



5. Калашников В.И. Информационно-измерительная техника и технологии. / В.И. Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин, Г.Г. Раннев, М.Ю. Рачков, В. А. Суругина, А. П. Тарасенко. -М.: Высшая школа, 2002. -520 с.

6. Путилин А. В. Вычислительная техника и программирование в измерительных системах. М.: Дрофа, 2006. - 416 с.

7. Суругина В.А. Информационно-измерительная техника и электроника. / В.А.Суругина, В.И. Калашников, Г.Г. Раннев. -М.: Высшая школа, 2006. -512с.

8. Таланчук П.М. Средства измерения в автоматических информационных системах и системах управления. К.: Радуга, 1994. - 672 с.

9. Франтасов Д. Н. Улучшение метрологических характеристик трансформаторов тока с цифровым блоком коррекции погрешности // А. М. Косолапов, Д. Н. Франтасов // Вестник транспорта Поволжья. – 2010. - №3(23). – 90-93с.

10. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. -357 с.

А.В. Игнатенков

## МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ДВУХПУТНОМ УЧАСТКЕ

(Самарский государственный университет путей сообщения)

Цель настоящей статьи – развить предложенную в [1] архитектуру искусственной нейронной сети для разработки графика движения поездов в части дополнительных сущностей, возникающих в эксплуатационной работе железных дорог и представить математическую модель её функционирования. Получившуюся нейронную сеть будем именовать в дальнейшем многослойной искусственной нейронной сетью с переменной проводимостью сигнала.

### Ограничения модели

Рассматривается сеть из  $N$  слоёв, имитирующая двухпутный железнодорожный участок с  $N$  станциями. На участке курсируют грузовые поезда с временами хода, содержащимися в массиве  $timesPrig$  размерностью  $N-1$ . Интервалы одновременного прибытия, отправления и проследования заданы как величина  $timeFreqArr$ . Максимальное время стоянки равняется  $maxStay$ . Нечётным движением поездов принимается движение поезда от слоя с номером 0, чётным – от слоя с номером  $N$ .

### Архитектура сети

Число слоёв в сети равняется числу станций на участке. Слои пронумерованы от 0 до  $N$ . Каждый слой содержит 1440 нейронов по числу минут в сутках. Нейроны пронумерованы от 0 до 1439. Каждый нейрон  $i$ -го слоя связан со всеми нейронами слоя с номером  $i-1$  двумя наборами весов – для проследования поездов в чётном и в нечётном направлениях. Ниже мы их будем называть чёт-



ными и нечётными связями. Кроме того, каждый  $j$  нейрон связан с нейронами от  $j-timeFreqArr$  до  $j+timeFreqArr$  для отражения таких сущностей, как неодновременное прибытие, отправление и проследование поездов.

Нейрон имеет такой признак, как состояние – способность принимать сигнал. Подробно сущность состояний определена в [1].

Для контроля событий с поездами каждый нейрон может выполнять одну из технических операций:  $arrivalNechet$  (прибытие нечётного поезда),  $departureNechet$  (отправление нечётного поезда),  $none$  (нет операции),  $arrivalChet$  (прибытие чётного поезда),  $departureChet$  (отправление чётного поезда).

Ниже мы будем описывать прохождение сигнала от слоя с номером  $N$  в сторону уменьшения номеров слоёв. Обучение будет производиться в обратном направлении. Таким образом, для чётных поездов имитируется движение в реальном времени, для нечётных – в направлении, противоположном реальному.

Каждая матрица весов  $W$  между двумя слоями с номерами  $i, i-1$  представляет собой квадратную матрицу с количеством строк и столбцов, равным 1440.

$$W_{i,i-1} = \begin{pmatrix} W_{0,1} & \dots & W_{0,1339} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{1339,0} & \dots & W_{1339,1339} \end{pmatrix},$$

где  $w_{ij}$  – значение веса на связи, соединяющей нейрон с номером  $i$  одного слоя с нейроном с номером  $j$  соседнего слоя. Каждая строка представляет собой веса нейрона с фиксированным индексом. Номер столбца обозначает номер нейрона предыдущего слоя, который связан с нейроном данного слоя.

