

**Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)**

Афонин А.А., Тювин А.В.

Научно-образовательный курс

«Гравиинерциальные приборы, системы и комплексы»

Москва 2013 г.

Оглавление

Предисловие.....	3
Обозначения и сокращения.....	4
Введение.....	5
1 Концепция технологии морских векторных гравиметрических измерений, предпосылки её практической реализации.....	8
1.1 Оценка возможностей создания векторного гравиметрического датчика.....	11
1.2 Аналитическая юстировка и калибровка инерциального измерительного блока БИНС.....	14
1.3 Методика и алгоритм аналитической юстировки и калибровки блока акселерометров.....	16
1.4 Обоснование выбора носителя БГНК.....	23
2 Основные задачи гравиинерциального навигационного комплекса, стратегия реализации бортового алгоритмического обеспечения.....	28
2.1 Алгоритмическое обеспечение векторных гравиметрических измерений.....	31
2.2 Алгоритмы БИНС определения параметров навигации и ориентации.....	33
Заключение.....	36
Литература.....	37

Предисловие

Данный материал «Гравиинерциальные приборы, системы и комплексы» написан на основании лекций, читаемых на кафедре «Автоматизированные комплексы ориентации и навигации» МАИ. Материал посвящен гравиинерциальным навигационным системам и комплексам, использующим в качестве носителей автономные необитаемые подводные аппараты.

Авторами материала являются доценты кафедры 305 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) к.т.н. Афонин А.А. и к.т.н. Тювин А.В.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат;
- БА – блока акселерометров;
- БГ – блок гироскопов;
- БГНК – бесплатформенный гравиинерциальный навигационный комплекс;
- БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система;
- БЦВК – бортовой цифровой вычислительный комплекс;
- ВГИ – векторных гравиметрических измерений;
- ВПГД – векторный помехозащищенный гравиметрический датчик;
- ГД – гравиметрический датчик;
- ГИ – гравиметрические измерения;
- ГНК – гравиинерциальный навигационный комплекс;
- ИИБ – инерциальных измерительных блоков;
- К – калибровка;
- М – маятник;
- МА – маятниковый акселерометр;
- МПА – малоразмерный подводный аппарат;
- ПГИ – процессор гравиметрических измерений;
- ПНПД – процессор вычисления номинальных параметров движения;
- ПОПБ – процессор оценки погрешностей БИНС;
- ПС – подбирающее судно;
- СК – система координат;
- СНС – спутниковая навигационная система;
- СОПЕК – систему определения и передачи координат;
- ТМДГ – трехкомпонентный модуляционный динамический гравиметр;
- УСТ – ускорение силы тяжести;
- ФИ – функционально избыточный;
- ЧЭ – чувствительный элемент;
- Ю – юстировка.

Введение

Гравитационное поле Земли и поле рельефа земной поверхности относятся к наиболее устойчивым геофизическим полям. Эти поля отличаются высокой стабильностью во времени, помехозащищенностью и малой зависимостью от метеоусловий. Особое практическое значение при этом приобретают возможности измерения ускорения силы тяжести (УСТ), как источника обобщенной информации о наиболее важных параметрах Земли.

При этом различают геодезическую гравиметрию как составную часть геодезии – науки изучающей фигуру и внешнее гравитационное поле Земли [1], и гравиразведку, являющуюся одним из методов исследования геологического строения верхних частей Земли (геология), поисков и разведки полезных ископаемых [2] .

Важнейшим результатом геодезических измерений является *определение уклонений отвесных линий*, позволяющих осуществлять переход от астрономических координат, определяемых на основе астрономо-геодезических и гравиметрических измерений к геодезическим координатам, определяемым координатами нормали к референц-эллипсоиду в системе координат, принятой в картографии [4,5].

Наиболее востребованными в настоящее время являются геологические измерения, поскольку именно в геологии неоднородность распределения плотности тела Земли является предметом исследования для прогноза регионов наиболее плотного залегания полезных ископаемых. Эти обстоятельства привели к необходимости детальных исследований перспективных по экономическим оценкам *локальных регионов*, с целью оценки экстремального проявления гравитационных аномалий, то есть «гнезд» небольшого объема, но богатого по содержанию полезных ископаемых. При этом достигнутая инструментальная точность гравиметрических датчиков требует взаимного учета геодезических и геологических данных для уточнения непосредственных гравиметрических измерений в процессе их камеральной обработки.

Традиционные технологии мобильных гравиметрических измерений реализуют скалярные измерения величины вектора УСТ [6]. При этом для обеспечения ориентации измерительных осей гравиметрических датчиков (ГД) по геодезической вертикали используют прецизионные гиросtabilизированные платформы, определяющие значительные массогабаритные характеристики при реализации гравиинерциальных навигационных комплексов (ГНК). Как следствие для ГНК необходимо применение носителей отличающихся значительными эксплуатационными затратами.

Наилучшие коммерческие гравиметрические морские измерения (ГИ) в настоящее время проводятся с разрешением до 0,1 мГал для определения аномалий с полувошной от 500 м, что позволяет картографировать гравитационные поля в масштабе 1:50000 с точностью, достаточной для оконтуривания нефтегазовых месторождений. С борта самолетов ГИ выполняются с разрешением более 1 мГал для аномалий с полувошной от 2 км, а при измерениях с вертолета 0,5 мГал с полувошной 1 км [3]. Наиболее точные – морские гравиметрические измерения реализуются на прямолинейных галсах при равномерном движении судна со скоростью до 5 морских узлов, как показано на рис. 1.

Данная технология слишком затратна, особенно при плотных гравиметрических измерениях, поскольку обусловлена эксплуатацией судов и организацией длительных исследовательских экспедиций, а также стоимостью и сложностью аппаратуры.

Устранение этого недостатка возможно путем создания *бесплатформенных гравиинерциальных навигационных комплексов* (БГНК) дополняющих традиционные оценки определения аномалий гравитационного поля Земли измерениями уклонений отвесных линий. Теоретические основы решение этой задачи предложены в разработках кафедры 305 МАИ [7].

Центральной задачей настоящей работы является актуальная проблема разработки методов и средств измерения аномалий гравитационного поля Земли экономически обоснованными средствами, дополняющими традиционные технологии решений этих задач в интересах геодезии, геофизики, геологии и специальных приложений.

Техническим инструментом достижения поставленной цели является создание БГНК, реализующего векторные гравиметрические измерения (ВГИ) и допускающего применение в качестве носителя БГНК малоразмерных автоматизированных подвижных объектов. Например, при реализации ВГИ высокой плотности на шельфе для уточнения наиболее компактного залегания полезных ископаемых, а также для решения поисково-спасательных операций на море экономически целесообразно применять автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Для решения этих задач в труднодоступных регионах удобно применять беспилотные летательные аппараты.

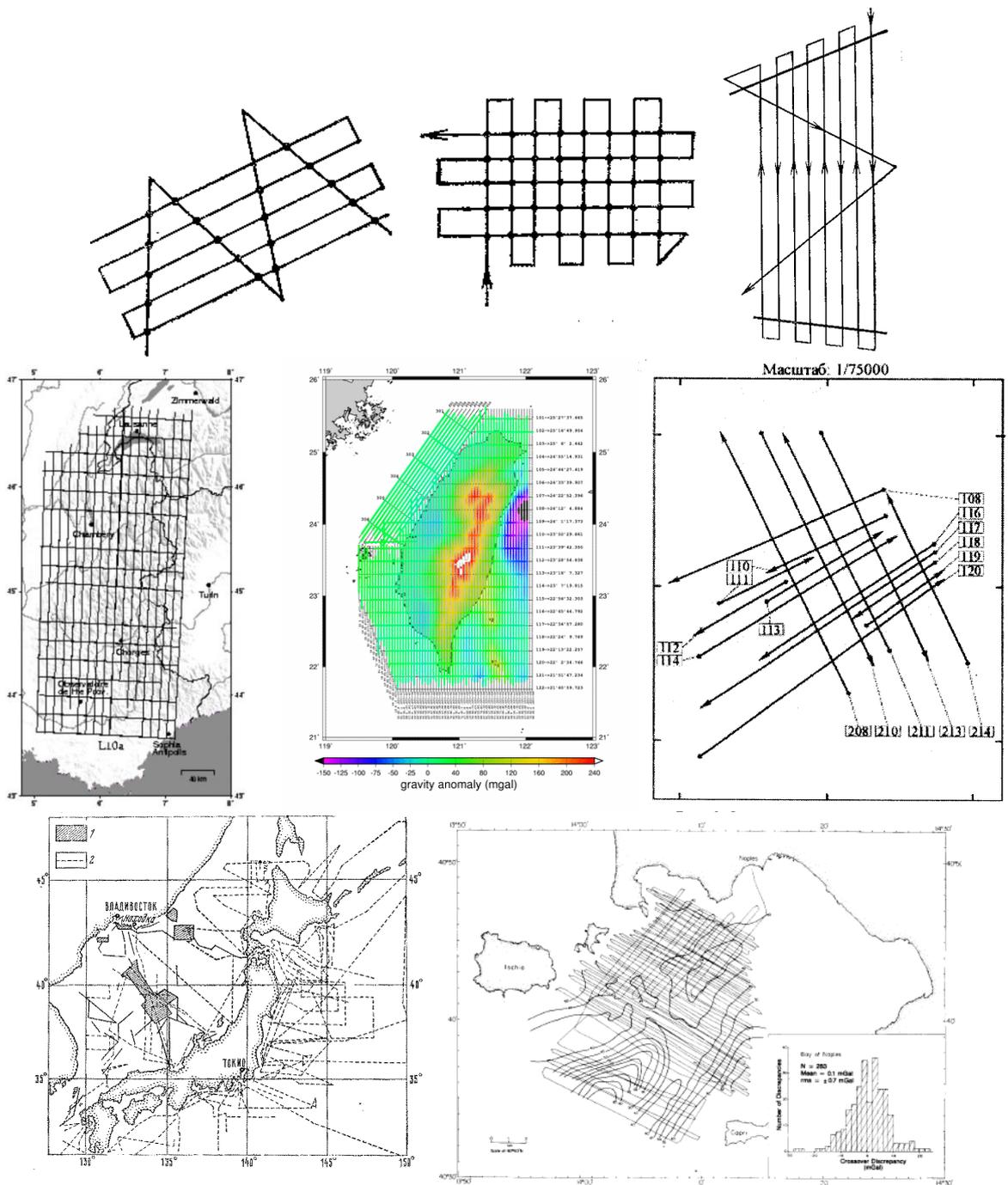


Рисунок 1 – Базовые схемы, а также конкретные примеры покрытия исследуемых регионов галатами. Построение измерительных карт гравиметрических профилей.

1 Концепция технологии морских векторных гравиметрических измерений, предпосылки её практической реализации

Реализация алгоритмического обеспечения комплекса осуществляется методом гравиинерциальных технологий, сочетающих измерение вектора УСТ с возможностями бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) по надежному информационному обеспечению задач навигации, ориентации и управления различными подвижными объектами [8].

