимый уровень риска (допустимая ненадежность); $\lambda_{\text{доп}}$, $\Lambda_{\text{доп}}$ – допустимый уровень интенсивности отказов; $T_{\text{треб}}$ – требуемый уровень времени эксплуатации ИВС до первого отказа системы; m_{min} – минимально допустимое число резервируемых элементов; m – фактическое число резервируемых элементов; k_i – коэффициент снижения степени риска для i -го элемента с уровнем надежности, равным q_i .

Для использования достоинств ИВС, построенных на основе применения принципов резервирования, комплексирования и комбинирования, необходимо во всех этих системах предусмотреть устройства контроля, которые по специальным алгоритмам могли бы своевременно определять неисправный датчик и осуществлять автоматическое отключение этого датчика с дальнейшим использованием сигналов только годных датчиков. Такие логические устройства называют детекторами отказов, мажоритарными органами или кворум-элементами. В этих логических устройствах часто используется метод «голосования» (метод мажорирования). Подобные системы содержат n одинаковых элементов ℓ_i ($i = \overline{1, n}$), объединенных схемой голосования « k из n » (k/n) (рис. 1.17) [3, 10]. Можно показать, что надежность ИВС по мере отказов входящих в нее датчиков стремится к надежности кворум-элемента.

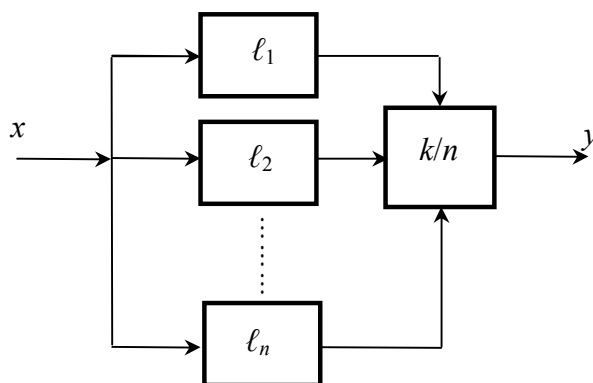


Рис. 1.17. Схема кворум-элемента

Следовательно, для повышения всего уровня безотказности ИВС необходимо не только использовать приемы резервирования, комплексирования и комбинирования датчиков, но и всемерно повышать надежность работы кворум-элемента.

В зависимости от требований, предъявляемых к ИВС по точности и надежности, можно выделить три основных режима работы кворум-элемента (табл. 1.24):

- **режим А**, при котором предполагается обработка многомерной информации, получаемой от грубых ($P_1 \ll 1$), но высоконадежных ($P_2 \approx 1$) датчиков;

- **режим Б**, при котором кворум-элемент обрабатывает информацию, получаемую от высокоточных и прецизионных ($P_1 \approx 1$) датчиков, но достаточно ненадежных ($P_2 \ll 1$);

- **режим АБ**, при котором предполагается обработка в кворум-элементе информации, получаемой от датчиков, обладающих средними показателями точности ($P_1 < 1$) и надежности ($P_2 < 1$).

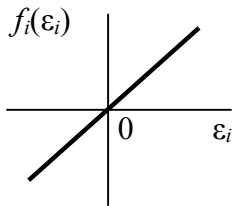
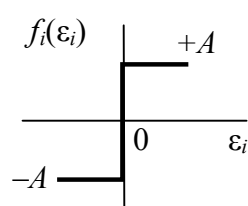
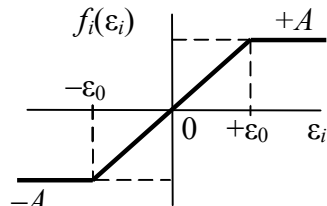
Работа любого кворум-элемента построена в соответствии с мультимодульным принципом обработки многомерной информации, получаемой от нескольких (n) датчиков в условиях их комплексирования или комбинирования. При этом кворум-элемент должен иметь нечетное число датчиков ($n = 2k + 1$).

Используя мультимодульный принцип обработки многомерной избыточной информации, получаемой в условиях комплексирования или комбинирования датчиков, можно достичь более высоких показателей точности и надежности всей ИВС на основе применения достаточно грубых и ненадежных датчиков, входящих в состав системы. Задача кворум-элемента в условиях возможного проявления с вероятностью $(1 - P_1)$ грубых внезапных отклонений в показаниях датчиков (выходящих за пределы эксплуатационного допуска) и возможного наступления их случайных постепенных отказов с вероятностью $(1 - P_2)$ выбрать и реализовать такую стратегию (субоптимальный алгоритм) обработки многомерной информации, чтобы выходной сигнал кворум-элемента (y) наиболее точно был приближен к достоверному значению.

Таблица 1.24

Режимы работы кворум-элемента

Характеристики	Режим		
	А	Б	АБ
Характеристика каналов (подсистем) по точности	Точность		
	низкая $P_1 \ll P_2$	высокая $P_1 \approx 1$	средняя
Характеристика каналов (подсистем) по надежности	Надежность		
	высокая $P_2 \approx 1$	низкая $P_2 \ll P_1$	средняя
Субоптимальный алгоритм обработки многомерной информации	$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ (операция осреднения)	$y = \text{med}(y_1, y_2, \dots, y_n)$ (операция мажорирования, выбора медианы)	$y = \sum_{j=1}^m \beta_j y_j$ $\beta_j = \left(D_j \sum_{k=1}^m D_k^{-1} \right)^{-1}$ (операция взвешивания сигналов)

Характеристики	Режим		
	А	Б	АБ
Уравнение состояния кворум-элемента $\varepsilon_i = y_i - y$ ($i = \overline{1, n}$)	$f_i(\varepsilon_i) = S_i \varepsilon_i$ (линейное состояние)	$f_i(\varepsilon_i) = \begin{cases} +A, & \text{при } \varepsilon_i > 0 \\ -A, & \text{при } \varepsilon_i < 0 \end{cases}$ (релейное состояние)	$f_i(\varepsilon_i) = \begin{cases} +A, & \text{при } \varepsilon_i > \varepsilon_0 \\ S_i \varepsilon_i, & \text{при } -\varepsilon_0 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_0 \\ -A, & \text{при } \varepsilon_i < -\varepsilon_0 \end{cases}$ (смешанное состояние)
Вероятность точной (P_1) и надежной (P_2) работы ИВС с кворум-элементом	$P_2 \approx 1,$ $P_1 \ll P_2,$ $P = P_1 \cdot P_2 \ll 1$	$P_1 \approx 1; P_2 \ll P_1,$ $P = P_1 \cdot P_2 \ll 1$	$P_1 < 1; P_2 < P_1,$ $P = P_1 \cdot P_2 < 1$
Графики функций состояния			

1.6. Гетеромагнитометрия – новое научное направление

Метрологические свойства любого ТБМ, оцениваемые в соответствии с системным подходом, могут быть наглядно отражены в виде схемы (рис. 1.18).

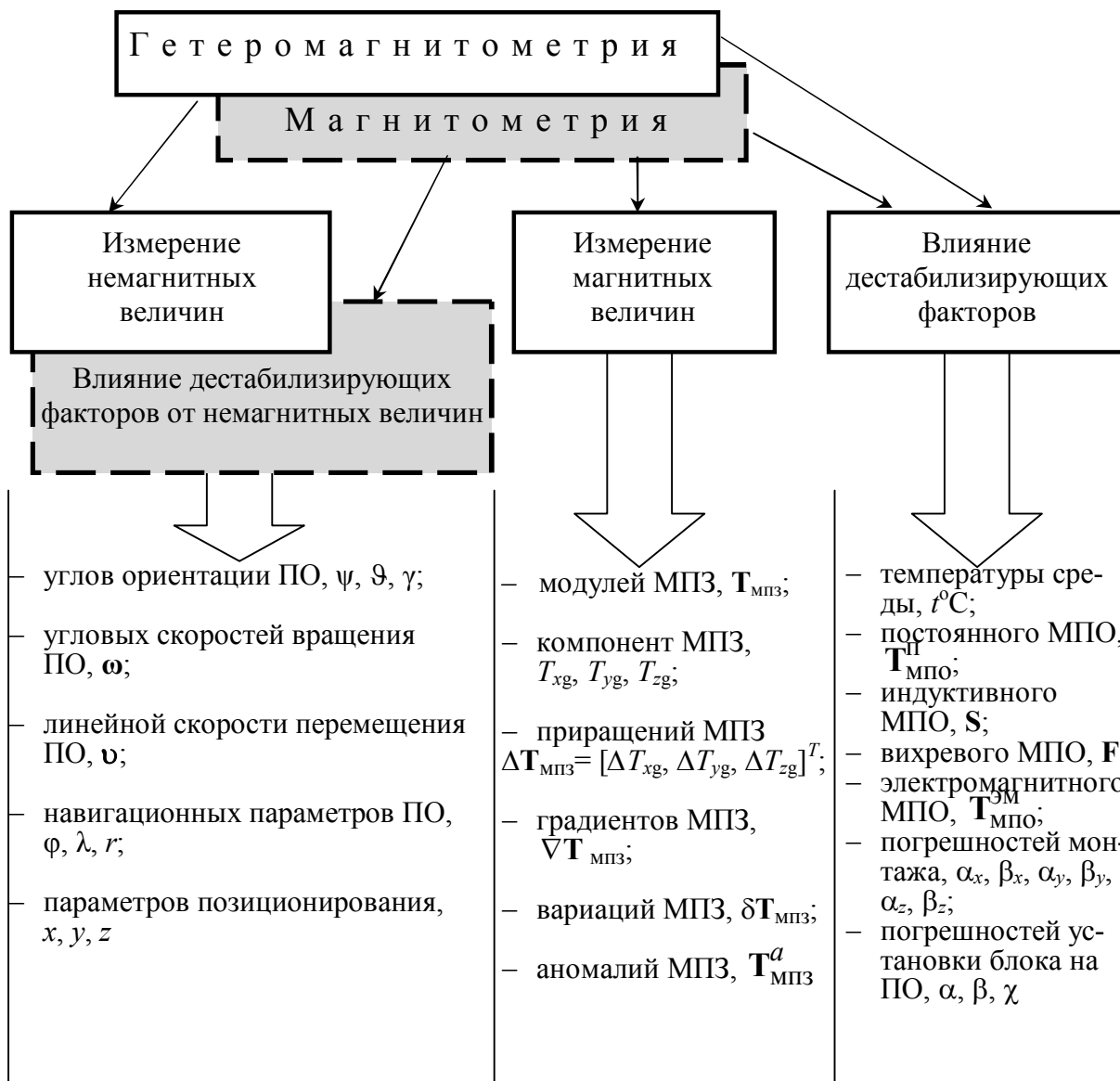


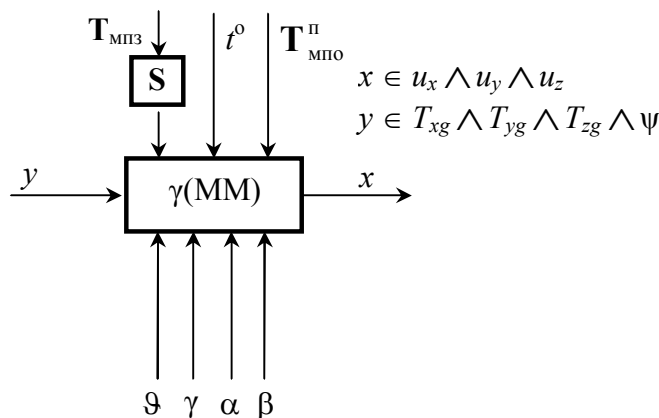
Рис. 1.18. Характеристика метрологических свойств ТБМ

Из анализа рис. 1.18 видно, что отличие нового научного направления (*гетеромагнитометрии*) от традиционно сложившегося направления (*магнитометрии*) заключается в оценке немагнитных параметров, на которые реагирует любой ТБМ:

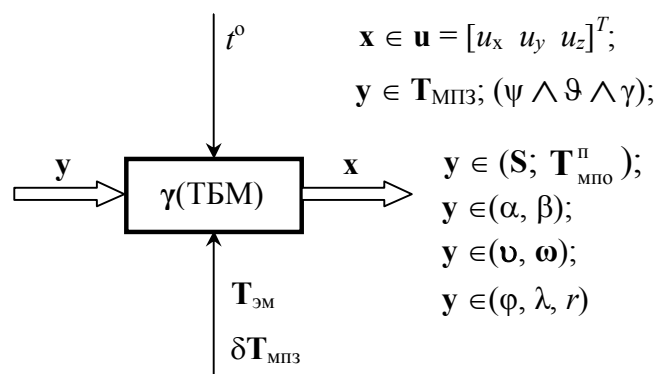
– в традиционной *магнитометрии* влияние немагнитных параметров на показания ТБМ рассматривается как возмущение (влияние дестабилизирующих факторов);

– в гетеромагнитометрии влияние немагнитных параметров на показания ТБМ рассматривается как измерение дополнительных параметров (многомерные измерения).

Эти отличия особенно наглядно усматриваются из сравнения схем измерений с помощью ММИ ТБМ, представленных на рис. 1.19.



a



b

Рис. 1.19. Схемы формирования информации: a – в магнитометрии; б – в гетеромагнитометрии

Гетеромагнитометрия как новое научное направление базируется на трех основах (рис. 1.20):

- системном анализе (синергетике);
- магнитометрии;
- информационно-компьютерных технологиях.

Условная схема, иллюстрирующая процесс перехода от концепции одномерных магнитных измерений к концепции n -мерных измерений в связи с эволюцией магнитометрии (от одномерной (1D) к пространственной трехмерной (3D) и в конечном счете к многомерной гетеромагнитометрии (nD)), представлена на рис. 1.21.

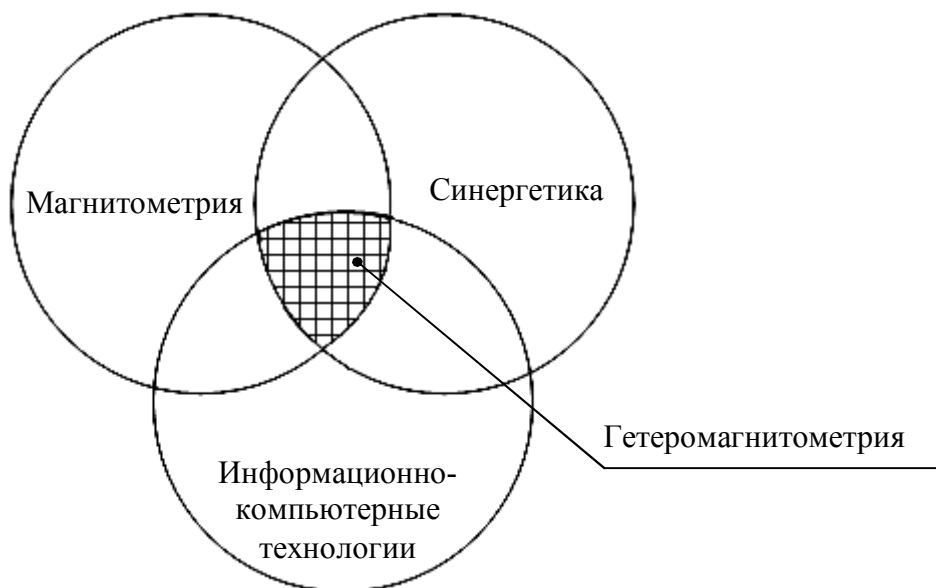


Рис. 1.20. Формирование научного направления гетеромагнитометрии

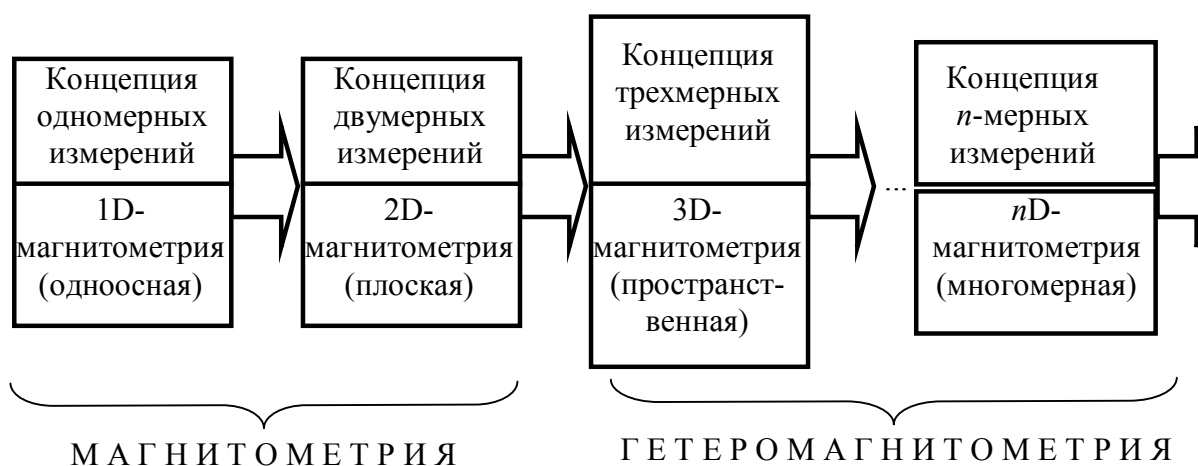


Рис. 1.21. Связь гетеромагнитометрии с магнитометрией

Гетеромагнитометрия – это такое новое научное направление на стыке трех областей (магнитометрии, синергетики и информационных технологий), которое предполагает достижение качественно и количественно нового научно-технического результата, а именно обеспечения решения задач *многофункциональности* магнитометрических средств измерений, улучшения их *техничко-экономических показателей* (точности, надежности и долговечности, отказоустойчивости и самопроверяемости, живучести и экономичности), путем расширения многомерной магнитометрической информации за счет реализации принципов структурной и функциональной избыточности информации, а также путем рациональной обработки этой информации на основе соответствующего программно-алгоритмического обеспечения.

Если в традиционной магнитометрии используется *дифференциальный принцип* – принцип «дробления» и сужения информации, принцип выделения из многомерной магнитометрической информации необходимой значимой информации и подавления при этом побочной малозначимой информации (или пренебрежения этой информацией), то в гетеромагнитометрии используется противоположный подход – *интегральный принцип* – принцип расширения информации, принцип системного подхода к комплексной обработке многомерной магнитометрической информации, принцип многофункционального решения задач измерений.

Сравнительный анализ традиционной бортовой магнитометрии и гетеромагнитометрии по принципиальным, эксплуатационным и технико-экономическим показателям, приведенным в табл. 1.25 и 1.26, подтверждает неоспоримые достоинства многомерной магнитометрии.

Таблица 1.25

Сравнительный анализ магнитометрии и гетеромагнитометрии

Показатели и характеристики (принципиальные)	Традиционная бортовая магнитометрия	Гетеромагнитометрия
Концепция измерений	Одномерная, двумерная (плоская)	Трехмерная, многомерная (пространственная)
Размерность решаемых задач для МК	1D, 2D	3D, nD
Размерность входа выхода	Скалярная величина y	Вектор y ($n \times 1$)
	Скалярная величина x	Вектор x ($m \times 1$)
Число измеряемых величин, n	1, 2	От 3 до n
Метод измерения угла курса, ψ	Прямой	Косвенный
Число возмущений	$n_{\text{возм}}$	$< n_{\text{возм}}$
Алгоритм повышения точности	Девиационный	Бездевиационный
Функциональные возможности	Меньше, чем в гетеромагнитометрии	Больше, чем в традиционной магнитометрии
Схемоконструктивное решение	Аналоговый магнитный компас, магниточувствительный механический прибор с подвижной механической частью	Цифровой магнитный компас, ЦМК-измерительно-вычислительная система без подвижных частей
Теоретические основы расчета и проектирования	Теория магнитных девиаций и девиационных работ	Теория аналитических и полуаналитических систем ориентации

Сравнительный анализ магнитометрии и гетеромагнитометрии по эксплуатационным характеристикам и технико-экономическим показателям

Эксплуатационные и технико-экономические показатели	Традиционная бортовая магнитометрия	Гетеромагнитометрия
Всережимность и невыбиваемость	Отсутствует	Имеется
Самопроверяемость, отказоустойчивость, живучесть, адаптируемость	Отсутствует	Имеется
Точность, надежность, долговечность	Низкие	Высокие
Массо-габаритные параметры	m, V	$(10^{-1}-10^{-2}) m,$ $(10^{-1}-10^{-2}) V$
Стоимость	Высокая	Низкая
Технологичность	Низкая	Высокая
Настройки и калибровки	Простые	Сложные
Введение поправок к показаниям МК	Физическим или алгоритмическим путем (компенсация)	Алгоритмическим путем (компенсация или приведение)
Многофункциональное использование	Отсутствует	Имеется
Возможность комплексирования	Ограничена	Не ограничена
Возможность комбинирования	Отсутствует	Имеется

Для корректной постановки и решения задачи гетеромагнитометрии необходимо расширить систему уравнений-связей, увеличивая их число m так, чтобы обеспечить равенство ($n = m$).

В любом случае, путем комплексирования или комбинирования датчиков первичной информации (ТБМ, ТБГ, ТБА и др.) удастся сформировать замкнутую систему уравнений размерности n , в которой число уравнений (m) равно числу неизвестных переменных (n), подлежащих измерению косвенным путем ($n = m$).

Системный анализ работы инерциальных (акселерометров, гироскопов) и магнитометрических (магнитометров) датчиков показывает, что показания блоков этих датчиков соответствуют условию формирования многомерных многосвязанных измерений:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_Г &= [u_{Гx} \ u_{Гy} \ u_{Гz}]^T = \mathbf{u}_Г(\boldsymbol{\omega}_e, \boldsymbol{\omega}_r, A(\psi, \vartheta, \gamma), \Delta t, \Delta U, \dots), \\
 \mathbf{u}_a &= [u_{ax} \ u_{ay} \ u_{az}]^T = \mathbf{u}_a(\ddot{\mathbf{r}}, \dot{\mathbf{r}}, \mathbf{g}, \mathbf{r}(\varphi, \lambda, r), A(\psi, \vartheta, \gamma), \boldsymbol{\omega}_e, \boldsymbol{\omega}_r, \Delta t, \Delta U, \dots), \\
 &= \mathbf{u}_M = [u_{Mx} \ u_{My} \ u_{Mz}]^T = \\
 &= \mathbf{u}_M(\mathbf{T}_{МПЗ}(\varphi, \lambda, r), \mathbf{T}_{МПО}(\mathbf{S}, \mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}, \mathbf{F}), A(\psi, \vartheta, \gamma), \boldsymbol{\omega}_r, \Delta t, \Delta U, \dots),
 \end{aligned} \tag{1.47}$$

где \mathbf{u}_r , \mathbf{u}_a , \mathbf{u}_m – векторы выходных сигналов блоков гироскопов, акселерометров и магнитометров; $\boldsymbol{\omega}_e$, $\boldsymbol{\omega}_r$ – векторы угловых скоростей вращения ПО в переносном и относительном движениях; $A(\psi, \vartheta, \gamma)$ – матрица ориентации ПО, элементы которой (направляющие косинусы) являются функциями углов курса ψ , тангажа (дифферента) ϑ и крена γ ; $\mathbf{r}(\varphi, \lambda, r)$ – радиус-вектор точки местоположения ПО, заданный в полярной системе координат; $\dot{\mathbf{r}}$, $\ddot{\mathbf{r}}$ – векторы абсолютных скоростей и ускорений пространственного движения ПО; \mathbf{g} – вектор ускорения свободно падающего тела; $\mathbf{T}_{МПЗ}$, $\mathbf{T}_{МПО}$ – векторы напряженностей МПЗ и МПО в точке расположения блока магнитометров.

В соответствии с принципами гетеромагнитометрии (многомерной магнитометрии) можно отметить, что показания блоков инерциальных и магнитометрических датчиков зависят не только от параметров, подлежащих измерениям, но и от других параметров, характеризующих:

- геометрические, кинематические, динамические и магнитные свойства подвижного основания;
- влияние дестабилизирующих факторов (Δt , ΔU и др.).

Разработчики блоков инерциальных и магнитометрических датчиков в настоящее время стремятся обеспечить реализацию линейных метрологических характеристик каналов измерений этих блоков [16, 34]:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{u}}_r &= \begin{bmatrix} \gamma_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{rz} \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{\omega} + \mathbf{u}_{r0} = \text{diag}[\gamma_{rx} \ \gamma_{ry} \ \gamma_{rz}] \cdot \boldsymbol{\omega} + [u_{rx0} \ u_{ry0} \ u_{rz0}]^T, \\ \tilde{\mathbf{u}}_a &= \begin{bmatrix} \gamma_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{az} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{a} + \mathbf{u}_{a0} = \text{diag}[\gamma_{ax} \ \gamma_{ay} \ \gamma_{az}] \cdot \mathbf{a} + [u_{ax0} \ u_{ay0} \ u_{az0}]^T, \\ \tilde{\mathbf{u}}_m &= \begin{bmatrix} \gamma_{mx} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{my} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{mz} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{T} + \mathbf{u}_{m0} = \text{diag}[\gamma_{mx} \ \gamma_{my} \ \gamma_{mz}] \cdot \mathbf{T} + [u_{mx0} \ u_{my0} \ u_{mz0}]^T, \end{aligned} \quad (1.48)$$

Где γ_{rx} , γ_{ry} , γ_{rz} , γ_{ax} , γ_{ay} , γ_{az} , γ_{mx} , γ_{my} , γ_{mz} , – масштабные коэффициенты соответствующих каналов измерений; \mathbf{u}_{r0} , \mathbf{u}_{a0} , \mathbf{u}_{m0} – векторы смещений нулей блоков датчиков.

На основе сравнения выражений (1.47) и (1.48) можно сформировать уравнения методических и инструментальных погрешностей блоков датчиков:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{u}_g &= \mathbf{u}_g - \tilde{\mathbf{u}}_g, \\ \Delta \mathbf{u}_a &= \mathbf{u}_a - \tilde{\mathbf{u}}_a, \\ \Delta \mathbf{u}_m &= \mathbf{u}_m - \tilde{\mathbf{u}}_m.\end{aligned}\tag{1.49}$$

При таком традиционном подходе к оценке метрологических свойств многомерных блоков датчиков будет допущена потеря существенной части полезной (да еще и детерминированной!) информации, так как проявления перекрестных связей между отдельными каналами и контурами измерений блоков будут восприняты как методические погрешности от перекрестных связей.

В соответствии же с принципами гетеромагнитометрии и многомерных измерений подход к оценке метрологических свойств блоков инерциальных датчиков и магнитометров строится на основе расширения вектора информационного состояния этих блоков как единого измерительного модуля:

$$\mathbf{u} = [\mathbf{u}_g, \mathbf{u}_a, \mathbf{u}_m]^T.\tag{1.50}$$

Рассмотрение с единой точки зрения вопросов инерциальных и магнитометрических измерений, соответствующих расширенной системе уравнений (1.22) и (1.31) и условию комплексирования блоков акселерометров, гироскопов и магнитометров в один единый магнитоинерциальный модуль, позволяет сформировать обобщенную линеаризованную математическую модель работы единого модуля в виде обобщенного векторно-матричного уравнения

$$\dot{\mathbf{u}} = A_1 \cdot \mathbf{u} + B_1 \cdot \mathbf{x} + C_f \cdot \mathbf{f},\tag{1.51}$$

где \mathbf{u} – многомерный вектор состояния единого магнитоинерциального модуля (вектор выходных сигналов интегрированного модуля); \mathbf{x} – многомерный вектор состояния системы «ПО – окружающая среда» (вектор входных параметров, подлежащих измерению; \mathbf{f} – вектор возмущений в виде дестабилизирующих факторов; A_1 – собственная матрица расширенного магнитоинерциального модуля; B_1 и C_f – матрицы коэффициентов эффективности влияния на состояние измерительного модуля векторов входных параметров и возмущений.

Представление метрологических характеристик каналов измерений расширенного единого магнитоинерциального модуля в виде обобщенного векторно-матричного уравнения (1.51), с одной стороны, позволяет достоверно и адекватно принять во внимание реальные метрологические свойства модуля с учетом проявления в нем прямых, обратных и перекрестных связей, а с другой стороны, обеспечивает условия для возможности использования разработанных и широко применяемых на практике линейных методов обработ-

ки многомерной информации (частотных, статистических с применением спектрального и корреляционного анализа, планирования многофакторных экспериментов, линейной фильтрации информации на основе фильтров Калмана, Бьюиси и Винера, оценивания векторов ошибок и пр.).

Расширение магнитоинерциальной информации, формулируемой с помощью многомерного измерительного модуля на основе комплексирования или комбинирования показаний магнитометров, акселерометров и гироскопов, позволяет существенно повысить алгоритмическим путем показатели точности, надежности, долговечности и отказоустойчивости ИВС без усложнения аппаратной (измерительной) части системы.

Такой подход к оценке и реализации метрологических свойств блоков инерциальных и магнитометрических датчиков с использованием принципов интеграции и гетеромагнитометрии создает единую теоретическую и практическую базу для рассмотрения расширенного многомерного средства измерений (многомерного модуля), построенного на основе интеграции инерциальных и магнитометрических блоков как единой измерительно-вычислительной системы (ИВС), в которой основная функция по формированию многомерной информации, по обеспечению высоких показателей точности, стабильности и устойчивости результатов измерений и формированию соответствующих метрологических характеристик каналов измерений приходится именно на вычислительную (а не на измерительную!) часть комплекса.

В практике проектирования и эксплуатации магнитоинерциальных ИВС открывается широкая перспектива для весьма гибкой и эффективной разработки схемотехнических решений при создании измерительных модулей и технологии их настройки, калибровки, юстировки и использования.

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ БЛОКА МАГНИТОМЕТРОВ

2.1. Характеристика инструментальных и эксплуатационных погрешностей блока магнитометров

Блок магнитометров (БММ) представляет собой трехосный магниточувствительный датчик с ортогональными осями чувствительности магнитометров, предназначенный для измерения компонент МПЗ в проекциях (T_x, T_y, T_z) на оси приборной системы координат $X_{\text{п}}Y_{\text{п}}Z_{\text{п}}$. Производственное название БММ – гетеромагнитный электронный модуль [12–14, 38–46]. Конструктивно блок БММ представляет собой моноблок, в котором в средней части корпуса, выполненного в виде куба (100 мм×100 мм×100 мм) из немагнитного материала, размещены шесть магнитометров, образующих три канала ММ-измерений. Три пары магнитометров выполнены по дифференциальной схеме. Магниточувствительная часть БММ конструктивно совмещена с блоком электроники (БЭ), причем элементы БЭ размещены на гранях кубического корпуса. Для теплоизоляции магнитометров и их экранирования относительно действий внешних электромагнитных помех МПЗ, а также внутренних электромагнитных помех, обусловленных работой БЭ, магниточувствительная часть блока закрыта двумя экранами (кубическими оболочками) из немагнитного материала со слабой теплопроводностью среды между этими двумя оболочками. Вместе с тем, в БЭ входят электрические элементы, детали которых выполнены из магнитно-мягких и магнитно-твердых материалов (штепсельные разъемы, крепеж и пр.).

