

ПОЛНОСТЬЮ АНАЛОГОВЫЙ ФОТОННЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Райков Александр Николаевич

Доктор технических наук, профессор

МГУ имени М.В. Ломоносова, Национальный центр цифровой экономики, руководитель департамента интеллектуальных технологий

Москва, Российская Федерация

anraikov@mail.ru

Аннотация

В статье предлагается методологическое обоснование разработки полностью аналоговой системы фотонного искусственного интеллекта (ФИИ), основанной на использовании оптических технологий для обработки непрерывных (аналоговых) сигналов без преобразования их в цифровую форму. Это позволяет преодолеть ограничения, связанные с цифровой обработкой данных, а именно: энергоёмкость и затратность времени на глубокое обучение нейронной сети, урезание спектра естественного сигнала, уменьшение весомости когнитивных семантик моделей искусственного интеллекта (ИИ). Фотонный подход позволяет многократно сократить время машинного обучения и энергозатраты. Он также помогает учесть неформализуемые аспекты когнитивной семантики моделей ИИ для более полного охвата человеческих чувств, мыслей и трансцендентных состояний сознания, которые цифровые компьютеры не могут полностью охватить. Такие достоинства достижимы за счет замены многослойной структуры нейронной сети одним матричным слоем Фурье-свертки множества обучающих образов, записанных на голографическом накопителе. Однако на фотонном пути развития ИИ возникают новые проблемы, включая синтез уникальных фотонных материалов для перезаписываемой трехмерной голографической памяти и управление оптическими процессами с помощью цифровых компьютеров. В статье предлагается алгоритм синтеза фотонных материалов с использованием подхода к решению обратных задач, реализованного с помощью генетического алгоритма.

Ключевые слова

перезаписываемая голографическая память, синтез фотонных материалов, фотонный искусственный интеллект, цифровое управление

Введение

Компьютерные данные в современных системах искусственного интеллекта (ИИ) обычно обрабатываются в цифровом виде и на суперкомпьютерах. Однако рост вычислительной производительности цифрового компьютера ограничен, поскольку транзисторы в полупроводниковых чипах не могут быть меньше размера атома, и количество параметров машинного обучения глубоких нейронных сетей постоянно растет, что приводит к росту времени обучения и энергозатратам. В то же время известно, что когнитивные процессы человека, отражаемые с помощью систем ИИ, являются не только цифровыми (дискретными), но и аналоговыми (непрерывными). Например, когнитивная семантика модели ИИ отражает чувства и трансцендентные состояния человеческого разума преимущественно в непрерывном формате (мысли, чувства) [1]. Для их охвата цифровая компьютерная парадигма управления знаниями в системах ИИ нуждается в пересмотре.

Полупроводниковому компьютеру, умеющему хорошо делать переключения, дискретное (цифра, биты, байты) представление данных удобно для решения расчетных задач. При цифровом представлении данных теория дискретной математики работает достаточно четко; теорема отсчетов Шеннона-Найквиста-Котельникова гарантирует повышение точности дискретных

© Райков А. Н., 2024

Производство и хостинг журнала «Информационное общество» осуществляется Институтом развития информационного общества.

Данная статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons «Атрибуция — Некоммерческое использование — На тех же условиях» Всемирная 4.0 (Creative Commons Attribution – NonCommercial - ShareAlike 4.0 International; CC BY-NC-SA 4.0). См. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.ru>
https://doi.org/10.52605/16059921_2024_06_168

вычислений при уменьшении интервала отсчетов. Однако рост точности за счет уменьшения интервалов отсчета не может быть бесконечным, поскольку время вычислений и энергозатраты растут с еще большей скоростью.

Человек или компьютер получают сигналы из окружающей действительности в аналоговом виде, например, первичными слоями глаза или аналоговой видеокамерой. Эти сигналы для коммуникации в организме или компьютерных сетях преобразуются в импульсные, что вносит в сигналы искажения. В организме человека это делает саму передачу сигнала менее энергозатратной, более надежной и быстрой. Однако в компьютере энергозатраты и время вычислений становятся труднопреодолимым препятствием.

Принимая во внимание опыт природы, потребность учета когнитивных семантик [1] и сравнительное время-энергетические оценки цифровых и аналоговых вычислений, в статье показано, что обрабатываемые в компьютере сигналы совсем не обязательно редуцировать до импульсов и пикселей. Сигнал может полностью обрабатываться в аналоговой (непрерывной) форме с применением оптических методов и инструментов.

Статья состоит из обзора вопроса, составления списка основных проблем создания системы фотонного искусственного интеллекта (ФИИ), обсуждения наиболее важной из них — синтеза фотонного материала, и предложения проекта фотонной архитектуры ФИИ.

1 Аналитический обзор

Оптический тренд в создании вычислительной среды при создании систем ИИ уже давно звучит как вызов современной цифровой компьютеризации [2]. Оптика уже давно позволяет делать математические операции, такие как свертка, дифференцирование и интегрирование функций, преобразование Фурье, масштабирование аргументов функции, восстановление функций по спектральной плотности суммы этой функции с δ -функцией. Оптика на несколько порядков ускоряет работу нейронной сети по сравнению с ее цифровой конструкцией [3].

Многие из оптических операций основаны на модуляции света полупрозрачными элементами. Для этого используется эффект дифракции волн. Оптические технологии также позволяют извлекать определенные длины волн с помощью резонатора, что приводит к селективности по длине волны. В результате получается довольно универсальная оптическая топология. Для такой реализации в статье [4] предлагается архитектура кластера кремниевых фотонных ускоренных вычислений, фотонные приемопередатчики и каналы с высокой пропускной способностью. В статье [5] предложено разделение и комбинирование каналов с длиной волны для масштабирования передачи данных. В работах [6, 7] предложены коммутаторы оптических схем для динамической реконфигурации топологии сети. Эксперименты показали целесообразность такой архитектуры. Благодаря предлагаемой архитектуре может быть достигнуто повышение производительности вычислений на несколько десятков процентов по сравнению с традиционной цифровой топологией аналогичного размера.

