

Акционерное общество
«Концерн «Центральный научно-исследовательский институт
«Электроприбор»

ПРОГРАММА-МИНИМУМ
кандидатского экзамена по научной специальности
2.2.5 «Приборы навигации»
технические науки

Санкт-Петербург
2024 г.

Гироскопы со сферическим неконтактным подвесом ротора. Типы подвесов. Основные подсистемы. Погрешности.

Лазерные гироскопы (ЛГ). Эффект Саньяка. Принципы работы газового гелий-неонового лазера. Кольцевой оптический резонатор, система съема информации, системы подставки, системы накачки ЛГ. Погрешности ЛГ.

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ). Принципы и схемы построения. Основные функциональные элементы. Погрешности ВОГ.

Волновой твердотельный гироскоп (ВТГ). Физический эффект инертности упругих волн. Схемы построения ВТГ, основные функциональные узлы. Системы съема и обработки информации, принципы стабилизации амплитуды вибраций, фазовой автоподстройки частоты, коррекции собственных осей жесткости. Погрешности ВТГ.

Микромеханические гироскопы. Схемы построения. Особенности математических моделей, погрешности.

Гироскоп на эффекте ядерного магнитного резонанса: принцип действия, варианты реализации. ЯМР-гироскоп со спин-обменной накачкой: схема построения, особенности реализации контуров управления магнитной и оптической подсистемами.

Гироскоп на холодных атомах (волнах Де-Бройля) Принцип действия, методические погрешности измерения угловой скорости, подходы к их компенсации.

4. Акселерометры и гравиметры

Особенности измерения линейных и угловых ускорений. Классификация акселерометров. Акселерометры прямого действия и компенсационного типа. Осевые и маятниковые акселерометры. Интегрирующие, струнные, кварцевые, микромеханические акселерометры; математические модели и структурные схемы. Демпфирование чувствительных элементов. Работа на вибрирующем основании. Частотные характеристики.

Назначение гравиметров. Принципы построения и классификация гравиметров. Гравиметры для работы на подвижном основании; основные характеристики, погрешности измерений. Перспективы построения гравитационных градиентометров. Метрологическое обеспечение. Методы испытаний акселерометров и гравиметров и стенды для их реализации.

5. Гироскопические стабилизаторы

Одноосные гироскопические стабилизаторы (ГС). Уравнения движения, структурные схемы и передаточные функции силового и индикаторно-силового ГС. Свободное и вынужденное движение ГС. Динамические характеристики ГС. Выбор параметров ГС из условия обеспечения заданных динамических характеристик. Определение собственной скорости прецессии ГС на неподвижном и подвижном основаниях. Влияние нелинейностей (моментов, трения, люфтов и др.) на динамику ГС. Динамические погрешности ГС. Исследование ГС при случайном характере возмущений. Типовые схемы ГС, их применение.

Двухосные ГС. Уравнения движения; их анализ. Структурные схемы и передаточные функции, устойчивость ГС. Влияние связи между каналами на динамические характеристики ГС. Свободное и вынужденное движения. Основные погрешности двухосного ГС. Движение платформы ГС при гармонических и случайных колебаниях основания. Типовые схемы двухосного ГС, их применение.

Трехосные ГС. Уравнения движения силового ГС, индикаторно-силового ГС с интегрирующими гироскопами, с ДУС, с астатическими, динамически настраиваемыми, вибрационными и лазерными гироскопами. Свободное и вынужденное движение платформы. Влияние связей между каналами на величину собственной скорости прецессии и выбор параметров ГС. Невывбываемые ГС.

Самоориентирующиеся ГС. Типовые схемы ГС и их применение. Применение ЭВМ для анализа динамики и синтеза параметров ГС по критерию оптимизации функции цели.

Метрологическое обеспечение, методы испытаний и динамические стенды для отработки и типовых поверок ГС.

