

## **ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ МЕТОДОМ НЕЙРОКОМПЬЮТИНГА**

**Милюков Д.А., Макаренко Н.Г., Малкин З.М.**

*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург*

*В данной работе рассматривается прогноз ПВЗ (X,Y) посредством ИНС. Для прогноза используется две схемы: векторная и одношаговая. В нашей работе векторная схема использовалась для прогноза на 10, 30, 50, 100, 200, 300, 400 и 600 дней. Одношаговая схема используется для горизонта в 10 дней. Обсуждается эффективность векторной схемы для коротко- и долгосрочных прогнозов. Всего для каждого горизонта осуществлялось 270 прогнозов в точках, отстоящих друг от друга на 10 дней, начиная со 2 февраля 2008 года. Статистика MAE сравнивалась с таблицей с сайта [http://www.cbk.waw.pl/EOP\\_PCC/](http://www.cbk.waw.pl/EOP_PCC/). Выяснилось, что векторная схема позволяет приблизиться к лучшему прогнозу сайта, а на некоторых отрезках улучшить прогноз, на участке от 50 до 250 дней для координат X, Y полюса. Одношаговая схема позволяет улучшить прогноза на участке от 1 до 7 дней для координат X полюса и на участке от 1 до 3 дней для координат Y полюса. Все работы осуществлялись в программной среде Matlab. По итогам работы создано ПО для получения прогноза в реальном времени.*

### **Введение**

Развитие высокоточных методов космической геодезии позволяет получать параметры вращения Земли (ПВЗ) с постоянно возрастающей точностью. С другой стороны, существует практическая потребность в доступности точных ПВЗ в реальном времени и их прогнозе. Эти данные необходимы в таких областях, как службы оперативного определения всемирного времени, наземная морская и космическая навигация и поддержка спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Для разных прикладных задач необходим прогноз с различной степенью упреждения (длительностью прогноза), т.е. интервалом времени между эпохой последних значений ПВЗ, полученных из наблюдений и эпохой использования предсказанных значений. Требуемая длительность прогноза ПВЗ варьируется от нескольких часов для оперативного обслуживания спутниковых навигационных систем и дифференциальной навигации до нескольких месяцев для морской и космической навигации. Для обеспечения наблюдательных программ в астрономии и космической геодезии требуется прогноз ПВЗ длительностью до нескольких недель, а для некоторых приложений, таких как издание астрономических и навигационных ежегодников, требуется прогноз длительностью до 1-2 лет. Для ряда теоретических работ интересно знать значения ПВЗ на годы и даже десятилетия [1, 2].

В данной работе проводился прогноз ПВЗ искусственными нейронными сетями (ИНС). Для построения таблицы обучения долгосрочных прогнозов использовалась т.н. векторная схема. Краткосрочный прогноз осуществлялся одношаговым способом. Мы считали, что применение векторной схемы может улучшить качество долгосрочного прогноза ПВЗ ИНС-ми, получить достаточную точность, сравнимую с другими методами, а, возможно, и превзойдя их.

### **Параметры вращения Земли**

Для описания ориентации Земли традиционно используется пять параметров, определяющих положение оси вращения в теле Земли и инерциальной системе координат, а также скорость собственного вращения Земли вокруг оси. Положение оси враще-

ния в инерциальной системе координат, точнее в МНСО<sup>1</sup>, задается углами прецессии и нутации.

Скорость вращения Земли вокруг оси определяется разностью шкал времени UT1-UTC, где UT1 – всемирное время и UTC – всемирное координированное время. Наклон, координаты полюса  $x_p$  и  $y_p$  задают положение мгновенной оси вращения Земли в системе отсчета, связанной с Землей (МЗСО<sup>2</sup>). Координаты полюса определяются в левосторонней прямоугольной системе, центр которой связан с полюсом, ось X направлена вдоль Гринвичского меридиана, ось Y по направлению меридиана 90° западной долготы.

Данные о ПВЗ публикуются в бюллетенях Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (МСВЗ). Оперативные данные, публикуемые в Бюллетене А и вычисляемые в Морской обсерватории США содержат также официальный прогноз ПВЗ МСВЗ. Окончательные значения ПВЗ МСВЗ вычисляются в Парижской обсерватории и публикуются в виде ряда ПВЗ EOPC04, который содержит параметры вращения Земли с 1962 г. по настоящее время шагом в одни сутки. Прогнозирование ПВЗ основывалось на данных ряда. В настоящей работе выполнялся прогноз двух ПВЗ:  $x_p$ ,  $y_p$ .

