

**А.В.Лобода**, к.ф.-м.н.,доц., **В.В.Буяджи**, ст.  
Одесский государственный экологический университет

## **ДИНАМИКА МНОГОСЛОЙНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ: ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ПАТТЕРНОВ**

*Моделируется динамика многослойных оптических нейронных сетей на основе эффекта фотонного эха и выполнена их численная реализация, демонстрирующая возможность сети обрабатывать сложные паттерны.*

**Ключевые слова:** динамика многослойных нейронных сетей, сложные паттерны

**Введение.** В настоящее время по-прежнему чрезвычайно высок интерес к нейрокомпьютерам, т.е. к физическим реализациям моделей нейронных сетей [1–7]. К числу актуальных задач относится изучение возможностей их оптических и оптоэлектронных воплощений [2]. Важно подчеркнуть, что, хотя известный прогресс в изучении особенностей оптических нейронных сетей достигнут, тем не менее, многие важнейшие вопросы, касающиеся их основных характеристик, моделей функционирования, информационной емкости, реализаций запоминания и возможностей обучения, обратной связи, воздействия шумов и т.д., до сих пор далеки от своего адекватного разрешения. Особенно это касается нейронных сетей на основе фотонного эха [5]. Применение эффекта фотонного эха представляет собой новый физический принцип реализации нейронной сети для систем оптической обработки информации. Детально состояние искомого круга проблем рассмотрено в [1,5]. Ранее нами были рассмотрены различные численные реализации, демонстрирующие возможности оптической нейронной сети обрабатывать последовательности образов произвольного порядка сложности, включая восстановление зашумленной входной последовательности. Данная работа продолжает искомые исследования по моделированию динамики оптических нейронных сетей и посвящена рассмотрению проблемы обработки паттернов достаточно высокого порядка сложности.

**Динамика многослойных оптических нейронных сетей.** Кратко, следуя [4,5], напомним основные положения динамики многослойных оптических нейронных сетей, в частности, на основе фотонного эха. Фотонное эхо представляет собой нелинейный оптический эффект, явление четырех волнового взаимодействия в нелинейной среде с задержкой во времени между световыми импульсами. Последовательность возбуждающих оптических импульсов проходит через соответствующую среду (пары металлов, кристаллы рубина и др.) и через определенный интервал времени вызывает отклик среды – сигнал фотонного эха. При этом необходимо, чтобы среда была резонансной, т.е. несущая частота оптических импульсов была близка к частоте возбуждаемого перехода, и линия этого перехода была неоднородно уширенной. Взаимодействие света с резонансной средой должно происходить за достаточно малые интервалы, меньшие времени «фазовой памяти». Необходимыми свойствами для применения фотонного эха как нового физического принципа реализации нейронных сетей в оптике обладает эффект стимулированного трехимпульсного фотонного эха. Расчет поляризации, т.е. макроскопического дипольного момента фотонного эха, наводимый последовательностью трех оптических импульсов, и далее подстановка ее в волновое уравнение Максвелла позволяет для амплитуды сигнала стимулированного эха получить выражение

$$E^{echo} = b.E_1^*E_2E_3.$$

Здесь  $b$  – коэффициент, определяемый параметрами конкретной среды и оптических импульсов;

$E(1,2,3)$  – амплитуды соответственно первого, второго и третьего импульсов. Предполагается, что среда является тонкой по сравнению с пространственным размером оптических импульсов, частота Раби значительна меньше 1, а длительность оптических импульсов значительно меньше обратной характерной ширины неоднородной линии резонансного перехода. Рассмотрим далее ансамбль двухуровневых систем, каждый уровень в котором состоит из двух подуровней тонкого расщепления [5]. Пусть через оптически тонкую среду распространяется последовательность импульсов, каждый импульс в которой представим в виде

$$E_j(r,t) = \varepsilon_j(r,t) \cos(\omega_0 t - k_j r + \varphi_j),$$

где  $\varepsilon$  – огибающая  $j$ -ого импульса;

$\omega_0$  – частота оптического поля.

