

Изучение опасных природных явлений методами машинного обучения.

Д.А. Рязанов, С.В. Стрижак

Институт системного программирования РАН

16 октября 2020 года.

Содержание презентации: I

1 Оценка эффективности перемешивания

- Мертвая вода
- Определяющие параметры

2 Обледенение

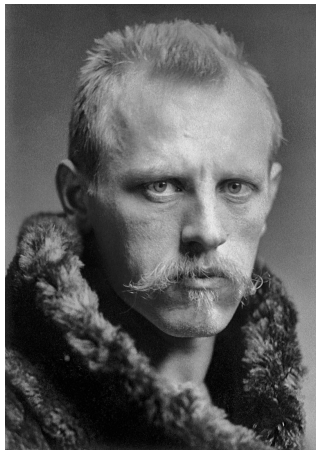
- Определяющие параметры

3 Используемые инструменты

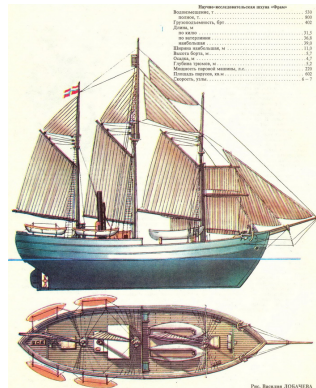
- Сверточные нейронные сети
- Генеративно-сопоставительные сети
- Рекуррентные нейронные сети

4 Выполнение задач проекта

Мертвая вода



Фритъоф Ведель-Ярлсберг Нансен
(1861 — 1930)



Исследовательская шхуна «Фрам»

Эффект «Мертвой воды».



Определяющие параметры

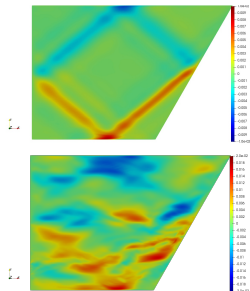
$$\nabla \cdot \vec{U} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \otimes \vec{U}) - \nabla \cdot \nu \left(\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T \right) = -\frac{1}{\rho_m} \nabla \hat{p} + \vec{F}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{U} \cdot s - \nabla \cdot \frac{\nu}{Sc} (\nabla s) = 0. \quad (3)$$

$$Ri_b = \frac{g \rho_0 d}{\rho_r U_0^2}, \quad R = \frac{d}{\delta}, \quad Re = \frac{U_0 d}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\kappa}.$$

$$\rho_0 = \frac{\Delta \rho}{2}, \quad U_0 = \frac{\Delta U}{2} \quad (4)$$



приведённое давление: $\hat{p} = p - p_0$;

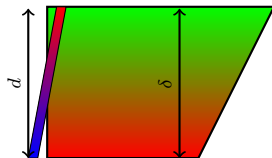
восстанавливающая сила: $\vec{F} = \beta \vec{g} \hat{s}$, где $\hat{s} = s(x, y, z, t) - s(x, y, z, 0)$.

$$\mathcal{M} = \frac{Ri_b}{Re Pr} \left[\frac{1}{V} \int_V - \left(\frac{d\rho_*}{dz} \right)^{-1} |\nabla \rho|^2 dV \right] - D_p, \quad D_p = \frac{2Ri_b}{Re Pr L_z}$$

$$\mathcal{X}_1(z, t_0) \equiv \frac{\bar{\epsilon}(z, t_0)}{\kappa \int N^2(z, t_0) dz}, \quad \mathcal{X}_2(z, t_0) \equiv \frac{N^2(z, t_0)}{\int N^2(z, t_0) dz}$$

$$y(t_0) \equiv \mathcal{E}(t_0).$$

$$\epsilon(x, t) = 2\nu s_{ij} s_{ij}, \quad \bar{\epsilon}(z, t) = \frac{1}{L_x L_y} \int \epsilon(x, t) dx dy, \quad \mathcal{E}(t) = \frac{\mathcal{M}(t)}{\mathcal{M}(t) + \langle \bar{\epsilon}(z, t) \rangle}$$





1



2

12% всех катастроф связанных с погодными явлениями происходят по причине крупных($>60\text{мкм}$) переохлажденных капель

3

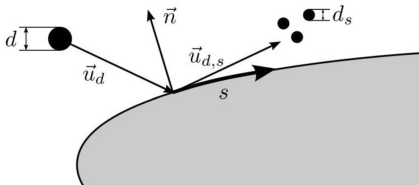
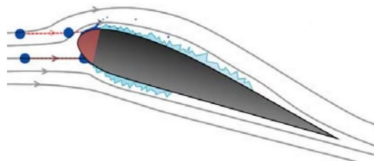
¹S. Fikke et al. COST 727: Atmospheric Icing on Structures Measurements and data collection on icing: State of the Art. 2006. Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp.