### **Нелинейный векторный прогноз**

Данная работа посвящена проблеме предсказания ПВЗ методами нелинейной хаотической динамики. В отличие от традиционной авторегрессионной схемы, в которой будущее значение временного ряда представлено линейной комбинацией прошлых значений, в нелинейном подходе прогноз определяется нелинейной непрерывной функцией  $\Phi$  от  $m$  переменных – прошлых значений ряда. Проблема предсказания заключается в построении наилучшего аппроксиматора функции  $\Phi$ , заданной на конечном наборе значений ряда. В этой статье в качестве такого аппроксиматора используется искусственная нейронная сеть (ИНС) [3].

Использованная в работе процедура построения таблицы для обучения ИНС основывается на известной теореме Такенса [4]. Временной ряд рассматривается здесь как типичная проекция фазовой траектории динамической системы на вещественную ось. Теорема утверждает, что существует отображение этого временного ряда в евклидово пространство  $R^m$  подходящей размерности (число переменных функции  $\Phi$ , в нашем случае число  $m$ ), которое типично является вложением. Кроме того, получаемый в результате вложения геометрический образ является топологической копией истинного аттрактора динамической системы.

Таким образом для нашего ряда  $\{x_k\}_{k=0}^N$  работает следующее уравнение:

$$x_{k+1} = \Phi(x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-m+1}) = \Phi(\overline{x}_k).$$

Задача прогноза имеет следующую форму. Для данного временного ряда и полученной для него реконструкции в  $R^m$  известны  $(N - m + 1)$  векторов  $\overline{x}_k = (x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-m+1}) \in R^m$ , компонентами которых являются отсчеты временного ряда. Таким образом, у нас есть  $(N - m + 1)$  строк в таблице обучения нашей ИНС.

<sup>1</sup> Международная небесная система отсчета. Невращающаяся инерциальная система с началом в барицентре Солнечной системы.

<sup>2</sup> Международная земная система отсчета. Вращающаяся с Землей система отсчета, определяющаяся положением геоцентра всей Земли вместе с океаном и атмосферой, шкалой, зависящей от потенциала тяжести, и ориентации осей.

В ряде случаев необходимо использовать лаг  $\tau > 1$  (расстояние между компонентами вектора  $\vec{x}_k = (x_{k-\tau}, x_{k-2\tau}, \dots, x_{k-(m+1)\tau}) \in R^m$ ). В этом случае число известных векторов составляет, очевидно,  $(N - (m + 1)\tau)$ . Такая схема построения таблицы обучения называется *векторной*.

Рассмотрим простой пример. Пусть для прогноза нашего ряда мы определим  $m = 4, N = 10, \tau = 2$ . Т.е. ряд состоит из 10 отсчетов, реконструкция строится в  $R^4$ .

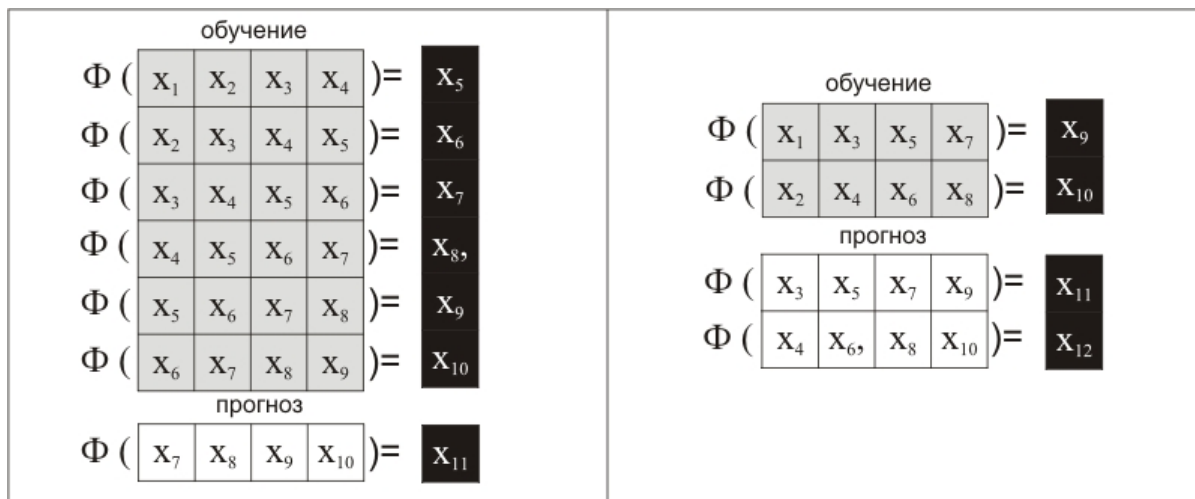


Рис. 1.