БИНС в настоящее время являются превалирующими навигационными системами в задачах информационного обеспечения целевых заданий различных подвижных объектов. БИНС обеспечивают автономность решения задач навигации, ориентации и управления при практической невозмущаемости системы и абсолютной доступности по условиям применения. Они составляют информационное ядро современных комплексов навигации, ориентации и управления, обеспечивая высокую целостность информационно-измерительных комплексов на базе бесплатформенных инерциальных технологий [9].

Важным преимуществом БИНС является возможность идентификации в рабочем режиме выходных погрешностей собственно БИНС и инструментальных погрешностей её инерциальных измерительных элементов как в автономном режиме при особых условиях движения объекта управления, так и в режиме коррекции от внешних источников навигационной информации. Возможности коррекции БИНС на интервалах доступности спутниковых навигационных систем (СНС) наиболее полно исследованы и опубликованы [10]. Наиболее актуальной современной проблемой является обеспечение достаточной точности автономной подводной навигации при недоступности СНС. Векторные гравиметрические измерения открывают дополнительные возможности решения этой проблемы.

Непосредственные гравиметрические измерения являются основой современных технологий гравиметрии, практическая реализация которых, равно как и точность их проведения, определяются целевым их назначением и условиями их проведения.

Возможность достижения достаточной для практического использования точности гравиметрической съемки находится на грани технических возможностей реализации датчиковой аппаратуры и сопровождается непреодолимыми помехами, например, микросейсм от гравитационных волн отдаленных землетрясений и от стоячих волн во время штормов в морях и океанах, происходящих непрерывно в осенне-весенний и зимний период. Из периодических возмущений при точных гравиметрических измерениях

следует учитывать лунно-солнечные притяжения, достигающие 0,16452 мГал и 0,07576 мГал, соответственно. Очевидно, исходя из перечисленных обстоятельств, требования к точности разрабатываемой аппаратуры должны быть разумно ограничены, исходя из условий решения поставленной задачи, ориентируясь на достигнутые характеристики точности датчиковой аппаратуры.

В настоящее время в зависимости от условий проведения и задач гравиметрической съемки успешно используются спутниковые, авиационные, морские и наземные технологии реализации гравиметрических измерений. Так достижения геоспутниковой отечественной альтиметрии позволили непосредственно измерить аномалии гравитационного потенциала в морях и океанах и создать равномерную сеть наблюдений по всей поверхности Земли. Достигнутая степень детализации геопотенциала обеспечивает картографирование аномалий гравитационного поля Земли по осредненным значениям в трапециях размера $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ [6].

Вместе с тем экономическая целесообразность требует детализации гравитационных аномалий, как по точности гравиметрической съемки, так и по плотности позиционирования максимального проявления гравитационных аномалий для последующего снижения себестоимости практической их разработки.

Практические цели применения результатов гравиметрической съемки в традиционной технологии достигаются морской и аэрогравиметрией с применением гравиинерциального метода измерения, использующего, как правило, гиостабилизированные платформы для создания в процессе движения носителя наиболее благоприятные условия работы ГД, изолируя его измерения от угловых колебаний носителя гравиметрического комплекса.

На практике для измерения УСТ на подвижном основании используются весьма высокоточные статические гравиметры, реже – маятниковые приборы и струнные гравиметры, относящиеся к среднему классу точности. Однако статические гравиметры отличаются относительно большими массой и габаритами, а также высокими энергопотреблением и стоимостью.

Наиболее точным современным методом, например, решения геолого-поисковых задач на шельфе является морская гравиметрия. Точность непосредственных измерений величины УСТ, достигнутая морскими гравиметрическими комплексами отечественного исполнения, составляет по систематической погрешности измерений 0,09...0,22 мГал при вертикальных ускорениях порядка 22...80 Гал (СКО) в океанских акваториях и 15...30 Гал в акваториях Черного и Баренцева морей. При этом после камеральной обработки обеспечивается точность измерений соответственно 0,10...0,37 мГал и 0,06...0,11 мГал,

соответственно [6]. Полученные результаты измерений достаточны для региональных геофизических съемок, при уточнении данных о фигуре Земли, а также при решении ряда других задач, в том числе и задач навигации. Отечественные достижения в этой области позволяют картографировать гравитационные поля в масштабе 1:50000 с точностью достаточной для оконтуривания газонефтяных месторождений. Однако стоимость морских площадных съемок весьма высока, поскольку исследуемые районы покрываются сетью взаимно перпендикулярных галсов с расстояниями между ними от 0,5 до 10 км и, следовательно, определяется стоимостью эксплуатации судна [6].

Для детализации спектра гравитационных аномалий при минимальных затратах, а также для проведения работ на мелководье представляется целесообразным использовать малоразмерные подводные аппараты (МПА) в качестве носителей гравиметрических комплексов. Автоматизированные подводные роботы ограниченного радиуса действия позволят при минимальных затратах детализировать масштабную площадную съемку с целью сокращения затрат при максимально возможном разрешении. Для практической реализации такой технологии гравиметрической съемки требуется разработать БГНК, сочетающий преимущества инерциального способа измерений с возможностью его реализации в минимальном массогабаритном исполнении. Современная тенденция роботизации морских работ является достаточной технической основой для выбора носителя такого БГНК при реализации новой технологии векторной морской гравиметрии, основные положения которой впервые предложены в разработках кафедры №305 МАИ [7].

Концепция разработки новой технологии векторной морской гравиметрии предполагает создание бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса, обеспечивающего непосредственные измерения гравитационных аномалий в процессе движения АНПА.

Центральной проблемой решения поставленной задачи, является разработка малогабаритного векторного ГД, обеспечивающего его применение на малоразмерных носителях.

Технической предпосылкой создания малогабаритного векторного помехозащищенного гравиметрического датчика (ВПГД) – трехкомпонентного модуляционного динамического гравиметра (ТМДГ) [9] является использование для построения его чувствительного элемента (ЧЭ) отечественного научно-технического потенциала, достигнутого в разработке маятниковых акселерометров (МА). Промышленно изготавливаемые методами планарной технологии из высокодобротных стабильных конструкционных материалов МА обладают высокой разрешающей

способностью при малых массогабаритных характеристиках (10-20 г, 1-3 см³). Компенсационный принцип измерения, принятый в этих МА, обеспечивает стабилизацию маятника вблизи положения равновесия, малую чувствительность к боковым ускорениям и высокое быстродействие (постоянная времени порядка 1 мс). Диапазон измерения МА по прямому назначению обычно составляет 10-50 г, что является значительным резервом повышения их точности в меньшем диапазоне, исходя из условий их применения на АНПА. При этом для использования МА в качестве ЧЭ ВПГД необходимо обеспечить высокую точность измерения вектора кажущегося ускорения путем автоматической компенсации его инструментальных и методических погрешностей при достаточной стабильности нуля-пункта, исходя из продолжительности автономной работы АНПА, выбранного в качестве носителя ВПДГ.

Другой предпосылкой обеспечения достаточной точности гравиметрической съемки являются динамические характеристики САУ отечественных АНПА, обеспечивающие высокую равномерность хода и точность стабилизации номинального движения. Эти обстоятельства при высокой точности измерения глубины движения практически обеспечивают носителю БГНК роль стабилизированной платформы, изолирующей гравиметрический датчик от влияния существенных негативных воздействий. Перечисленные обстоятельства создают необходимые условия для непосредственного измерения истинной вертикали, которые, в свою очередь, могут быть использованы для идентификации и компенсации влияния систематических погрешностей гироскопов – одного из основных источников навигационных погрешностей БИНС.

Достаточной предпосылкой успешной реализации проекта создания БГНК в полном объеме являются разработки кафедры 305 МАИ, реализованные в процессе выполнения ряда работ по заказам промышленности. Более полно возможности кафедры представлены в монографии [9].

1.1 Оценка возможностей создания векторного гравиметрического датчика

Реализация предлагаемой концепции морской гравиметрии определяется техническими возможностями создания прецизионного гравиметрического датчика малогабаритного исполнения, обеспечивающего измерение вектора кажущегося ускорения в процессе движения АНПА с точностью соизмеримой с достигнутым значением нуля-пункта в гравиметрических датчиках специально исполнения.

Гравиметрические ЧЭ отечественных ГНК при полосе пропускания 100 Гц имеют случайную составляющую погрешности 0,1-0,2 мГал (σ) за время осреднения 60 с при

нестабильности масштабного коэффициента 0,01%. Погрешность измерения аномалии УСТ при этом составляет 0,2 мГал (σ) для узкодиапазонного канала (0,25g) и 0,43 мГал (σ) для широкодиапазонного канала (0,5g). Вес ГНК при этом имеет 55 кг и размеры $\varnothing 430 \times 450$ мм. Указанные технические характеристики гравиметрических ЧЭ специального исполнения не решают проблемы векторных гравиметрических измерений. Альтернативой этому решению является использование отечественных достижений акселерометрии широкого применения.

Технические характеристики отечественных МА промышленно изготавливаемых методами планарной технологии из высокодобротных стабильных конструкционных материалов (кварц, кремний, лейкосапфир) имеют разрешающую способность 0,1-1 мГал при стабильности нуля-пункта порядка 10^{-4} (m/c^2)/час и обладают малыми массогабаритными характеристиками. Нестабильность масштабного коэффициента достигает 0,035%. Компенсационный принцип измерения, принятый в этих МА, обеспечивает стабилизацию маятника (М) вблизи положения равновесия, малую чувствительность к боковым ускорениям и высокое быстродействие. Указанные характеристики соответствуют широкому диапазону измерений и могут быть существенно улучшены в более узком диапазоне измерения, соответствующем применению АНПА при гравиметрической съемке.

Для использования акселерометров в качестве базового элемента ГД необходимо разработать специальные режимы их функционирования, а также конструкцию ГД, отвечающую поставленным задачам.

Вариантом решения проблемы является применение динамического модуляционного метода измерения УСТ, сущность которого заключается в следующем (рис. 2). Принятые на рисунке обозначения: Z_1, Z_2 – развязанные между собой соединения с «землей» МА₁ и МА₂; М_{1,2} – маятники; ДУ_{1,2} – датчики угла; ПУ_{1,2} – предварительные усилители; КЗ_{1,2} – корректирующие звенья; УМ_{1,2} – усилители мощности; ДМ_{1,2} – датчики момента; $R_{н1,2}$ – нагрузочные сопротивления; ВПУ_{1,2} – выходные прецизионные усилители; $R_{нд}$ – дополнительное нагрузочное сопротивление; СД – синхронный детектор; И – интегратор; ГУЧ – генератор управляемой частоты; ВУ – входной усилитель; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП_{1,2} – аналого-цифровые преобразователи.