В работе [8] предлагается интегрированная и когерентная оптическая нейронная сеть, основанная на стационарной архитектуре. Она обеспечивает процесс создания кремниевой фотоники, включающий волноводы, фазовращатели, германиевые фотодиоды и микрокольцевые модуляторы. Архитектуры со стационарным весом вычисляют матрично-векторное произведение [9, 10], что требует обработки данных со сверхнизкой задержкой. Узким местом для этой нейронной сети является обучение на большой обучающей выборке набора. Однако, такие приложения позволяют делать выводы в реальном времени, обучаясь непосредственно на оптических сигналах.

Возможной архитектурой оптических технологических решений может быть голографическая память (ГП). Например, в статье [11] предложена архитектура гибридного голографического коррелятора для обнаружения совпадений изображений с учетом сдвига, масштаба и поворота. Система может состоять из лазера, дефлекторов, преобразователей когерентного сигнала и быстро перезаписываемого голографического накопителя. Технология преобразования Фурье может быть использована в качестве методологической основы для оптических расчетов.

Сайт [12] рекламирует архитектуру оптической нейронной сети для повышения скорости вычислений и энергоэффективности по сравнению с традиционными цифровыми компьютерами. Предлагается модель рекуррентных нейронных сетей, которая сочетает в себе требуемую способность запоминать и способность забывать нерелевантные данные.

Оптические нейронные сети (ОНС), созданные на основе матричного умножения, имеют производственные ограничения. Однако было показано, что оптические инструменты обладают большим потенциалом для создания ОНС с низким энергопотреблением, низкой задержкой, широкой полосой пропускания и высоким уровнем параллелизма. Нелегко масштабировать размер матрицы и нейронных сетей [13]. Текущие результаты показывают, что скорость вычислений и размер матрицы выходят за рамки требуемых целей [14, 15]. Современное оптическое оборудование поддерживает только небольшие матрицы и небольшое количество нейронов.

Отсутствие видимого практического (внедренческого) прогресса внедрения оптических ускорителей вообще и ОНС в частности заслоняют вопрос синтеза специальных фотонных материалов для ГП. Вместе с тем этот вопрос явно требует инновационных решений. Например, к неклассическим подходам к синтезу фотонного материала стоит отнести использование в качестве его основы протеина. Так, в работе [16] представлен основанный на протеине подход к созданию перезаписываемых и перепрограммируемых многофункциональных оптических платформ, которые позволяют осуществлять 2D/3D кодирование и многоканальную визуализацию путем сочетания методов самосборки белков, нанопечатной литографии и 3D-морфинга (компьютерная анимация).

Чтобы преодолеть эти ограничения, перед фотонными вычислениями используются операции дискретизации, выборки, что приводит к потребности повторять в архитектуре ОНС цифровые алгоритмы [17]. Такой подход рано или поздно приводит к тем же ограничениям, с которыми сталкивается разработка цифровых компьютеров

2 Путь к фотонной архитектуре ИИ

С учетом сделанного аналитического обзора стоит рассмотреть три пути к созданию ФИИ:

- реализация алгоритмов с предварительным преобразованием непрерывных (аналоговых) сигналов в цифровую форму,
- обработка аналоговых (непрерывных) данных без их преобразования в цифровую форму,
- обработка аналоговых данных без преобразования непрерывных сигналов в цифровой формат в волновой среде.

Обзор в разделе 2 показал, что первый путь в настоящее время является наиболее популярным и преобладающим подходом при создании оптических версий ИИ. На этом пути уже работают оптические устройства, но у него есть ограничения, аналогичные тем, которые существуют при разработке систем ИИ на базе цифрового компьютера. Эти ограничения охватывают невозможность учета когнитивной семантики [1] и растущие затраты времени и энергии на вычисления, которые сопровождаются потребностью повышением точности через дискретизацию (выбор отсчетов) непрерывных сигналов.

Второй путь позволяет почти мгновенно выполнять операции глубокого машинного обучения за счет замены многошагового процесса настройки весов связей нейронов двухэтапной операцией Фурье-свертки множества обучающих образов. Однако он требует новых подходов к осуществлению оптической свертки большого набора изображений и созданию специального материала для быстро перезаписываемого 3D голографического накопителя. Система обучения аналоговой оптической нейронной сети может быть представлена рис. 1.