С учетом отмеченных особенностей блока показания БММ могут быть описаны с помощью уравнений Пуассона в векторной форме:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} + \mathbf{T}_{\text{МПО}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}} = \\ &= \left(\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{н}} + \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{а}} + \delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} \right) + \\ &+ \left(\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{п}} + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{и}} + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{в}} + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{э}} \right) + \\ &+ \left(\mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{п}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{и}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{в}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{э}} \right), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}, \mathbf{T}_{\text{МПО}}, \mathbf{T}_{\text{МПД}}$ – векторы напряженностей МПЗ, МПО и МПД в точке установки БММ; $\mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{п}}, \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{и}}, \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{в}}, \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{э}}$ – соответственно постоянная, индуктивная, вихревая и электромагнитная составляющие магнитного поля датчика (МПД).

Уравнение Пуассона (1.22) можно записать в следующей векторно-

матричной форме:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_x & T_y & T_z \end{bmatrix}^T = \mathbf{C} \left[\mathbf{B} \cdot (\mathbf{S}_0 + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} + \mathbf{B} \cdot (\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{П}}) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{F}_0 \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}})' + \mathbf{B} \cdot \mathbf{F} \cdot (\mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{Э}})' \right], \quad (2.2)$$

где \mathbf{S}_0 , \mathbf{F}_0 – матрицы коэффициентов индуктивной и вихревой составляющих МПО; \mathbf{F} – матрица коэффициентов вихревой составляющей МПД; \mathbf{C} – матрица геометрических погрешностей установки БММ на ПО.

Из анализа уравнения (2.2) можно сделать вывод о проявлении следующих (ожидаемых) инструментальных и методических погрешностей.

Инструментальные погрешности БММ обусловлены:

– неортогональностью осей чувствительностей БММ (матрица монтажа \mathbf{B});

– неточностью установки БММ на объекте (матрица установки \mathbf{C}).

Методические погрешности БММ обусловлены влиянием:

– постоянных составляющих МПО ($\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{П}}$) и МПД ($\mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{П}}$);

– индуктивной составляющей МПО (матрица Пуассона \mathbf{S}_0);

– вихревой составляющей МПО, связанной с вращением ПО в МПЗ (составляющая $\mathbf{F}_0 \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}})'$);

– электромагнитных помех БЭ через вихревую составляющую МПД (составляющая $\mathbf{F} \cdot (\mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{Э}})'$);

– условий ориентации блока в пространстве (матрицей ориентации \mathbf{A}).

В лабораторных условиях при проведении стендовых испытаний БММ в однородном МПЗ показания блока магнитометров могут быть описаны укороченным уравнением Пуассона

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_x & T_y & T_z \end{bmatrix}^T = \mathbf{B} \left[(\mathbf{S} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{П}} + \mathbf{F} (\dot{\mathbf{T}}_{\text{МПД}}^{\text{Э}}) + (\mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}})' \right], \quad (2.3)$$

где \mathbf{S} , \mathbf{F} – матрицы коэффициентов Пуассона по индуктивной и вихревой составляющим МПД, причем

$$\det \mathbf{S} = \det \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & k \end{bmatrix} \neq 0, \quad (2.4)$$

$$\det \mathbf{F} = \det \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ d_1 & e_1 & f_1 \\ g_1 & h_1 & k_1 \end{bmatrix} \neq 0.$$

Из уравнения Пуассона (2.3) видно, что при лабораторных испытаниях БММ могут проявляться погрешности шести видов:

- инструментальные постоянные технологические погрешности, обусловленные неортогональностью осей чувствительностей (матрица сборки B);

- методические постоянные погрешности, обусловленные влиянием постоянной составляющей МПД ($\mathbf{T}_{мпд}^n$);

- методические постоянные погрешности, обусловленные влиянием индуктивной составляющей МПД (матрица Пуассона \mathbf{S});

- эксплуатационные переменные погрешности, обусловленные влиянием изменения температуры (Δt) и режима питания блока (ΔU);

- эксплуатационно-методические переменные погрешности, обусловленные влиянием углов ориентации блока в пространстве (матрица ориентации $A = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi$);

- методические переменные погрешности, обусловленные влиянием электромагнитных помех БЭ через вихревую составляющую МПД $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{T}}_{мпд}^э)$.

Кроме того, появляются эксплуатационные погрешности БММ, обусловленные зависимостью его метрологических характеристик от температуры блока и режима его питания. Эти составляющие учитываются и компенсируются методом температурной и режимной идентификации и последующей калибровки датчика.

По условию ортогональности все блоки, состоящие из шести магнитометров, и магнитометрические датчики ДММ, входящие в БММ, могут быть построены по одной из трех схем магнитометрических измерений (ММ-измерений) (рис. 2.1): БММ и ДММ с ортогональными осями чувствительности (БММ-Орт и ДММ-Орт) (см. рис. 2.1, а); БММ и ДММ с квазиортогональными осями чувствительности (БММ-КО и ДММ-КО) (см. рис. 2.1, б); БММ и ДММ с неортогональными осями чувствительности (БММ-НО и ДММ-НО) (см. рис. 2.1, в).

Количественная характеристика таких схем измерений шестиосных БММ представлена в табл. 2.1, где $\sigma = \sqrt{c^2\alpha + c^2\beta + c^2\chi} - 1$ – показатель неортогональности, α, β, χ – углы неортогональности осей.

Таблица 2.1

Характеристика схем измерений в шестиосных блоках и датчиках

Схема БММ и ДММ	Технологические погрешности (α, β), град	Показатель неортогональности (σ)
БММ-Орт ДММ-Орт	$\alpha = \beta = 0$	$\sigma = 0$
БММ-КО ДММ-КО	$0 < \alpha \leq 10$ $0 < \beta \leq 10$	$0 < \sigma \leq 0,1$
БММ-НО ДММ-НО	$\alpha > 10$ $\beta > 10$	$\sigma > 0,1$

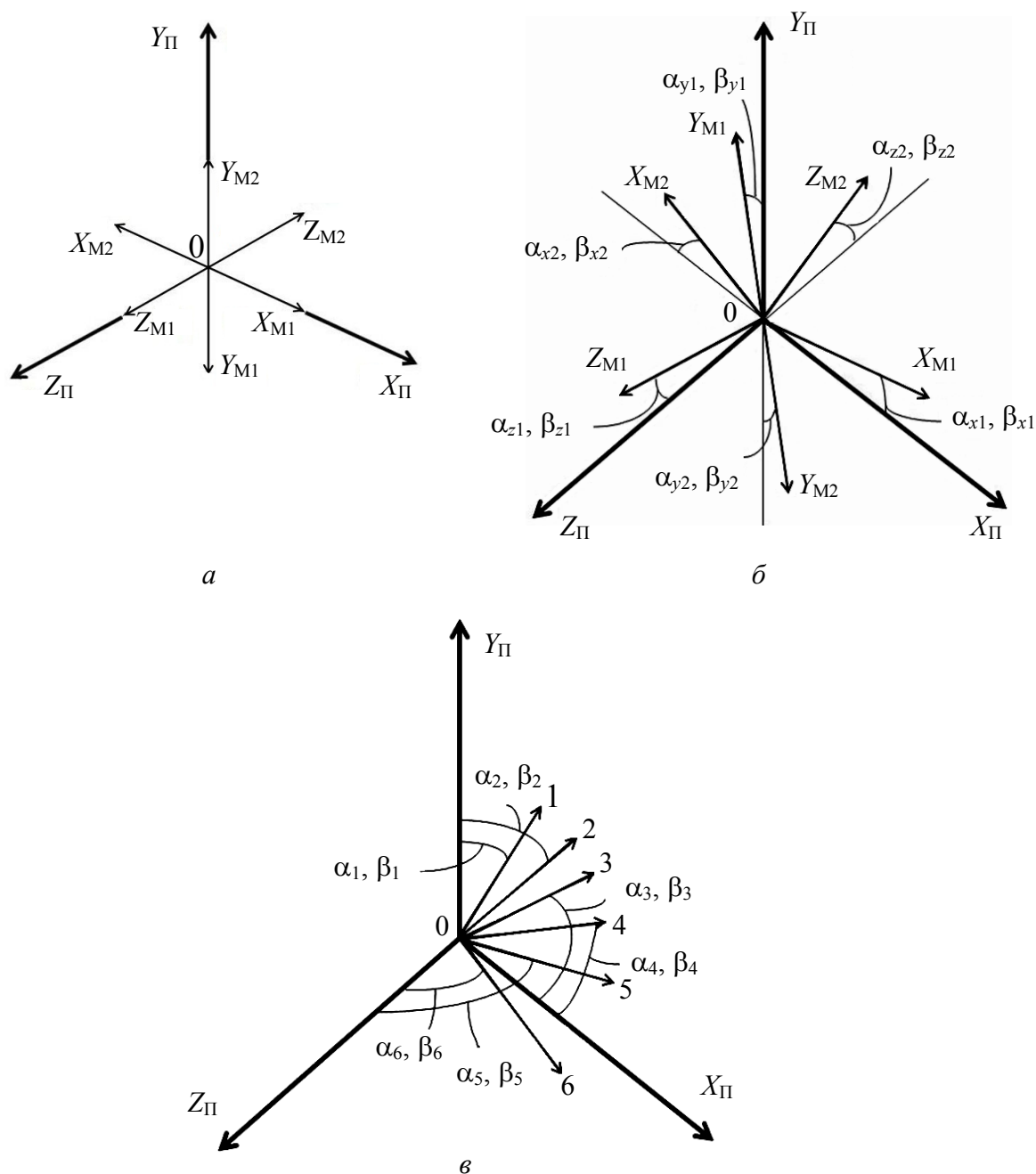


Рис. 2.1. Схемы магнитометрических измерений с помощью БММ и ДММ: *а* – с ортогональными осями чувствительности; *б* – с квазиортогональными осями чувствительности; *в* – с неортогональными осями чувствительности

В идеальном случае, если оси чувствительности БММ ортогональны ($B = E$) и МПД по постоянной, индуктивной и вихревой составляющим практически отсутствует ($\mathbf{T}_{мпд}^{\Pi} = \dot{\mathbf{T}}_{мпд}^{\circ} = 0$; $\mathbf{S} = \mathbf{F} = 0$), то показания БММ удовлетворяют условию ортогональности:

$$\sigma = \sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \chi} - 1 = \frac{\sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2}}{T} - 1 = 0, \quad (2.5)$$

где T – модуль вектора МПЗ в точке установки БММ (измеряется с помощью эталонной магнитометрической системы, например прецизионного модульного магнитометра).

Показатель σ позволяет не только косвенно выявить факт нарушения условия ортогональности осей чувствительности блока, но и определить степень влияния магнитных факторов, связанных с МПД:

- намагниченности отдельных деталей блока (штепсельных разъемов, крепежа, соединений);
- индуктивной составляющей МПД (S_{Π});
- вихревой (F_{Π}) и электромагнитной ($\dot{T}_{мпд}^{\circ}$) составляющих МПД.

Поэтому назовем параметр σ **показателем афинности-вариативности**, наблюдая за значением которого в лабораторных условиях с учетом различных режимов движения основания, можно косвенным путем оценить степень влияния (табл. 2.2):

- неортогональности осей чувствительности;
- индуктивной и электромагнитной составляющих МПД (неоднородности);
- вихревой составляющей МПД (нестабильности, нестационарности).

Таблица 2.2

Показатель афинности-вариативности

Условия проверки показателя			Условие афинности (неортогональности)	Условие вариативности МПД
невыврожденность	неоднородность	нестабильность		
$\sigma = 0$	$\Delta\sigma = 0$ $\left(\begin{matrix} \psi = \text{var} \\ \vartheta = \text{var} \\ \gamma = \text{var} \end{matrix} \right)$	$\dot{\sigma} = 0$ $\left(\begin{matrix} \dot{\psi} \neq \text{var} \\ \dot{\vartheta} \neq \text{var} \\ \dot{\gamma} \neq \text{var} \end{matrix} \right)$	Оси чувствительности БММ ортогональны (магнитометрические трехгранники $X_{mi}Y_{mi}Z_{mi}$ невырождены)	МПД стабильно (индуктивная и вихревая составляющие отсутствуют $S = F = 0$)
$\sigma \neq 0$	$\Delta\sigma \neq 0$ $\left(\begin{matrix} \psi = \text{var} \\ \vartheta = \text{var} \\ \gamma = \text{var} \end{matrix} \right)$	$\dot{\sigma} = 0$ $\left(\begin{matrix} \dot{\psi} \neq \text{var} \\ \dot{\vartheta} \neq \text{var} \\ \dot{\gamma} \neq \text{var} \end{matrix} \right)$	Оси чувствительности БММ неортогональны (магнитометрические трехгранники $X_{mi}Y_{mi}Z_{mi}$ $i = 1, \dots, 6$ афинные	МПД неоднородно ($S \neq 0$; $\dot{T}_{мпд}^{\circ} \neq 0$), но стабильно ($F = 0$)
	$\Delta\sigma \neq 0$ $\left(\begin{matrix} \psi = \text{var} \\ \vartheta = \text{var} \\ \gamma = \text{var} \end{matrix} \right)$	$\dot{\sigma} \neq 0$ $\left(\begin{matrix} \dot{\psi} \neq \text{var} \\ \dot{\vartheta} \neq \text{var} \\ \dot{\gamma} \neq \text{var} \end{matrix} \right)$		МПД неоднородно ($S \neq 0$; $\dot{T}_{мпд}^{\circ} \neq 0$) и нестабильно ($F \neq 0$)

При условии $\sigma = 0$, $\Delta\sigma \neq 0$, $\dot{\sigma} = 0$ можно говорить об ортогональности осей чувствительности, но при этом оказывает влияние на показания датчиков индуктивная составляющая МПД ($S \neq 0$).

В реальных условиях с учетом проявления геометрических погрешностей монтажа ММ в ДММ ($\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$) и погрешностей установки БММ (α, β, χ) схема измерения и обработки ММ-информации с помощью шестиосного БММ и ДММ с ортогональными осями чувствительности ММ (см. рис. 2.1, а, БММ-Орт, ДММ-Орт) оказывается **практически никогда не реализуемой**.

Эта схема рассматривается как идеальный, предельный случай (но нереализуемый) построения блока из шести ММ по схеме БММ-КО, когда углы неортогональности ($\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z, \chi$) стремятся к нулю. Поэтому применительно к схеме шестиосного блока ММ целесообразно рассматривать две **практически реализуемые** схемы измерения и обработки ММ-информации:

– **существующую** схему шестиконтурного измерения ММ-информации с помощью шести квазиортогональных ММ (см. рис. 2.1, б) и обработки ее по дифференциальным алгоритмам в одном трехконтурном канале вычислений (рис. 2.2, а, БММ-КО-1 и рис. 2.3);

– **предлагаемую** схему шестиконтурного измерения ММ-информации с помощью шести квазиортогональных ММ (см. рис. 2.1, б) и последующей ее обработки по недифференциальным многоканальным алгоритмам в восьми трехконтурных каналах вычислений (рис. 2.2, б, БММ-КО-2 и рис. 2.4).

Схемы измерений многомерной (шестимерной) ММ-информации с помощью существующего блока магнитометров с квазиортогональной ориентацией осей чувствительности (БММ-КО-1), а также схемы последующей обработки полученной информации даны на рис. 2.1, б, 2.2, а и 2.3. Блок БММ представляет собой измерительно-вычислительную систему (ИВС), состоящую из двух функционально связанных частей (см. рис. 2.3):

– **измерительной**, выполненной в виде магнитометрического датчика ДММ;

– **вычислительной**, выполненной в виде блока электроники БЭ-1 на основе использования микропроцессоров (МП-1,2,3).

Датчик ДММ-КО построен на основе использования шести компонентных магнитометров ММ-Х1, ... ММ-З2, конструктивно установленных на основании попарно (ММ-Х1+ММ-Х2; ММ-У1+ММ-У2; ММ-З1+ММ-З2). Каждая пара ММ связана с соответствующей осью приборного трехгранника $X_{\text{п}}Y_{\text{п}}Z_{\text{п}}$. Каждому ММ соответствует свой контур измерения. Следовательно, шестиосный ДММ-КО имеет шесть контуров измерений (см. рис. 2.3).

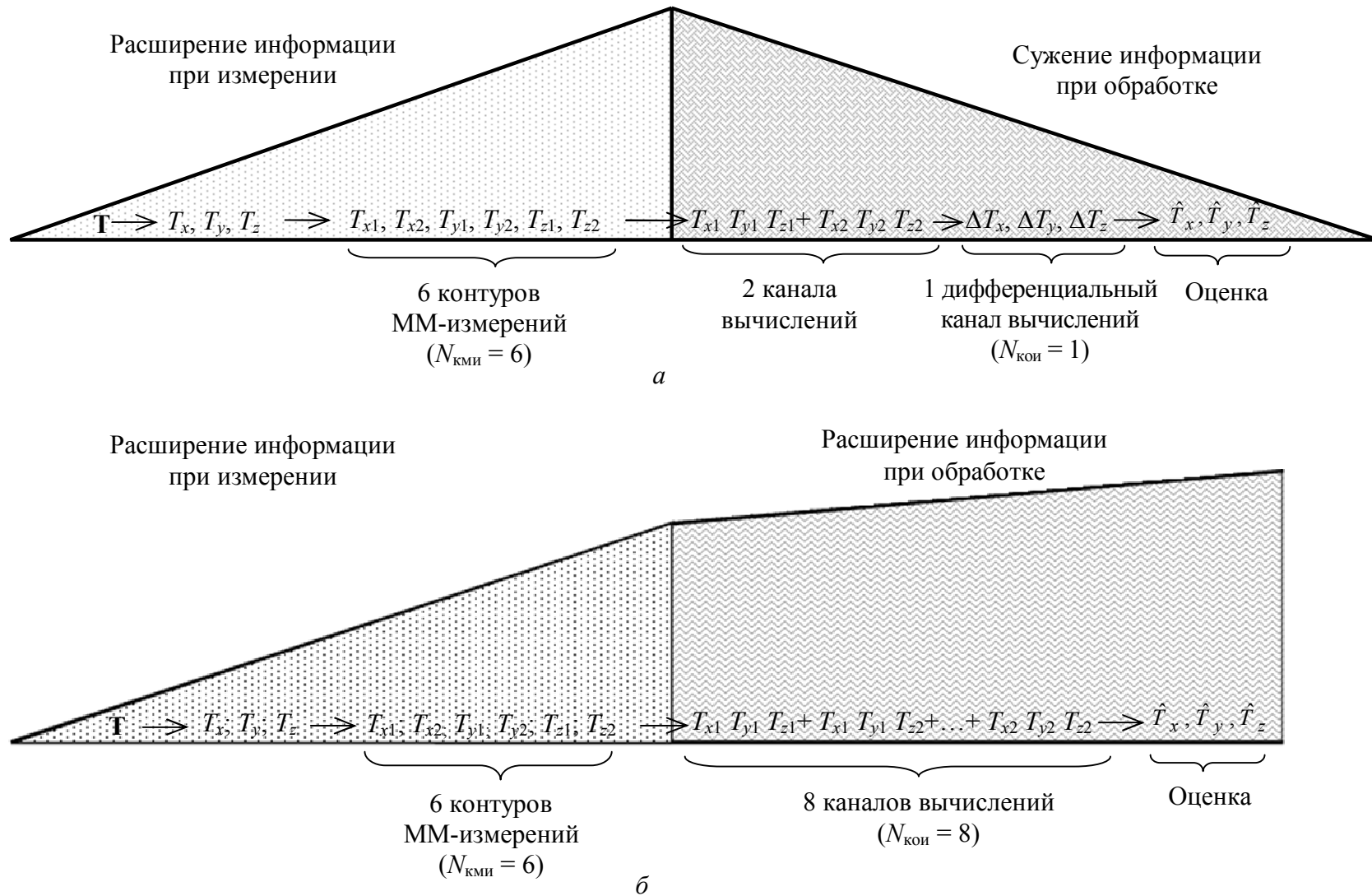


Рис. 2.2. Схемы обработки информации: *a* – по дифференциальным алгоритмам в одном трехконтурном канале вычислений; *б* – по недифференциальным многоканальным алгоритмам в восьми трехконтурных каналах вычислений

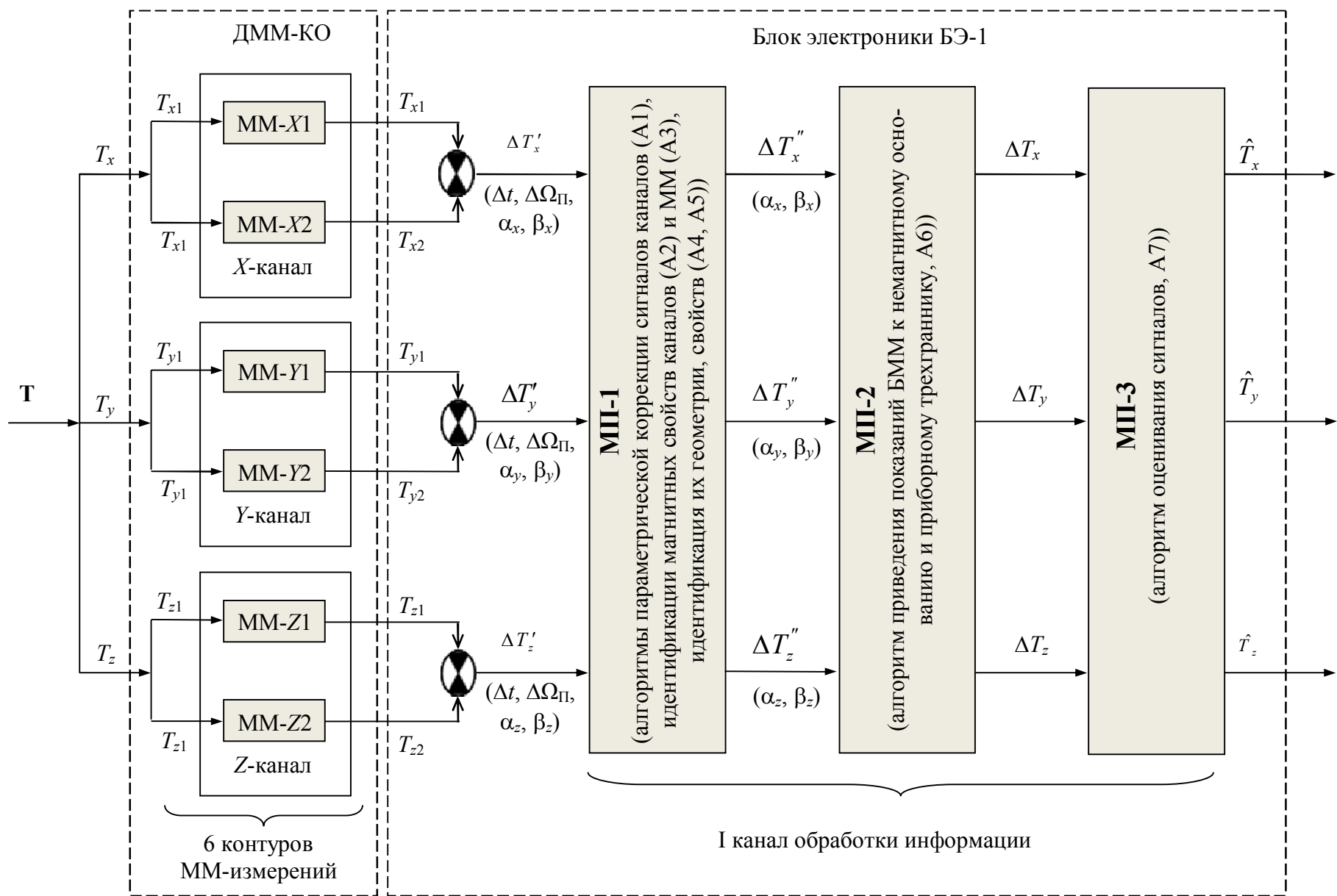


Рис. 2.3. Схема измерений и обработки информации в блоке БММ-КО-1

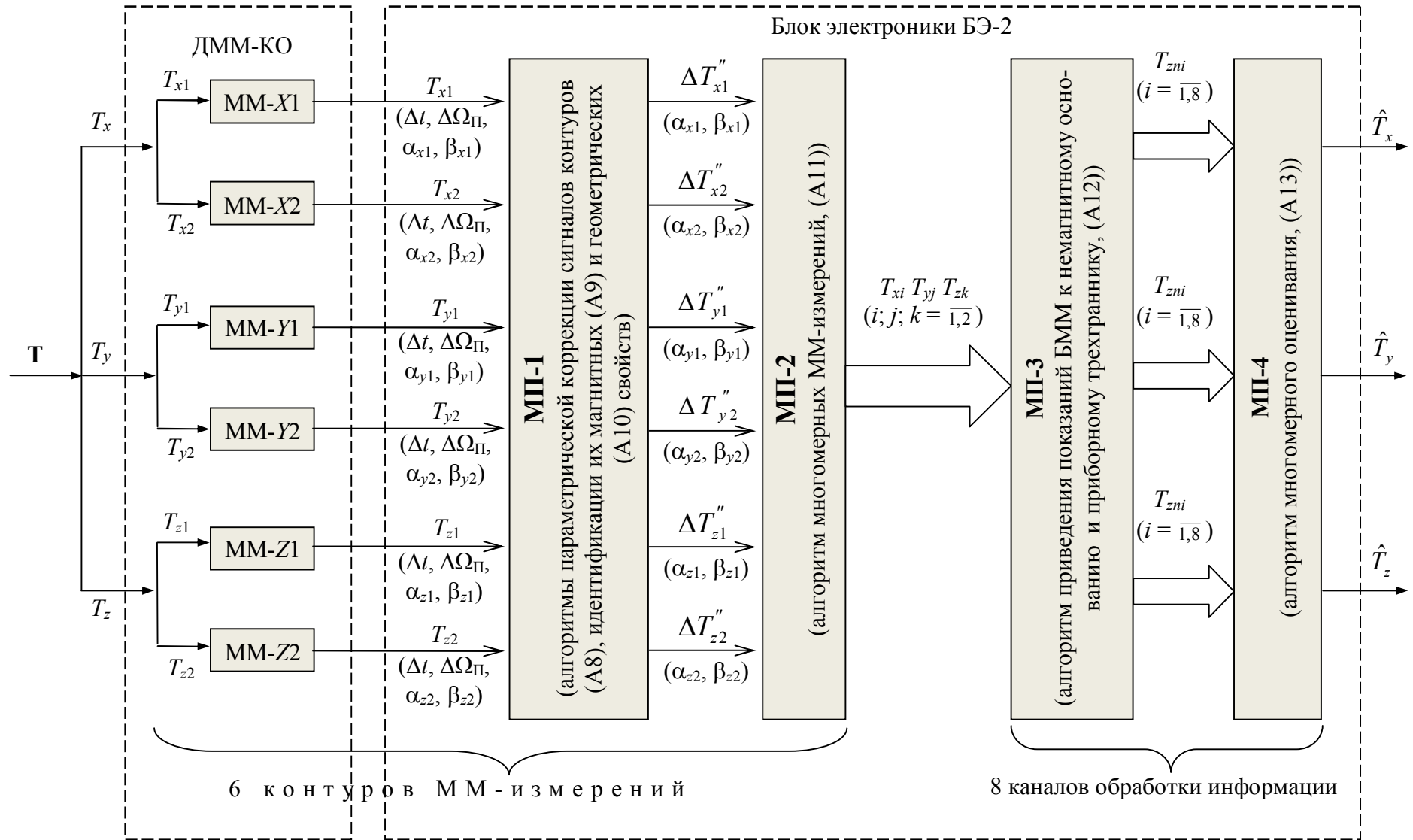


Рис. 2.4. Схема измерений и обработки информации в блоке БММ-КО-2

В факте построения ДММ по схеме шестиконтурного измерения (см. рис. 2.1, б и 2.3) заложено условие реализации **принципа структурной избыточности информации** в БММ. Рациональное использование этого условия в дальнейшем при обработке информации в БЭ создало бы предпосылки для повышения точности, устойчивости и стабильности показаний БММ. Однако в реальной схеме БММ в БЭ использован **принцип дифференциальной обработки информации** по каждой паре магнитометров применительно к каждой оси измерения (см. рис. 2.3). Реализация этого принципа, по существу, привела к сужению многомерной ММ-информации на этапе ее обработки в БЭ-1, хотя на этапе измерений за счет реализации принципа структурной избыточности информации в ДММ были созданы реальные условия для расширения ММ-информации и реальные предпосылки для получения улучшенных метрологических характеристик БММ (см. рис. 2.2, а). В результате такого нерационального схемотехнического решения относительно шести контуров ММ-измерений ($N_{\text{кми}} = 6$) полученная на этапе измерений многомерная информация в ДММ-КО на этапе вычислений в БЭ-1 сначала сводится к информации в двух параллельно работающих трехконтурных каналах вычислений ($T_{x1}T_{y1}T_{z1} + T_{x2}T_{y2}T_{z2}$), а затем за счет дифференциальной схемы вычислений только к информации в одном трехконтурном ($\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z$) канале ($N_{\text{кои}} = 1$) (см. рис. 2.2, а, 2.3). Применение дифференциальной схемы обработки информации по каждой оси ММ-измерений дало единственное преимущество – увеличение крутизны характеристики ДММ по каждой оси (увеличение чувствительности ММ) в 2 раза. Использование дифференциальной схемы измерений в БЭ-1 БММ можно оправдать еще и с точки зрения улучшения метрологических характеристик блока (по точности и стабильности показаний), если разработчик уверен в коррелированности систематических и случайных погрешностей каждой пары магнитометров (ММ-Х, ММ-У, ММ-З) или пары магнитометров подобраны неблагоприятным способом:

$$\begin{aligned}
 \Delta T_x &= T_{x1} - (-T_{x2}) = (T_{x10} \pm \Delta T_{x1}) - (-T_{x20} \pm \Delta T_{x2}) = (T_{x10} + T_{x20}) + \\
 &+ (\pm \Delta T_{x1 \mp \Delta T_{x2}}), \\
 \Delta T_y &= T_{y1} - (-T_{y2}) = (T_{y10} \pm \Delta T_{y1}) - (-T_{y20} \pm \Delta T_{y2}) = (T_{y10} + T_{y20}) + \\
 &+ (\pm \Delta T_{y1 \mp \Delta T_{y2}}), \\
 \Delta T_z &= T_{z1} - (-T_{z2}) = (T_{z10} \pm \Delta T_{z1}) - (-T_{z20} \pm \Delta T_{z2}) = (T_{z10} + T_{z20}) + \\
 &+ (\pm \Delta T_{z1 \mp \Delta T_{z2}}).
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

При испытаниях БММ-КО было установлено, что в соответствии с уравнениями Пуассона (2.2) или (2.3) и выражениями (2.6) метрологические характеристики ДММ-КО могут быть представлены в виде многомерных функций:

$$\begin{aligned}
 \Delta T_x &= T_{x1} - T_{x2} = \Delta T_x \cdot (T_x, T_y, T_z, \Delta t, \Delta \Omega_{\text{п}}, \alpha_x, \beta_x, \mathbf{S}, \mathbf{T}_{\text{п}}, \mathbf{F}, \psi, \vartheta, \gamma), \\
 \Delta T_y &= T_{y1} - T_{y2} = \Delta T_y \cdot (T_x, T_y, T_z, \Delta t, \Delta \Omega_{\text{п}}, \alpha_y, \beta_y, \mathbf{S}, \mathbf{T}_{\text{п}}, \mathbf{F}, \psi, \vartheta, \gamma), \\
 \Delta T_z &= T_{z1} - T_{z2} = \Delta T_z \cdot (T_x, T_y, T_z, \Delta t, \Delta \Omega_{\text{п}}, \alpha_z, \beta_z, \mathbf{S}, \mathbf{T}_{\text{п}}, \mathbf{F}, \psi, \vartheta, \gamma).
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Из выражений (2.7) для метрологических характеристик БММ-КО видно, что на показания БММ оказывают влияние по крайней мере пять факторов:

- *перекрестные связи*, обусловленные реагированием каждого ММ и каждого контура (X, Y, Z) на все проекции вектора \mathbf{T} на оси приборного трехгранника $X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ (T_x, T_y, T_z);

- эксплуатационные переменные погрешности, обусловленные *нестабильностью* условий работы блока, вызванной влиянием переменной температуры (Δt) и изменением режима питания блока (ΔU);

- инструментальные постоянные погрешности, обусловленные *неортогональностью* осей чувствительности каналов магнитометров ($\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$);

- методические постоянные погрешности, обусловленные влиянием *магнитных свойств* датчика (МПД) и основания (МПО) – ($\mathbf{S}, \mathbf{T}_{\Pi}, \mathbf{F}, \mathbf{T}_{\Theta}$);

- эксплуатационные переменные погрешности, обусловленные *изменением ориентации* блока в пространстве (ψ, ϑ, γ).