На вход контура стабилизации углового положения вертикально расположенного М₁ подается гармоническое калиброванное воздействие с частотой, близкой к собственной частоте колебаний М₁, что приводит к периодическому смещению его положения равновесия. При этом на выходе контура стабилизации (ДУ₁–ДМ₁) формируется соответствующее управляющее воздействие. При несовпадении собственной

2. погрешности, порождаемые влиянием механического и магнитоиндукционного демпфирования;
3. погрешности, порождаемые боковыми вибрациями основания;
4. погрешности, порождаемые принудительной модуляцией и зависимостью ряда параметров МА $J_{zц}(\alpha), J_{xy}(\alpha), J_x(\alpha), J_y(\alpha), J_z(\alpha), J_{дм}(\alpha), k_y(\alpha), c_{дy}(\alpha), c_{тп}(\alpha), b_{г}(\alpha), b_{дм}(\alpha), b_{дy}(\alpha), b_{вт}(\alpha), l(\alpha), k_{дм}(\alpha), k_{дy}(\alpha)$ от угла отклонения упругого маятника.

Исследования, проведенные в процессе выполнения проекта, показали, что:

- погрешность, обусловленная нелинейной зависимостью периода свободных колебаний упругого физического М от амплитуды колебаний, может быть существенно снижена путем алгоритмической компенсации, реализуемой в реальном масштабе времени;
- погрешность, обусловленная влиянием свободных составляющих переходного процесса в цепи стабилизации МА, при рациональном выборе параметров контура и, соответственно, малом времени регулирования переходного процесса (порядка 0,00015 с) может быть достаточно мала;
- погрешность, порождаемая влиянием механического и магнитоиндукционного демпфирования, также может быть достаточно уменьшена при уменьшении влияния собственного демпфирования маятника за счет, например, введения дифференцирующей положительной обратной связи в МА;
- погрешность, обусловленная вибрациями основания, эффективно компенсируется в разгружающем режиме МА₂.

Поскольку основные возмущающие факторы локализуются в процессе совершенствования конструкции и алгоритмического обеспечения ГД, гравиметрический датчик, построенный по исследованному принципу, будем называть векторным помехоустойчивым гравиметрическим датчиком.

Поскольку изменение режимов работы акселерометров практически нарушает их номинальное функционирование, представляет интерес разработка методов повышения точности измерения путем технологии его испытаний в процессе производства.

1.2 Аналитическая юстировка и калибровка инерциального измерительного блока БИНС

Эффективным решением проблемы повышения точности измерений вектора кажущегося ускорения является использование функционально избыточных (ФИ) инерциальных измерительных блоков (ИИБ). ФИ ИИБ обеспечивают автономное

повышение точности и оценку состояния ИИБ по погрешности измерения, контролируя целостность блока в процессе его эксплуатации. При этом требования к необходимой точности ориентации измерительных осей датчиков в установочной системе координат ИИБ (юстировка блока) вступают в противоречие с техническими возможностями их обеспечения путем прецизионной обработки установочных баз измерительных элементов.

Преодоление указанных ограничений достигается аналитической юстировкой (Ю) и калибровкой (К) блоков акселерометров (БА) и гироскопов (БГ), когда альтернативой техническому решению выступает аналитическая идентификация реальных параметров юстировки измерительных систем. Реализация аналитической юстировки и калибровки позволяет значительно снизить технологические требования к изготовлению блоков, поскольку в этом случае возможна реализация конструкции блока по свободным допускам, используя общедоступное оборудование. Другим важным преимуществом рассматриваемого технического решения является возможность эксплуатации ИИБ по текущему его состоянию, используя возможность периодической калибровки блоков в процессе их эксплуатации. Приоритет решения этой проблемы принадлежит МАИ [11,12].

Аналитическая Ю и К реализуется в отношении блоков измерителей проекций векторных величин, к которым относятся БА и БГ БИНС. В процессе испытаний блока осуществляется идентификация ориентации измерительных осей датчиков (e_i) в системе координат, связанной с установочными базами блока, а также оценка постоянных на данном включении инструментальных погрешностей, таких как смещение нулевых сигналов датчиков, погрешность масштабных коэффициентов и нелинейность их выходных характеристик. При включении в вектор оцениваемых параметров масштабного коэффициента датчиков (K_i) погрешность масштабных коэффициентов исключается из вектора оцениваемых параметров.

Теоретические основы аналитической юстировки и калибровки блоков заключаются в задании в базовой системе координат блока строгой последовательности эталонных воздействий (V_j) и измерении датчиками блока соответствующих им выходных сигналов (u_{ij}). Для каждого датчика блока справедливо уравнение измерений:

$$u_{ij} = K_i (e_i \cdot V_j + \Delta u_{ij}) + \Delta_{ij}, \quad (1)$$

где K_i – масштабный коэффициент датчика на данном включении, Δu_{ij} – вектор инструментальных погрешностей i -го датчика на j -ом включении, Δ_{ij} – невязка модели (1) при j -ом измерении.

Согласно (1) для N измерений ($j=1 \dots N$) составляется система линейных уравнений в отношении вектора \mathbf{Q} , компоненты которого представляют собой нелинейную комбинацию вектора оцениваемых параметров:

$$\mathbf{U} = [\mathbf{B}]\mathbf{Q} + \Delta. \quad (2)$$

Решение системы уравнений (2) в отношении вектора \mathbf{Q} вычисляется по методу наименьших квадратов:

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{B}^T [\mathbf{P}] \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T [\mathbf{P}] \mathbf{U}; \quad (3)$$

$$\mathbf{Q} = [q_1, \dots, q_i, \dots, q_k]^T; \quad (4)$$

$$\mathbf{U} = [u_{i1}, \dots, u_{ij}, \dots, u_{iN}]^T, \quad (5)$$

где матрица $[\mathbf{P}]$ является матрицей весовых коэффициентов.

Оценка (3) в случае нормального закона распределения вектора невязок Δ является оценкой максимального правдоподобия, однако для реализации экстремальных её свойств необходимо знание числовых характеристик \mathbf{K}_Δ закона распределения вектора Δ :

$$[\mathbf{P}] = [\mathbf{K}_\Delta]^{-1}.$$

Отсутствие таковых приводит к квазиправдоподобным оценкам компонент вектора \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{U}, \quad (6)$$

алгоритм определения которых проще и в ряде случаев может быть представлен в явном виде. Решение (6) существует, если ранг прямоугольной матрицы $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ равен размерности вектора оцениваемых параметров.

Компоненты вектора \mathbf{Q} определяются как функции оцениваемых параметров, которые включают: масштабный коэффициент датчика K_i ; направляющие косинусы ориентации измерительных осей датчиков в системе координат (СК) «О» (e_{ix}, e_{iy}, e_{iz}); смещение нулевого сигнала датчика (p_{i1}) и коэффициент нелинейности (p_{i2}) выходной характеристики датчика.

1.3 Методика и алгоритм аналитической юстировки и калибровки блока акселерометров

Аналитическую Ю и К блока акселерометров проведем в поле вектора силы тяжести \mathbf{g}_T , используя двухстепенный инструмент позволяющий устанавливать ось шпинделя инструмента под углом α над горизонтом в месте испытаний БА и осуществлять поворот приспособления с БА вокруг оси шпинделя на заранее рассчитанные углы β_j , как это показано на рис. 3.

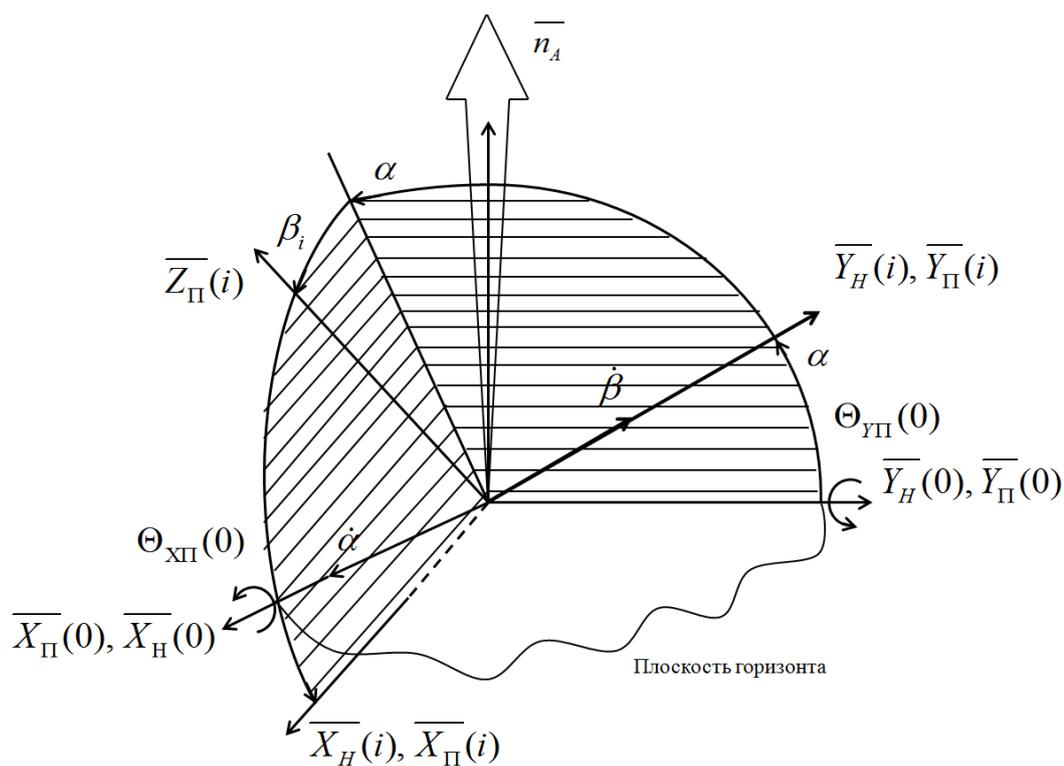


Рисунок 3 – Схема проведения испытаний блока акселерометров

С инструментом свяжем систему координат с осями $\mathbf{X}_H, \mathbf{Y}_H, \mathbf{Z}_H$, совпадающую первоначально с осями приспособления $\mathbf{X}_П, \mathbf{Y}_П, \mathbf{Z}_П$, в котором устанавливается БА, как это показано на рис. 4.

