

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

В.Н. Васильев, А.В. Павлов

ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Том 2

Когнитивные системы и оптические логические процессоры



Санкт-Петербург

2008

УДК 007:535.317

Васильев В.Н., Павлов А.В. Оптические технологии искусственного интеллекта / Учебное пособие. Изд.2. В 2-х т. Т.2 СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 71с.

В пособии представлены методические материалы по курсу «Оптические технологии искусственного интеллекта». Кратко изложены базовые сведения из области искусственного интеллекта, теории искусственных нейронных сетей, теории нечетких множеств, парадигмы когнитивной системы. Обсуждаются вопросы применения оптических технологий для реализации ряда моделей искусственных нейронных сетей, нечетких логик и когнитивных систем.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200600 – Фотоника и оптоинформатика.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Васильев В.Н., Павлов А.В., 2008

© Санкт-Петербургский
государственный
университет информационных
технологий, механики и оптики, 2008

«Феномен информации есть многостадийный, необратимый процесс становления структуры в открытой неравновесной системе, начинающийся со случайного запомненного выбора, который эта система делает, переходя от хаоса к порядку, и завершающийся целенаправленным действием согласно алгоритму или программе, отвечающим семантике выбора».

И.В.Мелик-Гайказян, «Информационные процессы и реальность», М., 1997.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	Стр. 4
Том 1	
<u>Модуль 1. Основы оптических информационных технологий и теории искусственных нейронных сетей</u>	
Тема 1.1. Вводная. Парадигмы искусственного интеллекта	5
Тема 1.2. Базовые математические операции и их реализация оптическими методами	18
Тема 1.3. Распознавание образов. Оптические методы распознавания	28
Тема 1.4. Основы парадигмы искусственных нейронных сетей	39
Тема 1.5. Сети однонаправленного распространения	50
Тема 1.6.1. ИНС как динамические системы	60
Тема 1.6.2. Самоорганизация и самообучение в ИНС	67
Тема 1.7. Концепция адаптивного резонанса (ART)	71
Том 2	
<u>Модуль №2. Когнитивные системы</u>	
Тема 2.1. Начала теории динамического хаоса	5
Тема 2.2. Когнитивные системы. Функциональная система Анохина	18
Тема 2.3. Голографический предсказатель случайных процессов	25
<u>Модуль №3. Оптические логические процессоры</u>	
Тема 3.1. Начала теории нечетких множеств	33
Тема.3.2.Оптические реализации нечетких систем. Алгебраические основания оптических реализаций нечетких систем. Приближение геометрической оптики	39
Тема 3.3. Приближение Фурье-оптики. Нечеткие логики	49
Тема 3.4. Логико-лингвистическое моделирование	57
Заключение	68
Информация о кафедре	69
	Стр.

Список принятых сокращений и обозначений

ВИ	Вычислительный интеллект
ГК	Голографический коррелятор
ИИ	Искусственный интеллект
КП	Когнитивная психология
КмП	Компьютерная парадигма в ИИ
КС	Когнитивная система
ЛМ	Лингвистическая модель
ЛП	Лингвистическая переменная
МЛ	Многозначная логика
НЛ	Нечеткая логика
НзЛ	Нечеткозначная (нечеткозначимая) логика
НмЛ	Немонотонная логика
НМ	Нечеткое множество
НС	Нейронная сеть
ОНС	Оптическая нейронная сеть
ТНМ	Теория нечетких множеств
AI	Artificial Intelligence
ART	Adaptive Resonance Theory (теория адаптивного резонанса)
FST	Fuzzy Sets Theory (теория нечетких множеств)
LV	Linguistic Variable (лингвистическая переменная)
NN	Neural Network (нейронная сеть)
WTA	Winner takes all (победитель забирает все)

Тема 2.1. Начала теории динамического хаоса

В предыдущих лекциях мы уделяли особое внимание обеспечению устойчивости динамической системы с тем, чтобы из любого положения система сходилась к единственному аттрактору, соответствующему запомненному образу. Однако, способность к правильному вспоминанию отнюдь не является критерием интеллектуальных способностей. Более того, человек, действующий и думающий строго так, как его учили, и никак иначе, не способный отойти от шаблона, воспринимается как человек не очень умный. Таким образом, стабильность и единственность аттрактора оказывается свойством, находящимся в некотором противоречии с интеллектуальными способностями. Поэтому в настоящей лекции мы рассмотрим начала хаотической динамики.

В обыденной жизни с термином хаос связана резко негативная оценка, напротив, термин стабильность имеет положительную оценку. Однако, рассмотрев несколько примеров из самых разных областей, мы увидим, что в данном случае имеет место отмеченный на первой лекции феномен обыденного мышления, для которого устойчивость картины мира приоритетнее ее логичности.

Пример 1, технический. Известно, что к учебным и пилотажным самолетам предъявляются противоположные требования – первые должны из любого положения самостоятельно возвращаться в состояние устойчивого полета (прощать ошибки летчика), вторые наоборот, реагировать на малейшее движение ручки управления. Первые в терминах динамических систем суть системы с единственным и достаточно глубоким аттрактором. Вторые – системы неустойчивые. Выдающиеся пилотажные характеристики самолетов семейства Су-37 обеспечены именно неустойчивыми режимами обтекания его плоскостей.

Пример 2, исторический, актуальный и сегодня. Николай I, обладавший выдающимися личными качествами, упорно создавал устойчивую систему управления Россией. Создал. Система доказала свою полную неработоспособность в условиях, отличающихся от эталонных – кончилось все поражением в Крымской войне. Систему пришлось менять капитально (реформы Александра II). Напротив, именно пореформенное время, характеризовавшееся современниками, как хаос, заложило основы для бурного развития России. Другой пример из нашей истории – СССР был системой с единственным аттрактором, попытка чуть-чуть изменить его координаты в фазовом пространстве привела к разрушению всей системы.

Перечисление примеров можно продолжить, но и этих достаточно, чтобы понять, что обыденные оценки хаоса и стабильности не совсем верны. Далее мы рассмотрим начала теории хаоса.

1. Определение 2.1.1. Сжимающее отображение

Пусть (X, d) – метрическое пространство,

def. $T: X \rightarrow X$ сжимающее отображение, если

$$\exists S, 0 < S < 1, \forall x, y \in X, d(T(x), T(y)) \leq Sd(x, y)$$

Если $S \in (0, \infty)$, то T – отображение Липшица.

2. Теорема о сходимости к неподвижной точке

(X, d) , T – сжимающее отображение, x_f – неподвижная точка, т.е.

$$T(x_f) = x_f,$$

$T(x)$ имеет в конечном счете одну неподвижную точку и, кроме того,

$$\forall x_0 \in X, \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_f, \text{ где } x_n = T(x_{n-1}).$$

Доказательство:

2.1. Единственность. Пусть $T(x)$ имеет две неподвижные точки x_{f1} и x_{f2} . Тогда по определению сжимающего отображения

$$d(x_{f1}, x_{f2}) = d(T(x_{f1}), T(x_{f2})) \leq Sd(x_{f1}, x_{f2}).$$

Так как $S < 1$, то последнее неравенство выполняется только при $x_{f1} = x_{f2}$, что и требовалось доказать.

2.2. Сходимость. Доказательство элементарно

3. Хаотическая динамикаа. Притягивающие и отталкивающие точки

Отображение T теперь не предполагается сжимающим, следовательно, теорема о неподвижной точке в данном случае неприменима. Пусть x_f – неподвижная точка. Если функцию T разложить в ряд Тейлора вблизи неподвижной точки, то получим

$$T(x) = T(x_f) + (x - x_f)T'(x_f).$$

Поскольку по определению неподвижной точки $T(x_f) = x_f$, то следующий шаг итерации $x_{n+1} = T(x_n)$, откуда получим следующее выражение

$$x_{n+1} - x_f = (x_n - x_f)T'(x_f).$$

Отсюда наглядно видно, что:

если $|T'(x_f)| > 1$, то точка x_f – отталкивающая, т.к. с каждым шагом расстояние увеличивается, орбиты из ее окрестности расходятся;

если $|T'(x_f)| < 1$, то точка x_f – притягивающая, т.к. с каждым шагом расстояние уменьшается, орбиты из ее окрестности сходятся.

b. Определение 2.1.2. Периодические точки

Точки ξ_1 и ξ_2 : $f(\xi_1) = \xi_2$; $T(\xi_2) = \xi_1$; $x_{n+1} = T(T(x_n)) \equiv T^{(2)}(x_n)$

Определение 2.1.3 Последовательность $\{x_n\}_{n=0}^{\infty} = \{T^{(n)}(x_0)\}_{n=0}^{\infty}$ называется орбитой точки x_0 .

Определение 2.1.4. Орбита называется периодической с периодом p , если $x_{n+p} = x_n$; $n=0,1,2,\dots$. Если уравнение периодичности $x_{n+p} = x_n$ справедливо только после некоторого $n \geq n_0$, то орбита в конечном счете периодическая.

c. Примеры функций, использование которых в качестве итерирующих отображений позволяет реализовать сценарии перехода к хаотической динамике.

- i. модель ограниченного роста $T: x_{n+1} = ax_n(1-x_n)$ (Верхольст, 1845)
- ii. $x_{n+1} = x_n^2 + a$
- iii. $x_{n+1} = x_n(1 + a(1-x_n))$
- iv. $x_{n+1} = x_n \exp(a(1-x_n))$

Этот список может быть продолжен. Важно, что для перехода к хаотической динамике итерирующее отображение должно относиться к классу неаффинных, т.е. они не могут быть представлены в виде $y(x) = ax + b$ – хаотическая динамика является свойством нелинейных систем.

Рассмотрим отображение $T(x) = x^2 + a$. Нетрудно видеть, что неподвижная точка суть решения уравнения $x = x^2 + a$, т.е.

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{1-4a}) \quad \eta = \frac{1}{2}(1 - \sqrt{1-4a})$$

Неподвижная точка суть действительные числа, только если $1-4a \geq 0$.

Если $a \leq 1/4$, то $\varepsilon < \eta < \varepsilon$, $T(-\varepsilon) = \varepsilon$.

Для $x_0 > \varepsilon$ и $x_0 < \varepsilon$ орбиты стремятся к ∞ .

Пусть $I \equiv [-\varepsilon, \varepsilon]$, если $-2 \leq a \leq 1/4$ и $x_0 \in I$, то $T(x_0) \in I$. Рассмотрим, к чему будет сходиться процесс, стартовавший на данном итерирующем отображении из начальной точки x_0 в зависимости от значения параметра a .

Если $-3/4 < a < 1/4$, то имеет место $|T'(\eta)| = |1 - (1-4a)^{1/2}| < 1$ и, следовательно неподвижная точка притягивающая - все орбиты с $x_0 \in I$ сходятся к η .

1. Если $-3/4 < a < 1/4$, то имеет место $|T'(\eta)| = |1 - (1-4a)^{1/2}| < 1$ и, следовательно неподвижная точка притягивающая - все орбиты с $x_0 \in I$ сходятся к η .

На рис.2.1.1. приведены примеры развития итерационного процесса для трех значений параметра a – видно, что после нескольких итераций процесс сходится к устойчивой точке. На рис.2.1.2 приведен фрагмент диаграммы, показывающей зависимость значения неподвижной точки от величины параметра a .

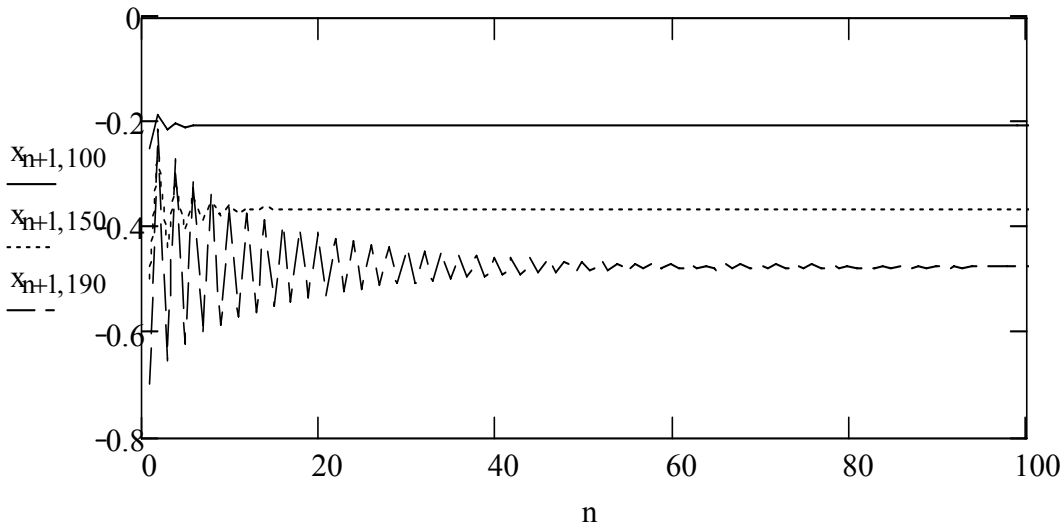


Рис.2.1.1 Динамика системы при различных значениях параметра a

2. Если $-3/4 < a < 1/4$, то имеет место $|T'(\eta)| = |1 - (1 - 4a)^{1/2}| < 1$ и, следовательно неподвижная точка притягивающая - все орбиты с $x_0 \in I$ сходятся к η . На рис.2.1.1. приведены примеры развития итерационного процесса для трех значений параметра a – видно, что после нескольких итераций процесс сходится к устойчивой точке. На рис.2.1.2 приведен фрагмент диаграммы, показывающей зависимость значения неподвижной точки от величины параметра a .

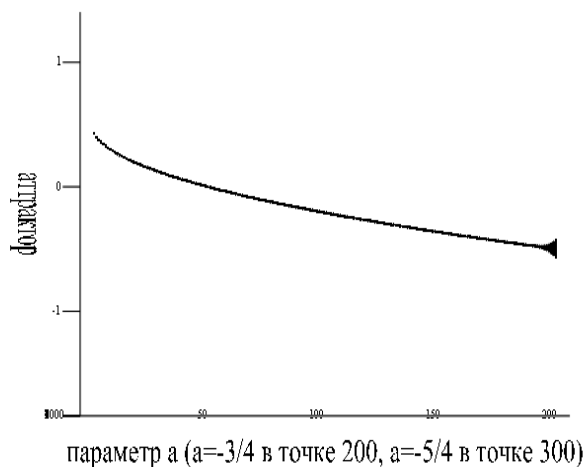


Рис.2.1.2. Зависимость значения неподвижной точки от величины параметра a в диапазоне $-3/4 < a < 1/4$

3. $a < -3/4 \Rightarrow |T'(\eta)| > 1 \Rightarrow$ Неподвижная точка η отталкивающая. В то же время, $T(2)$ доставляет пару притягивающих точек, приводящих к появлению цикла с периодом 2. Динамика системы для этого случая приведена на Рис. 2.1.3, а зависимость неподвижных точек $T(2)$ на рис.2.1.4.

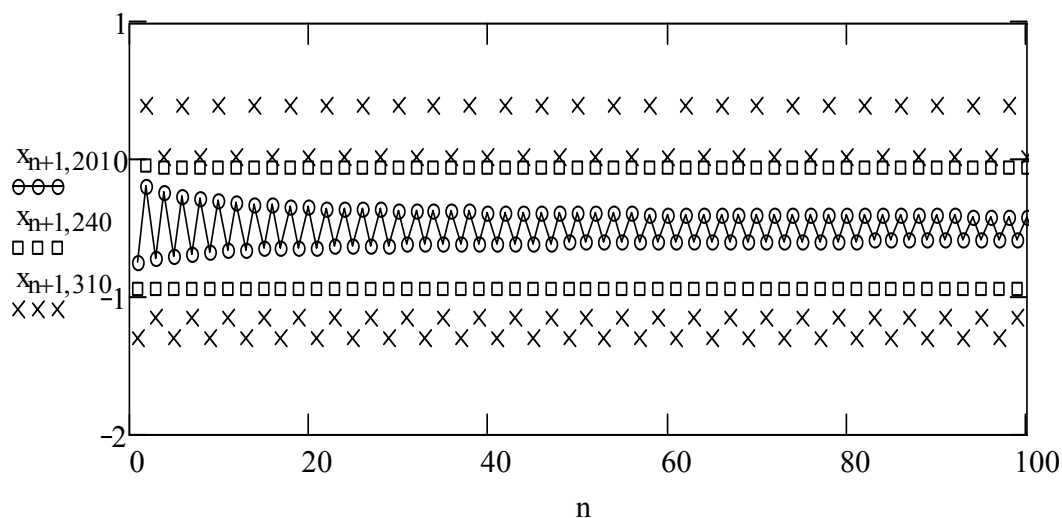


Рис.2.1.3. Зависимость значения неподвижной точки от величины параметра a в диапазоне $a < -3/4$

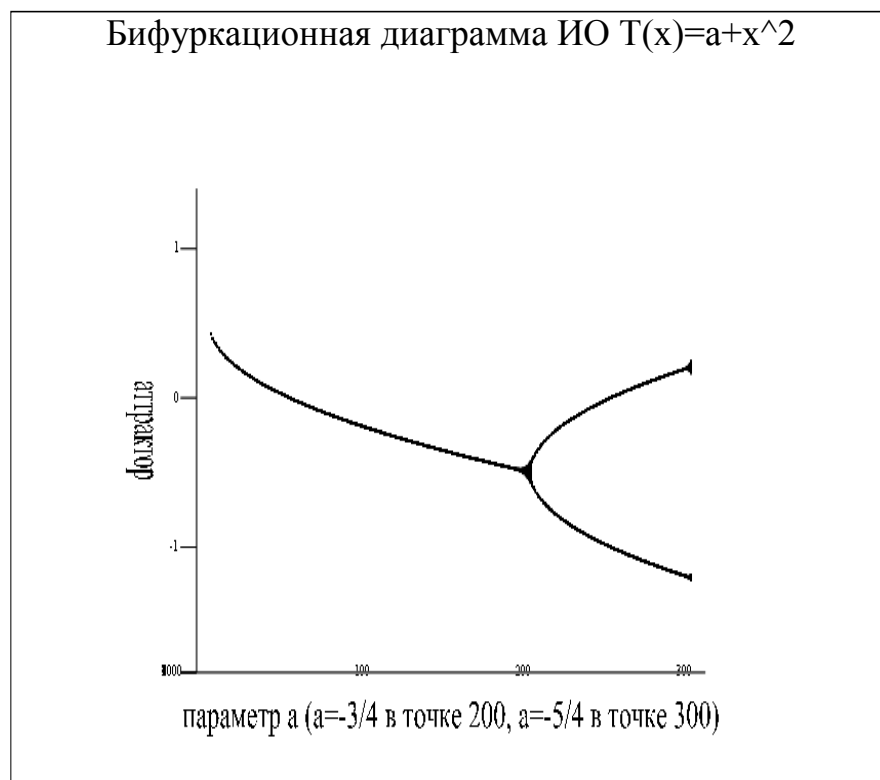


Рис.2.1.4. Зависимость значения неподвижной точки от величины параметра a в диапазоне $a < -3/4$

4. $a = -5/4$ – снова бифуркация удвоения периода – цикл с периодом 4.

