

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

PACS NUMBER: 82.01A

УДК 539.127

ДИНАМИКА МНОГОСЛОЙНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО ЭХА: ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ С ВХОДНЫМ СИНУСОИДАЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ

А. В. Глушков, А. В. Лобода, М. Г. Сербов, А. А. Свиначенко, В. В. Буяджи

Одесский государственный экологический университет

ДИНАМИКА МНОГОСЛОЙНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО ЭХА: ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ С ВХОДНЫМ СИНУСОИДАЛЬНЫМ ИМПУЛЬСОМ

А. В. Глушков, А. В. Лобода, Н. Г. Сербов, А. А. Свиначенко, В. В. Буяджи

Аннотация. Моделируется динамика многослойных нейронных сетей на основе эффекта фотонного эха и приводятся результаты компьютерных экспериментов по моделированию динамики нейросетей с входным синусоидальным импульсом

Ключевые слова: динамика нейронных сетей, эффект фотонного эха, входной синусоидальный импульс

ДИНАМІКА БАГАТОШАРОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖИ НА ОСНОВІ ФОТОННОЇ ЛУНИ: ЧИСЕЛЬНА РЕАЛІЗАЦІЯ З ВХІДНИМ СІНУСОІДАЛЬНИМ ІМПУЛЬСОМ

О. В. Глушков, А. В. Лобода, М. Г. Сербов, А. А. Свиначенко, В. В. Буяджи

Анотация. Моделюється динаміка багатошарової нейромережі на основі ефекту фотонної луни і наводяться результати комп'ютерних експериментів по моделюванню динаміки нейромережі з вхідним синусоїдальним імпульсом.

Ключові слова: динаміка нейронних мереж, ефект фотонної луни, вхідний синусоїдальний імпульс

DYNAMICS OF MULTI-LAYERS NEURAL NETWORKS ON BASIS OF PHOTON ECHO: NUMERICAL REALIZATION WITH INPUT RECTANGULAR PULSE

A. V. Glushkov, A. V. Loboda, N. G. Serbov, A. A. Svinarenko, V. V. Buyadzhi

Abstract. A dynamics of the multi-layers neural networks on the basis of photon echo and superlattices is studied. The results of the computer experiments on dynamics of neural networks with input sin-like pulse are presented.

Keywords: dynamics, network, photon echo effect, input sin-like pulse

1. Введение

В настоящее время по-прежнему значительный интерес прикован к разработке нейромпьютеров, т.е. физических реализаций моделей нейронных сетей [1–9]. К числу актуальных задач относится изучение возможностей их оптических и оптоэлектронных воплощений [2]. Основные особенности нейронной сети, на основе которой могут быть созданы полезные оптические устройства, сейчас активно разрабатываются. Известно, что искомая нейронная сеть должна быть многослойной, с возможностью реализации обучения, обратной связи и контролируемых шумов. Основные элементы – матрица связей, которая должна действовать как преобразователь одномерного или двумерного изображения, и модельный нейрон, дающий бинарный или непрерывный сигмоидный отклик на поступающее возбуждение. Хотя известный прогресс в изучении особенностей оптических многослойных нейронных сетей достигнут, тем не менее, многие важнейшие вопросы, касающиеся их основных характеристик, моделей функционирования, информационной емкости, реализаций запоминания и восстановления цепочек вызываемых последовательно во времени образов, 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]. Использование эффекта фотонного эха (мультифотонного эха) представляет собой новый физический принцип реализации нейронной сети для систем оптической обработки информации [4,5]. Настоящая работа продолжает исследования по моделированию динамики многослойной нейронной сети на основе фотонного эха [5–9], ее численной реализации. Приводятся результаты компьютерных экспериментов по моделированию динамики нейронных сетей с входным прямоугольным импульсом.

2. Динамика многослойных нейронных сетей на основе эффекта фотонного эха

Основные аспекты теории нейронно-сетевых систем на основе фотонного эха изложены ранее, в частности, в [5–8]. Поэтому, здесь отметим лишь принципиальные элементы искомой теории. Фотонное эхо представляет со-

бой нелинейный оптический эффект, явление четырех волнового взаимодействия в нелинейной среде с задержкой во времени между световыми импульсами [4]. 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”. Длительность импульсов света должна быть значительно меньше минимального времени релаксации в среде (условие когерентного взаимодействия). 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: $E^{echo} = b \cdot E_1^* E_2 E_3$. Здесь b – коэффициент, определяемый параметрами конкретной среды и оптических импульсов, $E(1,2,3)$ – амплитуды соответственно первого, второго и третьего импульсов. При получении этого соотношения предполагалось, 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 [4].

