



Коррекция и прогнозирование орбитального движения космических аппаратов с помощью искусственных нейронных сетей

Сорокин А.В, студент 4 курса ФУПМ

Научный руководитель: к.ф.-м.н., Ширококов М.Г.

ИПМ им.М.В.Келдыша РАН

05.07.2018

Содержание

- ▶ Постановка задачи
- ▶ План решения
- ▶ Введение в нейронные сети
- ▶ Решение задачи
- ▶ Заключение

Постановка задачи

- ▶ Перелет из точки в точку за заданное время в рамках возмущенной модели задачи двух тел

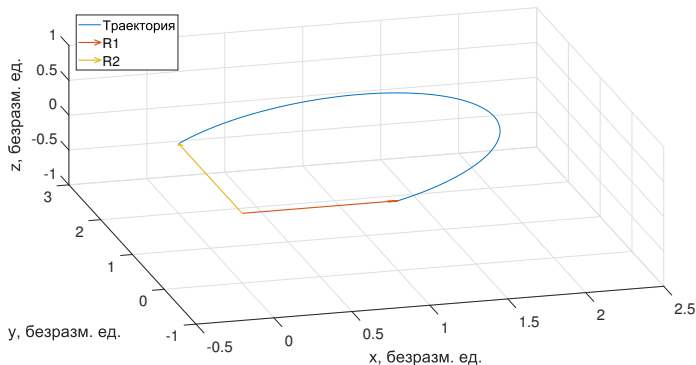


Рис. 1: Траектория перелета из точки в точку

Адаптивное управление

- ▶ Прогнозирующая нейронная сеть: сеть, которая принимает на вход положение, скорость и время полета КА, а выдает положение и скорость
- ▶ Корректирующая нейронная сеть: сеть, которая принимает на вход два положения и время полета, а выдает скорости в обоих положениях
- ▶ Обе искусственные нейронные сети (ИНС) обучены в рамках невозмущенной задачи двух тел

План решения

- ▶ Разработать прогнозирующую и корректирующую нейронные сети, составить для них обучающие выборки и обучить их
- ▶ Оценить точность решения, количество коррекций, оценить затраты характеристической скорости на весь перелет при различных величинах возмущающих ускорений
- ▶ Проверить влияние количества нейронов в сети на точность коррекций, проверить устойчивость решения к начальному условию

Введение в нейронные сети

- ▶ Нейронная сеть - взвешенный ориентированный граф в узлах которого находятся функции

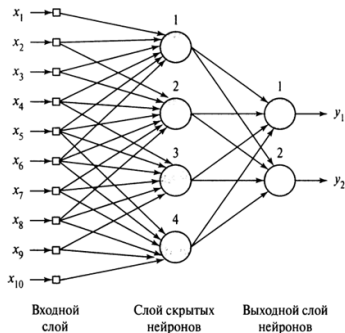


Рис. 2: Полносвязная нейронная сеть с одним скрытым слоем

Введение в нейронные сети

- ▶ Обучение с учителем - оптимизация функции потерь на обучающей выборке $S = \{[x_n, y_n]\}_{n=1}^N$
- ▶ Обучение без учителя - поиск внутренних взаимосвязей и зависимостей между объектами на основе их описания
- ▶ Обучение с подкреплением - поиск стратегий, приписывающих состояниям окружающей среды действия, которые сеть должна предпринять в этих состояниях

Решение задачи

- ▶ Инициализация обучающих выборок
- ▶ Разработка нейронных сетей для задач прогнозирования и коррекции
- ▶ Моделирование

Область инициализации выборки для прогноза

- ▶ Определим два шара, первый – радиуса ε_1 с центром в точке, задаваемой \vec{R}_1 , второй – радиуса ε_2 с центром в точке, задаваемой \vec{V}_1

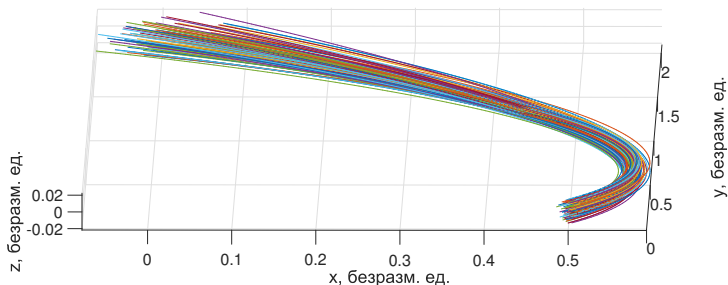


Рис. 3: Трубка траекторий

Выборка для прогнозирования

- ▶ Для задачи прогнозирования - составим конечный набор начальных условий, принадлежащих выбранным шарам: $\vec{y}_0 = [R_x, R_y, R_z, V_x, V_y, V_z]$
- ▶ Для каждого условия проинтегрируем траекторию
- ▶ Обучающая выборка: $S_{prog} = \{S_i\}_{i=1}^M$, где $S_i = \{[\vec{R}_n^i, \vec{R}_{end}^i]\}_{n=1}^N$
- ▶ M - количество траекторий, N - количество точек на траектории

