

# Измерительно-вычислительная система на основе искусственной нейронной сети для оценки параметров атмосферы

А.И. Чуличков<sup>1,2</sup>, С.В. Никитин<sup>1,2</sup>, А.Н. Боровский<sup>2</sup>, О.В. Постыляков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, Россия, 119991

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, Россия, 119017

## Аннотация

Хорошо разработаны методы линейной теории измерительно-вычислительных систем, они позволяют получать наиболее точные оценки параметров исследуемого объекта по данным измерений, а также контролировать согласованность используемой математической модели с результатом измерений. В настоящей работе эти методы обобщаются на класс нелинейных оценок, реализуемых с помощью нейронных сетей. Используются выборочные оценки точности редукции измерений и согласия модели с данными. Результаты подхода демонстрируются решением задачи оценки параметров атмосферы по регистрации рассеянного солнечного излучения.

## Ключевые слова

Редукция измерений, искусственная нейронная сеть, дистанционное зондирование атмосферы, оптимальные оценки параметров

## 1. Введение

Рассматривается эксперимент, проводимый по схеме

$$\xi = Af + v, \quad (1)$$

где  $\xi$  – искаженный шумом  $v$  результат измерения выходного сигнала  $Af$  измерительного прибора  $A$ , на вход которого подан сигнал  $f$  от измеряемого объекта, и требуется получить наиболее точную оценку выходного сигнала  $u = Uf$  «идеального» измерительного прибора  $U$ . В линейной теории измерительно-вычислительных систем (ИВС) оценкой  $u$  является результат  $R\xi$  линейного преобразования (редукции)  $R$ , выбираемого из условия максимальной точности оценки; точность оценки и выбор  $R$  вычисляется на основе математической модели измерения (1), согласие которой с результатом  $\xi$  измерения (1) контролируется параметром надежности модели [1].

В данной работе вместо класса линейных преобразований редукции используется класс нелинейных преобразований, осуществляемых искусственной нейронной сетью.

## 2. Синтез теории ИВС и нейронных сетей

Рассмотрим задачу редукции измерений (1) к виду, который имело бы измерение вектора  $f$  идеальным измерительным прибором  $U$ . Математические модели приборов  $A$  и  $U$  неизвестны, однако имеется набор тестовых данных в виде пар  $(u_i, \xi_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ , в которых  $\xi_i = Af_i + v_i$ ,  $u_i = Uf_i$  при некоторых  $A$ ,  $U$  и  $f_i$ . Редукцию измерения  $\xi$  будем осуществлять с помощью преобразования  $R_\lambda(\xi, c)$ , осуществляемой нейронной сетью, параметры которой  $c$  и гиперпараметры  $\lambda$ , задающие ее архитектуру, определим из условий наибольшей точности редукции и приемлемого согласия модели сети с набором данных  $(u_i, \xi_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ .

Для этого разобьем имеющийся набор данных на две части, «обучающую» и «контрольную», первая часть состоит из пар  $\{(u'_1, \xi'_1), \dots, (u'_p, \xi'_p)\}$ , вторая – из пар  $\{(u''_1, \xi''_1), \dots, (u''_q, \xi''_q)\}$ ,  $p+q=n$ .

По обучающей выборке  $\{(u'_1, \xi'_1), \dots, (u'_p, \xi'_p)\}$  построим нейронную сеть, выбирая ее параметры  $c$  с минимизацией функционала

$$\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \|R_\lambda(\xi'_i, c) - z'_i\|^2. \quad (2)$$

при дополнительных регуляризирующих условиях  $\sum_{j=1}^m c_j^2 \leq \varepsilon_1$ ,  $\max_{j=1, \dots, m} |c_j| \leq \varepsilon$ .

Пусть минимум функционала (2) достигается в точке  $c^*$ . Тогда значение  $\alpha(\xi', u') = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \|R_\lambda(\xi'_i, c^*) - u'_i\|^2$  характеризует согласие выходных данных нейронной сети с реальными значениями параметров  $\{u'_1, \dots, u'_p\}$ : чем меньше это значение, тем точнее нейронная сеть аппроксимирует зависимость  $Uf$  от  $\xi$  на обучающей выборке, и тем выше согласие выбранной модели нейронной сети с тестовым набором данных. Если согласие неприемлемо, требуется измерение архитектуры сети выбором гиперпараметров  $\lambda$ . Точность оценки параметров определим как среднее арифметическое от квадрата невязки данных сети с истинными значениями оцениваемых параметров на тестовой выборке:

$$h(\xi'', u'') = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \|R_\lambda(\xi''_i, c) - u''_i\|^2$$

Эта величина дает оценку точности параметров  $u = Uf$  на контрольной выборке.

Две характеристики, надежность модели  $\alpha(\xi', u')$  и точность редукции  $h(\xi'', u'')$ , позволяют разумно выбрать параметры нейронной сети,

### 3. Использование нейронной сети для оценки параметров атмосферы.

В качестве примера такого выбора сети рассматривается задача определения характеристик облачности (нижняя граница, оптическая толщина) и аэрозоля (оптическая толщина) по характеристикам измеренного рассеянного солнечного излучения (индекс цветности, абсолютная интенсивность и др.). Для построения набора данных использовалось компьютерное моделирование рассеяния солнечной радиации в атмосфере Земли методом Монте-Карло.

### 4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-01-00790 (часть 1 и 2) и 20-05-00826 (часть 3).

### 5. Литература

- [1] Пытьев, Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем / Ю.П. Пытьев. – М.: Физматлит, 2012. – 427 с.