### Инициализация сети

Перед первым проходом сигналов по сети веса связей задаются следующим образом. Для  $j$ -го нейрона слоя  $i$  веса всех чётных связей с номерами от 0 до  $j + timesPrig[i - 1]$  приравниваются нулю. Это запрещает как продвижение сигнала в сторону, противоположную течению времени, так и обеспечивает соблюдение минимального времени хода поезда между станциями. Все прочие веса задаются случайными числами полуинтервала  $[0;0,1)$ . Для нечётных связей выполняются аналогичные действия. При вычислении номера нейрона как при инициализации весов связей, так и в последующих расчётах проверяется условие попадания номера нейрона в отрезок  $[0;1439]$ .

Веса связей определяют уровень конкуренции между нейронами за право принять сигнал (поезд) на следующем слое (станции) в минуту, номер которой является номером столбца матрицы весов с положительным весом. Сигнал, характеризующий конкретный поезд, выходит со слоя нейронной сети (из данной станции) из некоторого нейрона (в некоторую минуту) и попадает на предыдущий слой.

Также при инициализации сети формируются связи  $j$ -го нейрона с соседними нейронами от  $j-timeFreqArr$  до  $j+timeFreqArr$ . Веса связей также задаются случайными числами от 0 до 0,1.



Для задания стоянки поезда формируется отдельный набор связей числом  $maxStay$ . Они связывают каждый нейрон с нейронами того же слоя в сторону прохождения сигнала.

### Передача сигнала по слоям

При прохождении сигнала по слоям последовательно происходит вычисление значений каждого нейрона. Массив значений  $X^i = \{x_0, x_1, \dots, x_{1439}\}$  будем называть значением слоя с номером  $i$ . Перед расчётом на слой с номером  $N$  подаётся вектор длины 1440, состоящий из нулей и единиц. Единица означает, что соответствующая минута связана с прохождением поезда.

Для всех значений, выходящих со слоёв с номерами  $N, N-1, \dots, 1$  выполняется:

$$\forall k \in \{0, 1, \dots, 1439\} \text{ если } X_k^{(i)} > 0, \text{ то } \exists j \in \{0, 1, \dots, 1439\}: w_{k,j} = \max\{w_{km}\}, X_j^{i-1} = 0$$

, тогда устанавливаем  $X_j^{i-1} = f(X_k^{(i)}, w_{k,j})$ ,

где

$w_{km}$  – вес на связи между нейронами слоев  $k$  и  $m$ ,

$f$  – функция активации,

$k$  – номер нейрона текущего слоя,

$i$  – номер рассматриваемого слоя.

Смысл описанного условия заключается в том, что для каждого нейрона с номером  $k$  текущего слоя с положительным значением выхода в следующем слое мы ищем такой нейрон, что значение веса их связи является максимальным из всех связей нейрона с номером  $k$  со следующим слоем.

Нейрону  $X_j^{(i-1)}$  присваивается значение статуса технической операции, равное  $arrivalChet$  для чётных поездов и  $arrivalNchet$  для нечётных. Состояние нейрона при этом переключается в состояние *off*. Все нейроны того же слоя с номерами от  $j-timeFreqArr$  до  $j$  также переключаются в состояние *off*. Из связей, предназначенных для стоянки, аналогичным указанному выше способу также выбирается связь с максимальным весом. Инцидентный с ней нейрон с номером  $m$  объявляется нейроном отправления поезда с данного слоя и ему присваивается состояние *chetOff* (*neChetOff*) и значение технической операции  $departureChet$  ( $departureNchet$ ).

Функции активации нейронов сигмоидные, задаваемые способом, указанным в [2].

Нейроны с номерами от  $j$  до  $m$  и от  $m$  до  $m+timeFreqArr$  получают состояние *off*.

Выходом сети  $Y$  примем вектор значений нулевого слоя  $X^{(0)}$ .

Как и ранее, существует желаемый выход сети  $Y_{\text{ц}}$ , который представляет собой последовательность нулей и единиц, смысл которой идентичен смыслу входного вектора.

