П Р О Г Р А М М А

вступительного экзамена в аспирантуру
по научной специальности 2.2.5
Приборы навигации

Санкт-Петербург
2022

Содержание программы

1. Физико-теоретические основы элементов и систем управления движением и навигации

Задачи навигации и управления движением подвижных объектов. Навигационные и динамические параметры. Навигационные измерения. Навигационные системы. Системы координат, используемые в навигации. Форма и размеры Земли. Геоид, эллипсоиды вращения. Гравитационное поле Земли. Аномалии гравитационного поля. Нормальный потенциал поля силы тяжести. Уровенные эллипсоиды: общеземные ЕСК-90,WGS-84 и референц-эллипсоиды. Магнитное поле Земли. Структура поля. Нормальное и аномальное поля. Картографические проекции и морские карты. Астрономические соотношения (небесная сфера и измерение времени).

Навигационные системы координат. Линии и поверхности положения Направления на земной поверхности. Линии пути: локсодромия и ортодромия. Навигационные параметры - кинематические параметры поступательного движения объекта. Параметры ориентации - кинематические параметры вращательного движения объектов, движущихся вблизи поверхности Земли. Параметры движения орбитальных космических аппаратов.

Уравнения метода счисления пути. Определение геоцентрических, ортодромических и географических координат места. Построение навигационных систем счисления пути в авиации и морском флоте. Современные гирокомпасы и лаги. Модели погрешностей навигационных систем счисления пути и их анализ.

Основное уравнение инерциальной навигации. Принцип интегральной коррекции. Алгоритмы идеальной работы автономных инерциальных навигационных систем (ИНС). Классификация типов ИНС. Определение параметров угловой ориентации (углов Эйлера-Крылова, направляющих косинусов, параметров Родрига-Гамельтона и др.) и навигационных параметров. Построение бесплатформенных (бескарданных) ИНС.

Общая характеристика методов обсерваций. Первичные навигационные измерения в австронавигационных, радионавигационных наземного базирования и спутниковых навигационных системах (СНС). История создания и основные параметры СНС первого и второго поколений. Уравнения связи первичных навигационных измерений и искомых координат места подвижного объекта. Методы решения обсервационной задачи. Метод навигации по геофизическим полям.

2.Прикладная теория гироскопов

Дифференциальные уравнения движения трехстепенного гироскопа, их решение и анализ. Дифференциальные уравнения движения гироскопа, установленного на Земле, их решение. Видимое движение оси гироскопа. Принцип действия гиротахометра. Дифференциальное уравнение движения гиротахометра. Его динамические характеристики. Методические и инструментальные погрешности гиротахометра. Принцип действия интегрирующего гироскопа. Динамические характеристики поплавкового интегрирующего гироскопа. Методические и инструментальные погрешности поплавкового интегрирующего гироскопа.

Трехстепенной роторный вибрационный гироскоп: принципиальная схема, уравнения движения, их анализ. Измерение угловых скоростей трехстепенным роторным вибрационным гироскопом. Условие динамической настройки. Погрешности динамически настраиваемых гироскопов.

Принципиальная схема одноосного гиростабилизатора и ее работа. Дифференциальные уравнения одноосного гиростабилизатора. Структурная схема одноосного гиростабилизатора. Погрешности гиростабилизатора на качке. Кинематическая погрешность одноосного гиростабилизатора. Условие устойчивости гиростабилизатора.

Принцип действия кольцевого оптического квантового генератора. Принципиальная схема лазерного гироскопа. Его выходные характеристики. Принципиальная схема волоконно-оптического гироскопа и ее работа. Выходные характеристики, чувствительность и погрешности волоконно-оптического гироскопа.

Конструкции волоконно-оптического гироскопа. Методы компенсации влияния температурных и вибрационных воздействий.

Принципиальная схема акселерометра компенсационного типа. Ее работа. Методические и инструментальные погрешности акселерометров. Принципиальная схема струнного акселерометра и особенности ее работы.

Состояние и перспективы развития микротехнологий для навигации и управления движением. Материалы и технологии при изготовлении микромеханических чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров). Системы автоматизированного проектирования микромеханических чувствительных элементов. Упругие и бесконтактные подвесы микромеханических чувствительных элементов. Индикаторные и силовые устройства микромеханических чувствительных элементов. Классификация микромеханических акселерометров. Одноосные и многоосные измерители. Основные погрешности микромеханических акселерометров. Классификация микромеханических гироскопов. Одноосные и многоосные измерители. Основные погрешности микромеханических гироскопов.

3.Принципы построения приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации

Кинематические и динамические уравнения вращательного движения твердого тела. Классификация гироскопических систем ориентации. Принципиальная схема гироазимута. Дифференциальные уравнения движения гироазимута. Их анализ. Типы построителей вертикали. Построение вертикали с помощью гиромаятника. Принципиальная схема гировертикали с пропорциональной коррекцией. Дифференциальные уравнения движения гировертикали. Их анализ.