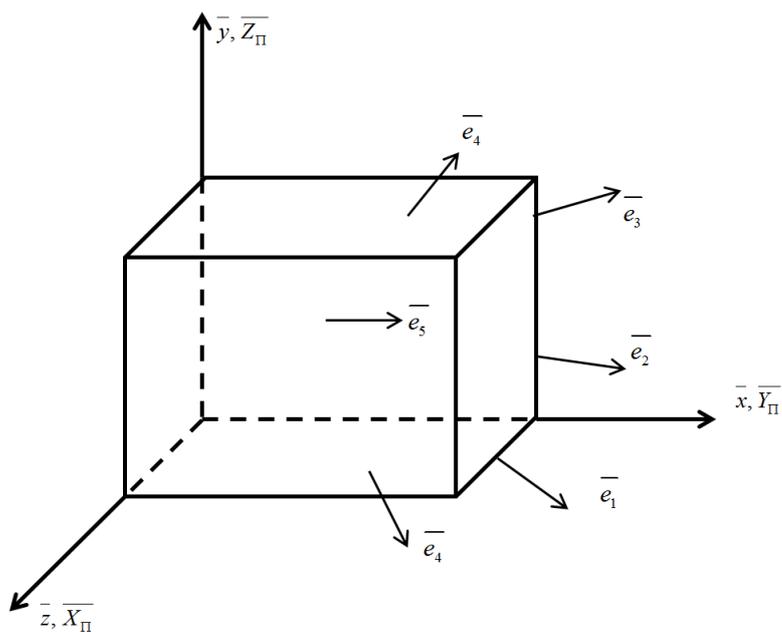


Рисунок 4 – Блок измерительных элементов в осях приспособления

Оси **X, Y** СК «И» и СК «П» первоначально устанавливаются в горизонт, а затем поворачиваются на угол α вокруг осей $X_{И}(0), X_{П}(0)$, величина которого рассчитывается по точности задания эталонных воздействий:

$$\alpha_{\text{опт}} = \arctg\left(\frac{D_{\theta_x} + D_{\delta\alpha} + \frac{D_{\delta\beta}}{N}}{2D_{\theta_x} + 2D_{\delta\alpha} + D_{\theta_y}}\right)^{1/4}, \quad (7)$$

где символом D обозначены дисперсии погрешностей выставки в горизонт и задания углов α, β_j ; N – число эталонных воздействий; $\alpha_{\text{опт}}$ – оптимальный по минимуму усредненной по трехмерному пространству погрешности задания эталонных воздействий угол установки оси шпинделя инструмента.

При испытаниях БА на неподвижном относительно Земли основании, например, в процессе изготовления блока, идеальное значение вектора кажущегося ускорения соответствует с обратным знаком вектору силы тяжести $\mathbf{n}_A = -\mathbf{g}_T$ в месте эксперимента. Это позволяет рассчитать идеальные значения вектора кажущегося ускорения в осях СК «П», по алгоритму:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{jn} &= \mathbf{g}_T [-\cos\alpha \sin\beta_j, \sin\alpha, \cos\alpha \cos\beta_j]^T; \\ \beta_j &= \frac{360^\circ}{N} (j-1), j=1, \dots, j, \dots, N, \end{aligned} \quad (8)$$

поскольку направление вектора кажущегося ускорения соответствует орту местной геодезической вертикали в месте эксперимента.

Значение величины вектора силы тяжести определяется с высокой точностью по результатам геодезической привязки места испытаний:

$$g_T(\varphi, h) = 9,78030 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi - 2\omega_0^2 h, \quad (9)$$

где φ – геодезическая широта места испытаний; h – превышение места испытаний над эллипсоидом, аппроксимирующим земную поверхность; $\omega_0^2 = 1,543 \cdot 10^{-6} \text{c}^{-2}$ – квадрат частоты Шулера.

Первое измерение выходных сигналов акселерометров блока ($j=1$) осуществляется после установки оси $Y_{П}$ приспособления на угол α от плоскости горизонта. Последующие измерения производятся по мере установки каждого угла β_j согласно алгоритму (8).

Поскольку вектор входных воздействий задается в СК «П», то и ориентацию измерительных осей датчиков блока целесообразно определять в этой же системе координат: $\mathbf{e}_{П} = [\mathbf{e}_{1П}, \mathbf{e}_{2П}, \mathbf{e}_{3П}]^T$. Для определения же характеристик юстировки в базовой

системе координат, связанной с установочными базами блока: $\mathbf{e}_o = [e_x, e_y, e_z]^T$, следует учесть установку БА в СК «П» приспособления в процессе испытаний: $\mathbf{e}_\Pi = [A_{o/\Pi}] \mathbf{e}_o$.

Согласно рис. 4 матрица ориентации СК «О» относительно СК «П» имеет вид:

$$A_{o/\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

При повороте же БА в приспособлении на 180° изменяются знаки элементов матрицы:

$$A_{o/\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

что приводит к смене знака характеристик юстировка БА в СК «П»:

$$\mathbf{e}_\Pi^* = [-e_{1\Pi}, -e_{2\Pi}, e_{3\Pi}]^T. \quad (11)$$

Согласно (1) для каждого датчика БА уравнение измерений принимает вид:

$$u_j = K_i (\mathbf{e}_\Pi \cdot \mathbf{n}_{j\Pi} + \Delta U_j) + \Delta_j, \quad (12)$$

где K_i – масштабный коэффициент i -го датчика БА; $\mathbf{n}_{j\Pi}$ – вектор входного воздействия j -го измерения в проекциях на оси СК «П»; ΔU_j – инструментальная погрешность измерения датчика БА при j -ом входном воздействии; \mathbf{e}_Π – единичный вектор ориентации измерительной оси акселерометра в СК «П»; Δ_j – величина невязок j -го измерения.

$$\Delta U_j = \Delta a_0 + \Delta a_1 + \Delta a_2 (\mathbf{e}_\Pi \cdot \mathbf{n}_{j\Pi}) + \Delta a_3 (\mathbf{e}_\Pi \cdot \mathbf{n}_{j\Pi})^2, \quad (13)$$

где Δa_0 – вариация нулевого сигнала датчика; Δa_1 – смещение нуля; Δa_2 – коэффициент ошибки масштабного коэффициента; Δa_3 – коэффициент ошибки нелинейности выходной характеристики.

Согласно (9), (13) с учетом оценки K_i уравнения (12) принимают вид:

$$u_j = K_i (e_{1\Pi} n_{1j\Pi} + e_{2\Pi} n_{2j\Pi} + e_{3\Pi} n_{3j\Pi}) + K_i [\Delta a_1 + \Delta a_3 (e_{1\Pi} n_{1j\Pi} + e_{2\Pi} n_{2j\Pi} + e_{3\Pi} n_{3j\Pi})^2] + \Delta_j. \quad (14)$$

При повторении программы испытаний с блоком, повернутым в приспособлении на 180° , измерениям согласно (11) соответствуют уравнения:

$$u_j^* = K_i (-e_{1\Pi} n_{1j\Pi} - e_{2\Pi} n_{2j\Pi} + e_{3\Pi} n_{3j\Pi}) + K_i [\Delta a_1 + \Delta a_3 (-e_{1\Pi} n_{1j\Pi} - e_{2\Pi} n_{2j\Pi} + e_{3\Pi} n_{3j\Pi})^2] + \Delta_j. \quad (15)$$

Сгруппируем уравнения (14), (15) по характеру проявления оцениваемых параметров принимая во внимание, что $n_{2j\Pi} = g_T \sin \alpha$ в процессе испытаний является известной постоянной величиной:

$$u_j = K_i (\Delta a_1 + e_{2П} n_{2П} + \Delta a_3 e_{2П}^2 n_{2П}^2) + K_i e_{1П} n_{1П} + K_i e_{3П} n_{3П} + K_i \Delta a_3 (e_{1П}^2 n_{1П}^2 + e_{3П}^2 n_{3П}^2 + 2e_{1П} e_{2П} n_{1П} n_{2П} + 2e_{1П} e_{3П} n_{1П} n_{3П} + 2e_{2П} e_{3П} n_{2П} n_{3П}) + \Delta_j; \quad (16)$$

$$u_j^* = K_i (\Delta a_1 - e_{2П} n_{2П} + \Delta a_3 e_{2П}^2 n_{2П}^2) - K_i e_{1П} n_{1П} + K_i e_{3П} n_{3П} + K_i \Delta a_3 (e_{1П}^2 n_{1П}^2 + e_{3П}^2 n_{3П}^2 + 2e_{1П} e_{2П} n_{1П} n_{2П} - 2e_{1П} e_{3П} n_{1П} n_{3П} - 2e_{2П} e_{3П} n_{2П} n_{3П}) + \Delta_j. \quad (17)$$

Анализ соотношений (16), (17) показывает, что, формируя совместную обработку измерений БА, можно упростить математическую модель их описания. Пусть измерения формируются по сумме измерений каждого датчика блока, тогда:

$$U_{lj} = \frac{u_j + u_j^*}{2} = K_i (\Delta a_1 + \Delta a_3 e_{2П}^2 n_{2П}^2) + 2K_i \Delta a_3 e_{1П} e_{2П} n_{2П} n_{1П} + K_i e_{3П} n_{3П} + K_i \Delta a_3 e_{1П}^2 n_{1П}^2 + K_i \Delta a_3 e_{3П}^2 n_{3П}^2 + \Delta_j = q_{1,1} + q_{1,2} n_{1П} + q_{1,3} n_{3П} + q_{1,4} n_{1П}^2 + q_{1,5} n_{3П}^2 + \Delta_j, \quad (18)$$

где $q_{i,j}$ – компоненты вектора идентифицируемых параметров согласно алгоритму (6).

$$\mathbf{Q}_1 = [q_{1,1}, q_{1,2}, q_{1,3}, q_{1,4}, q_{1,5}]^T; \quad (19)$$

$$q_{1,1} = K_i (\Delta a_1 + \Delta a_3 e_{2П}^2 n_{2П}^2), \quad q_{1,2} = 2K_i \Delta a_3 e_{1П} e_{2П} n_{2П},$$

$$q_{1,3} = K_i e_{3П}, \quad q_{1,4} = K_i \Delta a_3 e_{1П}^2, \quad q_{1,5} = K_i \Delta a_3 e_{3П}^2.$$

Разности измерений соответствует система уравнений вида:

$$U_{2j} = \frac{u_j - u_j^*}{2} = K_i e_{2П} n_{2П} + K_i e_{1П} n_{1П} + 2K_i \Delta a_3 e_{2П} e_{3П} n_{2П} n_{3П} + 2K_i \Delta a_3 e_{1П} e_{3П} n_{1П} n_{3П} + \Delta_j = q_{2,1} + q_{2,2} n_{1П} + q_{2,3} n_{3П} + q_{1,4} n_{1П} n_{3П} + \Delta_j. \quad (20)$$

Размерность вектора \mathbf{Q} в этом случае равняется четырем и принимает вид:

$$\mathbf{Q}_2 = [q_{2,1}, q_{2,2}, q_{2,3}, q_{2,4}]^T; \quad (21)$$

$$q_{2,1} = K_i e_{2П} n_{2П}, \quad q_{2,2} = K_i e_{1П}, \quad q_{2,3} = 2K_i \Delta a_3 e_{2П} e_{3П} n_{2П}, \quad q_{2,4} = 2K_i \Delta a_3 e_{1П} e_{3П}.$$

Используя решения системы (6) для векторов \mathbf{Q}_1 и \mathbf{Q}_2 для каждого датчика блока вычисляются:

- Масштабный коэффициент

$$K_i = \left(\frac{q_{2,1}^2}{g_T^2 \sin^2 \alpha} + q_{2,2}^2 + q_{1,3}^2 \right)^{1/2}. \quad (22)$$

- Направляющие косинусы ориентации измерительной оси датчика в СК «П»

$$e_{1П} = \frac{q_{2,2}}{K_i}, \quad e_{2П} = \frac{q_{2,1}}{K_i g_T \sin \alpha}, \quad e_{3П} = \frac{q_{1,3}}{K_i}. \quad (23)$$

- Смещение нулевого сигнала

$$\Delta a_1 = q_{1,1} - \frac{q_{1,4} q_{2,1}^2}{q_{2,2}^2 K_i}. \quad (24)$$

- Коэффициент нелинейности выходной характеристики

$$\Delta a_3 = \frac{q_{1,4}}{e_{1,л}^2 K_i} = K_i \frac{q_{1,4}}{q_{2,2}^2}. \quad (25)$$

Проведенные исследования показали, что обусловленность решения улучшается при увеличении числа измерений и зависит от угла установки оси шпинделя инструмента над горизонтом. При числе измерений до 24-х оптимальный диапазон установки оси шпинделя над горизонтом согласно методике (9) составляет от 40^0 до 55^0 . Уточнять значение угла $\alpha_{\text{опт}}$ следует исходя из точности задания эталонных воздействий по алгоритму (7).

