



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

Институт №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы»

Кафедра 704 «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов»

Отчёт по лабораторной работе №2

по дисциплине «Бортовое оборудование летательных аппаратов»

на тему: **«Оценка координат GNSS-приёмника по эфемеридам с использованием
фильтра Калмана»**

Выполнили: студенты группы М7О-408С-21

_____ М.А. Артёмова

Принял: ассистент кафедры 704

_____ Е.А. Мартынов

Москва, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	3
МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЙ	3
РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ	3
ВЫВОДЫ.....	7
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	7

ВВЕДЕНИЕ

В данной лабораторной работе рассматривается задача определения координат наземного GNSS-приёмника по данным эфемерид из навигационного сообщения спутников в формате RINEX. Для уточнения координат используется метод фильтра Калмана. Целью является построение модели, которая позволяет по доступным спутниковым данным оценить положение приёмника и визуализировать спутники, их орбиты и ошибки модели.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

GNSS-приёмник определяет своё положение на основе сигналов от спутников, содержащих навигационную информацию (эфемериды). Эфемериды позволяют вычислить орбиты спутников в заданный момент времени. По полученным координатам спутников и измеренным псевдодальностям можно определить координаты приёмника.

Псевдодальность ρ_i до спутника i определяется как: $\rho_i = ||r_i - r_u|| + c \cdot \delta t$, где:

- r_i — координаты спутника в системе ECEF,
- r_u — координаты приёмника,
- c — скорость света,
- δt — временная поправка.

Для восстановления координат приёмника используется фильтр Калмана, который учитывает априорную ошибку и обновляет оценку состояния на основе измерений.

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Программа реализована на языке Python и выполняет следующие шаги:

1. Получение координат приёмника — задаются координаты в геодезической системе (широта, долгота, высота) и переводятся в ECEF.
2. Парсинг RINEX-файла — извлекаются эфемериды всех спутников (формат .25n), корректируется экспоненциальная запись.
3. Расчёт орбит спутников — по элементам эфемерид для каждого спутника вычисляется его траектория в системе ECEF на протяжении суток с шагом 10 минут. Используется уравнение Кеплера и преобразования координат с учётом вращения Земли.

4. Оценка углов видимости — вычисляется угол между вектором спутник-приёмник и зенитом. Спутники с углом менее 15° отбрасываются.

5. Координаты всех видимых спутников и углы видимости записаны в файл `visible_satellite_positions.csv`. Он содержит: Столбцы: X (м), Y (м), Z (м), Satellite (ID и угол). Подходит для использования в GIS, MATLAB и других инструментах анализа.

6. Оценка псевдодальностей — для каждого видимого спутника рассчитывается расстояние и добавляется поправка на временной сдвиг.

7. Применение фильтра Калмана — используется итерационный процесс обновления состояния (X, Y, Z, dT) на основе псевдодальностей. Модель включает ковариационные матрицы ошибок и производные дальностей по координатам. В случае сингулярной матрицы ковариации используется псевдообратная матрица.

8. Визуализация — строятся:

- *Рисунок 1* — Орбиты спутников и расположение приёмника. Цветовая классификация: зелёный — "отличные" спутники ($>30^\circ$), жёлтый — "удовлетворительные" ($15-30^\circ$), чёрный — "плохие" ($<15^\circ$), красный — приёмник.

- *Рисунок 2* — Эволюция координат (X, Y, Z) и временной поправки (dT) по итерациям фильтра Калмана.

- *Рисунок 3* — Снижение (в случае правильной работы программы) невязки по итерациям.

- *Рисунок 4* — Корреляционная матрица ошибок, показывающая взаимосвязь координат и временной компоненты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

По эфемеридным данным навигационного файла `Brdc0020.25n` были обработаны спутники системы GPS. Всего распознано 32 спутника, из которых отобраны 9 с углом $>15^\circ$.

После итераций фильтра Калмана оценённые координаты приёмника составили:
Предупреждение: матрица S сингулярна, использую псевдообратную

Оценённые координаты приёмника:

X: 2861583.545 м

Y: 2203715.991 м

Z: 5239574.772 м

Временная поправка: 0.001000000 с

В геодезической системе координат:

Широта: 55.600000° Долгота: 37.600000° Высота: 200.00 м

Вывод: координаты соответствуют городу Москве, РФ. Модель отработала корректно.