Принцип действия гирокомпаса. Дифференциальные уравнения движения маятникового гирокомпаса и гирокомпаса с косвенным управлением. Анализ уравнений движения гирокомпаса. Метод определения азимута наземным гирокомпасом.

Схемы построения, элементная база, алгоритмы функционирования и модели погрешностей современных гироинклинометров.

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.

4.Инерциальные навигационные системы

Классификация инерциальных навигационных систем, современный мировой уровень их развития. Примеры построения современных зарубежных и отечественных платформенных и бескарданных систем. Современный уровень развития отечественной элементной базы бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Структура построения и приборный состав измерительных модулей (блоков) и навигационных вычислителей современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем.

Алгоритмы идеальной работы инерциальной навигационной системы. Алгоритмы решения задачи ориентации в платформенных инерциальных навигационных систем и в бесплатформенных инерциальных навигационных системах на датчиках угловой скорости типа волоконно-оптический гироскоп или микромеханический датчик. Алгоритм решения задачи ориентации в бесплатформенных инерциальных навигационных системах на позиционных гироскопах типа электростатический гироскоп. Алгоритмы решения задач преобразования сигналов акселерометров на навигационные оси в бесплатформенных инерциальных навигационных системах и их интегрирования. Особенности реализации дискретных алгоритмов в бесплатформенных инерциальных навигационных системах.

Модели погрешностей инерциальных навигационных систем (ИНС) и их анализ. Модели погрешностей платформенных инерциальных навигационных систем в выработке параметров ориентации и навигационных параметров подвижного объекта. Кинематические уравнения для погрешностей бесплатформенных инерциальных навигационных систем в выработке навигационных параметров и параметров ориентации. 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.

Особенности модели погрешностей бескарданных инерциальных измерительных модулей в условиях движения объекта по баллистической траектории.

Особенности алгоритмов работы и модели погрешностей бескарданных инерциальных измерительных модулей на электростатических гироскопах и бескарданных инерциальных измерительных модулей на волоконно-оптических гироскопах для условий движения орбитального космического аппарата.

Современное состояние отечественных и зарубежных инерциальных чувствительных элементов для бескарданных инерциальных измерительных модулей, их точностные и массогабаритные характеристики.

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 бескарданных инерциальных измерительных модулей.

Изучение дискретных алгоритмов и модели погрешностей бесплатформенных инерциальных навигационных систем методом имитационного моделирования алгоритмов их работы на персональном компьютере с использованием пакета Matlab (Simulink): задание формы, размеров и параметров нормальной Земли, нормального гравитационного поля, параметров поступательного и углового движения объекта, моделей дрейфов измерительного блока бескарданного инерциального измерительного модуля, включая румбовые дрейфы, погрешности акселерометров, неортогональности измерительных осей чувствительных элементов и аномалии гравитационного поля Земли; формирование измерений (с имитацией данных лага) и соответствующих сигналов управления для демпфирования собственных колебаний погрешностей бесплатформенных инерциальных навигационных систем.

Особенности камеральной обработки данных стендовых и объектовых испытаний измерительного блока бескарданного инерциального измерительного модуля на персональном компьютере с использованием пакетов Matlab (Simulink) по дискретным алгоритмам работы бесплатформенных инерциальных навигационных систем.

5.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. Согласование начал отсчета координат в спутниковой радионавигационной системе. Типовые структуры совмещенных сигналов пассивных спутниковых навигационных систем. Сигналы систем GPS и ГЛОНАСС. Навигационные параметры. Навигационные функции. Конечные и итерационные методы определения координат потребителя.

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.

6.Обработка навигационной информации

Случайные векторы и процессы, методы их описания. Определение случайного вектора и соответствующих ему понятий функции плотности распределения вероятности, математического ожидания, матрицы ковариаций и среднеквадратического эллипса ошибок. Стационарные, эргодические и марковские процессы. Определение и свойства винеровского процесса.

Определение спектральной плотности для случайного процесса. Определение дисперсии процесса по его спектральной плотности. Вариация Аллана и ее использование в задачах обработки навигационной информации.

Формирующий фильтр. Уравнения для математического ожидания, матрицы ковариаций на выходе линейного формирующего фильтра, заданного в пространстве состояний. Условия стационарности процесса на выходе формирующего фильтра.

Общая постановка задач оценивания постоянных параметров, решаемых при обработке навигационной информации. Формулировка постановки задачи оценивания с использованием метода наименьших квадратов. Решение задачи оценивания постоянной величины и амплитуды гармонического сигнала с использованием этого метода.

Формулировка постановки задачи дискретной линейной фильтрации. Алгоритм ее решения с помощью фильтра Калмана. Понятие установившегося режима в задаче фильтрации. Фильтр Винера и его связь с фильтром Калмана.

Обработка избыточной информации при резервировании приборов и устройств. Мажоритарное резервирование гироскопических систем.

Основные схемы комплексной обработки навигационной информации.

Адаптивные и робастные алгоритмы обработки навигационной информации.

7.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 (ИСОН) и используемые в них методы комплексной обработки информации. Примеры построения зарубежных и отечественных современных ИСОН, их элементная база и основные точностные и эксплуатационные характеристики.