Обычно в качестве возбуждающих импульсов берутся импульсы с прямоугольной огибающей. Между тем использование импульсов с непрямоугольной огибающей произвольной формы при произвольном соотношении между неоднородной шириной спектральной линии резонансного перехода позволяет получить новые возможности плане более эффективного применения эффекта в приложениях. Для определенности в качестве  $\varepsilon$ , брались функции вида

$$\varepsilon_j(s) = (1/2) \text{ch}^{-1}[\pi(s - \tau_j)/(2T_{j+1})], \quad (1)$$

где  $\tau_1$  ( $\tau_2$ ) – промежутки времени между максимумами амплитуд первого и второго (второго и третьего) возбуждающих импульсов;

$T_j$  – эффективные длительности импульсов.

Временная эволюция ансамбля при воздействии внешнего поля и процессов релаксации описывается уравнением Шредингера для матрицы плотности [5]

$$i\hbar \dot{\rho} = [H; \rho] + \text{релакс. члены}, \quad H = H_0 - (d_1 E) - (d_2 E), \quad (2)$$

где  $H_0$  – гамильтониан невозмущенного атома;

$d_j$  – дипольные моменты переходов между компонентами тонкой структуры.

Макроскопическую поляризацию среды на частоте  $\omega_0$  можно определить как

$$\langle P(t) \rangle = N \sum_k (d_1 \rho_{12}(t) + d_2 \rho_{34}(t)) \cdot \exp(i\omega_0 t).$$

После ряда громоздких выкладок для интенсивности эхо-сигнала можно в общем случае получить

$$I(R,t) \sim (1/R^2) (N^2 \omega_0^4 / c^4 V^2 (1 + \gamma_0)^2 \exp\{-2Gt_{23} - 2(t + t_{12})(T_2)^{-1} - \pi/2(t - t_{12})^2 (T_2)^{-1}\} | (d_1 \sin \vartheta_{13} - d_2 \sin \vartheta_{23}) \text{sh}^{-1}[\pi(t - 2\tau_1 - \tau_2 - r_i/c) T_1^{-1}]/2 |^2 \cdot (3) \\ \cdot \{(1 + \gamma_1) \sin \vartheta_{12} \sin \vartheta_{13} - (\gamma_0 - \gamma_2) \sin \vartheta_{22} \sin \vartheta_{21}\}^2,$$

где  $\theta_{ij}$  – площади импульсов ;

$$\gamma_{i-1} = (\gamma_0 k_{i3} - k_{i1}) / (k_{i3} + k_{i1} - k_{31} - k_{13}), i = 2, 4.$$

**Численная реализация нейросетей на основе фотонного эха.** Для реализации оптической нейронной сети с хэббовским правилом обучения матрицы связей мы естественно используем схему внутреннего произведения. Принципиальная оптическая схема для обработки последовательности образов  $\xi^1, \dots, \xi^p$  имеет следующий вид: {↓Вход→Накопительная матрица F1→→Корреляционная область→Накопительная матрица F2→→Выход→ Пороговое устройство→↑}. Первый импульс имеет равную единице амплитуду на всей плоскости среды, второй определяет векторы памяти, поступающие в виде вертикальных столбцов и обеспечивающие накопление в среде матриц памяти  $F_1 = F_2$  размером  $(N \cdot p)$ . Третий импульс, амплитуда которого определяется распознаваемым одномерным образом, поступает на вход системы и равномерно распределяется по среде в горизонтальном направлении. В результате возникают стимулированные эхо- сигналы, которые собираются оптически в горизонтально расположенный одномерный массив в корреляционной области. На первом этапе вычисляются внутренние произведения между входным вектором и векторами памяти. Выражение для амплитуды сигнала стимулированного фотонного эха:  $u(m) \sim \sum_j \xi_j^m \xi_j^{in}$ . Амплитуда первого импульса равна единице и здесь опущена.