Следует иметь в виду, что перечисленные погрешности могут оказывать влияние на показания БММ на уровне магнитометров с учетом их индивидуальных свойств (например, погрешности БММ от неортогональности осей чувствительности каждого ММ – $\alpha_{x1}, \beta_{x1}, \alpha_{x2}, \beta_{x2}, \dots, \alpha_{z2}, \beta_{z2}$).

Из анализа модели (2.7) метрологических характеристик БММ-КО видно, что на показания каждого ММ и каждого дифференциального контура ММ-измерений оказывают влияние:

- все проекции вектора \mathbf{T} напряженности МПЗ на оси приборного трехгранника $X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ (T_x, T_y, T_z), т. е. эти показания являются *многомерными*, а не одномерными;

- *постоянные* составляющие инструментально-методических погрешностей конструктивно-технологических факторов, обусловленных наличием у основания блока собственных *магнитных свойств* ($\mathbf{S}, \mathbf{F}, \mathbf{T}_{\Pi}$) и проявлением геометрического свойства *неортогональности* осей чувствительности магнитометров ($\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$);

- *переменные* составляющие методических погрешностей эксплуатационных факторов, обусловленных *нестабильностью* показаний ММ и контуров измерений из-за влияния переменной температуры и переменных режимов питания (нестабильность 1-го рода – $\Delta t, \Delta U$), а также из-за влияния изменения ориентации блока в пространстве (нестабильность 2-го рода – ψ, ϑ, γ).

В существующей схеме БММ-КО-1 (см. рис. 2.3) каждый ММ рассматривается как *одномерный* измеритель МПЗ, хотя на самом деле с учетом проявления у основания геометрических ($\alpha_x, \beta_x, \dots, \beta_z$) и магнитных ($\mathbf{S}, \mathbf{F}, \mathbf{T}_{\Pi}$) свойств он выступает практически как *трехмерный* (T_x, T_y, T_z), точнее, *многомерный* ($T_x, T_y, T_z, \psi, \vartheta, \gamma$ и др.) измеритель.

Блок электроники БЭ-1 обеспечивает с помощью микропроцессоров реализацию трехконтурного канала обработки ММ-информации (см. рис. 2.3).

Причем каждый контур вычисления в канале построен по дифференциальным схемам в соответствии с выражениями (2.6) и (2.7). Каждый дифференциальный контур обработки информации обеспечивает преобразование разностных сигналов в оценки \hat{T}_x , \hat{T}_y , \hat{T}_z (см. рис. 2.3):

$$\begin{aligned} \Delta T_x' &\rightarrow \Delta T_x'' \rightarrow \Delta T_x \rightarrow \hat{T}_x, \\ \Delta T_y' &\rightarrow \Delta T_y'' \rightarrow \Delta T_y \rightarrow \hat{T}_y, \\ \Delta T_z' &\rightarrow \Delta T_z'' \rightarrow \Delta T_z \rightarrow \hat{T}_z. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Микропроцессор МП-1 реализует сервисные алгоритмы (А1–А5), обеспечивающие:

- параметрическую коррекцию сигналов с целью их стабилизации в условиях проявления дестабилизирующих факторов Δt , ΔU (А1);
- идентификацию магнитных свойств ММ и каналов (А2, А3);
- идентификацию геометрических погрешностей, характеризующих неортогональность осей чувствительностей ММ (А4, А5).

Микропроцессоры МП-2 и МП-3 реализуют рабочие алгоритмы (А6, А7), обеспечивающие:

- приведение показаний БММ к немагнитному основанию и приборному ортогональному трехграннику (А6);
- формирование оценок сигналов контуров \hat{T}_x , \hat{T}_y , \hat{T}_z (А7).

Алгоритмы А1–А7 раскрыты в параграфах 2.2–2.5, 3.1, 3.2.

В основу предлагаемой схемы построения блока БММ-КО-2 положены следующие условия:

- максимально возможная простота реализации схемы за счет минимального объема конструктивно-технологического усовершенствования блока и обеспечения изменений в схемах обработки информации схемно-алгоритмическим путем;
- сохранение принципа структурной избыточности ММ-информации (на этапе измерения) и усиление его принципом функциональной избыточности информации (на этапе обработки ММ-информации);
- отказ от принципа дифференциальной схемы обработки информации и соответствующих алгоритмов.

Реализация перечисленных условий приводит к схеме БММ-КО-2, представленной на рис. 2.4. Из сравнения схем БММ-КО-1 (см. рис. 2.3) и БММ-КО-2 (см. рис. 2.4) видно, что предлагаемые усовершенствования не затрагивают конструктивно-технологических решений (в БММ датчик ДММ-КО остается без изменений). Изменения же затрагивают только *программно-алгоритмического обеспечения* (АО и ПО) БММ, что касается только соответствующей настройки блока электроники БЭ-2.

На этапе измерения ММ-информации с помощью блока БММ-КО-2, как и в блоке БММ-КО-1, сохраняются шесть контуров ММ-измерений, реализуемых в ДММ-КО с помощью шести магнитометров (см. рис. 2.3, 2.4). За счет этого сохраняется принцип структурной избыточности информации.

В блоке электроники БЭ-2 с помощью системы микропроцессоров (МП-1...4) реализуются как сервисные (А8–А10), так и рабочие (А11–А13) алгоритмы обработки информации. Причем алгоритмы предварительной подготовки БММ-КО-2 (А8–А10) совершенно эквивалентны соответствующим алгоритмам А1–А5 в блоке БММ-КО-1 (см. рис. 2.3, 2.4). Однако эти алгоритмы обеспечивают решение задач параметрической коррекции (Δt , ΔU), магнитной (\mathbf{S} , \mathbf{F} , \mathbf{T}_n) и геометрической (α_{x1} , β_{x1} , $\alpha_{x2}, \dots, \beta_{z2}$) идентификации применительно к каждому ММ.

В микропроцессоре МП-2 воспроизведен алгоритм многомерных измерений А11, реализующий *принцип функциональной избыточности информации* на этапе ее обработки в БЭ. В блоке БММ-КО-2 контуры ММ-измерений, образованные магнитометрами ММ-Х1, ММ-Х2, ..., ММ-Х22, не объединены в пары по каждой оси (как это сделано в БММ-КО-1), а работают параллельно друг другу и независимо друг от друга (см. рис. 2.4).

Из этих шести самостоятельных ММ-контуров (X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 , Z_1 , Z_2) можно образовать несколько трехконтурных каналов обработки информации ($N_{\text{кои}}$) с неповторяющимися осями чувствительности X_i , Y_j , Z_k ($i, j, k = \overline{1, 2}$, $i \neq j \neq k$).

Число возможных троек ММ $X_i Y_j Z_k$ определяется по формуле комбинаторики

$$N_{\text{кои}} = P_2 \cdot P_2 \cdot P_2 = (P_2)^3 = (A_2^2)^3, \quad (2.9)$$

где $N_{\text{кои}}$ – число каналов обработки информации; P_2 – число возможных перестановок из двух элементов; A_2^2 – число размещений из двух элементов по два. С учетом общей формулы для размещений

$$A_n^k = n(n-1)(n-2)\dots(n-k+1) \quad (2.10)$$

получим

$$A_2^2 = 2(2-1) = 2 \cdot 1 = 2.$$

Следовательно,

$$N_{\text{кои}} = (P_2)^3 = 2^3 = 8. \quad (2.11)$$

Таким образом, на основе показаний шести контуров магнитных измерений ($N_{\text{кми}} = 6$) в БЭ-2 алгоритмическим путем можно построить восемь трехконтурных каналов обработки информации ($N_{\text{кои}} = 8$). Схема формирования этих каналов обработки информации (КОИ) на основе шести контуров магнитных измерений (КМИ) представлена на рис. 2.5.

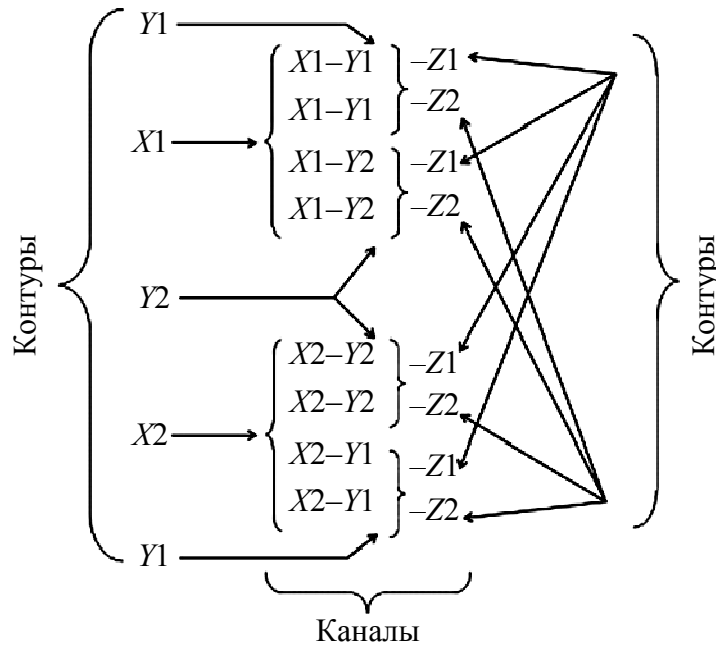


Рис. 2.5. Схема формирования каналов обработки информации

Следовательно, в предлагаемой схеме БММ-КО-2 реализованы два принципа формирования избыточной информации:

- структурной избыточности на этапе измерений в ДММ-КО;
- функциональной избыточности на этапе обработки информации.

За счет этого удается обеспечить расширение информации (см. рис. 2.2, б) как при измерениях ($N_{\text{кми}} = 6$), так и при вычислениях ($N_{\text{кои}} = 8$). В соответствии с этим в БЭ-2 предусматривается двухуровневая обработка информации (см. рис. 2.4):

- *первичная* многоконтурная в МП-1,2 на основе алгоритмов А8–А11;
- *вторичная* многоканальная в МП-3,4 на основе алгоритмов А12, А13.

С учетом получения на выходе МП-3 множества (3×8) сигналов, формируемых с помощью восьми трехконтурных каналов вычислений ($T_{\text{хпи}}, T_{\text{ypi}}, T_{\text{zпи}}, i = \overline{1,8}$), представляется возможным получить более точные оценки средних значений выходных сигналов БММ-КО-2 $\hat{T}_x, \hat{T}_y, \hat{T}_z$, приведенных к осям приборного базиса (алгоритм А13):

$$\hat{T}_x = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 T_{\text{хпи}}, \quad \hat{T}_y = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 T_{\text{ypi}}, \quad \hat{T}_z = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 T_{\text{zпи}}. \quad (2.12)$$

Отказ от принципа дифференциальной обработки информации в БММ-КО-2 и реализация в предлагаемой схеме БММ принципа структурно-функциональной избыточности информации обеспечивают для блока:

- *улучшение* метрологических характеристик БММ за счет повышения точности измерений, снижения уровня нестабильности в показаниях блока;
- *повышение* запаса живучести и отказоустойчивости блока;
- *повышение* надежности и долговечности работы блока;
- *обеспечение* условия самопроверяемости (самоконтроля) блока по контурам и каналам.

Исходя из общности математического описания показаний шестиосных блоков магнитометров на основе уравнений Пуассона, может быть разработана и реализована общая последовательность решения задачи калибровки БММ в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.6.

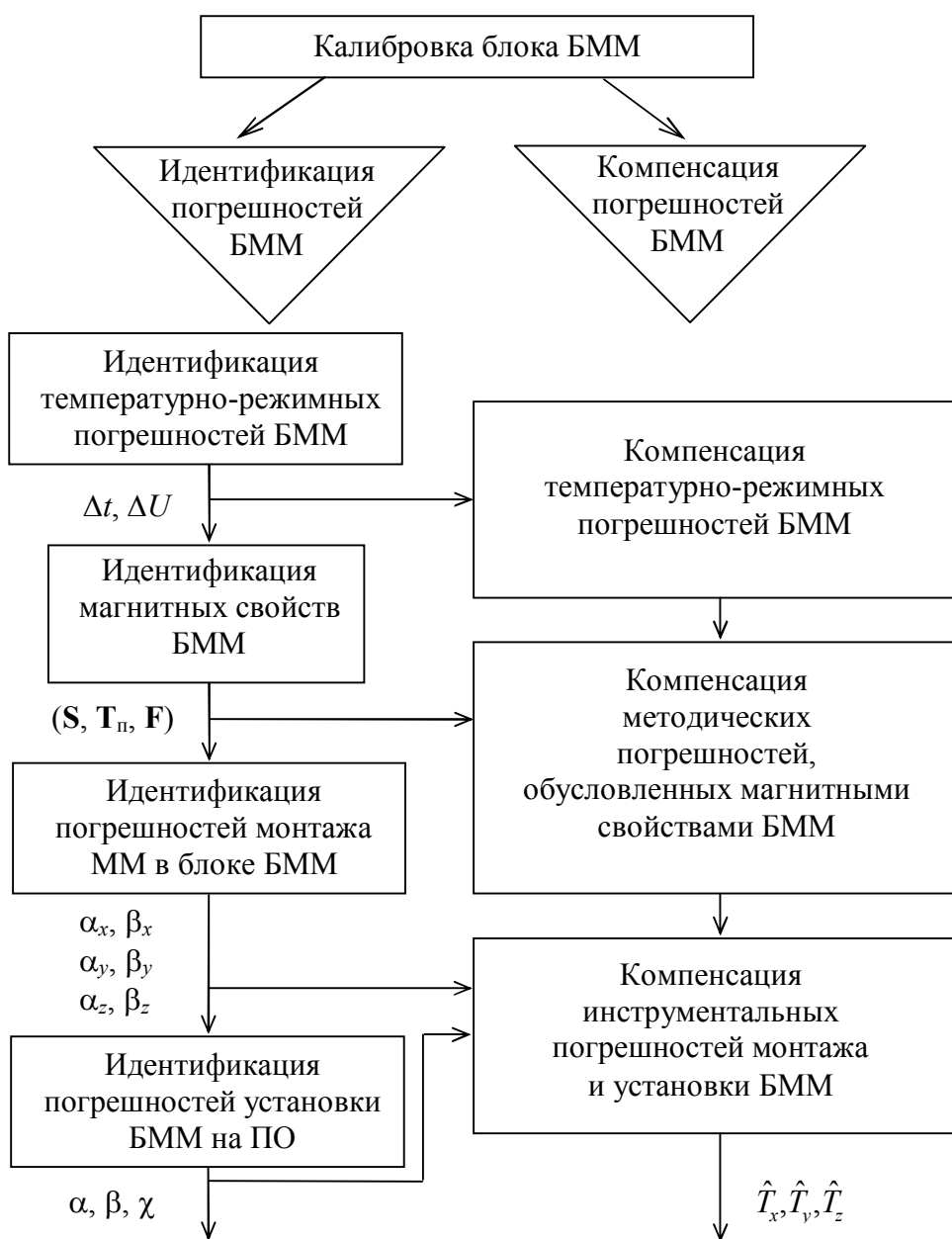


Рис. 2.6. Схема последовательности решения задачи калибровки БММ

Из анализа схемы калибровки БММ видно, что вся процедура состоит из трех этапов:

- аттестации рабочего места;
- идентификации погрешностей;
- компенсации выявленных погрешностей.

В свою очередь, каждый из этапов включает решение:

- на этапе аттестации – трех задач;
- на этапе идентификации погрешностей БММ – четырех задач;
- на этапе компенсации погрешностей – трех задач.

Алгоритмическое обеспечение решения задач идентификации и компенсации погрешностей шестиосных БММ представлено в главах 2 и 3 монографии. В главе 4 описана методика реализации алгоритмов идентификации и компенсации погрешностей БММ.

2.2. Идентификация магнитных свойств блока магнитометров

Показания БММ при его испытаниях и исследовании в лабораторных условиях описываются в виде совокупностей составляющих, указанных в векторном уравнении (2.1) или в виде уравнения Пуассона, записанного в векторно-матричных формах (2.2) или (2.3).

Если уравнение Пуассона записать не в географически ориентированной системе координат $X_g Y_g Z_g$, а в геомагнитной системе отсчета $X_m Y_m Z_m$, то по аналогии с уравнением (2.2) можно записать векторно-матричное уравнение

$$\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T = \mathbf{C} \cdot [B \cdot (\mathbf{S} + E) \cdot A_m \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m + B \cdot (\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{II}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{II}}) + B \cdot \mathbf{F} \cdot ((A_m \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m)' + B \cdot \mathbf{F} \cdot (\mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{III}})')] \quad (2.13)$$

где A_m – матрица ориентации БММ относительно геомагнитной системы координат; $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m$ – вектор напряженности МПЗ, заданный в геомагнитном трехграннике. Причем

$$A_m = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\Phi, \quad (2.14)$$

$$\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m = [T_\Gamma \ T_B \ 0]^T, \quad (2.15)$$

где Φ – магнитный курс; T_Γ , T_B – горизонтальная и вертикальная составляющие МПЗ.

Уравнения Пуассона, записанные в нормальной земной (географической) системе координат $X_g Y_g Z_g$ (2.2) и в геомагнитной системе отсчета $X_m Y_m Z_m$ (2.13), могут быть приведены к общей форме записи, если предварительно выполнить операцию формирования эталонного вектора \mathbf{T}_0 в приборной системе координат

$$\mathbf{T}_0 = A \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} = A_m \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m. \quad (2.16)$$

Тогда уравнения (2.2) и (2.13) могут быть приведены к общему виду

$$\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T = \mathbf{C} \cdot [B(\mathbf{S} + E)\mathbf{T}_3 + B(\mathbf{T}_{\text{мпз}}^{\text{н}} + \mathbf{T}_{\text{мпз}}^{\text{н}}) + B\mathbf{F}\mathbf{T}'_3 + B\mathbf{F}\mathbf{T}_{\text{мпз}}^{\text{э}}]. \quad (2.17)$$

Для блока БММ-КО-1 с дифференциальной схемой измерения выходные сигналы формируются в следующем виде:

$$\Delta\mathbf{T} = [\Delta T_x \ \Delta T_y \ \Delta T_z]^T. \quad (2.18)$$

А для предлагаемой схемы блока БММ-КО-2 с отдельным формированием шести сигналов (по контурам) можно записать две тройки сигналов

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1 &= [T_{x1} \ T_{y1} \ T_{z1}]^T, \\ \mathbf{T}_2 &= [T_{x2} \ T_{y2} \ T_{z2}]^T, \end{aligned} \quad (2.19)$$

для каждой из которых справедливо уравнение Пуассона (2.13).

2.2.1. Паспортизация магнитного поля Земли

Из анализа выражений (2.13)–(2.19) видно, что для точного аналитического описания показаний блоков магнитометров и других магнитометрических систем необходимо знание точных значений параметров МПЗ ($\mathbf{T}_{\text{мпз}}$ или $\mathbf{T}_{\text{мпз}}^m$). При оценке сигналов блоков ММ и других магнитометрических систем с использованием уравнений Пуассона МПЗ рассматривается как **эталонный опорный базис**. От точности знания и задания параметров МПЗ зависит точность оценки и прогнозирования с помощью уравнений Пуассона показаний БММ и магнитометрических систем $\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T$.

Точное знание параметров МПЗ необходимо при решении конкретных задач в таких практических областях, как геофизика, геологическая разведка и поиск полезных ископаемых, ориентация и навигация подвижных объектов и др.

Для г. Саратова с географическими координатами ($\varphi = 51^\circ 32'$ (с. ш.) и $\lambda = 46^\circ 04'$ (в. д.)) известны параметры МПЗ:

$$\begin{aligned} T_r &= 0,205\text{Э} = 20500 \text{ нТл}, \quad T_b = 0,366\text{Э} = 36600 \text{ нТл}, \\ T_{\text{мпз}} &= \sqrt{T_r^2 + T_b^2} = \sqrt{0,205^2 + 0,366^2}\text{Э} = 0,4195 \text{ Э} = 41950 \text{ нТл}, \\ \Delta &= D_m = -10,2^\circ \text{ (западное склонение)}, \\ J_m &= 60^\circ 44' \text{ (наклонение вниз)}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

В нормальной земной системе координат $X_g Y_g Z_g$

$$\begin{aligned} T_{xg} &= T_r \cos D_m = 0,205 \text{ Э} \cdot \cos(-10,2^\circ) = 0,205 \text{ Э} \cdot 0,9842 = \\ &= 0,201761 \text{ Э} = 20176 \text{ нТл}, \\ T_{zg} &= T_r \sin D_m = 0,205 \text{ Э} \cdot \sin(-10,2^\circ) = 0,205 \text{ Э} \cdot (-0,1771) = \\ &= -0,036305 \text{ нТл} = -3630,5 \text{ нТл} \text{ (проекция направлена на запад)}, \\ T_{yg} &= T_b = 0,366 \text{ Э} = 36600 \text{ нТл}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Магнитный курс Φ , как и истинный (географический) курс ψ , отсчитывается по часовой стрелке в пределах $\Phi \in [0; 360^\circ]$ (ГОСТ 20058-80).

Структура МПЗ такова, что в любой точке земного шара и околоземного пространства вектор $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$ может быть представлен тремя составляющими

$$\mathbf{T}_{\text{МПЗ}} = \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{H}} + \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{a}} + \delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}, \quad (2.22)$$

где $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{H}}$, $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{a}}$, $\delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$ – нормальная и аномальная составляющие МПЗ и вариации МПЗ.

Основу формирования вектора $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$ составляет нормальная составляющая $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{H}}$ (90% и более). Аномальная составляющая МПЗ $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{a}}$ придает геомагнитному полю свойство **неоднородности** (в пространстве), а вариации МПЗ $\delta \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$ придают геомагнитному полю свойство **нестационарности** (во времени). Следовательно, в соответствии с представлением МПЗ, состоящим из трех составляющих, это поле в каждой точке пространства и в различные моменты времени является неоднородным и нестационарным (нестабильным).

Для применения МПЗ в качестве эталонного опорного поля используется описание магнитного поля по нормальной составляющей $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{H}}$ МПЗ-Н, носящей постоянный регулярный характер.

Параметры нормального геомагнитного поля (МПЗ-Н) можно определить двумя путями:

- аналитическим;
- экспериментальным.

Определение параметров МПЗ-Н аналитическим путем строится на основе использования той или иной аналитической модели МПЗ-Н. В настоящее время на практике находят, как правило, аналитические модели с различной степенью точности описания:

- **грубые модели** на основе представления МПЗ-Н в виде соосного магнитного диполя;
- **уточненные модели** на основе представления МПЗ-Н в виде несоосного магнитного диполя;
- **точные модели** на основе разложения геомагнитного потенциала в гармонический сферический ряд Гаусса.

Для модели соосного диполя можно написать векторно-матричное уравнение

$$\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m = [T_{xm} \quad T_{ym} \quad T_{zm}]^T = \frac{M_m}{R} [\cos \varphi_m \quad -2 \sin \varphi_m \quad 0]^T, \quad (2.23)$$

где T_{xm} , T_{ym} , T_{zm} – проекции вектора $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m$ на оси геомагнитной системы координат (X_m – касательная к магнитному меридиану, Y_m – вертикаль места, Z_m – горизонтальная ось, касательная к магнитной параллели, направленная на восток); $M_m = 8,06 \cdot 10^{15}$ нТл·км³ – магнитный момент МПЗ-Н; $\varphi_m \approx \varphi$ – геомагнитная широта.

Приводя уравнение (2.23) к скалярному виду, получим для любой точки околоземного пространства ($r \geq R$)

$$\begin{aligned} T_{\Gamma} &= T_{xm} = \frac{M_m}{r^3} \cos \varphi_m, \\ T_{\text{В}} &= T_{ym} = -\frac{M_m}{r^3} 2 \sin \varphi_m, \\ T_{zm} &= 0. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Модуль напряженности МПЗ-Н, принимаемого за соосный диполь, равен

$$T_{\text{д}} = T_{\text{МПЗ}}^m = \sqrt{T_{\Gamma}^2 + T_{\text{В}}^2} = \frac{M_m}{r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi_m}. \quad (2.25)$$

В действительности магнитный диполь МПЗ-Н является несоосным и имеет магнитную ось (ось намагничивания), наклоненную к оси вращения Земли под углом $\mu \approx 11,5^\circ$ (южный магнитный полюс S_m этого несоосного диполя расположен в районе Гренландии). Для несоосного диполя МПЗ-Н можно написать

$$\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^g = A_{Dm} \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m, \quad (2.26)$$

где $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^g$ – вектор напряженности МПЗ, заданный в нормальной земной системе координат X_g, Y_g, Z_g ; A_{Dm} – матрица угла магнитного склонения. Или в скалярной форме

$$\begin{aligned} T_{\text{дхг}} &= T_{\text{д}} \frac{\cos D_m \cos \varphi_m}{\sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi_m}}, \\ T_{\text{дуг}} &= -2T_{\text{д}} \frac{\sin \varphi_m}{\sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi_m}}, \\ T_{\text{дзг}} &= T_{\text{д}} \frac{\sin D_m \cos \varphi_m}{\sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi_m}}, \end{aligned} \quad (2.27)$$

где $T_{\text{дхг}}$, $T_{\text{дуг}}$, $T_{\text{дзг}}$ – проекции вектора $\mathbf{T}_{\text{д}}$ на оси $X_g Y_g Z_g$.

Матрица A_{Dm} зависит от географических координат текущей точки в околоземном пространстве $A(\varphi, \lambda, r)$ (φ, λ – географические широта и долгота; \mathbf{r} – радиус-вектор). С учетом этой зависимости для проекции вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}^g$ на оси земной системы координат $X_g Y_g Z_g$ можно записать

$$\begin{aligned} T_{xg}^H &= \left(\frac{R_1}{r}\right)^3 \left[-g_1^0 \cos \varphi + (h_1^1 \sin \lambda + g_1^1 \cos \lambda) \cdot \sin \varphi\right], \\ T_{yg}^H &= 2\left(\frac{R_1}{r}\right)^3 \left[g_1^0 \sin \varphi + (h_1^1 \sin \lambda + g_1^1 \cos \lambda) \cdot \cos \varphi\right], \\ T_{zg}^H &= \left(\frac{R_1}{r}\right)^3 (g_1^1 \sin \lambda + h_1^1 \cos \lambda), \end{aligned} \quad (2.28)$$

где $R_1 = 6371110$ м – средний радиус Земли; g_1^0, g_1^1, h_1^1 – коэффициенты Гаусса–Шмидта для дипольной модели МПЗ-Н (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Значения коэффициентов Гаусса–Шмидта

Коэффициенты, нТл	Стандартные модели МПЗ-Н		
	МАП-80	WMM-2005	WMM-2010
g_1^0	-30339	-29556,8	-29496,6
h_1^1	5758	5079,8	4944,4
g_1^1	-2123	-1671,7	-1586,3

В геофизике, геологоразведке, в областях навигации и ориентации с использованием информации о геофизических полях давно используются точные модели нормального МПЗ-Н по составляющим вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}^g$ в виде различных модификаций модели Международного аналитического описания *IGRF (International Geomagnetic Reference Field)*, основанного на разложении геомагнитного потенциала в сферический гармонический ряд Гаусса:

$$\begin{aligned} T_{xg}^H &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_1}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \cdot \nabla P_n^m, \\ T_{yg}^H &= \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \left(\frac{R_1}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\sin \varphi), \\ T_{zg}^H &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_1}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m (g_n^m \cos m\lambda - h_n^m \sin m\lambda) \cdot \frac{P_n^m(\sin \varphi)}{\cos \varphi}, \end{aligned} \quad (2.29)$$

где $P_n^m(\sin \varphi)$ – присоединенные функции Лежандра n -й степени порядка m ; ∇P_n^m – широтный градиент первого порядка присоединенной функции Лежандра n -й степени порядка m .