Введём понятие «номер поезда», который обозначим как  $r$ . Мы говорим, что поезд проходит по станции с номером  $l_1$  в минуту  $k_1$  и по станции с номе-



ром  $l_2$  в минуту  $k_2$ , если выполняется равенство:  $r(X_{k_1}^{l_1}) = r(X_{k_2}^{l_2})$   $\forall r \forall l \exists k: r(X_k^l) = r$ , т.е. все поезда проходят по каждой станции ровно в одной точке-минуте. По номерам поездов производится отслеживание прохождения поездов по всем станциям. Значения номеров поездов присваиваются на основании задания на разработку графика и действующей классификации поездов.

### Обучение сети

После расчёта значений нейронов всей сети отдельно считаются ошибки выхода для чётных и нечётных поездов. Возможны ошибки 2 видов – поезд пришёл раньше ожидаемого времени и поезд пришёл позже ожидаемого времени (либо поезд вообще не дошёл до нулевого слоя). Кроме того, во время прохождения сигнала между слоями «след сигнала» может «пересекать» сигнал, соответствующий другому поезду (случай обгона на одном и том же пути).

В силу имеющихся ограничений поезда встречных направлений не могут находиться на одном и том же пути в одно и то же время. Поэтому может возникнуть конкуренция за одни и те же нейроны у встречных поездов. Чтобы сеть быстрее дошла до удовлетворительного решения, мы сначала рассчитываем то направление движения (чётное или нечётное), суммарная ошибка по прибытию поездов у которого меньше.

Ошибка по прибытию состоит из двух составляющих:

1. Обычная ошибка
2. Позитивная ошибка

Ошибка сети для поездов, которые пришли позже ожидаемого времени либо вообще не дошли до нулевого слоя (назовём её обычной ошибкой), вычисляется по формуле:

$$E = \sum (k_{\text{ц}} - k_{\text{ф}}) + \sum_b (\tau * k'_{\text{ц}}),$$

где

$r(Y_{k_{\text{ц}}}) = r(Y_{k_{\text{ф}}})$  – номер поезда,

$k'_{\text{ц}}$  – номера индексов элементов вектора  $Y_{\text{ц}}$ , для которых сигнал сети не дошёл до нулевого слоя,

$Y_{k_{\text{ц}}}, Y_{k_{\text{ф}}}$  – значения элементов соответственно целевого вектора  $Y_{\text{ц}}$  и фактического вектора прибытий  $Y_{\text{к}}$

$\tau$  – коэффициент штрафа для недошедшего поезда.

Ошибка сети для поездов, которые пришли раньше ожидаемого времени (назовём её позитивной ошибкой), вычисляется аналогично:

$$E = \sum (k_{\text{ф}} - k_{\text{ц}})$$

Таким образом, мы имеем 4 вида ошибок – для дошедших и не дошедших поездов для чётного и нечётного направлений. Ошибки измеряются в минутах.

Сеть обучается, начиная со слоя с номером 1 до слоя с номером  $N$ .

Если обычная ошибка (по чётному или нечётному направлению) нас устраивает (не превышает наперёд заданное значение), мы производим усиление



тех связей, по которым прошли удовлетворяющие нас сигналы сети. Если выход данного поезда произошёл не раньше ожидаемого времени, то веса всех связей, по которым прошёл сигнал данного поезда, увеличиваются на единицу.

В противном случае мы выполняем следующие четыре шага, описанные для чётного движения поездов:

1. Нахождение всех коллизий (обгонов) на рассматриваемом перегоне. Каждая коллизия двух поездов определяется перебором всех нейронов на обоих слоях и обнаружении таких ситуаций, когда выход первого поезда со станции происходит раньше выхода второго поезда, а прибытие первого поезда на следующую станцию происходит позже прибытия второго поезда.