6. Гировертикали и курсовые гироскопические системы

Гировертикали (ГВ). Методы определения направления истинной вертикали на подвижном объекте. Схемы маятниковых ГВ. Уравнения движения, погрешности ГВ и их статистический анализ. Способы повышения точности ГВ. Невыбываемая ГВ.

Двухгироскопные и четырехгироскопные силовые ГВ. Уравнения движения ГВ типа ЦГВ, погрешности силовых ГВ. Гировертикали с интегральной коррекцией. Условия настройки на период 84,4 мин.

Гироскопический компас (ГК). Уравнения движения простого маятникового ГК; их анализ. Погрешности ГК на подвижном основании с учетом случайных возмущений и способы их уменьшения. Схемы двухроторного и пространственного ГК. Уравнения движения, их анализ. Условия настройки на период 84,4 мин. Гиروهоризонткомпас и гиросироткомпас. Гиросиротант. Уравнения движения, передаточные функции, их анализ, погрешности, динамические характеристики.

Принципиальная схема гиросироты. Дифференциальные уравнения движения гиросироты, их анализ.

Курсовертикаль. Трехгироскопная курсовертикаль с силовой стабилизацией. Уравнения движения, передаточные функции, их анализ; погрешности. Трехгироскопная курсовертикаль на поплавковых гироскопах. Двухгироскопная курсовертикаль на поплавковых гироскопах. Двухгироскопная курсовертикаль с астатическим гироскопом. Бескарданный гиروهоризонткомпас.

Методы синтеза гироскопических систем. Определение передаточной функции системы. Метод Винера. Оптимальная фильтрация на конечном интервале времени. Параметрический синтез гироскопических систем с заданной структурой. Оптимизация передаточной функции корректирующего устройства.

Методы автокомпенсации инструментальных погрешностей гироскопических систем. Метод принудительного вращения карданового подвеса гироскопа. Метод реверсирования вектора кинетического момента гироскопа.

Основные конструктивные особенности гироскопических чувствительных элементов. Системы автоматизированного проектирования гироскопических приборов. Обеспечение надежности гироскопических систем при проектировании. Методы повышения надежности приборов и систем.

7. Инерциальные навигационные системы

Принципы построения и классификация инерциальных навигационных систем (ИНС). Инерциальные навигационные системы геометрического, полуаналитического типа; аналитического типа с гиросtabilизированной платформой, бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Основное уравнение идеальной работы ИНС платформенного типа и его реализация при работе ИНС в географической, ортодромной и ортополярной сферических системах координат. Учет несферичности Земли и модели ее гравитационного поля. Принцип интегральной коррекции и его применение при построении ИНС. Начальная выставка платформенных ИНС.

Алгоритмы решения задачи ориентации в БИНС на датчиках угловой скорости (волоконно-оптических или микромеханических). Алгоритм решения задачи ориентации в ИНС на неуправляемых гироскопах (электростатических гироскопах). Алгоритмы решения задач преобразования сигналов акселерометров на навигационные оси и их интегрирования в БИНС. Особенности реализации дискретных алгоритмов ориентации и навигации БИНС.

Модели погрешностей ИНС и их анализ. Кинематические уравнения погрешностей ИНС. Уравнения погрешностей инерциального контура ИНС, их приближенные аналитические решения. Уравнения погрешности контура вертикали ИНС, их

приближенные аналитические решения. Собственные частоты модели погрешностей инерциальных навигационных систем.

Модели погрешностей современных акселерометров, волоконно-оптических гироскопов, микромеханических датчиков и бескарданных измерительных модулей на их основе. Методы калибровки акселерометров, волоконно-оптических гироскопов и микромеханических датчиков в условиях стенда в составе БИНС.