Далее внутренние произведения взвешивают накопленные в матрице F2 соответствующие векторы памяти  $(\xi^1, \dots, \xi^p)$ . Эта операция также приводит к возникновению сигналов стимулированного эха, которые далее суммируются, приводя к одномерному распределению с амплитудой:  $s_i \sim \sum_m u(m) \xi_{ii}^m = \sum_m (\xi_i^m) \sum_j \xi_j^m \xi_j^{in}$ . Это

соотношение, пороговое преобразование и обратная связь определяют динамику оптической нейронной сети Хопфилда с хэббовской матрицей связи. Для амплитуды выходного сигнала в этом случае имеем:  $a_{kl}^{out} \sim \sum_m u(m) a_{kl}^m = \sum_m a_{kl}^m \sum_{j,i} a_{ij}^m a_{ij}^{in}$ . Для учета

эффекта запаздывания в динамику сети надо включить переменные запаздывания:

$\xi_i(n+1) = f[\sum_{j=1}^N \sum_{l=0}^{Q_k-1} J_{ij}^l \xi_j(n-l)]$ , где матрицы связи (соответствующие переменным запаздывания) имеют вид

$$J_{ij}^l = \sum_{k=1}^s \sum_{m=1}^{Q_k-l} \xi_i^{k, \mu+\lambda-1} \xi_j^{k, m} \dots \text{and} \dots \xi_j^{k, mk+1} = \xi_j^{k, l},$$

где  $s$  – число цепочек в сети;

$Q_k$  – число образов в  $k$ -ой цепочке.

Если  $l=0$ , тогда имеем сеть с мгновенным откликом. Для того, чтобы получить возможность моделировать инвариантное распознавание образов и получить большую информационную емкость следует использовать нейронные сети высших порядков. В [5] была предложена соответствующая схема. Вместо линейных по  $s$  выражений в правилах преобразования образов и вычисления матриц участвуют суммы нелинейных выражений

$$a_m^{out} = \text{sgn} \left( \sum_{j_1, j_2, \dots, j_n} W_{mj_1, \dots, j_n} a_m^{in} a_{j_1}^{in} \dots a_{j_n}^{in} \right) \quad 1 < j_1, j_2, \dots, j_n < N, \quad 1 < m < N_o,$$

где  $a^{in}$  – входной образ;

$a^{out}$  - выходной образ;  $j=1, 2, \dots, N_o$ ;

$W$  – сила связи между нейронами с номерами  $m, j_1, \dots, j_n$ .

Нами разработан пакет программ численного моделирования динамики оптической нейронной сети (на основе фотонного эха), обладающей следующими ключевыми характеристиками: многослойность, возможность введения обучения, обратной связи и контролируемых оптических шумов [5-8]. Возможны различные варианты задания матрицы связей и бинарного или непрерывного сигмоидного отклика модельных нейронов. В [6] на основе данного пакета проведено численное моделирование оптической нейронной сети для распознавания серии образов (число слоев  $N=3-5$ , число образов  $p=320$ ; функция ошибки

$$SSE = \sum_{p=1}^{p_{\max}} \left\{ \sum_{k=1}^{k_{\max}} [t(p,k) - O(p,k)]^2 \right\},$$

где  $O(p,k)$  – нейросетевой выход  $k$  для образа  $p$  и  $t(p,k)$  – обученный образ  $p$  для выхода  $k$ ;

$SSE$  определяется из процедуры минимизации;

выходная ошибка  $RMS = \sqrt{SSE/P_{\max}}$ .

В качестве нейронной функции использовалась функция вида:  $f(x) = 1/[1 + \exp(-\delta x)]$ .

В [7,8] приведены данные работы трехслойной нейросети, в частности, результаты теста на совпадение значений эталонов обучающей выборки и результирующих значений выходного сигнала оптической нейросети (с простейшими тригонометрическими функциями). На рис.1 приведены результаты компьютерного эксперимента по моделированию динамики нейросети с моделированием входного сигнала импульсом типа (1). Анализ результатов указывает на достаточно высокую способность рассмотренной нейросети обрабатывать паттерны произвольного порядка сложности.