Область инициализации выборки для коррекции

- ▶ Поместим невозмущенную траекторию в трубку радиуса δ и равномерно распределим в ней конечное количество позиций КА

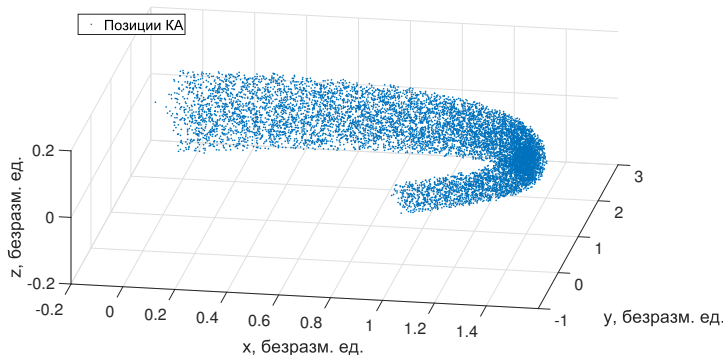


Рис. 4: Визуализация обучающей выборки для коррекции

Выборка для коррекции

- ▶ Для каждой позиции КА из трубки - \vec{R}_i и конечной точки из постановки \vec{R}_{end} посчитаем скорости, необходимые для того чтобы попасть из \vec{R}_i в \vec{R}_{end}
- ▶ Обучающая выборка: $S_{corr} = \{[\vec{R}_i, t_i, \vec{V}_i^{lambert}]\}_{i=1}^N$
- ▶ N - количество заданных позиций

Выбор нейронной сети

- ▶ Нейронная сеть радиально-базисных функций (РБФ-сеть):
 1. Единственный скрытый слой
 2. Только нейроны скрытого слоя имеют нелинейную активационную функцию
 3. Активационная функция - плотность нормального распределения
- ▶ Инициализация весов в сети происходит не произвольно, а с начальным приближением

Выход РБФ-сети и функционал ошибки

- ▶ Выход нейронной сети:

$$f(\vec{x}|\vec{\theta}) = \omega_0 + \sum_{n=1}^M \omega_n \exp\left(-\frac{\|\vec{x} - \vec{\mu}_n\|^2}{2\sigma_n^2}\right)$$

- ▶ Вектор параметров: $\vec{\theta} = [\vec{\omega}, \vec{\mu}, \vec{\sigma}]$, где $\vec{\mu} = [\vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_M]$
- ▶ M - количество нейронов в скрытом слое
- ▶ Функционал ошибки - среднеквадратическая ошибка

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y_n - f(\vec{x}_n|\vec{\theta}))^2$$

- ▶ N - количество примеров в обучающей выборке

Оптимизация функции потерь

- ▶ Длина вектора параметров $\vec{\theta}$ равна $M \cdot d + 2M + 1$
- ▶ Якобиан для сети на всех обучающих примерах:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(\vec{x}_1, \vec{\theta})}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f(\vec{x}_1, \vec{\theta})}{\partial \theta_{M \cdot d + 2M + 1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(\vec{x}_N, \vec{\theta})}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f(\vec{x}_N, \vec{\theta})}{\partial \theta_{M \cdot d + 2M + 1}} \end{pmatrix}$$

- ▶ Оптимизация методом Левенберга-Марквардта

$$\Delta \vec{\theta} = (J^T J + \lambda E)^{-1} J^T (\vec{y} - \vec{y}(\vec{\theta}))$$

Моделирование

- ▶ Проверка модели для различных уровней возмущения
- ▶ Оценка количества коррекций в зависимости от величины возмущающего ускорения
- ▶ Оценка затрат характеристической скорости на весь перелет
- ▶ Влияние количества нейронов в сети на точность коррекций
- ▶ Проверка устойчивости модели к начальному условию