Ковариационный анализ потенциальной точности аналитической юстировки и калибровки по методике (8) показал, что дисперсия оценок смещения нуля $D\delta p_{1i}$, масштабного коэффициента $D\delta K_i$ и характеристик юстировки блока акселерометров можно рассчитать согласно алгоритму:

$$D\delta p_{1i} = \frac{D\Delta u_{\text{изм.}}}{2NK_i^2} + \frac{Dp_{0i}}{2N} + \frac{g_T^2 \cos^2 \alpha}{4N} (1-r_{iz}^2) D\delta \beta_i; \quad (26)$$

$$D\delta K_i = K_i^2 ((D\theta_x + D\delta\alpha)[(1-r_{i2}^2)tg^2\alpha + r_{i2}^2(r_{i2}^2 ctg^2\alpha - 2(1-r_{i2}^2))] + \frac{D\delta\beta}{2N} [(1-r_{i2}^2)^2 + \frac{3}{2}r_{i2}^2(1-r_{i2}^2)ctg^2\alpha + 2r_{i1}^2r_{i3}^2] + \frac{D\Delta u_{\text{изм.}}}{Ng_T^2} [\frac{2}{\cos^2\alpha}(1-r_{i2}^2) + \frac{r_{i2}^2}{\sin^2\alpha}]); \quad (27)$$

$$D|\theta_i| = (D_{\theta_x} + D_{\delta\alpha}) [r_{i2}^2(1-r_{i2}^2)(tg^2\alpha + ctg^2\alpha + 2)] + \frac{D\theta_y}{\cos^2\alpha} (1-r_{i2}^2) + \frac{D\delta\beta}{2N} [\frac{3}{2}(1-r_{i2}^2)ctg^2\alpha + (1-r_{i2}^2)(3+r_{i2}^2) - 2r_{i1}^2r_{i3}^2] + \frac{D\Delta u_{\text{изм.}}}{NK_i^2 g_T^2} [\frac{2}{\cos^2\alpha}(1-r_{i2}^2) + \frac{1}{2\sin^2\alpha}(1-2r_{i2}^2)], \quad (28)$$

где K_i – масштабный коэффициент датчика акселерометра, В/г; r_{ij} – направляющий косинус ориентации измерительной оси i -го по отношению к j -ой оси приспособления, используемого для установки БА; g_T – величина вектора входного воздействия; N – число измерений выходных сигналов датчиков блока; α – угол установки над плоскостью горизонта оси инструмента, используемого для точного поворота на заранее рассчитанные углы β_i , рад.; $D\delta p_{0i}$ – дисперсия вариации нулевого сигнала датчиков, g^2 ; $D\theta_x, D\theta_y$ – дисперсии ошибок установки инструмента в горизонт в первоначальном положении, рад²; $D\delta\alpha, D\delta\beta$ – дисперсии ошибок задания инструментом углов α, β_j , рад.².

В работе [4] показано, что оценки потенциальной точности аналитической Ю и К блока датчиков абсолютной угловой скорости аналогичны полученным, если в алгоритмах оценки положить:

$$D\delta\alpha = D\delta\chi + D\delta\varphi, D\theta_y = D_{\theta_y}^* \sin^2\varphi + D\delta\psi \cos^2\varphi, \quad (29)$$

где $D\delta\chi$ – дисперсия ошибки установки оси инструмента над плоскостью, перпендикулярной вектору входного воздействия, рад.²; $D_{\theta_y}^*$, $D\delta\psi$ – дисперсии ошибок первоначальной установки инструмента в горизонт и плоскость меридиана, рад.²; $D\delta\varphi$ – дисперсия ошибки привязки места расположения инструмента по широте, рад.²; φ – номинальное значение широты места расположения инструмента.

Качественный анализ полученных оценок позволяет заключить, что точность юстировки и калибровки существенно зависит от ориентации измерительных осей датчиков в базовой системе координат инструмента. Погрешность, обусловленная ошибками измерения входного сигнала датчика, вариацией его нулевого сигнала, а также ошибками задания углов β_j могут быть снижены до требуемой величины рациональным выбором числа измерений. Ошибки же установки в плоскость горизонта, в плоскость меридиана, угла α , а также привязки места расположения инструмента по широте приводят к неустранимым погрешностям юстировки и калибровки масштабного коэффициента датчиков.

Результаты численного моделирования возможностей аналитической юстировки и калибровки при использовании в качестве инструмента для приведения испытаний оптической делительной головки ОДГ-1, обеспечивающей установку углов β_j с погрешностью не превышающей $\delta\beta_j = 3''$ (3σ) выполнены для ФИ ИИБ конусной структуры из шести датчиков с полууглом раствора конуса $54,7^\circ$. При этом полагалось, что погрешности инструмента составляют $\delta\alpha, \delta\beta_j = 3''$ (3σ), $\theta_x, \theta_y = 1''$. Расчеты показали, что при $\alpha_{\text{опт}} = 40^\circ$ значения погрешностей идентификации только от погрешностей инструмента не превысят (3σ): по смещению нуля акселерометра – $1.5 \cdot 10^{-5} \text{g}$; по ошибке масштабного коэффициента – $3 \cdot 10^{-4} \%$; по ошибке юстировки – 4 угл. с. Значения предельных погрешностей (с вероятностью 95%) от всех возмущающих факторов приведены в табл. 1. В расчетах принималось, что вариация нулевого сигнала акселерометров не превышает $2 \cdot 10^{-5} \text{g}$.

Таблица 1 Точность идентификации инструментальных погрешностей блока акселерометров

Число измерений	Ошибка смещения нуля, 10^{-5} g	Ошибка масштабного коэффициента, %	Ошибка юстировки, угл. с
N=12	1,2	0,0028	7,4
N=24	0,89	0,0020	5,4
N=36	0,34	0,0008	2,3

В отношении блока датчиков абсолютной угловой скорости принимались следующие условия: вариация нулевого сигнала – 0,04 град/ч; масштабный коэффициент – 0,6 угл. с/имп., время замера выходного сигнала – 100 с, погрешность инструмента, помимо указанных выше, дополняется ошибкой установки в плоскость меридиана $\delta\psi$, ошибкой привязки по широте $\delta\phi$, ошибкой измерения интервала времени – 10 мкс. Указанные погрешности инструмента определяют $\alpha_{\text{онт}}=39^{\circ}$. Значения предельных погрешностей (с вероятностью 95%) от всех возмущающих факторов приведены в табл. 2.

Таблица 2 Точность идентификации инструментальных погрешностей блока гироскопов

Число измерений	Ошибка дрейфа, град/час	Ошибка масштабного коэффициента, %	Ошибка юстировки, угл. с
N=12	0,0056	0,036	36
N=24	0,0038	0,025	26
N=36	0,0016	0,010	10

Приведенные результаты демонстрируют высокую эффективность аналитической юстировки и калибровки при проведении испытаний в упрощенном варианте при использовании доступного стандартного оборудования для периодической проверки состояния функционально избыточных инерциальных измерительных блоков БИНС в процессе их эксплуатации.

1.4 Обоснование выбора носителя БГНК

В настоящее время существует значительное количество подводных аппаратов, имеющих обширную классификацию для решения различных целевых задач в условиях полного погружения. Массогабаритные характеристики аппаратов определяются в

основном типом энергетической и движительной систем, выбор которых зависит, в свою очередь, от требований автономности аппарата и энергопотребления, приходящегося главным образом на движение и частично на работу аппаратуры. Все АНПА в штатном применении используют собственную систему стабилизации, навигации и управления. АНПА подразделяются на: буксируемые, самоходные, управляемые по кабелю, и автономные самоходные аппараты. Наибольший интерес представляют именно автономные подводные аппараты, как наиболее универсальные, совершенные и эффективные технические средства для решения задач морской гравиметрической съемки повышенной плотности. Их преимущества многократно доказаны при выполнении реальных работ в океане, в частности, по обследованию районов с залежами твердых полезных ископаемых, изучению загрязнения среды, а также поиску и обследованию атомных подводных лодок, затонувших на больших глубинах в океане. АНПА являются наиболее перспективным типом подводных робототехнических средств. Для обеспечения гравитационной съемки особенно важны их возможности по обеспечению стабилизации параметров движения на постоянной глубине при высокой равномерности хода.

По возможностям обеспечения равномерного хода и стабилизации программного движения (вплоть до зависания) выделяется АНПА TSL (рис. 5). Известно применение его отечественными исследователями при испытаниях навигационной системы на новых принципах.

Автономно-привязной необитаемый подводный аппарат TSL отечественного исполнения разработан по заказу американской фирмы для работы в водоводах и водонаполненных туннелях и отличается высокой степенью стабилизации программного движения. На аппарате установлены: гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой; лаг; компас; датчики дифферента, крена, угловых скоростей; датчики глубины; эхолокационная система для движения вдоль стен водовода и обхода препятствий; доплеровский лаг.



Рисунок 5 – Спуск на воду АНПА с большого гидрографического катера

В процессе прибрежных работ АНПА TSL используется как самоходный объект с информационно-командной связью, осуществляемой оператором с обеспечивающего судна по оптоволоконному кабелю. В передней секции аппарата под прозрачным обтекателем установлены две видеокамеры, гидролокатор секторного обзора и эхолотационная система, включающая передний, левый, правый, верхний, нижний эхолоты. Одна из видеокамер смонтирована на поворотной платформе и обеспечивает переднюю видеосъемку в широком диапазоне углового обзора. Другая видеокамера ориентирована вертикально вниз и предназначена для съемки дна и обеспечения работы системы позиционирования на основе обработки видеoinформации. Система из шести двигателей обеспечивает произвольные движения, в том числе боком влево, вправо, вверх, вниз, а также зависание. В процессе движения оптоволоконный кабель свободно выматывается с катушки, расположенной в кормовом отсеке АНПА. В состав сменного оборудования при автономном варианте использования входят: GPS; радиомодем; доплеровский лаг; система с ультракороткой базой и контейнер с пользовательским оборудованием.

