

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОГО ПРЕДСКАЗАТЕЛЯ МЕТОДОМ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАФИИ

© 2005 г. А. В. Павлов, канд. техн. наук

ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург
E-mail: alexandervpavlov@mail.ru

Показана возможность реализации в 4f-схеме фурье-голографии с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости модели множественной линейной регрессии, строящей наилучшее предсказание для стационарных в широком смысле случайных процессов. Приведена экспериментальная иллюстрация.

Коды OCIS: 090.0090, 3000.34700.

Поступила в редакцию 15.07.2004.

1. Введение

Наличие ряда глубоких аналогий между свойствами человеческого интеллекта и оптической голографии в настоящее время признано как оптиками, так и специалистами по искусственному интеллекту (ИИ) [1–4]. На сегодняшний день в наибольшей степени теоретически и технически разработана голографическая реализация такого атрибута интеллекта, как ассоциативность мышления в его простейшей форме – автоассоциативной памяти (ААП), восстанавливающей эталон при предъявлении его искаженной или дефектной версии [5]. Большинство голографических реализаций ААП основано на архитектуре оптической нейросети (ОНС) – "4f-схема фурье-голографии с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости". С использованием этой архитектуры реализованы также и более сложные нейросетевые (НС) модели обработки информации, включающие в себя ААП в качестве ключевого блока, например, модели ART [6]. Вместе с тем, представляется достаточно очевидным, что принцип ассоциативности мышления отнюдь не исчерпывается моделью ААП и для задачи создания ИИ также актуальна реализация более сложных видов ассоциативной обработки.

Другой атрибут интеллекта, неразрывно связанный с ассоциативностью мышления – способность к предвидению дальнейшего развития событий. Важность этого атрибута сложно переоценить, поскольку именно от развитости способности предсказания в значительной мере зависят как выживаемость индивида, так и его успешность в достижении жизненных целей. Задача предсказания имеет также и сугубо инженерный аспект, например, при эксплуатации телекоммуникационных сетей [7–9], систем водоснабжения и канализации [10] и других сложных объектов.

В теории случайных процессов задача предсказания традиционно рассматривается как частный

случай задачи наилучшей оценки [11–13]. Для стационарных в широком смысле случайных процессов наилучшее предсказание дает модель множественной линейной регрессии, которая может рассматриваться как строго формализованный случай ассоциативной обработки.

Методам, развитым в теории случайных процессов, в последнее время часто противопоставляются НС методы предсказания [14–17], в том числе основанные на идее лингвистического моделирования [6], в силу способности НС методов решать трудноформализуемые задачи посредством построения невербализуемых ассоциаций. Вместе с тем, достаточно очевидно, что декларируемый применительно к нейросетям принцип "model-free" в действительности не абсолютен, поскольку как для биологических, так и для искусственных нейросетей, созданных на реальной физической базе, принцип неформализуемости модели обработки всегда ограничен реальными свойствами используемых в искусственных нейросетях физических явлений, регистрирующих сред и устройств.

В настоящей статье показано, что ОНС архитектуры "4f-схема фурье-голографии с фазосопрягающим зеркалом в корреляционной плоскости" реализует модель множественной линейной регрессии, сохраняя такие атрибуты нейросетей, как обучаемость, ассоциативность отклика и отсутствие необходимости в формальном описании обрабатываемой информации.

2. Модель

2.1. Оптическая схема

Архитектура ОНС "4f-схема фурье-голографии с фазосопрягающим зеркалом в корреляционной плоскости" приведена на рис. 1. При помещении во входную плоскость Ip объектного изображения Im_B в задней фокальной плоскости S второй фурье-преобразующей линзы L_2 формируется функция взаимной

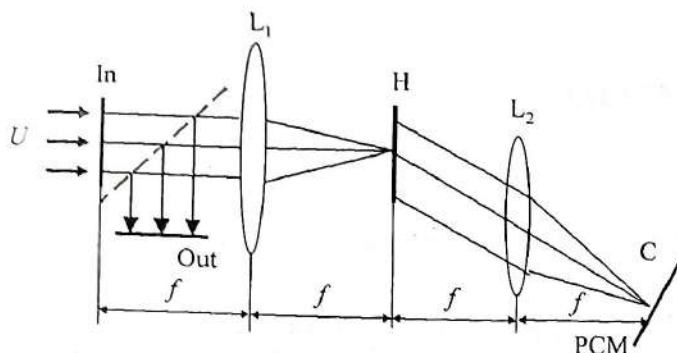


Рис. 1. Оптическая схема. In – входная плоскость, L_1, L_2 – фурье-преобразующие линзы с фокусным расстоянием f , Н – голограмма, С – корреляционная плоскость, РСМ – фазосопрягающее зеркало, Out – выходная плоскость.