8. Радиотехнические и спутниковые навигационные системы

Общая модель радиотехнической системы. Условия распространения радиоволн. Общие требования к сигналам радиотехнических станций. Радиотехнические методы измерения координат и их производных. Угломерный и дальномерный методы. Разностно-дальномерный и комбинированный угломерно-дальномерный методы. Классификация радиолокационных и радионавигационных станций. Их тактические и технические характеристики. Дальность действия радиосистем. Основное и обобщенное уравнение дальности.

Погрешности измерения радионавигационного параметра. Погрешности определения линий положения. Погрешность определения координат объекта угломерным и дальномерным методом.

Доплеровский метод измерения путевой скорости и угла сноса. Построение доплеровских измерителей вектора скорости. Корреляционный метод измерения путевой скорости и угла сноса.

Структурная схема спутниковой навигационной системы. Классификация спутниковых навигационных систем. Общая характеристика элементов спутниковых навигационных систем.

Принципы построения аппаратуры потребителей. Обобщенная схема аппаратуры потребителя спутниковой навигационной системы. Необходимость и время поиска радионавигационного сигнала. Кадр навигационного сигнала. Дифференциальный кодовой и дифференциальный фазовый режимы работы аппаратуры потребителя.

Алгоритмы решения навигационных задач по выборке одновременных измерений. Показатели точности навигационных определений. Точность определения координат по одному навигационному искусственному спутнику Земли. Точность определения координат по созвездию навигационных искусственных спутников Земли. Точность оценки скорости движения.

9. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации

Современные корабельные и авиационные интегрированные системы ориентации и навигации, структура построения. Назначение и решаемые задачи. Требования к точностным и эксплуатационным характеристикам чувствительных элементов бескарданных инерциальных измерительных модулей. Режимы работы интегрированных систем ориентации и навигации (ИСОИ) и используемые в них методы комплексной обработки информации. Примеры построения зарубежных и отечественных современных ИСОИ, их элементная база и основные точностные и эксплуатационные характеристики.

Задача фильтрации при интеграции данных бескарданного инерциального измерительного модуля, спутниковой навигационной системы и лага с использованием алгоритма фильтра Калмана. Линеаризация измерений в интегрированной системе ориентации и навигации при формировании измерений на уровне первичных навигационных параметров. Режимы работы интегрированной системы ориентации и навигации: начальная выставка, калибровка, обсервационный, автономный с лагом, взаимодействия с корабельными потребителями информации. Расчетная модель погрешностей ИСОИ. Приближенные аналитические решения для погрешностей аналогов вертикали и ИСК, погрешностей в выработке навигационных параметров.

Интегрированная система ориентации и навигации на основе бескарданного инерциального измерительного модуля с измерительным блоком на волоконно-оптических гироскопах и одноантенной приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы. Современное состояние, основные проблемы. Модели дрейфов гироскопов и погрешностей акселерометров измерительного блока бескарданного инерциального измерительного модуля. Наблюдаемость составляющих модели дрейфов гироскопов и погрешностей акселерометров измерительного блока бескарданного инерциального измерительного модуля в различных режимах работы интегрированной системы ориентации и навигации. Калибровка измерительного блока бескарданного инерциального измерительного модуля в условиях стенда, использование модуляционного вращения или реверсных поворотов измерительного блока. Особенности калибровки румбовых дрейфов измерительного блока бескарданного инерциального измерительного модуля в процессе эксплуатации, возможные пути решения задачи.

GPS-компасы как интегрированные инерциально-спутниковые системы. Современное состояние в отечественной и зарубежной практике. Структура построения, элементная база, особенности алгоритмического обеспечения. Основные тактико-технические характеристики. Неоднозначности фазовых измерений и методы их разрешения.

10. Системы ориентации и стабилизации космических летательных аппаратов

Задачи, решаемые системами ориентации и стабилизации космических летательных аппаратов (КЛА). Принципы и схемы построения активных систем и непосредственных гироскопических стабилизаторов КЛА. Условия работоспособности непосредственных гироскопических стабилизаторов и их основные характеристики. Метод связывания скрытого кинетического момента с корпусом КЛА. Гиросины, гравитационно-гироскопическая стабилизация КЛА.