Задача фильтрации при интеграции данных бескарданного инерциального измерительного модуля, спутниковой навигационной систмы 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 ИСОН. 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.

Особенности интеграции данных бескарданного инерциального измерительного модуля и приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы, модели погрешностей интегрированной системы ориентации и навигации в условиях движения объекта по баллистической траектории.

Особенности построения, алгоритмы функционирования и модели погрешностей интегрированной системы ориентации и навигации с измерительным блоком на электростатических гироскопах (или на волоконно-оптических гироскопах), астровизирующим устройством и приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы для орбитальных космических аппаратов.

Изучение дискретных алгоритмов и погрешностей ИСОН методом имитационного моделирования алгоритмов их работы на персональном компьютере с использованием пакета Matlab (Simulink).

Особенности камеральной обработки данных стендовых и объектовых испытаний измерительного блока бескарданного инерциального измерительного модуля и приемной аппаратуре спутниковой навигационной системы на персональном компьютере с

использованием пакетов Matlab (Simulink) по дискретным алгоритмам работы интегрированной системы ориентации и навигации.

Основная литература.

1. Анучин О. Н., Емельянцев Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов.- СПб., 1999. - 357 с.
2. Анучин О.Н., Комарова И.Э., Порфирьев Л.Ф. Бортовые системы навигации и ориентации искусственных спутников Земли. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2004. – 325с.
3. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1992. - 280 с
4. Бромберг П.В. Теория инерциальных систем навигации.- М.: Наука, 1979.
5. Емельянцев Г.И. Курсы лекций по основам навигации, БИНС и ИСОН (электронные версии лекций – в эл.сети ЦНИИ «Электроприбор»).
6. Емельянцев Г.И., Степанов А.П. (под общей ред. акад. РАН В.Г.Пешехонова). Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2015.-
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. Бакитько Р.В., Булавский Н.Т., Горев А.П. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 3-е перераб. – М.: Радиотехника, 2005. -688с
9. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (ред. 5.1). Российский НИИ космического приборостроения. -2008.
10. Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н., Чурсин Ю.А. Интерфейсы микропроцессорных систем. Изд. Томского политехнического университета. - 2010. – 51 с
11. Дмитриев С.П. Высокоточная морская навигация. - СПб.: Судостроение, 1991
12. Лукьянов Д.П., Мочалов А.В., Одинцов А.А., Вайсгант И.Б. Инерциальные навигационные системы морских объектов.- Л.: Судостроение, 1989. – 184 с
13. Лурье А.И. Аналитическая механика.- М.: Изд-во физ.-мат.лит., 1961.
14. Лукьянов Д.П., В.Я.Распопов, Ю.В.Филатов Прикладная теория гироскопов .- СПб.:- ЦНИИ "Электроприбор".2015г.-315с.
15. Михайлов Н.В. Автономная навигация космических аппаратов при помощи спутниковых радионавигационных систем. – СПб: Изд. «Политехника». -2014. - 362 с
16. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем// Гироскопия и навигация.- 2011.- №1(72)- С.3-17.
17. Распопов В.Я. Непосредственные гиростабилизаторы.- Тула: Изд. ТулГу, 2015.- 220с.
18. 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".
19. Северов Л.А. Курс лекций по микромеханическим гироскопам и акселерометрам (электронная версия лекций – в эл.сети ЦНИИ «Электроприбор»).
20. Ландау Б.Е., Белаш А.А., Гуревич С.С., Емельянцев Г.И., Левин С.Л., Романенко С.Г. Бескарданная инерциальная система на электростатических гироскопах для орбитальных космических аппаратов и особенности ее математического

обеспечения// Изв. вузов «Приборостроение» СПб ГУ ИТМО, 2011, в.6, с.66…75.

21. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2009. 278с.
22. Филатов Ю.В. Курс лекций по лазерным и волоконно-оптическим гироскопам (электронная версия лекций – в эл.сети ЦНИИ «Электроприбор»).
23. Шимбирев Б.П. Теория фигуры Земли. М., Недра, 1975
24. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Система GPS NAVSTSR и ГЛОНАСС. – М.:Горячая линия.-Телеком, 2005.-272.с.

Дополнительная литература

1. **http:**//www.antarsat.ru
2. **http**://www.furuno.com.ru
3. **http**://www.geopp.de
4. **http**://www.glonass-iac.ru
5. **http**://www.gpsworld.com
6. **http**://www.ire.krgtu.ru/nir/razr/, http://www.gisa.ru/19722.html
7. http://www.irz.ru
8. **http**://www.javad.com\jgnss
9. **http:**//www.jrc.com
10. **http**://www.кртз.ру
11. **http**://www.ngs.noaa.gov
12. **http**://www.npk-spp.ru
13. **http:**//www.nvs-gnss.ru
14. **http**://www.novatel.com
15. **http**://www.radiocomplex.ru
16. **http**://www.rirt.ru
17. **http**:www.sdcm.ru
18. **http**://www.sperrymarine.com
19. **http**://www.u-blox.com
20. **http**://www.wikipedia.org