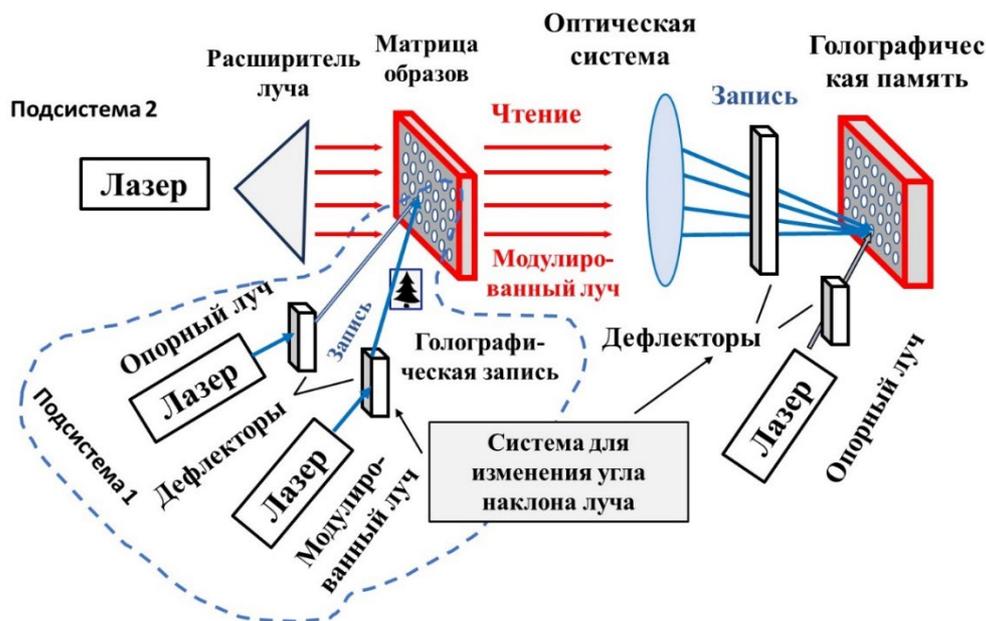


Рис. 1: Архитектура системы обучения фотонной нейронной сети

Система обучения ФИИ на рисунке 1 состоит из двух подсистем. В первой из них (Подсистема 1) формируется оптический обучающий набор изображений. Обучающие изображения записываются голографическими методами на полупрозрачную матрицу изображений для использования в качестве модуляторов лучей. Запись может осуществляться с помощью большого набора опорных лучей, формируемых лазерным расширителем луча, матрицей микролазеров или с помощью группы оптических волноводов. Такое формирование обучающей выборки данных выполняется по мере появления шаблонов для машинного обучения. Система изменения углов регистрации лучей осуществляется с помощью дефлекторов и классических цифровых вычислительных машин.

Подсистема 2 на рисунке 1 играет следующую роль в обучении. После заполнения обучающей выборки набор опорных лучей направляется на эту матрицу, одновременно считывая все записанные изображения. Такая система производит одновременную Фурье-свертку всех записанных изображений и, используя цифровой контроллер и дефлекторы, направляет все модулированные лучи в одну из точек голографической матрицы, которая впоследствии может быть использована в качестве аналоговой оптической нейронной сети. Для записи другой точки этой голографической матрицы требуется формирование другого обучающего набора изображений.

Что касается третьего пути развития архитектуры ФИИ, то стоит вспомнить, что человеческие мысли могут напоминать лазерные солитоны [18]. Это волны в волноводах со стабильной структурой. Они перемещаются в пространстве и пересекаются без искажений. Связь солитонов слабая, и в каждом решении сохраняются замкнутые энергетические линии. Фотонный ИИ, по-видимому, может быть построен с использованием лазерных солитонов.

Существует два типа солитонов: консервативный и диссипативный [19]. Консервативный солитон существует со слабой диссипацией, что обеспечивает длительный срок его существования. Диссипативный солитон возникает из-за потока энергии, сбалансированного определенным образом, за счет чего возникают стабильные структуры в модулированной нелинейной среде. Диссипативные солитоны могут быть движущимися, вращающимися, статичными, периодически или хаотично изменяющимися, одиночными и сгруппированными, одномерными, двумерными и трехмерными. Их портреты должны быть связаны с символами.

Солитоны ведут себя подобно квантовым частицам: существует дискретный набор их состояний; они возбуждаются пороговым образом—для появления солитона необходимо выделение энергии. Солитоны могут вести себя как в фазе, так и в противофазе. Некоторые асимметричные структуры могут быть построены с использованием множества идентичных диссипативных солитонов. Параметры лазера для генерации диссипативных солитонов

выбираются таким образом, чтобы обеспечить превышение коэффициента усиления при низкой интенсивности излучения. Если при определенном уровне интенсивности рост солитонов увеличивается быстрее, чем поглощение, возможно их стабильное поддержание. Фактическая ширина солитонов в полупроводниковых резонаторах составляет около десятка микрон. Режим генерации может быть установлен в центральной части апертуры. Дифракция размывает переход между модами, и яркое пятно на темном фоне будет представлять собой простейшее лазерное диссипативное решение

В системе ФИИ каждому символу-солитону должна быть сопоставлена его семантическая интерпретация в голографическом накопителе в виде Фурье-образов, которые могут быть оптическим отображением внешнего проявления человеком эмоций, объектов, текстов, изображений, звуков, голоса, фильмов, математических формул, химических соединений и т.д.

3 Синтез фотонного материала

Изображения в ГП системы ФИИ могут быть записаны как сами по себе, так и в формате Фурье-свертки. Для первого требуется больше физического пространства, а для второго – больший угол обзора и меньше места для записи. Конечное число изображений должно быть быстро записываться и перезаписываться заново лазерными лучами в одной точке 3D голографического накопителя.

Изучение проблем, связанных с созданием необходимого фотонного материала, показывает, что он должен соответствовать следующим требованиям:

- размер записанных изображений должен определяться диаметром лазерного пятна, например, порядка порядка 0.1 мм;
- новое изображение должно быть записано путем изменения наклона опорного и объектного (модулированного) лучей;
- один блок перезаписываемого 3D накопителя должен позволять хранить в матрице множество изображений;
- система дефлекторов, подключенная к цифровому суперкомпьютеру, должна позволять синхронно менять направление опорного и объектного лучей.

Отсутствие быстро перезаписываемого накопителя является основной проблемой при создании продвинутого ФИИ. Объектный и опорный лучи создают запись в фотонном материале для 3D перезаписываемого голографического накопителя. Фотон не имеет массы; он стабилен, но записывающая среда нестабильна относительно фотона. Для записи могут использоваться различные поля и волны: радио, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, обычный свет, рентгеновское и гамма-излучение.

Необходимый фотонный материал для записи состоит из элементарных частиц, поэтому фундаментальный уровень квантовой электродинамики должен стать физической основой для синтеза фотонного материала на атомарном уровне. Необходимый материал должен обеспечить высокую стабильность при энергетическом потенциале, превышающем потенциал вакуумной среды, что будет соизмеримо с возможностью полного потенциала элементарных частиц (квантовой системы) в малом объеме.

Как известно, уравнение Шредингера используется для описания состояния квантовой системы (метод первых принципов). Оно обеспечивает предсказание ее поведения достаточно точно, однако его решение требует зачастую недопустимо большого времени. Решение этого уравнения сохраняет стабильность в соответствии с исходными данными. Однако эта стабильность мгновенно исчезает, если система подвергается внешнему воздействию, например, фотонному. Волновая функция, которая дает полное описание квантовой системы в терминах амплитуд вероятности, характеризуется необратимостью и неконтролируемым взаимодействием частиц.