На эпоху 2010–2015 гг. действует модель Международного магнитного поля *World Magnetic Model for 2010–2015 (WMM-2010)*, составленная в соответствии с общей моделью *IGRF*. Коэффициенты h_n^m , g_n^m для этой модели имеют численные значения, приведенные в табл. П. 1 (прил. 1) (сайт сети Internet: <http://www.ngdc.noaa.gov.com>, режим доступа свободный).

Определение параметров МПЗ-Н экспериментальным путем может быть выполнено различными способами. Для этих целей на практике чаще всего используются геофизические трехкомпонентные блоки магнитометров (например, магнитометр геофизический феррозондовый МГФ-ЗГМ). Для привязки показаний магнитометра к конкретным точкам в околоземном пространстве может быть использована аппаратура потребителя АП СНС (например, *GPS*-приемник), а также карта местности.

Можно определить направление географического меридиана на основе показаний АП СНС в двух (минимум) точках $A_1(\varphi_1, \lambda_1)$ и $B_1(\varphi_2, \lambda_2)$, т. е. найти направление на север по формулам сферического треугольника (рис. 2.7).

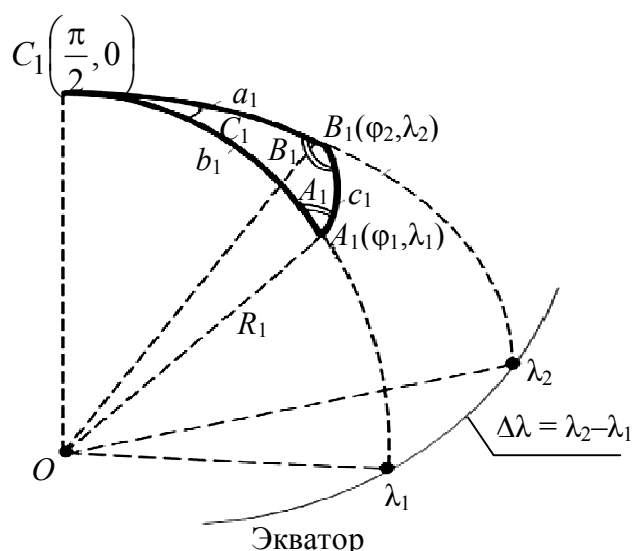


Рис. 2.7. Схема сферического треугольника

Допустим, что с помощью АП СНС определены географические координаты двух точек $A_1(\varphi_1, \lambda_1)$ и $B_1(\varphi_2, \lambda_2)$, расстояние между которыми измерено точно непосредственным путем (дуга $A_1B_1 = l$). Тогда на основе проведенных измерений ($\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2, l$) для сферического треугольника $A_1B_1C_1$ можно вычислить его элементы:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\pi}{2} - \varphi_2, & b_1 &= \frac{\pi}{2} - \varphi_1, \\ c_1 &= \frac{l}{R_1}, & C_1 &= \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1. \end{aligned} \quad (2.30)$$

На основе теоремы сферической геометрии для сферического треугольника можно найти углы A_1 и B_1 , определяющие направления плоскостей географических меридианов OA_1C_1 и OB_1C_1 в точках A_1 и B_1 :

$$\begin{aligned}\sin A_1 &= \frac{\sin C_1}{\sin c_1} \cdot \sin a_1 = \frac{\sin(\lambda_2 - \lambda_1)}{\sin\left(\frac{l}{R_1}\right)} \cdot \cos\varphi_2, \\ \sin B_1 &= \frac{\sin C_1}{\sin c_1} \cdot \sin b_1 = \frac{\sin(\lambda_2 - \lambda_1)}{\sin\left(\frac{l}{R_1}\right)} \cdot \cos\varphi_1, \\ \cos A_1 &= \frac{\cos a_1 - \cos b_1 \cdot \cos c_1}{\sin b_1 \cdot \sin c_1} = \frac{\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1)}{\cos\varphi_1 \cdot \sin(\lambda_2 - \lambda_1)}, \\ \operatorname{tg} B_1 &= \frac{\sin C_1}{\sin a_1 \cdot \operatorname{ctg} b_1 - \cos a_1 \cdot \cos C_1} = \frac{\sin(\lambda_2 - \lambda_1)}{\cos\varphi_2 \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 - \sin\varphi_2 \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1)}, \\ \operatorname{tg} A_1 &= \frac{\sin C_1}{\sin b_1 \cdot \operatorname{ctg} a_1 - \cos b_1 \cdot \cos C_1} = \frac{\sin(\lambda_2 - \lambda_1)}{\cos\varphi_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi_2 - \sin\varphi_1 \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1)}.\end{aligned}\tag{2.31}$$

Формулы (2.30)–(2.31) составляют основу **алгоритма начальной выставки** (алгоритма АНВ-С) ИВС по спутниковой информации.

Направление истинного (географического) меридиана можно найти точнее, если располагать двумя дополнительными блоками:

- трехосным блоком гироскопов (ТБГ) (например, волоконно-оптических (ВОГ));
- трехосным блоком акселерометров (ТБА) (например, маятниковых кварцевых).

Допустим, что оси чувствительности обоих блоков (ТБГ и ТБА) образуют ортогональный приборный трехгранник. Если при любой произвольной ориентации общего основания, на котором установлены эти блоки, произвести измерения в режиме остановки основания, то показания ($\boldsymbol{\omega}$ и \boldsymbol{a}) блоков можно записать с помощью следующих векторно-матричных уравнений:

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_{x0} \ \omega_{y0} \ \omega_{z0}]^T = A_0 \cdot [\Omega_{xg} \ \Omega_{yg} \ \Omega_{zg}]^T, \tag{2.32}$$

$$\boldsymbol{a} = [g_{x0} \ g_{y0} \ g_{z0}]^T = A_0 \cdot [g_{xg} \ g_{yg} \ g_{zg}]^T. \tag{2.33}$$

В режиме остановки основания блок ТБГ выступает в качестве измерителя угловой скорости вращения Земли:

$$\boldsymbol{\Omega} = [\Omega_{xg} \ \Omega_{yg} \ \Omega_{zg}]^T = [\Omega \cos\varphi \ \Omega \sin\varphi \ 0]^T, \tag{2.34}$$

а блок ТБА выполняет функции трехкомпонентного гравиметра, измеряющего ускорение свободно падающего тела \mathbf{g} в проекциях на оси приборной системы координат:

$$\mathbf{g} = [g_{xg} \quad g_{yg} \quad g_{zg}]^T = [0 \quad -g \quad 0]^T. \quad (2.35)$$

Матрица начальной ориентации (выставки) основания блоков ТБГ и ТБА имеет вид

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_{11}^0 & a_{12}^0 & a_{13}^0 \\ a_{21}^0 & a_{22}^0 & a_{23}^0 \\ a_{31}^0 & a_{32}^0 & a_{33}^0 \end{bmatrix} = [a_{ij}^0]_3^3. \quad (2.36)$$

Приводя с учетом выражений (2.34)–(2.36) векторно-матричные уравнения (2.32) и (2.33) к скалярной форме, получим

$$\begin{aligned} \omega_{x0} &= (a_{11}^0 \cdot \cos\varphi + a_{12}^0 \cdot \sin\varphi) \cdot \Omega, \\ \omega_{y0} &= (a_{21}^0 \cdot \cos\varphi + a_{22}^0 \cdot \sin\varphi) \cdot \Omega, \\ \omega_{z0} &= (a_{31}^0 \cdot \cos\varphi + a_{32}^0 \cdot \sin\varphi) \cdot \Omega, \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} g_{x0} &= -ga_{12}^0, \\ g_{y0} &= -ga_{22}^0, \\ g_{z0} &= -ga_{32}^0. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Решая системы уравнений (2.37) и (2.38), получим формулы для вычисления начальных значений направляющих косинусов $a_{ij}^0 (i, j = \overline{1;3})$ в режиме начальной выставки основания:

$$\begin{aligned} a_{12}^0 &= -\frac{g_{x0}}{g}, \quad a_{22}^0 = -\frac{g_{y0}}{g}, \quad a_{32}^0 = -\frac{g_{z0}}{g}, \\ a_{11}^0 &= \frac{\frac{\omega_{x0}}{\Omega} + \frac{g_{x0}}{g} \sin\varphi}{\cos\varphi}, \quad a_{21}^0 = \frac{\frac{\omega_{y0}}{\Omega} + \frac{g_{y0}}{g} \sin\varphi}{\cos\varphi}, \quad a_{31}^0 = \frac{\frac{\omega_{z0}}{\Omega} + \frac{g_{z0}}{g} \sin\varphi}{\cos\varphi}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Начальные значения остальных направляющих косинусов $a_{ij}^0 (i, j = \overline{1;3})$ могут быть вычислены на основе уравнений связей (условий ортогональности и коллинеарности осей):

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\psi_0 &= \frac{a_{13}^0}{a_{11}^0}, \quad \sin \vartheta_0 = a_{12}^0, \quad \operatorname{tg}\gamma_0 = \frac{a_{32}^0}{a_{22}^0}, \\ \cos \psi_0 &= \frac{a_{11}^0}{\sqrt{(a_{11}^0)^2 + (a_{13}^0)^2}} = \frac{a_{11}^0}{\sqrt{1 - (a_{12}^0)^2}}, \\ \cos \gamma_0 &= \frac{a_{22}^0}{\sqrt{(a_{22}^0)^2 + (a_{32}^0)^2}} = \frac{a_{22}^0}{\sqrt{1 - (a_{12}^0)^2}}. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Для этих целей могут быть использованы и другие формулы. Выражения (2.32)–(2.40) образуют основу алгоритма **начальной выставки** (алгоритма АВН-И) **по инерциальной информации**. В литературе этот алгоритм получил название *TRIAD*-алгоритма, а метод его реализации получил название **метода аналитического горизонтирования и гироскопирования** (метод АГГ). Следует отметить, что метод АГГ и алгоритм АВН-И позволяют не только определить все углы ориентации (ϑ , γ – горизонтирование и ψ – компасирование), но и вычислить географическую широту φ местоположения блоков ТБГ и ТБА.

Подставляя в соотношения (2.29) соответствующие формулы для $P_n(\sin\varphi)$, $P_n^m(\sin\varphi)$, ∇P_n^m и производя промежуточные преобразования, получим развернутые выражения для проекций T_{xg}^n , T_{yg}^n , T_{zg}^n с учетом членов разложения в сферический гармонический ряд Гаусса–Шмидта степеней $n = \overline{1; \bar{b}}$ и порядка $m = \overline{0; \bar{n}}$ (прил. 2).

Совокупность выражений, приведенных в прил. 2, образует основу **алгоритмов аналитической паспортизации поля** (АПП-1...АПП-3). Сравнение вычисленных по формулам прил. 2 теоретических значений проекций вектора $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^n = [T_{xg}^n \ T_{yg}^n \ T_{zg}^n]^T$ с соответствующими экспериментальными значениями $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^{\text{эксп}} = [T_{xg}^{\text{эксп}} \ T_{yg}^{\text{эксп}} \ T_{zg}^{\text{эксп}}]^T$ дает возможность в соответствии с формулой (2.22) определить влияние на формирование МПЗ в данной точке пространства аномальной ($\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^a$) и вариационной ($\delta\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$) составляющих геомагнитного поля, обусловленных проявлением естественных и искусственных источников помех.

На основании такой количественной оценки можно делать заключение об **однородности** (градиенты МПЗ $\nabla\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$, $\nabla\mathbf{T}_Г$, $\nabla\mathbf{T}_В$ достаточно малы) и **стабильности (стационарности)** (вариации МПЗ $\delta\mathbf{T}_{\text{МПЗ}} \approx 0$) МПЗ, а также возможности использования его в качестве невозмущенного опорного поля, заданного в неподвижной системе координат.

Если **пассивный способ** поиска однородного и стабильного МПЗ в данной точке пространства не приводит к необходимому результату, то можно воспользоваться **активным способом**, основанным на возможности изоляции измерительного блока от влияния внешних магнитных и элект-

тромагнитных помех с помощью металлической клетки и последующей генерации с помощью катушек Гельмгольца искусственного магнитного поля, используемого в качестве эталонного опорного поля для решения задач идентификации [40, 41].

2.2.2. Алгоритм косвенной оценки условий ортогональности и вариативности (алгоритм АИ-1)

Задачу выявления и аттестации погрешностей БММ будем решать алгоритмическим путем. Если МПД по постоянной, индуктивной и вихревой составляющим отсутствует, т. е.

$$\mathbf{T}_{\text{мпд}}^{\text{п}} = \mathbf{T}_{\text{мпд}}^{\text{и}} = \mathbf{T}_{\text{мпд}}^{\text{в}} = \mathbf{0},$$

причем оси чувствительностей магнитометров ортогональны друг другу и совпадают с соответствующими осями приборной системы координат $X_{\text{п}}Y_{\text{п}}Z_{\text{п}}$

$$B = E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

то показания такого БММ должны совпадать с показаниями эталонной магнитометрической системы при их одинаковой ориентации в пространстве (например, при $\psi = \vartheta = \gamma = 0$):

$$\begin{aligned} \Delta T_x &= T_x - T_{xg} = 0, & \Delta \dot{T}_x &= 0, \\ \Delta T_y &= T_y - T_{yg} = 0, & \Delta \dot{T}_y &= 0, \\ \Delta T_z &= T_z - T_{zg} = 0, & \Delta \dot{T}_z &= 0. \end{aligned} \quad (2.41)$$

По модулю (при любой ориентации БММ по ψ, ϑ, γ)

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2} = T_{\text{мпз}} = \sqrt{T_{xg}^2 + T_{yg}^2 + T_{zg}^2}. \quad (2.42)$$

Скорости изменений вариаций $\Delta \dot{T} = 0$.

С геометрической точки зрения критерием ортогональности осей является условие

$$\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \chi} = 1, \quad (2.43)$$

причем

$$\cos \alpha = \frac{T_x}{T_{\text{мпз}}}, \quad \cos \beta = \frac{T_y}{T_{\text{мпз}}}, \quad \cos \chi = \frac{T_z}{T_{\text{мпз}}}. \quad (2.44)$$

Следовательно, обобщенным показателем неортогональности (афинности) и вариативности БММ является косвенный критерий

$$\sigma = \sqrt{\frac{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2}{T_{\text{МПЗ}}^2} - 1} \neq 0. \quad (2.45)$$

Чем сильнее σ отличается от нуля, тем явственнее проявляется неортогональность осей и больше влияние МПД по всем составляющим.

2.2.3. Алгоритм предварительной идентификации МПД по постоянной и индуктивной составляющим (алгоритм АИ-2)

В первом приближении пренебрежем в уравнении (2.2) влиянием геометрических погрешностей ($B = C = E$) и вихревых составляющих МПД и МПО ($\dot{\mathbf{T}}_{\text{МПД}}^{\text{эм}} \approx 0; \omega = 0; \mathbf{F}_0 = \mathbf{F} = E$). Тогда уравнение Пуассона (2.2) приобретает укороченный вид

$$\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T = (\mathbf{S} + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{н}}. \quad (2.46)$$

Для схемы Эйлера–Крылова направляющие косинусы a_{ij} , ($i, j = \overline{1,3}$) матрицы A относительно нормальной земной системы координат вычисляются по формулам (1.12).

При использовании матрицы A_m относительно геомагнитного трехгранника $X_m Y_m Z_m$ следует заменить истинный курс ψ на магнитный курс Φ .

На основе результатов паспортизации МПЗ в точке установки БММ на лабораторной установке с помощью эталонной магнитометрической системы ($\mathbf{T}_{\text{МПЗ}} = [T_{xg} \ T_{yg} \ T_{zg}]^T$) и результатов любых четырех идентификационных экспериментов находим эталонные значения МПЗ в приборных осях (без магнитных и геометрических искажений):

$$\begin{aligned} T_{x\bar{i}} &= a_{11}^i \cdot T_{xg} + a_{12}^i \cdot T_{yg} + a_{13}^i \cdot T_{zg}, \\ T_{y\bar{i}} &= a_{21}^i \cdot T_{xg} + a_{22}^i \cdot T_{yg} + a_{23}^i \cdot T_{zg}, \\ T_{z\bar{i}} &= a_{31}^i \cdot T_{xg} + a_{32}^i \cdot T_{yg} + a_{33}^i \cdot T_{zg}, \quad (i \equiv \overline{1,4}). \end{aligned} \quad (2.47)$$

На основе приведенных неискаженных показаний БММ формируем матрицу идентификации

$$N = \begin{bmatrix} T_{x\bar{1}} & T_{y\bar{1}} & T_{z\bar{1}} & 1 \\ T_{x\bar{2}} & T_{y\bar{2}} & T_{z\bar{2}} & 1 \\ T_{x\bar{3}} & T_{y\bar{3}} & T_{z\bar{3}} & 1 \\ T_{x\bar{4}} & T_{y\bar{4}} & T_{z\bar{4}} & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

Находим детерминант матрицы N :

$$\det N = \begin{vmatrix} T_{x\varepsilon 1} & T_{y\varepsilon 1} & T_{z\varepsilon 1} & 1 \\ T_{x\varepsilon 2} & T_{y\varepsilon 2} & T_{z\varepsilon 2} & 1 \\ T_{x\varepsilon 3} & T_{y\varepsilon 3} & T_{z\varepsilon 3} & 1 \\ T_{x\varepsilon 4} & T_{y\varepsilon 4} & T_{z\varepsilon 4} & 1 \end{vmatrix} \neq 0. \quad (2.49)$$

Выражение (2.49) – условие невырожденности матрицы N . Находим обратную матрицу

$$N^{-1} = \frac{\tilde{N}}{\det N}, \quad (2.50)$$

где \tilde{N} – союзная (присоединенная) матрица.

Вычислим коэффициенты суммарной матрицы (матрицы Пуассона и единичной матрицы E)

$$\mathbf{S} + E = \begin{bmatrix} a+1 & b & c \\ d & e+1 & f \\ g & h & k+1 \end{bmatrix}$$

и компоненты вектора постоянной составляющей МПД $\mathbf{T}_{\text{мпд}}^{\text{п}} = [P \ Q \ R]^T$ (**алгоритм АИ-2**):

$$\begin{aligned} [(a+1) \ b \ c \ P]^T &= N^{-1} \cdot [T_{x1} \ T_{x2} \ T_{x3} \ T_{x4}]^T, \\ [d \ (e+1) \ f \ Q]^T &= N^{-1} \cdot [T_{y1} \ T_{y2} \ T_{y3} \ T_{y4}]^T, \\ [g \ h \ (k+1) \ R]^T &= N^{-1} \cdot [T_{z1} \ T_{z2} \ T_{z3} \ T_{z4}]^T. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Вместо общего алгоритма АИ-2 в векторно-матричной форме (2.51) могут быть использованы формулы Крамера.

Матрица идентификации N должна удовлетворять требованиям невырожденности и хорошей обусловленности

$$\det N \neq 0, \quad (2.52)$$

$$\text{cond } N = \|N\| \cdot \|N^{-1}\| \rightarrow \min. \quad (2.53)$$

Общий алгоритм АИ-2 идентификации магнитных свойств датчика БММ в виде формул (2.51) может быть конкретизирован применительно к существующему блоку БММ-КО-1 с дифференциальной схемой обработки информации (**алгоритм АИ-2.1**)

$$\begin{aligned} [(a+1) \ b \ c \ P]^T &= N^{-1} \cdot [\Delta T_{x1} \ \Delta T_{x2} \ \Delta T_{x3} \ \Delta T_{x4}]^T, \\ [d \ (e+1) \ f \ Q]^T &= N^{-1} \cdot [\Delta T_{y1} \ \Delta T_{y2} \ \Delta T_{y3} \ \Delta T_{y4}]^T, \\ [g \ h \ (k+1) \ R]^T &= N^{-1} \cdot [\Delta T_{z1} \ \Delta T_{z2} \ \Delta T_{z3} \ \Delta T_{z4}]^T \end{aligned} \quad (2.54)$$

и применительно к предлагаемому блоку БММ-КО-2 с отдельной схемой обработки информации по шести контурам ($k = 6$) и двум каналам ($m = 2$) (алгоритм АИ-2.2)

$$\begin{aligned} [(a_i + 1) \ b_i \ c_i \ P_i]^T &= N^{-1} \cdot [T_{xi}^I \ T_{xi}^{II} \ T_{xi}^{III} \ T_{xi}^{IV}]^T, \\ [d_i \ (e_i + 1) \ f_i \ Q_i]^T &= N^{-1} \cdot [T_{yi}^I \ T_{yi}^{II} \ T_{yi}^{III} \ T_{yi}^{IV}]^T, \\ [g_i \ h_i \ (k_i + 1) \ R_i]^T &= N^{-1} \cdot [T_{zi}^I \ T_{zi}^{II} \ T_{zi}^{III} \ T_{zi}^{IV}]^T, \quad (i = 1, 2). \end{aligned} \quad (2.55)$$

Следует отметить, что в выражениях (2.54) и (2.55) фигурирует одна и та же матрица идентификации N , определяемая по формуле (2.48).

Если при решении задачи идентификации МПД используется уравнение Пуассона в векторно-матричной форме, причем вектор $\mathbf{T}_{МПЗ}^m$ отнесен к осям геомагнитного трехгранника $X_m Y_m Z_m$ в виде выражения (2.15), то с учетом выражения (2.14) следует уточнить формулы (1.12) путем замены $\psi \rightarrow \Phi$. Тогда вместо уравнения (2.46) можно записать

$$\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T = (\mathbf{S} + E) \cdot (A_\gamma \cdot A_\theta \cdot A_\Phi) \cdot [T_\Gamma \ T_B \ 0]^T + \mathbf{T}_{МПД}^n. \quad (2.56)$$

С учетом такой замены на основе использования результатов любых четырех идентификационных экспериментов находим эталонные значения вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}^m$ в осях приборного трехгранника $X_\Pi Y_\Pi Z_\Pi$ (без магнитных и геометрических искажений):

$$\begin{aligned} T_{x\pi i} &= a_{11}^i \cdot T_\Gamma + a_{12}^i \cdot T_B, \\ T_{y\pi i} &= a_{21}^i \cdot T_\Gamma + a_{22}^i \cdot T_B, \\ T_{z\pi i} &= a_{31}^i \cdot T_\Gamma + a_{32}^i \cdot T_B, \quad (i = \overline{1, n}; n \geq 4). \end{aligned} \quad (2.57)$$

Эталонные значения вектора $\mathbf{T}_\theta = \mathbf{T}_{МПЗ}$, приведенного к осям $X_\Pi Y_\Pi Z_\Pi$ и рассчитанные по формулам (2.22), (2.47) и (2.57), должны совпадать.

Дальнейшая обработка информации в соответствии с алгоритмом А2 должна проводиться по тем же формулам (выражения (2.48)–(2.53)).

При решении задачи идентификации МПД по алгоритму АИ-2 необходимо проводить проверку правильности выполнения промежуточных вычислений. В частности, для проверки правильности вычисления направ-

ляющих косинусов a_{ij}^k ($i, j = \overline{1;3}; k = \overline{1;n}$) матриц ориентации A или A_m полезно проводить промежуточную проверку условия параллельности осей

$$\begin{aligned} a_{11}^2 + a_{12}^2 + a_{13}^2 &= 1, \\ a_{21}^2 + a_{22}^2 + a_{23}^2 &= 1, \\ a_{31}^2 + a_{32}^2 + a_{33}^2 &= 1 \end{aligned} \quad (2.58)$$

и условия ортогональности осей

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot a_{21} + a_{12} \cdot a_{22} + a_{13} \cdot a_{23} &= 0, \\ a_{11} \cdot a_{31} + a_{12} \cdot a_{32} + a_{13} \cdot a_{33} &= 0, \\ a_{21} \cdot a_{31} + a_{22} \cdot a_{32} + a_{23} \cdot a_{33} &= 0. \end{aligned} \quad (2.59)$$

Факты связанности направляющих косинусов матриц ориентации A или A_m по условиям коллинеарности и ортогональности осей могут быть представлены несколько в другой форме:

$$\begin{aligned} a_{11} &= a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}, \\ a_{12} &= a_{23}a_{31} - a_{33}a_{21}, \\ a_{13} &= a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}, \\ a_{21} &= a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33}, \\ a_{22} &= a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}, \\ a_{23} &= a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32}, \\ a_{31} &= a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}, \\ a_{32} &= a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23}, \\ a_{33} &= a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}. \end{aligned} \quad (2.60)$$

Из выражений (2.60) видно, что элементы a_{ij} любой матрицы ориентации совпадают со своими алгебраическими дополнениями A_{ji} :

$$a_{ij} = A_{ji}, \quad (i, j = \overline{1;3}). \quad (2.61)$$

Следовательно, союзная (присоединенная) матрица определяется выражением

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}^T = A^T. \quad (2.62)$$

С учетом выражений (2.60)–(2.62) можно показать, что детерминант любой матрицы ориентации равен

$$D = \det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix} = 1. \quad (2.63)$$

Отсюда следует, что обратная матрица совпадает с транспонированной

$$A^{-1} = \frac{\tilde{A}}{\Delta} = A^T, \quad (2.64)$$

т. е. совпадает с транспонированной матрицей A^T . Тогда

$$A^{-1} \cdot A = A^T \cdot A = E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.65)$$

Следовательно, след матрицы ориентации равен

$$\text{Sp } A = \det A \cdot \det A^{-1} = 3. \quad (2.66)$$

С другой стороны,

$$\text{Sp } A = \sum_{i,j=1}^3 a_{ij} (i = j) = a_{11} + a_{22} + a_{33}. \quad (2.67)$$

Выражения (2.63) и (2.66) являются, по существу, условиями проверки невырожденности ($\det A \neq 0$) и хорошей обусловленности ($\text{cond } A \rightarrow \min$) матрицы ориентации.

Совокупность выражений (2.58)–(2.67) образует основу формирования **алгоритма контроля и нормировки** (алгоритма АКН-1), выполняющего вспомогательную функцию.

В результате решения задачи идентификации магнитных свойств БММ по алгоритму А2 становятся известными матрица коэффициентов Пуассона \mathbf{S} и компоненты вектора постоянной составляющей МПД $\mathbf{T}_{\text{мпд}}^n = [P \quad Q \quad R]^T$.

2.3. Идентификация инструментальных погрешностей блока магнитометров

После решения задачи идентификации МПД по параметрам матрицы коэффициентов Пуассона \mathbf{S} и компонентам вектора $\mathbf{T}_{\text{мпд}}^n$ с помощью алгоритма А2 может быть поставлена и решена задача идентификации инструментальных погрешностей монтажа ММ в БММ (по алгоритму А3).

К инструментальным погрешностям блока ММ относятся геометрические погрешности, обусловленные неортогональностью осей чувствительностей БММ X_i, Y_i, Z_i ($i = 1, 2$). Формирование геометрических погрешностей от неортогональности осей чувствительности определяется технологическими условиями монтажа магнитометров в корпусе блока (см. рис. 2.1, б).

Предположим, что условие ортогональности осей чувствительности БММ не выполняется, т. е. матрица монтажа (B) ММ (сборки БММ) равна (см. рис. 2.1, б)

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \beta_x & -\alpha_x \\ -\alpha_y & 1 & \beta_y \\ \alpha_z & -\beta_z & 1 \end{bmatrix} \neq E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.68)$$

В этом случае уравнение Пуассона для дифференциальных каналов может быть записано в следующем векторно-матричном виде:

$$\Delta \mathbf{T} = [\Delta T_x \quad \Delta T_y \quad \Delta T_z]^T = B \cdot [(\mathbf{S} + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^n]. \quad (2.69)$$

Уравнение Пуассона в форме (2.69) удобно для решения задачи идентификации магнитных и геометрических свойств основания.

2.3.1. Идентификация магнитных и геометрических свойств основания по каналам магнитных измерений (алгоритм АИ-3.1)

Если вектор напряженности МПЗ $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$ задан не в нормальной земной системе координат ($\mathbf{T}_{\text{МПЗ}} = [T_{xg} \quad T_{yg} \quad T_{zg}]^T$), а в нормальном геомагнитном трехграннике ($\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m = [T_g \quad T_b \quad 0]^T$), то уравнение Пуассона (2.69) будет записано аналогично с учетом матрицы ориентации ПО ($A \sim A_m$).