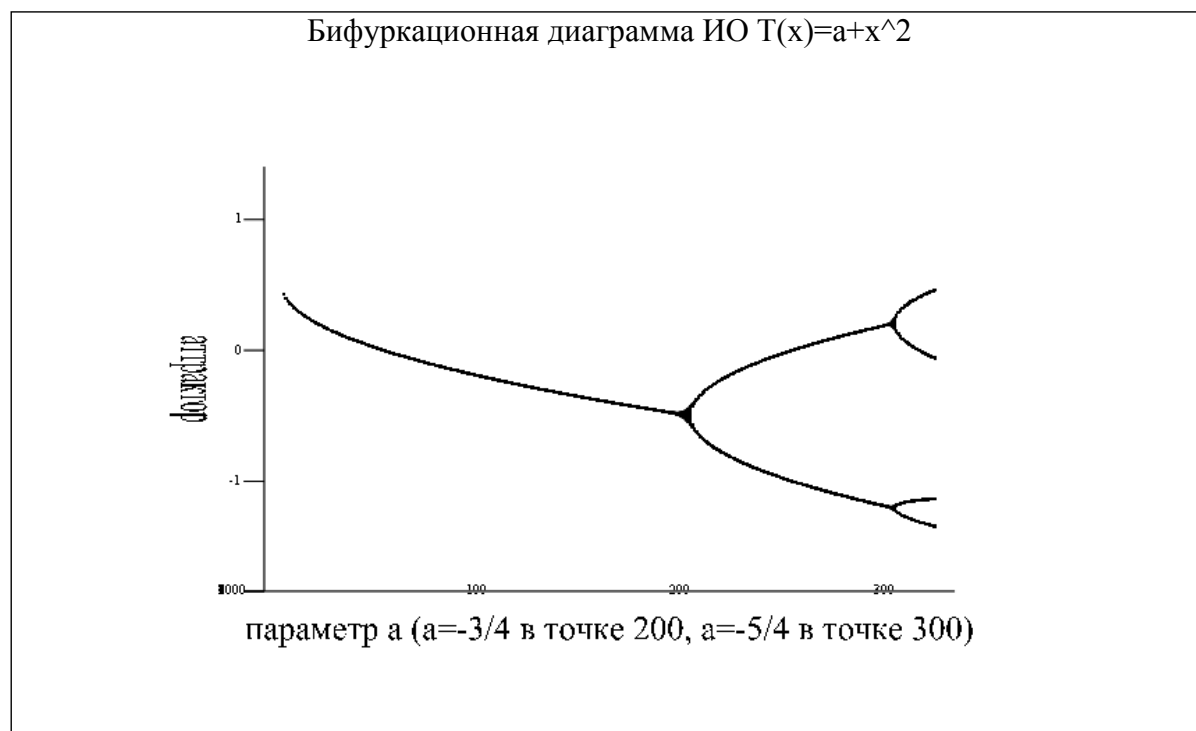


Рис.2.1.5. Зависимость значения неподвижной точки от величины параметра a в диапазоне $a \in [-5/4, 0]$

5. При $a < -1.401155\dots$ система из циклического переходит в режим, в котором неподвижные точки отсутствуют. На рис.2.1.6 приведена динамика системы при значении параметра $a < a_{\infty} = -1.401155\dots$. Нетрудно видеть, что после некоторого числа итераций (в данном случае после 60 итераций) система выходит на режим, в котором ее траектория с некоторым периодом проходит в определенной области, называемой странным аттрактором. Траектория системы не точно повторяет саму себя, но каждый раз проходит вблизи от предыдущей траектории.

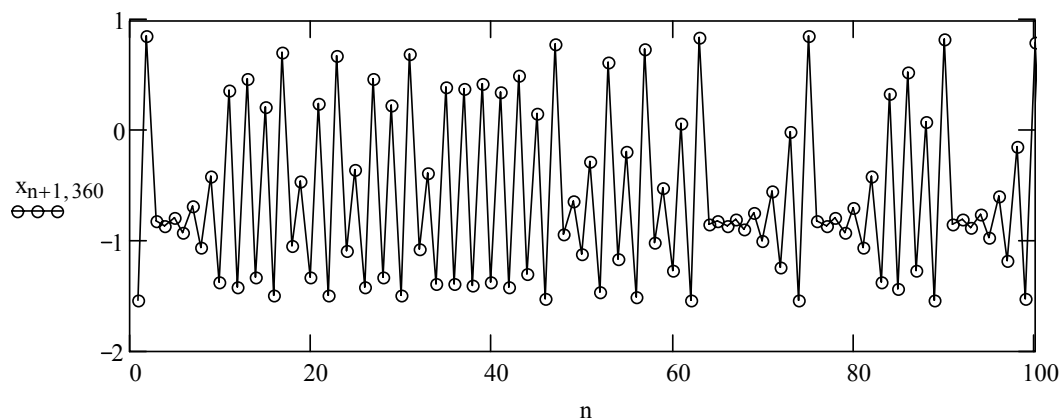


Рис.2.1.6. Динамика системы при значениях параметра $a < -1.401155\dots$

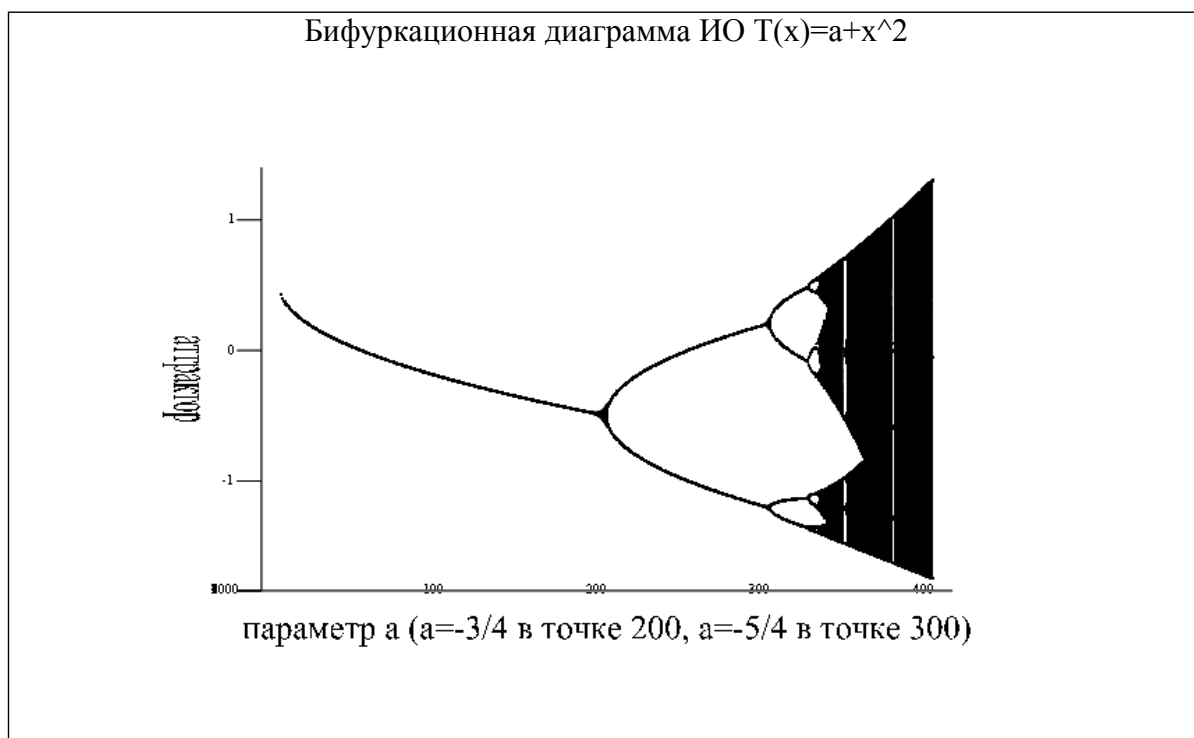


Рис.2.1.7. Бифуркационная диаграмма

6. При $a=-2$, $\varepsilon=2$, $I=[-2,2]$, $y=x$ пересекает график $T^{(n)}(x)$ точно 2^n раз, каждая точка периодическая с периодом $n \Rightarrow$ существуют периодические орбиты с $p=2,3,4,\dots,n$.

7. Точка Фейгенбаума $a_\infty = \lim a_n = -1.401155\dots$, где a_n — значения точек бифуркаций.

$1/4 < a < a_\infty$ — удвоение периода

$a_\infty < a$ — область хаоса

в окрестности $a=-1.7548777\dots$ — окно периода 3.

Отношение длин интервалов между точками бифуркаций имеет предел

$$d = \lim \frac{a_n - a_{n-1}}{a_{n+1} - a_n} = 4.669162\dots - \text{постоянная Фейгенбаума. Если значения } a_\infty$$

для разных ф-ций разные, то значение d одно для очень многих ф-ций.

d. Определение 2.1.5. Хаос. Пусть (X,d) метрическое пространство. Отображение $T:X \rightarrow X$ называется хаотическим, если:

- i. T обладает существенной зависимостью от начальных условий, а именно: (X,d) , $x \in X$, U — открытое мн-во, $x \in U$, для $\delta > 0 \exists n > 0$ и $(\cdot)y \in U$, что $d(T^{(n)}(x), T^{(n)}y) > \delta$;

- ii. T транзитивно, т.е. для $\forall U, V$ – открытых мн-в $\exists n \geq 0$ такое, что $T^{(n)}(U) \cap V \neq \emptyset$;
- iii. Периодические точки плотны в X , т.е. в любой окрестности $\forall$ точки в X существует по крайней мере одна периодическая точка и, следовательно, бесконечное мн-во периодических точек.

Это – строгий хаос. Строго говоря, условие (1) избыточно, т.к. оно следует из 2 и 3.

Пример поведения системы (бифуркационная диаграмма) для ИО «Модель ограниченного роста»

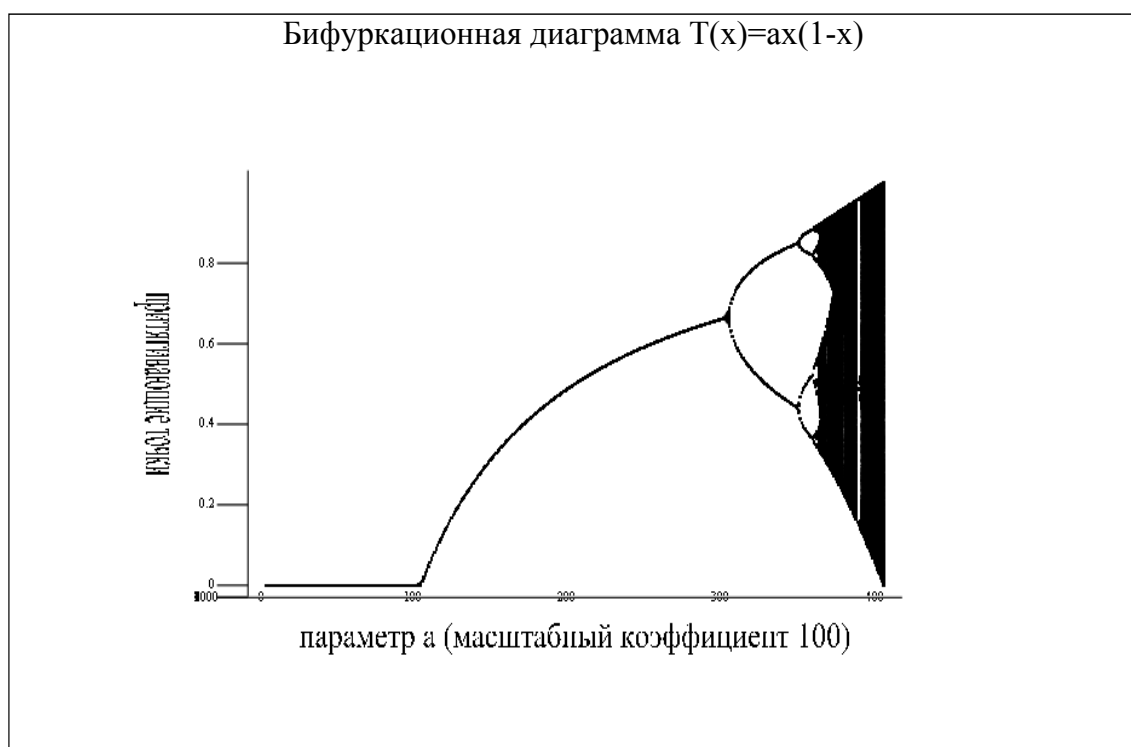


Рис.2.1.7. Бифуркационная диаграмма для ИО «Модель ограниченного роста»

Из сравнения рисунков 2.1.6 и 2.1.7 видно, что в зависимости от вида итерирующего отображения конкретный вид бифуркационной диаграммы, называемой также деревом Фейгенбаума, может изменяться, но все бифуркационные диаграммы отображают переход к хаосу, содержащий три последовательных этапа: хаотическую динамику, циклическую динамику, хаотическую динамику.

Хаос и интеллект.

Согласно данным нейрофизиологии мозг здорового бодрствующего человека является предельно неустойчивой хаотической системой. Без

хаотической динамики невозможно обучение – мозг не может добавить в память новый образ (Рис.2.1.8.) [3].

Без хаотической динамики невозможно творчество – решение творческой задачи суть создание нового, ранее неизвестного паттерна нейронной динамики, нового аттрактора в пространстве состояний. Для этого мозг должен «погрузиться в хаос», а затем выйти из него, т.е. необходим режим т.н. контролируемого хаоса.

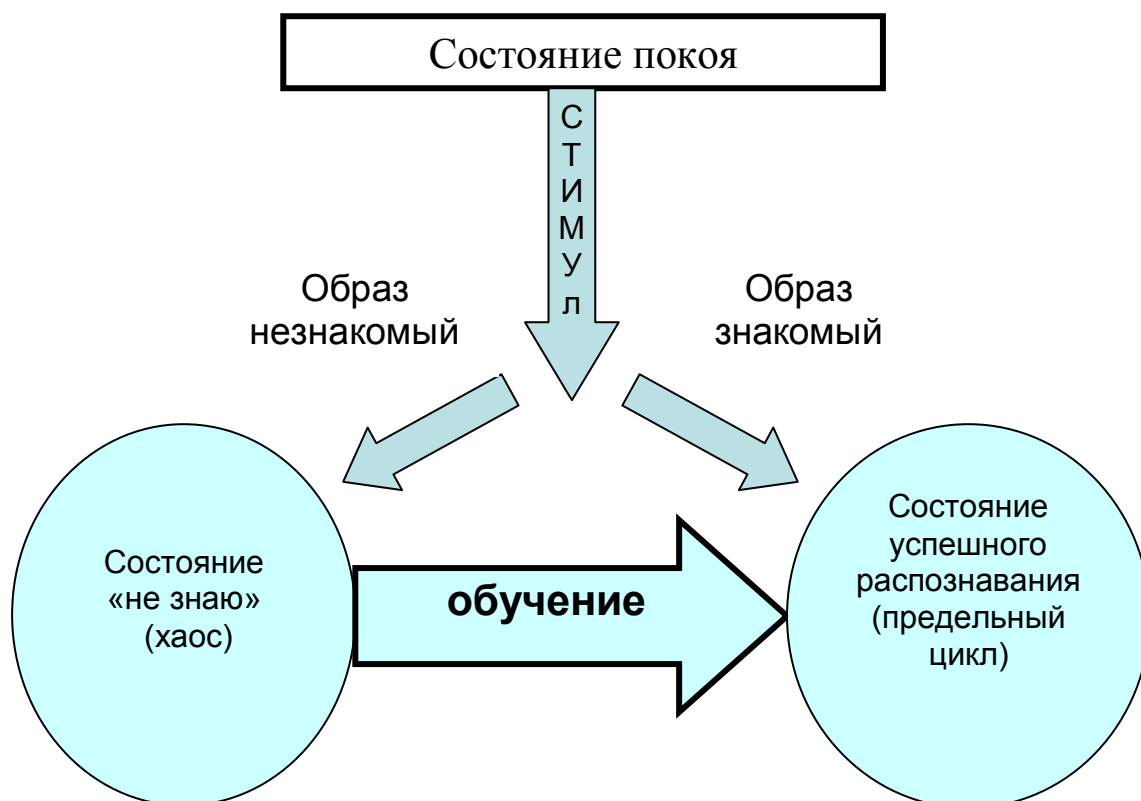


Рис.2.1.8. Роль хаоса в обучении

Следуя [4], рассмотрим возможность реализации хаотического режима в НС Хопфилда. Возможны два метода реализации хаотической динамики:

1. Несимметричная матрица связей. В этом случае не ясно как реализовать режимы обучения и распознавания.
2. Симметричная матрица связей, но нелинейная активационная функция нейрона. Рассмотрим этот вариант подробно.

Пусть имеется классический биполярный нейрон Мак-Каллоха и Питтса с пороговой активационной функцией, описываемой выражением

$$Out_{t+1} = \text{sign}(NET_t) = \begin{cases} 1 & \text{if } NET_t > 0 \\ -1 & \text{if } NET_t < 0 \end{cases}$$

Представим это выражение в виде отображения, зависящего от NET как от параметра, т.е. $T(Out_t, NET)$. На рисунке 2.1.9. этому отображению соответствуют два прямых отрезка

$$Out_{t+1} = 1 \text{ для } NET > 0$$

и

$$Out_{t+1} = -1 \text{ для } NET < 0.$$

Закрепим правый конец верхнего отрезка и начнем вращать его, аналогично для нижнего отрезка (пунктир). Если угол между отрезком и горизонталью не равен нулю, то переход нейрона из одного состояния в другое будет уже не

мгновенным, но итерационным. Чем больше наклон, тем медленнее приближение. Обозначим зависимость угла наклона от суммы внешних воздействий $K(NET)$, тогда отображение можно представить в виде

$$T(Out_t, NET) = K(NET)Out_t + (1 - K(NET)) \text{ для } NET > 0$$

и

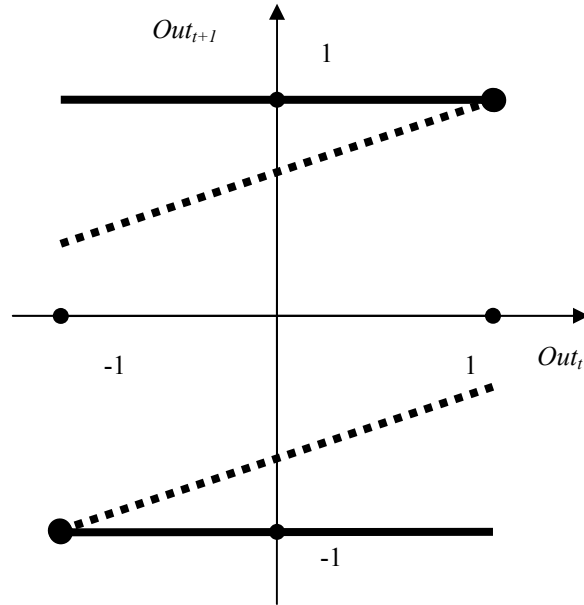
$$T(Out_t, NET) = K(NET)Out_t - (1 - K(NET)) \text{ для } NET < 0$$

Эти выражения можно обобщить в виде

$$T(Out_t, NET) = \text{Sign}(NET) + (Out_t - \text{Sign}(NET))K(NET).$$

Нетрудно видеть, что $K(NET)$ должно быть четной, положительной, невозрастающей функцией и $\lim_{NET \rightarrow \infty} K(NET) = 0$. В качестве такой функции можно взять, например,

$$K(NET) = \frac{2}{1 + |NET|}$$



Если NET велико, то $K(NET)$ мало, отображение сжимающее, динамика конвергентна и нейрон близок к классическому нейрону Мак-Каллоха и Питтса.

Если $NET > 1$, но не очень велико, то $K(NET) < 1$, и динамика конвергентна.

Если $NET = 1$, то $K(NET) = 1$ – получаем гомоклинический взрыв.

Если $NET < 1$, то $K(NET) > 1$ – отображение становится растягивающим, динамика хаотическая.