²Aircraft Ice Accretion Prediction Based on Neural Networks E. Ogretim, W. Huebsch, and A. Shinn Journal of Aircraft 2006 43:1, 233-240

³Baars WJ, Stearman RO, Tinney CE (2010) A review on the impact of icing on aircraft stability and control. J Aeroelast Struct Dyn 2:35–52

Определяющие параметры

- Скорость
- Температура
- Водность
- Среднеобъемный диаметр
- Время



Сверточные нейронные сети

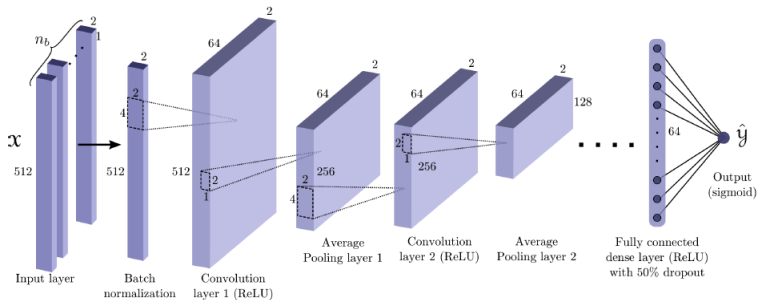


Рис.: Архитектура сверточной нейронной сети, которая оценивает эффективность перемешивания

$$\sum_{n_b} (y - \hat{y})^2 / n_b$$

⁴Deep learning of mixing by two 'atoms' of stratified turbulence. Hesam Salehipour, W. R. Peltier. arXiv

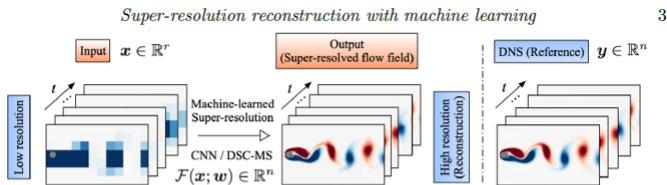


FIGURE 1. An overview of machine-learned super-resolution analysis for cylinder flow.

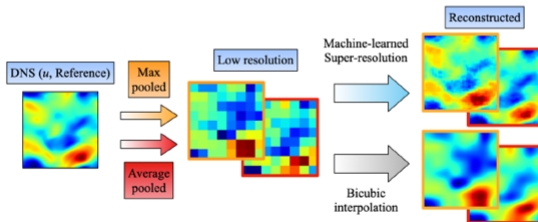


FIGURE 2. Max/average pooling and super-resolution reconstruction of the turbulent velocity field.

Рекуррентные нейронные сети

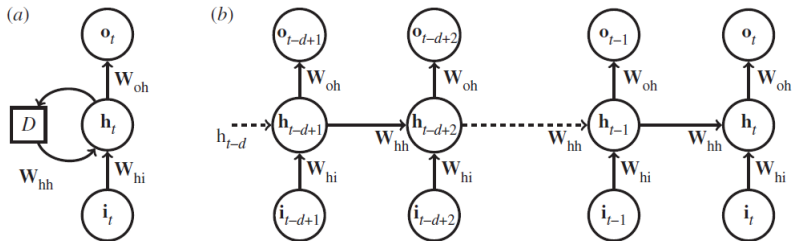


Рис.: Рекуррентная нейронная сеть

6

⁶Data-driven forecasting of high-dimensional chaotic systems with long short-term memory networks. Pantelis R. Vlachas, Wonmin Byeon, Zhong Y.Wan, Themistoklis P. Sapsis and Petros Koumoutsakos

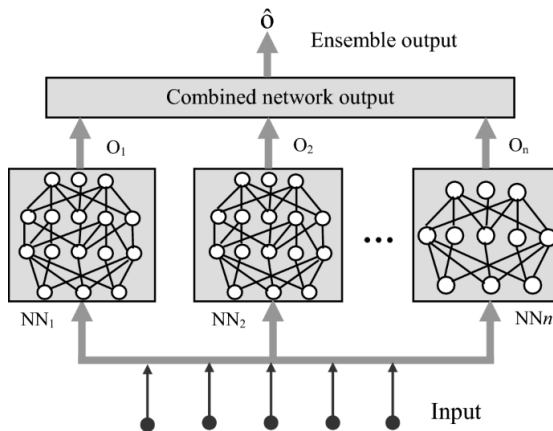
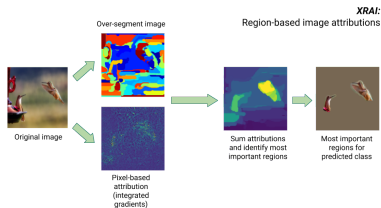