На Рис. 1 показаны две схемы построения таблицы обучения. Слева расположен - классический (одношаговый): все компоненты вектора отстоят друг от друга на единицу. Справа расположен векторный: компоненты векторов отстоят друг от друга на лаг  $\tau = 2$ . Видно, что в случае последнего мы можем предсказывать сразу  $\tau$  значений ряда при достаточно состоятельной обучающей выборке. При этом мы избавляемся от роста ошибок, характерных для одношаговых схем, когда для каждого последующего прогноза добавляются спрогнозированное на предыдущем шаге значение отсчета.

### ИНС

Для прогнозирования ПВЗ была использована трехслойная ИНС: 10-5-1. Параметры нейронов (весовые коэффициенты и поляризация) настраивались в процессе обучения (40 циклов) по принципу обратного распространения ошибки методом Левенберга-Марквардта. Для построения таблиц обучения использовалась размерность вложения  $m=10$ , временной лаг  $\tau$  выбирался равным горизонту предсказания. Для каждого прогноза обучение запускалось 10 раз. Для получения окончательного прогноза проводили усреднение.

### Ход работы

Чтобы оценить качество прогнозов, выполненных на нашей нейронной сети, делалось следующее. Начиная со 2 февраля 2008 года через каждые 10 дней (в прошлое) для  $x_p, y_p$  получали прогноз по двум схемам. Векторный на 10, 30, 50, 100, 150, 200, 400, 600 дней. Одношаговый на 10 дней. Всего таких прогнозов считалось 90.

Все, что написано в предыдущем абзаце, повторяли для даты 2 февраля 2005 года и 2 февраля 2002 года. Таким образом в сумме оказывалось 270 прогнозов для  $x_p$  и для  $y_p$ , охватывающие около 9 лет.

Для анализа точности прогноза оценивалась среднее отклонение:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|$$

### Результаты

В 2005 году была создана Кампания по сравнению прогнозов ПВЗ (КСП ПВЗ). Основная идея данного форума заключалась в сравнении качества прогнозов различных методов, техник и стратегий (в том числе с использованием ИНС), применяемых для прогноза ПВЗ. Актуальную сравнительную информацию по качеству прогнозов можно найти на интернет-сайте. Именно со сводной таблицей КСП ПВЗ мы сравнивали наши результаты. Из сводных данных видно, что качество прогноза ИНС оставляет желать лучшего. Какие же результаты были получены нами?

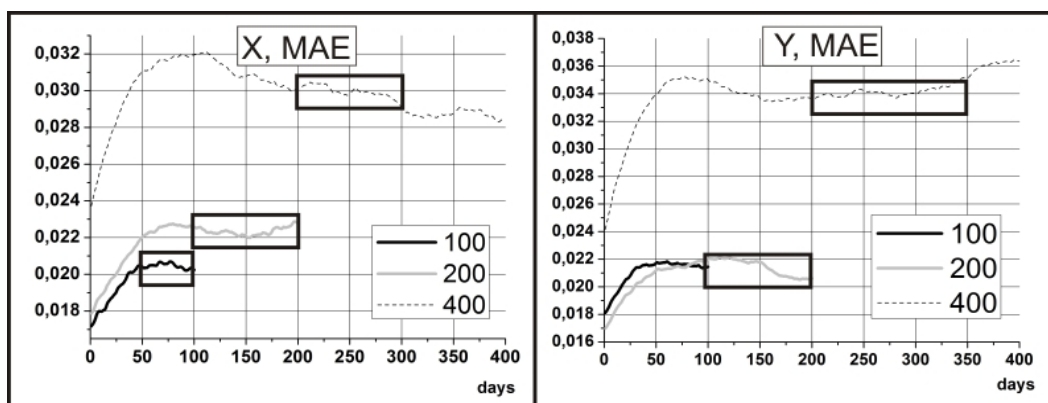


Рис. 2.

На Рис. 2 показано среднее отклонение для прогнозов координат  $x_p, y_p$ , выполненные по векторной схеме. Статистика показана для прогнозов на 100, 200 и 400 дней. Именно эти прогнозы демонстрировали лучшие результаты на некоторых отрезках.

На левом рисунке отмечены три области прямоугольником. Если эти области сравнить со сводной таблицей с сайта КСП ПВЗ, то можно увидеть следующее. Среднее отклонение от 50 до 100 дней соответствует такой для лучшего прогноза с указанного сайта. Среднее отклонение на участке от 100 до 200 дней явно лучше всех прогнозов. На участке от 200 до 300 дней статистика также соответствует лучшему прогнозу с указанного сайта.

