

Моделирование квантовой логики при линейной записи наложенных голограмм Фурье: феномен «Линда»

А.В.Павлов

Показан классический механизм квантово-подобного когнитивного феномена «Линда», работающий при линейной записи наложенных голограмм Фурье в 4f-схеме с обращением волновых фронтов. Приведены результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: наложенные голограммы, голография Фурье, голографическая ассоциативная память, квантовая логика, квантово-подобные феномены, корреляция.

В настоящее время активно обсуждается вопрос проявления квантовых свойств классическими объектами, в частности системами разной природы (оптическими, когнитивными, социальными и др.), характеризующимися сильной классической когерентностью [1–5]. Для объяснения возможного механизма одного из признанных в таких системах квантово-подобных феноменов – «Линда» [6], в работах [7, 8] предложено применение квантовой логики. Ключевую роль в этом формализме играет некоммутативность операторов, однако собственно квантовой природы, а также квантовых явлений и механизмов, порождающих логику, в [7, 8] не показано.

В работе [9] рассмотрен возможный классический механизм феномена «Линда» без обращения к квантовому формализму [7, 8], основанный на нелинейности экспозиционных характеристик (ЭХ) голографических регистрирующих сред (ГРС) при записи наложенных голограмм (НГ) Фурье в 4f-схеме с обращением волнового фронта – голографической автоассоциативной памяти (ГААП) [10, 11]. В настоящей работе показан еще один классический механизм феномена, работающий при линейных ЭХ ГРС, т. е. без требования на некоммутативность.

Суть феномена «Линда» [6] состоит в следующем. Респондентам рассказывали о вымышленной персоне по имени Линда и предлагали выбрать из списка ответов – кто есть Линда: «Феминистка» (F), «Кассир в банке» (T) или «Феминистка, работающая кассиром в банке» ($F&T$)? Рассказ был построен так, чтобы вызвать явные ассоциации с ответом «Феминистка» и никаких – с «Кассир». По результатам статистической обработки ответов их вероятности выстроились в порядке $p(F) > p(F&T) > p(T)$, противоречащем классической логике и теории вероятности: вероятность конъюнкции независимых событий не может превышать вероятность каждого.

Для реализации этого эксперимента использовалась схема ГААП (рис.1). Мультиплексная голограмма как

сумма двух НГ, записанная в линейном диапазоне ЭХ ГРС, хранит эталоны F и T :

$$H_M(v) = [R_F \exp(j2\pi v x_F) + F(F(x))] [R_F \exp(j2\pi v x_F) + F(F(x))]^* + [R_T \exp(j2\pi v x_T) + F(T(x))] \times [R_T \exp(j2\pi v x_T) + F(T(x))]^*, \quad (1)$$

где v – пространственная частота; j – мнимая единица; R_F и R_T – амплитуды волновых фронтов от точечных источников $\delta_F(x_F)$ и $\delta_T(x_T)$, смещенных на x_F и x_T от главной оптической оси; F и $*$ – символы преобразования Фурье и комплексного сопряжения.

При предъявлении во входной плоскости образа L мультиплексная голограмма (1) в плоскости П2 формирует распределения амплитуд, описываемые функциями взаимной корреляции:

$$E = E_F(\Delta) + E_T(\Delta) = [L(x) \otimes F(x)] + [L(x) \otimes T(x)], \quad (2)$$

где \otimes – символ операции корреляции.

Устройство обращения волнового фронта (ОВФ) выделяет из поля (2) только глобальные максимумы с амплитудами

$$E_F(\Delta)|_{\Delta=\delta_F} = k_{LF} [F(x) \otimes F(x)]|_{\Delta=\delta_F} = k_{LF} \mu_F^2 S_F = k_{LF} P_F, \\ E_T(\Delta)|_{\Delta=\delta_T} = k_{LT} [T(x) \otimes T(x)]|_{\Delta=\delta_T} = k_{LT} \mu_T^2 S_T = k_{LT} P_T, \quad (3)$$

где k – коэффициенты корреляции; μ^2 – начальные моменты второго порядка; S – площади; P – мощности соответствующих образов. При обращении волновых фронтов в плоскости П2 голограмма (1) в обратном ходе лучей в плоскости П1 восстанавливает эталонные образы:

$$F^R(x) = k_{LF} \mu_F^2 S_F F(x) = k_{LF} P_F F(x), \\ T^R(x) = k_{LT} \mu_T^2 S_T T(x) = k_{LT} P_T T(x). \quad (4)$$

Отношение мощностей зарегистрированных восстановленных образов с учетом нелинейной в общем случае зависимости чувствительности сенсора от мощности $S(P)$ имеет вид

А.В.Павлов. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: pavlov@phoi.ifmo.ru

Поступила в редакцию 22 декабря 2018 г., после доработки – 19 февраля 2019 г.