корреляции $Im_B \otimes Im_A^n$, где $\otimes$ – символ операции корреляции, Im_A – эталонное изображение, использованное при записи голограммы, Im_A^n – результат фильтрации изображения Im_A оператором голографической регистрирующей среды η . На этом этапе ОНС работает как классический коррелятор Ван дер Люгта.

Для обеспечения прохождения возбуждения в обратном направлении, т. е. $C \rightarrow H \rightarrow Out$, где Out – выходная плоскость, оптически сопряженная с входной In посредством полупрозрачного зеркала М, в плоскость С помещается нелинейное устройство обращения волнового фронта РСМ (фазосопрягающее зеркало). Нелинейный оператор РСМ Nl подбирается таким образом, чтобы выделить из корреляционного распределения только глобальный максимум (ГМ) автокорреляционной функции (АКФ). Как правило, эта процедура реализуется посредством многоитерационного процесса, для обеспечения которого аналогичное фазосопрягающее зеркало помещается также и в плоскость In [5]. Процесс в плоскости С может быть представлен как

$$Nl(Im_B \otimes Im_A^n) \rightarrow \delta,$$

где δ – дельта-функция, описывающая дифракционно-ограниченный точечный источник. В результате такой процедуры в обратном ходе лучей $C \rightarrow H \rightarrow Out$ глобальный максимум АКФ как точечный опорный источник восстанавливает в Out изображение Im_A^n . Отметим, что само эталонное изображение Im_A , с которого была записана фурье-голограмма Н, может быть восстановлено только при линейном операторе η , что для большинства реальных изображений физически невыполнимо в силу ограниченности динамического диапазона голографических регистрирующих сред [18, 19].

В том случае, если фурье-голограмма восстанавливается не глобальным максимумом АКФ как точечным источником, а всем корреляционным полем, то за счет наложения изображений, восстанавливаемых боковыми максимумами АКФ, восстановлен-

ное изображение “портится”, а вокруг него появляется ореол. Ниже будет показано, что при использовании на этапе прохождения света $C \rightarrow H \rightarrow Out$ фурье-голограммы с инверсной передаточной характеристикой этот ореол описывается моделью линейной регрессии, т. е. суть линейное предсказание.

2.2. Модель и ее реализация

Для упрощения выкладок, но без потери общности, примем допущение о разделимости переменных в функции, описывающей изображение как реализацию случайного поля.

Пусть $Im(x)$ – реализация стационарной в широком смысле случайной функции (процесса) с автокорреляционной функцией $C(\xi)$, наблюдаемой на интервале $[x_{min}, x_0]$, где $x_0 = 0$ – момент или точка наблюдения. Наилучшая линейная оценка значения случайной величины $Im_{pred}(x_k)$ в точке $x_k > 0$ определяется моделью множественной линейной регрессии выражением [11]:

$$Im_{pred}(x_k) = \int_{x_{min}}^{x_0} Im(x_0 - x) a(x) dx, \quad (1)$$

где весовая функция $a(x)$ находится из решения уравнения [12]:

$$\int_{x_{min}}^{x_0} a(x) C(|x - \xi|) dx = C(x_k + \xi). \quad (2)$$

Поскольку в рамках нашего рассмотрения $Im(x) \in [0, 1]$, то обычно предъявляемое требование $M(Im(x)) = 0$, где M – математическое ожидание, может быть опущено [12]. Для решения задачи в рассматриваемой ОНС дважды применим к (1) фурье-преобразование и теорему Бореля о свертке. В результате, учитывая инверсию координат, возникающую в силу нереализуемости обратного фурье-преобразования, получим

$$Im_{pred}(-x_k) = F(F(Im(x_0 - x))F(a(x))). \quad (3)$$

Выражение (2) в фурье-пространстве примет вид

$$F(a(x))F(C(|x - \xi|)) = F(C|x_k + \xi|),$$

откуда получим

$$F(a(x)) = \frac{F(C(x_k + \xi))}{F(C(|x - \xi|))}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим

$$Im_{pred}(-x_k) = F \left(F(Im(x_0 - x)) \frac{F(C(x_k + \xi))}{F(C(|x - \xi|))} \right)$$