В стабильных системах поведение синтезируемого материала можно описать как эволюцию набора вероятностей в фазовом пространстве. Для нестабильных систем в течение длительного времени надежность описаний сомнительна. В дополнение к фазовой вероятности амплитудная вероятность отображается в виде комплексных чисел, квадрат модуля которых определяет вероятность состояния.

Основой для создания требуемого голографического материала является молекула, объединяющая несколько атомов, соединенных в геометрическом порядке. Молекула представляет собой образец стабильной физической структуры – ее атомы соединены по определенным

правилам, которые зависят от свойств атомов. Количество связей зависит от количества электронов, которые атом делит с другими атомами. Эти свойства подчиняются таким правилам, как то, что атом углерода является наиболее «дружественным» из всех элементов; у него четыре связи, у азота — три, у хлора — одна и у водорода — одна.

Значения параметров межатомных взаимодействий могут быть определены исходя из спектральных, термодинамических и структурных характеристик молекул. Химические процессы, такие как хаотическая диффузия вещества, связанная с воздействием внешних сил (окружающей среды, гравитационных и электромагнитных полей), проявляются в поведении молекул.

Существуют способы декомпозиции сложной системы молекулярной динамики для расчетов, особенно на суперкомпьютерах с параллельным программированием. Два наиболее популярных метода декомпозиции — молекулярный и пространственный. Третий метод, не столь распространенный, рассматривает декомпозицию сил. Технологии ИИ, основанные на генетических алгоритмах и физико-химическом подходе, такие как графен, или биофизические, такие как протеин, могут быть также использованы для создания необходимых фотонных материалов.

Можно создавать необходимые фотонные материалы, используя методы ИИ и молекулярной динамики — для прогнозирования кристаллической структуры, идентификации метастабильных фаз с оценкой локальных минимумов [20]. Исходными данными являются характеристики различных типов квантовых частиц и молекул. Прогнозирование структуры материала позволяет обрабатывать различные материалы (фотонные кристаллы, кристаллические поверхности и т. д.) с учетом их особенностей. Такие наборы данных, как база данных о структуре неорганических кристаллов, могут помочь в обучении моделей ИИ.

Теория функционала плотности (DFT) и суперкомпьютерные технологии с параллельными алгоритмами могут помочь оценить различные структуры, используя определенные математические допущения и аппроксимации в области молекулярной динамики. Это уменьшает точность прогноза, но существенно сокращает время вычислений. Ведь необходимый материал может содержать сотни атомов в ячейке, структуру и характеристики которых даже современные суперкомпьютеры не могут рассчитать и предсказать на основе метода первых принципов. Для сокращения вычислительных процедур используются межатомные силовые поля на высоком уровне абстракции, для чего и используется подход DFT.

В работе [21] показано, что фотополимеры со спиновым покрытием на стеклянных пластинах обеспечивают объемные голографические пропускающие решетки с дифракционной эффективностью 80%, которые могут сохраняться в фотополимерах толщиной 100 мкм. В работе [22] изучается эффект дифракции при квазирезонансном лазерном излучении. Также использовались режимы дифракции Рамана-Натха и Брэгга [23]. В первом случае рассматривается взаимодействие атома со светом, когда процесс рассеяния создает различные импульсные состояния атомов. Для последнего были предусмотрены длительное время взаимодействия и один порядок дифракции.

В работе [24] описан голографический диск на базе гибридного оптоэлектронного коррелятора [25]. Эта архитектура позволяет обнаруживать совпадения во время корреляции, инвариантной к сдвигу, масштабированию и вращению [26]. Этот диск содержит более тысячи сохраненных изображений. Диск заменил пространственный модулятор освещенности. Существует система, которая обеспечивает многократную запись [27, 28]. Для создания материала этой системы был использован фенантренихин, легированный светочувствительным красителем поли (метилметакрилатом).

Возможно использование графенового подхода. На наноразмере вещества — от 0 до 100 нм — частицы могут взаимодействовать, самоорганизоваться и саморазвиваться. Графит и трехмерные углеродные аллотропы демонстрируют слабую Ван-дер-Ваальсову межслойную π -связь, соединяющую слои вещества на расстоянии 0.335 нм. Это связь, при которой атомы почти соприкасаются своими внешними электронными облаками. Примером прочной связи является двумерная модификация углерода, образующая так называемый графен. Слой графена представляет собой гексагональную решетку с ребрами 0.142 нм, в узлах которой расположены атомы углерода. В этом случае каждый атом соединен с тремя соседними атомами ковалентными химическими σ -связями.

Исследование свойств графена проводится с использованием методов квантовой электродинамики. Квазичастицы, возникающие в результате коллективного взаимодействия электронов в двумерном кристалле, ведут себя как безмассовые электроны, хотя и движутся со скоростью Ферми. Уравнение Дирака описывает поведение таких частиц, а также описывает эволюцию квантового поля с течением времени, в котором присутствуют как частицы, так и античастицы. Пары частиц рождаются в сильных полях.

Структура связывания, электронные свойства и выход наноструктур MoS₂, уложенных на графеновую подложку, были изучены с помощью DFT-расчетов [29]. Результаты показали критическую роль ребер в регулировании прочности связывания и межфазного взаимодействия электронов. Метод пространственной выборки был применен для оценки возможности экспериментальной реализации плоских углеродных аллотропов [30] путем измерения реализуемости путем оценки частоты их появления.

Явления, которые выходят за рамки классической физики, наблюдаемые в графене, также интерпретируются с использованием методов квантовой электродинамики и физики конденсированных сред. Плазменные колебания (плазмоны Дирака) также возникают в графене. Собственная частота колебаний в графене не зависит от ширины нанопленки; изменяя ее, можно изменять частоту колебаний и настраивать их на резонанс с частотой излучения. В этом случае концентрация носителей тока определяет прочность связи между световой волной и плазмонами.