Оценка точности моделей

- ▶ Зависимость точности попадания КА в цель от силы и типа возмущений

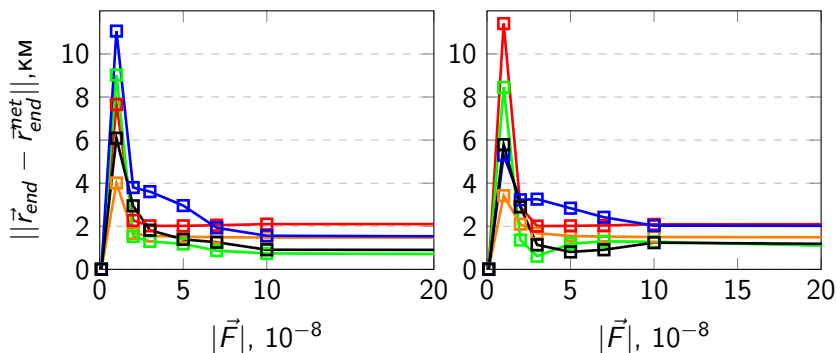


Рис. 5: Точность для постоянных и переменных возмущений

Оценка количества коррекций

- ▶ Зависимость количества коррекций от силы и типа возмущений

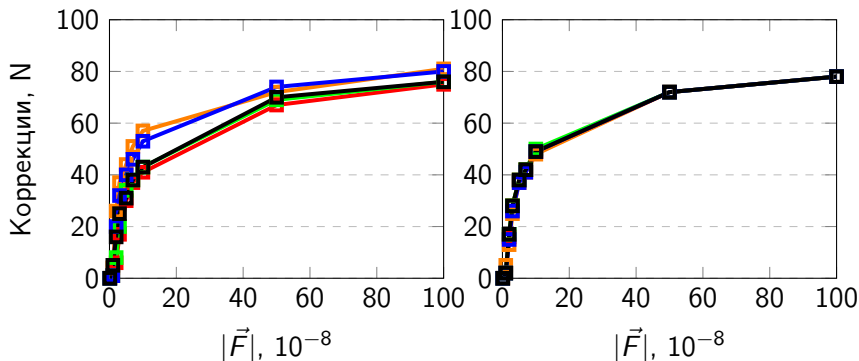
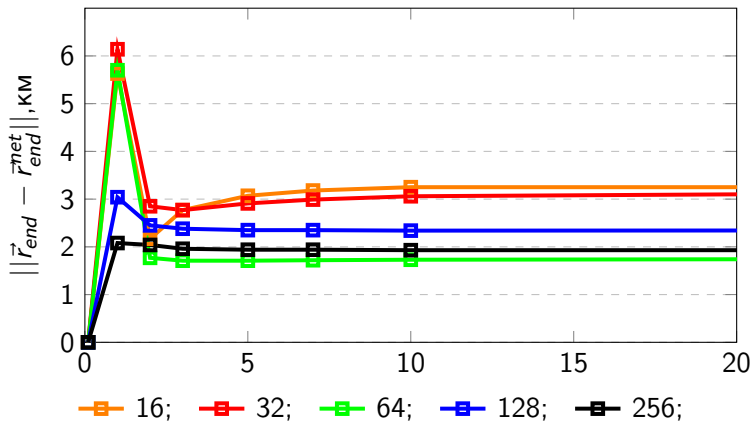


Рис. 6: Коррекции для постоянных и переменных возмущений

Влияние количества нейронов

- ▶ Зависимость точности попадания КА в цель от силы возмущения и количества нейронов в сети



Затраты характеристической скорости

- ▶ Зависимость нормы суммарного импульса от силы возмущения

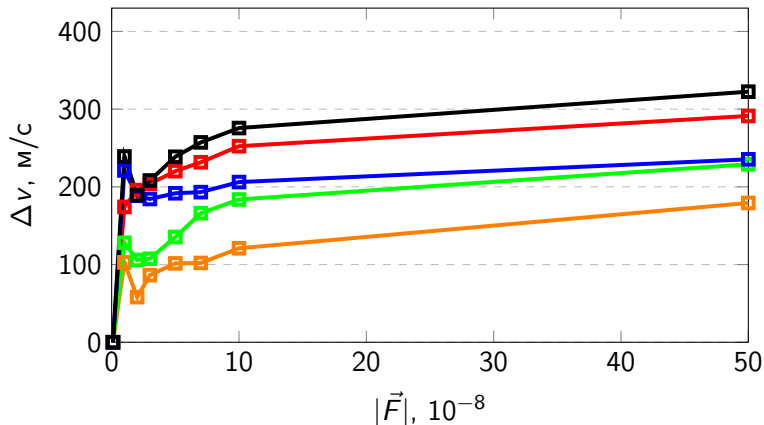


Рис. 7: Δv для переменных возмущений

Устойчивость модели

- ▶ Проверка модели на различных точках из окрестности начальной показала ее устойчивость

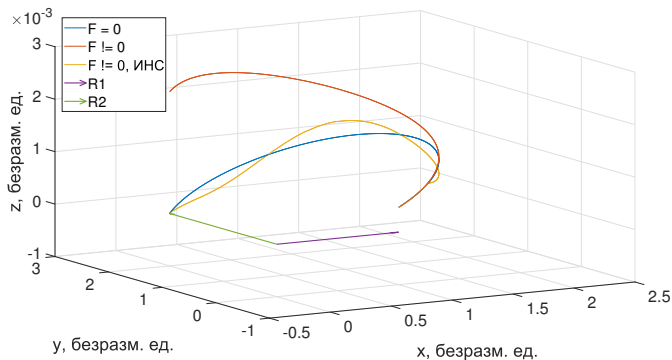


Рис. 8: Проверка устойчивости на примере плоской траектории

Заключение

- ▶ Для задачи перелета между двумя точками разработаны две нейронные сети отвечающие за коррекцию и прогноз орбитального движения аппарата в рамках возмущенной задачи двух тел
- ▶ Исследования показали, что увеличение возмущающей силы приводит к возрастанию количества необходимых коррекций
- ▶ Нейронные сети оказались способными решать задачу в случаях, когда начальное условие КА находится в окрестности исходной точки
- ▶ Точность производимых коррекций увеличивается при увеличении нейронов в сетях