

## 46. Голографическая волновая модель ассоциативной памяти

*В. В. Храбров, В. В. Ткаченко*

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук  
Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Построена формальная вычислительная модель ассоциативной памяти голографического типа, обладающей свойствами фильтрации и устойчивости на повреждения. Численным моделированием обратимых волновых процессов на множестве регулярно связанных цифровых осцилляторов, образующих двумерную метрику входного пространства сигналов (изображений), показана возможность восстановления информации по неполному ключу и высокая помехоустойчивость к шумам входного сигнала, достигаемая благодаря фильтрующим свойствам ассоциативного отображения. Формальная модель может быть применена также для иных метрик пространства сигналов.

*Ключевые слова:* Цифровая голография, Ассоциативная память, Распределенное кодирование, Цифровые осцилляторы, Моделирование волновых процессов, Помехоустойчивость.

*Цитирование:* Храбров, В. В. Голографическая волновая модель ассоциативной памяти / В. В. Храбров, В. В. Ткаченко // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 296–300.

### Введение

В задачах параллельной обработки информации особую роль играют оптические голографические модели ассоциативной обработки данных [1, 2], описываемые функциями двух переменных с выполнением преобразований на комплексных волновых полях. Такие модели основаны на свойствах физического пространства распространять волны возмущения, где любая точка пространства является одновременно и источником, и приемником сигналов, где само физическое пространство является процессором обрабатываемой информации. Известны также модели [3], описывающие параллельную распределенную обработку информации в мозге человека в виде динамики осцилляторных нейронных сетей. Концептуальной основой этих моделей является волновой способ распространения сигналов в среде некоторых осцилляторов и передача информации от каждой точки пространства к каждой, или от каждого нейрона к каждому посредством волнового взаимодействия. Однако это системное свойство реализовано в указанных моделях не в полной мере.

Основной трудностью в оптической голографии является физическая невозможность остановить время и зарегистрировать мгновенный волновой паттерн. Запись и восстановление волновых паттернов в оптических процессорах связаны с получением интерференционной картины, образованной объектной волны с дополнительной опорной волной. Благодаря когерентности опорной и объектной волн в области регистрации создается условие возникновения стационарных осцилляций — стоячих волн, амплитудное распределение которых не

изменяется во времени. Именно эти стационарные стоячие волны создают интерференционную картину как побочный эффект мгновенного суммирования и вычитания действительных компонент амплитуд при условии наложения когерентных волн. В действительности же, физически две волны — опорная и объектная — в области регистрации распространяются в линейной среде без какого-либо взаимодействия полностью независимо друг от друга. Этот побочный эффект, будучи зарегистрирован как паттерн физического модулятора (амплитудного или фазового), позволяет на этапе восстановления лишь частично исказить опорный волновой фронт таким образом, что в результате искажения появляется ослабленный и зашумленный неточностями модуляции фантом информационной волны.

В известных моделях осцилляторных нейронных сетей [3], однако, распространение волн не рассматривается как процесс, играющий существенную системную роль в передаче информации. Возникает вопрос: возможно ли создать формальную модель параллельного вычислительного процесса на абстрактной вычислительной структуре, в которой распространяются такие же волны возбуждения, как в физической среде (эфире), но на простейших абстрактных осцилляторах, заменяющие функции коллективного поведения нейронов в нейронных сетях? Это становится возможным, если построить вычислительную модель обратимого волнового процесса без затухания на сетке дискретных отсчетов, в узлы которого помещены процессоры, выполняющие функции абстрактных осцилляторов.

### **1. Принципы построения модели волнового вычислительного процесса**

1. Основным вычислительным элементом в модели является гармонический осциллятор без затухания, удовлетворяющих уравнению  $d^2x/dt^2 = -\omega^2x$ , где  $x$  — величина возбуждения осциллятора,  $\omega$  — частота осциллятора.

2. Множество осцилляторов в модели соответствует дискретной сетке моделируемого пространства распространения волн. Каждый осциллятор имеет память текущего состояния как комплексной мгновенной амплитуды его возбуждения.

3. Осцилляторы обмениваются величинами возбуждений через регулярную локальную структуру связей, соответствующую метрике моделируемого пространства.

4. Физический смысл метрики — определение расстояния между осцилляторами через локальные связи. Метрика в модели является единственным способом адресации одного осциллятора относительно другого. Осцилляторы в модели не имеют адреса доступа, отличного от локальных связей (в конкретной аппаратной или программной реализации вспомогательный адрес может быть, но он в абстрактной модели несущественен).

5. Метрика обладает свойством целочисленной мерности. Например, модель пространства может быть ноль-мерной (отдельный осциллятор), одномерной (цепочка связанных осцилляторов), двумерной (тетрагональная, гексагональная структура связей) и т. п.

6. В модели не допускаются нелокальные связи между вычислительными элементами. Регулярная структура связей соединяет между собой только непосредственные соседи (принцип локальности физических взаимодействий и простоты).

7. Осцилляторы изменяют свое состояние параллельно в дискретные моменты времени, синхронизируемые внешним таймером.

8. Состояние каждого осциллятора в последующий момент времени зависит исключительно от его текущего состояния и состояния его непосредственно связанных соседей.

9. Благодаря локальным связям волна на множестве осцилляторов распространяется пошагово в дискретные моменты времени в соответствии с волновым алгоритмом, являющимся дискретным аналогом непрерывного уравнения осциллятора без затухания.

10. Согласно принципу Гюйгенса — Френеля, каждый осциллятор вычислительной среды, куда дошел фронт волны, рассматривается как источник новой волны, распространяющейся по локальным связям. Сложение волн от всех осцилляторов в каждый момент времени выглядит как волновое преобразование, обеспечивающее отображение каждой точки пространства на сферическую область (функция рассеяния точки), размер которой пропорционален количеству пройденных шагов волнового алгоритма.