Введем обозначение вектора неискаженных показаний БММ, формируемых при условии отсутствия магнитных свойств у датчика блока и основания ($\mathbf{S} = 0, \mathbf{T}_{\text{МПД}}^n = 0$):

$$\mathbf{T}_3 = [T_{x3} \quad T_{y3} \quad T_{z3}]^T = A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} = A_m \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}}^m. \quad (2.70)$$

С учетом (2.70) уравнение Пуассона (2.69) можно привести к укороченному виду

$$\Delta \mathbf{T} = [\Delta T_x \quad \Delta T_y \quad \Delta T_z]^T = B \cdot [(\mathbf{S} + E) \cdot \mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_{\text{МПД}}^n]. \quad (2.71)$$

С учетом (2.68) уравнение Пуассона (2.69) приведем к расширенному векторно-матричному виду

$$\begin{bmatrix} \Delta T_x \\ \Delta T_y \\ \Delta T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_x & -\alpha_x \\ -\alpha_y & 1 & \beta_y \\ \alpha_z & -\beta_z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (a+1) \cdot T_{x3} + b \cdot T_{y3} + c \cdot T_{z3} + P \\ d \cdot T_{x3} + (e+1) \cdot T_{y3} + f \cdot T_{z3} + Q \\ g \cdot T_{x3} + h \cdot T_{y3} + (k+1) \cdot T_{z3} + R \end{bmatrix}. \quad (2.72)$$

Введем обозначения следующих переменных:

$$\begin{aligned} x_1 &= \alpha_x(k+1), & x_2 &= \alpha_x \cdot R, & x_3 &= \beta_x(e+1), & x_4 &= \beta_x \cdot Q, \\ x_5 &= \alpha_x \cdot h, & x_6 &= \alpha_x \cdot g, & x_7 &= \beta_x \cdot d, & x_8 &= \beta_x \cdot f, \\ y_1 &= \alpha_y(a+1), & y_2 &= \alpha_y \cdot P, & y_3 &= \beta_y(k+1), & y_4 &= \beta_y \cdot R, \\ y_5 &= \alpha_y \cdot b, & y_6 &= \alpha_y \cdot c, & y_7 &= \beta_y \cdot g, & y_8 &= \beta_y \cdot h, \\ z_1 &= \alpha_z(a+1), & z_2 &= \alpha_z \cdot P, & z_3 &= \beta_z(e+1), & z_4 &= \beta_z \cdot Q, \\ z_5 &= \beta_z \cdot d, & z_6 &= \beta_z \cdot f, & z_7 &= \alpha_z \cdot b, & z_8 &= \alpha_z \cdot c, \end{aligned} \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} x_P &= x_4 - x_2 + P, & y_{1d} &= d - y_1, & z_{1g} &= z_1 + g, \\ x_{3b} &= x_3 + b, & y_Q &= y_4 - y_2 + Q, & z_{3h} &= h - z_3, \\ x_{1c} &= c - x_1, & y_{3f} &= y_3 + f, & z_R &= z_2 - z_4 + R. \end{aligned} \quad (2.74)$$

С учетом принятых обозначений векторно-матричное уравнение Пуассона (2.72) можно привести к скалярному виду

$$\begin{aligned} \Delta T_x &= (a+1) \cdot T_{x3} + x_{3b} \cdot T_{y3} + x_{1c} \cdot T_{z3} + x_P, \\ \Delta T_y &= y_{1d} \cdot T_{x3} + (e+1) \cdot T_{y3} + y_{3f} \cdot T_{z3} + y_Q, \\ \Delta T_z &= z_{1d} \cdot T_{x3} + z_{3h} \cdot T_{y3} + (k+1) \cdot T_{z3} + z_R \end{aligned} \quad (2.75)$$

или к векторно-матричному виду

$$\begin{bmatrix} \Delta T_x \\ \Delta T_y \\ \Delta T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a+1 & x_{3b} & x_{1c} \\ y_{1d} & (e+1) & y_{3f} \\ z_{1d} & z_{3h} & (k+1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{x3} \\ T_{y3} \\ T_{z3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_P \\ y_Q \\ z_R \end{bmatrix}. \quad (2.76)$$

Уравнения (2.75) и (2.76) содержат двенадцать неизвестных: $a+1$, x_{3b} , x_{3c} , x_P , y_{1d} , $e+1$, y_{3f} , y_Q , z_{1g} , z_{3h} , $k+1$, z_{3R} .

Известными величинами в этих уравнениях являются реальные разностные показания БММ (ΔT_x ; ΔT_y ; ΔT_z) и их эталонные (вычисляемые) показания (T_{x3} , T_{y3} , T_{z3}). Для обеспечения корректности решения задачи идентификации погрешностей БММ предположим, что в лабораторных условиях проведено не менее четырех ($i = \overline{1, n}$, $n \geq 4$) идентификационных экспе-

риментов. Тогда на основе уравнений (2.75) или (2.76) можно сформировать три системы уравнений (по четыре уравнения в каждой системе), которые можно записать в векторно-матричном виде

$$\begin{aligned} [\Delta T_{x1} \ \Delta T_{x2} \ \Delta T_{x3} \ \Delta T_{x4}]^T &= N \cdot [(a+1) \ x_{3b} \ x_{1c} \ x_p]^T, \\ [\Delta T_{y1} \ \Delta T_{y2} \ \Delta T_{y3} \ \Delta T_{y4}]^T &= N \cdot [y_{1d} \ (e+1) \ y_{3f} \ y_Q]^T, \\ [\Delta T_{z1} \ \Delta T_{z2} \ \Delta T_{z3} \ \Delta T_{z4}]^T &= N \cdot [z_{1g} \ z_{3h} \ (k+1) \ z_R]^T. \end{aligned} \quad (2.77)$$

Как и при решении предыдущей задачи (см. параграф 2.2.3), матрица идентификации N имеет размерность (4×4) и определяется по формуле (2.48).

Решение уравнений (2.77) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} [(a+1) \ x_{3b} \ x_{1c} \ x_p]^T &= N^{-1} \cdot [\Delta T_{x1} \ \Delta T_{x2} \ \Delta T_{x3} \ \Delta T_{x4}]^T, \\ [y_{1d} \ (e+1) \ y_{3f} \ y_Q]^T &= N^{-1} \cdot [\Delta T_{y1} \ \Delta T_{y2} \ \Delta T_{y3} \ \Delta T_{y4}]^T, \\ [z_{1g} \ z_{3h} \ (k+1) \ z_R]^T &= N^{-1} \cdot [\Delta T_{z1} \ \Delta T_{z2} \ \Delta T_{z3} \ \Delta T_{z4}]^T. \end{aligned} \quad (2.78)$$

На основе принятых обозначений сформируем три векторно-матричных уравнения:

$$\begin{bmatrix} x_{3b} \\ x_{1c} \\ x_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (e+1) & 0 \\ (k+1) & 0 & 0 \\ -R & Q & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \beta_x \\ P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ c \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.79)$$

$$\begin{bmatrix} y_{1d} \\ y_{3f} \\ y_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(a+1) & 0 & 0 \\ 0 & (k+1) & 0 \\ -P & 1 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_y \\ \beta_y \\ Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d \\ f \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.80)$$

$$\begin{bmatrix} z_{1g} \\ z_{3h} \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a+1) & 0 & 0 \\ 0 & -(e+1) & 0 \\ P & -Q & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_z \\ \beta_z \\ R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g \\ h \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.81)$$

Запишем решение уравнений (2.79)–(2.81) в векторно-матричном виде

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \beta_x \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (e+1) & 0 \\ (k+1) & 0 & 0 \\ -R & Q & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_{3b} - b \\ x_{1c} - c \\ x_p \end{bmatrix}, \quad (2.82)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_y \\ \beta_y \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(a+1) & 0 & 0 \\ 0 & (k+1) & 0 \\ -P & 1 & R \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y_{1d} - d \\ y_{3f} - f \\ y_Q \end{bmatrix}, \quad (2.83)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_z \\ \beta_z \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a+1) & 0 & 0 \\ 0 & -(e+1) & 0 \\ P & -Q & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} z_{1g} - g \\ z_{3h} - h \\ z_R \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

или в скалярном виде

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \frac{c - x_{1c}}{k+1}, \\ \beta_x &= \frac{x_{3b} - b}{e+1}, \\ P &= x_p + \alpha_x \cdot R - \beta_x \cdot Q, \end{aligned} \quad (2.85)$$

$$\begin{aligned} \alpha_y &= \frac{d - y_{1d}}{a+1}, \\ \beta_y &= \frac{y_{3f} - f}{k+1}, \\ Q &= y_Q + \alpha_y \cdot P - \beta_y \cdot R, \end{aligned} \quad (2.86)$$

$$\begin{aligned} \alpha_z &= \frac{z_{1g} - g}{a+1}, \\ \beta_z &= \frac{h - z_{3h}}{e+1}, \\ R &= z_R + \beta_z \cdot Q - \alpha_z \cdot P. \end{aligned} \quad (2.87)$$

Следует иметь в виду, что углы неортогональности $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$, определенные по алгоритму АИ-3.1 (по формулам (2.85)–(2.87)), характеризуют ориентацию осей чувствительности дифференциальных каналов, осредненных относительно осей приборной системы координат $X_{п}, Y_{п}, Z_{п}$ (см. рис. 2.1, б, 2.3). Однако эти углы не дают полного представления о фактической ориентации осей чувствительности магнитометров в шестиосном блоке БММ.

Поэтому решим задачу идентификации параметров, характеризующих магнитные и геометрические свойства основания по контурам магнитных измерений.

2.3.2. Идентификация магнитных и геометрических свойств основания по контурам магнитных измерений (алгоритм АИ-3.2)

Рассмотрим блок БММ с квазиортогональной ориентацией осей чувствительности X_i, Y_i, Z_i ($i = \overline{1;2}$), в котором схема ориентации этих осей соответствует рис. 2.1, б, 2.4 (БММ-КО-2).

В отличие от предыдущей задачи (см. параграф 2.3.1) в задаче идентификации погрешностей ориентации осей чувствительности X_i, Y_i, Z_i ($i = \overline{1;2}$) в шестиосном блоке БММ-КО-2 (см. рис. 2.4) требуется определить не шестимерный вектор

$$\mathbf{x} = [\alpha_x \quad \beta_x \quad \alpha_y \quad \beta_y \quad \alpha_z \quad \beta_z]^T, \quad (2.88)$$

а двенадцатимерный вектор геометрических погрешностей

$$\mathbf{x} = [\alpha_{x1} \quad \alpha_{x2} \quad \alpha_{y1} \quad \alpha_{y2} \quad \alpha_{z1} \quad \alpha_{z2} \quad \beta_{x1} \quad \beta_{x2} \quad \beta_{y1} \quad \beta_{y2} \quad \beta_{z1} \quad \beta_{z2}]^T. \quad (2.89)$$

Для решения задачи идентификации погрешностей монтажа ММ в корпусе блока БММ следует располагать не трехмерным вектором разностных сигналов по каждому дифференциальному каналу измерений (см. рис. 2.3)

$$\Delta \mathbf{T} = [\Delta T_x \quad \Delta T_y \quad \Delta T_z]^T, \quad (2.90)$$

а шестимерным вектором выходных сигналов всех шести магнитометров (см. рис. 2.4)

$$\mathbf{T} = [T_{x1} \quad T_{x2} \quad T_{y1} \quad T_{y2} \quad T_{z1} \quad T_{z2}]^T. \quad (2.91)$$

Сформируем на основе шестимерного вектора \mathbf{T} два трехмерных вектора \mathbf{T}_1 и \mathbf{T}_2 , соответствующих показаниям двух троек магнитометров $X_1Y_1Z_1$ и $X_2Y_2Z_2$ (см. рис. 2.1, б, 2.4):

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1 &= [T_{x1} \quad T_{y1} \quad T_{z1}]^T, \\ \mathbf{T}_2 &= [T_{x2} \quad T_{y2} \quad T_{z2}]^T. \end{aligned} \quad (2.92)$$

В сигналах троек ММ (в векторах \mathbf{T}_1 и \mathbf{T}_2) заложена информация о влиянии на них таких факторов, как:

- параметры МПЗ в точке установки БММ ($\mathbf{T}_{МПЗ}$);
- параметры ориентации основания (A);
- параметры МПД ($\mathbf{S}, \mathbf{T}_{МПД}^n$);
- технологические условия монтажа ММ (B).

По аналогии с уравнениями (2.69) и (2.71) для каждой тройки ММ можно записать

$$\mathbf{T}_i = [T_{xi} \quad T_{yi} \quad T_{zi}]^T = B_i \cdot [(\mathbf{S}_i + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ} + \mathbf{T}_{МПД i}^n], \quad (i = \overline{1;2}) \quad (2.93)$$

или

$$\mathbf{T}_i = [T_{xi} \quad T_{yi} \quad T_{zi}]^T = B_i \cdot [(\mathbf{S}_i + E) \cdot \mathbf{T}_\ominus + \mathbf{T}_{МПД i}^n], \quad (i = \overline{1;2}). \quad (2.94)$$

Далее задача идентификации геометрических погрешностей ММ, т. е. задача определения векторов

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= [\alpha_{x1} \quad \beta_{x1} \quad \alpha_{y1} \quad \beta_{y1} \quad \alpha_{z1} \quad \beta_{z1}]^T, \\ \mathbf{x}_2 &= [\alpha_{x2} \quad \beta_{x2} \quad \alpha_{y2} \quad \beta_{y2} \quad \alpha_{z2} \quad \beta_{z2}]^T, \end{aligned} \quad (2.95)$$

решается для каждой тройки магнитометров с осями чувствительности X_1, Y_1, Z_1 и X_2, Y_2, Z_2 независимо друг от друга по формулам (2.72)–(2.87) с учетом соответствующих замен. Алгоритм АИ-3.2 вычисления геометрических погрешностей монтажа ММ в соответствии с выражениями (2.78), (2.85)–(2.87) сводится к следующим формулам:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} (a'+1) & x'_{3b} & x'_{1c} & x'_P \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot [T_{x1}^I \quad T_{x1}^{II} \quad T_{x1}^{III} \quad T_{x1}^{IV}]^T, \\ \begin{bmatrix} y'_{1d} & (e'+1) & y'_{3f} & y'_Q \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot [T_{y1}^I \quad T_{y1}^{II} \quad T_{y1}^{III} \quad T_{y1}^{IV}]^T, \\ \begin{bmatrix} z'_{1g} & z'_{3h} & (k'+1) & z'_R \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot [T_{z1}^I \quad T_{z1}^{II} \quad T_{z1}^{III} \quad T_{z1}^{IV}]^T, \end{aligned} \quad (2.96)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} (a''+1) & x''_{3b} & x''_{1c} & x''_P \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot [T_{x2}^I \quad T_{x2}^{II} \quad T_{x2}^{III} \quad T_{x2}^{IV}]^T, \\ \begin{bmatrix} y''_{1d} & (e''+1) & y''_{3f} & y''_Q \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot [T_{y2}^I \quad T_{y2}^{II} \quad T_{y2}^{III} \quad T_{y2}^{IV}]^T, \\ \begin{bmatrix} z''_{1g} & z''_{3h} & (k''+1) & z''_R \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot [T_{z2}^I \quad T_{z2}^{II} \quad T_{z2}^{III} \quad T_{z2}^{IV}]^T. \end{aligned} \quad (2.97)$$

Тогда углы неортогональности вычисляются по формулам, аналогичным выражениям (2.85)–(2.87):

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{xi} &= \frac{c - x'_{1c}}{k^i + 1} & \beta_{xi} &= \frac{x'_{3b} - b}{e^i + 1} \\ P^i &= x'_P + \alpha_{xi} \cdot R - \beta_{xi} \cdot Q \end{aligned} \right\}, \quad (i = 1,2), \quad (2.98)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{yi} &= \frac{d - y'_{1d}}{a^i + 1} & \beta_{yi} &= \frac{y'_{3f} - f}{k^i + 1} \\ Q^i &= y'_Q + \alpha_{yi} \cdot P - \beta_{yi} \cdot R \end{aligned} \right\}, \quad (i = 1,2), \quad (2.99)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{zi} &= \frac{z_{1g}^i - g}{a^i + 1} \\ R^i &= z_R^i + \beta_{zi} \cdot Q - \alpha_{zi} \cdot P \end{aligned} \right\}, \quad \beta_{zi} = \frac{h - z_{3h}^i}{e^i + 1}, \quad (i = 1, 2). \quad (2.100)$$

Углы неортогональности α_{xi} , β_{xi} , α_{yi} , β_{yi} , α_{zi} , β_{zi} ($i = 1, 2$), определенные по алгоритму АИ-3.2 в соответствии с выражениями (2.96)–(2.100), характеризуют ориентацию осей чувствительности всех шести ММ с предлагаемой схемой квазиортогональной ориентации БММ-КО-2 (см. рис. 2.1, б, 2.6).

2.4. Идентификация погрешностей установки на объекте блока магнитометров (алгоритм АИ-4)

При установке блока БММ на ПО следует учитывать то, что само подвижное основание может обладать своими магнитными свойствами (\mathbf{S}_0 , $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^n$). Эта установка сопровождается формированием геометрических погрешностей α , β , χ , которые могут быть заданы по схеме ортогональных преобразований координат.

Углы установки блока в корпус ПО α , β , χ учитываются с помощью матрицы установки \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & -\chi & \beta \\ \chi & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.101)$$

В отличие от матрицы \mathbf{B} монтажа магнитометров матрица \mathbf{C} установки блока является кососимметричной и характеризует ортогональные преобразования координат (например, по схеме Эйлера–Крылова $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \chi$):

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_\chi \cdot \mathbf{C}_\beta \cdot \mathbf{C}_\alpha. \quad (2.102)$$

С учетом наличия у ПО собственных магнитных свойств и проявления при установке БММ на корпусе ПО геометрических погрешностей α , β , χ уравнение Пуассона (2.13) или (2.17) может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T &= (\mathbf{S}_0 + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{C} \times \\ &\times [B \cdot (\mathbf{S} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{T}_\ominus + B \cdot (\mathbf{T}_{\text{МЦД}}^n) + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^n + B \cdot \mathbf{F}_0 \cdot \dot{\mathbf{T}}_\ominus + B \cdot \mathbf{F} \cdot \dot{\mathbf{T}}_{\text{МЦД}}^\ominus]. \end{aligned} \quad (2.103)$$

Идентификация магнитных свойств ПО (определение матрицы \mathbf{S}_0 и вектора $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^n$) выполняется аналогично решению задачи идентификации магнитных свойств датчика (определение \mathbf{S} , $\mathbf{T}_{\text{МЦД}}^n$) по алгоритму А2 (фор-

мулы (2.47)–(2.67)). В результате решения задачи идентификации магнитных свойств ПО становятся известными матрица \mathbf{S}_0 и вектор $\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{п}}$:

$$\mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & c_0 \\ d_0 & e_0 & f_0 \\ g_0 & h_0 & k_0 \end{bmatrix}, \quad (2.104)$$

$$\mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{п}} = [P_0 \quad Q_0 \quad R_0]^T. \quad (2.105)$$

С учетом пренебрежения вихревой ($\mathbf{F}_0 = 0$) и электромагнитной ($\mathbf{F} = 0$) составляющими МПО и МПД уравнение Пуассона (2.103) может быть записано в укороченном виде

$$\mathbf{T} = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T = (\mathbf{S}_0 + E) \cdot \mathbf{C} \cdot [B \cdot (\mathbf{S} + E) \cdot \mathbf{T}_{\text{Э}} + B \cdot (\mathbf{T}_{\text{МПД}}^{\text{п}}) + \mathbf{T}_{\text{МПО}}^{\text{п}}]. \quad (2.106)$$

В задачу идентификации погрешностей установки БММ на объекте входит определение элементов матрицы установки $\mathbf{C}(\alpha, \beta, \chi)$. С учетом выражений (2.68), (2.72), (2.101), (2.104), (2.105) уравнение (2.106) может быть приведено к развернутой форме

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + 1 & b_0 & c_0 \\ d_0 & e_0 + 1 & f_0 \\ g_0 & h_0 & k_0 + 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\chi & \beta \\ \chi & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \times \\ \times \left(\begin{bmatrix} 1 & \beta_x & -\alpha_x \\ -\alpha_y & 1 & \beta_y \\ \alpha_z & -\beta_z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (a+1) \cdot T_{xэ} + b \cdot T_{yэ} + c \cdot T_{zэ} + P \\ d \cdot T_{xэ} + (e+1) \cdot T_{yэ} + f \cdot T_{zэ} + Q \\ g \cdot T_{xэ} + h \cdot T_{yэ} + (k+1) \cdot T_{zэ} + R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ R_0 \end{bmatrix} \right). \quad (2.107)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} F_1 &= (a+1) \cdot T_{xэ} + b \cdot T_{yэ} + c \cdot T_{zэ} + P + \\ &+ \beta_x [d \cdot T_{xэ} + (e+1) \cdot T_{yэ} + f \cdot T_{zэ} + Q] - \alpha_x [g \cdot T_{xэ} + h \cdot T_{yэ} + (k+1) \cdot T_{zэ} + R] + P_0, \\ F_2 &= -\alpha_y \cdot [(a+1) \cdot T_{xэ} + b \cdot T_{yэ} + c \cdot T_{zэ} + P] + \\ &+ [d \cdot T_{xэ} + (e+1) \cdot T_{yэ} + f \cdot T_{zэ} + Q] + \beta_y \cdot [g \cdot T_{xэ} + h \cdot T_{yэ} + (k+1) \cdot T_{zэ} + R] + Q_0, \\ F_3 &= \alpha_z \cdot [(a+1) \cdot T_{xэ} + b \cdot T_{yэ} + c \cdot T_{zэ} + P] - \\ &- \beta_z [d \cdot T_{xэ} + (e+1) \cdot T_{yэ} + f \cdot T_{zэ} + Q] + [g \cdot T_{xэ} + h \cdot T_{yэ} + (k+1) \cdot T_{zэ} + R] + R_0. \end{aligned} \quad (2.108)$$

С учетом обозначений (2.108) уравнение (2.107) может быть представлено в укороченном виде

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \chi \end{bmatrix}, \quad (2.109)$$

причем

$$\begin{aligned} F_x &= T_x - (a_0 + 1) \cdot F_1 - b_0 \cdot F_2 - c_0 \cdot F_3, \\ F_y &= T_y - d_0 \cdot F_1 - (e_0 + 1) \cdot F_2 - f_0 \cdot F_3, \\ F_z &= T_z - g_0 \cdot F_1 - h_0 \cdot F_2 - (k_0 + 1) \cdot F_3 \end{aligned} \quad (2.110)$$

или

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} - \mathbf{S}_0 \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}. \quad (2.111)$$

Элементы m_{ij} матрицы M рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} m_{11} &= c_0 \cdot F_2 - b_0 \cdot F_3, \quad m_{12} = (a_0 + 1) \cdot F_3 - c_0 F_1, \quad m_{13} = b_0 \cdot F_1 - (a_0 + 1) \cdot F_2, \\ m_{21} &= f_0 \cdot F_2 - (e_0 + 1) \cdot F_3, \quad m_{22} = d_0 \cdot F_3 - f_0 \cdot F_1, \quad m_{23} = (e_0 + 1) \cdot F_1 - d_0 \cdot F_2, \\ m_{31} &= (k_0 + 1) \cdot F_2 - h_0 \cdot F_3, \quad m_{32} = g_0 \cdot F_3 - (k_0 + 1) \cdot F_1, \quad m_{33} = h_0 \cdot F_1 - g_0 \cdot F_2. \end{aligned} \quad (2.112)$$

Решение уравнения (2.109):

$$\begin{bmatrix} \alpha & \beta & \chi \end{bmatrix}^T = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z \end{bmatrix}^T. \quad (2.113)$$

На основании решения (2.113) в векторно-матричном виде могут быть получены соответствующие формулы Крамера. Для того чтобы решение (2.113) существовало и было единственным и устойчивым, необходимо, чтобы матрица M была невырожденной и хорошо обусловленной:

$$\det M \neq 0, \quad (2.114)$$

$$\text{cond } M = \|M\| \cdot \|M^{-1}\| \rightarrow \min, \quad (2.115)$$

где $\|M\|$, $\|M^{-1}\|$ – нормы матрицы M и обратной матрицы M^{-1} .

Формулы (2.114) и (2.115) составляют основу алгоритма контроля и нормировки матриц (АКН-2). Задачу идентификации погрешностей установки БММ на объекте приходится решать всегда после демонтажа блока с объекта и его новой установки на ПО.

3. УСТРАНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ БЛОКА МАГНИТОМЕТРОВ

После решения задач идентификации методических и инструментальных погрешностей блока БММ по алгоритмам АИ-1, АИ-2.1, АИ-2.2, АИ-3.1, АИ-3.2 и АИ-4 необходимо перейти к следующему этапу калибровки блока – решению задач компенсации этих погрешностей.

Задачи компенсации погрешностей БММ решим **алгоритмическим путем**. При разработке алгоритмов компенсации погрешностей блока ММ могут быть использованы два способа: **девиационный** и **бездевиационный**.

3.1. Компенсация погрешностей блока магнитометров девиационным способом

Девиационный способ компенсации выявленных погрешностей БММ заключается в определении по девиациям **поправок** к показаниям блока с помощью девиационных алгоритмов и введении их в алгоритм обработки информации в БЭ БММ.

3.1.1. Компенсация погрешностей блока магнитометров по каналам измерений девиационным способом (алгоритм АК-5.1)

Алгоритм АК-5.1 вычисления поправок к показаниям блока БММ с последующей коррекцией этих показаний с целью устранения выявленных погрешностей может быть разработан, если сравнить действительные сигналы, формируемые на выходе БММ с учетом проявления методических и инструментальных погрешностей, с неискаженными сигналами блока, формируемыми на выходе при условии отсутствия магнитных свойств у датчика и геометрических погрешностей монтажа ММ.

Показания БММ существующей схемы (БММ-КО-1) с учетом влияния на них магнитных свойств датчика и проявления погрешностей монтажа ММ определяются уравнением (2.71). Неискаженные показания блока (без учета магнитных свойств датчика и проявления геометрических погрешностей монтажа ММ в БММ) определяются выражением (2.70). Тогда девиации (погрешности, формируемые в выходных сигналах блока БММ-КО-1) могут быть вычислены в виде разности

$$\Delta T_{\text{д}} = \Delta T - T_{\text{э}} = B \cdot [(S + E) \cdot T_{\text{э}} + T_{\text{мпд}}^{\text{п}}] - T_{\text{э}}. \quad (3.1)$$

Из выражения (3.1) видно, что для получения точных (неискаженных) значений выходных сигналов \mathbf{T}_\ominus БММ на основе коррекции действительных сигналов, формируемых на выходе блока $\Delta\mathbf{T}$, необходимо ввести поправку в показания блока:

$$\mathbf{T}_\ominus = \Delta\mathbf{T} - \Delta\mathbf{T}_д. \quad (3.2)$$

Выражения (3.1) и (3.2) можно привести к развернутому виду:

$$\Delta\mathbf{T}_д = \begin{bmatrix} \Delta T_{xd} \\ \Delta T_{yd} \\ \Delta T_{zd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_x & -\alpha_x \\ -\alpha_y & 1 & \beta_y \\ \alpha_z & -\beta_z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (a+1) \cdot T_{x\ominus} + b \cdot T_{y\ominus} + c \cdot T_{z\ominus} + P \\ d \cdot T_{x\ominus} + (e+1) \cdot T_{y\ominus} + f \cdot T_{z\ominus} + Q \\ g \cdot T_{x\ominus} + h \cdot T_{y\ominus} + (k+1) \cdot T_{z\ominus} + R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{x\ominus} \\ T_{y\ominus} \\ T_{z\ominus} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} T_{x\ominus} & T_{y\ominus} & T_{z\ominus} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \Delta T_x & \Delta T_y & \Delta T_z \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} \Delta T_{xd} & \Delta T_{yd} & \Delta T_{zd} \end{bmatrix}^T. \quad (3.4)$$

С учетом выражений (2.70) уравнение (3.1) может быть конкретизировано:

$$\Delta\mathbf{T}_д = B \cdot [(\mathbf{S} + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^g + \mathbf{T}_{МПД}^n] - A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^g \quad (3.5)$$

или

$$\Delta\mathbf{T}_д = B \cdot [(\mathbf{S} + E) \cdot A_m \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^m + \mathbf{T}_{МПД}^n] - A_m \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^m. \quad (3.6)$$

С учетом выражений (1.12), (2.4), (2.14), (2.15), (2.47), (2.56), (2.57), (2.68), (2.72) соотношения (3.1)–(3.6) могут быть приведены к скалярной форме записи.

Если блок БММ, у которого предварительно выявлено проявление собственных магнитных свойств и погрешностей монтажа ММ, установлен на ПО, то его показания в соответствии с выражением (2.106) определяются векторно-матричным уравнением

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{T} &= \begin{bmatrix} \Delta T_x & \Delta T_y & \Delta T_z \end{bmatrix}^T = (\mathbf{S}_0 + E) \cdot \mathbf{C} \cdot \left[B \cdot (\mathbf{S} + E) \cdot \mathbf{T}_\ominus + B \cdot \mathbf{T}_{МПД}^n + \mathbf{T}_{МПО}^n \right] = \\ &= (\mathbf{S}_0 + E) \cdot \mathbf{C} \cdot \left[B \cdot (\mathbf{S} + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^g + B \cdot \mathbf{T}_{МПД}^n + \mathbf{T}_{МПО}^n \right]. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Тогда с учетом выражения (2.70) можно вычислить девиации блока БММ-КО-1 по следующим векторно-матричным уравнениям:

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{T}_д &= (\mathbf{S}_0 + E) \cdot \mathbf{C} \cdot \left[B \cdot (\mathbf{S} + E) \cdot A_\gamma A_\vartheta A_\psi \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^g + B \cdot \mathbf{T}_{МПД}^n + \mathbf{T}_{МПО}^n \right] - \\ &- A_\gamma A_\vartheta A_\psi \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^g \end{aligned} \quad (3.8)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{T}_д &= (\mathbf{S}_0 + E) \cdot \mathbf{C} \cdot \left[B \cdot (\mathbf{S} + E) \cdot A_\gamma A_\vartheta A_\phi \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^m + B \cdot \mathbf{T}_{МПД}^n + \mathbf{T}_{МПО}^n \right] - \\ &- A_\gamma A_\vartheta A_\phi \cdot \mathbf{T}_{МПЗ}^m. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Выражения (3.1)–(3.9) и их скалярные аналоги составляют основу построения алгоритма АК-5.1. Вычислительный процесс в соответствии с алгоритмом коррекции АК-5.1 реализуется в БЭ-1 БММ-КО-1 (см. рис. 2.3).

3.1.2. Компенсация погрешностей блока магнитометров по контурам магнитных измерений девиационным способом (алгоритм АК-5.2)

В предлагаемой схеме блока БММ-КО-2 (см. рис. 2.4) компенсация идентифицированных по контурам ММ-измерений погрешностей может быть выполнена по алгоритму АК-5.2, который формируется по аналогии с алгоритмом АК-5.1 девиационным способом.

Показания блока БММ предлагаемой схемы (БММ-КО-2) с обработкой ММ-информации в шести контурах ММ-измерений и восьми каналах КОИ с учетом проявления в них методических (магнитных) и инструментальных (геометрических) погрешностей определяются выражениями (2.91)–(2.94). Неискаженные магнитным и геометрическим путем показания БММ определяются выражением (2.70). Тогда девиации БММ-КО-2 по двум каналам (или по восьми каналам) обработки информации могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\Delta T_{di} = T_i - T_0 = B_i \cdot [(S_i + E) \cdot A \cdot T_{МПЗ}^g + T_{МПЦi}^n] - A \cdot T_{МПЗ}^g, \quad (i = \overline{1;8}) \quad (3.10)$$

или

$$\Delta T_{di} = T_i - T_0 = B_i \cdot [(S_i + E) \cdot A_m \cdot T_{МПЗ}^m + T_{МПЦi}^n] - A_m \cdot T_{МПЗ}^m, \quad (i = \overline{1;8}) \quad (3.11)$$

С учетом установки блока БММ-КО-2 на ПО и проявления магнитных свойств у датчика и основания, а также геометрических погрешностей монтажа ММ и установки блока девиации БММ-КО-2 могут быть определены по следующим формулам в векторно-матричном виде:

$$\Delta T_{di} = (S_0 + E) \cdot C \cdot [B_i \cdot (S_i + E) \cdot A_\gamma \cdot A_9 \cdot A_\psi \cdot T_{МПЗ}^g + B_i \cdot T_{МПЦi}^n + T_{МПО}^n] - A_\gamma \cdot A_9 \cdot A_\psi \cdot T_{МПЗ}^g, \quad (i = \overline{1;8}) \quad (3.12)$$

или

$$\Delta T_{di} = (S_0 + E) \cdot C \cdot [B_i \cdot (S_i + E) \cdot A_\gamma \cdot A_9 \cdot A_\Phi \cdot T_{МПЗ}^m + B_i \cdot T_{МПЦi}^n + T_{МПО}^n] - A_\gamma \cdot A_9 \cdot A_\Phi \cdot T_{МПЗ}^m, \quad (i = \overline{1;8}). \quad (3.13)$$

Выражения (3.10)–(3.13) и их скалярные аналоги составляют основу построения алгоритма АК-5.2. Обработка многомерной ММ-информации в соответствии с алгоритмом коррекции АК-5.2 реализуется в БЭ-2 БММ-КО-2 (см. рис. 2.4).