На основе графена уже разрабатываются компактные электрооптические устройства, например, высокоточные кольцевые резонаторы или быстродействующие фазовые модуляторы, в том числе фазированные решетки, нейронные сети и системы оптической связи. Современные фотонные материалы для фазовых модуляторов характеризуются низким изменением показателя преломления. Изменение индекса вызывает сдвиг резонансной длины волны отклика.

Эти подходы были использованы, например, для создания стабильных сверхтвердых материалов, сверхпроводников, органических материалов, не подлежащих перезаписи и даже ледяных кристаллических материалов [31]. Однако они не охватывают создание фотонных материалов для быстро перезаписываемых оптических накопителей со многими стабильными состояниями. Для решения задач синтеза фотонных кристаллов с требуемыми параметрами необходимо использовать методы компьютерного прогнозирования.

Таким образом, остается нерешенной следующая проблема: прогнозирование материала пока нереалистично классическими методами из-за практически бесконечного числа кристаллических структур. Статистика интеллектуального анализа данных показывает, что существующие базы данных различных структур вещества неполны, а метод авторегрессии не позволяет обнаружить принципиально новые кристаллические структуры.

Перечисленные подходы к синтезу материалов использовались, например, для создания сверхтвердых материалов, сверхпроводников и органических материалов. Как можно заметить, эти задачи не охватывают проблемы создания фотонных материалов для перезаписываемого голографического накопителя со многими стабильными состояниями. Однако для синтеза необходимого фотонного материала в любом случае необходимо использовать методы прогнозирования кристаллической структуры с помощью ИИ.

Синтез фотонного материала – это процесс решения обратной задачи, учитывающий требуемые функциональные требования и ограничения. На вход системы решения такой задачи необходимо ввести соответствующий набор данных, и тогда результатом должна быть структура требуемого материала. Этот подход аналогичен построению стратегий в различных областях, когда необходимо сформулировать цель и проложить путь к ней [32]. Поскольку несколько требуемых значений параметров желаемого материала могут носить концептуальный характер, задача может быть решена с помощью генетического алгоритма. Генетический алгоритм [33] включает в себя следующие этапы: построение шаблона решения, последовательные и повторяющиеся операции (начальная популяция, размножение, кроссинговер и мутация), получение структуры-кандидата к требуемому фотонному материалу и подход к его разработке.

4 Возможность сжатия времени мозгового штурма

Наиболее сложным процессом принятия групповых решений является сетевой Электронный мозговой штурм, когда эксперты распределены по разным местам, удаленным друг от друга [4]. Он может быть дивергентным или конвергентным. Первый удобен для генерации идей, второй – для

принятия согласованного решения. В статье [27] показано, что специальные семантические интерпретации текстовых сообщений, генерируемых во время мозгового штурма, и использование виртуальных инструментов совместной работы [28] помогают ускорить этот процесс. Последний из указанных инструментов обеспечивает в режиме реального времени демонстрацию на экране количественных характеристики выступлений каждого участника, таких как время разговора, громкость, частоты голоса и т.д.

Чтобы сократить время отдельного мозгового штурма, проводимого в процессе стратегического совещания, авторами настоящей работы сделана попытка привлечь во внимание возможности методов распознавания эмоций. Для этого архитектура системы поддержки решений должна быть дополнена подсистемой распознавания эмоциональных характеристик текстов, как показано на рис. 1.

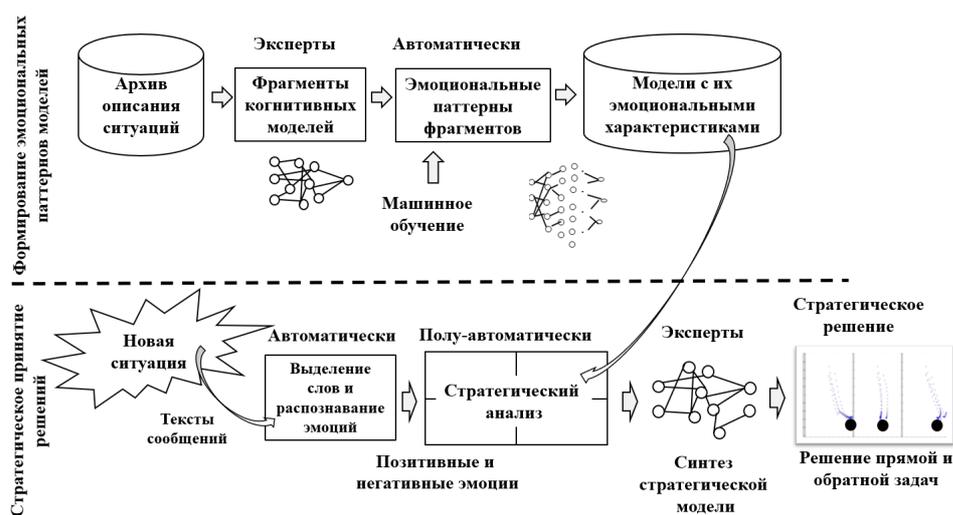


Рис. 1. Подсистема распознавания эмоциональных характеристик текстов

Подсистема состоит из двух основных частей: обучения и поддержки принятия стратегических решений. Первая часть посвящена подготовке ключевых слов и фрагментов моделей, которые оснащены обученными искусственными нейронными сетями для распознавания эмоций. Во время обучения учитываются различные индивидуальные особенности участников команды: навыки, возраст, место рождения, культурные традиции и т.д. Исходные ключевые слова и фрагменты моделей могут быть созданы экспертами, а результат построения моделей может быть проверен путем сопоставления их с соответствующими большими данными (см., например, [29]). В результате каждый фрагмент модели снабжается эмоциональным паттерном с использованием алгоритмов машинного обучения.

Вторая часть подсистемы служит для поддержки планирования полуавтоматическим созданием предложений по включению некоторых важных кандидатов ключевых слов или фрагментов моделей в результат стратегического анализа. Эта часть подсистемы анализирует сообщения участников и обеспечивает автоматическое распознавание их активности в высказывании своего мнения и написании комментариев, а также – эмоциональных значений генерируемых участниками текстов. Эти значения со связями с участниками приписываются высказанным словам таким динамичным и синхронизированным образом, что участники могут наблюдать их на коллективном экране или экранах компьютеров участников. Как показывают эксперименты и практическая апробация технологии, такая демонстрация значительно ускоряет процесс достижения согласия участников относительно решения обсуждаемых вопросов как показывает апробация [28], в том числе сделанная авторами настоящей работы.