Возможности реализации хаотической динамики в оптических системах основаны на использовании нелинейных свойств оптических сред. Например, в схеме «голографический коррелятор в оптическом резонаторе» в качестве фазо-сопрягающих зеркал могут быть использованы регистрирующие среды с передаточной характеристикой, подобной приведенной на Рис.2.1.10, если эта характеристика удовлетворяет вышеприведенным требованиям.

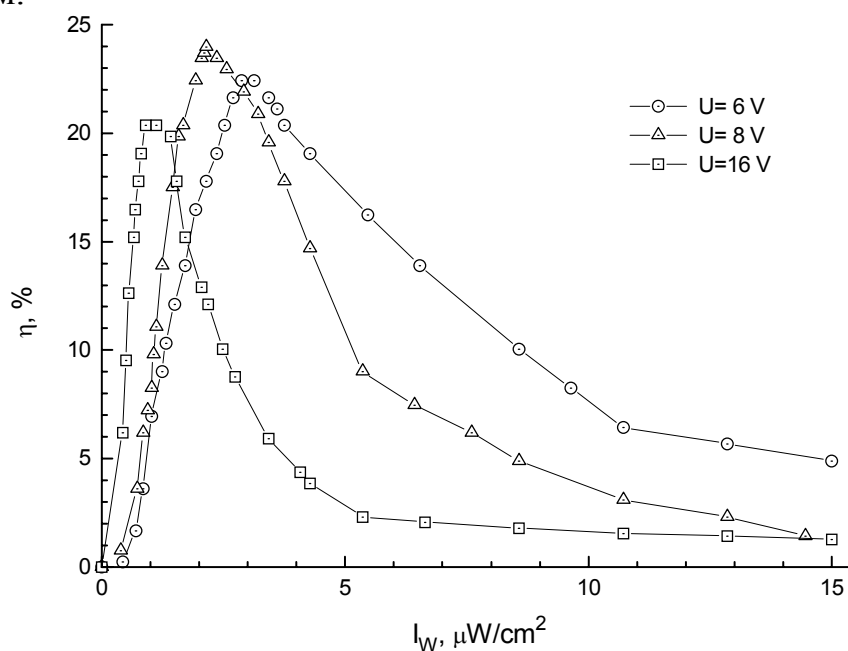


Рис. 2.1.10. Модуляционные характеристики оптически управляемой структуры стибнит - нематический жидкий кристалл ($\nu = 22 \text{ mm}^{-1}$, случай немодулированных во времени записывающих пучков). Зависимости сняты А.Н.Чайкой, структура разработана в ВНЦ ГОИ им.С.И.Вавилова И.Е.Моричевым, Н.И.Плетневой, Л.П.Амосовой

На рис.2.1.11 приведена бифуркационная диаграмма, рассчитанная для схемы «4-f Фурье-голографии с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости» применительно к использованию передаточных характеристик фазо-сопрягающего зеркала на структура фотополупроводник – жидкий кристалл, приведенных на рис.2.1.10.

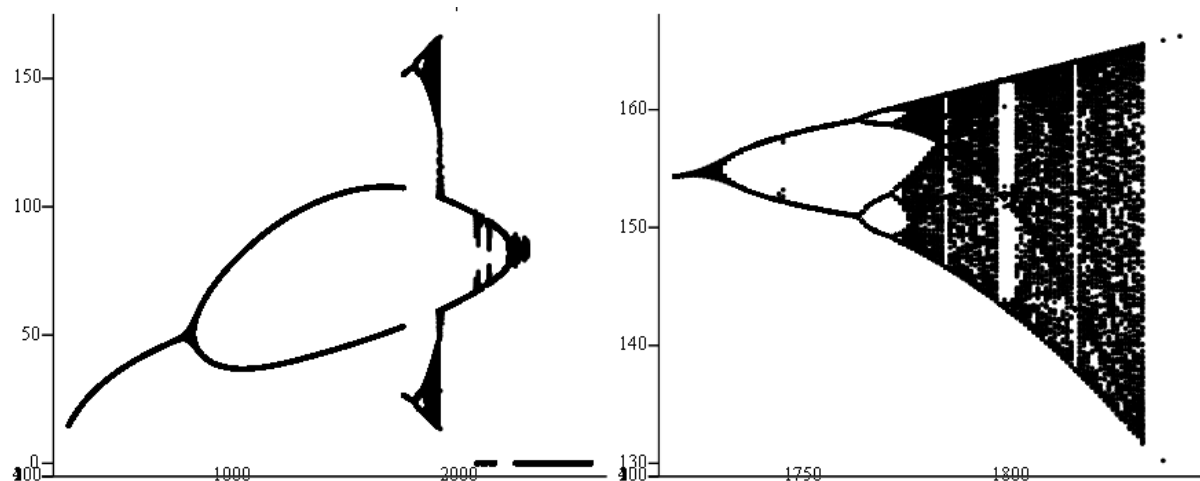


Рис.2.1.11. Бифуркационная диаграмма и ее увеличенный фрагмент, рассчитанные для итерирующего отображения, приведенного на Рис.2.1.9

На Рис.2.1.12. приведена схема разработанного группой исследователей Laurent Larger, Eric Genin, Jean-Pier Codgebuer and Vladimir Udaltsov из Laboratoire d'Optique P.M. Duffieux оптоэлектронного генератора для защищенных систем связи, использующего оптический фазовый модулятор работающий с частотой 12 GHz на структуре LiNbO_3 [3].

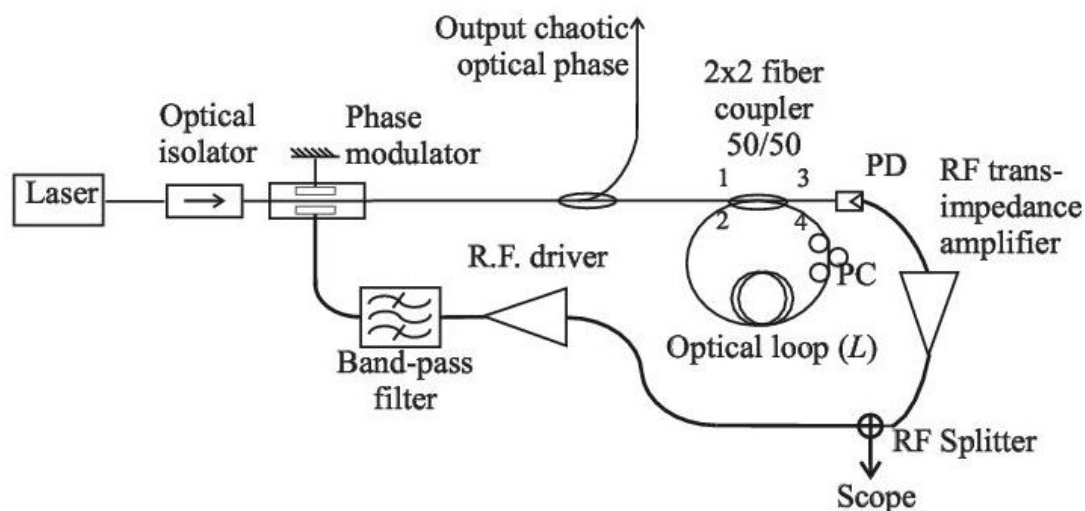


Рис.2.1.12. Оптоэлектронный генератор оптического сигнала с хаотической динамикой

Оптоэлектронный генератор состоит из высокостабильного лазера, освещающего фазовый модулятор на основе структуры LiNbO_3 , выход которого поступает на волоконную петлю длиной 1,25м., которая осуществляет нелинейную модуляцию интенсивности по отношению к входной модуляции фазы. Флуктуации интенсивности детектируются фотодиодом и усиливаются с тем, чтобы модулировать электронный вход модулятора фазы. Поскольку модуляция фазы происходит быстрее, чем

время прохождения петли, то для различных коэффициентов обратной связи могут быть получены различные виды колебаний. Если коэффициент обратной связи превосходит порог, то генерируется широкополосный хаотический режим.

Литература к Лекции 2.1.

1. Кроновер Р.М., Фракталы и хаос в динамических системах, М.2000.
2. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы, Спб, 2000.
3. Фриман Дж.У., Динамика мозга в восприятии и сознании: творческая роль хаоса // В сб. «Синергетика и психология». Вып.3. "Когнитивные процессы", Издательство «Когито-Центр», 2004.
4. Ижикевич Е.М., Малинецкий Г.Г., Модель нейронной сети с хаотическим поведением// Ин-т прикладной математики им.М.В.Келдыша. Препринт №17 за 1993, М., 1993.
5. *Laurent Larger, Eric Genin and Vladimir Udaltsov*, Optoelectronic phase chaos generator for secure communication, Int. Topical Meeting on Optoinformatics, St/Petersburg, 18-21 October 2004, Book of Abstracts, p.13
6. А.В.Павлов, О применимости голографических технологий при решении творческих задач // Сб.трудов IV международной конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», Коломна 2007, т.1, с.282-290.

Тема 2.2. Когнитивные системы. Теория функциональной системы П.К Анохина

В первой лекции мы отметили, что в настоящее время наибольший интерес в области ИИ вызывает парадигма когнитивной системы и привели некоторые ее существенные черты. Здесь необходимо отметить, что парадигма когнитивной системы во многом повторяет важнейшие моменты теории функциональной системы, разработанной под руководством академика П.К.Анохина. К сожалению, здесь мы встречаем еще один пример того, как тупость и ограниченность ревнителей чистоты марксизма-ленинизма фактически привели к утрате Россией своего научного приоритета – о работах П.К.Анохина за границей СССР мало кто знал, а сам он вынужден был тратить свое время и силы на доказательства того, что теория функциональной системы не противоречит догматам марксизма-ленинизма. Поэтому в настоящей лекции мы рассмотрим некоторые важнейшие моменты теории функциональной системы П.К.Анохина.

П.К.Анохин был учеником выдающегося отечественного физиолога академика И.П.Павлова, широко известного как автор учения об условных рефлексах. Это учение положило начало так называемому «рефлекторному подходу», согласно которому любое действие (акция) является ответом на поступающий на вход системы стимул, т.е. является реакцией системы на внешний раздражитель. Этот подход известен также под названием «рефлекторной дуги» (Рис.2.2.1.).

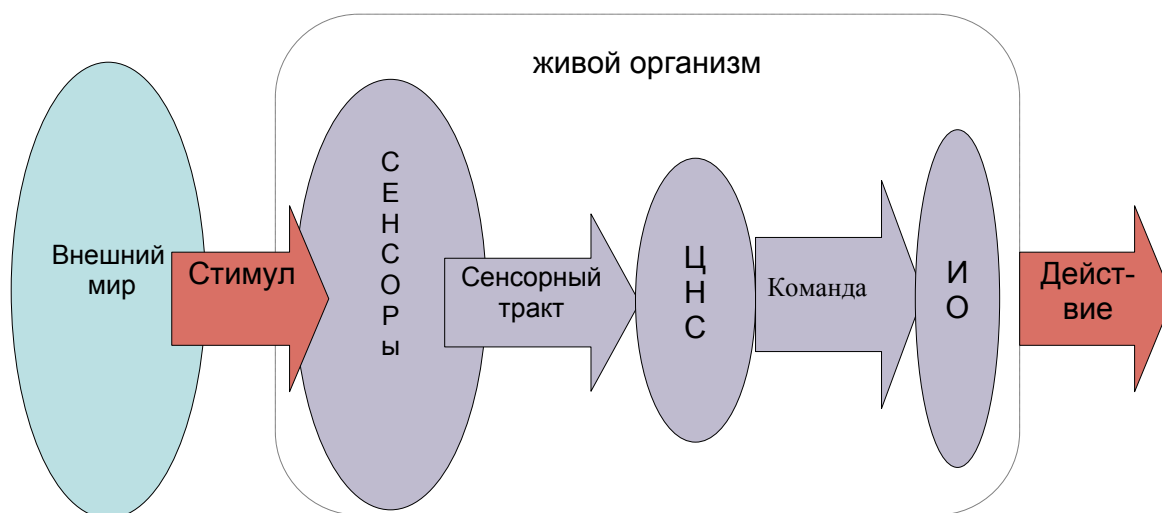


Рис.2.2.1. Принципиальная схема рефлекторной дуги

Согласно этому подходу, организм пассивно ожидает поступления стимула из внешнего мира. При поступлении стимула, он обрабатывается сенсорами, преобразуется сенсорным трактом, поступает в центральную нервную систему (ЦНС), которая вырабатывает команду на

исполнительные органы (ИО), совершающие заданное действие. На этом все заканчивается. Ни способность к предвидению, ни способность к целеполаганию в этой концепции не рассматриваются. Между тем, очевидно, что эти способности суть атрибуты интеллектуальной системы, а само понятие интеллекта даже в обыденном его понимании предполагает не пассивную, но активную роль во взаимодействии с окружающим миром.

В 1916г. И.П.Павлов выступил с докладом «Рефлекс цели». Более он термин «цель» в своих работах не употреблял. Это и понятно, поскольку в этом случае ставилось под сомнение все то величественное здание рефлекторного подхода, которое он возводил всю жизнь, и которое принесло ему славу и известность. Учение о рефлекторном процессе построено на принципе строго поступательного хода возбуждения от пункта к пункту по всей рефлекторной дуге. В вопросе формирования цели И.П.Павлов, наоборот, встретился с совершенно неожиданным принципом работы нервной системы - модель конечного результата поведенческого акта создается уже на начальных этапах распространения нервного возбуждения, т.е. раньше, чем закончится весь процесс формирования поведенческого акта, и раньше, чем будет получен сам результат.

Ввести сначала в нейрофизиологию, а потом и более широко, в когнитивную науку понятия цели, целеполагания, предсказания, и, тем самым, обогатить и кибернетику, и математику, и общую теорию систем, довелось ученику И.П.Павлова – академику Петру Кузьмичу Анохину.

В 1932-33 годах в результате экспериментов по замене сгибаемой мышцы разгибательной и наблюдением за процессом восстановления утраченных двигательных функций, была выдвинута идея обратной афферентации (от латинского *afferentus* – приносящий) – получения организмом информации о достигнутом результате и ее последующей обработке. Тем самым, идея обратной связи была выдвинута за 12 лет до появления кибернетики, выдвинута не математиками и инженерами, а физиологами! Дальнейшее развитие этого подхода и привело к формированию концепции функциональной системы, принципиальная архитектура которой, приведена на Рис.2.2.2.

Но прежде, чем рассматривать операционную архитектуру функциональной системы, необходимо остановиться на вопросе о том, что именно позволяет организовать взаимодействие многих независимых элементов в систему, что является *системообразующим фактором*. Этот вопрос, ключевой для формирования системного подхода, также был разрешен именно П.К.Анохиным, определившим, что системообразующим фактором является *полезный результат*, на достижение которого направлена деятельность системы. Ни в математике, ни в кибернетике вопрос о системообразующем факторе решен удовлетворительным образом не был. Предлагавшиеся определения системы страдали расплывчатостью и

неконкретностью, например, система определялась как нечто большее, нежели просто сумма ее элементов. Это, конечно, верно, но пользы от такого определения мало. Взгляд на результат как на ключевой фактор в понятии системы значительно изменил взгляды на систему вообще и дал новое освещение ряду принципиальных вопросов теории систем.

Прежде всего, оказалось возможным как всю деятельность системы, так и ее всевозможные изменения, представить целиком в терминах результата, что еще более подчеркнуло его решающую роль в поведении системы. Таким образом, деятельность системы может быть полностью выражена в вопросах, отражающих различные этапы ее формирования:

- 1) какой результат должен быть получен?
- 2) когда именно должен быть получен результат?
- 3) какими механизмами должен быть получен результат?
- 4) как система убеждается в достаточности полученного результата?

По сути дела, эти четыре вопроса разрешаются основными узловыми механизмами системы. Вместе с тем, в них выражено все то, ради чего формируется система.

Возникает также вопрос о том, откуда система знает про тот полезный результат, которого еще нет, который еще только должен быть получен в будущем. Иными словами, возникает вопрос о способности к целеполаганию, о функции предвидения или предсказания – вопросы, не вписывавшиеся в марксистско-ленинский материализм.

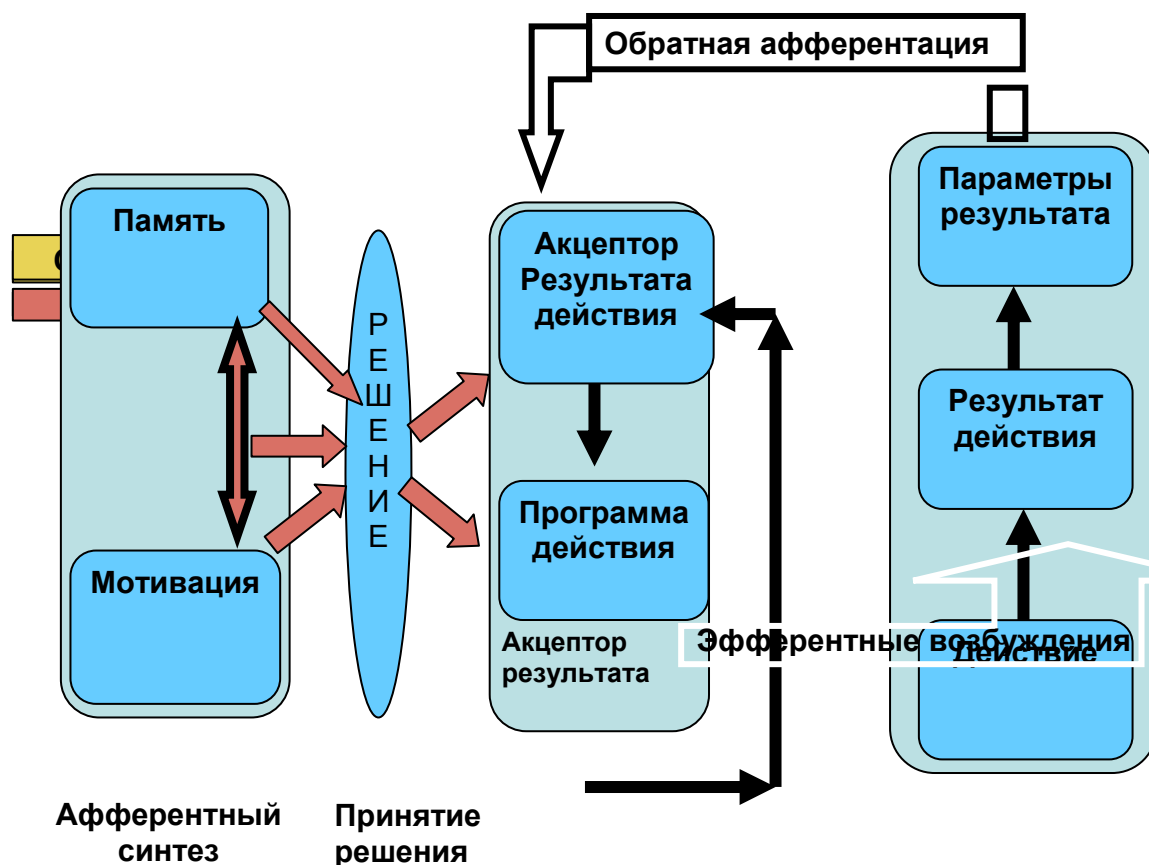


Рис.2.2.2. Архитектура функциональной системы

На Рис.2.2.2. приведена принципиальная, упрощенная операционная архитектура функциональной системы (ФС) по Анохину. В работе ФС можно выделить четыре основные стадии:

1. Афферентный синтез;
2. Принятие решения;
3. Формирование акцептора результата действия;
4. Совершение действия и оценка его результатов.

Рассмотрим эти этапы подробнее.