3.2. Коррекция показаний блока магнитометров бездевиационным способом

Бездевиационный способ компенсации идентифицированных методических (магнитных) и инструментальных (технологических) погрешностей БММ заключается в коррекции показаний блока путем **приведения** их к немагнитному основанию и ортогональному приборному трехграннику $X_{\text{п}}Y_{\text{п}}Z_{\text{п}}$ без геометрических погрешностей монтажа ММ и установки блока на ПО.

Бездевиационный способ коррекции показаний БММ может быть реализован **приведением** показаний блока магнитометров к приборному базису двумя путями:

- **по каналам** измерений (для существующей схемы БММ-КО-1);
- **по контурам** измерений (для предлагаемой схемы БММ-КО-2).

Анализ уравнений (2.13), (2.17), (2.46), (2.56), (2.71), (2.72), (2.75), (2.76), (2.93), (2.94), (2.103), (2.106), (2.107), (3.7), описывающих формирование ММ-информации на выходе блоков БММ-КО-1 и БММ-КО-2, показывает, что коррекция показаний блоков может быть выполнена не путем вычисления девиации блоков с последующим введением поправки в их показания, а путем восстановления информации о векторе \mathbf{T}_3 на основе решения указанных уравнений. Такая вычислительная операция восстановления информации о векторе \mathbf{T}_3 неискаженных показаний БММ с практической точки зрения означает приведение реальных показаний БММ к ортогональному приборному базису $X_{\text{п}}Y_{\text{п}}Z_{\text{п}}$, неискаженному методическими и инструментальными погрешностями.

3.2.1. Приведение показаний блока магнитометров к ортогональному приборному базису по каналам измерений (алгоритм АК-6.1)

Формирование ММ-информации в БММ по каналам измерений соответствует существующей схеме блока БММ-КО-1 (см. рис. 2.3). Показания блока БММ-КО-1 могут быть описаны с помощью уравнений (2.71), (2.72), (2.75), (2.76), (3.7). Используя математический прием обращения векторно-матричных уравнений, можно найти вектор неискаженных показаний БММ \mathbf{T}_3

$$\mathbf{T}_\circ = [B \cdot (\mathbf{S} + E)]^{-1} \cdot [\Delta \mathbf{T} - \mathbf{T}_{\text{мид}}^n] \quad (3.14)$$

или в развернутой форме

$$\begin{bmatrix} T_{x\circ} \\ T_{y\circ} \\ T_{z\circ} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & \beta_x & -\alpha_x \\ -\alpha_y & 1 & \beta_y \\ \alpha_z & -\beta_z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a+1 & b & c \\ d & e+1 & f \\ g & h & k+1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_x - P \\ \Delta T_y - Q \\ \Delta T_z - R \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

На основе использования выражений (3.14), (3.15) можно решить задачу приведения показаний БММ-КО-1 к невозмущенному приборному базису $X_{\text{п}}Y_{\text{п}}Z_{\text{п}}$ без учета установки этого блока на ПО.

При установке БММ-КО-1 на ПО описание связи показаний блока $\Delta \mathbf{T} = [\Delta T_x \quad \Delta T_y \quad \Delta T_z]^T$ с конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами становится сложнее (см. уравнение (3.7)). Путем обращения уравнения (3.7) находим вектор приведенных неискаженных показаний блока БММ-КО-1:

$$\mathbf{T}_\circ = [B \cdot (\mathbf{S} + E)]^{-1} \cdot \left([(\mathbf{S}_0 + E) \cdot \mathbf{C}]^{-1} \cdot \Delta \mathbf{T} - B \cdot \mathbf{T}_{\text{мид}}^n - \mathbf{T}_{\text{мпю}}^n \right). \quad (3.16)$$

Из выражения (3.16) видно, что решение уравнения (3.7) путем его обращения привело к необходимости вычисления обратных матриц:

$$[B \cdot (\mathbf{S} + E)]^{-1} = \left(\begin{bmatrix} 1 & \beta_x & -\alpha_x \\ -\alpha_y & 1 & \beta_y \\ \alpha_z & -\beta_z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a+1 & b & c \\ d & e+1 & f \\ g & h & k+1 \end{bmatrix} \right)^{-1}, \quad (3.17)$$

$$[(\mathbf{S}_0 + E) \cdot \mathbf{C}]^{-1} = \left(\begin{bmatrix} a_0+1 & b_0 & c_0 \\ d_0 & e_0+1 & f_0 \\ g_0 & h_0 & k_0+1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\chi & \beta \\ \chi & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1}. \quad (3.18)$$

Задача приведения показаний БММ-КО-1 к невозмущенному приборному базису на основе выражений (3.14)–(3.18) относится к классу **обратных задач бортовой магнитометрии** [11, 12, 25, 26]. Выражения (3.14)–(3.18) составляют основу вычислительного процесса, реализуемого в блоке БЭ-2 БММ-КО-1 (см. рис. 2.3) в соответствии с алгоритмом АК-6.1.

Решения (3.14)–(3.16) будут единственными и устойчивыми, если матрицы $[B \cdot (\mathbf{S} + E)]$ и $[(\mathbf{S}_0 + E) \cdot \mathbf{C}]$ удовлетворяют требованиям **невывро-**

денности и хорошей обусловленности (алгоритм АКН-2):

$$\begin{aligned} \det [B \cdot (S + E)] &\neq 0, \\ \det [(S_0 + E) \cdot C] &\neq 0, \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \text{cond}[B \cdot (S + E)] &= \|[B \cdot (S + E)]\| \cdot \|[B \cdot (S + E)]^{-1}\| \rightarrow \min, \\ \text{cond}[(S_0 + E) \cdot C] &= \|[(S_0 + E) \cdot C]\| \cdot \|[(S_0 + E) \cdot C]^{-1}\| \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Выражения (3.14) – (3.20) составляют основу формирования алгоритма АК-6.1.

3.2.2. Приведение показаний блока магнитометров к ортогональному приборному базису по контурам измерений (алгоритм АК-6.2)

Формирование ММ-информации в БММ по контурам измерений соответствует предлагаемой схеме блока БММ-КО-2 (см. рис. 2.4).

Показания блока БММ-КО-2 могут быть описаны с помощью уравнений (2.13), (2.17), (2.46), (2.56), (2.93), (2.94), (2.103), (2.106), (2.107). Используя математический прием обращения векторно-матричных уравнений (2.94) и (2.106), получим выражения для вычисления приведенных показаний блока БММ-КО-2:

$$\mathbf{T}_{\circ} = [B_i \cdot (S_i + E)]^{-1} \cdot (\mathbf{T}_i - \mathbf{T}_{\text{мид}i}^n), \quad (i = \overline{1;6}) \quad (3.21)$$

или в развернутой форме

$$\begin{bmatrix} T_{x\bar{i}} \\ T_{y\bar{i}} \\ T_{z\bar{i}} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & \beta_{xi} & -\alpha_{xi} \\ -\alpha_{yi} & 1 & \beta_{yi} \\ \alpha_{zi} & -\beta_{zi} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i + 1 & b_i & c_i \\ d_i & e_i + 1 & f_i \\ g_i & h_i & k_i + 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{xi} - P_i \\ \Delta T_{yi} - Q_i \\ \Delta T_{zi} - R_i \end{bmatrix}, \quad (i = \overline{1;6}). \quad (3.22)$$

Приведенные показания блока БММ-КО-2 с учетом факта установки его на ПО могут быть найдены путем обращения уравнения (2.106):

$$\mathbf{T}_{\circ} = [B_i \cdot (S_i + E)]^{-1} \cdot \left([(S_0 + E) \cdot C]^{-1} \cdot \mathbf{T}_i - B \cdot \mathbf{T}_{\text{мид}i}^n - \mathbf{T}_{\text{мп}o}^n \right), \quad (i = \overline{1;6}). \quad (3.23)$$

Дадим развернутые выражения для обратных матриц:

$$[B_i \cdot (S_i + E)]^{-1} = \left(\begin{bmatrix} 1 & \beta_{xi} & -\alpha_{xi} \\ -\alpha_{yi} & 1 & \beta_{yi} \\ \alpha_{zi} & -\beta_{zi} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i + 1 & b_i & c_i \\ d_i & e_i + 1 & f_i \\ g_i & h_i & k_i + 1 \end{bmatrix} \right)^{-1}, \quad (i = \overline{1;6}). \quad (3.24)$$

Для обеспечения условий получения единственных, устойчивых и невырождаемых решений (3.21) – (3.23) необходимо, чтобы матрицы $[B_i \cdot (S_i + E)]^{-1}$, $(i = \overline{1;6})$ и $[(S_0 + E) \cdot C]$ были невырожденными и хорошо обусловленными:

$$\begin{aligned} \det[B_i \cdot (S_i + E)] &\neq 0, \\ \text{cond}[B_i \cdot (S_i + E)] &= \|[B_i \cdot (S_i + E)]\| \cdot \|[B_i \cdot (S_i + E)]^{-1}\| \rightarrow \min, \quad (i = \overline{1;6}). \end{aligned} \quad (3.25)$$

Формулы (3.25) могут быть представлены в развернутой форме:

$$\begin{aligned} \det[B_i \cdot (S_i + E)] &= \left\| \begin{bmatrix} 1 & \beta_{xi} & -\alpha_{xi} \\ -\alpha_{yi} & 1 & \beta_{yi} \\ \alpha_{zi} & -\beta_{zi} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i + 1 & b_i & c_i \\ d_i & e_i + 1 & f_i \\ g_i & h_i & k_i + 1 \end{bmatrix} \right\| = \\ &= \left| \begin{array}{ccc} 1 + a_i + d_i \beta_{xi} - g_i \alpha_{xi} & b_i + (e_i + 1) \beta_{xi} - h_i \alpha_{xi} & c_i + \beta_{xi} f_i - \alpha_{xi} (k_i + 1) \\ d_i - \alpha_{yi} (a_i + 1) + g_i \beta_{yi} & 1 + e_i - \alpha_{yi} b_i + h_i \beta_{yi} & f_i - \alpha_{yi} c_i + \beta_{yi} (k_i + 1) \\ \alpha_{zi} (a_i + 1) - d_i \beta_{zi} + g_i & \alpha_{zi} b_i + h_i - \beta_{zi} (e_i + 1) & 1 + k_i + \alpha_{zi} c_i - \beta_{zi} f_i \end{array} \right|, \\ \text{cond}[B_i \cdot (S_i + E)] &= \left\| \begin{bmatrix} 1 & \beta_{xi} & -\alpha_{xi} \\ -\alpha_{yi} & 1 & \beta_{yi} \\ \alpha_{zi} & -\beta_{zi} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i + 1 & b_i & c_i \\ d_i & e_i + 1 & f_i \\ g_i & h_i & k_i + 1 \end{bmatrix} \right\| \times \\ &\times \left\| \left(\begin{bmatrix} 1 & \beta_{xi} & -\alpha_{xi} \\ -\alpha_{yi} & 1 & \beta_{yi} \\ \alpha_{zi} & -\beta_{zi} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i + 1 & b_i & c_i \\ d_i & e_i + 1 & f_i \\ g_i & h_i & k_i + 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \right\|. \end{aligned}$$

Выражения (3.18), (3.19), (3.21) – (3.25) составляют основу формирования алгоритма АК-6.2. Вычислительный процесс по формулам алгоритма АК-6.2 выполняется в БЭ-2 БММ-КО-2 (см. рис. 2.4).

Совокупность всех разработанных алгоритмов паспортизации, выставки, контроля, нормировки, идентификации, компенсации и их общая характеристика представлены в прил. 3.

4. МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ БЛОКА МАГНИТОМЕТРОВ

Математическое и алгоритмическое обеспечение решения задач идентификации и компенсации погрешностей блока БММ рассмотрены в главах 2 и 3. В главе 4 приводится технологическое и методическое обеспечение решения этих задач (описание лабораторного оборудования, технологии и методики реализации алгоритмов идентификации и компенсации погрешностей блока БММ, сведения о которых представлены в главах 2 и 3).

4.1. Описание лабораторного оборудования для калибровки блока магнитометров

Для организации рабочего места (лабораторного стенда), а также проведения лабораторных испытаний и исследований макета БММ необходимо следующее оборудование (технологическое обеспечение):

- трехосная магнитометрическая система для эталонных измерений МПЗ в точке установки лабораторного стенда по компонентам T_{xg} , T_{yg} , T_{zg} в географической или по T_r и T_b в геомагнитной системах координат (например, трехосный геофизический магнитометр МПФ-3МГ);

- поворотный немагнитный стол для разворотов БММ в азимуте по курсу ψ (или Φ) со шкалой точного отсчета с минимальной ценой деления не более 6';

- уровень для горизонтирования поворотного стола (с погрешностью отсчета, не превышающей 6');

- технологический кронштейн для крепления макета БММ, установки его на поворотный стол и задания углов отклонения от плоскости горизонта по дифференту ϑ и крену γ и их контроль по шкалам с погрешностями отсчета $\Delta\vartheta$ и $\Delta\gamma$ не более 10';

- макет БММ в комплекте с персональным компьютером, монитором, клавиатурой, блоками питания и пр.;

- устройство для определения направления геомагнитного меридиана на север (например, магнитный компас с погрешностью измерений не более 10');

- поворотная установка МПУ-1 (или УПГ-48, УПГ-56) с заданием вращения платформы с угловыми скоростями от $\omega_{min} = \pm 0,01$ до $\omega_{max} = \pm 100^\circ/\text{с}$.

Для проведения автономных лабораторных испытаний независимо от знания параметров МПЗ может быть рекомендована **магнитная камера** с пассивным экраном относительно внешнего магнитного поля и с активным генератором собственного магнитного поля в виде катушек Гельмгольца.

4.2. Методика аттестации лабораторного стенда и условия проведения лабораторных испытаний блока магнитометров

Лабораторные испытания и исследования макета БММ должны проводиться в специальном помещении с паспортизированным МПЗ и на специальном рабочем месте, аттестованном по магнитным и геометрическим свойствам:

- допустимая степень **отклонения** реального МПЗ, сформированного на рабочем месте в лаборатории с учетом естественных и искусственных аномалий геомагнитного поля относительно нормального поля МПЗ-Н с описанием в виде стандартной модели *IGRF*, не должна превышать $\Delta T \leq \pm 100$ нТл по всем компонентам и модулю геомагнитного поля;
- допустимая степень **неоднородности** МПЗ, измеренная в виде градиентов по компонентам и модулю, не должна превышать

$$\langle \nabla T \rangle, \langle \nabla T_{xg} \rangle, \langle \nabla T_{yg} \rangle, \langle \nabla T_{zg} \rangle, \langle \nabla T_r \rangle, \langle \nabla T_b \rangle \leq 1 \frac{\text{нТл}}{\text{м}};$$

- допустимая степень **вариативности** МПЗ от влияния источников электромагнитных помех, измеренная в виде скоростей изменения во времени вариаций $\Delta \dot{T}, \Delta \dot{T}_{xg}, \Delta \dot{T}_{yg}, \Delta \dot{T}_{zg}, \Delta \dot{T}_r, \Delta \dot{T}_b$, не должна превышать величины $\langle \delta \dot{T} \rangle \leq 1 \frac{\text{нТл}}{\text{ч}}$.

Для обеспечения универсальности ММ-измерений и измерений углов ($\psi, \Phi, \vartheta, \gamma$) блок БММ может быть укомплектован двумя дополнительными блоками: блоком акселерометров и блоком гироскопов, позволяющими реализовать алгоритм начальной выставки методом аналитического горизонтирования и гирокомпасирования (АГГ) с определением углов $\psi, \Phi, \vartheta, \gamma$ и направления на север истинного и геомагнитного меридианов.

В процессе проведения лабораторных испытаний и исследований макета БММ все угловые измерения ($\psi, \Phi, \vartheta, \gamma, \Delta\psi, \Delta\Phi, \Delta\vartheta, \Delta\gamma$ и др.) должны проводиться с допустимыми погрешностями, не превышающими δ' .

Калибровка БММ производится в три этапа:

- аттестация рабочего места;
- идентификация погрешностей блока;
- компенсация погрешностей блока.

Методика аттестации рабочего места включает следующие операции:

1) расчет по формулам прил. 2 алгоритма АПП-3 (с учетом данных табл. П.1) параметров $T_{xg}^H, T_{yg}^H, T_{zg}^H$ нормального геомагнитного поля МПЗ-Н в соответствии с параграфом 2.2.1 для географической точки расположения рабочего места в лаборатории (координаты φ и λ известны);

2) определение направления меридианов истинного (географического) NS и магнитного N_mS_m по методике физического или аналитического компасирования (формулы (2.30)–(2.40)). На рабочем месте необходимо провести две линии географического NS и магнитного N_mS_m меридианов, пересекающихся в точке установки лабораторного стенда;

3) определение экспериментальным путем вектора напряженности T в географической ($T = [T_{xg} \ T_{yg} \ T_{zg}]^T$) и геомагнитной ($T_m = [T_\Gamma \ T_\Theta \ 0]^T$) системах координат с учетом определенных направлений NS и N_mS_m с помощью эталонной ММ-системы;

4) сравнение между собой экспериментальных и расчетных значений параметров МПЗ, определенных по пунктам 2 и 3 настоящей методики для точки размещения рабочего места в лаборатории. Они не должны превышать по всем компонентам ($T_{xg}, T_{yg}, T_{zg}, T_\Gamma, T_\Theta$) величины $\Delta T_{МПЗ} \leq 200 \text{ нТл}$. Если $\Delta T_{МПЗ} > 200 \text{ нТл}$ хотя бы по одной компоненте, то следует выбрать другое рабочее место для лабораторных испытаний;

5) проведение точечных компонентных измерений минимум в шести точках (по схеме домино) в пределах площадки ($1\text{ м} \times 1\text{ м}$) на рабочем месте, фиксация компонент $T_{xgi}, T_{ygi}, T_{zgi}, T_{\Gamma i}, T_{\Theta i}$ ($i = \overline{1; 6}$) в i -х точках, вычисление разности компонент в соседних точках $\Delta T_{xg}, \Delta T_{yg}, \Delta T_{zg}, \Delta T_\Gamma, \Delta T_\Theta$ и градиента МПЗ на рабочем месте:

$$\begin{aligned} \nabla T_{xg} &= \frac{\Delta T_{xg}}{\Delta x}, \\ \nabla T_{yg} &= \frac{\Delta T_{yg}}{\Delta y}, \\ \nabla T_{zg} &= \frac{\Delta T_{zg}}{\Delta z}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Значения градиентов компонент не должны превышать допустимых значений $\nabla T_{МПЗ} \leq \langle \nabla T_{МПЗ} \rangle = 1 \frac{\text{нТл}}{\text{м}}$ (МПЗ квазиоднородно);

6) выполнение в соответствии с пунктом 3 настоящей методики измерений параметров МПЗ в точке установки лабораторного стенда в разные моменты времени с интервалами $\Delta t = 1 \text{ ч}$. Необходимо вычислить вариации параметров МПЗ за эти интервалы времени:

$$\begin{aligned} \delta \dot{T}_{xgj} &= \frac{\Delta T_{xg}}{\Delta t_j}, & \delta \dot{T}_{ygj} &= \frac{\Delta T_{yg}}{\Delta t_j}, & \delta \dot{T}_{zgj} &= \frac{\Delta T_{zg}}{\Delta t_j}, \\ \delta \dot{T}_{vj} &= \frac{\Delta T_v}{\Delta t_j}, & \delta \dot{T}_{ej} &= \frac{\Delta T_e}{\Delta t_j}, & \delta \dot{T}_j &= \frac{\Delta T}{\Delta t_j}, \quad (j = \overline{1;3}). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Если градиенты ∇T и вариации $\delta \dot{T}$ МПЗ превышают допустимые пределы

$$\begin{aligned} \nabla T > \langle \nabla T \rangle &= 1 \frac{\text{нТл}}{\text{м}}, \\ \delta \dot{T} > \langle \delta \dot{T} \rangle &= 1 \frac{\text{нТл}}{\text{час}}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

это свидетельствует о том, что выбранное рабочее место характеризуется недопустимым уровнем **неоднородности** или недопустимой степенью **нестабильности**. При измерении параметров неоднородного и нестабильного МПЗ все погрешности измерений, связанные с неоднородностью и нестабильностью, будут входить в погрешности магнитных измерений, производимых блоком БММ.

В случае если рабочее место для лабораторных испытаний характеризуется достаточно большими значениями неоднородности и нестабильности (выполняются неравенства (4.3)), то процедуру калибровки БММ каждый раз следует выполнять в полном объеме с учетом предварительно проводимой каждый раз операции аттестации рабочего места.

Если же рабочее место для лабораторных испытаний и исследований будет достаточно **однородным** и **стабильным** (градиенты и вариации МПЗ в пределах допустимых значений), то процедуру аттестации рабочего места можно проводить реже (например, один раз в 2–3 дня), а очередную процедуру калибровки БММ – каждый раз в виде последовательности двух этапов (идентификации и компенсации) с учетом результатов последней операции аттестации рабочего места.

4.3. Методика идентификации магнитных свойств блока магнитометров в лабораторных условиях

Для реализации алгоритмов идентификации магнитных свойств БММ по дифференциальным каналам АИ2.1 (см. формулы (1.12), (2.47)–(2.54) в параграфе 2.2.3) и по контурам КМИ АИ2.2 (см. формулы (1.12), (2.47)–(2.53) и (2.55)), а также сервисных алгоритмов АКН-1 (см. формулы (2.58)–(2.67) в параграфе 2.2.3) и АКН-2 (см. формулы в табл. П.2 прил. 2) рекомендуется следующая последовательность действий при испытаниях и исследованиях макета БММ на рабочем месте в лабораторных условиях:

1. Собрать и настроить лабораторный стенд с использованием лабораторного оборудования, указанного в параграфе 4.1.

2. Подготовить лабораторный стенд и макет БММ к работе.

3. Измерить параметры МПЗ ($T_{мпз}$, T_{xg} , T_{yg} , T_{zg} , $T_{г}$, $T_{в}$) с помощью эталонной ММС и индикатора плоскости истинного географического меридиана в точке установки БММ на поворотный стол. Погрешности воспроизведения в лабораторных условиях базовых направлений в плоскостях горизонта и истинного географического меридиана не должны превышать $6'$.

4. Задать последовательно несколько угловых положений в пространстве (в табл. 4.1 значения углов Эйлера–Крылова для примера) с помощью поворотного стола (ПС) и технологического кронштейна (ТК) с макетом БММ и снять показания блока. Записать показания блока (T_x , T_y , T_z) в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Идентификационные эксперименты¹

Номер эксперимента	Курс ψ , град	Дифферент ϑ , град	Крен γ , град	Сигналы БММ, нТл		
				T_x	T_y	T_z
1	0	0	0			
2	45	+20	+30			
3	90	+30	+20			
4	45	-20	-30			
5	90	-30	-20			

Отсчет углов курса, дифферента и крена следует производить по схеме Эйлера–Крылова в последовательности ψ – ϑ – γ .

Курс ψ отсчитывается по часовой стрелке в пределах от 0 до $+360^\circ$ ($\psi_0 = 0^\circ$ – курс на север; $\psi_1 = +90^\circ$ – на восток; $\psi_2 = +180^\circ$ – на юг; $\psi_3 = +270^\circ$ – на запад; $\psi_4 = +360^\circ$ – на север).

Дифферент отсчитывается от плоскости горизонта ($\vartheta_0=0$) в пределах до $+90^\circ$ (кабрирование) и до -90° (пикирование).

Крен γ отсчитывается от плоскости горизонта ($\gamma_0=0$) в пределах до $+90^\circ$ (правый крен) и до -90° (левый крен).

Если вместо компонент T_{xg} , T_{yg} , T_{zg} в географически ориентированных осях используются горизонтальная $T_{г}$ и вертикальная $T_{в}$ составляющие МПЗ, то отсчет углов Эйлера–Крылова проводится в геомагнитной системе координат по схеме Φ – ϑ – γ .

5. Вычислить в соответствии с параграфом 2.2.3 по формулам (2.58)–(2.67) алгоритма АКН-1 (см. табл. П.2 прил. 2) параметры, характеризующие невырожденность матрицы ориентации A , правильность определения ее элементов (направляющих косинусов), выполнение условий ортогональности, коллинеарности осей и хорошей обусловленности матрицы. Выполнить нормировку и коррекцию матрицы.

¹ Могут быть заданы другие числовые значения углов Эйлера–Крылова.

6. Вычислить в соответствии с параграфом 2.2.3 по формулам (2.49), (2.50), (2.52) и (2.53) алгоритма АКН-2 (см. табл. П.2 прил. 2) параметры, характеризующие невырожденность и хорошую обусловленность матрицы идентификации N .

7. Определить в первом приближении параметры магнитного поля датчика (МПД) по индуктивной (S) и постоянной ($T_{мпд}^n$) составляющим МПД, используя результаты измерений МПЗ с помощью эталонной магнитометрической системы и выполнения идентификационных экспериментов (см. табл. 4.1) по формулам алгоритма АИ-2.1 (табл. П.3 прил. 2, для дифференциальных каналов измерений) или по формулам алгоритма АИ-2.2 (см. табл. П.3 прил. 2, для шести контуров КМИ).

Для повышения точности решения задачи идентификации МПД рекомендуется проводить измерение выходных сигналов БММ (T_x, T_y, T_z) в идентификационных экспериментах ($i = \overline{1; n}$) при n , превышающем минимально допустимое значение ($n \geq n_{min} = 4$), а также использовать значения параметров МПЗ, заданные в нормальной земной $X_g Y_g Z_g$ и в геомагнитной $X_m Y_m Z_m$ системах координат, с последующим осреднением результатов оценки матрицы \hat{S} и вектора $\hat{T}_{мпд}^n$, которые необходимо занести в паспорт блока БММ.

4.4. Методика идентификации инструментальных погрешностей блока магнитометров

Идентификация инструментальных погрешностей монтажа ММ в блоке БММ проводится после предварительного решения задачи идентификации магнитных свойств датчика ($S, T_{мпд}$) в соответствии с алгоритмом АИ-2.1 или АИ-2.2 параграфа 4.3.

1. Выполнить операции по п. 1–6 методики идентификации МПД (параграф 4.3). Результаты измерений занести в табл. 4.1. Вычислить элементы матрицы \hat{s} и компоненты вектора $\hat{T}_{мпз}^n$.

2. Вычислить показатель σ в соответствии с параграфом 2.2.2 по формулам (2.43)–(2.45) алгоритма АИ-1 косвенной оценки условий ортогональности и вариативности БММ. Если $\sigma \neq 0$, то этот факт косвенно свидетельствует о нарушении условия ортогональности осей чувствительности ММ блока БММ.

3. Вычислить углы неортогональностей $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$ осей чувствительностей дифференциальных каналов блока БММ в соответствии с параграфом 2.3.1 по формулам (2.73)–(2.87) алгоритма АИ-3.1 (табл. П.3 прил. 2) и занести данные в технический паспорт блока БММ.

4. Вычислить углы неортогональностей $\alpha_{xi}, \beta_{xi}, \alpha_{yi}, \beta_{yi}, \alpha_{zi}, \beta_{zi}$, ($i = \overline{1; 2}$) осей чувствительностей магнитометров блока БММ в соответствии с параграфом 2.3.2 по формулам (2.47), (2.96)–(2.100) алгоритма АИ-3.2 (см. табл. П.3 прил. 2) и занести данные в паспорт блока БММ.

Идентификацию углов неортогональностей α , β , γ , характеризующих установку блока БММ на ПО, следует проводить в соответствии с параграфом 2.4 по формулам (2.47), (2.104)–(2.113) алгоритма АИ-4 (см. табл. П.3 прил. 2) после непосредственной установки блока на объект. Данные необходимо занести в технический паспорт изделия.

4.5. Методика алгоритмической компенсации погрешностей блока магнитометров

Компенсация методических и инструментальных погрешностей БММ проводится после предварительного решения задач идентификации магнитных свойств датчика (оценки \hat{S} и $\hat{T}_{\text{мпд}}^n$) по алгоритмам АИ-2.1, АИ-2.2 и идентификации инструментальных погрешностей блока по алгоритмам АИ-1, АИ-3.1 и АИ-3.2 (см. табл. П.3 прил. 2).

1. Вычислить в соответствии с параграфом 3.1.1 по формулам (3.3)–(3.9) девиационного алгоритма АК-5.1 (табл. П.4 прил. 2) для текущих показаний блока (ΔT_x , ΔT_y , ΔT_z) девиации БММ с учетом проявления магнитных свойств и инструментальных погрешностей монтажа ММ и определить скорректированные значения выходных сигналов по каналам измерений ($\hat{\Delta T}_x$, $\hat{\Delta T}_y$, $\hat{\Delta T}_z$) БММ-КО-1 существующей схемы.

2. Вычислить в соответствии с параграфом 3.1.2 по формулам (3.10)–(3.13) девиационного алгоритма АК-5.2 (см. табл. П.4 прил.2) для текущих значений показаний блока по контурам ММ-измерений (T_{xi} , T_{yi} , T_{zi} , $i = \overline{1;2}$) девиации блока БММ с учетом проявления у него магнитных свойств и инструментальных погрешностей монтажа ММ и определить скорректированные значения выходных сигналов по КМИ (\hat{T}_{xi} , \hat{T}_{yi} , \hat{T}_{zi} , $i = \overline{1;2}$) в БММ-КО-2 предлагаемой схемы.