11. Стохастические методы обработки информации

Статистическое описание случайных процессов. Статистические характеристики случайных процессов. Стационарность случайных процессов. Понятие белого шума. Наиболее употребительные законы распределения. Предельные теоремы. Статистический анализ точности линейных систем. Преобразование случайных входных сигналов элементарными звеньями. Определение статистических характеристик выходных сигналов многомерных систем во времени и в частотном представлении. Формирование случайных процессов с заданными характеристиками. Применение формирующих фильтров. Использование методов моделирования случайных процессов на ЭВМ. Экспериментальные методы определения статистических характеристик случайных процессов. Определение дисперсии процесса по его спектральной плотности. Вариация Аллана и ее использование в задачах обработки навигационной информации.

Оптимальные линейные системы. Статистические критерии оптимальности и их особенности. Необходимое и достаточное условие оптимальности. Решение задачи оптимальной фильтрации методом Винера. Постановка задачи оптимальной фильтрации Калмана и Бьюси. Алгоритм оптимального фильтра Калмана—Бьюси и его особенности. Нелинейная калмановская фильтрация и ее особенности. Методы гарантирующего оценивания. Метод эллипсоидов. Метод апертурного оценивания. Достоинства и недостатки методов гарантирующего оценивания по сравнению со статистическими.

12. Основные положения теории информационно-измерительных систем

Основные понятия, термины и определения. Физические величины (ФВ). Методы и средства идентификации ФВ (прямые, косвенные, методы сравнения). Эталоны ФВ. Методы и способы оценки достоверности измерения ФВ. Истинное значение ФВ,

точность (погрешность) измерения. Измерительные преобразователи (ИП), назначение, основные характеристики. Формы представления выходного сигнала (аналоговая, частотная, цифровая). Методы и средства взаимного преобразования сигналов (аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи), качественные показатели (быстродействие, точность, разрядность, энергоёмкость и др.). Расчет статических и динамических характеристик ИП. Измерительные цепи прямого преобразования и уравнивания (статического, астатического, развертывающего). Измерительные цепи цифровых ИП.

Классификация погрешностей. Причины возникновения и основные составляющие статических и динамических погрешностей. Методы анализа точности и повышения точности ИП (структурные, алгоритмические; комплексирование; принцип инвариантности). Надежность ИП. Расчет показателей надежности и методы повышения надежности ИП. Цифровые методы и средства анализа метрологических характеристик сигналов с использованием современных программных и аппаратных средств ЭВМ. Методы оценки количественных и качественных характеристик выходных сигналов ИП с использованием вероятностных критериев.

Основная литература

1. Анучин О. Н., Емельянец Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов.- СПб., 1999. - 357 с.
2. Воронов А.С., Ривкин Б.С. Гироскоп на волнах де Бройля. Просто о сложном // Гироскопия и навигация. 2021- №2,. С. 126-139.
3. Бессекерский В. А., Фабрикант Е. А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. Л.: Судостроение, 1968.
4. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1992. -280 с
5. Бромберг П.В. Теория инерциальных систем навигации.- М.: Наука, 1979, 296 с.
6. Емельянец Г.И., Степанов А.П. (под общей ред. акад. РАН В.Г.Пешехонова). Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2016, 394 с.
7. Евстифеев, М.И. Состояние разработок и перспективы развития микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев // Навигация и управление движением. Сб. докладов II научно-технической конференции молодых ученых, С-Петербург. 2000. С.54-71.
8. Дмитриев С.П. Высокоточная морская навигация. - СПб.: Судостроение, 1991.
9. Дмитриев С.П. Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб: Электроприбор, 1997.
10. Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. - М.: Наука, 1976, 672 с.
11. Ландау Б.Е. Электростатический гироскоп со сплошным ротором. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. – 150 с.
12. Липтон А. Выставка инерциальных систем на подвижном основании. - М. Наука, 1971, 168 с.
13. Лукьянов Д.П., Мочалов А.В., Одинцов А.А., Вайсгант И.Б. Инерциальные навигационные системы морских объектов.- Л.: Судостроение, 1989. – 184 с
14. Лурье А.И. Аналитическая механика.- М.: Изд-во физ.-мат.лит., 1961.
15. Лукьянов Д.П., В.Я.Распопов, Ю.В.Филатов Прикладная теория гироскопов .- СПб.: ЦНИИ "Электроприбор".2015г.-315с.
16. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2009. 278с.
17. Мейер Д., Ларсен М. Гироскоп на ядерно-магнитном резонансе для инерциальной навигации // Гироскопия и навигация. 2014. №1 (84). С. 3–13.
18. Михайлов Н.В. Автономная навигация космических аппаратов при помощи спутниковых радионавигационных систем. – СПб: Изд. «Политехника». -2014. - 362 с