Первая стадия работы ФС – стадия *афферентного синтеза*. П.К.Анохин выделяет четыре решающих компонента афферентного синтеза, которые должны быть подвергнуты одновременной обработке с одновременным взаимодействием на уровне отдельных нейронов: доминирующая на данный момент мотивация, обстановочная афферентация, также соответствующая данному моменту, пусковая афферентация и, наконец, память. Основным условием афферентного синтеза является одновременная встреча всех четырех участников этой стадии функциональной системы. Например, наличие автомата с водой (обстановочная афферентация) становится актуальным только тогда, когда

человек хочет пить (доминирующая на данный момент мотивация), обстановка позволяет, есть вода и автомат (пусковая афферентация) и он знает, что этот автомат нальет ему воду в стакан, т.е. имеет уже опыт его использования, неважно, свой или чужой (память). Если хотя бы одного из этих компонентов нет, то на автомат обращают внимания.

Афферентный синтез имеет место на всех уровнях жизнедеятельности организма – как на уровне всего организма, так и на уровне отдельной клетки, в том числе, нейрона. Таким образом, даже отдельный нейрон должен иметь четыре различных входа, соответствующих четырем перечисленным типам входных воздействий.

В связи с этим П.К.Анохин обращает внимание на то, что существующая в нейрофизиологии тенденция изучать и рассматривать такие компоненты афферентного синтеза, как мотивация, память, стимул и т.п., в качестве отдельных, самодовлеющих проблем неверна и малоэффективна. Афферентный синтез, приводящий организм к решению вопроса, какой именно результат должен быть получен в данный момент, обеспечивает постановку цели, достижению которой и будет посвящена вся дальнейшая логика системы.

Следующий этап - *принятие решения*. Это один из самых интересных моментов в разворачивании системных процессов. Теория функциональной системы сделала этап принятия решения полноценным участником объективного процесса формирования системы, критического процесса, благодаря которому афферентная оценка всех условий завершается доступным исследованием механизмом. Согласно теории ФС, афферентный синтез, подчиняясь доминирующей в данный момент мотивации и под коррекцией памяти, ведет такой подбор возможных степеней свободы, при котором возбуждения избирательно направляются к мышцам, совершающим нужное действие.

Обратим внимание на фразу: «подбор возможных степеней свободы»! Точнее, речь в данном случае идет о выборе из того огромного числа степеней свободы, которым обладает система, только тех, которые необходимы для достижения цели. Вопрос выбора степеней свободы фактически и есть вопрос организации системы. Например, Эшби подсчитал, что матрица из 400 бинарных элементов (20×20) позволяет получить 10^{1020} возможных комбинаций. Нейронов в мозгу в среднем 14 млрд, нейроны отнюдь не бинарные элементы. Для того, чтобы такая сложная система как живой организм действовала целенаправленно, из этого гигантского числа степеней свободы необходимо выбрать ничтожную часть. Малейшее нарушение с выбором – и нарушается как минимум координация движений.

Возникает также весьма существенный вопрос о том, когда и как происходит принятие решения о получении именно того, а не другого результата. Существует гипотеза, что оценка возможных результатов при

данной доминирующей мотивации происходит уже в стадии афферентного синтеза, а то, что происходит в стадии принятия решения, делается уже результатом выбора на основе длительной оценки различных, внутренне формирующихся результатов.

Таким образом, принятие любого решения, после завершения стадии афферентного синтеза, является выбором наиболее подходящих степеней свободы в тех компонентах, которые должны составить рабочую часть системы. В свою очередь эти оставшиеся степени свободы дают возможность экономно осуществить именно то действие, которое должно привести к ожидаемому системой результату.

Как именно происходит это освобождение от избыточных степеней свободы и почему момент принятия решения часто имеет характер внезапной интуиции, особенно при решении творческих задач, — эти вопросы еще ждут своего ответа.

Следующий этап - формирование *акцептора результатов действия*. Аппарат акцептора результатов действия — один из самых интересных в деятельности мозга и практически так же универсален, как обратная афферентация и афферентный синтез. Концепция этого механизма нарушила доминировавшее до того представление о строго поступательном ходе возбуждений по центральной нервной системе согласно рефлекторному подходу. Акцептор результатов действия на основе многостороннего механизма афферентного синтеза предсказывает свойства того результата, который должен быть получен в соответствии с принятым решением, и, следовательно, опережает ход событий в отношениях между организмом и внешним миром.

Акцептор результатов действия должен сформировать нервные механизмы, которые позволяют не только прогнозировать признаки необходимого в данный момент результата, но и сличать их с параметрами реального результата, информация о которых приходит к акцептору результатов действия благодаря *обратной афферентации*. Именно этот аппарат дает единственную возможность организму исправить ошибку поведения или довести несовершенные поведенческие акты до совершенных благодаря тому, что формируется цикл: достигнутый результат — обратная афферентация — сличение и оценка реальных результатов в акцепторе результатов действия — выработка корректирующих воздействий — новый результат и т.д..

То, что аппарат акцептора результатов действия формируется непосредственно после принятия решения, доказано экспериментально.

Вероятно, что в стадии афферентного синтеза складывается несколько возможных результатов, затем производится выбор наиболее адекватного по отношению к данной доминирующей мотивации результата, который и реализуется. Остальные возможные результаты не выходят на

эфферентные (от латинского *efferentus* – уносящий) пути и, соответственно, не реализуются.

После отработки исполнительными органами поступивших к ним по эфферентным путям нервных возбуждений (управляющих команд), производится оценка параметров полученного результата. Результаты оценки обратной афферентацией приносятся в акцептор результатов действия, где и сличаются с ожидаемыми. По результатам сравнения реальных и ожидаемых результатов либо формируются корректирующие команды, либо организм принимает решение о достижении цели и переходит к следующему этапу своей жизнедеятельности.

Отметим, что момент сличения реальных и ожидаемых результатов интересен тем, что его результат зависит от того, что можно назвать уровнем интеллекта – при отрицательных результатах в аппарате сличения возникает рассогласование, активирующее ориентировочно-исследовательскую реакцию, которая, поднимает ассоциативные возможности мозга на высокий уровень, тем самым помогая активному подбору дополнительной информации.

Таким образом, из этого, более, чем краткого, обзора уже ясно, что теория функциональной системы, в отличие от рефлекторного подхода, отводит живому организму и, шире, познающему субъекту не пассивную, но активную роль. Прежде всего, речь идет о способности к предвидению как способности к предсказанию дальнейшего развития событий. Той способности, без обладания которой любой живой организм обречен.

Нетрудно видеть, что большинство из рассмотренных нами моделей ИНС относятся скорее к системам, вмещающимся в рамки рефлекторного подхода. Для перехода к искусственным интеллектуальным системам, хотя бы отчасти вписывающимся в рамки концепции функциональной системы, необходимо реализовать механизм предсказания, чему и будет посвящена следующая лекция.

Литература к Лекции 2.2.

1. Анохин П.К., Философский смысл проблемы естественного и искусственного интеллекта // В сб. «Синергетика и психология». Вып.3. "Когнитивные процессы". изд-во «Когито-Центр». 2004.
2. Анохин П.К., Идеи и факты в разработке теории функциональных систем // Психологический журнал (1984, т. 5, с. 107-118).
3. Анохин П.К., Шумилина А.И., Анохина А.П. и др. Функциональная система как основа интеграции нервных процессов в эмбриогенезе. Труды V съезда физиологов СССР. 1937, 148-156.
4. Анохин П. К. Функциональная система, как методологический принцип биологического и физиологического исследования. — В

- кн.: Системная организация физиологических функций. М., 1968, с. 5—7.
5. *Анохин П. К.* Теория функциональной системы. — «Успехи физиол. наук.», 1970, т. 1, № 1, с. 19-54.
6. *Анохин П. К.* Системный анализ вегетативной деятельности нейрона. — «Успехи физиол. наук», 1974, т. 5, № 2, с. 5—92.
7. *Моллер Р., Гросс Х.-М.* Восприятие через антиципацию // В сб. «Синергетика и психология». Вып.3. "Когнитивные процессы". изд-во «Когито-Центр». 2004.
8. *Фриман Дж. У.* Динамика мозга в восприятии и сознании: творческая роль хаоса // В сб. «Синергетика и психология». Вып.3. "Когнитивные процессы". изд-во «Когито-Центр». 2004.
9. *Князева Е. Н.*, Методы нелинейной динамики в когнитивной науке // В сб. «Синергетика и психология». Вып.3. "Когнитивные процессы", Издательство «Когито-Центр", 2004, с.29-48.
10. *Комбс А.*, Сознание: Хаотическое и странно аттракторное // В сб. «Синергетика и психология». Вып.3. "Когнитивные процессы", Издательство «Когито-Центр", 2004, с.49-60.

Тема 2.3. Голографический предсказатель случайных процессов

В лекции, посвященной теории Функциональной Системы П.К.Анохина, мы обратили внимание на такой важнейший атрибут интеллекта, неразрывно связанный с ассоциативностью мышления, как способность к предсказанию, понимаемая как способность к предвидению дальнейшего развития событий. Важность этого атрибута сложно переоценить, поскольку именно от развитости способности предвидения в значительной мере зависит как выживаемость индивида, так и его успешность в достижении жизненных целей.

П.К.Анохин в своих работах неоднократно подчеркивал, что именно признание ключевой роли предсказания позволило сделать принципиальный шаг от традиционного рефлекторного подхода к парадигме функциональной системы (ФС). Предсказание является тем механизмом, что обеспечивает реализацию целого ряда когнитивных способностей, определяющих эффективность взаимодействия организма с внешним миром, в том числе, восприятия. В частности, в когнитивной психологии хорошо известен феномен «познавательного дрейфа», заключающийся в том, что при восприятии внимание акцентируется именно на новых, ранее не встречавшихся познающему субъекту фрагментах информации. В парадигме ФС Анохина этот эффект реализуется в акцепторе результатов действия при сравнении результата предсказанного с результатом полученным. Задача предсказания имеет также и сугубо прикладной аспект, например, при эксплуатации телекоммуникационных и инженерных сетей, сложных технологических комплексов [1-4].

В предыдущих лекциях мы упомянули, что НС являются универсальными аппроксиматорами и, тем самым, способны решать задачу предсказания как задачу экстраполяции. Задача предсказания в теории случайных процессов рассматривается как частный случай задачи наилучшей оценки [5-7]. Классическим методам, развитым в теории случайных процессов, зачастую противопоставляются нейросетевые (НС) методы предсказания [8-11], в том числе, основанные на идее лингвистического моделирования [1], в силу способности НС методов решать трудноформализуемые задачи посредством построения невербализуемых ассоциаций. Отметим, что противопоставление классических и НС методов в данном случае не имеет абсолютного характера, поскольку:

- регрессионные модели могут трактоваться как частный, строго формализованный, случай ассоциативных методов обработки;
- для искусственных НС, созданных на реальной физической базе, принцип неформализуемости модели обработки всегда ограничен

реальными свойствами используемых физических явлений, регистрирующих сред и устройств.

В этой лекции мы увидим, что ОНС архитектуры «4f-схема Фурье-голографии с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости» (Рис.2.3.1.) реализует модель множественной линейной регрессии, сохраняя такие атрибуты НС, как обучаемость, ассоциативность отклика и отсутствие формализованного описания обрабатываемой информации.

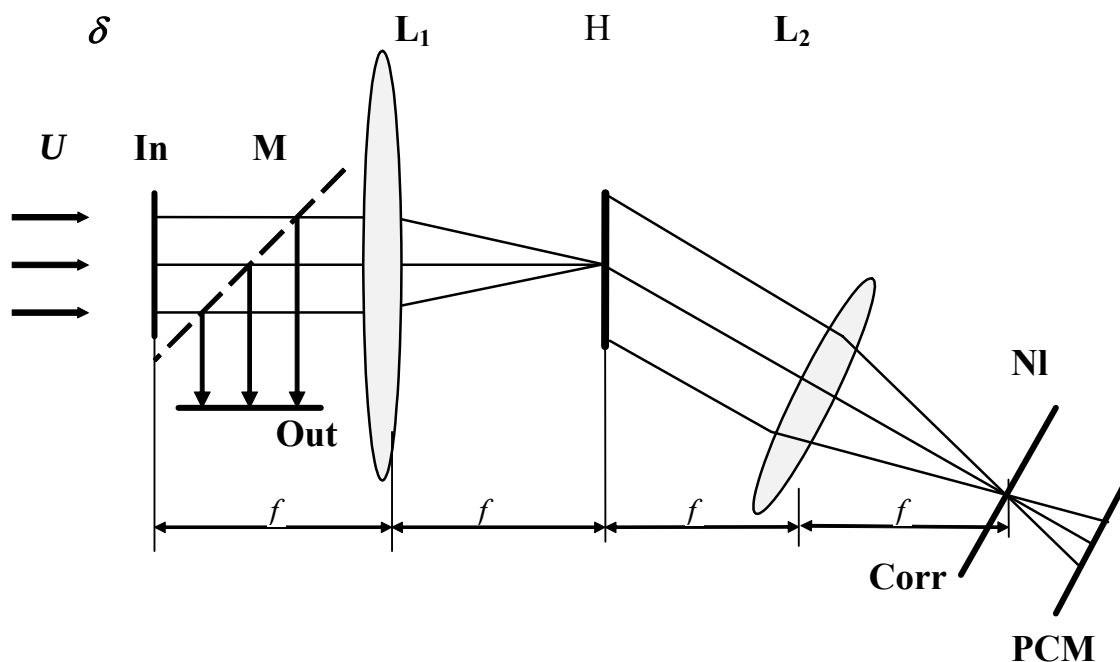


Рис.2.3.1. Схема 4-f Фурье-голографии с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости

Для упрощения выкладок, но без потери общности, примем допущение о разделимости переменных в функции, описывающей изображение как реализацию случайного поля. Это допущение обычно имеет силу для большинства реальных изображений [15].

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. Примем, что Фурье-голограмма записана с эталонного изображения Im_A , восстанавливается объектным изображением Im_B , оба изображения суть функции, принадлежащие одному пространству. Наилучшая линейная оценка значения случайной величины $Im_{Bpred}(x_k)$ по $Im_A(x)$ в точке $x_k, k > 0$, определяется выражением [7]

$$Im_{Bpred}(x_k) = \int_{x_{Min}}^{x_0} Im_B(x_0 - x) a(x) dx, \quad (2.3.1)$$

где весовая функция $a(x)$ находится из решения уравнения [7]

$$\int_{x_{Min}}^{x_0} a(x) C_{BA}(|x - \xi|) dx = C_{BA}(x_k + \xi) \quad , \quad (2.3.2)$$

где C_{BA} обозначает функцию взаимной корреляции $Im_B(x)$ и $Im_A(x)$. 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 [6]. Для решения задачи в рассматриваемой ОНС дважды применим к (2.3.1) фурье-преобразование и теорему Бореля о свертке. В результате, учитывая инверсию координат, возникающую в силу нереализуемости в оптике обратного фурье-преобразования, получим

$$Im_{Bpred}(x_k) = F\left(F(Im_B(x)) \cdot F(a(x))\right). \quad (2.3.3)$$

Выражение (10.2) в фурье-пространстве примет вид

$$F(a(x)) \cdot F(C_{BA}(\xi)) = F(C_{BA}(x_k + \xi)) \quad ,$$

откуда получим

$$F(a(x)) = \frac{F(C_{BA}(x_k + \xi))}{F(C_{BA}(\xi))}. \quad (2.3.4)$$

Подставив (2.3.4) в (2.3.3), получим

$$Im_{Bpred}(x_k) = F\left(F(Im_B(x)) \cdot \frac{F(C_{BA}(x_k + \xi))}{F(C_{BA}(\xi))}\right)$$

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

$$Im_{Bpred}(x_k) = F\left(\frac{F(C_{BA}(x_k + \xi))}{F^*(Im_A(x))}\right), \quad (2.3.5)$$

где астериск обозначает комплексное сопряжение.

Выражение (2.3.5) может быть реализовано в обсуждаемой архитектуре оптической нейронной сети (Рис.2.3.1) посредством процедуры, состоящей из следующих двух этапов:

1 этап – формирование в слое С распределения $C_{BA}(\xi)$. На этом этапе НС работает как классический голографический коррелятор Ван дер-Люгта и фурье-голограмма Н согласована с эталоном, т.е. $H(\nu)=F(Im_A^\eta)$.

2 этап – прохождение возбуждения от выделенного из АКФ фрагмента $C_{BA}(x_k+\xi)$ в обратном направлении $C \rightarrow H^{-1} \rightarrow I$ через матрицу связей с инверсной передаточной характеристикой $H^{-1}(\nu)=(F(Im_A^\eta))^{-1}$. Методы реализации инверсных голограмм хорошо известны [16] и заключаются, в частности, в использовании голографических регистрирующих сред с обратной зависимостью дифракционной эффективности от экспозиции. В результате реализации второго шага амплитуда света в точке x_k плоскости Out будет пропорциональна искомому значению $Im_{Bpred}(x_k)$.

Структура связей при реализации модели

Рассмотрим особенности структуры связей, формируемой голограммой, благодаря которым возможна реализация модели предсказателя.

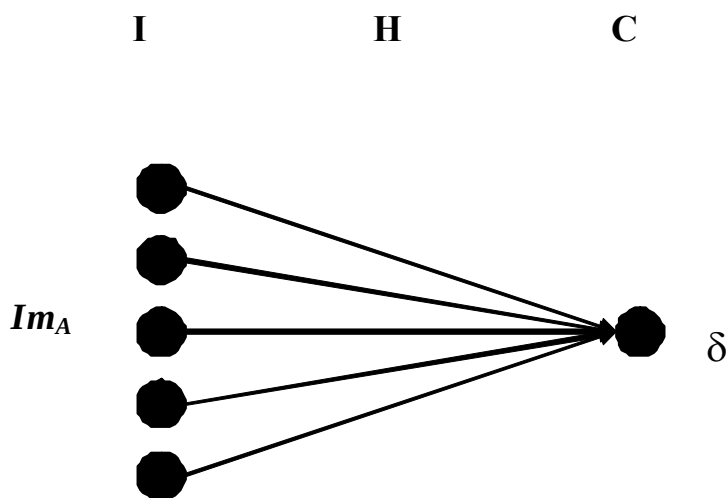


Рис.2.3.2. Структура связей при записи голограммы

На этапе записи голограммы, т.е. обучения нейронной сети, формируется структура связей типа «звезда Гроссберга» (рис.2.3.2.), соединяющая слой сенсорных нейронов (слой I), активированных эталонным изображением Im_A , с единственным вычислительным нейроном слоя С – точечным опорным источником, формирующим в схеме Рис.2.30.1. плоскую опорную волну (δ -нейрон на рис.2.3.2.).

Традиционный подход к созданию искусственных нейронных сетей (ИНС) предполагает, что обученная НС работает именно с той структурой

связей, которая была сформирована при обучении – в данном случае «звездой Гроссберга» (рис.2.3.2.). Это безусловно верно для ИНС с созданных на электронной элементной базе, в которых связи локализованы в виде элементов схемы. Однако, реальные свойства фундаментального явления дифракции и голограммы как дифракционного элемента, реализующего матрицу весов межнейронных связей, вносят коррективы в этот постулат, существенно расширяя возможности ассоциативной обработки, которые и будут продемонстрированы ниже.