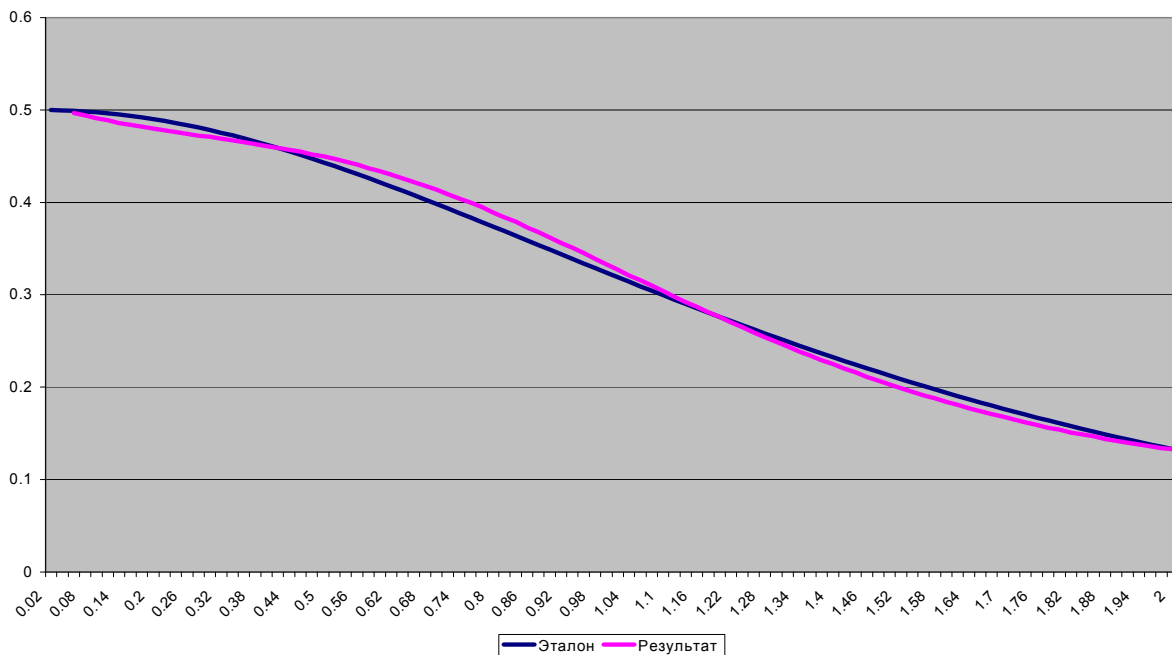


Рисунок 1 - Результат РС эксперимента по моделированию динамики нейросети с входным сигналом типа (1).

В заключение авторы выражают глубокую благодарность проф. Глушкову А.В. за постановку задачи, полезные советы и ценные критические замечания.

### Список литературы

1. *Neural Computers*, Eds. R.Eckmiller, C.Malsburg.- Berlin: Springer, 1998.-650P.
2. *Neural Networks for Computing*, Ed. J.Denker.- New York: AIP Publ., 2000.-580P.
3. Манькин Э.А., Самарцев В.В., Оптическая эхо-спектроскопия.-М.:Наука, 1994.-280С.
4. Манькин Э.А., Сурина И., Нейронные сети.-М.:РНИЦ "Курчатовский Институт", 1993.-180.
5. Глушков А.В., Лобода А.В., Свинарченко А.А., Теория нейронных сетей на основе фотонного эха и их программная реализация. Одесса: ТЭС.-2004.-174с.
6. *Glushkov A.V., Loboda A.V., Program realization of models of the optical neural networks* Препр./МОНУ. Одеського нац. унів-ту ім.І.І.Мечникова; Ph-L-3-01.- Одесса:2001.- 18с.
7. Лобода А.В., Свинарченко А.А., Иваницкая Л.А., Динамика многослойной нейронной сети на основе фотонного эха: численная реализация// Вісник ОДЕКУ.-2006.-№3.-С. 251-255.
8. Лобода А.В., Буяджи В.В., Об одной модели оптических нейронно-сетевых систем с хэббовским правилом обучения// Тез. докл. Конф. молодых ученых ОДЕКУ, Одесса.-2007.

**Динаміка багатослоєвої оптичної нейронної мережі: чисельна реалізація для складних патернів.**

**Лобода А.В., Буяджи В.В.**

*Моделюється динаміка оптичної нейромережі на основі ефекту фотонної луни і виконано її чисельну реалізацію, яка демонструє можливість мережі обробляти складні паттерни.*

**Ключові слова:** динаміка багатослоєвої нейромережі, складні паттерни.

**Dynamics of multi-layers optical neural networks: numerical realization for complex patterns.**

**Loboda A.V., Buyadzh V.V.**

*Dynamics of multi-layers optical neural networks on the basis of photon echo is studied. Numeric realization of neural networks demonstrates its possibility to make a processing of complex patterns.*

**Keywords:** dynamics, multi-layers neural network, complex patterns.