3. Проверить выполнение условий невырожденности и хорошей обусловленности матрицы $B \cdot (S + E)$ в соответствии с параграфом 3.2.1, 3.4 по формулам (2.114), (2.115), (3.19) алгоритма АКН-2 (см. табл. П.2 прил. 2). Вычислить обратную матрицу $[B \cdot (S + E)]^{-1}$ по формуле (2.50). При нарушении условий (2.114), (2.115) провести операцию нормировки матрицы $B \cdot (S + E)$.

4. Вычислить в соответствии с параграфом 3.2.1 по формулам (3.14)–(3.18) бездевиационного алгоритма АК-6.1 (см. табл. П.4 прил. 2) приведенные к немагнитному и неискаженному приборному базису значения показаний БММ в БММ-КО-1 существующей схемы.

5. Вычислить в соответствии с параграфом 3.2.2 по формулам (3.21)–(3.24) бездевиационного алгоритма АК-6.2 (см. табл. П.4 прил. 2) приведенные значения показаний БММ к немагнитному и неискаженному приборному базису в БММ-КО-2 предлагаемой схемы.

Алгоритмическое приведение показаний БММ к невозмущенному приборному базису по формуле (3.16) алгоритма АК-6.1 и формулам (3.18), (3.20) алгоритма АКН-2 с учетом идентифицированных магнитных свойств основания и инструментальных погрешностей установки блока на ПО проводится аналогичным путем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформированное на стыке трех научных областей (магнитометрии, синергетики (системного анализа) и *ИТ*-технологии) новое научное направление – **гетеромагнитометрия** – позволяет с единых научно-технических позиций сформулировать и решить комплекс задач, связанных с математическим, алгоритмическим, метрологическим, техническим, программным, методико-технологическим обеспечением магнитных измерений на борту подвижного основания, как **многомерных измерений**. При этом все гетеромагнитные средства измерений СИ (модульные, компонентные, дифференциальные, градиентные, вариативные) рассматриваются как многомерные измерительно-вычислительные системы, включающие в свой состав многомерные, многосвязанные блоки векторных датчиков (магнитных, инерциальных) и многоканальные, многоконтурные вычислители – микропроцессоры.

Основные вопросы, связанные с разработкой схмотехнических решений при проектировании гетеромагнитных СИ, формированием их метрологических характеристик, оценкой погрешностей измерений и их устранением, в рамках гетеромагнитометрии решаются схемоалгоритмическим путем.

Исследование схем построения блоков магнитометров показывает, что шестиосный БММ типа гетеромагнитного электронного модуля может быть построен по одной из трех схем измерений:

- по **идеальной схеме** с ортогональными осями чувствительностей магнитометров (БММ-Орт);
- по **существующей схеме** с квазиортогональными осями чувствительностей магнитометров (БММ-КО-1);
- по **предлагаемой схеме** с неортогональными осями чувствительностей магнитометров (БММ-КО-2).

Сравнительный анализ этих трех схем измерений по показателям эксплуатационной работоспособности показывает преимущества предлагаемой схемы БММ-КО-2 перед существующей схемой (БММ-КО-1), в которой реализованы схема измерений и алгоритмы обработки информации, имеющие существенные ограничения и недостатки:

- использована менее совершенная концепция плоских двумерных измерений в предположении о том, что плоскость отсчета всегда занимает горизонтальное положение (углы крена γ и дифферента ϑ принимаются равными нулю и в алгоритмах обработки информации не учитываются);
- алгоритмы обработки информации не позволяют определить ис-

тинный (географический) курс ψ , а дают возможность вычислять магнитный курс Φ , причем со значительными магнитными и геометрическими искажениями;

- алгоритмы обработки информации не учитывают магнитных свойств самого датчика с электроникой и магнитных свойств основания, на котором он установлен (это приводит к возникновению методических магнитных погрешностей), а также его геометрических свойств, связанных с проявлением углов неортогональностей при монтаже ММ в блоке и при установке самого блока на ПО (это приводит к формированию инструментальных геометрических погрешностей);

- схема дифференциальной обработки информации работает по трем каналам вычисления разностей сигналов магнитометров, хотя первичная ММ-информация поступает по шести контурам КМИ (это в конечном счете приводит к получению невысоких показателей точности, надежности и долговечности);

- схема получения и обработки ММ-информации не обеспечивает условий для реализации в гетеромагнитном электронном модуле свойств отказоустойчивости, живучести и самопроверяемости.

Предлагаемые алгоритмы АИ-1, АИ-2.1, АИ-2.2, АИ-3.1, АИ-3.2, АИ-4 идентификации магнитных свойств датчика и основания, инструментальных погрешностей монтажа ММ и установки блока БММ на ПО позволяют с помощью разработанной методики определить параметры магнитных полей датчика, основания и идентифицировать геометрические погрешности монтажа ММ по неортогональным осям и погрешности установки БММ с перекосами на ПО.

Для повышения точности работы блока БММ-КО-1 существующей схемы измерений могут быть использованы девиационные (АК-5.1, АК-5.2) и бездевиационные (АК-6.1, АК-6.2) алгоритмы коррекции показаний блока с вычислением девиаций прибора и последующим введением поправок или с алгоритмическим приведением показаний прибора к немагнитному основанию с неискаженным ортогональным приборным базисом.

Работа гетеромагнитного электронного модуля в режиме курсоуказания ПО может быть более точной и более устойчивой вне зависимости от углов наклона основания относительно плоскости горизонта (γ , ϑ), если обеспечить обработку трехмерной магнитометрической информации (ΔT_x , ΔT_y , ΔT_z), снимаемой с БММ, в БЭ по девиационным алгоритмам [42, 43] или по бездевиационным алгоритмам с учетом использования дополнительной геометрической информации об углах наклона основания (γ , ϑ).

Предлагаемые алгоритмы идентификации, коррекции погрешностей блока БММ и приведения его показаний к невозмущенному ортогональному приборному базису относятся к классу **обратных задач бортовой магнитометрии** (некорректных задач, по А. Н. Тихонову) и характеризуются возможностью вырождения решений из-за формирования особенных

матриц и получения неустойчивых решений за счет повышенной чувствительности алгоритмов к погрешностям и вариациям сигналов БММ в первичной ММ-информации. Поэтому при обработке многомерной ММ-информации в БЭ БММ очень важно использовать сервисные алгоритмы контроля, коррекции и нормировки матриц АКН-1, АКН-2.

Методика и технология калибровки метрологических характеристик блоков магнитометров как измерительно-вычислительных систем, реализуемые по предлагаемым алгоритмам, носят универсальный характер и позволяют выполнять калибровочные и настроечные работы для этих блоков в лабораторных и полигонных (на объектах эксплуатации) условиях.

На базе существующего гетеромагнитного электронного модуля в перспективе возможна разработка бортовой измерительно-вычислительной системы с расширенными функциями определения параметров ориентации и навигации ПО за счет использования инерциальной информации от дополнительных блоков (блока акселерометров ТБА и блока гироскопов ТБГ), реализующих алгоритмы аналитического горизонтирования и гирокомпасирования основания, а также алгоритмы дифференциальной геомагнитной навигации.

Материалы монографии могут быть использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, связанных с проектированием, изготовлением, настройкой, контролем и исследованием многомерных измерительных модулей, имеющих в своем составе гироскопы, акселерометры и магнитометры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кожухов В. П., Воронов В. В., Григорьев В. В.* Магнитно-компасное дело. М. : Транспорт, 1987. 260 с.
2. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М. Н. Красильникова, Г. Г. Себрякова. М. : Физматлит, 2005. 280 с.
3. *Агеев В. М., Павлов Н. В.* Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование : учебник / под ред. В. В. Петрова. М. : Машиностроение, 1990. 432 с.
4. *Дмитроченко Л. А., Гора В. П., Савинов Г. Ф.* Бесплатформенные инерциальные навигационные системы : учеб. пособие / Моск. авиац. ин-т. М., 1984. 64 с.
5. *Степанов О. А.* Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Гироскопия и навигация. 2002. № 1. С. 23–46.
6. *Белоглазов И. Н., Джанджгава Г. И., Чигин Г. П.* Основы навигации по геофизическим полям. М. : Наука, 1985. 328 с.
7. *Арутюнов П. А.* Теория и применение алгоритмических измерений. М. : Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
8. *Куликовский К. Л., Купер В. Я.* Методы и средства измерений : учеб. пособие. М. : Энергоатомиздат, 1986. 448 с.
9. *Краус М., Вошни Э.* Измерительные информационные системы. М. : Мир, 1975. 310 с.
10. *Браславский Д. А.* Приборы и датчики летательных аппаратов : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 1970. 392 с.
11. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Каюшкина Е. А.* Проблемы и перспективы развития прецизионной магнитометрии // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 93–104.
12. *Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Спиридонов Д. М.* Однофакторные калибровки блока магнитометров (алгоритмы, методика, технологии) // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 115–131.
13. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М. : Наука, 2005. 379 с.
14. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Гетеромагнитная микроэлектроника. Микро-системы активного типа. М. : Наука, 2007. 612 с.
15. *Матвеев В. В., Располов В. Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ» «Электроприбор», 2009. 280 с.
16. *Несенюк Л. П.* Бесплатформенные инерциальные системы. Обзор состояния и перспективы развития // Гироскопия и навигация. 2002. № 1. С. 13–23.
17. *Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А.* Специальная магнитометрия. СПб. : Наука, 2002. 228 с.
18. Магнитометрические средства обнаружения : Теория и практика построения / под ред. д-ра техн. наук проф. И. Н. Крюкова. М. : Радиотехника, 2013. 192 с.
19. *Проскуряков Г. М.* Алгоритмический способ повышения точности, надежности и быстродействия приборных комплексов // Приборы и приборные системы : тез. докл. всерос. НТК, 26–29. сент. 1994 г. / Тульский гос. техн. ун-т. Тула, 1994. С. 97–98.

20. Плотников П. К., Проскуряков Г. М. Алгоритмическое обеспечение многомерных измерений с учетом технологических и эксплуатационных факторов // Состояние и проблемы технических измерений : тез. докл. на 1-й НТК, 22–24 ноября 1994 г. / Моск. гос. техн. ун-т. М., 1994. С. 97–98.
21. Проскуряков Г. М., Саюров В. Д. Обеспечение точности автоматизированных производств на этапе их разработки при использовании принципов многомерных измерений // Комплексное обеспечение точности автоматизированных производств : междунар. НТК, 29–30 мая 1995 г. / Пензенский гос. техн. ун-т. Пенза, 1995. С. 23–25.
22. Пат. 1777451 Российская Федерация, МКИ G 01 C 17/38. Способ магнитометрической разведки с подвижного поискового аппарата / заявители Проскуряков Г. М., Скрипкин А. А. ; патентообладатель Конструкторское бюро промышленной автоматики. – № 4745971 ; заявл. 03.10.1989 ; опубл. 22.07.1992.
23. Проскуряков Г. М., Скрипкин А. А. Алгоритмическое обеспечение способа компенсации девиации индукционного датчика и азимутальная выставка платформы // Гироскопические системы и их элементы : сб. науч. тр. / Тульский гос. техн. ун-т. Тула, 1991. С. 32–36.
24. Проскуряков Г. М., Скрипкин А. А. Анализ девиаций курсовых магнитных систем // Приборостроение : межвуз. сб. науч. тр. / Перм. политехн. ин-т. Пермь, 1991. С. 12–20.
25. Плотников П. К., Проскуряков Г. М. К вопросу об идентификации параметров математической модели магнитных полей объекта и Земли : Деп. в ВИНТИ 12.01.94, № 95-В94. М. : ВИНТИ, 1994. 9 с.
26. Проскуряков Г. М. Комплексные алгоритмы бортовой магнито-гравиметрии // Гироскопия и навигация. 1995. № 1(8). С. 72–73.
27. Пат. 134633 Российская Федерация, МПК G01C 23/00. Устройство для персональной навигации и ориентации / заявитель Проскуряков Г. М. ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГТУ им. Гагарина Ю. А.». – № 2013121686 ; заявл. 08.05.2013 ; опубл. 20.11.2013.
28. Проскуряков Г. М., Буров А. С. Исследование функций чувствительностей и погрешностей алгоритмов дифференциальной геомагнитной навигации // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. 2013. Вып. 1(69). С. 153–155.
29. Пат. 2523753 Российская Федерация, МПК G01C 21/00. Способ персональной автономной навигации и ориентации / заявители Проскуряков Г. М., Буров А. С. ; патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГТУ им. Гагарина Ю. А.». – № 2013100327 ; заявл. 09.01.2013 ; опубл. 28.05.2014.
30. Грановский В. А. Системная метрология : Метрологические системы и метрология систем. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 360 с.
31. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : РИЦ «Татьянин день», 1993. 274 с.
32. Епифанов А. Д. Надежность систем управления. М. : Машиностроение, 1975. 180 с.
33. Проскуряков Г. М., Плотников П. К. Геометрия и кинематика пространственного состояния подвижных объектов : учеб. пособие / Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов, 2008. 155 с.
34. Пешехонов В. Г. Ключевые задачи современной автономной навигации // Гироскопия и навигация. 1994. № 4(7). С. 44–49.
35. Кандауров А. П., Милевский В. И., Поляков И. Н. Пилотажно-навигационные комплексы и цифровые системы управления ЛА : учеб. пособие / Моск. авиац. ин-т. М., 1989. 66 с.
36. Анучин О. Н., Емельянец Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / под общей ред. чл.-корр. РАН В. Г. Пешехонова. СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 357 с.

37. Анучин О. Н., Комарова И. Э., Порфирьев Л. Ф. Бортовые системы навигации и ориентации искусственных спутников Земли. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. 326 с.

38. Пат. 2280917 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 L 27/14. Многофункциональное интегральное магнитополупроводниковое устройство / заявители : А. А. Игнатъев, А. В. Ляшенко ; патентообладатель ОАО «Тантал». – № 205117825; заявл. 09.06.2005 ; опубл. 27.07.2006, Бюл. № 21, 51 с.

39. Стальмахов В. С., Игнатъев А. А. Лекции по спиновым волнам. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1983. 183 с.

40. Куликов М. Н., Романченко Л. А. Определение магнитного поля Земли магнитометрическим датчиком при вращении его на углы кратные 90° // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. II и III науч.-техн. совещ. 2004 г. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2005. Вып. 2 : Методы проектирования магнитоэлектронных устройств. С. 109–114.

41. Игнатъев А. А., Куликов М. Н., Романченко Л. А. Модель подавления импульсных магнитных помех немагнитными проводящими цилиндрами // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2008. Вып. 3 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Прикладные аспекты. С. 36–43.

42. Пат. 1822248 Российская Федерация, МПК G 01 C 17/38. Способ определения девиации курсоуказателя подвижного объекта / заявители : Проскураков Г. М., Скрипкин А. А., Сауров В. Д.; патентообладатель Конструкторское бюро промышленной автоматики. – № 4873869 ; заявл. 17.08.1990 ; опубл. 05.08.1993.

43. Пат. 1633930 Российская Федерация, МПК G 01 C 17/38. Способ определения девиации курсоуказателя подвижного объекта / заявители Проскураков Г. М., Сауров В. Д., Скрипкин А. А.; патентообладатель Конструкторское бюро промышленной автоматики. – № 4722359 ; заявл. 24.07.1989 ; опубл. 27.09.1993.

44. Бабич О. А. Обработка информации в навигационных комплексах. М. : Машиностроение, 1991. 512 с.

45. Распопов В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие. М. : Машиностроение, 2007. 400 с.

46. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М. : Радио и связь, 1989. 208 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица П.1

Данные аналитической модели IGRF/WMM 2010 года

n	m	$g_n^m(t_0)$, нТл	$h_n^m(t_0)$, нТл	$\dot{g}_n^m(t_0)$, нТл/год	$\dot{h}_n^m(t_0)$, нТл/год
1	0	-29496,6	–	11,6	–
1	1	-1586,3	4944,4	16,5	-25,9
2	0	-2396,6		-12,1	–
2	1	3026,1	-2707,7	-4,4	-22,5
2	2	1668,6	-576,1	1,9	-11,8
3	0	1340,1	–	0,4	–
3	1	-2326,2	-160,2	-4,1	7,3
3	2	1231,9	251,9	-2,9	-3,9
3	3	634,0	-536,6	-7,7	-2,6
4	0	912,6	–	-1,8	–
4	1	808,9	286,4	2,3	1,1
4	2	166,7	-211,2	-8,7	2,7
4	3	-357,1	164,3	4,6	3,9
4	4	89,4	-309,1	-2,1	-0,8
5	0	-230,9	–	-1,0	–
5	1	357,2	44,6	0,6	0,4
5	2	200,3	188,9	-1,8	1,8
5	3	-141,1	-118,2	-1,0	1,2
5	4	-163,0	0,0	0,9	4,0
5	5	-7,8	100,9	1,0	-0,6
6	0	72,8	0,0	-0,2	0,0
6	1	68,6	-20,8	-0,2	-0,2
6	2	76,0	44,1	-0,1	-2,1
6	3	-141,4	61,5	2,0	-0,4
6	4	-22,8	-66,3	-1,7	-0,6
6	5	13,2	3,1	-0,3	0,5
6	6	-77,9	55,0	1,7	0,9
7	0	80,5	–	0,1	–
7	1	-75,1	-57,9	-0,1	0,7
7	2	-4,7	-21,1	-0,6	0,3

Продолжение табл. П.1

n	m	$g_n^m(t_0)$, нТл	$h_n^m(t_0)$, нТл	$\dot{g}_n^m(t_0)$, нТл/год	$\dot{h}_n^m(t_0)$, нТл/год
7	3	45,3	6,5	1,3	-0,1
7	4	13,9	24,9	0,4	-0,1
7	5	10,4	7,0	0,3	-0,8
7	6	1,7	-27,7	-0,7	-0,3
7	7	4,9	-3,3	0,6	0,3
8	0	24,4	-	-0,1	-
8	1	8,1	11,0	0,1	-0,1
8	2	-14,5	-20,0	-0,6	0,2
8	3	-5,6	11,9	0,2	0,4
8	4	-19,3	-17,4	-0,2	0,4
8	5	11,5	16,7	0,3	0,1
8	6	10,9	7,0	0,3	-0,1
8	7	-14,1	-10,8	-0,6	0,4
8	8	-3,7	1,7	0,2	0,3
9	0	5,4	-	0,0	-
9	1	9,4	-20,5	-0,1	0,0
9	2	3,4	11,5	0,0	-0,2
9	3	-5,2	12,8	0,3	0,0
9	4	3,1	-7,2	-0,4	-0,1
9	5	-12,4	-7,4	-0,3	0,1
9	6	-0,7	8,0	0,1	0,0
9	7	8,4	2,1	-0,1	-0,2
9	8	-8,5	-6,1	-0,4	0,3
9	9	-10,1	7,0	-0,2	0,2
10	0	-2,0	-	0,0	-
10	1	-6,3	2,8	0,0	0,1
10	2	0,9	-0,1	-0,1	-0,1
10	3	-1,1	4,7	0,2	0,0
10	4	-0,2	4,4	0,0	-0,1
10	5	2,5	-7,2	-0,1	-0,1
10	6	-0,3	-1,0	-0,2	0,0
10	7	2,2	-3,9	0,0	-0,1
10	8	3,1	-2,0	-0,1	-0,2
10	9	-1,0	-2,0	-0,2	0,0
10	10	-2,8	-8,3	-0,2	-0,1
11	0	3,0	-	0,0	-
11	1	-1,5	0,2	0,0	0,0
11	2	-2,1	1,7	0,0	0,1
11	3	1,7	-0,6	0,1	0,0
11	4	-0,5	-1,8	0,0	0,1
11	5	0,5	0,9	0,0	0,0
11	6	-0,8	-0,4	0,0	0,1

Окончание табл. П.1

n	m	$g_n^m(t_0)$, нТл	$h_n^m(t_0)$, нТл	$\dot{g}_n^m(t_0)$, нТл/год	$\dot{h}_n^m(t_0)$, нТл/год
11	7	0,4	-2,5	0,0	0,0
11	8	1,8	-1,3	0,0	-0,1
11	9	0,1	-2,1	0,0	-0,1
11	10	0,7	-1,9	-0,1	0,0
11	11	3,8	-1,8	0,0	-0,1
12	0	-2,2	-	0,0	-
12	1	-0,2	-0,9	0,0	0,0
12	2	0,3	0,3	0,1	0,0
12	3	1,0	2,1	0,1	0,0
12	4	-0,6	-2,5	-0,1	0,0
12	5	0,9	0,5	0,0	0,0
12	6	-0,1	0,6	0,0	0,1
12	7	0,5	0,0	0,0	0,0
12	8	-0,4	0,1	0,0	0,0
12	9	-0,4	0,3	0,0	0,0
12	10	0,2	-0,9	0,0	0,0
12	11	-0,8	-0,2	-0,1	0,0
12	12	0,0	0,9	0,1	0,0

Приложение 2

**Формулы для определения проекций вектора $\mathbf{T}_{\text{МПЗ}}$
в виде сферических гармонических рядов**

$$\begin{aligned}
 T_{zg}^H = & \left(\frac{R}{r}\right)^3 \cdot \{[g_1^1 \sin \lambda - h_1^1 \cos \lambda]\} + \left(\frac{R}{r}\right)^4 \cdot \{3 \cdot [g_2^1 \sin \lambda - h_2^1 \cos \lambda] \cdot \cos \theta + \\
 & + 6 \cdot [g_2^2 \sin 2\lambda - h_2^2 \cos 2\lambda] \cdot \sin \theta\} + \left(\frac{R}{r}\right)^5 \cdot \{[g_3^1 \sin \lambda - h_3^1 \cos \lambda] \cdot (7.5 \cos^2 \theta - 1.5) + \\
 & + 30 \cdot [g_3^2 \sin 2\lambda - h_3^2 \cos 2\lambda] \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta + 45 \cdot [g_3^3 \sin 3\lambda - h_3^3 \cos 3\lambda] \cdot \sin^2 \theta\} + \\
 & + \left(\frac{R}{r}\right)^6 \cdot \{0.5 \cdot [g_4^1 \sin \lambda - h_4^1 \cos \lambda] \cdot (35 \cos^3 \theta - 15 \cos \theta) + [g_4^2 \sin 2\lambda - h_4^2 \cos 2\lambda] \times \\
 & \times (105 \cos^2 \theta - 15) \cdot \sin \theta + 315 \cdot [g_4^3 \sin 3\lambda - h_4^3 \cos 3\lambda] \cdot \cos \theta \cdot \sin^2 \theta + \\
 & + 420 \cdot [g_4^4 \sin 4\lambda - h_4^4 \cos 4\lambda] \cdot \sin^3 \theta\} + \left(\frac{R}{r}\right)^7 \cdot \{1.875 \cdot [g_5^1 \sin \lambda - h_5^1 \cos \lambda] \times \\
 & \times (21 \cos^4 \theta - 14 \cos^2 \theta + 1) + 105 \cdot [g_5^2 \sin 2\lambda - h_5^2 \cos 2\lambda] \cdot (3 \cos^3 \theta - \cos \theta) \cdot \sin \theta + \\
 & + 157.5 \cdot [g_5^3 \sin 3\lambda - h_5^3 \cos 3\lambda] \cdot (9 \cos^2 \theta - 1) \cdot \sin^2 \theta + 3780 \cdot [g_5^4 \sin 4\lambda - h_5^4 \cos 4\lambda] \cdot \cos \theta \cdot \sin^3 \theta + \\
 & + 4725 \cdot [g_5^5 \sin 5\lambda - h_5^5 \cos 5\lambda] \cdot \sin^4 \theta\} + \left(\frac{R}{r}\right)^8 \cdot \{0.125 \cdot [g_6^1 \sin \lambda - h_6^1 \cos \lambda] \times \\
 & \times (693 \cos^5 \theta - 735 \cos^3 \theta + 105 \cdot \cos \theta) + 26.25 \cdot [g_6^2 \sin 2\lambda - h_6^2 \cos 2\lambda] \times \\
 & \times (33 \cos^4 \theta - 21 \cos^2 \theta + 1) \cdot \sin \theta + 118.125 \cdot [g_6^3 \sin 3\lambda - h_6^3 \cos 3\lambda] \cdot (44 \cos^3 \theta - 14 \cos \theta) \cdot \sin^2 \theta + \\
 & + 630 \cdot [g_6^4 \sin 4\lambda - h_6^4 \cos 4\lambda] \cdot (33 \cos^2 \theta - 3.5) \cdot \sin^3 \theta + 5 \cdot [g_6^5 \sin 5\lambda - h_6^5 \cos 5\lambda] \times \\
 & \times (10395 \cdot \sin^4 \theta \cdot \cos \theta) + 5 \cdot [g_6^6 \sin 6\lambda - h_6^6 \cos 6\lambda] \cdot 10395 \cdot \sin^5 \theta\},
 \end{aligned}$$

где $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$.

$$\begin{aligned}
 T_{\text{zg}}^H = & \left(\frac{R}{r}\right)^3 \cdot \{-g_1^0 \sin \theta + [g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda] \cdot \cos \theta\} + \left(\frac{R}{r}\right)^4 \cdot \{-3g_2^0 \sin \theta \cdot \cos \theta + \\
 & + 3[g_2^1 \cos \lambda + h_2^1 \sin \lambda] \cdot (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + 6[g_2^2 \cos 2\lambda + h_2^2 \sin 2\lambda] \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta\} + \\
 & + \left(\frac{R}{r}\right)^5 \cdot \{g_3^0 \cdot (-7.5 \cos^2 \theta \sin \theta + 1.5 \sin \theta) + [g_3^1 \cos \lambda + h_3^1 \sin \lambda] \times \\
 & \times (7.5 \cos^3 \theta - 15 \cos \theta \cdot \sin^2 \theta - 1.5 \cos \theta) + [g_3^2 \cos 2\lambda + h_3^2 \sin 2\lambda] \cdot (30 \cos^2 \theta \cdot \sin \theta - 15 \sin^3 \theta) + \\
 & + [g_3^3 \cos 3\lambda + h_3^3 \sin 3\lambda] \cdot (45 \cos \theta \cdot \sin^2 \theta)\} + \left(\frac{R}{r}\right)^6 \cdot \{g_4^0 \cdot (7.5 \cos \theta \cdot \sin \theta - 17.5 \sin \theta \cdot \cos^3 \theta) + \\
 & + [g_4^1 \cos \lambda + h_4^1 \sin \lambda] \cdot (7.5 \sin^2 \theta - 52.5 \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + 17.5 \cos^4 \theta - 7.5 \cos^2 \theta) + \\
 & + [g_4^2 \cos 2\lambda + h_4^2 \sin 2\lambda] \cdot (105 \cos^3 \theta \cdot \sin \theta - 15 \sin \theta \cdot \cos \theta - 105 \cos \theta \cdot \sin^3 \theta) + \\
 & + [g_4^3 \cos 3\lambda + h_4^3 \sin 3\lambda] \cdot (315 \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta - 105 \sin^4 \theta) + [g_4^4 \cos 4\lambda + h_4^4 \sin 4\lambda] \times \\
 & \times (420 \cos \theta \cdot \sin^3 \theta)\} + \left(\frac{R}{r}\right)^7 \cdot \{g_5^0 \cdot (26.25 \sin \theta \cdot \cos^2 \theta - 1.875 \sin \theta - 39.375 \cos^4 \theta \cdot \sin \theta) + \\
 & + [g_5^1 \cos \lambda + h_5^1 \sin \lambda] \times (17.5 \cos^5 \theta - (35/3) \cdot \cos^3 \theta + (5/6) \cdot \cos \theta - 70 \cos^3 \theta \cdot \sin^2 \theta + \\
 & + (70/3) \cdot \cos \theta \cdot \sin^2 \theta) + [g_5^2 \cos 2\lambda + h_5^2 \sin 2\lambda] \cdot (315 \cos^4 \theta \cdot \sin \theta - 105 \sin \theta \cdot \cos^2 \theta + \\
 & + 52.5 \sin^3 \theta - 472.5 \cos^2 \theta \cdot \sin^3 \theta) + [g_5^3 \cos 3\lambda + h_5^3 \sin 3\lambda] \cdot ((1417.5 \cos^2 \theta - 157.5) \times \\
 & \times (\cos \theta \cdot \sin^2 \theta - 945 \cos \theta \cdot \sin^4 \theta) + [g_5^4 \cos 4\lambda + h_5^4 \sin 4\lambda] \cdot (3780 \cos^2 \theta \cdot \sin^3 \theta - 945 \sin^5 \theta) + \\
 & + [g_5^5 \cos 5\lambda + h_5^5 \sin 5\lambda] \cdot (4725 \cos \theta \cdot \sin^4 \theta)\} + \left(\frac{R}{r}\right)^8 \cdot \{g_6^0 (91.875 \cos^3 \theta \cdot \sin \theta - \\
 & - 13.125 \cos \theta \cdot \sin \theta - 86.625 \sin \theta \cdot \cos^5 \theta) + [g_6^1 \cos \lambda + h_6^1 \sin \lambda] \times \\
 & \times ((-433.125 \cos^4 \theta + 275.625 \cos^2 \theta - 13.125) \cdot \sin^2 \theta + \\
 & + (86.625 \cos^4 \theta - 91.875 \cos^2 \theta + 13.125) \cdot \cos^2 \theta) + [g_6^2 \cos 2\lambda + h_6^2 \sin 2\lambda] \times \\
 & \times ((-1732.5 \cos^3 \theta + 551.25 \cos \theta) \cdot \sin^3 \theta + (866.25 \cos^4 \theta - 551.25 \cos^2 \theta + 26.25) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) + \\
 & + [g_6^3 \cos 3\lambda + h_6^3 \sin 3\lambda] \cdot ((-5197.5) \cdot \cos^2 \theta - 551.25) \cdot \sin^4 \theta + (5197.5 \cos^2 \theta - \\
 & - 1653.75) \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta) + [g_6^4 \cos 4\lambda + h_6^4 \sin 4\lambda] \cdot ((-10395 \cos \theta \cdot \sin^5 \theta + 20790 \cos^2 \theta - \\
 & - 551.25) \cdot \cos \theta \cdot \sin^3 \theta) + [g_6^5 \cos 5\lambda + h_6^5 \sin 5\lambda] \cdot (51975 \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^4 \theta - 10395 \cdot \sin^6 \theta) + \\
 & + [g_6^6 \cos 6\lambda + h_6^6 \sin 6\lambda] \cdot (62370 \cos \theta \cdot \sin^5 \theta)\};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{yg}^H = & 2 \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^3 \cdot \{g_1^0 \cos \theta + [g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda] \cdot \sin \theta\} + 3 \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^4 \{g_2^0 \cdot (1.5 \cos^2 \theta - 0.5) + \\
 & + 3[g_2^1 \cos \lambda + h_2^1 \sin \lambda] \cdot (\cos \theta \cdot \sin \theta) + 3[g_2^2 \cos 2\lambda + h_2^2 \sin 2\lambda] \cdot \sin^2 \theta\} + 4 \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^5 \times \\
 & \times \{g_3^0 \cdot (2.5 \cos^3 \theta - 1.5 \cos \theta) + [g_3^1 \cos \lambda + h_3^1 \sin \lambda] \cdot (7.5 \cos^2 \theta \cdot \sin \theta - 1.5 \sin \theta) + \\
 & + [g_3^2 \cos 2\lambda + h_3^2 \sin 2\lambda] \cdot (15 \cos \theta \cdot \sin^2 \theta) + [g_3^3 \cos 3\lambda + h_3^3 \sin 3\lambda] \cdot (15 \sin^3 \theta)\} + 5 \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^6 \times \\
 & \times \{0.125 \cdot g_4^0 \cdot (35 \cos^4 \theta - 30 \cos^2 \theta + 3) + [g_4^1 \cos \lambda + h_4^1 \sin \lambda] \cdot (0.5 \cdot \sin \theta \cdot (35 \cdot \cos^3 \theta - 15 \cos \theta)) + \\
 & + [g_4^2 \cos 2\lambda + h_4^2 \sin 2\lambda] \cdot (0.5 \cdot \sin^2 \theta \cdot (105 \cdot \cos^2 \theta - 15)) + [g_4^3 \cos 3\lambda + h_4^3 \sin 3\lambda] \times \\
 & \times (105 \cos \theta \cdot \sin^3 \theta) + [g_4^4 \cos 4\lambda + h_4^4 \sin 4\lambda] \cdot (105 \cdot \sin^4 \theta)\} + 6 \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^7 \cdot \{0.125 \cdot g_5^0 (63 \cos^4 \theta - \\
 & - 70 \cos^2 \theta + 15) \cdot \cos \theta + 1.875 \cdot [g_5^1 \cos \lambda + h_5^1 \sin \lambda] \cdot (21 \cos^4 \theta - 14 \cos^2 \theta + 1) \cdot \sin \theta + \\
 & + 52.5 \cdot [g_5^2 \cos 2\lambda + h_5^2 \sin 2\lambda] \cdot (3 \cos^3 \theta - \cos \theta) \cdot \sin^2 \theta + 52.5 \cdot [g_5^3 \cos 3\lambda + h_5^3 \sin 3\lambda] \times \\
 & \times (9 \cos^2 \theta - 1) \cdot \sin^3 \theta + 945 \cdot [g_5^4 \cos 4\lambda + h_5^4 \sin 4\lambda] \cdot (\cos \theta \cdot \sin^4 \theta) + \\
 & + 945 \cdot [g_5^5 \cos 5\lambda + h_5^5 \sin 5\lambda] \cdot \sin^5 \theta\} + 7 \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^8 \cdot \{0.0625 \cdot g_6^0 (231 \cos^6 \theta - 367.5 \cos^4 \theta + \\
 & + 105 \cos^2 \theta - 5) + 0.125 \cdot [g_6^1 \cos \lambda + h_6^1 \sin \lambda] \cdot (693 \cos^5 \theta - 735 \cos^3 \theta + 105 \cos \theta) \cdot \sin \theta + \\
 & + 13.125 \cdot [g_6^2 \cos 2\lambda + h_6^2 \sin 2\lambda] \cdot (33 \cos^4 \theta - 21 \cos^2 \theta + 1) \cdot \sin^2 \theta + 39.375 \cdot [g_6^3 \cos 3\lambda + h_6^3 \sin 3\lambda] \times \\
 & \times (44 \cdot \cos^2 \theta - 14) \cdot \sin^3 \theta \cdot \cos \theta + 157.5 \cdot [g_6^4 \cos 4\lambda + h_6^4 \sin 4\lambda] \cdot (33 \cos^2 \theta - 3.5) \cdot \sin^4 \theta + \\
 & + [g_6^5 \cos 5\lambda + h_6^5 \sin 5\lambda] \cdot (10395 \cos \theta \cdot \sin^5 \theta) + 10395 \cdot [g_6^6 \cos 6\lambda + h_6^6 \sin 6\lambda] \cdot \sin^6 \theta\}.
 \end{aligned}$$