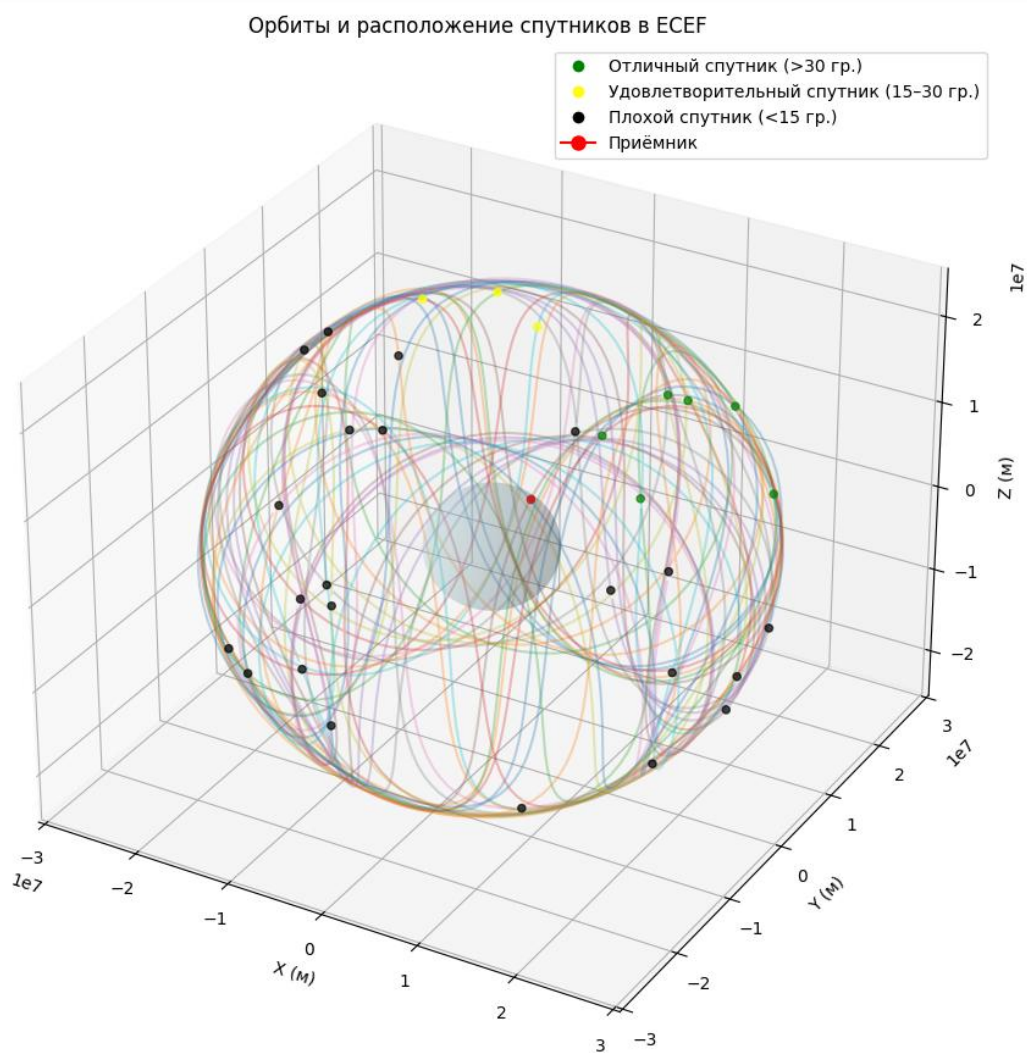


Рисунок 1 – 3D-график орбит спутников и расположения приёмника в системе ECEF с цветовой классификацией по углу