Заключение

Оптические инструменты уже позволяют создавать небольшие и энергоэффективные цифровые системы с искусственными нейронными сетями. Они помогают выполнять математические операции, такие как свертка, дифференцирование и интегрирование функций, масштабирование аргументов функции, восстановление функций по спектральной плотности суммы этой функции.

Однако оптические алгоритмы обычно повторяют алгоритмы цифровых компьютеров, которые характеризуются значительным временем и высокой энергоемкостью вычислений. Цифровой подход также не охватывает аналоговые оптические процессы, необходимые для учета неформализуемой когнитивной семантики моделей ИИ.

В настоящей работе показано, что снятие таких ограничений можно осуществить за счет замены длительного обучения многослойной нейронной сети одноразовой оптической Фурье-сверткой множества обучающих образов.

Основным препятствием на пути создания полностью аналогового и оптического ИИ является создание необходимых фотонных материалов для быстро перезаписываемой голографической памяти со многими стабильными состояниями.

В настоящее время можно сделать оценку уровня технологической готовности (международная шкала TRL) ФИИ порядка 3-4, что говорит о потребности государственной поддержки пока еще коммерчески не освоенного изделия.

Детальное описание предложенного в настоящей статье подхода к созданию Фотонного ИИ приведено в книге автора [34].

Литература

1. Raikov A. Cognitive semantics of artificial intelligence: a new perspective, Springer Singapore, Computational Intelligence XVII, 2021, 128 p., doi: 10.1007/978-981-33-6750-0.
2. Zhu S., Yu T., Xu T., et al. Intelligent Computing: The Latest Advances, Challenges, and Future, *Intell. Comput.* 2023, 3:Article 0006, doi. 10.34133/icomputing.0006.
3. Chen Y., Nazhamaiti M., Xu H., et al. All-analog photoelectronic chip for high-speed vision tasks, *Nature* 623, 48–57. 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06558-8
4. Wu Z., et al. Peta-Scale Embedded Photonics Architecture for Distributed Deep Learning Applications, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, pp. 1-13, doi: 10.1109/JLT.2023.3276588.
5. Kim B.Y., Okawachi Y., Jang J.K., et al. Turn-key, high-efficiency Kerr comb source, *Optics letters*, 44(18), 2019, pp. 4475–4478 doi: 10.48550/arXiv.1907.07164.
6. Wang W., Khazraee M., Zhong Z., et al. Topoopt: Co-optimizing network topology and parallelization strategy for distributed training jobs, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2202.00433.
7. Lu Y., Gu H., Yu X., Li P. X-nest: A scalable, flexible, and high-performance network architecture for distributed machine learning. *Journal of Lightwave Technology*, 39(13), 2021, pp. 4247–4254, doi:10.1109/JLT.2021.3073277.
8. Bandyopadhyay S., et al. Single-chip photonic deep neural network with accelerated training, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2208.01623.
9. Gyger S., Zichi J., Schweickert L., et al. Reconfigurable photonics with on-chip single-photon detectors, *Nat Commun* 12, No 1408, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-21624-3.
10. Novack A., et al. Germanium photodetector with 60 GHz bandwidth using inductive gain peaking, *Optics Express* 21, 28387, 2013, doi: 10.1364/OE.21.028387.
11. Gamboa J., et al. Ultrafast image retrieval from a holographic memory disc for high-speed operation of a shift, scale, and rotation invariant target recognition system, 2022, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2211/2211.03881.pdf> (last access, 30.09.2023)
12. Lightelligence, <https://www.lightelligence.ai/> (last access, 15.04.2024)
13. Sainath T.N., Kingsbury B., Saon G., et al. Deep convolutional neural networks for large-scale speech tasks, *Neural networks*, 64, 2015, pp. 39-48.
14. Wu C., Yu H., Lee S., et al. Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network, *Nat. Commun.* 12(1), 2021, pp. 1-8.
15. Ashtiani F., Geers A. J., Aflatouni F., et al. An on-chip photonic deep neural network for image classification, *Nature* 606, 2022, pp. 501–506, doi: 10.1038/s41586-022-04714-0.
16. Chang J., Wang T., Fu Y., Chen P., Tao G., Wang Y., Lu Y. All-protein-based rewritable and reprogrammable multifunctional optical imaging platforms via multi-strategy imprinting and multimode 3D morphing, *Matter*. 7(4):1591-1611, 2024. doi:10.1016/j.matt.2024.01.030
17. Xu X., et al. Photonic Perceptron Based on a Kerr Microcomb for High-Speed, Scalable, Optical Neural Networks, *Laser Photonics Rev*, 14(10), 2020, 2000070, doi: 10.1002/lpor.202000070.