2. Перебираются все нейроны слоя. Если инцидентный данному нейрону с состоянием *departureChet* (*departureNechet*) поезд пришёл не раньше ожидаемого времени, то происходит обучение весов связей этого нейрона: – увеличивая веса, находящиеся «слева» от положения максимального веса согласно формуле:

$$\forall c \in (j + \text{timePrig}, \dots, l - s): w_{j,c} = w_{j,c} + G \cdot \eta \cdot x_j^i \cdot f'(x_c^{i-1}) \quad (1)$$

– уменьшая сам максимальный вес по формуле:

$$w_{j,l} = w_{j,l} - \eta \cdot x_j^i \cdot f'(x_l^{i-1}) \quad (2)$$

– уменьшая веса, находящиеся «справа» от положения максимального веса по формуле:

$$\forall c \in (l, \dots, 1439): w_{j,c} = w_{j,c} - \eta \cdot x_j^i \cdot f'(x_c^{i-1}), \quad (3)$$

В формулах (1)-(3) приняты следующие обозначения:

*j* – номер обучаемого нейрона,

*timePrig* – минимальное время хода между слоями *i* и *i-1*,

*l* – номер нейрона слоя *i-1*, в который пришёл сигнал от нейрона с номером *j*,

*f'* – производная функции активации,

*s = √E* – показатель, характеризующий ширину отрезка, в пределах которого происходит положительная корректировка весов, *E* – обычная ошибка сети для данного направления,

*G* – коэффициент, введённый для ускоренного роста весов,

*η* – скорость обучения сети,

*x<sub>j</sub><sup>i</sup>* – значение нейрона *j* слоя *i*,

*f'(x<sub>i</sub><sup>i+1</sup>)* – значение производной функции активации в последующем слое (*i-1*) для нейрона с номером *i*,

3. Если поезд, инцидентному данному нейрону, обгоняют другие поезда, то происходит дополнительное увеличение весов нейронов, номера которых находятся в диапазоне от *j + timePrig* до номера нейрона прибытия обогнавшего поезда.

4. В случае если позитивная ошибка положительна, происходит обучение сигналов, соответствующих поездам, которые пришли раньше ожидаемого времени. Процедура идентична описанной в пункте 2, за исключением того, что слагаемые в формулах 1 и 2 меняют свой знак на противоположный.



Обучение сети происходит до тех пор, пока все 4 вида ошибок не будут удовлетворять заранее заданным значениям либо не будет исчерпано некоторое число попыток.

### Выводы

Итак, изменение весов происходит таким образом, чтобы прохождение сигналов вело от изначально заданных значений, поданных на один слой, к желаемым выводам на другом слое. В архитектуре нейронной сети имеются особенности для отражения в модели железнодорожных сущностей и ограничений. Подобраны алгоритмы, уменьшающие отклонения выхода сети от ожидаемого и для соблюдения правил проследования поездов.

Дальнейшее исследование будет посвящено изучению влияния скорости обучения и коэффициента *G* на точность работы сети и условий её сходимости.

### Литература

1. А.В.Игнатенков, А.М.Ольшанский О построении квазигопфилдовской искусственной нейронной сети для решения задач упорядочения процессов// В кн.: Перспективные информационные технологии (ПИТ-2015), том 2: труды Международной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова. - Самара, Издательство Самарского научного центра РАН, 2015. - 388 с., с.74-78 - ISBN 978-5-93424-735-7.

2. А.В.Игнатенков, А.М.Ольшанский. Применение искусственной нейронной сети для построения расписаний процессов на примере графика движения поездов.// Современные информационные технологии и ИТ-образование. Т.2 (№11). 2015. //М., изд-во ВМК МГУ, 2015, - 614 с., с.50-55.

А.В. Игнатенков, М.Г. Лысиков, А.М. Ольшанский, В.С. Дарадур

### О РОЛИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

(ООО «Научно-технологический центр по эксплуатации железных дорог»,  
Самарский государственный университет путей сообщения)

В настоящее время существует много подходов к интеллектуализации работы транспорта и железных дорог, среди которых – мультиагентные системы, генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и др. Все они пытаются решить задачу составления расписания работы полигона, узла, станции с определенными требованиями и критериями качества. Однако общим недостатком таких подходов является попытка учесть все факторы работы железных дорог как ограничения, не анализируя технологические причины появления каждого из ограничений.

В настоящей работе предлагается подход, основанный на автоматической выработке технологии работы станции, на основе которой в дальнейшем будет построен суточный план-график работы этой станции. Суточный план-график –