На правом рисунке. Участок от 100 до 200 дней явно лучше. Участок от 200 до 350 дней соответствует или становится лучше, чем указано на сайте.

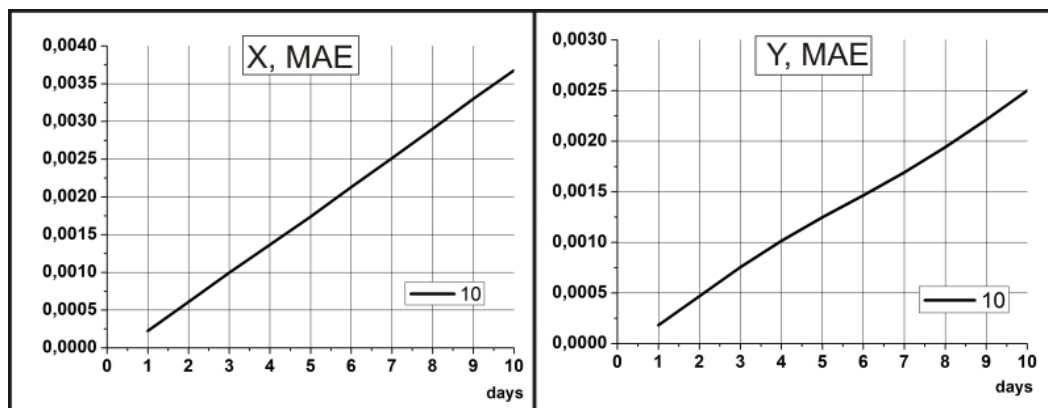


Рис. 3.

На Рис. 3 показано среднее отклонение для прогнозов координат  $x_p, y_p$ , выполненные по одношаговой схеме. Данные прогнозы делались только на 10 дней. Опять же, если сравнить данную статистику со сводной таблицей, то будет видно следующее. Для координаты  $x_p$  статистика лучше на участке от 1 до 7 дней. Для координаты  $y_p$  статистика лучше на участке от 1 до 3 дней. Прогноз на следующую дату в обоих случаях оказывается лучше в два раза, чем представлены на сайте.

### **Вывод**

Мы показали, что использованная нами нейронная сеть позволяет делать долгосрочные прогнозы ПВЗ достаточной точности, а иногда превосходя по точности другие методики. Использование векторной схемы существенно улучшает качество прогноза нейронными сетями, что говорит об оправданности ее использования.

Также мы показали, что краткосрочный прогноз, выполненный посредством ИНС «классическим» (одношаговым) способом, оказывается существенно лучше тех, с которыми мы проводили сравнение.

Все это говорит о хорошей применимости данных методов прогнозов для практических задач.

### **Литература**

1. *Зотов Л.В.* Анализ вариаций и их прогнозирования, кандидатская диссертация, М.: МГУ 2005.
2. *Dennis D. McCarthy and Brian J. Luzum.* Prediction of Earth orientation. Bulletin Gtodique 1991 Vol. 65 P. 18-21.
3. *Ежов А.А., Шумский С.А.* Нейрокомпьютинг и его приложения в экономике и бизнесе. М.: МИФИ 1998.
4. *Такенс Ф.* Хаос. Структуры в динамике. Конечномерные детерминированные системы. Москва-Ижевск. 2003

## **EARTH ORIENTAITION PARAMETERS FORECAST USING NEUROCOMPUTING**

**Milkov D.A., Makarenko N.G., Malkin Z.M.**

*The Main Astronomic Observatory RAS, Saint-Petersburg*

The purpose of the work is forecast of EOP (X,Y) by ANN. We used the two scheme of prediction: vector and one-step. Vector scheme makes it possible to obviate the error growth with increase the time horizon. In our work we used the vector scheme for 10, 30, 50, 100, 200, 300, 400 and 600 days forecast. The one-step scheme was used for 10 days forecast. It was discussed the quality of vector scheme for short- and medium-terms prediction. For every time horizons we predict in 270 points of time-series. This points is 10 days distant from each other. The first point is 2nd February 2008. Our MAE statistic was compared with tables at [http://www.cbk.waw.pl/EOP\\_PCC/](http://www.cbk.waw.pl/EOP_PCC/). We find out that our 50-250 days vector scheme forecast is close to better forecast from with site and better in some segment for X, Y coordinates. Also our 1-7 days one-step scheme forecast for X and 1-3 days one-step scheme forecast for Y coordinates are better. All programs developed in MatLab. The result of the work is software for real-time forecast generation.