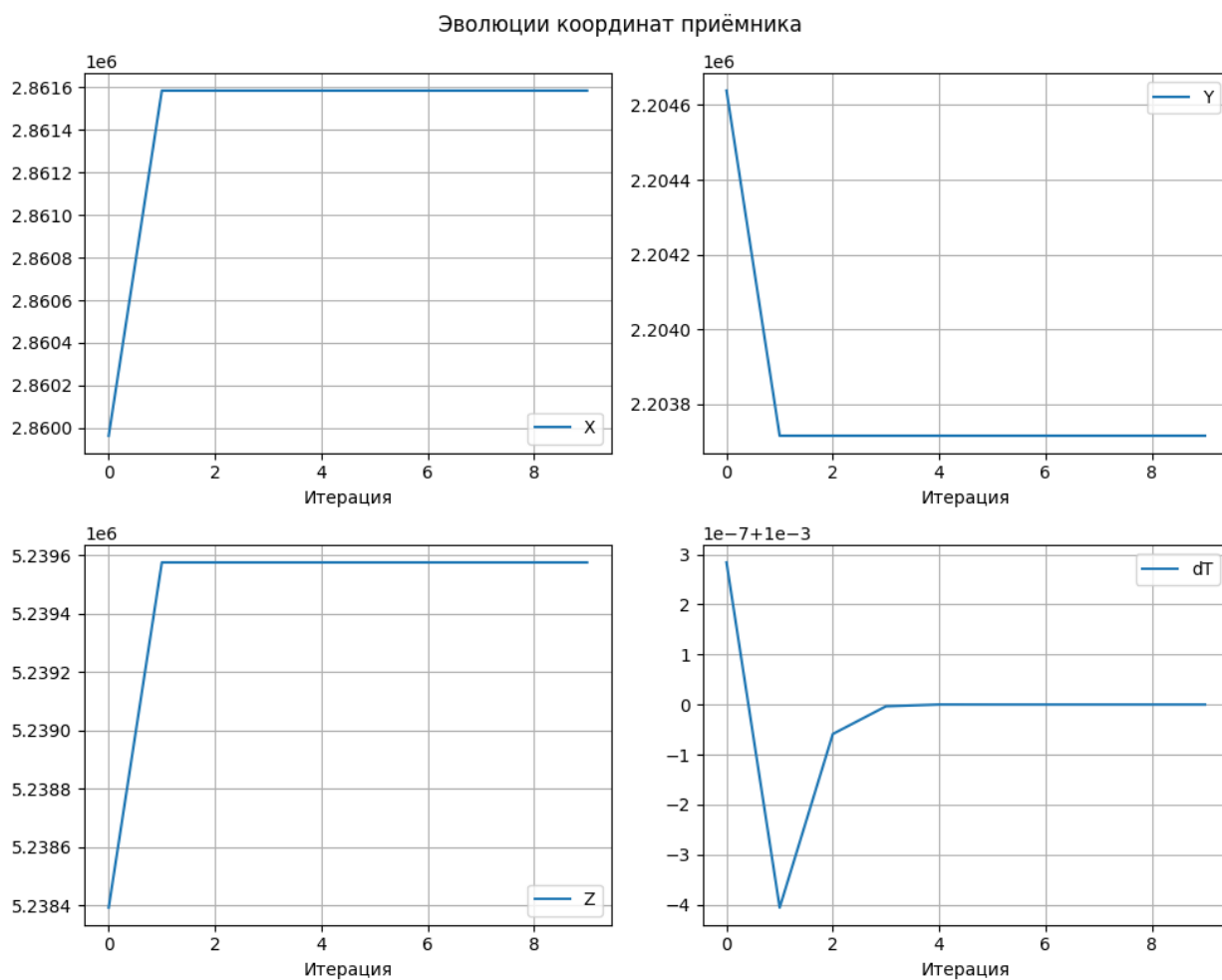


Рисунок 2 – Графики эволюций координат X , Y , Z и временной поправки dT по итерациям фильтра Калмана