Приложение 3

Сводные таблицы алгоритмов

Таблица П.2

Сервисные алгоритмы

Алгоритмы		Уравнения, формулы, выражения	Назначение алгоритма
обозначение	название		
АПП-1	Алгоритм предварительной (ориентировочной) паспортизации МПЗ	(2.23)–(2.25)	Приближенное математическое описание МПЗ, приближенная оценка параметров МПЗ
АПП-2	Алгоритм уточненной паспортизации МПЗ	(2.26)–(2.28)	Уточненное математическое описание МПЗ, уточненное определение параметров МПЗ
АПП-3	Алгоритм точной паспортизации МПЗ	(2.29), прил. 1, 2	Точное математическое описание МПЗ, точное определение параметров МПЗ
АНВ-С	Алгоритм начальной выставки по спутниковой информации	(2.30), (2.31)	Точное определение навигационных параметров, определение направления географического меридиана
АНВ-И	Алгоритм начальной выставки по инерциальной информации	(2.39), (2.40)	Автономное определение параметров ориентации и навигации при начальной выставке блока БММ
АКН-1	Алгоритм контроля и нормировки матрицы ориентации	(2.58)–(2.67)	Промежуточная проверка правильности вычисления направляющих косинусов матрицы ориентации А, нормировка и коррекция матрицы
АКН-2	Алгоритм контроля и нормировки матриц	(2.49), (2.52), (2.53), (2.112), (2.114), (2.115), (3.19), (3.20), (3.25)	Проверка невырожденности матриц и хорошей их обусловленности, нормировка и коррекция матриц

Таблица П.3

Алгоритмы идентификации

Алгоритмы		Уравнения, формулы, выражения	Назначение алгоритма
обозначение	название		
АИ-1	Алгоритм оценки неортогональности и вариативности	(2.42)–(2.45)	Проведение косвенной оценки условий ортогональности осей чувствительностей ММ и вариативности их показаний

Алгоритмы		Уравнения, формулы, выражения	Назначение алгоритма
обозначение	название		
АИ-2.1	Алгоритм идентификации магнитных свойств датчика по дифференциальным каналам	(1.12), (2.47)–(2.54)	Определение параметров МПД по сигналам БММ, сформированным в дифференциальных каналах существующей схемы
АИ-2.2	Алгоритм идентификации магнитных свойств датчика по контурам КМИ	(1.12), (2.47)–(2.53), (2.55)	Определение параметров МПД по сигналам БММ, сформированным в контурах КМИ предлагаемой схемы БММ
АИ-3.1	Алгоритм идентификации инструментальных погрешностей БММ по каналам измерений	(2.47), (2.73)–(2.87)	Определение углов неортогональностей осей чувствительности дифференциальных каналов БММ ($\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$) в существующей схеме БММ
АИ-3.2	Алгоритм идентификации инструментальных погрешностей БММ по контурам измерений	(2.47), (2.96)–(2.100)	Определение углов неортогональностей осей чувствительностей ММ в блоке ($\alpha_{xi}, \beta_{xi}, \alpha_{yi}, \beta_{yi}, \alpha_{zi}, \beta_{zi}$) ($i = 1, 2$) в предлагаемой схеме БММ
АИ-4	Алгоритм идентификации погрешностей установки блока на ПО	(2.47), (2.104), (2.105), (2.108)–(2.113)	Определение углов неортогональностей осей приборного трехгранника относительно основания (α, β, γ)

Таблица П.4

Алгоритмы коррекции

Алгоритмы		Уравнения, формулы, выражения	Назначение алгоритма
обозначение	название		
АК-5.1	Девиационный алгоритм компенсации погрешностей БММ по каналам измерений	(3.3)–(3.9)	Вычисление девиаций БММ и введение поправок в показания блока существующей схемы БММ-КО-1
АК-5.2	Девиационный алгоритм компенсации погрешностей БММ по контурам измерений	(3.10)–(3.13)	Вычисление девиаций БММ и введение поправок в показания блока предлагаемой схемы БММ-КО-2
АК-6.1	Бездевиационный алгоритм коррекции показаний БММ по каналам измерений	(3.14)–(3.18)	Алгоритмическое приведение показаний БММ к невозмущенному приборному базису в существующей схеме БММ-КО-1
АК-6.2	Бездевиационный алгоритм коррекции показаний БММ по контурам измерений	(3.21)–(3.24)	Алгоритмическое приведение показаний БММ к невозмущенному приборному базису в предлагаемой схеме БММ-КО-2

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АГ	— атомный гироскоп
АГГ	— аналитическое горизонтирование и гироскопирование
АИ	— атомный интерферометр
АНС	— астрономическая навигационная система
АО	— алгоритмическое обеспечение
АП	— аппаратура потребителя
БГМ- X , БГМ- Y , БГМ- Z ,	— комплексированные блоки датчиков (гироскопов и магнитометров) по соответствующим каналам (X , Y , Z)
БИНС	— бесплатформенная ИНС
БИС	— большая интегральная схема
БИСОН	— бесплатформенная инерциальная система ориентации и навигации
БК-ГМ1, БК-ГМ2	— блоки базисов на основе комплексирования гироскопов и магнитометров
БММ	— блок магнитометров
БОИ	— блок обработки информации
БСУ	— бортовая система управления
БЦВМ	— бортовая цифровая вычислительная машина
БЭ	— блок электроники
ВГ	— вибрационный гироскоп
ВОГ	— волоконно-оптический гироскоп
ВТГ	— вибрационный твердотельный гироскоп
ГФП	— геофизическое поле
ГЛОНАСС	— глобальная навигационная спутниковая система
ДММ	— датчик магнитометрический
ДНГ	— динамически настраиваемый гироскоп
ДПИ	— датчик первичной информации
ДСНС	— дифференциальная спутниковая навигационная система
ДУС	— датчик угловой скорости
ИВК	— измерительно-вычислительный комплекс
ИВС	— измерительно-вычислительная система
ИКТ	— информационно-компьютерные технологии
ИНС	— инерциальная навигационная система
ИО	— информационное обеспечение
ИП	— измерительный преобразователь
ИС	— измерительная система

КБ-А, КБ-Г, КБ-М	– комбинированные базисы датчиков (акселерометров, гироскопов и магнитометров)
КБ-МАГ	– комплексные базисы на основе гиромагнито-акселерометрической информации
КМИ	– контур магнитных измерений
КО	– квазиортогональный
КОИ	– канал обработки информации
КЭНС	– корреляционно-экстремальная навигационная система
ЛГ	– лазерный гироскоп
МЭМС	– микроэлектромеханические системы
МК	– магнитный компас
ММ	– магнитометр
ММИ	– метод многомерных измерений
ММГ	– микромеханический гироскоп
МО	– математическое обеспечение
МП	– микропроцессор
МПД	– магнитное поле датчика
МПЗ	– магнитное поле Земли
МПО	– магнитное поле объекта
МПП	– магнитное поле помех
МТО	– методико-технологическое обеспечение
МЭМ	– магниточувствительный электронный модуль
МХ	– метрологическая характеристика
НМХ	– нормированная метрологическая характеристика
НС	– навигационная система
ОИУС	– оптический измеритель угловой скорости
ПАВ	– поверхностные акустические волны
ПВЗ	– поле вращения Земли
ПО	– подвижный объект (подвижное основание)
Про	– программное обеспечение
ПТЗ	– поле тяжести Земли
РНС	– радиотехническая навигационная система
СБИС	– сверхбольшая интегральная схема
СИ	– средство измерений
СКВИД	– сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик (англ. <i>SQUID</i>)
СКО	– среднеквадратическое отклонение
СНС	– спутниковая навигационная система
СОН	– система ориентации и навигации

СОН-ГФ	– система ориентации и навигации по геофизическим полям
ССОН	– спутниковая система ориентации и навигации
ТБА	– трехосный блок акселерометров
ТБГ	– трехосный блок гироскопов
ТБМ	– трехосный блок магнитометров
ТО	– техническое обеспечение
ФМО	– ферромагнитный объект
ФМХ	– функциональная метрологическая характеристика
ЦМК	– цифровой магнитный компас
ЭСГ	– электростатический гироскоп
Г-х, Г-у, Г-z; М-х, М-у, М-z; А-х, А-у, А-z	– датчики (гироскопы, магнитометры, акселерометры), установленные по осям трехгранника XYZ

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ψ, ϑ, γ	– углы Эйлера–Крылова (углы истинного (географического) курса, тангажа и крена)
Φ	– магнитный курс ПО
φ, λ	– географическая широта и долгота
\mathbf{r}	– радиус-вектор точки текущего местоположения объекта
ω	– абсолютная угловая скорость вращения объекта
Ω	– угловая скорость собственного вращения Земли
$\Delta\psi, \Delta\vartheta, \Delta\gamma$	– вариации углов ориентации
$\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta r$	– вариации параметров навигации
$\mathbf{T}_{МПЗ}^H, \mathbf{T}_{МПЗ}^A$	– векторы напряженностей МПЗ по нормальной и аномальной составляющим
$\delta \mathbf{T}_{МПЗ}$	– вектор вариации напряженности МПЗ
$\mathbf{T}_{МПО}^H, \mathbf{T}_{МПО}^П$	– векторы напряженности МПО по индуктивной, постоянной, вихревой и электромагнитной составляющим
$\mathbf{T}_{МПО}^B, \mathbf{T}_{МПО}^{ЭМ}$	
$\mathbf{T}_{МПД}$	– вектор напряженности МПД
A	– матрица ориентации ПО
$A_\psi, A_\vartheta, A_\gamma$	– матрицы углов курса, тангажа и крена
B_x, B_y, B_z	– матрицы технологических погрешностей монтажа магнитометров (ММ-х, ММ-у, ММ-z)
C	– матрица погрешностей установки БММ на объекте
S, F	– матрицы коэффициентов Пуассона по индуктивной и вихревой составляющим МПО
$X_g Y_g Z_g$	– нормальная земная система координат (ГОСТ 20058-80)
XYZ	– связанная система координат (связана с ПО)
$X_\Pi Y_\Pi Z_\Pi$	– приборная система координат (связана с корпусом БММ)
$X_{Mi} Y_{Mi} Z_{Mi}$	– магнитометрическая система координат (связана с i -м ММ, $i = \overline{1,3}$)
$X_m Y_m Z_m$	– нормальная геомагнитная система координат
$X_M Y_M Z_M$	– измерительная ММ-система координат (может быть неортогональной, аффинной; связана с осями чувствительности i -х ММ)
$\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$	– углы неортогональности контуров магнитометров по осям X, Y, Z соответственно (углы монтажа ММ)
α, β, χ	– геометрические погрешности (углы) установки БММ на ПО
T_x, T_y, T_z	– проекции вектора напряженности \mathbf{T} МПЗ на оси приборного трехгранника $X_\Pi Y_\Pi Z_\Pi$ БММ
$\hat{T}_x, \hat{T}_y, \hat{T}_z$	– оценки проекций вектора напряженности \mathbf{T}

$\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z$	– разностные сигналы ММ-контуров
$\Delta T_{xi}, \Delta T_{yi}, \Delta T_{zi}$	– погрешности в показаниях i -х ММ
E	– единичная матрица
$(A \mathbf{T}_{МПЗ}^n)'$	– производная от векторно-матричного произведения (вихревая составляющая МПЗ)
$(\mathbf{T}_{млд}^{\ominus})'$	– производная от вектора напряженности МПД, обусловленной электромагнитными помехами датчика (скорость изменения электромагнитной составляющей)
$a, b, c, d, e, f, g, h, k$	– коэффициенты матрицы Пуассона
Δ (дельта)	– оператор Лапласа, характеризует разность двух величин
∇ (набла)	– оператор Гамильтона, характеризует градиент пространственного изменения физических величин
δ (дельта)	– знак относительной погрешности
$\langle T_x \rangle, \langle T_y \rangle, \langle T_z \rangle$	– допустимые значения компонент T_x, T_y, T_z
$T_{гар}$	– гарантийный ресурс
P_n	– надежность, вероятность работы изделия в течение времени T
$a, b, c, d, e, f, g, h, k$	– коэффициенты матрицы F
\mathbf{x}, \mathbf{y}	– векторы входных и промежуточных сигналов многомерных СИ
$\mathbf{a}, \boldsymbol{\omega}, \mathbf{T}$	– векторы показаний блоков ТБА, ТБГ и ТБМ
$\boldsymbol{\omega}_e, \boldsymbol{\omega}_r$	– векторы переносной и относительной составляющей угловой скорости вращения ПО
\mathbf{w}, \mathbf{g}	– векторы кажущегося ускорения и ускорения свободно падающего тела
$a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z,$ $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z, g_x, g_y, g_z$	– проекции векторов $\mathbf{a}, \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\Omega}$ и \mathbf{g} на оси трехгранника XYZ
b	– показатель аффинности-вариативности блоков
S_1, \mathbf{S}_1	– масштабный коэффициент и матрица масштабных коэффициентов СИ
\mathbf{u}, \mathbf{u}_0	– векторы выходных и нулевых сигналов СИ
$\Delta \mathbf{u}_B$	– векторы возмущений
$\Delta t^0, \Delta U$	– изменения температуры и напряжения питания
λ	– интенсивность отказов изделия
λ_1	– длина волны
\wedge	– знак оценки соответствующей величины или вектора
$\boldsymbol{\rho}(\rho_x, \rho_y, \rho_z)$	– радиус-вектор положения точки измерения и его проекции на оси XYZ
T_{xg}, T_{yg}, T_{zg}	– проекции вектора $\mathbf{T}_{МПЗ}$ на оси трехгранника XYZ
$\mathbf{U}_M, \mathbf{U}_a, \mathbf{U}_r$	– векторы выходных сигналов ТБМ, ТБА, ТБГ

Список обозначений

$U_{mx}, U_{my}, U_{mz};$ $U_{ax}, U_{ay}, U_{az};$ U_{gx}, U_{gy}, U_{gz}	– проекции векторов выходных сигналов ТБМ, ТБА, ТБГ на оси трехгранника XYZ
$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$	– масштабные коэффициенты соответствующих контуров измерений
$\Delta\gamma_x, \Delta\gamma_y, \Delta\gamma_z$	– нестабильности масштабных коэффициентов соответствующих контуров измерений
P, Q, R	– проекции вектора $\Gamma_{\text{МПО}}^{\text{П}}$ на оси трехгранника XYZ
$a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}; b_{xj}, b_{yj}, b_{zj};$ $c_{xk}, c_{yk}, c_{zk}; d_{xk}, d_{yk}, d_{zk}$	– функции чувствительностей соответствующих контуров измерений ТБМ к дестабилизирующим факторам ($\Delta t^0, \Delta U, \Delta U_B$)
P_3, Q_3, R_3	– проекции вектора $\Gamma_{\text{МПО}}^3$ на оси трехгранника XYZ
$[]^T$	– знак транспонирования матрицы
$[]^{-1}$	– знак обращения матрицы
$t_{\text{авт}}$	– время автономной работы изделия
p, q	– надежность и вероятность отказов элемента
m	– кратность резервирования элементов в группе
n	– число групп элементов в ИВС
Q_p	– вероятность риска, вероятность наступления отказа
Λ	– интенсивность отказов всей системы
Π, Σ	– знаки произведения и суммы
$n \times n; n \times 1; m \times 1;$	– размерности матриц и векторов
med	– функция осреднения
x, y, z	– параметры позиционирования
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	– ошибки позиционирования
\wedge, \vee	– знаки конъюнкции и дизъюнкции
\in	– знак принадлежности элемента
$\tilde{u}_m, \tilde{u}_a, \tilde{u}_r$	– векторы нормируемых показаний ТБМ, ТБА, ТБГ
A_1, B_1, C_f	– матрицы в уравнении Коши
var	– обозначение вариативности (изменяемости)
const	– обозначение постоянства (неизменности)
cond	– число обусловленности матрицы, параметр Лифшица
det	– детерминант матрицы

СПИСОК СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

Алгоритм: совокупность действий (например, вычислительных операций), обеспечивающих достижение поставленной цели.

Аффинность: свойство неортогональности осей.

Акселерометр: измеритель линейных ускорений.

Аномальное магнитное поле Земли (МПЗ-А): составляющая магнитного поля Земли (МПЗ-А), обусловленная влиянием искусственных и естественных источников, вызывающих отклонения в описании геомагнитного поля от нормального МПЗ (МПЗ-Н), регламентированного в виде стандартного описания модели *JGRF*.

Аттестация рабочего места: совокупность действий (измерений и вычислений), проводимых на рабочем месте с целью определения параметров МПЗ и выявления расхождений в описании геомагнитного поля на рабочем месте и МПЗ-Н.

Блок: схемотехническое решение, при котором несколько измерительных преобразователей (например, магнитометров) конструктивно размещены в одном едином корпусе.

Базис приборный: корпус прибора, материально воспроизводящий приборную систему координат $X_n Y_n Z_n$.

Вариативность: свойство изменчивости показаний прибора во времени.

Вариация МПЗ: изменение параметров МПЗ во времени.

Время наработки на отказ: время непрерывной работы прибора до наступления первого отказа (вероятностная характеристика).

Векторно-матричная форма записи линейной системы уравнений: условная форма записи систем линейных уравнений в виде одного уравнения с использованием операторов матриц и векторов с целью обеспечения компактности записи.

Гравиметр: прибор для измерения ускорения свободного падения тела g .

Гарантийный ресурс: суммарное время работы изделия $T_{\text{гар}}$, в течение которого производитель гарантирует безотказную работу с надежностью $P = 100\%$.

Геофизическая навигация и ориентация: задачи навигации и ориентации, решаемые на основе измерений параметров геофизических полей.

Гетеромагнитный электронный модуль: схемотехническое решение построения многоосного блока магнитометров, при котором магнитометрический датчик и блок электроники конструктивно размещены в одном корпусе и образуют единый модуль.

Градиент: вектор, характеризующий величину производной от данной физической величины по перемещению и отсчитанный в направлении перемещения.

Датчик: схемотехническое решение в области измерительной техники, при котором несколько однородных или разнородных измерительных преобразователей конструктивно размещены на одном едином корпусе.

Девиация: суммарная (результатирующая) погрешность измерения.

Долговечность: характеристика работоспособности изделия во времени, количественно долговечность определяется временами T и $T_{\text{гар}}$.

Детерминант матрицы: определитель матрицы.

Живучесть: свойство изделия сохранять свою работоспособность (полную или ограниченную) в условиях отказа каких-то элементов этого изделия.

Задача ориентации: задача определения параметров ориентации ПО в пространстве.

Задача навигации: задача определения навигационных параметров ПО.

Идентификация: операции (например, вычислительные операции по алгоритму) определения тех или иных параметров, характеризующих те или иные свойства изделия.

Измерения инерциальные, геофизические, спутниковые: определение инерциальных параметров (ускорения \mathbf{a} и угловой скорости вращения $\boldsymbol{\omega}$), параметров геофизических полей (\mathbf{T} , $\boldsymbol{\Omega}$, \mathbf{g} и др.) и параметров навигационных спутников (r_i , Δt_i , $i = \overline{1, n}$), выполняемое с помощью тех или иных средств измерений.

Измерения одномерные, многомерные: измерения одной физической величины или совокупности однородных или разнородных физических величин (измеряемого вектора $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n]^T$).

Избыточность информации структурная: свойство средства измерений получать многомерную информацию $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n]^T$, при котором размерность n измеряемого вектора \mathbf{x} превышает минимально необходимую n_{min} и достигается за счет расширения средств измерений и использования резервных СИ.

Избыточность информации функциональная: свойство средства измерений (СИ) получать расширенную многомерную информацию $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n]^T$, при котором неравенство $n > n_{min}$ достигается за счет выявления и использования способности СИ реагировать на несколько физических величин.

Интенсивность отказов $\lambda(\text{ч}^{-1})$: статистическая величина, характеризующая частоту наступления отказов изделия при нормальных условиях эксплуатации.

Калибровка: совокупность действий (операций), обеспечивающих идентификацию (определение) погрешностей измерителя и последующую компенсацию (устранение) этих погрешностей физическим или алгоритмическим путем.

Матрица: математический оператор, представляющий собой таблицу упорядоченных элементов, используемый в линейной алгебре для обеспечения компактной формы записи систем линейных уравнений.

Матрица единичная E : квадратная матрица размерности $n \times n$, диагональные элементы которой равны 1, а недиагональные элементы равны 0.

Матрица ориентации A : квадратная матрица размерности (3×3) , элементы которой представляют собой направляющие косинусы a_{ij} , ($i, j = 1, 2, 3$), зависящие от углов ориентации (ψ , Φ , ϑ , γ).

Матрица Пуассона S : квадратная матрица (3×3) , элементами которой являются коэффициенты Пуассона для индуктивной составляющей магнитного поля.

Магнитометр: прибор для измерения параметров магнитного поля (модульный магнитометр – T ; Компонентный магнитометр – T_x ; T_y ; T_z). Компонентный магнитометр – измерительный одномерный преобразователь.

Методика: последовательность действий (например, операций измерений, вычислительных операций и др.), гарантирующих достижение поставленной цели.

Нормальное магнитное поле Земли (МПЗ-Н): постоянная составляющая МПЗ, описание которой строится на основе использования стандартной модели JGRF.

Надежность: вероятностная характеристика работоспособности изделия (вероятность P безотказной работы изделия в течение гарантированного ресурса при нормальных условиях эксплуатации).

Неколлениарность осей: геометрическое свойство, отражаемое условием непараллельности осей.

Некомпланарность осей: геометрическое свойство, заключающееся в выполнении условия, при котором оси не лежат в одной плоскости.

Неортогональность осей: геометрическое свойство, заключающееся в выполнении условия, при котором оси не образуют между собой прямых углов.

Отказоустойчивость: свойство изделия сохранять (частично или полностью) работоспособность в условиях проявления отказов некоторых элементов.

Погрешности монтажа магнитометров: инструментальные геометрические погрешности, характеризующие факт несовпадения осей чувствительности магнитометров с соответствующими ортогональными осями приборной системы координат.

Погрешности установки БММ: инструментальные геометрические погрешности, проявляющиеся при установке БММ на ПО и характеризующие факт несовпадения ортогональных осей приборного трехгранника с соответствующими осями связанной системы координат XYZ .

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ГЕТЕРОМАГНИТНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	
1.1. Задачи и проблемы навигации и ориентации подвижных объектов.....	9
1.2. Информационно-компьютерные технологии и многомерные измерения.....	13
1.3. Автономные измерения.....	19
1.4. Современные и перспективные требования к автономным измерениям.....	39
1.5. Комплексирование, резервирование и комбинирование магнитометров.....	46
1.6. Гетеромагнитометрия – новое научное направление.....	65
2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ БЛОКА МАГНИТОМЕТРОВ	
2.1. Характеристика инструментальных и эксплуатационных погрешностей блока магнитометров.....	73
2.2. Идентификация магнитных свойств блока магнитометров.....	88
2.2.1. Паспортизация магнитного поля Земли.....	89
2.2.2. Алгоритм косвенной оценки условий ортогональности и вариативности (алгоритм АИ-1).....	97
2.2.3. Алгоритм предварительной идентификации МПД по постоянной и индуктивной составляющим (алгоритм АИ-2).....	98
2.3. Идентификация инструментальных погрешностей блока магнитометров.....	102
2.3.1. Идентификация магнитных и геометрических свойств основания по каналам магнитных измерений (алгоритм АИ-3.1).....	103
2.3.2. Идентификация магнитных и геометрических свойств основания по контурам магнитных измерений (алгоритм АИ-3.2).....	107
2.4. Идентификация погрешностей установки на объекте блока магнитометров (алгоритм АИ-4).....	109
3. УСТРАНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ БЛОКА МАГНИТОМЕТРОВ	
3.1. Компенсация погрешностей блока магнитометров девиационным способом	112
3.1.1. Компенсация погрешностей блока магнитометров по каналам измерений девиационным способом (алгоритм АК-5.1).....	112
3.1.2. Компенсация погрешностей блока магнитометров по контурам магнитных измерений девиационным способом (алгоритм АК-5.2).....	114
3.2. Коррекция показаний блока магнитометров бездевиационным способом.....	115
3.2.1. Приведение показаний блока магнитометров к ортогональному приборному базису по каналам измерений (алгоритм АК-6.1).....	115
3.2.2. Приведение показаний блока магнитометров к ортогональному приборному базису по контурам измерений (алгоритм АК-6.2).....	117

4. МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ БЛОКА МАГНИТОМЕТРОВ	
4.1. Описание лабораторного оборудования для калибровки блока магнитометров	119
4.2. Методика аттестации лабораторного стенда и условия проведения лабораторных испытаний блока магнитометров	120
4.3. Методика идентификации магнитных свойств блока магнитометров в лабораторных условиях	122
4.4. Методика идентификации инструментальных погрешностей блока магнитометров	124
4.5. Методика алгоритмической компенсации погрешностей блока магнитометров	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
<i>Список литературы</i>	129
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение 1. Данные аналитической модели JGRF/WMM-2010	132
Приложение 2. Формулы для определения проекций вектора $T_{МПЗ}$ в виде сферических гармонических рядов	135
Приложение 3. Сводные таблицы алгоритмов	138
Список сокращений	140
Список обозначений	143
Список специальных терминов	146

Научное издание

*Игнатъев Александр Анатольевич
Проскуряков Герман Михайлович*

**ГЕТЕРОМАГНИТОМЕТРИЯ:
Алгоритмы, методики,
калибровки блоков магнитометров**

Редактор *Е. А. Малютина*
Технический редактор *В. В. Володина*
Корректор *Ю. И. Астахова*
Оригинал-макет подготовили *О. Г. Данке, Т. Н. Сиротинина*

Подписано в печать 25.12.2014. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 8,83 (9,5). Тираж 100. Заказ .

Издательство Саратовского университета. 410012, Саратов, Астраханская, 83.
Типография Саратовского университета. 410012, Саратов, Б. Казачья, 112А.

