

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
аэрокосмических технологий  
С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Глобальные навигационные спутниковые системы
<b>по направлению:</b>	Техническая физика
<b>профиль подготовки:</b>	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: И.О. Скакун, преподаватель

Программа обсуждена на заседании центра образовательных программ ФАКТ 02.12.2024

## Аннотация

Курс «Глобальные навигационные спутниковые системы» (ГНСС) посвящен задаче обработки измерений навигационных космических аппаратов (КА). В курсе рассматривается принцип построения и функционирования ГНСС, задача уточнения координат и времени навигационного приёмника и задача уточнения орбит и поправок часов КА ГНСС.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- изучение основных теоретических понятий, концепций и подходов, используемых для обработки измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) космических аппаратов (КА).

#### Задачи дисциплины

- приобретение базовых знаний о принципах построения ГНСС;
- приобретение базовых знаний о системах отсчета, системах координат и шкалах времени;
- приобретение базовых знаний о спутниковых сигналах и навигационном приемнике;
- приобретение базовых знаний о расчетном аналоге навигационных измерений;
- приобретение базовых знаний о методах оценивания параметров;
- приобретение базовых знаний о расчете орбит и поправок часов КА ГНСС;
- освоение методов позиционирования по измерениям КА ГНСС на персональном компьютере;
- освоение методов определения орбиты КА по измерениям КА ГНСС на персональном компьютере.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-6 Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1 Определяет приоритеты профессиональной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
	УК-6.2 Способен планировать самостоятельную деятельность в решении профессиональных задач; подвергать критическому анализу проделанную работу; находить и творчески использовать имеющийся опыт в соответствии с задачами саморазвития
ОПК-1 Способен использовать фундаментальные законы природы и основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности	ОПК-1.2 Использует необходимые физические законы и понимает границы их применимости
ОПК-3 Способен осуществлять теоретические и экспериментальные исследования в избранной области технической физики, учитывать современные тенденции развития технической физики в своей профессиональной деятельности	ОПК-3.1 Способен проводить анализ проблем и задач, возникающих в избранной области технической физики

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- принципы построения ГНСС;
- системы отсчета, системы координат и шкалы времени;
- структуру спутниковых навигационных сигналов и принцип функционирования навигационного приёмника;
- модель навигационных измерений.

уметь:

- решать задачу позиционирования навигационного приёмника по измерениям КА ГНСС;
- решать задачу определения орбиты низкоорбитального КА по измерениям КА ГНСС.

владеть:

- теоретическим и понятийным аппаратом, используемым для обработки измерений КА ГНСС.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	История и принцип построения ГНСС	4			3
2	Системы отсчета	6			2
3	Спутниковые сигналы КА ГНСС и навигационный приемник	4			2
4	Модель кодовых и фазовых измерений КА ГНСС	4			2
5	Методы оценивания параметров	6			2
6	Методы позиционирования по сигналам КА ГНСС	6			4
7	Связь координат КА в инерциальной и земной системах координат через параметры вращения Земли	16			6
8	Орбиты и поправки часов КА ГНСС	14			9
Итого часов		60			30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

###### 1. История и принцип построения ГНСС

История развития и принципы построения ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, Beidou, QZSS). Общие характеристики навигационных систем.

###### 2. Системы отсчета

Системы отсчета. Небесная и земная системы координат и переход между ними. Параметры вращения Земли. Шкалы времени и переход между ними (UT, ET, UT1, TAI, UTC, TDT&TDB, GPS Time, TT). Принцип построения атомной шкалы времени TAI и UTC.

###### 3. Спутниковые сигналы КА ГНСС и навигационный приемник

Общая структура навигационных сигналов КА ГНСС. Бинарная фазовая манипуляция. Меандровые шумоподобные (ВОС) сигналы. Общий принцип работы приёмника. Антенна. Приёмное устройство. АЦП. Опорный генератор и синтезатор частот. Демодуляция навигационного сообщения. Измерения текущих навигационных параметров.

#### 4. Модель кодовых и фазовых измерений КА ГНСС

Общий вид модели кодовых и фазовых измерений КА ГНСС. Поправки часов КА и приёмника. Атмосферная и ионосферная задержки. Выносы фазовых центров излучающей и приёмной антенн. Эффект набега фазы. Релятивистские эффекты. Систематические смещения. Фазовая неоднозначность. Используемые комбинации кодовых и фазовых измерений в разных частотных диапазонах. Соглашения IERS.