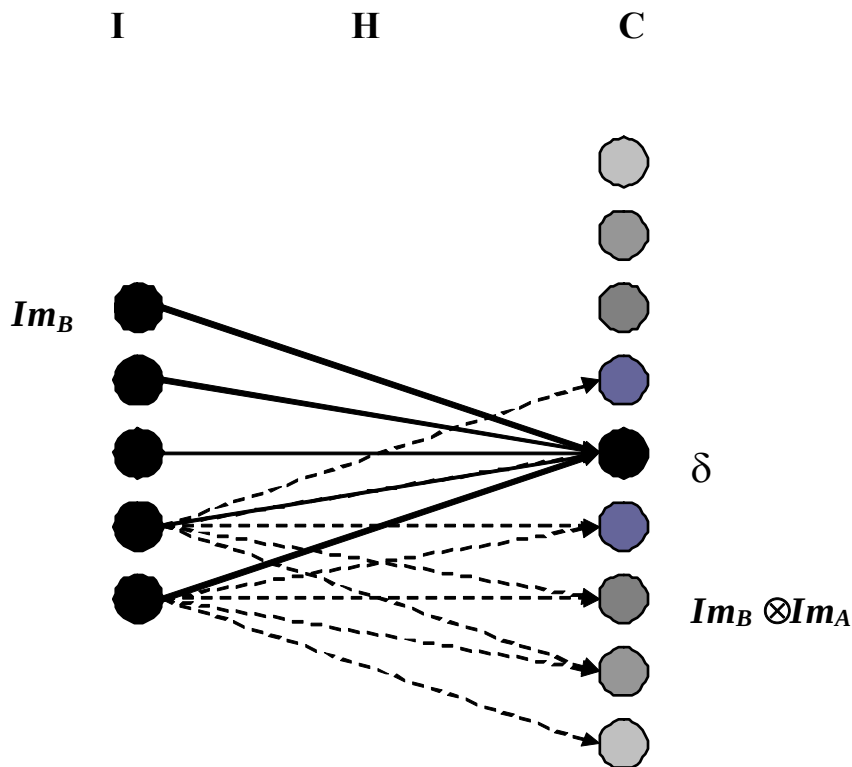


Рис. 2.3.3. Структура связей при восстановлении тонкой голограммы Фурье

Если голограмма записана на «тонкой» регистрирующей среде, то она обладает свойством угловой инвариантности. Свойство угловой инвариантности в терминах схемы рис.2.3.1. – свойство инвариантности голограммы к положению δ -нейрона. В результате, каждый нейрон слоя I, активированный освещающим голограмму изображением Im_B , независимо от других I-нейронов активирует записанную на голограмме звезду Гроссберга. Каждая звезда, в свою очередь, восстанавливает в слое C эталонное изображение Im_A , т.е. активирует N_A нейронов, где N_A – число элементов разрешения (активных нейронов) в эталонном изображении Im_A . Соседний I-нейрон im_{Bi+1} также активирует свою звезду Гроссберга, восстанавливая в слое C эталонное изображение Im_A , смещенное относительно предыдущего на один нейрон (Рис.2.3.3., для простоты пунктиром показаны только связи от «нижних» I-нейронов). Суперпозиция восстановленных в плоскости C и смещенных друг относительно друга

эталонных изображений Im_A и формирует функцию взаимной корреляции $(Im_B \otimes Im_A)$ освещающего Im_B и эталонного изображений Im_A .

Таким образом, вследствие свойства угловой инвариантности, голограмма при ее освещении изображением Im_B формирует не одну, как НС с локализованными связями, а N_B звезд Гроссберга, которые в слое С активируют $N_C = N_A + N_B - 1$ нейронов.

Аналогичным образом, при обращении волнового фронта тонкая по критерию угловой селективности голограмма восстановит $N_A + N_B$ звезд Гроссберга – Рис.2.3.4.

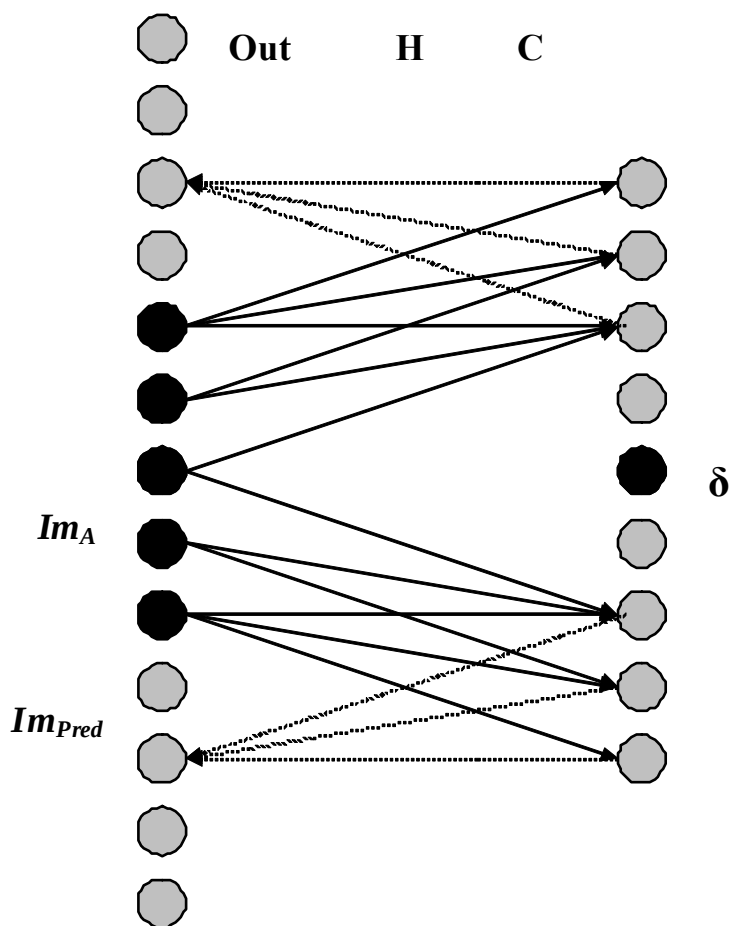


Рис.2.3.4 Структура связей ОНС при реализации модели линейного предсказателя

На Рис.2.3.4 приведена эта структура связей, обеспечивающих формирование решения (2.3.5). Для упрощения рисунка приведены только связи для $k=2$. Из Рис.10.4 видно, что если фурье-голограмма обладает свойством угловой инвариантности, т.е. тонкая, то требование на выделение на втором шаге фрагмента $C(x_k + \xi)$ из автокорреляционной функции выполняется автоматически для всех $k \in [0, N_A^\eta]$.

Реализация выражения (2.3.5) предполагает выполнение условия $\xi \in [x_{Min}, x_0]$, или в дискретной форме $k \in [0, N_A^\eta]$. Из Рис.2.3.1 видно, что k -

тый I-нейрон получает возбуждение от $(N_A^n - k)$ C-нейронов и через них связан с $(N_A^n - k)$ I-нейронами, активированными Im_A^n . Иными словами, физически реализуемо условие $\xi_k \in [0, (N_A^n - k)]$, т.е. предсказание на глубину k вычисляется по базе $(N_A^n - k)$, причем полный набор связей не обеспечивается. Полный набор связей возможен для $k = N_A^n - N_B^n$.

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 прохождения света голограммы с инверсной передаточной характеристикой. В случае, если обрабатываемое изображение может трактоваться как реализация стационарного в широком смысле случайного поля, то ОНС строит корректное предсказание для данной реализации. В реальности критерию стационарности удовлетворяет только крайне ограниченный класс изображений. Если обрабатываемое изображение не удовлетворяет критерию стационарности, а большая часть реальной информации свойством стационарности не обладает, то возникает аналогия с биологическими прототипами ИИ, которые также в большинстве случаев строят внутреннюю модель окружающего мира, исходя из примата устойчивости модели по отношению к ее адекватности.

Свойство линейности регрессии в рамках данной технической реализации определяется применимостью интеграла суперпозиции к описанию распространения света в оптических системах. Переход к реализации модели нелинейной регрессии, дающей более широкие возможности для обработки реальной информации, возможен в рамках *нелинейной оптики*, учитывающей взаимодействие излучения со средой, в которой оно распространяется.

В свете современных тенденций развития оптических информационных систем необходимо еще раз отметить существенное требование к физической реализации модели – *Фурье-голограмма должна обладать свойством угловой инвариантности, т.е. должна быть тонкой*. 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. Возможно, это противоречие суть лишь частный случай *более общего принципа, ограничивающего возможности одновременного увеличения объема памяти и интеллектуальных способностей одного устройства*.

Литература к Лекции 2.3.

1. *Pedricz W., Vasilakos A.*, Linguistic Models and Linguistic Modeling// IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 1999, v.29, 6.
2. *Grossglauser M., Bolot J.C.*, On the Relevance of Long-Range Dependence in Network Traffic, //IEEE Trans. on Networking, 1999, v.7, №5.
3. *Roughan M., Veitch D., Abry P.*, Real-Time Estimation of the Parameters of Long-Range Dependence// IEEE Trans. on Networking, 2000, v.8, №4.
4. *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.
5. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.*, Теория случайных процессов и инженерные приложения, М.Высшая школа, 2000.
6. *Вентцель А.Д.*, Курс теории случайных процессов, М. Наука, 1975.
7. *Grimmet G.R., Sterzaker D.R.*, "Probability and Random Processes", Oxford. Oxford Sc. Publ., Claredon Press, 1992.
8. *Carpenter G.A.*, Distributed learning, recognition, and prediction by ART and ARTMAP neural networks // Neural Networks , 1997, v.10, №8
9. *Wakuya H., Zurada J.M.*, Bi-directional computing architecture for time series prediction // Neural Networks, 2001, v.14, №9.
10. *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.
11. *Zemouri R., Racocceanu D., Zerhouni N.*, Recurrent radial basis function network for time-series prediction // Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, v.16, №5-6.
12. *Павлов А.В.*, Об алгебраических основаниях Фурье-голографии// Оптика и спектроскопия, 2001, т.90, №3.
13. *Кулешов А.М., Шубников Е.И., Смаева С.А.*, Об оптимальности голографического согласованного фильтра,// Оптика и спектроскопия, 1986, т.60, №6.
14. *Александрина С.А., Кулешов А.М.*, Влияние режекции низких пространственных частот спектра на параметры сигнала в голографическом корреляторе // Оптика и спектроскопия, 1990, т.68, №3.
15. *Сергеев Г.А., Янутин Д.А.*, Статистические методы исследования природных объектов, Л., Гидрометеиздат, 1973.-300с.
16. *Гуревич С.Б., Константинов В.Б., Соколов В.К., Черных Д.Ф.*, Под.ред. Гуревича С.Б., Передача и обработка информации голографическими методами – М., Сов.радио, 1978, 304 с.
17. *Павлов А.В.*, О применимости модели линейной регрессии к описанию Фурье-голографии // Оптика и спектроскопия, 2005, т., №4

Тема 3.1. Начала теории нечетких множеств

В первой лекции мы отметили, что важнейшей составной частью современного подхода к проблеме ИИ является теория нечетких множеств (ТНМ). Понятие нечеткости, лежащее в основе ТНМ, суть частный случай более общего *НЕ-фактора неоднозначность* [1]. Термин *НЕ-факторы* был предложен А.С.Нариньяни в начале 80-х годов с целью учета тех особенностей интеллекта, которые соотносятся с (цитата по [1]):

- формами знания, пока плохо поддающимися формализации, при том, что эта часть знания несравнимо больше, чем формализованная;
- различными дефектами знаний и данных;
- возможными формами незнания, являющегося неотъемлемой и основной частью любого знания.

На сегодня важнейшее достоинство ТНМ с точки зрения ее практической применимости – существенно более глубокая математическая проработки и формализация с использованием существующей математики по сравнению с остальными НЕ-факторами, суть важными для адекватного описания и моделирования интеллектуальной деятельности (недоопределенность, неточность, неполнота, некорректность и др.). Поэтому мы сосредоточимся именно на ТНМ.

Существует несколько подходов к формализации понятия нечеткости [3]. Рассмотрим интуитивно понятный подход, обобщающий понятие традиционного (четкого) множества.

Основное понятие ТНМ – степень принадлежности элемента множества μ . В классической теории множеств элемент либо принадлежит множеству ($\mu=1$), либо нет ($\mu=0$). Нечеткое множество (НМ) образуется посредством обобщения понятия принадлежности, т.е. расширения двухэлементного множества значений $\{0,1\}$ до континуума $[0,1]$.

Определение 3.1.1. НМ $A = \{(x, \mu_A(x))\}$ определяется математически как совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов x универсального множества X и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(x)$ или, поскольку функция принадлежности $\mu_A(x)$ является исчерпывающей характеристикой НМ, непосредственно в виде функции $\mu_A(x)$, определяемой как отображение

$$\mu : X \rightarrow [0,1],$$

где X – универсальное множество (область определения функции принадлежности $\mu_A(x)$).

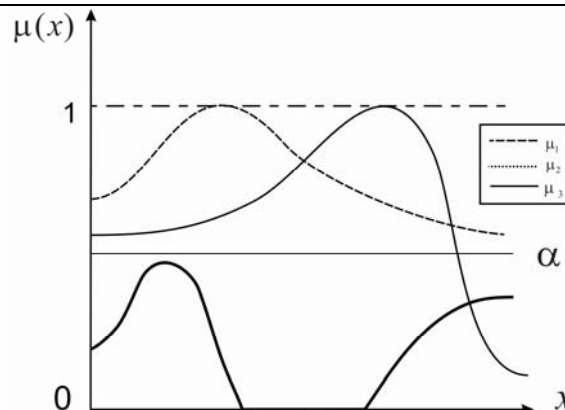
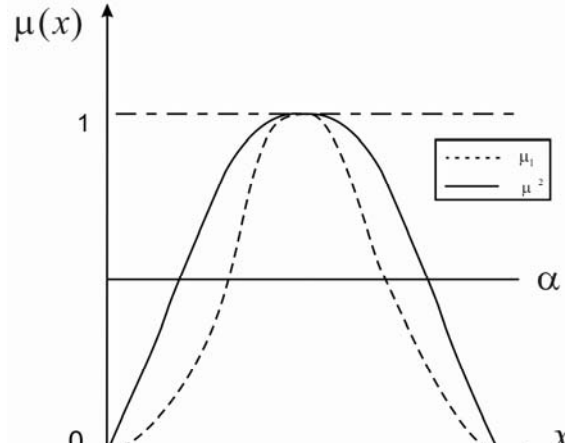
Операции над НМ из класса всех НМ $F(X) = \{\mu | \mu : X \rightarrow [0,1]\}$ универсального множества X , как следует из определения 3.1.1.,

определяются над функциями принадлежности и могут вводиться разными способами. Рассмотрим для примера некоторые из ставших уже классическими операций, приведенные в Табл.3.1.1.

Табл.3.1.1. Операции над нечеткими множествами

Название операции	Символическая запись	Связка	Графическое представление
Дополнение	$\mu_3(x) =$ $\bar{\mu}(x) = 1 - \mu(x)$ $\forall x \in X$	НЕ	
Пересечение I - MIN	$\mu_3(x) =$ $(\mu_1(x) \wedge \mu_2(x)) =$ $\min\{\mu_1(x), \mu_2(x)\}$ $\forall x \in X$	И	
Объединение I - MAX	$\mu_3(x) =$ $(\mu_1(x) \vee \mu_2(x)) =$ $\max\{\mu_1(x), \mu_2(x)\}$ $\forall x \in X$	ИЛИ (ЛИ БО ..., ЛИБ О)	

	$\mu_3(x) =$ $(\mu_1(x) \wedge \mu_2(x)) =$ $\max\{0, \mu_1(x) + \mu_2(x) - 1\}$ $\forall x \in X$	И	
Объединение II – ограниченная сумма	$\mu_3(x) =$ $(\mu_1(x) \vee \mu_2(x)) =$ $\min\{1, \mu_1(x) + \mu_2(x)\}$ $\forall x \in X$	ИЛИ	
Пересечение III – алгебраическое произведение	$\mu_3 = (\mu_1 \cdot \mu_2)(x) = \mu_1(x) \cdot \mu_2(x)$ $\forall x \in X$	И	
Объединение III – алгебраическая сумма	$\mu_3(x) = (\mu_1 \overset{\wedge}{+} \mu_2)(x) =$ $\mu_1(x) + \mu_2(x) - \mu_1(x)\mu_2(x)$ $\forall x \in X$	ИЛИ	

Разность	$\mu_3(x) = \mu_1(x) - \mu_2(x) = \max\{0, \mu_1(x) - \mu_2(x)\}$ $\forall x \in X$		
Концентрирование	$\mu_3(x) = \mu^2(x)$ $\forall x \in X$	Очень	

Приведем основные понятия ТНМ:

Определение 3.1.2 (Нормальность) НМ A нормально, если верхняя граница его ф-ции принадлежности равна единице, т.е. $\sup_{x \in X} \mu_A(x) = 1$. Если $\sup_{x \in X} \mu_A(x) < 1$, то НМ называется субнормальным.

Определение 3.1.3. НМ пусто, если

$$\mu_A(x) = 0; \forall x \in X.$$

Определение 3.1.4. Множеством уровня α (α -срезом) называется четкое подмножество универсального множества X , определяемое

$$A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}; \alpha \in [0, 1]$$

Определение 3.1.5. Саппорт НМ может быть определен как множество уровня 0.

Определение 3.1.6. НМ A называется выпуклым тогда и только тогда, когда, когда его функция принадлежности выпукла, т.е. для каждой пары точек x, y из X выполняется условие

$$\forall \lambda \in [0,1]; \mu_A(\lambda x + (1-\lambda)y) \geq \min(\mu_A(x), \mu_A(y)).$$

Для понимания адекватности ТНМ особенностям интеллектуальной деятельности рассмотрим простейший пример. Представим объем знаний человека и воспринимаемую им информацию, например, условия задачи, в виде множеств. В жизни все сталкивались с людьми, которых мы определяем терминами «ограниченный», «узко мыслящий» и, наоборот, с людьми, которых мы характеризуем как широко смотрящих на вещи, широко мыслящих. Для первого типа людей характерно использование классических, «четких» множеств (Рис.1.1.1.а), для второго – нечетких (Рис.3.1.1.б). Решить задачу – значит найти пересечение множества, представляющего условия задачи, с множеством собственных знаний. Соответственно, если задача сложная, то множества не пересекаются (очевидным образом) – для первого типа людей задача не разрешима. А широко мыслящий человек найдет пересечение «на хвостах» функций принадлежности и за эти «хвосты» «вытянет» решение.

