

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

Утверждена
Ученым советом
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
протокол № 04-26 от « 23 » апреля 20 26г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Системы и методы наземной и космической навигации»

Научная специальность:

1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

Форма обучения

очная

Москва, 2025

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Дисциплина: «Системы и методы наземной и космической навигации»

Научная специальность:

1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

Форма обучения: очная

ИСПОЛНИТЕЛЬ (разработчик программ):

Захваткин М.В., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, к.ф.-м.н.

РЕЦЕНЗЕНТ:

Тучин А.Г., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, д.ф.-м.н.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА РЕКОМЕНДОВАНА

Ученым советом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

протокол №_____от « 24 » апреля 20 26 г.

Заведующий аспирантурой _____ / Меньшов И.С. /

Оглавление

АННОТАЦИЯ.....	4
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	4
2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	4
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
3.1. Структура дисциплины	5
3.2. Содержание разделов дисциплины	5
3.3. Лекционные занятия	6
3.4. Семинарские занятия.....	6
4. ТЕКУЩАЯ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ И ИТОГОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ	7
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	9
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	9

АННОТАЦИЯ

Рабочая программа дисциплины «Системы и методы наземной и космической навигации» разработана и составлена в соответствии с требованиями Постановления Правительства РФ от 30.11.2021г. №2122 «Об утверждении Положения о подготовке научно-педагогических кадров в аспирантуре(адъюнктуре)», Приказа Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021г. №951 «Об утверждении федеральных государственных требований к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов)», в соответствии с учебными планами подготовки аспирантов Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН по научной специальности 1.1.7 - «Теоретическая механика, динамика машин».

Дисциплина «Системы и методы наземной и космической навигации» реализуется в рамках Блока «Образовательный компонент» программы подготовки научных и научно - педагогических кадров в аспирантуре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Основными источниками материалов для формирования содержания программы являются: учебные издания, монографии, научные публикации, Интернет-ресурсы.

Общая трудоёмкость дисциплины по учебному плану составляет 2 ЗЕТ (72 часа), из них лекций – 12 часов, семинарских занятий – 12 часов, практических занятий – 0 часов и самостоятельной работы – 48 часов, включая подготовку к зачету. Дисциплина реализуется на 3-м курсе, в 6-м семестре, продолжительность обучения – 1 семестр.

Текущая аттестация проводится в соответствии с заданиями и формами контроля, предусмотренными настоящей программой.

Промежуточная аттестация (итоговая оценка знания) осуществляется в период зачётно-экзаменационной сессии в форме дифференцированного зачёта.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения учебной дисциплины «Системы и методы наземной и космической навигации»:

- освоение теоретического материала дисциплины: определения, теоремы и их доказательства;
- формирование профессиональных компетенций, связанных с использованием методов и алгоритмов, изученных в рамках дисциплины, для решения прикладных задач.

Задачи освоения учебной дисциплины «Системы и методы наземной и космической навигации»:

- изучение методов оценивания состояния в применении к задачам навигационного обеспечения;
- овладение методами высокоточного преобразования между различными системами отсчета и шкалами времени;
- применение изученных методов и алгоритмов для решения задач определения параметров движения космических аппаратов.

2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Системы и методы наземной и космической навигации» направлен на формирование определенных знаний, умений и компетенций.

а) универсальные (УК): не предусмотрено

б) общепрофессиональные (ОПК): не предусмотрено

в) профессиональные (ПК):

- способность разрабатывать и исследовать теоретико-механические модели материальных систем (ПК-1);

- способность самостоятельно разрабатывать и исследовать математические модели механики робототехнических и мехатронных систем (ПК-2);
- способность использовать основные понятия прикладной небесной механики (ПК-3).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Иметь представление:

- об основных подходах к решению задачи определения параметров движения.

Знать:

- основные определения систем отсчета и шкал времени, используемых при решении задач навигации;
- основные инерциальных навигационных систем;
- оптимальные свойства основных статистических методов определения орбиты.

Уметь:

- поставить и решить задачу определения параметров движения;
- производить преобразования между ключевыми шкалами времени.

Владеть:

- методами Гаусса и Лапласа первоначального определения орбиты;
- моделями траекторных измерений;
- современными моделями вращения Земли.