19. Гироскопические системы / Под ред. Д. С. Пельпора. В 3 ч. М.: Высш. шк., 1986–1988. Ч. 1: Теория гироскопов и гироскопических стабилизаторов.1986; Ч. 2: Гироскопические приборы и системы. 1988; Ч. 3: Элементы гироскопических приборов. 1988.
20. Распопов В.Я. Непосредственные гиростабилизаторы.- Тула: Изд. ТулГУ, 2015.- 220с.
21. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч1. Введение в теорию оценивания.- 2010.-509 с; Ч2. Введение в теорию фильтрации. -2012. - 417 с. - СПб. - ЦНИИ "Электроприбор".
22. Северов Л.А. Курс лекций по микромеханическим гироскопам и акселерометрам (электронная версия лекций – в эл.сети АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»).
23. Филатов Ю.В. Курс лекций по лазерным и волоконно-оптическим гироскопам (электронная версия лекций – в эл.сети АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»).
24. Челпанов И.Б. Гироскопы. Курс лекций. (электронная версия лекций – в эл.сети АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»).
25. Шимбирев Б.П. Теория фигуры Земли. М., Недра, 1975
26. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Система GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.:Горячая линия.-Телеком, 2005.-272.с.

Дополнительная литература

1. Емельянцева Г.И. Курсы лекций по основам навигации, БИНС и ИСОН (электронные версии лекций – в эл.сети АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»).
2. Литманович Ю.А Развитие методов решения задач навигации на базе инерциального подхода (видеозаписи 4 лекций-семинаров – в эл.сети АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»).
3. Литманович Ю.А. Определение параметров углового и поступательного движения твердого тела по инерциальной информации в форме приращений кратных интегралов от измеряемых параметров. Изв. РАН, Механика твердого тела, №1, 2002г.
4. Литманович Ю.А. Об одном подходе к использованию избыточной информации в задачах определения угловой ориентации по наблюдению за двумя векторами, «Гироскопия и навигация», №3, 2012 г.
5. Матвеев В.В. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 9. Ч. 2
6. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. - 2020. - №2 - С. 3-10.
7. Пешехонов В.Г. Проблема уклонения отвесной линии в высокоточной навигации // Гироскопия и навигация.- 2020.- №4- С.3-15.
8. Соколов А.И., Литманович Ю.А., Драницына Е.В. Автономная навигация необитаемых автономных аппаратов. Научно-технический сборник //Системы управления и обработки информации: научн.-техн.сб./ АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб. 2024. Вып. 1, С.17-28.
9. Теннштедт Б., Веддиг Н., Шён Ш.. Повышение точности инерциальной навигации с использованием интерферометров на холодных атомах // Гироскопия и навигация. - 2021. - №4 - С.22-45.
10. Уокер Т.Дж., Ларсен М.С. ЯМР-гироскопы со спин-обменной накачкой. // Гироскопия и навигация. - 2018. - №1 - С. 28-54.