и, применив теорему Винера–Хинчина и учтя инверсию координат в корреляционной плоскости, получим окончательное выражение для наилучшей линейной оценки значения функции в точке x_k :

$$Im_{pred}(x_k) = F \left(\frac{F(C(x_k + \xi))}{F^*(Im(x))} \right), \quad (5)$$

где астериск обозначает комплексное сопряжение.

Выражение (5) может быть реализовано в обсуждаемой архитектуре ОНС посредством процедуры, состоящей из следующих двух этапов:

1 этап – формирование в слое С распределения $C(x)$. На этом этапе нейросеть работает как классический голографический коррелятор Ван дер Люгта и фурье-голограмма Н согласована с эталоном, т. е. $H(v) = F(Im_A^n)$.

2 этап – прохождение возбуждения от выделенного из АКФ фрагмента $C(x_k + \xi)$ в обратном направлении $C \rightarrow H \rightarrow Out$ через матрицу связей с инверсной передаточной характеристикой $\eta^{-1}(v) = (F(Im_A^n))^{-1}$. Методы реализации инверсных голограмм хорошо известны [20] и заключаются, в частности, в использовании голографических регистрирующих сред с обратной зависимостью дифракционной эффективности от экспозиции. В результате реализации второго этапа амплитуда света в точке x_k плоскости Out будет пропорциональна искомому значению $Im_{pred}(x_k)$.

Нетрудно видеть, что данная схема позволяет также построить оценку (предсказание) для реализации процесса, отличной от эталонной. Действительно, если фурье-голограмма записана с изображения Im_A , а предъявляется объектное изображение Im_B , и если оба изображения суть функции, принадлежащие одному пространству, то выражение (2) примет вид:

$$\int_{x_{min}}^{x_0} a(x) C_{BA}(|x - \xi|) dx = C_{BA}(x_k + \xi),$$

а выражение (5), соответственно, переписется в виде:

$$Im_{Bpred}(x_k) = F \left(\frac{F(C_{BA}(x_k + \xi))}{F^*(Im_A(x))} \right), \quad (6)$$

где C_{BA} обозначает функцию взаимной корреляции $Im_B(x)$ и $Im_A(x)$.

Если фурье-голограмма тонкая (по критерию угловой инвариантности), то требование на выделение на втором этапе фрагмента $C(x_k + \xi)$ из АКФ выполняется автоматически для всех $k \in [0, N_A^n]$.

Таким образом, если обрабатываемое изображение удовлетворяет свойству стационарности и на этапе прохождения света $C \rightarrow H \rightarrow Out$ используется

голограмма с инверсной передаточной характеристикой, то ореол вокруг восстановленного изображения эталона суть предсказание случайного процесса, даваемое моделью множественной линейной регрессии. При этом нетрудно видеть, что в восстановленном изображении точка x_k получает возбуждение от $(N_A - k)$ пикселей АКФ, где N_A – число элементов разрешения (пикселей) во входном изображении Im_A , и через них связана с $(N_A - k)$ пикселями входного изображения Im_A . Иными словами, физически реализуемо условие $\xi_k \in [k, N_A]$, т. е. предсказание на глубину k , вычисляется по базе $(N_A - k)$.

3. Экспериментальная иллюстрация

Экспериментальная установка была собрана по схеме, приведенной на рис. 1, в которую были внесены следующие изменения:

1. Голограмма фазосопрягающего зеркала располагалась не в корреляционной плоскости, а за ней, на том эмпирически подобранном расстоянии, на котором распределение амплитуд по сечению пучка было приблизительно равномерным. Такое решение обусловлено невозможностью записи голограммы корреляционного поля в силу того, что перепад амплитуд в корреляционном поле существенно превышает динамический диапазон регистрирующих сред.