18. Veretenov N., Fedorov S., and Rosanov Ni. Dissipative three-dimensional topological optical solitons with crossed localization of polarization components. *Optics Letters* Vol. 49, Issue 7, pp. 1761-1764 (2024) doi: 10.1364/OL.520839
19. Rosanov N.N. *Spatial Hysteresis and Optical Patterns*, Springer Berlin, Heidelberg, 2013, doi: 10.1007/978-3-662-04792-7.
20. Oganov A.R., Pickard C.J., Zhu Q., et al. Structure prediction drives materials discovery, *Nat Rev Mater* 4, 2019, pp. 331-348, doi: 10.1038/s41578-019-0101-8.
21. Vayalamkuzhi P., Bhargab D., Joby J., et al. High-efficiency panchromatic photopolymer recording material for holographic data storage systems, *Optical Materials*, 52, 2016, pp. 212-218, doi: 10.1016/j.optmat.2015.12.042.
22. Altshuler S., Frantz L.M., Braunstein R. Reflection of atoms from standing light waves, *Phys. Rev. Lett.* 17, 1966, pp. 231-232, doi: 10.1103/PhysRevLett.17.231.
23. B'eguín A., Rodzinka T., Vigu'e J., Allard B., Gauguet A. Characterization of an atom interferometer in the quasi-Bragg regime, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2112.03086.
24. Gamboa J., et al. Ultrafast image retrieval from a holographic memory disc for high-speed operation of a shift, scale, and rotation invariant target recognition system, *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2211.03881.
25. Monjur M.S., Tseng S., Fouda M.F., Shahriar S.M. Experimental demonstration of the hybrid optoelectronic correlator for target recognition, *Appl. Opt.* 56, 2017, pp. 2754-2759.
26. Gamboa J., Fouda M., Shahriar S.M. Demonstration of shift, scale, and rotation invariant target recognition using the hybrid opto-electronic correlator, *Opt Express* 27, 2019, p. 16507.
27. Wang J., Luo S. Volume holographic storage using sync-angular multiplexing by rotating material in thick photopolymer, *Opt Laser Technol* 153, 2022, p. 108295.
28. Alcaraz P.E., Nero G., Blanche P.-A. Bandwidth optimization for the Advanced Volume Holographic Filter, *Opt Express* 30(1), 2022, pp. 576-587, doi: 10.1364/OE.444101.
29. Guo M., Yang Y., Leng Y., et al. Edge dominated electronic properties of MoS₂/ graphene hybrid 2D materials: edge state, electron coupling and work function, *J. Mater. Chem. C*, Vol. 5, pp. 4845-4851 (2017). doi: 10.1039/c7tc00816c
30. Yang X., Wang J., Zheng J., Guo M., Zhang R.-Z. Screening for Planar Carbon Allotropes Using Structure Space Sampling, *J. Phys. Chem. C* 2020, 124, 6379-6384 doi: 10.1021/acs.jpcc.9b10778
31. Zhang H., Huang H., Gao L., Fu Q., Cheng S., Bu Y. Magnetic Dioxide Clathrate Hydrates: A Type of Promising Building Blocks for Icy Crystalline Materials, *J. Phys. Chem.*, 124(19):10669-10678, 2020, doi:10.1021/acs.jpcc.0c01952.
32. Raikov, A. Convergent Fuzzy Cognitive Modelling of Regional Youth Policy Strategy, In: Yang, X.S., Sherratt, R.S., Dey, N., Joshi, A. (eds) *Proceedings of Eighth International Congress on Information and Communication Technology. ICICT 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, 694, Springer, Singapore, 2023, pp. 911-921, doi: 10.1007/978-981-99-3091-3_74.
33. Raikov A.N., Panfilov S.A. Convergent decision support system with genetic algorithms and cognitive simulation, *Proc. of the IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM'2013*, Saint Petersburg, Russia, June 2013, pp. 1142-1147, doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00404
34. Raikov A. *Photonic Artificial Intelligence*. Springer Singapore, Series: Springer Briefs in Applied Sciences and Technology XVII, 2024, 110 p. doi: 10.1007/978-981-97-1291-5

ALL-ANALOGUE PHOTONIC ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Raikov, Alexander Nikolaevich

Doctor of technical sciences, professor

*Lomonosov Moscow State University, National Center for Digital Economy, head of department for intellectual technologies
Moscow, Russia Federation*

anraikov@mail.ru

Abstract

The article offers a methodological justification for developing a fully analogue photonic artificial intelligence (PAI) system based on optical technologies for processing continuous (analogue) signals without converting them into digital form. This makes it possible to overcome the limitations associated with digital data processing, namely the energy intensity and time-consuming nature of deep neural network training, the reduction of the natural signal spectrum, and the diminution of the weight of cognitive semantics of artificial intelligence (AI) models. The photonic approach makes it possible to reduce machine learning time and energy consumption significantly. It also helps to consider the non-formalizable aspects of the cognitive semantics of AI models to capture better human feelings, thoughts, and transcendent states of consciousness that digital computers cannot fully capture. Such advantages are achievable by replacing the multilayer structure of a neural network with a single matrix layer of Fourier convolution of a set of training images recorded on a holographic storage device. However, new problems arise on the photonic path of AI development, including synthesising unique photonic materials for rewritable three-dimensional holographic memory and controlling optical processes using digital computers. The article proposes an algorithm for the synthesis of photonic materials utilising an approach to solving inverse problems implemented using a genetic algorithm.

Keywords

digital control, photonic artificial intelligence, rewritable holographic memory, synthesis of photonic materials

References

1. Raikov A. Cognitive semantics of artificial intelligence: a new perspective, Springer Singapore, Computational Intelligence XVII, 2021, 128 p., doi: 10.1007/978-981-33-6750-0.
2. Zhu S., Yu T., Xu T., et al. Intelligent Computing: The Latest Advances, Challenges, and Future, *Intell. Comput.* 2023, 3:Article 0006, doi. 10.34133/icomputing.0006.
3. Chen Y., Nazhamaiti M., Xu H., et al. All-analog photoelectronic chip for high-speed vision tasks, *Nature* 623, 48–57. 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06558-8
4. Wu Z., et al. Peta-Scale Embedded Photonics Architecture for Distributed Deep Learning Applications, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, pp. 1-13, doi: 10.1109/JLT.2023.3276588.
5. Kim B.Y., Okawachi Y., Jang J.K., et al. Turn-key, high-efficiency Kerr comb source, *Optics letters*, 44(18), 2019, pp. 4475–4478 doi: 10.48550/arXiv.1907.07164.
6. Wang W., Khazraee M., Zhong Z., et al. Topoopt: Co-optimizing network topology and parallelization strategy for distributed training jobs, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2202.00433.
7. Lu Y., Gu H., Yu X., Li P. X-nest: A scalable, flexible, and high-performance network architecture for distributed machine learning. *Journal of Lightwave Technology*, 39(13), 2021, pp. 4247–4254, doi:10.1109/JLT.2021.3073277.
8. Bandyopadhyay S., et al. Single-chip photonic deep neural network with accelerated training, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2208.01623.
9. Gyger S., Zichi J., Schweickert L., et al. Reconfigurable photonics with on-chip single-photon detectors, *Nat Commun* 12, No 1408, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-21624-3.
10. Novack A., et al. Germanium photodetector with 60 GHz bandwidth using inductive gain peaking, *Optics Express* 21, 28387, 2013, doi: 10.1364/OE.21.028387.
11. Gamboa J., et al. Ultrafast image retrieval from a holographic memory disc for high-speed operation of a shift, scale, and rotation invariant target recognition system, 2022, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2211/2211.03881.pdf> (last access, 30.09.2023)
12. Lightelligence, <https://www.lightelligence.ai/> (last access, 15.04.2024)