11. Благодаря волновому алгоритму с функцией рассеяния точки на сферу обеспечивается распределенное кодирование информации в точности как в оптических голографических системах. Такое рассеяние точки является полностью обратимым через изменение мнимой части возбуждения всех осцилляторов на противоположный знак, что соответствует обращению времени, и последующей отработке того же количества шагов волнового алгоритма — волновой паттерн свернется в первоначальное состояние (первоначальный образ). Если после отработки нескольких шагов волнового алгоритма часть волнового паттерна стереть, то после обращения в первоначальное состояние исходный образ паттерна восстановится целиком, хоть и с увеличенными шумами. Наложение случайного шума на волновой паттерн после отработки волнового алгоритма и обращению его в первоначальное состояние, приводит к уменьшению шумов после свертки в первоначальное состояние.

12. Поскольку модель строится на конечном множестве осцилляторов, связанных локально регулярной структурой, различаются внутренние и граничные осцилляторы. Внутренние — это осцилляторы, имеющие такое же количество соседей, как и количество связей в заданной топологии. Граничные осцилляторы имеют меньше соседей и связей, чем внутренние.

13. Назначение граничных осцилляторов — эмулировать бесконечное распространение волны за границы пространства осцилляторов без отражений фронта волны на границе. Волновой фронт, вышедший за границу, безвозвратно исчезает — это имеет значение для последующей фильтрации шумов при восстановлении волновых паттернов.

14. Паттерн возбуждений осцилляторов на любом шаге работы волнового алгоритма представляет собой картину распространения волн от каждого осциллятора, которая после

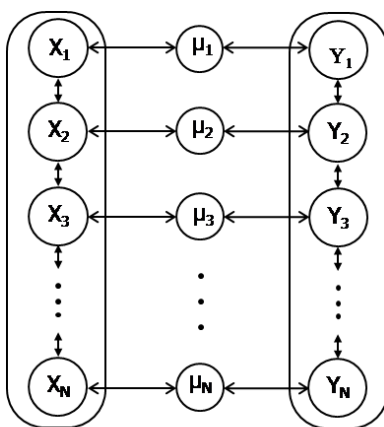


Рис. 1. Структура голографической модели ассоциативной памяти

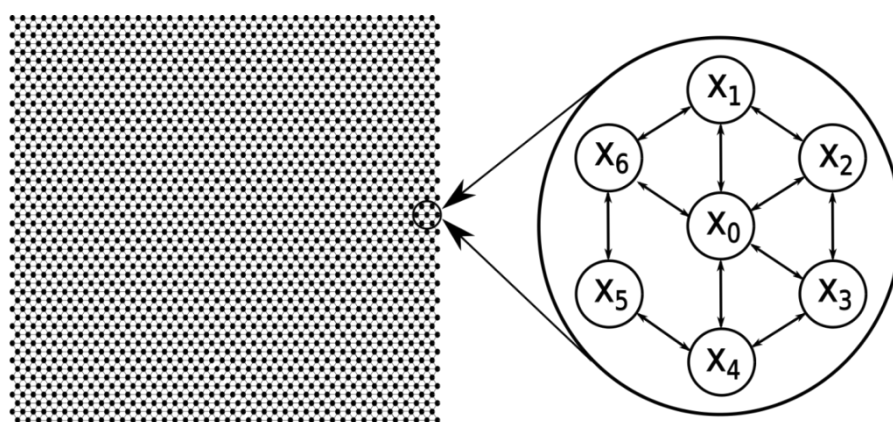


Рис. 2. Гексагональная структура локальных связей осцилляторов

отработки заданного количества шагов копируется в операционную память ассоциативного процессора для дальнейшей обработки.

15. На входы ассоциативного процессора поступают непосредственно волновые паттерны как ключей, так и паттерны информации, связанной с ключами, преобразованные волновым алгоритмом.

## 2. Базовая структура голографической модели ассоциативной памяти

Базовая структура голографической волновой модели ассоциативной памяти включает две группы осцилляторов в пространствах  $X$  и  $Y$ , служащих одновременно входами-выходами модели, и собственно голографической памяти, в которую записывается результат вычисления произведения комплексных величин состояния осцилляторов, соответствующих пространств, как изображено на рисунке 1.

В качестве примера на рисунке 2 изображено двумерное пространство 2304 осцилляторов с гексагональной структурой связей между элементами и его фрагмент, показывающий связи одного из осцилляторов с его 6 соседями.

### **Заключение**

Программная реализация голографической волновой модели выполнена на языке программирования C++ в среде Qt под операционной системой Linux. Результаты программного моделирования демонстрируют процесс распространения волн на множестве гексагонально связанных осцилляторов на плоскости изображений, над которыми производятся операции волнового алгоритма, а также восстановление исходных изображений с возможностью стирания части волновых фронтов и наложения шумов, что показывает возможность восстановления волновых фронтов ассоциируемых двумерных изображений по неполным или зашумленным ключам.

### **Список источников**

- [1] **Gabor, D.** Associative Holographical Memories / D. Gabor // IBM Journal of Research and Development. — 1969. — Vol. 13. — №2. — P. 156–159.
- [2] **Павлов, А. В.** Обработка информации оптическими методами : Том 2 / А. В. Павлов. — Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО. — 2010. — 78 с.
- [3] **Борисюк, Г. Н.** Осцилляторные нейронные сети. Математические результаты и приложения / Г. Н. Борисюк, Р. М. Борисюк, Я. Б. Казанович, Т. Б. Лузянина, Т. С. Турова, Г. С. Цымбалюк // Математическое моделирование. — 1992. — Том 4. — №1. — С. 3–43.