#### 5. Методы оценивания параметров

Линеаризация измерений КА. Взвешенный метод наименьших квадратов. Фильтр Калмана. Методы решения линейных систем уравнений. Решение систем линейных уравнений больших размерностей.

#### 6. Методы позиционирования по сигналам КА ГНСС

Описание методов позиционирования приёмника по измерениям КА ГНСС (standalone, RTK, PPP, PPP-RTK). Решение навигационной задачи по кодовым измерениям. Особенности обработки фазовых измерений.

Семестр: 8 (Весенний)

#### 7. Связь координат КА в инерциальной и земной системах координат через параметры вращения Земли

Невозмущенное и возмущенное движение КА. Уравнения движения. Уравнения в вариациях. Численное решение систем дифференциальных уравнений. Модель гравитационного потенциала Земли в форме разложения в ряд по сферическим функциям. Притяжение Солнца, Луны и планет. Учет сжатия Земли. Световое давление. Реактивная тяга. Приливные эффекты. Релятивистские эффекты. Эмпирическая модель светового давления.

#### 8. Орбиты и поправки часов КА ГНСС

Кинематический метод определения положения низкоорбитального КА по измерениям КА ГНСС. Динамический метод определения орбиты низкоорбитального КА по измерениям КА ГНСС. Общая структура задачи определения орбит и часов КА ГНСС. Международные службы IGS и IERS.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Компьютерная аудитория, проектор, доска.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Небесная механика. Основные задачи и методы [Текст] / Г. Н. Дубошин - М. Наука, 1968
2. Практические занятия по вычислительной математике в МФТИ [Текст]. Ч. 1 : учеб. пособие для вузов / Е. Н. Аристова, Н. А. Завьялова, А. И. Лобанов ; М-во образования РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2014 .— 243 с.
3. Практические занятия по вычислительной математике в МФТИ [Текст]. Ч. 2 : учеб. пособие для вузов / Е. Н. Аристова, А. И. Лобанов ; М-во образования РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2015 .— 310 с.

Фонд литературы кафедры:

1. Авдюшев В. А. и др. Численное моделирование орбит. – 2010.
2. Бордовицына Т. В., Авдюшев В. А. Теория движения искусственных спутников Земли //Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2007.

Дополнительная литература

1. Лекции по вычислительной математике [Текст], учеб. пособие для вузов / И. Б. Петров, А. И. Лобанов, М., Интернет-Ун-т Информ. Технологий : БИНОМ. Лаб. знаний, 2006, 2010, 2013

Фонд литературы кафедры:

1. Гасников А.В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска. – М.: МФТИ, 2018. - 241 с. 2-е изд
2. Hofmann-Wellenhof L.W. «GNSS. Global Navigation Satellite Systems» - 2008
3. Borre K., Strang G. «Algorithms for global positioning» - 2012
4. Montenbruck O., Gill E. «Satellite Orbits» - 2005
5. Kaplan E.D., Hegarty C.J. «Understanding GPS. Principles and applications» - 2006
6. Urban S.E., Seidelmann P.K. «Explanatory supplement to the astronomical almanac» - 2013
7. Teunissen P. J.G., Montenbruck O. «Handbook of Global Navigation Satellite Systems» - 2017

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

- <http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха
- <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование»
- <http://elibrary.ru> –электронная библиотека

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

C++, Python, интернет-ресурсы

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Лекции сопровождаются домашними заданиями (самостоятельной работой), в процессе выполнения которых студент совершенствует способность создания программного кода, а также закрепляет знания, полученные на лекции.

Самостоятельная работа включает в себя:

- ознакомление с актуальной научной литературой;
- решение задач при выполнении домашних заданий;
- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной литературе).