2. Как следует из (5), в построении предсказания участвуют только боковые максимумы корреляционной функции. В то же время яркость изображения эталона, восстанавливаемого ГМ АКФ, настолько превосходит яркость ореола-предсказания, что “забивает” телевизионный сенсор. Поэтому на этапе восстановления фурье-голограммы АКФ при регистрации изображения глобальный максимум АКФ вырезался специальной диафрагмой.

3. Как следует из рассмотрения раздела 2.2, для реализации модели необходима именно тонкая голограмма. Принципиальная ограниченность дифракционной эффективности тонкой голограммы [1], вкупе с использованием голографической техники для реализации фазосопрягающего зеркала, ведет к существенным энергетическим потерям в схеме рис. 1. Эти потери усугубляются применением техники инверсной голограммы. Поэтому для обеспечения интенсивности восстановленного изображения (5), достаточной для его регистрации телевизионным сенсором, вместо инверсной голограммы вынужденно была использована схема узкополосной фильтрации с записью фурье-голограммы в режиме переэкспозиции.

Для экспериментальной иллюстрации было использовано реальное аэрофотоизображение однородного лесного массива (рис. 2), поскольку имен-

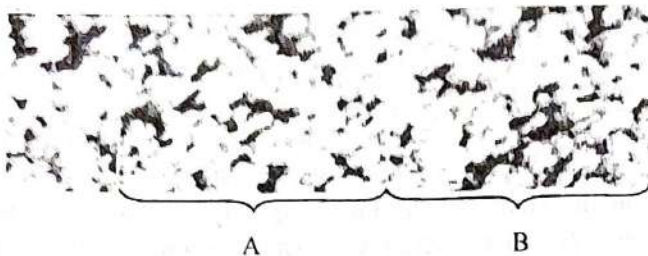


Рис. 2. Использованное в эксперименте изображение лесного массива. А – эталонный фрагмент, использованный для записи голограммы, В – соседний участок.

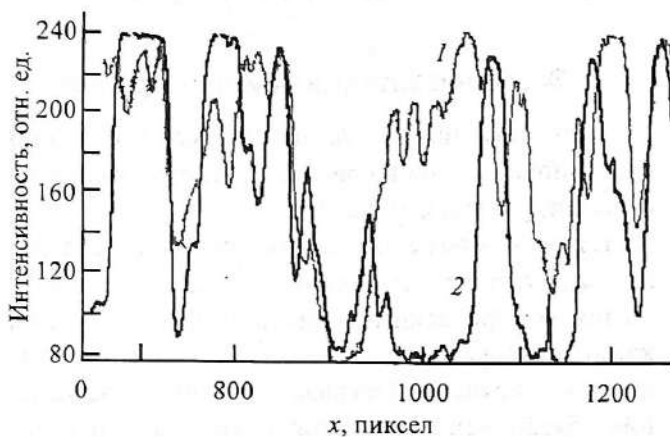


Рис. 3. Фотометрические профили участка В изображения рис. 2 (кривая 1) и восстановленного в плоскости Out предсказания (кривая 2).

но этот тип природных объектов наиболее близок по своим статистическим свойствам к стационарным случайным полям, хотя все же свойством стационарности и не обладает [21]. Размер части А, т. е. эталона, использованного при записи и восстановлении голограммы, составлял 650 пикселей. На рис. 3 приведены фотометрические профили участка В (пиксели 650–1350), т. е. части изображения, находившейся при записи фурье-голограммы за границами кадрового окна (кривая 1), и соответствующего этому участку ореола, окружающего восстановленное в эксперименте изображение эталона, т. е. предсказания (кривая 2). При анализе приведенной экспериментальной иллюстрации следует учитывать, что в результате узкополосной фильтрации в восстановленном изображении были утрачены практически все детали за исключением контуров крон, которые, наоборот, были подчеркнуты.

4. Заключение

Таким образом, архитектура ОНС “4f-схема фурье-голографии с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости” строит наилучшую в смысле среднего квадрата ошибки линейную оценку при использовании на этапе обратного прохожде-

ния света голограммы с инверсной передаточной характеристикой. Если обрабатываемое изображение может трактоваться как реализация стационарного в широком смысле случайного поля, то ОНС строит корректное предсказание для данной реализации. Если обрабатываемое изображение не удовлетворяет критерию стационарности, а большая часть реальной информации свойством стационарности не обладает, то возникает еще одна аналогия с биологическими прототипами ИИ, которые также в большинстве случаев строят внутреннюю модель окружающего мира, исходя из примата устойчивости модели по отношению к адекватности [2].