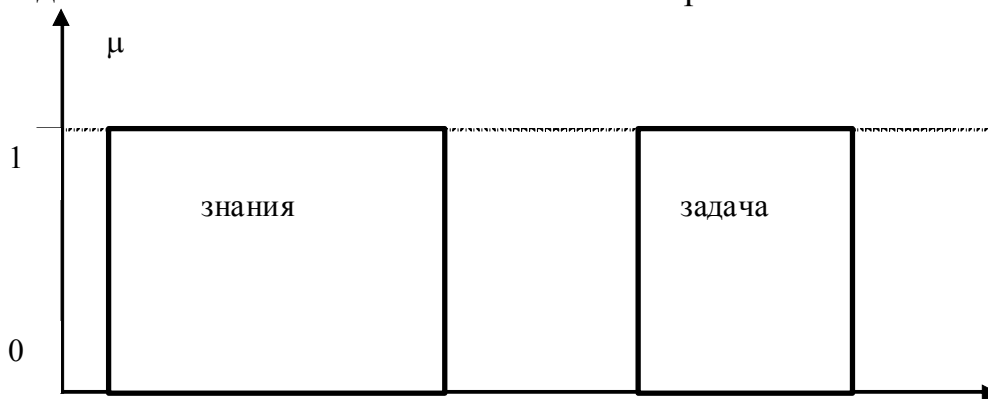


Рис.3.1.1.а Представление знания и задачи ограниченным человеком – множества не пересекаются, решения не найдено

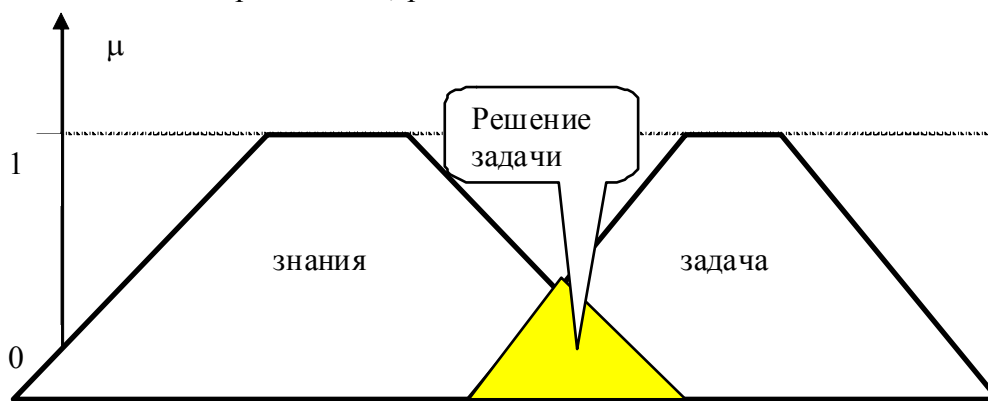


Рис.3.1.1.б Представление знания и задачи широко мыслящим человеком – есть пересечения, есть решение

С этой точки зрения понятно, почему часто решения сложных задач приходят во сне (классический пример – таблица Менделеева) – во сне

происходит «фаззификация» (от английского термина Fuzzy – нечеткий), т.е. размывание множеств. И этот же пример поясняет, чем гений отличается от сумасшедшего – у гения, как и у сумасшедшего чрезвычайно широкие функции принадлежности, но первый понимает, на каких уровнях (значениях μ) он нашел пересечение, а сумасшедший – нет. Для сумасшедшего $\forall \mu=1$.

В настоящее время сформировалось понимание нечеткости как свойства модели, имеющего причиной нелинейность определяющей модель операции, например, операции отрицания. Как показал Колмогоров [8], вероятность суть аддитивная мера на алгебре. Ниже мы увидим, что мера порождается операцией, определяющей дуальность определяющих алгебру операций, в частности, аддитивная мера порождается линейным отрицанием. Если операция, задающая дуальность, нелинейна, то мера свойством аддитивности не обладает, т.е. классическая теория вероятностей может оказаться неадекватна существенно нелинейным системам.

Применительно к голографическим системам, в рассматриваемом аспекте важно, что, как показано в цикле работ [9-11] любое измерение как в классических, так и квантово-механических системах представляет собой форму вывода «Обобщенный Modus Ponens». Интуитивно очевидна трактовка явления дифракции как причины возникновения нечеткости в оптике. Это предположение для приближения Фурье-оптики будет строго подтверждено в следующей лекции, где мы увидим, что классическая 4-f схема Фурье-голографии адекватно описывается нечеткозначимой логикой, в которой истинностная функция принимает значения из множества нечетких подмножеств.

Литература к Лекции 3.1.

1. *Нариньяни А.С.* НЕ-факторы 2004// Труды Девятой Национальной Конференции по Искусственному Интеллекту, 28.09 – 02.10.04, Тверь, М.Физматлит,2004,Т.1, с.420-432.
2. *Заде Л.*, Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений // Математика. Новое в зарубежной науке, М., Мир, 1976, в.3
3. *Новак В., Перфильева И., Мочкорж И.*, Математические принципы нечеткой логики. М.Физматлит.2006 - 352С.
4. *Э. Трильяс, К. Альсина, А. Вальверде.* Нужны ли в теории нечетких множеств операции MAX, MIN и 1-j? / В кн. "Нечеткие множества и теория возможностей" под ред. Р.Р. Ягера. - М.: 1986. – С. 199-228.
5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.

Тема.3.2.Оптические реализации нечетких систем. Алгебраические основания оптических реализаций нечетких систем

Традиционно, оптические реализации нечетких систем делят на две группы – логические процессоры, реализующие строго определенный набор логических операций, и системы логического вывода, известные также под термином «нечеткая ассоциативная память», реализующие более сложные операции, относящиеся к классу нечетких ассоциаций.

В рамках первого класса систем предложены различные архитектуры, использующие матричные источники и приемники излучения – как линейки, так и двумерные матрицы, более сложные схемы на их основе, в том числе, комбинированные с системой памяти, системы распознавания и морфологической обработки изображений.

Большой интерес представляют системы из второго класса, реализующие правила логического вывода «Обобщенный Modus Ponens». Принципиальная схема такой системы приведена на Рис.3.2.1. Как и для НС, ключевой элемент нечеткой системы – ассоциатор (MP), связывающий пару векторов. В отличие от НС, где для набора ассоциируемых векторов веса связей суммируются в процессе обучения, в нечетких системах ассоциации для каждой пары векторов устанавливаются независимо, а суммируются их выходы.

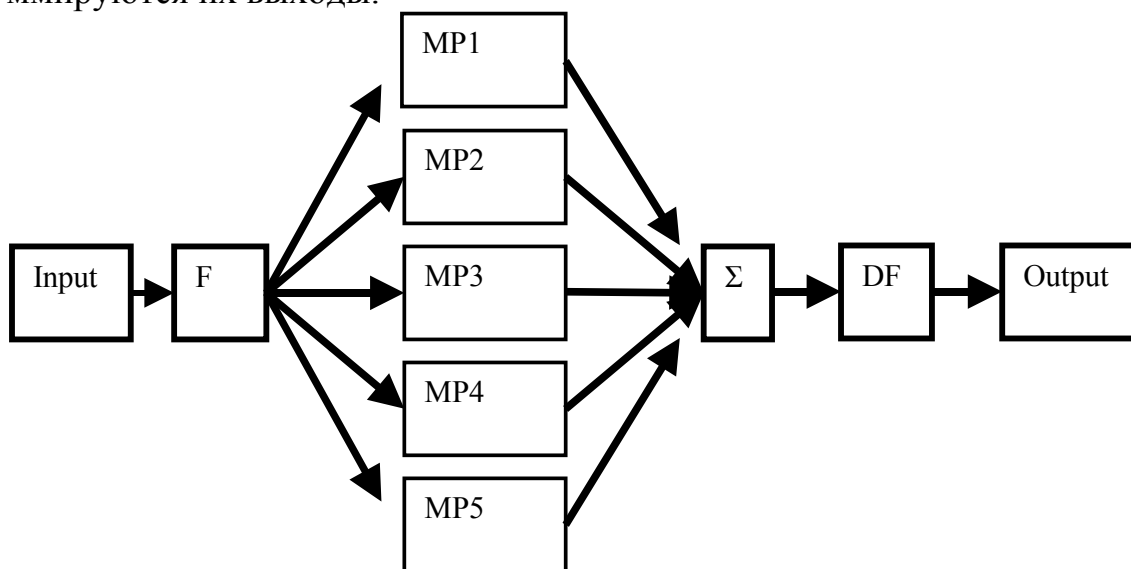


Рис.3. 2. 1. Принципиальная схема нечеткой системы. Input – вход, F – блок ввода нечеткости (fuzzifier – блок фаззификации), MP – ассоциаторы, хранящий каждый одну ассоциацию в виде правила «Modus Ponens», Σ – сумматор, DF – блок уменьшения нечеткости (defuzzifier)

Из Рис.3.2.1. следует возможность применения для реализации нечетких систем схемы Фурье-голографии и как ассоциатора, и как блока F. Ниже мы рассмотрим эти возможности, попытавшись построить алгебру, адекватную рассматриваемым оптическим схемам.

Используемые определения и аппарат

Определение 3.2.1 Для целей настоящего рассмотрения определим алгебру как модель $\langle X, N, \cdot, \oplus \rangle$, где X – универсум, N – операция отрицания, $\cdot$ и $\oplus$ – операции абстрактного умножения и сложения, соответственно.

Определение 3.2.2. Определим логику как конструкцию $\langle X, N, \cdot, \oplus, T \rangle$, где T – истинностное отображение $T: P \rightarrow L$, где P – множество всех высказываний, L – решетка значений истинности. Если $L = \{0, 1\}$, то мы имеем дело с классической «строгой» логикой, если $L = [0, 1]$, то логика многозначная, если L – множество нечетких подмножеств, то логика нечеткозначимая.

Определение 3.2.3. Примем неограниченный плоский волновой фронт в качестве универсального множества X . Тогда любое изображение Im , т.е. поле в плоскости или транспарант суть подмножество X . Элементы изображения (пиксели) суть элементы подмножества, а функция принадлежности определяется как отображение $Im: X \rightarrow [0, 1] \times P_{Im}$, где $[0, 1]$ – интервал нормированных амплитуд, P_{Im} – фазовый член, $\times$ – символ декартового произведения. Для простоты, но без потери общности ограничимся в рамках статьи рассмотрением только амплитудных изображений Im . Включение в рассмотрение фазовых компонент ведет к модели уровня пространства, сохраняя при этом все определенные ограничения.

Определение 3.2.3. Определим коммутативную, ассоциативную и неубывающую бинарную операцию $V: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ с нейтральным элементом e , т.е.

$$\forall a \in [0, 1]; V(a, e) = V(e, a) = a. \quad (3.2.1.a)$$

Тогда, если $e = 1$, V определим как абстрактное умножение ($V = \cdot$); если $e = 0$, V определим как абстрактное сложение ($V = \oplus$).

Введем понятие нулевого элемента n (аннигилятора)

$$\forall a \in [0, 1]; V(a, n) = V(n, a) = n. \quad (3.2.1.b)$$

Определение 3.2.4. Определим унарную операцию отрицания как отображение $N: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, удовлетворяющее аксиомам:

$$N(1) = 0, N(0) = 1, \quad (3.2.2)$$

$$\forall a, b \in [0, 1]; a \geq b \Rightarrow N(a) \leq N(b). \quad (3.2.3)$$

Отрицание строгое (инволюция), если

$$N(N(a)) = a \quad (3.2.4)$$

Заимствуем классификацию отрицаний из работы [5]: если $N(N(a)) < a$, отрицание обычное (слабое), если $N(N(a)) > a$, отрицание интуитивное.

Операция отрицания позволяет выразить N -дуальность операций умножения и сложения в форме законов деМоргана:

$$N(a \cdot b) = N(a) \oplus N(b) \quad (3.2.5.a.)$$

$$N(a \oplus b) = N(a) \cdot N(b). \quad (3.2.5.b.)$$

Если N – инволюция, то

$$(a \cdot b) = N(N(a) \oplus N(b)) \quad (3.2.6.a.)$$

$$(a \oplus b) = N(N(a) \cdot N(b)). \quad (3.2.6.b.)$$

Определение 3.2.5. Неубывающая функция $\varphi: [0,1] \rightarrow [0,+\infty]$ называется аддитивным генератором операции отрицания [5], если

$$N(a) = \varphi^*(\varphi(1) - \varphi(a)), \quad (3.2.7)$$

$\varphi(0) = 0$, $\varphi(1)$ – ограничено, где псевдоинверсная функция φ^* – определяется следующим образом:

$$a \in [0, \varphi(1)] \Rightarrow \varphi^*(a) = \varphi^{-1}(a)$$

$$a \geq \varphi(1) \Rightarrow \varphi^*(a) = 1.$$

Здесь φ^{-1} – инверсная функция к φ .

Определение 3.2.6. Пусть $[0,1]^X$ – решетка, т.е. на множестве X определена операция $<$. Определим меру g на $[0,1]^X$ посредством аксиом [4]

$$g(a \cdot b) \bullet g(a \oplus b) = g(a) \bullet g(b), \quad (3.2.8.a)$$

$$a \subset b \Rightarrow g(a) < g(b), \quad (3.2.8.b)$$

где $\bullet$ – абстрактная, не определенная пока операция, которая задаёт на $[0,+\infty)$ группу с нулём 0. Отметим, что условие (3.2.8.a) очень сильно ослаблено по сравнению с более строгим определением

$$\forall n \in \mathbb{N} \ a_n \in X \text{ и } a_n < a_{n+1} \Rightarrow g(\bigvee_{n \in \mathbb{N}} a_n) = \sup_{n \in \mathbb{N}} \{g(a_n)\},$$

так как в нем не учтена счётная псевдоаддитивность меры.

В работе [5] показано, что отрицание (3.2.4) является дополнением в смысле операции $\bullet$ в силу того, что $\varphi(a \bullet b) = \varphi(a) + \varphi(b)$ и, если $b = N(a)$, то из (3.2.7) следует $\varphi(a \bullet N(a)) = \varphi(a) + \varphi(N(a)) = \varphi(1)$. Отсюда следует, что именно операция отрицания определяет меру на алгебре, порождаемой этим отрицанием.

Приближение геометрической оптики

Рассмотрим зависимость амплитудного пропускания от экспозиции $\tau(a)$, характерную для негативных регистрирующих сред (Рис.3.2.2). Нетрудно видеть, что при общепринятых условиях нормировки $\tau_{\max}=1$, $\tau_{\min}=0$, $a_{\max}=1$, $a_{\min}=0$ зависимость $\tau(a)$ удовлетворяет аксиоматическому определению операции отрицания (3.2.2–3.2.3). Рассмотрим два случая выбора рабочего динамического диапазона: отрицание обладает свойством инволютивности (3.2.4) и не обладает. Отказ от требования на инволютивность отрицания позволяет существенно расширить динамический диапазон и повысить точность вычислений в силу того, что свойство инволютивности суть математическая абстракция, не находящая обоснования в физике процесса фоторегистрации и поэтому правомочная лишь при некоторых, довольно строгих ограничениях.

Алгебра, порождаемая инволюцией

В этом разделе рассмотрим следующие вопросы: выбор аппроксимирующей функции (АФ), определяющие операции, конструктивное определение меры.

Выбор функции, аппроксимирующей зависимость пропускания от экспозиции. Задача заключается в нахождении инволютивной функции, минимизирующей выбранную метрику аппроксимации. Подход к решению задачи с позиций однопараметрического расширения вероятностной меры сужает круг функций, используемых для аппроксимации экспериментально измеренных значений. Произвольный перебор функций из числа инволютивных также не гарантирует наилучшего выбора. Решение может быть найдено посредством аппроксимации в пространстве аддитивных генераторов отрицания (3.2.7) в силу того, что ограничения на генератор существенно более слабые, чем на инволютивную АФ.

Иллюстрация. Аддитивный генератор φ строился по экспериментально измеренным точкам для области недоэкспозиции зависимости $\tau(a)$, приведенной на Рис.3.2.2., численными методами.

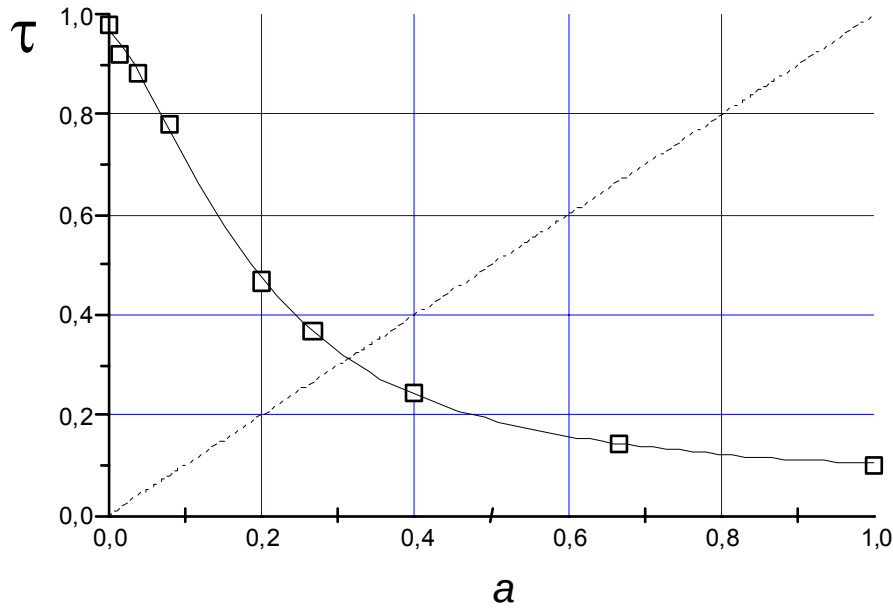


Рис.3.2.2. Зависимость пропускания от экспозиции для фотопленки МИКРАТ-ВР, проявитель №1

Границы динамического диапазона, в котором АФ $\tau(a)$ удовлетворяет свойству инволютивности, подбирались итерационным методом по критерию минимизации метрики аппроксимации. φ аппроксимировалась степенным полиномом под контролем условия монотонности в границах динамического диапазона.

$$\varphi(a) = \sum_{j=1}^n \varphi_j \cdot a^j$$

В качестве метрики приближения в пространстве аддитивных генераторов использовались евклидова и предложенная авторами [6] φ -метрика:

$$\begin{aligned} \text{евклидова метрика:} \quad \|A\|_e &= (\sum a_i^2)^{1/2} \\ \varphi\text{-метрика:} \quad \|A\|_\varphi &= (\sum \varphi(a_i)^2)^{1/2} \end{aligned}$$

Если $\{(a_i, b_i) \mid 1 \leq i \leq m\}$ – нормированные экспериментальные данные, $N(a)$ – функция, аппроксимирующая участок зависимости $\tau(a)$, то отклонения по введённым нормам принимают следующий вид:

$$\Delta_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [b_i - N(a_i)]^2}{m}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [b_i - \varphi^*(\varphi(1) - \varphi(a_i))]^2}{m}}$$

$$\Delta_{\varphi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [\varphi(b_i) - \varphi(N(a_i))]^2}{m}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [\varphi(b_i) + \varphi(a_i) - \varphi(1)]^2}{m}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left[\sum_{k=1}^n \varphi_k \cdot (b_i^k + a_i^k - 1) \right]^2}{m}}$$

Введение φ -метрики обусловлено тем, что расчёт отклонения Δ_{φ} сопряжён с вычислением функции, обратной к φ , что может привести к возрастанию погрешности вычислений. Представление отклонения по φ -норме позволяет использовать только прямые вычисления.

На Рис.3.2.3 приведены аддитивные генераторы для участка недозащиты $\tau(a)$, аппроксимированные полиномами пятой степени:

$$\varphi_1 = 0,354 \cdot x - 0,315 \cdot x^2 - 0,064 \cdot x^3 + 0,111 \cdot x^4 + 0,301 \cdot x^5 \quad (\Delta_{\varphi} = 0,281),$$

$$\varphi_2 = 0,576 \cdot x - 0,117 \cdot x^2 + 0,076 \cdot x^3 + 0,210 \cdot x^4 + 0,308 \cdot x^5 \quad (\Delta_{\varphi} = 0,072)$$

и порождаемые ими АФ.

Определяющие операции

Операция умножения реализуется при освещении позитивного транспаранта, полученного в результате двухступенчатого процесса негатив-позитив $a \cdot b = a \cdot N(N(b))$, если a – волна, b – транспарант, или $a \cdot b = N(N(a)) \cdot N(N(b))$, если a и b – транспаранты. В качестве нейтрального элемента выступает транспарант с единичным пропусканием.