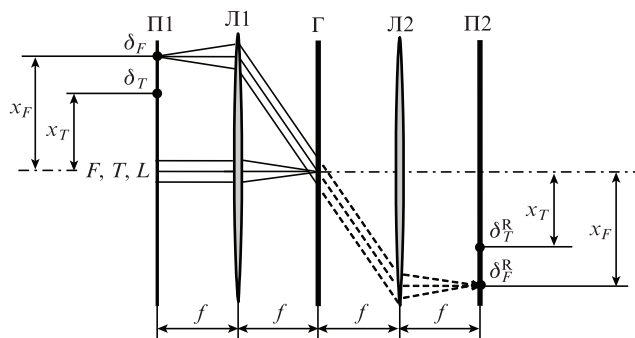


Рис.1. ГАОП на основе 4f-схемы голографии Фурье: F, T – эталонные образы при записи наложенных голограмм; L – входной образ; δ_F и δ_T – опорные точечные источники; Л1, Л2 – фурье-преобразующие линзы; Π1, Γ и Π2 – плоскости образов, голограмм и корреляционной соответственности (в последнюю помещается устройство обращения волнового фронта, на схеме не показано).

$$V_{FT} = \frac{S\langle F^R(x), F^R(x) \rangle}{S\langle T^R(x), T^R(x) \rangle} = \frac{S\langle [k_{LF} P_F F(x)], [k_{LF} P_F F(x)] \rangle}{S\langle [k_{LT} P_T T(x)], [k_{LT} P_T T(x)] \rangle}, \quad (5)$$

где угловые скобки – символ скалярного произведения.

Рассмотрим (4) и (5) в терминах эксперимента [6]. Вероятность в квантовой физике определяется как скалярное произведение волновых функций, т.е. как квадратичная норма, а математически эквивалентна интенсивности (мощности P). Восстановленное ААП поле зависит от свойств и входного образа «Линда»: коэффициентов корреляции с эталонами и их мощностей. Коэффициенты корреляции зависят от сугубо индивидуальных характеристик внутренних репрезентаций рассуждающим агентом и образа «Линда», задаваемого рассказом [6], и эталонов. Для многих сенсоров, включая нейроны, характерен сигмоидальный вид $S(P)$, часто с инверсным участком. Если отношение V_{FT} (5) попадает в относительный динамический диапазон прямого участка $S(P)$, то имеем конъюнкцию ($F \& T$), в ином случае сенсор регистрирует только один образ из двух эталонов, восстановленных ААП (4).

Голографическая автоассоциативная память (см. рис.1) численно моделировалась при линейной записи голограммы (1) для ряда характеристик образов и сенсора. На рис.2 представлены результаты при изменении только одного параметра – вида $S(P)$. Образы содержат по 256×256 пикселей: надписи на черном фоне залиты реализациями двумерного фрактального броуновского движения (параметр Хёрста $H = 0.1$). Отношение мощностей эталонов $P_F/P_T = 1.943$, отношение коэффициентов корреляции $k_{LF}/k_{LT} = 2$. Используются три вида зависимости

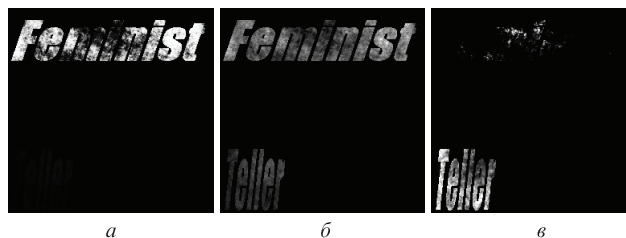


Рис.2. Восстановленные образы и их мощности: $P^R = 2.469 \times 10^8$ (а), 1.328×10^8 (б), 9.642×10^7 (в). В последнем случае из образа F восстановлено лишь несколько пикселей, поэтому его нельзя распознать.

$S(P)$: сигмоидальная $S(P, a, b, d) = \{1 + \exp[a(-P/b + 1)]\}^{-1} - d$, где a, b и d – параметры, причем b задает точку $S(P) = P$, а d – значение $S(0)$ (рис.2,а); линейная (рис.2,б); сигмоидальная с инверсным участком $S(P, a, c, d) = P^c \exp[-(P + d)^2/(2a^2)]$ (рис.2,в).

На рис.2,б представлена конъюнкция $F \& T$. Таким образом, $P^R(F) > P^R(F \& T) > P^R(T)$, что полностью совпадает с результатом [6], т.е. мы наглядно видим реализацию феномена «Линда» классическим методом, без обращения не только к квантовой физике по существу, но и к квантовому формализму. Отметим, что модель ГАОП относится к биологически мотивированным. Подчеркнем также, что представленный результат не следует трактовать как отрицание в принципе самой возможности наличия квантовых явлений и механизмов в макросистемах, включая когнитивные и социальные, но лишь как поиск наиболее простого объяснения экспериментальных результатов, адекватного физической реальности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-01-00676-а).

1. Желтиков А.М. *УФН*, **188**, 1119 (2018).
2. Гриб А.А., Парфенов Г.Н. *Теоретическая и математическая физика*, **169**, 259 (2011).
3. Khrennikov A. *Front. Phys.*, **3**, 77 (2015).
4. Asano M. et al. *Found. Phys.*, **45**, 1362 (2015). DOI: 10.1007/s10701-015-9929-y.
5. Moreira C., Wichert A. *Front. Phys.*, **4**, 26 (2016). DOI: 10.3389/fphy.2016.00026.
6. Tversky A., Kahneman D. *Psychological Rev.*, **90**, 293 (1983).
7. Busemeyer J.R. et al. *Psychological Rev.*, **118**, 193 (2011).
8. Trueblood J.S., Pothos E.M., Busemeyer J.R. *Front. Psychology*, **5**, 322 (2014).
9. Павлов А.В., Орлов В.В. *Квантовая электроника*, **49** (3), 246 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (3), 246 (2019)].
10. Soffer B.H., Dunning G.J., Owechko Y., Marom E. *Opt. Lett.*, **11**, 118 (1986).
11. Paek E.G., Psaltis D. *Opt. Eng.*, **26**, 428 (1987).