В свете современных тенденций развития оптических информационных систем необходимо еще раз отметить существенное требование к физической реализации модели – фурье-голограмма должна быть тонкой по критерию угловой инвариантности. Это требование вступает в противоречие со стремлением к увеличению объема памяти и энергетической эффективности устройства ИИ, поскольку как максимальный объем памяти, так и максимальная дифракционная эффективность достигаются при использовании объемных голограмм, принципиально не обладающих свойством угловой инвариантности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 03-01-00825а) и Программы грантов Минобразования России в области естественных и технических наук (грант Е02-2.0-61).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кольер Р., Беркхарт Л., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
2. Кузнецов О.П. Неклассические парадигмы в искусственном интеллекте // Изв. АН. Сер. Теория и системы управления. 1995. № 5. С. 3–23.
3. Судakov К.В. Голографический принцип системной организации процессов жизнедеятельности // Успехи физиол. наук. 1997. Т. 28. № 4. С. 3–32.
4. Прибрам К. Нелокальность и локализация: голографическая гипотеза о функционировании мозга в процессе восприятия и памяти // В сб. “Синергетика и психология”. В. 1. Методологические вопросы. Издательство МГСУ “Союз”, 1997.
5. Owechko Y. Nonlinear holographic associative memories // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1989. V. 25. № 3. P. 619–634.
6. Wunsh D.C. II et al. Photorefractive adaptive resonance neural network // Applied Optics. 1993. V. 32. № 8. P. 1399–1407.
7. Pedricz W., Vasilakos A. Linguistic Models and Linguistic Modeling // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part B. 1999. V. 29. № 6. P. 745–759.

8. *Roughan M., Veitch D., Abry P.* Real-Time Estimation of the Parameters of Long-Range Dependence // *IEEE Transactions on Networking*. 2000. V. 8. № 4. P. 467–478.
9. *Yoo S.J., Kwak K.S., Kim M.C.* Predictive and Measurement-based Dynamic Resource Management and QoS Control for Videos // *Computer Communications*. 2003. V. 26. № 14. P. 1651–1661.
10. *Kasabov N.K., Kim J., Watts M.J., Gray A.R.* FuNN/2 – a fuzzy neural network architecture for adaptive learning and knowledge acquisition // *Information Sciences*. 1997. V. 101. № 3–4. P. 155–176.
11. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 383 с.
12. *Вентцель А.Д.* Курс теории случайных процессов. М.: Наука, 1975. 320 с.
13. *Grimmet G.R., Sterzaker D.R.* Probability and Random Processes. Oxford: Oxford Sc. Publ., Clarendon Press, 1992.
14. *Carpenter G.A.* Distributed learning, recognition, and prediction by ART and ARTMAP neural networks // *Neural Networks*. 1997. V. 10. № 8. P. 1473–1494.
15. *Wakuya H., Zurada J.M.* Bi-directional computing architecture for time series prediction // *Neural Networks*. 2001. V. 14. № 9. P. 1307–1321.
16. *Tchaban T., Griffin J.P., Taylor M.J.* A comparison between single and combined backpropagation neural networks in the prediction of turnover // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 1998. V. 11. № 1. P. 347–354.
17. *Zemouri R., Racocanu D., Zerhouni N.* Recurrent radial basis function network for time-series prediction // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003. V. 16. № 5–6. P. 453–463.
18. *Кулешов А.М., Шубников Е.И., Смаева С.А.* Об оптимальности голографического согласованного фильтра // *Опт. и спектр*. 1986. Т. 60. № 6. С. 1273–1276.
19. *Александрова С.А., Кулешов А.М.* Влияние режекции низких пространственных частот спектра на параметры сигнала в голографическом корреляторе // *Опт. и спектр*. 1990. Т. 68. № 3. С. 652–655.
20. *Гуревич С.Б., Константинов В.Б., Соколов В.К., Черных Д.Ф.* Передача и обработка информации голографическими методами / Под. ред. Гуревича С.Б. М.: Сов. радио, 1978. 304 с.
21. *Сергеев Г.А., Янутиш Д.А.* Статистические методы исследования природных объектов. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 300 с.