Рис.: Ансамбль нейронных сетей

Выполнение задач проекта

Объяснимость —

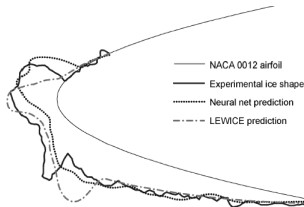


Надежность —

Сравнение с результатами численных расчетов
(Сравнение с результатами экспериментов)



OpenFOAM



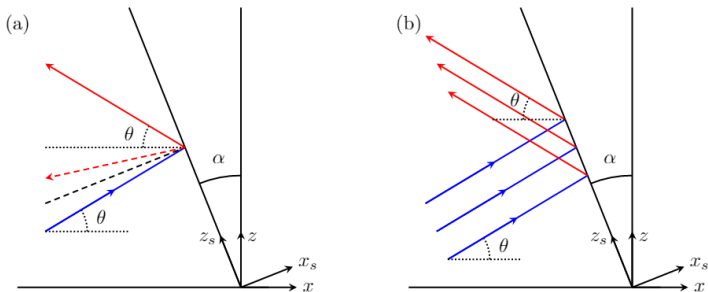


Рис.: Отражение волновых пакетов от наклонной стенки а) Одного пакета в сравнении с «классическим» отражением б) Отражение нескольких параллельных пакетов

Дисперсионное
соотношение:

$$\frac{\omega}{N} = \pm \sin \theta$$

θ – угол распространения
волн.

ω – частота вынужденных
колебаний.

N – частота плавучести:

$$N(z) = \sqrt{-\frac{g}{\rho(z_0)} \cdot \frac{d\rho(z)}{dz}}$$

7

⁷Е. V. Ermanyuk and N. V. Gavrilov. Oscillations of cylinders in a linearly stratified fluid. J. Appl. Mech. Tech. Phys., 43(4):503–511, 2002.

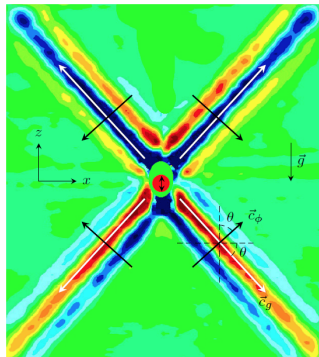


Рис.: Вертикальные колебания цилиндра в стратифицированной жидкости

Физические параметры:

$$\begin{aligned}\rho_m &= 1 & [g/cm^3]; \\ s_0 &= -\frac{1.02 \cdot z}{10^3} + 3.03 \cdot 10^{-2}; \\ \rho &= \rho_m(1 + s) & [g/cm^3]; \\ \nu &= 10^{-2} & [cm^2/s]; \\ Sc &= 10^2; \\ g &= 981 & [cm/s^2];\end{aligned}$$

Граничные условия на левой
стенке:

$$U_x = A \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \cdot \omega \cdot \sin(\omega t),$$

$$U_z = 0, \text{ где } A = 0.1 [cm],$$

$$\omega_1 = 0.6 [rad/s], 0 < z < H.$$

На остальных границах
условие: $\vec{U} = 0$.

Для давления: $\nabla p = 0$.

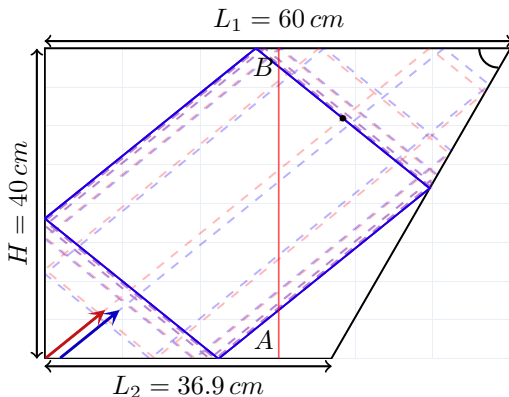


Рис.: Схематичное изображение резервуара

8 **Рис.:** Экспериментальное обнаружение аттрактора внутренних волн

⁸Brouzet, C., Sibgatullin, I., Scolan, H., Ermanyuk, E., Dauxois, T. (2016). Internal wave attractors examined using laboratory experiments and 3D numerical simulations. Journal of Fluid Mechanics, 793, 109-131. doi:10.1017/jfm.2016.119