Работа аппарата осуществляется под управлением бортового компьютера. В телеуправляемом варианте аппарат принимает команды высокого уровня, поступающие от компьютера оператора. Система автоматического управления аппарата обеспечивает стабилизацию высоты (глубины) и курса. Команды управления от компьютера оператора, а также информация о состоянии аппарата, визуальная информация и показания датчиков в режиме реального времени передаются на обеспечивающее судно по оптоволоконному кабелю на дистанции до 5 км. В автономном режиме для задания миссии используется специально разработанный язык программирования аппарата.

Небольшие размеры позволяют выполнять работы с аппаратом с небольшого судна типа БГК (большой гидрографический катер), имеющего лебедку грузоподъемностью 500

кг с вылетом стрелы за борт 1 м, что обеспечивает оперативность и высокую мобильность выполнения работ.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

ГЛУБИНА: 300 м; СКОРОСТЬ: 2,5 узла; АВТОНОМНОСТЬ: 8 часов,
что обеспечивает длину хода в автономном режиме работы порядка 40 км;

МАССА: 320 кг; ГАБАРИТЫ: Ø640× 3030 мм.

Поскольку структура бортовых систем, обеспечивающих функцию носителя аппаратуры, определяется принципом действия системы управления АНПА, реализация их, как правило, унифицирована. Основные достоинства унификации и модульного исполнения элементов АНПА следующие:

- существенное снижение трудоемкости и сроков разработки АНПА для различных применений;
- возможность перехода по мере разработки новых блоков от более простых к более сложным и одинаково отработанным комплексам;
- широкое резервирование элементов и, следовательно, повышение надежности решения задач комплексом;
- существенное упрощение проблемы электромагнитной и акустической совместимости систем.

Основные функциональные узлы АНПА представлены на рис. 6.

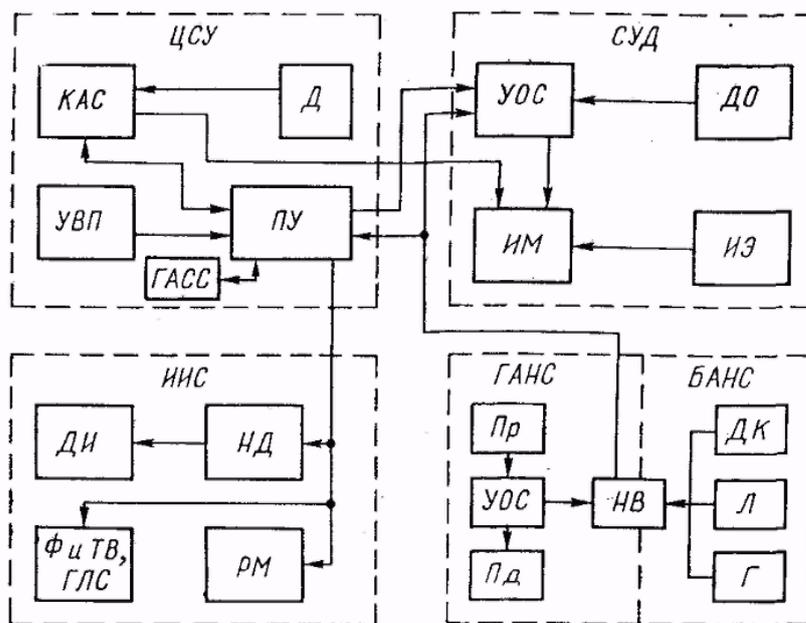


Рисунок 6 – Структурная схема систем аппарата,

где ЦСУ — центральная система управления; СУД — система управления движением; ГАНС — гидроакустическая навигационная система; БАНС — бортовая автономная нави-

гационная система; ИИС — информационно-измерительная система; КАС — контрольно-аварийная система; ПУ — программное устройство; УВП — устройство ввода программ; ГАСС — гидроакустическая система связи; Д — датчики контрольно-аварийной системы; УОС — устройство обработки сигналов системы управления движением и навигации; ДО — датчики ориентации аппарата; ИЭ — источники энергии; ИМ — исполнительные механизмы; ДИ — датчики информации о среде; НД — накопитель данных; НВ — навигационный вычислитель; ДК — датчик курса; Г — глубиномер; Л — лаг; Пд — передатчик; Пр — приемник; Ф — фотосистема; ТВ — телевизионная система; ГЛС — гидролокационная система; РМ — рабочие механизмы.

В ходе выполненных на каф. 305 разработок предложено для повышения надежности эксплуатации АНПА использовать в дополнение штатного состава КАС для его поиска после прохождения галса ГИ автоматизированную систему определения и передачи координат (СОПЕК), обеспечивающую в современных технологиях СНС и линий передачи данных определение координат АНПА после всплытия и передачу их на подбирающее судно (ПС). Экспериментальный образец СОПЕК разработки кафедры 305 по заданию ГНПП "Регион" прошел успешные натурные испытания в полигонах Ладожского озера.

СОПЕК изготавливается в 2-х комплектах, один из которых размещается на ПС, а другой на АНПА. Габариты аппаратного комплекта СОПЕК АНПА $250 \times 160 \times 100$ мм³ при весе с автономным источником питания не более 5кг. Точность определения координат 12 м, а точность определения скорости 0,1 м/с (СКО).

По условиям применения СОПЕК обеспечивает вычисление:

$V_{1С}$, $V_{1В}$ – северной и восточной составляющих вектора скорости мобильного диспетчерского пункта (ПС);

$V_{2С}$, $V_{2В}$ – северной и восточной составляющих вектора скорости отслеживаемого подвижного объекта (АНПА);

φ_1 , λ_1 , t_1 – широты, долготы и времени хода до АНПА, определяемые GPS приемником мобильного диспетчерского пункта;

φ_2 , λ_2 , t_2 – широты, долготы и времени хода до ПС, определяемые GPS приемником отслеживаемого подвижного объекта.

2 Основные задачи гравиинерциального навигационного комплекса, стратегия реализации бортового алгоритмического обеспечения

Высокие требования к точности гравиметрической съемки определяют аналогичные требования и к методической точности бортового алгоритма БГНК, критерием эффективности которого по обобщенному критерию качества справедливо положить требование минимального объема вычислений необходимых для обеспечения заданной точности. При этом, исходя из целевой функции БГНК, целесообразна унификация бортового программного обеспечения.

Согласно требованиям ПЗ-90 принимаются следующие значения параметров референц-эллипсоида, принятого для вычисления нормального гравитационного ускорения в алгоритмах гравитационного канала и БИНС [1,2]:

большая полуось	$a = 6\,378\,136 \text{ м};$
малая полуось	$b = 6\,356\,751 \text{ м};$
первое сжатие	$\alpha = (a - b)a^{-1} = 1/298,257839303;$
угловая скорость вращения Земли	$\omega = 7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с};$
нормальная сила тяжести на экваторе	$g = 9,780319 \text{ м/с}^2 \text{ рад/с};$
универсальная гравитационная постоянная	$k = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кгс}^2;$
масса Земли	$M = 5,974242 \cdot 10^{24} \text{ кг};$
геоцентрическая гравитационная составляющая	$\mu = k M = 3,9860044 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2.$

Такое техническое решение обеспечивает использование ВПГД в качестве прецизионного измерителя вектора кажущегося ускорения БИНС и автоматический учет измеренных аномалий гравитационного поля в навигационном контуре БИНС, что уточняет определение координат и скорости движения носителя. При этом вычисление поправки на переносное движение носителя в гравитационном контуре БГНК осуществляется без использования информации о форме земной поверхности, что, в свою очередь, повышает точность вычисления гравитационных аномалий.

Изложенные положения практически реализуются в структуре БГНК, представленной на рис. 7. БГНК объединяет в единую информационно-измерительную и управляющую систему комплекс приборов и систем первичной информации, бортовой цифровой вычислительный комплекс (БЦВК) и САУ МПА.

Комплекс приборов и систем первичной информации включает: ИИБ в составе ВПДГ и ФИ БГ; глубиномерную систему (ГМС), магнитометрическую курсовую систему (МКС); векторный измеритель относительной скорости (лаг), навигационную аппаратуру потребителя (НАП) СНС (см. рис. 7). БЦВК объединяет систему процессоров,

обеспечивающих под общим управлением решение частных задач: процессор БИНС, поставляет компонентам БЦВК информацию о векторе скорости АНПА относительно земной поверхности \mathbf{U} , геоцентрическом векторе местоположения \mathbf{R} , а также ортах этих векторов $\mathbf{1}_U, \mathbf{1}_R$ и ортах связанной с объектом СК «О» в проекциях на оси базовой земной экваториальной СК «Е». Здесь же с частотой решения основного уравнения навигации вычисляются угловые параметры навигации и управления. ПГИ – процессор гравиметрических измерений реализует алгоритмы ВПДГ, алгоритмы оценки относительных и переносных ускорений, а также алгоритмы определения аномалий УСТ Δg_T . ПОПБ – процессор оценки погрешностей БИНС реализует алгоритмы оптимального их оценивания и алгоритмы компенсации их влияния на точность выходной информации. ПНПД – процессор вычисления номинальных параметров движения осуществляет информационное обеспечение задач САУ АНПА.

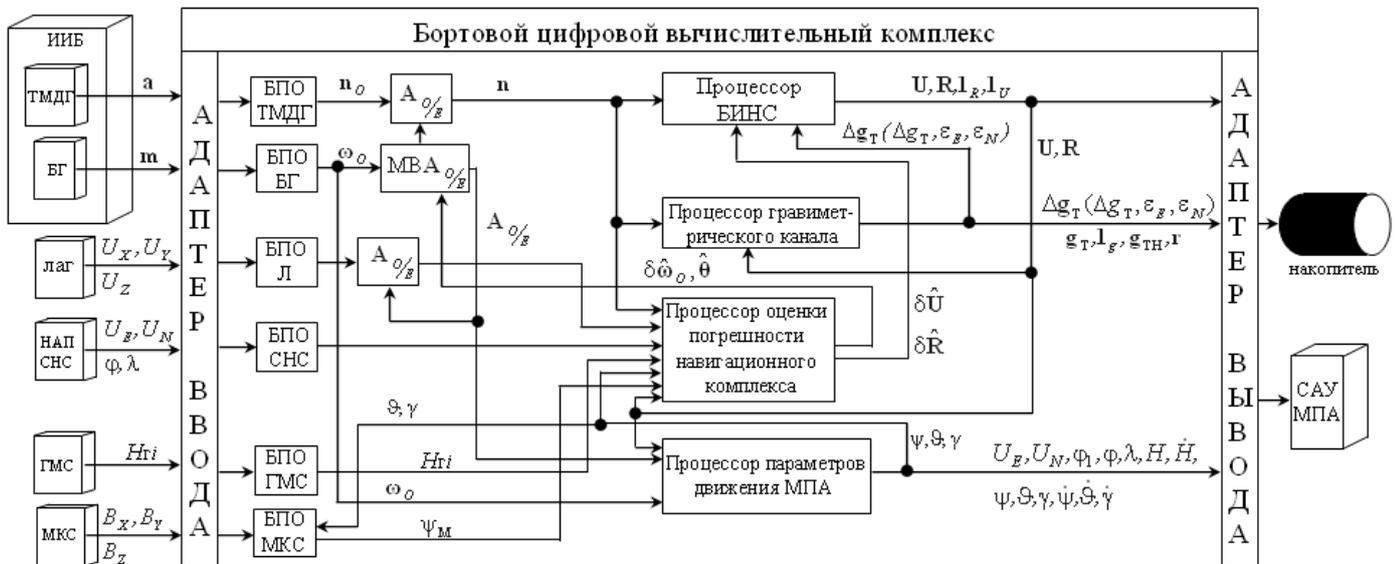


Рисунок 7 – Структура реализации унифицированного алгоритма БГНК. На рисунке: БПО – блок предварительной обработки измерительной информации; МВ – модуль вычисления;