Приобрести опыт:

- решения задачи определения орбиты космического аппарата.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Структура дисциплины

Распределение трудоёмкости дисциплины по видам учебных работ

Вид учебной работы	Трудоёмкость	
	ЗЕТ	час.
Общая трудоёмкость по учебному плану	2	72
Лекции (Л)		12
Практические занятия (ПЗ)		0
Семинары (С)		12
Самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарским и практическим занятиям) и самостоятельное изучение тем дисциплины		24
Вид контроля: дзачёт		24

3.2. Содержание разделов дисциплины

Общее содержание дисциплины

№ раздела	Наименование темы (раздела)	Содержание темы (раздела)	Форма текущей аттестации
1.	Системы координат и шкалы времени в навигации	Небесная и земная системы отсчета. Модели вращения Земли. Прецессия и нутация. Шкалы времени и преобразование между ними. Солнечное, звездное, атомное время. Динамические шкалы времени. Эфемеридное время. Координатное и собственное время. Пульсарная шкала времени.	О, ДЗ
2.	Навигационные системы	Определение и свойства инерциальной навигации. Платформенные и бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Источники погрешностей и достижимые точности инерциальной навигации. Уравнения ошибок ИНС. Глобальные и региональные	О, ДЗ

		спутниковые системы навигации. Геометрический фактор точности определения местоположения. Математические модели измерений сигналов спутниковых систем навигации.	
3.	Задача определения орбиты по траекторным измерениям	Детерминированные и статистические методы определения орбиты. Методы Лагранжа-Гаусса и Лапласа первоначального определения орбиты. Критерии оптимальности статистических методов определения орбиты. Теорема Гаусса-Маркова. Оценка и прогноз навигационных ошибок. Компенсация шума динамической модели. Световое уравнение. Запаздывание сигнала, распространяющегося в центральном гравитационном поле невращающегося тела. Математические модели оптических и радиотехнических траекторных измерений космического аппарата. Вычисление частных производных расчетных значений измерений по уточняемым параметрам. Алгоритмы высокоточного преобразования между динамическими шкалами времени	О, ДЗ

Примечание: О – опрос, Д – дискуссия (диспут, круглый стол, мозговой штурм, ролевая игра), ДЗ – домашнее задание (эссе и пр.). Формы контроля не являются жёсткими и могут быть заменены преподавателем на другую форму контроля.

3.3. Лекционные занятия

№ занятия	№ раздела (темы)	Краткое содержание раздела (темы)	Кол-во часов
1.	1	Небесная и земная системы отсчета, их современная реализация. Модели вращения Земли, разделение движение на смещение полюса, суточное вращение, прецессию и нутацию. Определение шкалы времени. Всемирное, звездное, всемирное и атомное время. Динамические шкалы времени. Координатное и собственное время. Пульсарная шкала времени.	4
2.	2	Определение и свойства инерциальной навигации. Платформенные и бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Глобальные и региональные спутниковые системы навигации. Траекторные измерения по сигналам ССН.	2
3.	3	Детерминированные и статистические методы определения орбиты. Методы Лагранжа-Гаусса и Лапласа первоначального определения орбиты. Критерии оптимальности оценок в статистических методах определения орбиты. Минимаксные оценки. Теорема Гаусса-Маркова.	2
4.	3	Оценка и прогноз навигационных ошибок. Компенсация шума динамической модели. Запаздывание сигнала, распространяющегося в центральном гравитационном поле невращающегося тела. Математические модели оптических и радиотехнических траекторных измерений космического аппарата. Высокоточное преобразования между динамическими шкалами времени.	4
	ВСЕГО		12

3.4. Семинарские занятия

№ занятия	№ Раздела (темы)	Краткое содержание раздела (темы)	Кол-во часов
1.		Международные небесная и земная системы отсчета. Современные модели вращения Земли и их реализация. Параметры вращения Земли. Связь между звездным и всемирным временем. Уравнение равноденствий. Преобразование между динамическими шкалами времени. Приближенное выражение для преобразования между земной и барицентрической шкалами времени.	4
2.		Источники погрешностей и достижимые точности инерциальной навигации. Уравнения ошибок ИНС. Геометрический фактор точности определения местоположения по сигналам спутниковых систем навигации. Математические модели измерений сигналов спутниковых систем навигации.	2
3.		Статистические методы определения орбиты. Подходы к учету шума динамической модели. Прогнозирование навигационных ошибок. Математические модели оптических и радиотехнических траекторных измерений космического аппарата.	2
4.		Вычисление частных производных расчетных значений измерений по уточняемым параметрам. Алгоритмы высокоточного преобразования между земной и барицентрической шкалами времени	4
	ВСЕГО		12

4. ТЕКУЩАЯ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ И ИТоговый КОНТРОЛЬ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Аттестация аспирантов проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – «Положение о текущей и промежуточной аттестации в аспирантуре Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)» и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине проводится в форме опроса, а также оценки вопроса-ответа в рамках участия обучающихся в дискуссиях и различных контрольных мероприятиях по оцениванию фактических результатов обучения, осуществляемых преподавателем, ведущим дисциплину. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины см. ниже.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина: активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость занятий;
- степень усвоения теоретических знаний и уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы, проводимым в рамках семинаров, практических занятий и самостоятельной работы.