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 ε – огибающая j -ого импульса, ω_0 – частота оптического поля. Обычно в качестве возбуждающих импульсов берутся импульсы с прямоугольной

огибающей. Между тем использование импульсов с прямоугольной огибающей произвольной формы при произвольном соотношении между неоднородной шириной спектральной линии резонансного перехода позволяет получить новые возможности как в плане более эффективного применения эффекта в приложениях так и расширить область значений параметров теории. Для определенности в качестве функции ϵ , задающей форму возбуждающих импульсов, брались функции вида: $\epsilon_j(s) = (1/2)\text{ch}^{-1}[\pi(s - \tau_j)/(2T_{j+1})]$, где τ_j (τ_2) – промежутки времени между максимумами амплитуд первого и второго (второго и третьего) возбуждающих импульсов, T_j – эффективные длительности импульсов. Временная эволюция рассматриваемого ансамбля при воздействии внешнего поля и процессов релаксации описывается уравнением Шредингера для матрицы плотности:

$$i\hbar\dot{\rho} = [H; \rho] + \text{релакс. члены},$$

$$H = H_0 - (d_1 E) - (d_2 E).$$

Здесь H_0 – гамильтониан невозмущенного атома, d_j – дипольные моменты переходов между компонентами тонкой структуры. Макроскопическую поляризацию среды на частоте ω_0 можно определить стандартным образом:

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

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

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

где θ_{ij} – площади импульсов, $\gamma_{i-1} = (\gamma_0 k_{i3} - k_{i1}) / (k_{i3} + k_{i1} - k_{31} - k_{13})$, $i = 2, 4$; остальные обозначения стандартные. Различные частные случаи рассмотрены в [5]. Имеющая место модуляция эхо сигнала во времени приводит к необходимости выбора оптимального временного интервала между вторым и первым импульсами в случае применения фотонного эха в оптических нейросетях.

3. Численная реализация нейросетей на основе фотонного эха

Перейдем далее к изложению модели численной реализации нейросети на основе фотонного эха. Детально искомая численная процедура изложена в [5,6]. Один из перспективных подходов к реализации оптической нейронной сети с хэббовским правилом обучения матрицы связей является схема внутреннего произведения [1]. Принципиальная оптическая схема для обработки последовательности образов ξ^1, \dots, ξ^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: $u(m) \sim \sum \xi_j^m \xi_j^{in}$. Амплитуда первого импульса равна единице и здесь опущена. Далее внутренние произведения взвешивают накопленные в матрице F2 соответствующие векторы памяти ξ^1, \dots, ξ^p . Эта операция также приводит к возникновению сигналов стимулированного эха, которые далее суммируются, приводя к одномерному распределению с амплитудой: $s_i \sim \sum_m u(m) \xi_{ii}^m = \sum_m (\xi_i^m) \sum_j \xi_j^m \xi_{ij}^{in}$. Это соотношение, пороговое преобразование и обратная связь определяют динамику оптической нейронной сети Хопфилда с хэббовской матрицей связи. Реализация, основанная на эффекте фотонного эха, позволяет далее заменить разрешение образов памяти в пространстве разрешением во времени. В результате оказывается возможной обработка двумерных оптических массивов. Аналогично для амплитуды выходного сигнала в этом слу-

чае имеем: $a_{kl}^{out} \sim \sum_m u(m)a_{kl}^m = \sum_m a_{kl}^m \sum_{j,l} a_{ij}^m a_{ij}^{in}$. Для учета эффекта запаздывания в динамику сети надо включить переменные запаздывания:

$$\xi_i(n+1) = f\left[\sum_{j=1}^N \sum_{l=0}^{Q_k-1} J_{ij}^l \xi_j(n-l)\right],$$

где матрицы связи (соответствующие переменным запаздывания) имеют вид:

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

Здесь s — число цепочек в сети, Q_k — число образов в k -ой цепочке. Если $l=0$, тогда имеем сеть с мгновенным откликом. Отметим, что необходимость запоминания состояний в предшествующие моменты времени в нейронных сетях с $l>0$ делает трудным их реализацию известными оптическими методами, за исключением метода, основанного на эффекте фотонного эха. 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.