$\mathbf{A}_{O/E}$ – матрица ориентации связанной с АНПА СК «О» относительно базовой земной экваториальной СК «Е»; \mathbf{a}, \mathbf{m} – векторы избыточных измерений ВПДГ (ТМДГ) и БГ соответственно; $U_{X,Y,Z}$ – проекции относительной скорости МПА на связанные оси;

$U_{E,N}$ – восточная и северная составляющие относительной скорости; φ, λ – географические широта и долгота; φ_1 – геоцентрическая широта; H_{Gi} – глубина, измеряемая ГМ;

$B_{X,Y,Z}$ – проекции вектора индукции геомагнитного поля на оси связанной СК;

\mathbf{n}, \mathbf{n}_O – вектор кажущегося ускорения АНПА в проекциях на оси СК «Е» и «О» соответственно;

$\boldsymbol{\omega}_O$ – вектор абсолютной угловой скорости МПА в проекциях на оси СК «О»;

ψ, ϑ, γ – углы курса, дифферента и крена МПА; ψ_M – магнитный курс; \mathbf{R} – геоцентрический вектор положения; \mathbf{U} – вектор скорости относительно земной поверхности; $\Delta\hat{\mathbf{U}}, \Delta\hat{\mathbf{R}}$ – оценки погрешностей определения навигационных параметров (\mathbf{U}, \mathbf{R}); $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ – оценка ухода базовой СК; $\Delta\hat{\boldsymbol{\omega}}_C$ – оценка систематических составляющих дрейфов гироскопов. $\mathbf{1}_g$ – орт истинной вертикали; $\mathbf{1}_R$ – орт геоцентрической вертикали; $\mathbf{1}_U$ – орт \mathbf{U} ; \mathbf{g}_T – вектор УСТ; \mathbf{g}_{TH} – нормальный вектор УСТ; \mathbf{r} – орт \mathbf{g}_{TH} ; $\Delta\mathbf{g}_T$ – векторная поправка, являющаяся функцией $\Delta g_T, \varepsilon_E, \varepsilon_N$, где Δg_T – аномалия величины УСТ, а $\varepsilon_E, \varepsilon_N$ – величины, численно равные компонентам отклонения отвесной линии соответственно в плоскостях первого вертикала и меридиана;

H – глубина погружения АНПА.

Функциональными особенностями БГНК являются:

- использование ВПГД в качестве функционально избыточного измерителя вектора кажущегося ускорения;
- формирование специального канала векторных гравиметрических измерений, поставляющего измерения аномалий вектора силы тяжести в контур навигационных вычислений БИНС в режиме равномерного прямолинейного движения АНПА;
- обеспечение системы управления АНПА прецизионной информацией о параметрах навигации и ориентации, достаточной для позиционирования гравиметрических измерений и стабилизации номинального режима его движения, обеспечивающего, в свою очередь, максимальную точность гравиметрических измерений.

Такой подход обеспечивает:

- высокую методическую точность информационного ядра комплекса, объединяющего алгоритм основных уравнений навигации БИНС и прецизионные алгоритмы вычисления угловых параметров навигации, управления и наведения;
- коррекцию погрешностей информационного ядра при минимальной размерности вектора состояния;
- автоматическое уточнение по результатам коррекции параметров навигации, управления и наведения, а, следовательно, и гравиметрических измерений, используемых в ПГИ, ПОПБ, ПНПД;
- использование в локальных вычислителях наиболее эффективное алгоритмическое обеспечение, сложившееся при решении частных задач;

- возможность размещения в БЦВК дополнительного алгоритмического обеспечения в удобных информационных системах координат, отличающихся от базовой СК комплекса;
- автономную коррекцию алгоритмического обеспечения частных модулей без нарушения архитектуры программного обеспечения БЦВК.

2.1 Алгоритмическое обеспечение векторных гравиметрических измерений

Как отмечалось выше высокая точность и повышенная информативность гравиметрической съемки достигается:

- разработкой алгоритмического обеспечения технологии векторных гравиметрических измерений, основные уравнения которых реализуются в государственной навигационной системе координат ПЗ-90;
- созданием ВПГД, обеспечивающего высокую стабильность нуля-пункта в процессе непосредственных измерений на подвижном основании;
- разработкой алгоритмического обеспечения БГНК, информационным ядром которого является БИНС, использующая ГД в качестве измерителя вектора кажущегося ускорения;
- включением непосредственных измерений гравитационных аномалий гравиметрического канала в навигационный контур БИНС для повышения точности определения навигационных параметров;
- комплексированием выходной информации БИНС с измерениями дополнительных источников навигационной информации – СНС на интервалах её доступности, векторной электромагнитной курсовой системы, допускающей реализацию в приемлемом массогабаритном исполнении, с целью идентификации и последующей компенсации погрешностей параметров навигации и ориентации БИНС, а также систематических инструментальных погрешностей ИИБ;
- выбором АНПА для использования в качестве носителя БГНК, САУ которого обеспечивает стабилизацию равномерного движения на постоянной глубине, достаточной для уменьшения влияния турбулентного слоя среды, обусловленного волнением моря, на точность гравиметрических определений путем минимизации вертикальных ускорений и высокой точности определения глубины движения.
- объединения БГНК в единый информационно-управляющий комплекс с САУ АНПА с целью обеспечения автоматизации процесса гравиметрической съемки, а

также оптимальной по точности идентификации погрешностей БГНК траекторий движения и ориентации АНПА;

Практическая реализация технологии ВГИ требует также разработки технического оснащения гравиметрической съемки, направленного на безопасность применения АНПА и его приведение после выполнения программы гравиметрических измерений к вспомогательному судну для дозаправки и изменения в бортовом вычислителе программы движения.

Основанные уравнения инерциальной навигации БИНС в земной экваториальной СК имеют вид:

$$\dot{\mathbf{U}}_E = -2\mathbf{K}_{\mathbf{u}_E} \mathbf{U}_E + \mathbf{A}_{o/E} \mathbf{n}_o + \mathbf{g}_{тнE}; \dot{\mathbf{R}}_E = \mathbf{U}_E; \quad (30)$$

$$\dot{\mathbf{A}}_{o/E} = \mathbf{A}_{o/E} \mathbf{K}_{\varpi_o} - \mathbf{K}_{\mathbf{u}_E} \mathbf{A}_{o/E}; \quad (31)$$

$$\mathbf{u}_E = [0, 0, u]^T;$$

$$\varpi_o = [\varpi_x, \varpi_y, \varpi_z]^T,$$

где использованы следующие обозначения: $\mathbf{g}_{тнE}$ – вектор нормального ускорения силы тяжести в точке относительно центра референц-эллипсоида, определяемой вектором местоположения \mathbf{R}_E ; \mathbf{U}_E – вектор скорости относительно Земли в проекциях на оси СК «E»; \mathbf{u}_E – вектор абсолютной угловой скорости вращения Земли в проекциях на оси СК «E»; \mathbf{n}_o – вектор кажущегося ускорения в проекциях на оси связанной с объектом СК «O»; ϖ_o – вектор абсолютной угловой скорости СК «O»; $\mathbf{A}_{o/E}$ – матрица ориентации СК «O» относительно СК «E»; \mathbf{K}_{ϖ_o} – кососимметрическая матрица, составленная из компонент вектора ϖ_o ; $\mathbf{K}_{\mathbf{u}_E}$ – кососимметрическая матрица, составленная из компонент вектора \mathbf{u}_E .

Основные уравнения векторных гравиметрических измерений в земной экваториальной системе координат по структуре соответствуют системе (1):

$$\mathbf{g}_{TE} = \dot{\mathbf{U}}_E + 2\mathbf{K}_{\mathbf{u}_E} \mathbf{U}_E - \mathbf{A}_{o/E} \mathbf{n}_o; \quad (32)$$

$$\mathbf{g}_{TE} = \mathbf{g}_{тн} + \mathbf{A}; \quad (33)$$

$$\mathbf{r} = -\mathbf{g}_{тн} \mathbf{g}_{тн}^{-1}; \mathbf{g}_{тн} = (\mathbf{g}_{тн} \cdot \mathbf{g}_{тн})^{-1/2}; \quad (34)$$

$$\mathbf{l}_g = -\mathbf{g}_{TE} \mathbf{g}_{TE}^{-1}; \mathbf{g}_{TE} = (\mathbf{g}_{TE} \cdot \mathbf{g}_{TE})^{-1/2}; \quad (35)$$

$$\Delta \mathbf{g}_T = \mathbf{g}_{TE} - \mathbf{g}_{тн}; \quad (36)$$

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{l}_g - \mathbf{r} = \boldsymbol{\varepsilon} \times \mathbf{r}; \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{r} \times \Delta \mathbf{r}; \quad (37)$$

$$\mathbf{E} = (\boldsymbol{\zeta} \times \mathbf{r}) | \boldsymbol{\zeta} \times \mathbf{r} |^{-1}; \quad \mathbf{N} = \mathbf{r} \times \mathbf{E};$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_E = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}; \quad \boldsymbol{\varepsilon}_N = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{N}; \quad \boldsymbol{\varepsilon}_E = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}; \quad \boldsymbol{\varepsilon}_N = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{N}; \quad (38)$$

$$\mathbf{A} = [\Delta g_T; \boldsymbol{\varepsilon}_E; \boldsymbol{\varepsilon}_N]^T, \quad (39)$$

здесь приняты следующие обозначения: $\mathbf{g}_{TE}, \mathbf{g}_{TN}$ – вектор истинного и нормального УСТ в проекциях на оси СК «Е»; $\dot{\mathbf{U}}_E$ – неравномерность движения носителя комплекса; \mathbf{A} – вектор гравитационных аномалий, подлежащий определению в процессе гравиметрических измерений; $\mathbf{1}_g, \mathbf{r}$ – орты истинной и геодезической вертикали в проекциях на оси СК «Е»; $\Delta \mathbf{r}$ – геометрическая интерпретация уклонения отвесной линии, вычисляемая по практическим измерениям в СК «Е»; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор малого поворота, соответствующий уклонению отвесной линии; \mathbf{E}, \mathbf{N} – орты Восточного и Северного направлений в месте гравиметрических измерений; $\Delta g_T; \boldsymbol{\varepsilon}_E; \boldsymbol{\varepsilon}_N$ – компоненты вектора гравитационных аномалий.