Однако условие для нейтрального элемента $\tau = 1$ физически нереализуемо. Если для операции отрицания процедура нормировки $\tau_{\max}=1$, $\tau_{\min}=0$, $a_{\max}=1$, $a_{\min}=0$ позволяет полностью удовлетворить аксиоматическое определение (12.2–12.3), то для операции умножения нормировка позволяет добиться выполнения условий

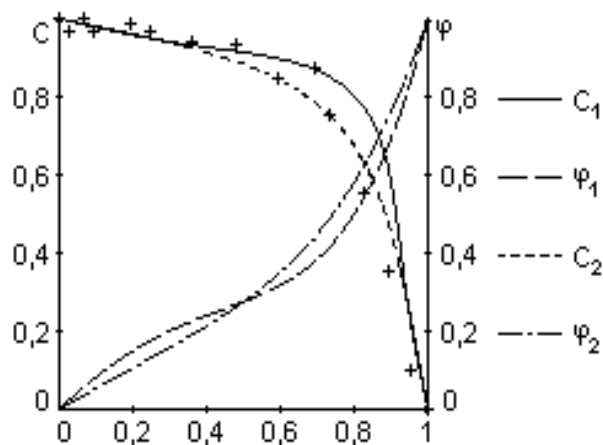


Рис.3.2.3. Аддитивные генераторы φ и порождаемые ими отрицания

$$0 \cdot 0 = 0, \quad 1 \cdot 1 = 1,$$

но аксиомы (3.2.1) не выполняются:

$$a \cdot 0 \neq 0, \quad a \cdot 1 \neq a.$$

Поэтому представляется корректным отказ от нормировки рабочего диапазона пропускания и трактовка $\tau_{\max}$ и $\tau_{\min}$ как плоскостей, вырезающих физически реализуемую часть из полной поверхности $(a \cdot b): [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, удовлетворяющей полному набору аксиом (3.2.1).

Известно, что в силу изоморфности определенного посредством (3.2.1) абстрактного умножения на интервале $[0,1]$ ординальному произведению, любое строгое произведение обладает мультипликативным генератором ϕ_m , определяемым:

$$a \cdot b = \phi_m^*(\phi_m(a) \cdot \phi_m(b)).$$

Для квазилинейного диапазона $\tau(a) = 1-a$, аддитивный генератор отрицания $\phi(a) = a$ является мультипликативным генератором умножения. При нелинейной зависимости $\tau(a)$ эта связь операций отрицания и умножения силы не имеет: $\phi(a) \neq \phi_m(a)$.

Определяющая операция сложения, N -дуальная умножению, физически реализуется схемой Рис.3.2.4, непосредственно выполняющей закон деМоргана в форме (3.2.6.b).

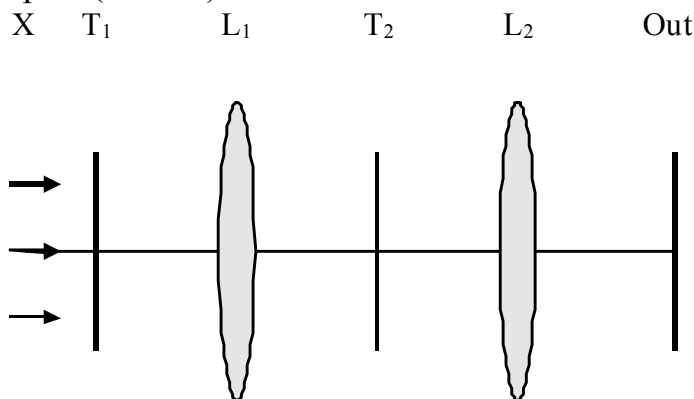


Рис. 3.2.4. Схема оптической реализации закона деМоргана

Ограниченность динамического диапазона также как и в случае умножения ведет к тому, что плоскости $\tau_{\max}$ и $\tau_{\min}$ вырезают из поверхности, удовлетворяющей аксиомам (3.2.1), физически реализуемую часть, этим аксиомам не удовлетворяющую. Процедура нормировки позволяет реализовать лишь свойство $0 \oplus 0 = 0, 1 \oplus 1 = 1$.

Конструктивное определение меры. Переход от аксиоматического (3.2.8) к конструктивному определению меры заключается в определении абстрактной операции $\bullet$. В силу того, что, в схеме Рис.3.2.4. операции $\cdot$ и $\oplus$ несовместны, аксиома (3.2.8.а) может быть ослаблена и представлена в виде

$$g(a \oplus b) = g(a) \bullet g(b),$$

откуда, используя представленные в [5] результаты, получим определение операции $\bullet$ через аддитивный генератор отрицания (3.2.7)

$$\varphi(a \bullet b) = \varphi(a) + \varphi(b).$$

Отсюда нетрудно видеть, что традиционно используемая аддитивная мера [6] адекватна схеме Рис.3.2.4 только в случае линейной аппроксимации зависимости пропускания от экспозиции.

Практический интерес представляют меры энергии $E(a)$ и энтропии $H(a)$:

$$E(A) = \bullet \sum_{x \in X} e(\mu_A(x)) \quad H(A) = \bullet \sum_{x \in X} h(\mu_A(x))$$

где символ $\bullet \sum$ означает суммирование в смысле операции $\bullet$, функции $e, h: [0,1] \rightarrow [0,1]$ и непрерывны на $[0,1]$, e строго возрастает на $[0,1]$, h строго возрастает на $[0, 1/2]$ и строго убывает на $[1/2, 1]$, $e(0) = 0$ и $e(1) = 1$, $h(0) = h(1) = 0$ и $h(1/2) = 1$.

Функции $e(x)$ и $h(x)$ принимают следующий вид:

$$e(x) = x \quad (3.12.9)$$

$$h(x) = \varphi^{-1}(x) \cdot N(\varphi^{-1}(x)) = \varphi^{-1}(x) \cdot \varphi^{-1}(1-x), \quad (3.2.10)$$

где $\varphi(x)$ определяется по экспериментально измеренным значениям $\tau(a)$ как описано выше. При этом для функции $q(x) = (\ln \varphi^{-1}(x))'$ выполнено: $q(x) \geq q(1-x) \quad \forall x \in [0, 1/2]$. Последнее условие в силу симметрии функции h относительно точки $x = 1/2$ эквивалентно: $h'(x) \geq 0$ на $[0, 1/2]$.

Меры энтропии и энергии позволяют оценить информационные характеристики изображения до и после обработки (H) и среднюю статистику его элементов (E). Из (3.2.9) видно, что при выполнении операции абстрактного сложения над дизъюнктными множествами мера энергии суммируется в смысле операции $\bullet$, т.е. увеличивается. Действие операции абстрактного умножения уменьшает меру энергии. Из (3.2.7) и (3.2.9), с учетом связи $\varphi(a \bullet b) = \varphi(a) + \varphi(b)$, следует соотношение

$$\forall a \in X: E(N(a)) = \varphi^{-1}(|X| - E(a)),$$

где $|X|$ – мощность X .

Выполнение операций отрицания N , умножения $\cdot$ и сложения $\oplus$ может как увеличивать, так и уменьшать меру энтропии. Последнее объясняется свойствами функции $h(x)$ в определении меры энтропии.

Алгебра, порождаемая неинволютивным отрицанием

Требование на инволютивность отрицания существенно сужает используемый динамический диапазон регистрирующей среды и ограничивает его требованием на симметричность кривой $\tau(a)$ относительно прямой $\tau = a$. В ряде случаев это ограничение недопустимо.

Схема рис.3.2.4 вне зависимости от типа АФ реализует закон деМоргана в форме (3.2.6.b), в то время как для неинволютивного отрицания корректна форма (3.2.5.b). В результате, при неинволютивной АФ определяющие операции являются решеточными только в ограниченной области $[a_{\text{Max}}(b), b_{\text{Max}}(a)]$, определяемой:

$$\forall a, b \in [0, 1], a > b : a_{\text{Max}}(b) \geq N(N(a) \cdot N(b)).$$

На рис.3.2.2 экспериментальные значения зависимости $\tau(a)$ аппроксимированы функцией Лоренца

$$\tau(a) = \tau_0 + (2a_1\omega)[\pi(4(a-a_c)^2 + \omega^2)]^{-1},$$

выбранной из числа иных АФ, удовлетворяющих критерию гладкости в смысле монотонности первой производной, по критерию минимизации величины среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\text{л}} = 8.26 \cdot 10^{-2}$. На рис.3.2.5 приведено графическое изображение порождаемой этим отрицанием посредством (3.2.6.b) операции $(a \oplus b)$ в части, удовлетворяющей свойству решеточности $(a \oplus b) \geq \text{MAX}(a, b)$.

Логика, реализуемая в приближении геометрической оптики

Из проведенного конструктивного определения меры для приближения геометрической оптики и определения логики (определение 3.2.1.) следует корректность принятия интервала $[0, 1]$ в качестве истинностного интервала, что по определению ведет к многозначной логике. Тогда, используя определение интерпретации как отображения на истинностное пространство, правомочна трактовка любого изображения как функции истинности соответствующего операнда. Отсюда, используя классические формулы интерпретации логических связок для многозначной логики [7], получим приведенную в табл.3.2.1 реализацию логических операторов оптической схемой рис.3.2.4.

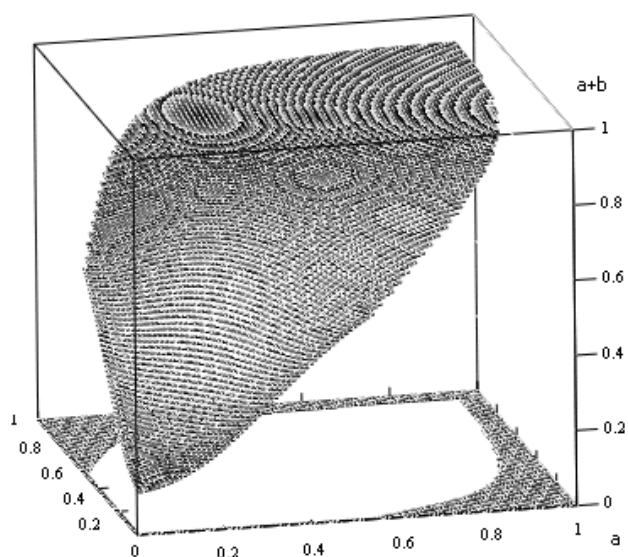

 Рис.3.2.5. Часть операции $\oplus$, удовлетворяющая свойству решеточности

Табл. 3.2.1. Схема реализации операторов многозначной логики схемой рис.3.2.4

Логическая связка	Формула интерпретации	Транспаранты		Способ регистрации Out
		T_1	T_2	
Конъюнкция		Im_A	Im_B	Позитивный
Дизъюнкция		$N(Im_A)$	$N(Im_B)$	Негативный
Импликация	$N(Im_A) \vee Im_B$	Im_A	$N(Im_B)$	Негативный
Тавтология	$Im_A \vee N(Im_A)$	$N(Im_A)$	Im_A	Негативный
Противоречие	$Im_A \wedge N(Im_A)$	Im_A	$N(Im_A)$	Позитивный
Оператор Шеффера	$N(Im_A \vee Im_B)$	$N(Im_A)$	$N(Im_B)$	Позитивный
Стрелка Пирса	$N(Im_A \wedge Im_B)$	Im_A	Im_B	Негативный

Литература к Лекции 3.2.

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.
2. Ishikawa S., "Fuzzy Inferences by Algebraic Method", Fuzzy Sets and Systems, 1997, v.87, pp.181-200
3. Ishikawa S., A Quantum Mechanical Approach to a Fuzzy Theory// Fuzzy Sets and Systems, 1997, v.90, pp.277-306
4. Ishikawa S. Fuzzy Logic in Measurements// Fuzzy Sets and Systems, Vol. 100 ,№. 1-3, pp. 291-300

5. Э. Трильяс, К. Альсина, А. Вальверде. Нужны ли в теории нечетких множеств операции MAX, MIN и 1-j? / В кн. "Нечеткие множества и теория возможностей" под ред. Р.Р. Ягера. - М.: 1986. – С. 199-228.
6. Биркгоф Г.. Теория решеток. - М.: Наука, 1984. - 568 с.
7. Павлов А.В. Математические модели оптических методов обработки информации // Известия Академии Наук: Серия «Теория и системы управления», 2000, №3, с.111-118.
8. Р.З.Закиров, А.В.Павлов "Алгебраические основания оптических технологий вычислительного интеллекта" – в кн. "Оптические и лазерные технологии: Сборник статей" / Под ред. В.Н.Васильева – СПб: СПбГИТМО, 2001, с. 33-55.

Тема 3.3. Приближение Фурье-оптики

Фурье-дуальность

Переход от геометрической к Фурье-оптике сохраняет свойства операций отрицания и умножения и позволяет расширить модель за счет введения в рассмотрения Фурье-дуальности, реализуемой оператором Фурье-преобразования

$$F: [0,1] \times P_{Im} \rightarrow [0,1] \times P_F, \quad (3.3.1)$$

где P_{Im} и P_F – интервалы фазовых сдвигов в пространствах изображений и Фурье, соответственно. Из (3.2.1) непосредственно следует необходимость применения голографических методов для регистрации и восстановления члена P_F .

Оператор F удовлетворяет аксиомам (3.2.2) при определении единицы как бесконечного плоского волнового фронта X и нуля как δ -функции, т.е.

$$F(X) = \delta, \quad F(\delta) = X. \quad (3.3.2)$$

В реальности X ограничен апертурой кадрового окна и, соответственно, δ -функция суть дифракционно ограниченный точечный источник. Аксиома монотонности (3.2.3) имеет силу в смысле противопоставления «малый размер элемента разрешения – широкий Фурье-образ» и ограничена внутренней коррелированностью как фундаментальным свойством реальной информации. В отличие от рассмотренных в приближении геометрической оптики поточечных операторов, Фурье-оптика учитывает внутреннюю структурированность информации – операции определяются над изображениями Im .

Абстрактное сложение. Рассмотрим классическую 4-f схему Фурье-голографии с внеосевым плоским опорным пучком (Рис.3.3.1). Нетрудно видеть, что схема непосредственно реализует закон деМоргана в форме 3.2.6.b при замене оператора N на F . Отсюда получим абстрактное сложение, Фурье-дуальное умножению

$$(Im_A \oplus Im_B)_F = F (F(Im_B) \cdot \eta(F(Im_A))), \quad (3.3.3)$$

где η – оператор голографической регистрирующей среды, использованной для записи Фурье-голограммы операнда (изображение) Im_A , Im_B – операнд (изображение), восстанавливающий голограмму. При линейном операторе η (3.3.3) суть свертка.

Оператор η ограничивает свойства ассоциативности и коммутативности операции (3.2.3) в зависимости от свойств операндов. Если $F(Im_A) \approx F(Im_B)$, то свойства ассоциативности и коммутативности

актуальны. Свойство монотонности $A \geq C, B \geq D \Rightarrow (Im_A \oplus Im_B)_F \geq (Im_C \oplus Im_D)_F$ ограничено свойством внутренней коррелированности элементов изображения.

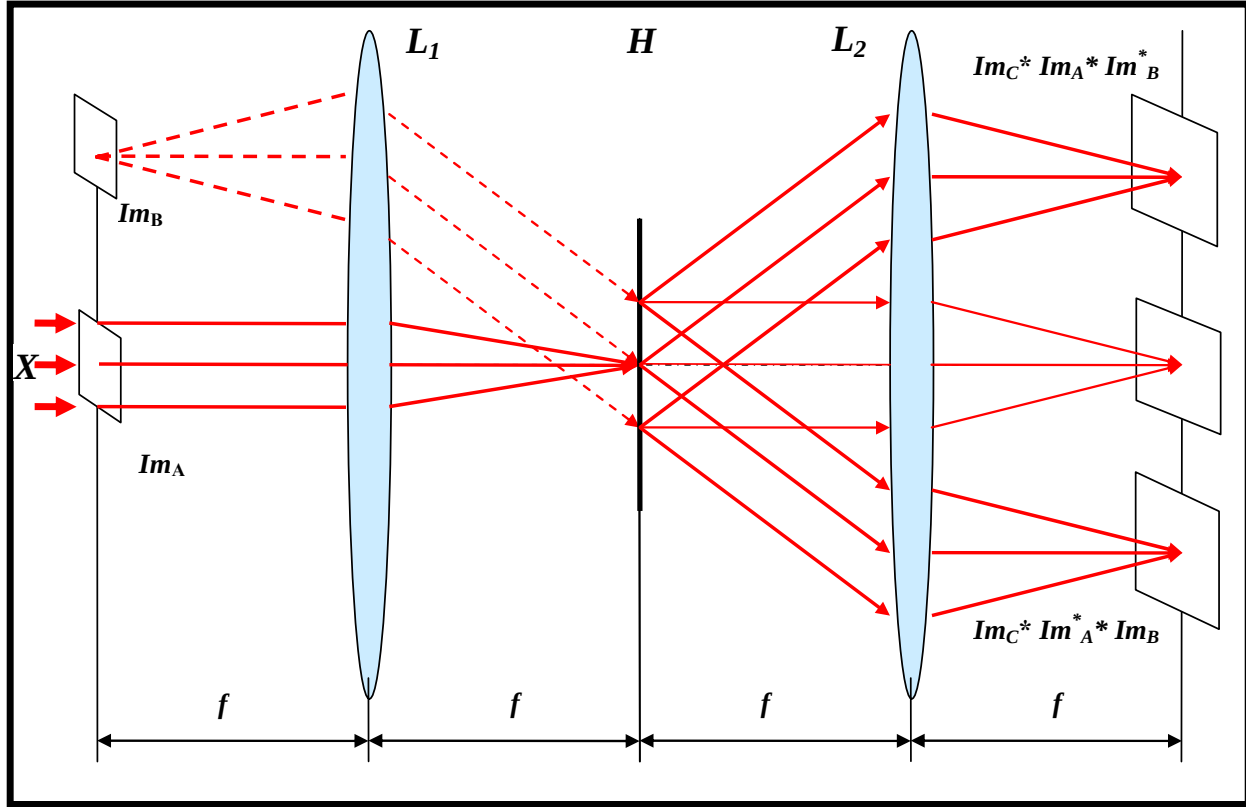


Рис.3.3.1. 4- f схема Фурье-голографии с внеосевым опорным пучком

Элементы модели

Для любого элемента модели существуют четыре связанных с ним элемента: негативный, дополнительный, инверсный и противоположный. В рамках настоящего раздела интерес представляют два последних.

Инверсный элемент Im_A^i для элемента Im_A определяется из условия

$$(Im_A \oplus Im_A^i) = 0,$$

которое для приближения Фурье-оптики имеет вид:

$$(Im_A \oplus Im_A^i)_F = \delta. \quad (3.3.4)$$

Это условие физически реализуемо в схеме инверсной голографической фильтрации при записи голограммы, описываемой оператором:

$$\eta^i = F(Im_A)^{-1}. \quad (3.3. 5)$$

Как правило, современные модели ВИ, в т.ч. НС, предполагают многоитерационный процесс поиска решения, сопровождающийся многократными дифракциями света на голограмме. Каждая итерация ведет к уменьшению разрешения, т.е. Фурье-образ последующей итерации будет уже Фурье-образа предыдущей и в силу ограниченности динамического диапазона голографических регистрирующих сред условие (3.3.5) и, соответственно, (3.3.4), выполненное для первой итерации, для последующих уже физически невыполнимо. Отсюда следует, что группу строят только системы с одной дифракцией на голограмме. Многоитерационным голографическим системам, таким как оптические НС резонансной архитектуры, адекватна полугруппа.