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 [5,6]. Возможны различные варианты задания матрицы связей и бинарного или непрерывного сигмоидного отклика (и т.д.) модельных нейронов. В [5-8] на основе разработанного 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 настоящем расчете были апробированы функция: $f(x, T) = \exp[(xT)^4]$. На рис.1 приведены результаты работы трехслойной нейросети, в частности, результаты компьютерных экспериментов по моделированию динамики многослойных нейронных сетей с входным синусоидальным импульсом. Анализ полученных данных подтверждает общий вывод и данного и аналогичных других компьютерных экспериментов [5-8] о достаточно высоком качестве обработки многослойными оптическими нейронно-сетевыми системами входных сигналов самой различной формы и сложности.

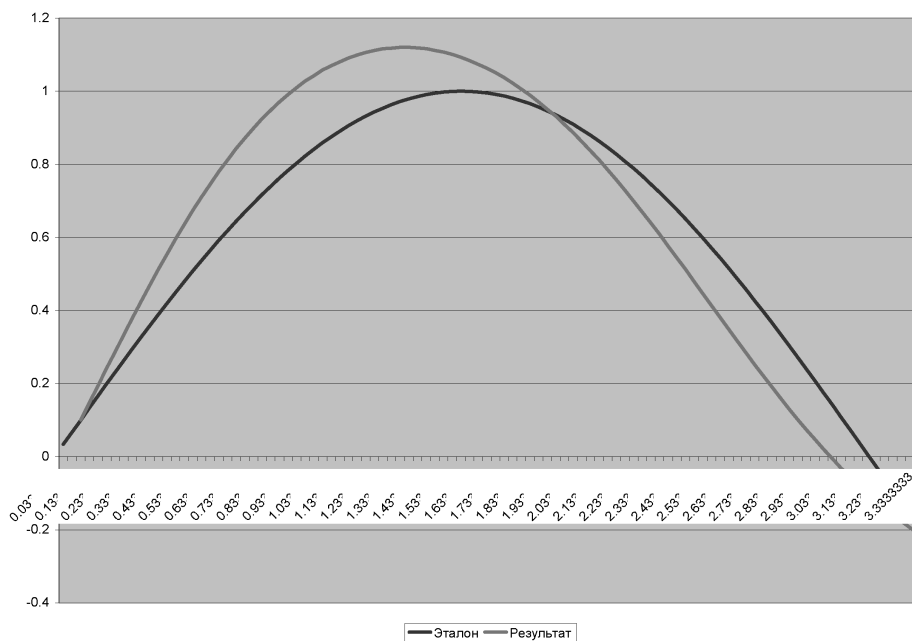


Рис. 1. Результаты компьютерных экспериментов по моделированию динамики многослойных нейронных сетей с входным синусоидальным импульсом

Список литературы

1. *Neural Computers*, Eds. R.Eckmiller, C.Malsburg. — Berlin: Springer, 1998. — 650 p.
2. *Neural Networks for Computing*, Ed. J.Denker. — New York: AIP Publ., 2000. — 580 p.
3. Манькин Э.А., Самарцев В.В., Оптическая эхоспектроскопия. — М.:Наука, 1994. — 280 с.
4. Манькин Э.А., Сурина И.И., Нейронные сети и их оптические воплощения. — М.:РНИИ "Курчатовский Институт", 1993. — 180с.
5. Глушков А.В., Лобода А.В., Свиноренко А.А., Теория нейронных сетей на основе фотонного эха и их программная реализация. — Одесса: ТЕС. 2003. — 200с.
6. *Glushkov A.V., Loboda A.V., Program realization of models of the optical neural networks* Препр./ МОНУ.НДІ фізики Одеського національного університету ім.І.І.Мечникова; Ph-L-3-01. — Одесса:2001. — 18с.
7. Лобода А.В., Буяджи В.В., Динамика многослойной оптической нейронной сети: численная реализация для сложных паттернов// Вестник Одесск.гос.эколог.ун-та. — 2007. — N4. — С.363-367.
8. Лобода А.В., Свиноренко А.А., Иваницкая Л.А., Динамика многослойной нейронной сети на основе фотонного эха: численная реализация// Вестник Одесск.гос.эколог.ун-та. — 2006. — №3. — С.363-367.
9. *Serbov N.G., Svinarenko A.A., Wavelet and multifractal analysis of oscillations in a grid of coupled autogenerators*//Photoelectronics. — 2007. — N16. — P.53-56.