Выбранная структура алгоритмического обеспечения информационного ядра БГНК обеспечивает синхронное решение задач навигации и геодезических измерений в рациональном по требованиям к БЦВМ программно-алгоритмическом обеспечении.

Основные уравнения инерциальной навигации БИНС (30), (31) дополняются алгоритмами вычисления навигационных параметров и параметрами ориентации, используемыми для позиционирования гравиметрических измерений и управления носителем БГНК.

2.2 Алгоритмы БИНС определения параметров навигации, ориентации и управления

Алгоритм вычисления географических координат:

$$\mathbf{1}_R = \mathbf{R}_и (\mathbf{R}_и \cdot \mathbf{R}_и)^{-1/2} = [E_{R1}, E_{R2}, E_{R3}]^T;$$

$$\varphi_* = \arctg \frac{E_{R3}}{(1 - E_{R3}^2)^{1/2}}, \quad -\pi/2 \leq \varphi < \pi/2 \quad \text{– геоцентрическая широта,}$$

$$\varphi = \varphi_* + e^2 \left(1 - \frac{h}{a} \right) E_{R3} (1 - E_{R3}^2)^{1/2} \quad \text{– географическая широта,} \quad (40)$$

$$\Lambda = \arctg \frac{E_{R2}}{E_{R1}}, \quad 0 \leq \Lambda < 2\pi \quad \text{– инерциальная долгота,}$$

$$\lambda_1 = \Lambda - ut + \lambda(0), \quad (41)$$

$\lambda = \lambda_1 - \text{int} \frac{\lambda_1}{2\pi} 2\pi$ – географическая долгота.

Алгоритм вычисления скорости в географической сопровождающей СК:

$$\mathbf{g}_{T_{и}} = \mathbf{g}(\mathbf{R}_{и}) - \mathbf{u}_{и} \times (\mathbf{u}_{и} \times \mathbf{R}_{и}); \mathbf{r}_{и} = \frac{\mathbf{g}_{T_{и}}}{|\mathbf{g}_{T_{и}}|}; \quad (42)$$

$$\mathbf{E}_{и} = \frac{\mathbf{Z}_{и} \times \mathbf{r}_{и}}{|\mathbf{Z}_{и} \times \mathbf{r}_{и}|}; \mathbf{N}_{и} = \mathbf{r}_{и} \times \mathbf{E}_{и};$$

$$U_E = \mathbf{U}_{и} \cdot \mathbf{E}_{и}; U_N = \mathbf{U}_{и} \cdot \mathbf{N}_{и}; \quad (43)$$

$$\dot{H} = \mathbf{U}_{и} \cdot \mathbf{r}_{и}; U_{и} = (U_E^2 + U_N^2)^{1/2}.$$

Алгоритмы вычисления параметров ориентации

Предварительно рассчитаем вспомогательный единичный вектор, нормальный плоскости включающей вертикаль и продольную ось объекта:

$$\mathbf{Z}_{1и} = \frac{\mathbf{x}_{и} \times \mathbf{r}_{и}}{|\mathbf{x}_{и} \times \mathbf{r}_{и}|} = \frac{\mathbf{x}_{и} \times \mathbf{r}_{и}}{\cos \nu}, \quad (44)$$

тогда алгоритмы вычисления пилотажных параметров принимают вид:

$$\psi = -\arctg \frac{\mathbf{N}_{и} \cdot \mathbf{Z}_{1и}}{\mathbf{E}_{и} \cdot \mathbf{Z}_{1и}}; \nu = \arctg \frac{\mathbf{x}_{и} \cdot \mathbf{r}_{и}}{(1 - (\mathbf{x}_{и} \cdot \mathbf{r}_{и}))^{1/2}}; \gamma = \arctg \frac{\mathbf{y}_{и} \cdot \mathbf{Z}_{1и}}{\mathbf{z}_{и} \cdot \mathbf{Z}_{1и}}. \quad (45)$$

Алгоритмы вычисления параметров управления:

$$\theta = \arctg \frac{\mathbf{l}_U \cdot \mathbf{r}_{и}}{(1 - (\mathbf{l}_U \cdot \mathbf{r}_{и})^2)^{1/2}}; \alpha = \arctg \frac{-\mathbf{l}_U \cdot \mathbf{y}_{и}}{\mathbf{l}_U \cdot \mathbf{x}_{и}}; \beta = \arctg \frac{\mathbf{l}_U \cdot \mathbf{z}_{и}}{(1 - (\mathbf{l}_U \cdot \mathbf{z}_{и})^2)^{1/2}}. \quad (46)$$

Алгоритмы вычисления углов скоростного курса и крена:

$$\mathbf{l}_{Ur} = \frac{\mathbf{U}_{и} \times \mathbf{r}_{и}}{|\mathbf{U}_{и} \times \mathbf{r}_{и}|}; \mathbf{l}_{Uy} = \frac{\mathbf{U}_{и} \times \mathbf{y}_{и}}{|\mathbf{U}_{и} \times \mathbf{y}_{и}|}; \psi_a = \arctg \frac{U_E}{U_N}; \gamma_a = \arctg \frac{\mathbf{l}_{Uy} \cdot (\mathbf{l}_U \times \mathbf{l}_{Ur})}{\mathbf{l}_{Ur} \cdot \mathbf{l}_{Uy}}. \quad (47)$$

Перечисленные параметры при инерциальном измерении носят вспомогательный характер, однако, используются в контуре инерциального управления объектов, на

которых по условиям применения затруднительно использовать, например, систему воздушных сигналов.

Алгоритмы вычисления параметров наведения

Географические координаты места цели позволяют рассчитать в СК «И» единичный вектор геоцентрической вертикали места цели, а также угол поворота Φ в плоскость кратчайшего приведения и сферическую дальность s до цели. Введем в СК «И» единичный вектор нормальный плоскости полета ($\mathbf{l}_{\text{нпп}}$) и единичный вектор направления горизонтального полета на цель ($\mathbf{l}_{\text{нп}}$):

$$\mathbf{l}_{\text{нпп}} = \mathbf{l}_{\text{Rц}} \times \mathbf{l}_{\text{R}}; \mathbf{l}_{\text{нп}} = \mathbf{l}_{\text{R}} \times \mathbf{l}_{\text{нпп}}. \quad (48)$$

Тогда угол поворота в плоскость кратчайшего движения к цели и сферическая дальность до цели могут быть вычислены по алгоритмам:

$$\Phi = \arctg \frac{\mathbf{U}_{\text{и}} \cdot \mathbf{l}_{\text{нпп}}}{\mathbf{U}_{\text{и}} \cdot \mathbf{l}_{\text{нп}}}; \quad (49)$$

$$s = R_3 \arctg \frac{\mathbf{l}_{\text{нп}} \cdot \mathbf{l}_{\text{Rц}}}{\mathbf{l}_{\text{R}} \cdot \mathbf{l}_{\text{Rц}}}; \quad (50)$$

где R_3 – величина радиуса Земли при сферической аппроксимации геоида.

Координаты цели в инерциальной СК «И» задаются геоцентрическими координатами ее местоположения с учетом превышения h места цели над референц-эллипсоидом:

$$\mathbf{l}_{\text{Rц}} = [\cos\varphi_{\text{ц}} \cos\Lambda_{\text{ц}}, \cos\varphi_{\text{ц}} \sin\Lambda_{\text{ц}}, \sin\Lambda_{\text{ц}}]^T; \quad (51)$$

$$R_{\text{ц}} = a(1 - 0,5e^2 \sin^2\varphi_{\text{ц}}) + h_{\text{ц}}. \quad (52)$$

Инерциальная долгота места цели вычисляется с учетом времени работы БИНС в рабочем режиме:

$$\Lambda_{\text{ц}} = \lambda_{\text{ц}} + ut. \quad (53)$$

Отметим, что методическая точность базовой математической модели алгоритма идеальной работы БИНС ограничивается только принятой математической моделью гравитационного поля Земли, что позволяет использовать её и для получения эталонного расчета при моделировании численных алгоритмов БИНС.

Подробные комментарии к выводу представленных алгоритмов изложены в учебном пособии [8].

Заключение

В представленном материале изложены теоретические основы и назначение гравиметрических измерений, а также способы их реализации в традиционных технологиях. Предложен новый способ векторных гравиметрических измерений, расширяющий содержание традиционных технологий в определении аномалий гравитационного поля Земли измерениями отклонений истинной вертикали. Представлены алгоритмы векторных гравиметрических измерений, а также БИНС, являющейся информационным ядром бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по проекту 14.В37.21.1904 от 04.10.2012г. ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы”.

Литература

1. Закатов П.С. Курс высшей геодезии. Издание 4. – М.: «Недра», 1976;
2. Миронов В.С. Курс гравиразведки. –Л.: «Недра», Ленинградское отделение, 1980;
3. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. –М.: Главная редакция Физико-математической лит., 1983;
4. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90). Координационный научно-информационный центр. М., 1998;
5. ГОСТ Р 51794-2001. Аппаратура радионавигационная глобальной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат определения точек. Госстандарт России. Москва;
6. Применение гравиинерциальных технологий в геофизике // Сборник статей и докладов под общей редакцией В.Г. Пешехонова. –СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002, 199с. ISBN 5-900780-40-6;
7. Тювин А.В., Афонин А.А., Черноморский А.И. Об одной концепции векторных гравиметрических измерений // Авиакосмическое приборостроение, 2005, №3;
8. Алешин Б.С., Тювин А.В., Черноморский А.И., Плеханов В.Е. Проектирование бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Учебное пособие (УМО АРК) –М.: Изд-во МАИ-ПРИН, 2010;
9. Алешин Б.С., Афонин А.А., Веремеенко К.К., Кошелев Б.В., Плеханов В.Е., Тихонов В.А., Тювин А.В., Федосеев Е.П., Черноморский А.И. Ориентация и навигация подвижных объектов. Современные информационные технологии. Монография под редакцией Алешина Б.С., Веремеенко К.К., Черноморского А. И. –М.: Физматлит, 2006, ISBN 5-9221-0735-6;
10. Тювин А.В., Афонин А.А., Жарков М.В., Караченцев М.В., Сулаков А.С. Оценка возможностей бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса в задачах векторной морской гравиметрии с использованием спутниковой навигации // Авиакосмическое приборостроение, №6, 2007;
11. А.с. 795181 (СССР). МКИ G_N 01р 21/00. Способ калибровки и юстировки блока измерителей векторной величины. Тювин А.В., Дмитроченко Л.А. -Опубликовано в БИ, 1980, №1;
12. Тювин А.В.. К вопросу обеспечения равноточности аналитической юстировки и калибровки блоков измерительных элементов: Вопросы повышения точности гироскопических и навигационных устройств. Тематический сборник научных трудов. -М.: Издательство МАИ, 1989.