Оценивание обучающегося на занятиях осуществляется с использованием нормативных оценок по четырёх-балльной системе (5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – удовлетворительно, 2 – неудовлетворительно).

Оценочные средства для текущей аттестации

Форма контроля знаний	Вид аттестации	Примечание
Опрос слушателей	текущая	Опрос по темам предыдущих занятий
Домашние задания	текущая	Подготовка рефератов

Примерные темы рефератов для текущего контроля успеваемости:

1. Практическая реализация современных моделей вращения Земли.
2. Земная и барицентрическая динамические шкалы времени.
3. Измерения сигналов спутниковых систем навигации.
4. Ошибки инерциальной навигационной системы.
5. Статистические методы определения орбиты и их оптимальные свойства.
6. Расчет запаздывания сигнала в математических моделях траекторных измерений
7. Использование пульсарной шкалы в качестве навигационных сигналов

Формой промежуточной аттестации (итоговый контроль уровня знаний) является дифференцированный зачет, который проводится в период зачётно-экзаменационной сессии в соответствии с графиком учебного процесса. Обучающийся допускается к зачёту в случае выполнения всех учебных заданий и мероприятий, предусмотренных настоящей программой. В случае наличия учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) невыполненных заданий) аспирант отрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

Оценивание обучающегося осуществляется с использованием нормативных оценок:

Оценка	Требования к знаниям и критерии выставления оценок
2, неудовлетворительно	не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы
3, удовлетворительно	имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ
4, хорошо	твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения
5, отлично	глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач

Примерный список вопросов для итогового зачёта:

1. Небесная и земная системы отсчета. Международная реализация этих систем.
2. Модели вращения Земли. Прецессия и нутация.
3. Шкалы времени и преобразование между ними. Солнечное, звездное, всемирное и атомное время.
4. Динамические шкалы времени. Эфемеридное время.
5. Координатное и собственное время.
6. Пульсарная шкала времени.
7. Определение и свойства инерциальной навигации.
8. Платформенные и бесплатформенные инерциальные навигационные системы.
9. Источники погрешностей и достижимые точности инерциальной навигации. Уравнения ошибок ИНС.

10. Глобальные и региональные спутниковые системы навигации. Геометрический фактор точности определения местоположения.
11. Математические модели измерений сигналов спутниковых систем навигации.
12. Детерминированные и статистические методы определения орбиты.
13. Методы Лагранжа-Гаусса и Лапласа первоначального определения орбиты.
14. Критерии оптимальности статистических методов определения орбиты. Теорема Гаусса-Маркова.
15. Оценка и прогноз навигационных ошибок. Компенсация шума динамической модели.
16. Световое уравнение. Запаздывание сигнала, распространяющегося в центральном гравитационном поле невращающегося тела.
17. Математические модели траекторных измерений космического аппарата. Вычисление частных производных расчетных значений измерений по уточняемым параметрам.
18. Алгоритмы высокоточного преобразования между динамическими шкалами времени.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Жаров В.Е. Сферическая астрономия. Фрязино, 2006, 480 с.
2. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1976, 672 с.
3. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике (под ред. Г.Н.Дубошина). М.: Наука, 1971, 584 с.
4. Платонов А.К. О построении движений в баллистике и мехатронике. В сб. Прикладная небесная механика и управление движением (сборник статей, посвящённый 90-летию со дня рождения Д.Е. Охоцимского), ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010, с. 127-222.
5. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. : Наука, 1976.
6. Херрик С. Астродинамика / под ред. В. А. Сарычев. : Мир, 1977.
7. Tapley B. D., Schutz B. E., Born G. H. Statistical Orbit Determination / под ред. F. Cynar. : Elsevier, 2004.

Дополнительная литература и Интернет-ресурсы

1. Тучин Д.А. Автономное определение орбиты на борту космического аппарата // Препринт ИПМ, 2019, № 7, 36 с.
2. Аким Э.Л., Энеев Т.М. Движение искусственных спутников Земли. Межпланетные полёты. В сб. Прикладная небесная механика и управление движением (сборник статей, посвящённый 90-летию со дня рождения Д.Е. Охоцимского), ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010, с. 7-29.
3. Чулин А.Н. Калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы по информации автономной системы навигации на активных участках полёта космического аппарата. В сб. Актуальные вопросы проектирования космических аппаратов и комплексов. Вып. М.: «Блок-Информ-Экспресс», 2005, с. 274-279.
4. Moyer T. D. Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation.: John Wiley & Sons, 2003.
5. Vallado D. A. Fundamentals of astrodynamics and applications. : Microcosm Press, 2013. Вып. 4.

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для чтения лекций и проведения семинаров требуется мультимедийная аудитория с проектором.

ИСПОЛНИТЕЛИ (разработчики программы):

Захваткин М.В., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, к.ф.-м.н.