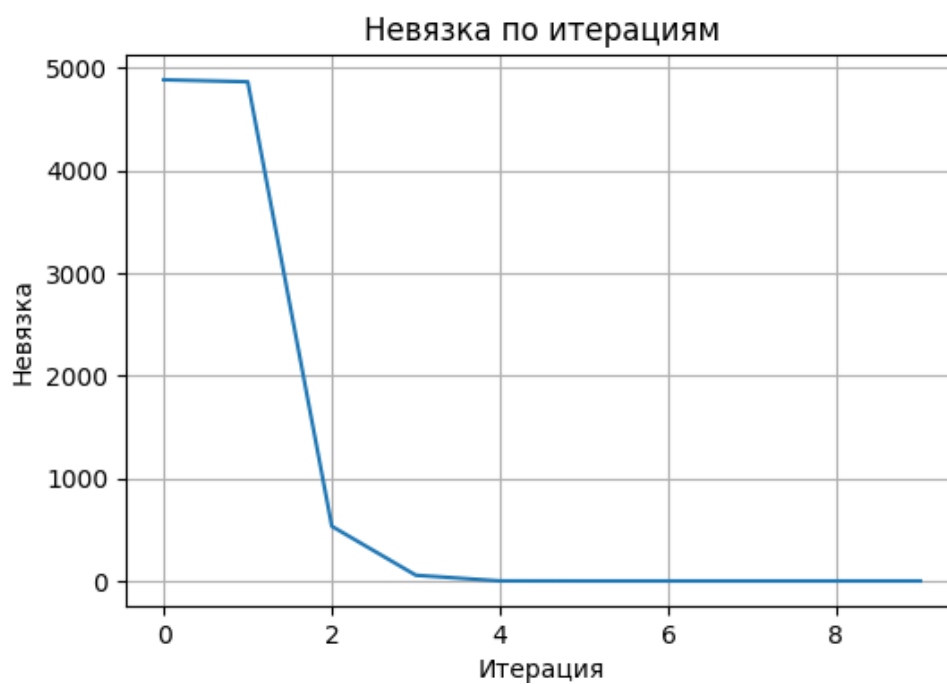


Рисунок 3 – График снижения невязки приёмника по итерациям

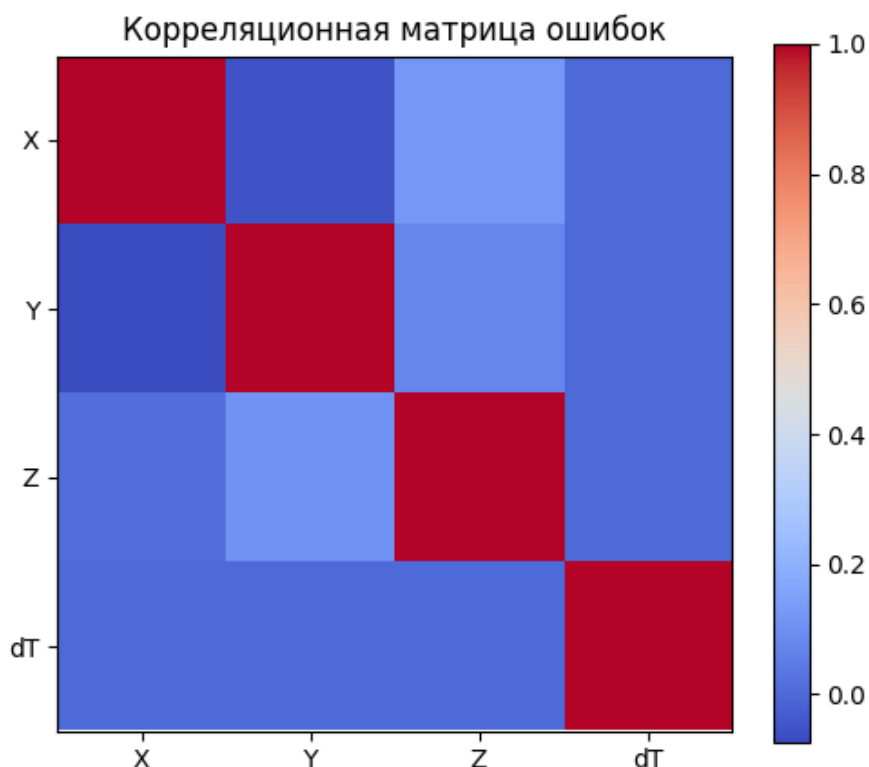


Рисунок 4 – Корреляционная матрица ошибок

ВЫВОДЫ

- Построена модель определения координат GNSS-приёмника на основе эфемеридных данных и фильтра Калмана.
- Реализована фильтрация и визуализация навигационного процесса.
- В случае вырождения ковариационной матрицы применяется псевдообратная матрица.
- Результаты соответствуют действительным координатам, что подтверждает корректность методики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. IGS/RTCM RINEX Committee. RINEX - The Receiver Independent Exchange Format. Version 4.02 / Ed. Francesco Gini. – 1 October 2024. – 131 p.
2. Бобронников В.Т., Козорез Д.А., Красильщиков М.Н., Лебедев А.А., Малышев В.В., Сыпало К.И., Федоров А.В. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов / под общ. ред. М.Н. Красильщикова, В.В. Малышева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Альянс, 2013. — 468 с.
3. Карлащук В.И., Карлащук С.В. Спутниковая навигация. Методы и средства. — М.: СОЛОН-Пресс, 2006. — 176 с. — (Библиотека инженера). — ISBN 5-98003-251-7.