13. Sainath T.N., Kingsbury B., Saon G., et al. Deep convolutional neural networks for large-scale speech tasks," *Neural networks*, 64, 2015, pp. 39-48.
14. Wu C., Yu H., Lee S., et al. Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network, *Nat. Commun.* 12(1), 2021, pp. 1-8.
15. Ashtiani F., Geers A. J., Aflatouni F., et al. An on-chip photonic deep neural network for image classification, *Nature* 606, 2022, pp. 501-506, doi: 10.1038/s41586-022-04714-0.
16. Chang J., Wang T., Fu Y., Chen P., Tao G., Wang Y., Lu Y. All-protein-based rewritable and reprogrammable multifunctional optical imaging platforms via multi-strategy imprinting and multimode 3D morphing, *Matter*. 7(4):1591-1611, 2024. doi:10.1016/j.matt.2024.01.030
17. Xu X., et al. Photonic Perceptron Based on a Kerr Microcomb for High-Speed, Scalable, Optical Neural Networks, *Laser Photonics Rev*, 14(10), 2020, 2000070, doi: 10.1002/lpor.202000070.
18. Veretenov N., Fedorov S., and Rosanov Ni. Dissipative three-dimensional topological optical solitons with crossed localization of polarization components. *Optics Letters* Vol. 49, Issue 7, pp. 1761-1764 (2024) doi: 10.1364/OL.520839
19. Rosanov N.N. *Spatial Hysteresis and Optical Patterns*, Springer Berlin, Heidelberg, 2013, doi: 10.1007/978-3-662-04792-7.
20. Oganov A.R., Pickard C.J., Zhu Q., et al. Structure prediction drives materials discovery, *Nat Rev Mater* 4, 2019, pp. 331-348, doi: 10.1038/s41578-019-0101-8.
21. Vayalamkuzhi P., Bhargab D., Joby J., et al. High-efficiency panchromatic photopolymer recording material for holographic data storage systems, *Optical Materials*, 52, 2016, pp. 212-218, doi: 10.1016/j.optmat.2015.12.042.
22. Altshuler S., Frantz L.M., Braunstein R. Reflection of atoms from standing light waves, *Phys. Rev. Lett.* 17, 1966, pp. 231-232, doi: 10.1103/PhysRevLett.17.231.
23. B'eguine A., Rodzinka T., Vigu'e J., Allard B., Gauguier A. Characterization of an atom interferometer in the quasi-Bragg regime, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2112.03086.
24. Gamboa J., et al. Ultrafast image retrieval from a holographic memory disc for high-speed operation of a shift, scale, and rotation invariant target recognition system, *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2211.03881.
25. Monjur M.S., Tseng S., Fouda M.F., Shahriar S.M. Experimental demonstration of the hybrid optoelectronic correlator for target recognition, *Appl. Opt.* 56, 2017, pp. 2754-2759.
26. Gamboa J., Fouda M., Shahriar S.M. Demonstration of shift, scale, and rotation invariant target recognition using the hybrid opto-electronic correlator, *Opt Express* 27, 2019, p. 16507.
27. Wang J., Luo S. Volume holographic storage using sync-angular multiplexing by rotating material in thick photopolymer, *Opt Laser Technol* 153, 2022, p. 108295.
28. Alcaraz P.E., Nero G., Blanche P.-A. Bandwidth optimization for the Advanced Volume Holographic Filter, *Opt Express* 30(1), 2022, pp. 576-587, doi: 10.1364/OE.444101.
29. Guo M., Yang Y., Leng Y., et al. Edge dominated electronic properties of MoS₂/ graphene hybrid 2D materials: edge state, electron coupling and work function, *J. Mater. Chem. C*, Vol. 5, pp. 4845-4851 (2017). doi: 10.1039/c7tc00816c
30. Yang X., Wang J., Zheng J., Guo M., Zhang R.-Z. Screening for Planar Carbon Allotropes Using Structure Space Sampling, *J. Phys. Chem. C* 2020, 124, 6379-6384 doi: 10.1021/acs.jpcc.9b10778
31. Zhang H., Huang H., Gao L., Fu Q., Cheng S., Bu Y. Magnetic Dioxide Clathrate Hydrates: A Type of Promising Building Blocks for Icy Crystalline Materials, *J. Phys. Chem.*, 124(19):10669-10678, 2020, doi:10.1021/acs.jpcc.0c01952.
32. Raikov, A. Convergent Fuzzy Cognitive Modelling of Regional Youth Policy Strategy, In: Yang, X.S., Sherratt, R.S., Dey, N., Joshi, A. (eds) *Proceedings of Eighth International Congress on Information and Communication Technology. ICICT 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, 694, Springer, Singapore, 2023, pp. 911-921, doi: 10.1007/978-981-99-3091-3_74.
33. Raikov A.N., Panfilov S.A. Convergent decision support system with genetic algorithms and cognitive simulation, *Proc. of the IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM'2013*, Saint Petersburg, Russia, June 2013, pp. 1142-1147, doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00404
34. Raikov A. *Photonic Artificial Intelligence*. Springer Singapore, Series: Springer Briefs in Applied Sciences and Technology XVII, 2024, 110 p. doi: 10.1007/978-981-97-1291-5