

Управление и прогнозирование движения космического аппарата с малой тягой при помощи искусственных нейронных сетей

Сорокин А.В, студент 5 курса ФУПМ

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

ИПМ им.М.В.Келдыша РАН

19.11.2018

Содержание

- ▶ Постановка задачи
- ▶ Цель работы
- ▶ Введение в нейронные сети
- ▶ Решение задачи
- ▶ Заключение

Постановка задачи

- ▶ Рассматривается оптимальный по энергии перелет из точки \vec{X}_0 в точку \vec{X}_1 в рамках возмущенной модели задачи двух тел, где $\vec{X}_0 = [\vec{R}_0, \vec{V}_0]$, $\vec{X}_1 = [\vec{R}_1, \vec{V}_1]$
- ▶ Минимизируем функционал $\int_{t_0}^{t_f} u^2 dt$
- ▶ Классический подход состоит в применении принципа максимума Понтрягина, сопряженных переменных и метода продолжения по гравитационному параметру, разработанный Петуховым В.Г.

Цель работы

- ▶ Прогнозирующая нейронная сеть: сеть, которая принимает на вход положение, скорость, значение сопряженных переменных и время полета КА, а выдает положение и скорость
- ▶ Корректирующая нейронная сеть: сеть, которая принимает на вход два фазовых вектора и время полета, а выдает значение сопряженных переменных
- ▶ Обе искусственные нейронные сети (ИНС) обучены в рамках невозмущенной задачи двух тел

Введение в нейронные сети

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

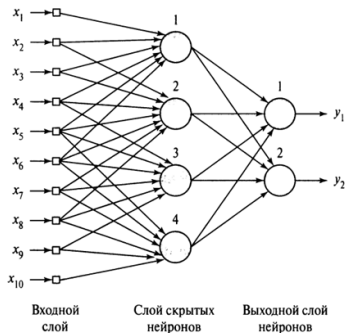


Рис. 1: Полносвязная нейронная сеть с одним скрытым слоем

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

Область инициализации выборки для прогноза

- ▶ Определим некоторую ε окрестность относительно точки, задаваемой начальным вектором \vec{X}_0 , где $\vec{X}_0 = [\vec{R}_0, \vec{V}_0, \vec{\lambda}_{r0}, \vec{\lambda}_{v0}]$ – 12-мерный вектор

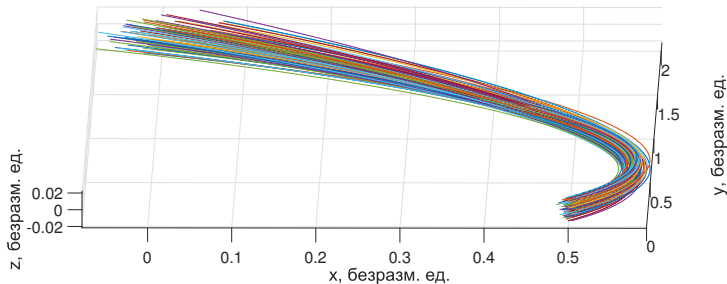


Рис. 2: Трубка траекторий

Выборка для прогнозирования

- ▶ Для задачи прогнозирования - составим конечный набор начальных условий, принадлежащих выбранной окрестности
- ▶ Для каждого условия проинтегрируем траекторию
- ▶ Обучающая выборка: $S_{prog} = \{S_i\}_{i=1}^M$, где $S_i = \{[\vec{R}_n^i, \vec{V}_n^i, \vec{\lambda}_{rn}^i, \vec{\lambda}_{vn}^i, t_n^i, \vec{R}_{end}^i]\}_{n=1}^N$
- ▶ 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

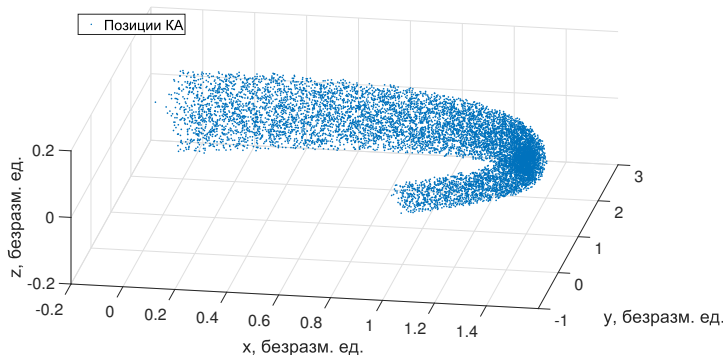


Рис. 3: Визуализация обучающей выборки для коррекции

Выборка для коррекции

- ▶ Для каждой позиции КА из трубки – \vec{R}_i найдем значения сопряженных переменных, необходимые для того чтобы попасть из \vec{R}_i в \vec{R}_{end}
- ▶ Обучающая выборка: $S_{corr} = \{[\vec{R}_i, \vec{V}_i, t_i, \vec{\lambda}_{ri}, \vec{\lambda}_{vi}]\}_{i=1}^N$
- ▶ 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

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

Заключение

- ▶ Для задачи оптимального перелета между двумя точками составлены обучающие выборки отвечающие за коррекцию и прогноз орбитального движения аппарата в рамках возмущенной задачи двух тел
- ▶ Разработаны и обучены две нейронные сети отвечающие каждой из выборок