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляет преподаватель путем проверки домашних заданий и проведения индивидуальных консультаций.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Техническая физика
<b>профиль подготовки:</b>	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 7 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** И.О. Скакун, преподаватель

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-6 Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1 Определяет приоритеты профессиональной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
	УК-6.2 Способен планировать самостоятельную деятельность в решении профессиональных задач; подвергать критическому анализу проделанную работу; находить и творчески использовать имеющийся опыт в соответствии с задачами саморазвития
ОПК-1 Способен использовать фундаментальные законы природы и основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности	ОПК-1.2 Использует необходимые физические законы и понимает границы их применимости
ОПК-3 Способен осуществлять теоретические и экспериментальные исследования в избранной области технической физики, учитывать современные тенденции развития технической физики в своей профессиональной деятельности	ОПК-3.1 Способен проводить анализ проблем и задач, возникающих в избранной области технической физики

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Глобальные навигационные спутниковые системы» обучающийся должен:

### знать:

- принципы построения ГНСС;
- системы отсчета, системы координат и шкалы времени;
- структуру спутниковых навигационных сигналов и принцип функционирования навигационного приёмника;
- модель навигационных измерений.

### уметь:

- решать задачу позиционирования навигационного приёмника по измерениям КА ГНСС;
- решать задачу определения орбиты низкоорбитального КА по измерениям КА ГНСС.

### владеть:

- теоретическим и понятийным аппаратом, используемым для обработки измерений КА ГНСС.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Текущий контроль осуществляется в форме защиты домашних работ. Итоговая оценка выставляется с учетом выполнения домашних работ и устной беседы по программе курса.

Домашние работы:

Задание № 1

Реализация функции (класса) вычисления расчетного аналога навигационных измерений с учетом ряда коррекций. Тестирование написанного кода и проверка результатов.

Задание № 2

Решение координатно-временной задачи по предложенным навигационным измерениям. Тестирование написанного кода и проверка результатов.

Задание № 3

Реализация метода численного интегрирования систем дифференциальных уравнений движения и уравнений в вариациях с учетом ряда возмущающих факторов и коррекций. Тестирование написанного кода и проверка результатов.

#### Задание № 4

Решение задачи определения орбиты низкоорбитального КА по предложенным навигационным измерениям. Тестирование написанного кода и проверка результатов.

#### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Промежуточная аттестация проводится в форме дифференцированного зачета в осеннем и весеннем семестре.

Примеры вопросов для дифференцированного зачёта:

1. Описать различия между календарями и шкалами времени. Выписать формулы их конвертации.
2. Описать различия между системами координат. Выписать формулы перехода между ними.
3. Рассказать об структуре навигационных сигналов. Описать принцип функционирования навигационного приемника.
4. Рассказать о методах позиционирования. Описать алгоритм решения задач позиционирования и структуру матрицы производных системы линеаризованных уравнений.
5. Решить координатно-временную задачу по предложенным навигационным измерениям.
6. Реализовать метод численного интегрирования систем дифференциальных уравнений движения и уравнений в вариациях с учетом ряда возмущающих факторов и коррекций.
7. Рассказать о возмущениях, учитываемых при интегрировании уравнений движения. Описать их примерный вклад в погрешность интегрирования.
8. Рассказать о методах определения положения низкоорбитального КА по сигналам КА ГНСС. Описать алгоритм решения задач и структуру матрицы производных системы линеаризованных уравнений.
9. Рассказать о вычислении производных по параметрам эмпирических ускорений. Привести вид линеаризованного уравнения измерений с учетом производных по параметрам эмпирических ускорений.
10. Рассказать о возмущениях, учитываемых при интегрировании вариационных уравнений. Описать их примерный вклад в погрешность интегрирования. Привести вид линеаризованного уравнения измерений с учетом производных по параметрам вращения Земли и начальным условиям КА.

#### Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при выполнении домашних заданий и ответе на вопросы по программе дисциплины;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при выполнении домашних заданий и ответе на вопросы по программе дисциплины;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при выполнении домашних заданий и ответе на вопросы по программе дисциплины, но допускает при этом небольшие неточности;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, демонстрирует умение применять полученные знания на практике при выполнении домашних заданий, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, демонстрирует умение применять полученные знания на практике при выполнении домашних заданий, но допускает в ответе или в решении задач много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, демонстрирует умение применять полученные знания на практике при выполнении домашних заданий, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, если во время ответа, при выполнении домашних заданий он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;



оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту, если во время ответа, при выполнении домашних заданий он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту, если во время ответа он показал, что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач или не выполнил какое-либо из домашних заданий.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении устного дифференцированного зачёта обучающемуся выдается билет и предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов. Во время проведения дифференцированного зачёта при подготовке ответов на билеты, обучающиеся могут пользоваться только программой дисциплины.