Противоположный элемент (относительно операции абстрактного сложения) Im_A° определяется условием

$$Im_A^{\circ}(x) = Im_A(-x),$$

где x – обобщенная координата элемента Im_A на оси элементов модели. Пользуясь свойством симметрии Фурье-преобразования, получим

$$F(Im_A^{\circ}(x)) = F^*(Im_A(x)),$$

где астериск – символ комплексного сопряжения. Отсюда, используя определение вычитания как сложения с аддитивно противоположным элементом, получим:

$$(Im_A \oplus Im_B^{\circ})_F = F(F(Im_A) \cdot \eta(F(Im_B^{\circ}))) = F(F(Im_A) \cdot \eta(F^*(Im_B))), \quad (3.3. 6)$$

т.е. операция корреляции суть вычитание.

Ось элементов модели. Пусть в схеме Фурье-голографии рис.3.3.1 голограмма записывается с эталонного изображения Im_1 с опорным изображением δ . Восстановление голограммы эталоном Im_1 даст в +1 и –1 порядках дифракции, соответственно:

$$\begin{aligned} Im_1 \oplus Im_1 &= Im_2 \\ Im_1 \oplus Im_1^{\circ} &= Im_{1-1} \neq \delta. \end{aligned}$$

При восстановлении голограммы опорным источником δ

$$\delta \oplus Im_1 = Im_1,$$

т.е. δ -функция действительно удовлетворяет аксиоме аддитивного нуля.

Применяя процедуру обращения волнового фронта в плоскостях Im и S необходимое число раз, можно получить

$$Im_i \oplus Im_1 = Im_{i+1}$$

$$Im_i \oplus Im_1^0 = Im_{i-1} \neq \delta,$$

т.е. схема Фурье-голографии и, в частности, широко распространенная архитектура оптической НС «голографический коррелятор в линейном резонаторе» корректно относительно операций сложения и вычитания реализуют ось элементов модели, полностью соответствуя первоначально предложенным для натурального числового ряда аксиомам Пеано. Эталонное изображение, с которого записана голограмма, выступает в качестве первого (не нулевого) элемента модели. Аксиома индукции при этом ограничена информационной емкостью системы и (в зависимости от выбранной схемы) угловой инвариантностью голограммы. На рис.3.3.2 схематически изображена реализация оси элементов модели.

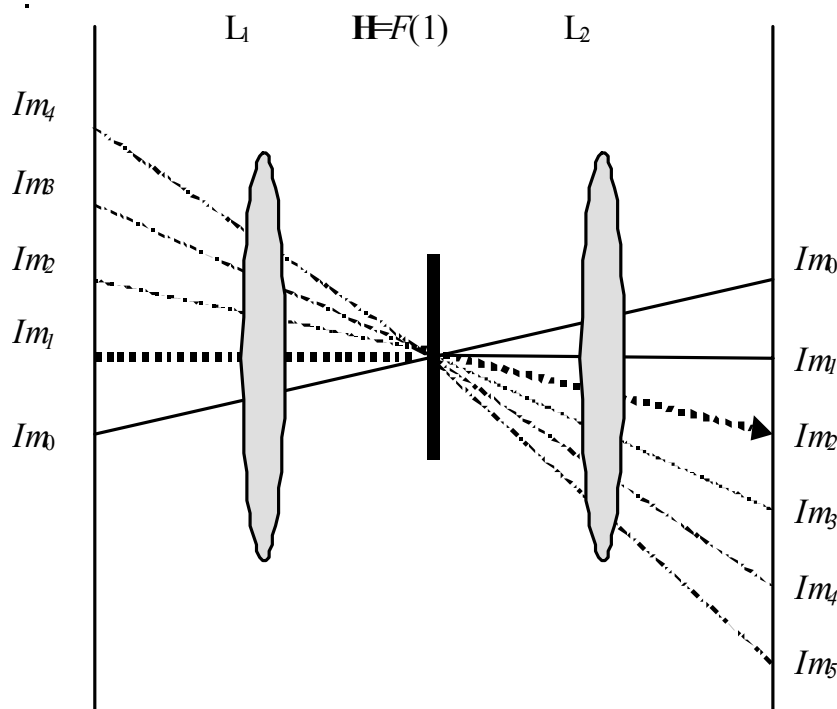


Рис.3.3.2. Реализация оси элементов модели

Логика и оператор импликации для приближения Фурье-оптики

Аксиоматическое определение оператора импликации допускает различные варианты его конструктивного определения. Можно убедиться, что простая замена в семантическом правиле, реализуемом в приближении геометрической оптики, оператора N на F ведет к оператору импликации хотя и физически реализуемому, но порождающему правила логического вывода, не имеющие ясной интерпретации. Для обеспечения физической обоснованности модели рассмотрим возможную реализацию правила вывода «обобщенный Modus Ponens» в схеме Рис.3.3.1:

Условие: если A есть Im_A , то B есть Im_B
 Посылка: A есть Im_A'
 Заключение: B есть Im_B' ,

где A и B – некоторые высказывания, Im_A , Im_A' и Im_B , Im_B' – их значения истинности. Представим это правило вывода как композицию

$$(A' \vee (A \rightarrow B)) \Rightarrow B', \quad (3.3.7)$$

где символ $\rightarrow$ обозначает оператор импликации. Если Im_A и Im_B – изображения, то композиционное правило вывода (3.3.7) описывает ассоциативные свойства отклика Фурье-голограммы, записанной с эталонного изображения Im_A с точечным опорным источником Im_B , при восстановлении голограммы изображением Im_A' . Действительно, с учетом определения и (13.3), отображение левой части (3.13.7) на истинностное пространство можно представить в виде

$$(Im_A' \vee T(A \rightarrow B)) = Im_A' * F(\eta(F^*(Im_A)F(Im_B))), \quad (3.3.8.a)$$

для +1 порядка дифракции, и

$$(Im_A' \vee T(A \rightarrow B)) = Im_A' * F(\eta(F(Im_A)F^*(Im_B))), \quad (3.3.8.b)$$

для –1 порядка дифракции. Здесь символ $*$ обозначает операцию свертки, астериск – комплексное сопряжение. Отсюда следует определение оператора импликации, реализуемого методом Фурье-голографии:

$$T(A \rightarrow B) = F(\eta(F^*(Im_A)F(Im_B))) \quad (3.3.9.a)$$

в +1 порядке дифракции, и

$$T(A \rightarrow B) = F(\eta(F(Im_A)F^*(Im_B))) \quad (3.3.9.b)$$

в –1 порядке дифракции.

Из (3.3.9) следует, что в соответствии со сложившейся системой классификации НЛ (Лекции 3.1 – 3.2), использованная здесь трактовка изображений как истинностных функций позволяет реализовать в схеме Фурье-голографии как многозначную, так и нечеткозначимую логики. Для сравнения многозначной и нечеткозначимой логик рассмотрим простейший, традиционно используемый пример вывода «Modus Ponens»:

Условие: Если яблоко красное, то оно спелое.
 Посылка: Это яблоко очень красное.
 Заключение: Это яблоко очень спелое.

Многозначная логика, позволяет оценить степень отклонения цвета от эталонного и, соответственно, степень отклонения спелости от эталонной, но не позволяет оценить знак отклонения, так как не различает категории "очень спелое" и "недостаточно спелое". В рамках нечеткозначимой логики значения лингвистических переменных «степень покраснения» и «степень спелости» могут быть представлены нечеткими числами (НЧ), определяемыми как нормальные, унимодальные и выпуклые подмножества X , описываемые функцией принадлежности $\mu: X \rightarrow [0,1]$ (Рис.3.3.3.). Физически реализуем следующий подход:

Если обозначить эталонную степень покраснения яблока НЧ

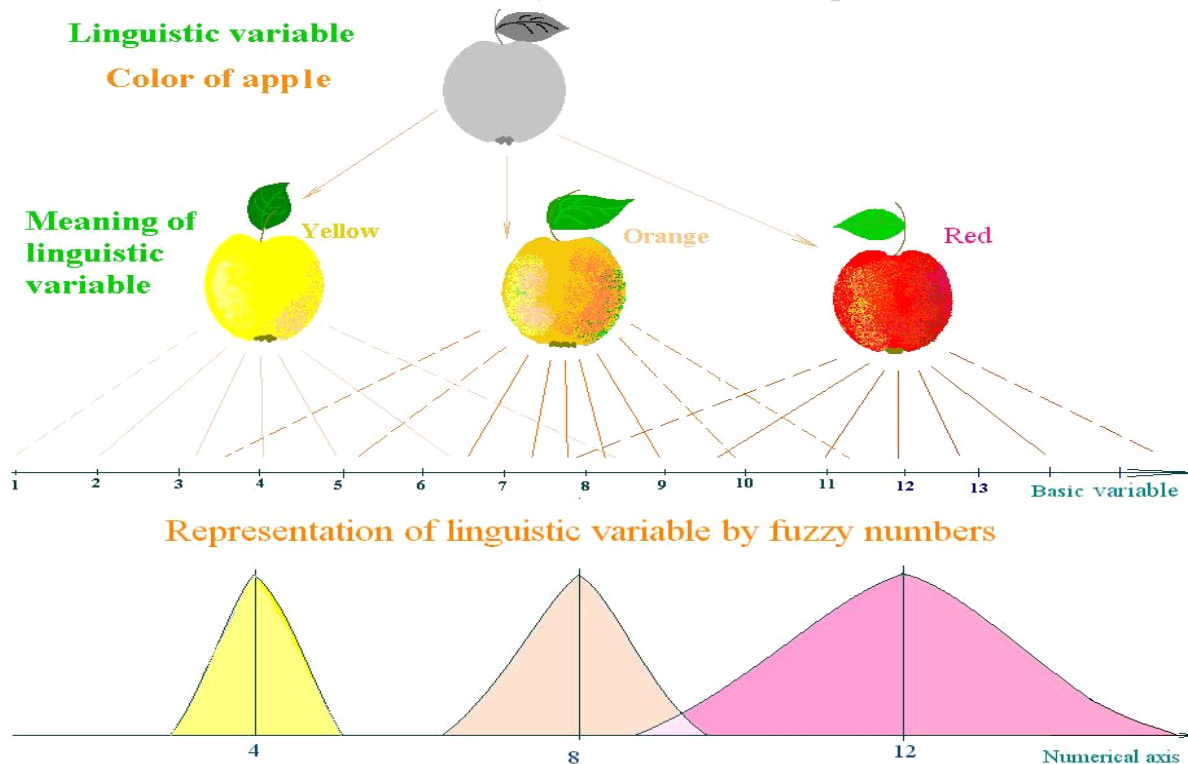


Рис.3.3.3. Представление смысла ЛП посредством НЧ

"нечеткое один" (1), с которого записана голограмма, то эталон спелости

будет представлен в -1 порядке дифракции в выходной плоскости (Рис.3.1) НЧ "нечеткое два" ($\underline{2}$). Недостаточная краснота яблока, представляемая НЧ, меньшим, чем «нечеткое один», обозначит степень спелости НЧ из интервала НЧ $[1, \underline{2}]$, очень спелые яблоки будут представлены НЧ $>\underline{2}$.

Оператор η определяет как максимально возможное количество градаций X/δ шкалы $[\delta, X]$ посредством задания δ , имеющей физический смысл функции рассеяния, так и перераспределение градаций шкалы между интервалами $[1, \underline{2}]$ и $[\underline{2}, X]$ посредством задания $\underline{1}$. При возрастании параметра $(X/\underline{1})$, логика в рамках примера лучше «чувствует» степень переспелости. Наоборот, при уменьшении этого параметра, логика становится «более разборчивой» в оценке степени недоспелости.

В этом примере мы подошли к следующему ключевому понятию – *лингвистической переменной* и, соответственно, *лингвистическому моделированию*, которое и будет рассмотрено в следующей лекции. Отметим, что представление значений истинности, равно как и значений лингвистических переменных нечеткими числами – простейший случай, рассмотренный здесь из соображений наглядности. Собственно модель не содержит в себе ограничений на тип нечеткого множества. Использование многомодальных подмножеств *Im* позволяет в перспективе перейти к многокритериальным моделям принятия решений с учетом взаимной коррелированности критериев.

Литература к Лекции 3.3.

1. Нариньяни А.С. НЕ-факторы 2004// Труды Девятой Национальной Конференции по Искусственному Интеллекту, 28.09 – 02.10.04, Тверь, М.Физматлит, 2004, Т.1, с.420-432.
2. Заде Л., Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений // Математика. Новое в зарубежной науке, М., Мир, 1976, в.3
3. Павлов А.В. Математические модели оптических методов обработки информации // Известия Академии Наук: Серия «Теория и системы управления», 2000, №3, с.111-118.
4. Биркгоф Г.. Теория решеток. - М.: Наука, 1984. - 568 с.
5. Э. Трильяс, К. Альсина, А. Вальверде. Нужны ли в теории нечетких множеств операции MAX, MIN и $1-j$? / В кн. "Нечеткие множества и теория возможностей" под ред. Р.Р. Ягера. - М.: 1986. – С. 199-228.
6. Р.З.Закиров, А.В.Павлов "Алгебраические основания оптических технологий вычислительного интеллекта" – в кн. "Оптические и лазерные технологии: Сборник статей" / Под ред. В.Н.Васильева – СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2001, с. 33-55.

Тема 3.4. Логико-лингвистическое моделирование

Логико-лингвистическое моделирование (ЛМ) как направление в рамках фундаментальной проблемы создания искусственного интеллекта (ИИ) [1] отражает такую особенность человеческого мышления как работа на *лингвистических шкалах* (ЛШ) [2], относящихся к классу порядковых шкал [3]. Напомним, что порядковая шкала – это шкала, на которой задано отношение порядка (например, больше – меньше), метрическая шкала – шкала, на которой задана метрика (расстояние). ЛМ применяется преимущественно в ситуациях, когда необходимо передать системе ИИ (обучить) неформализуемые знания, накопленные человеком и выраженные им на естественном для человека языке. Задача обучения системы ИИ как задача формирования человеко-машинного интерфейса может быть представлена как задача градуировки метрической шкалы, используемой техническим устройством, во взаимно-однозначном соответствии с лингвистической шкалой, интуитивно (и субъективно!) градуированной человеком.

Одно из направлений развития ЛМ, опирающееся на аппарат теории нечетких множеств, основано на предложенной Л.Заде концепции лингвистической переменной (ЛП) [4]. В рамках этого подхода смысл (значение) ЛП представляется нечетким подмножеством, как правило – нечетким числом (НЧ), определяемым как унимодальное, нормальное и выпуклое подмножество числовой оси [5]. Смысл всего высказывания вычисляется по правилам арифметики НЧ [6]. Этот подход был успешно применен при решении ряда практических задач, например, для предсказания загрузки узлов телекоммуникационных сетей [6], управления в реальном времени работой сложных радиотехнических комплексов [7], медицинской диагностики [8], и ряда других [9,10].

Представление смысла ЛП нечетким подмножеством предъявляет повышенные требования к вычислительной мощности процессора, что имеет следствием использование по преимуществу «удобных» с точки зрения вычислительной процедуры моделей, например, треугольных НЧ и, как результат, ограничение гибкости и применимости реализуемой модели. Более того, рассматривая задачу реализации ЛМ не изолированно, но в рамках комплексной проблемы выбора парадигмы создания ИИ [2,11,12], должно иметь в виду необходимость реализации в системе ИИ таких атрибутов человеческого интеллекта, как

- Обучаемость;
- Образность мышления;
- Ассоциативность мышления.

В Лекции 1 мы упоминали, что перечисленные атрибуты, вкупе с работой на ЛШ, относятся в первую очередь к «правополушарным информационным процессам», реализация которых вызывает наибольшие

трудности в рамках классического (компьютерного) подхода к проблеме ИИ в силу принципиальной невербализуемости и неалгоритмизуемости таких процессов [2]. В частности, многие исследователи обращают внимание на наличие сильнейшего внутреннего противоречия, скрытого в понятии «моделирование образов» [13]. Между тем, именно правополушарные информационные процессы в значительной степени определяют интеллектуальные способности индивида – способность к обучению и ассоциативность мышления в своей совокупности как способность к нахождению и установлению связей между различными, на первый взгляд весьма далекими друг от друга, массивами информации. Такая постановка задачи вкупе с отрицательным ответом на фундаментальный вопрос о «правомочности рассмотрения информационных процессов безотносительно к их физическому носителю» [11] актуализирует вопрос выбора физической основы ИИ.

В предыдущих лекциях мы показали, что классическая 4-f схема Фурье-голографии строит нечетко-значимую логику и, тем самым, реализует логический вывод на лингвистических шкалах. Этот подход основан на предложенной Л.Заде [4] идее представления значений лингвистических переменных нечеткими числами. Модель была подтверждена экспериментальной реализацией правила логического вывода «Обобщенный Modus Ponens», связывающего одну входную и одну выходную лингвистические переменные (ЛП).

Практический интерес представляют более сложные схемы рассуждений, связывающие набор ЛП на входе с одной выходной ЛП, т.е. схемы формирования интегральной оценки по набору входных ЛП [4,6-9]. Например, в задаче медицинской диагностики на входе могут быть десятки и сотни ЛП – результаты анализов, история болезни, рассказ пациента, впечатления врача от осмотра и т.п., а на выходе должно быть одно решение – лечить или нет, а если лечить, то как. Попытки непосредственного применения подхода, основанного на представлении значений ЛП нечеткими числами (НЧ), для реализации таких схем рассуждений, показали его ограниченность. Не вдаваясь в обсуждение всех нюансов, отметим лишь, что в рамках задачи реализации упомянутых атрибутов биологического интеллекта, признание образности мышления суть признание того, что мозг оперирует отнюдь не числами, пусть даже и нечеткими, но образами. С этой точки зрения существенно, что аналитическая модель, представленная в предыдущих лекциях [22], не накладывает на операнды ограничений, редуцирующие их к НЧ и, тем самым, предоставляет возможности для реализации упомянутых атрибутов интеллекта человека.

В настоящей лекции, базируясь на развитой аналитической модели [22], мы рассмотрим подход к реализации в классической 4-f схеме Фурье-голографии (ФГ) логического вывода на лингвистических шкалах с учетом

принципа образности мышления. Исходя из того, что модель обработки информации определяется в первую очередь физическими свойствами материального носителя интеллекта [2], мы заимствуем от биологических прототипов не конкретные модели, но общие принципы, конкретизируя их применительно к используемой схеме ФГ. Подход экспериментально проиллюстрирован на примере формирования интегральной оценки по набору ЛП, т.е. логического вывода типа «Обобщенный Modus Ponens», связывающего набор входных ЛП с одной выходной ЛП.

Подход и используемые определения

Следуя Л.Заде [4], определим лингвистическую переменную как набор $\langle Y, Tm(Y), U, G, M \rangle$, где Y – название переменной, $Tm(Y)$ – терм множество, U – универсальное множество, G – синтаксическое правило, порождающее термы множества $Tm(Y)$, M – семантическое правило, которое каждому лингвистическому значению Y ставит в соответствие его смысл $M(Y)$. Мы не будем рассматривать грамматику G и ограничимся рассмотрением семантического правила M .

Примем, что значение лингвистической переменной A (смысл высказывания) представлено изображением Im_A , а L – лингвистическая шкала. Тогда $M(A) = Im_A$ и, как следует из материалов предыдущей лекции [22], и с учетом [4,23-26], в схеме Рис.3.3.1. физически реализуемы два семантических правила, связывающих входную In и выходную Out ЛП:

$$M_{+1}(In \rightarrow Out) = F(F(Im_{In})\eta(F^*(Im_{Out}))) \quad (3.4.1)$$

для +1 порядка дифракции, где астериск обозначает комплексное сопряжение. Аналогично, выражение для семантического оператора, реализуемого в –1 порядке дифракции схемы Рис.3.3.1.

$$M_{-1}(In \rightarrow Out) = F(F(Im_{In}) \eta (F (Im_{Out}))) . \quad (3.4.2)$$

Отметим важный для дальнейшего изложения момент, что согласно модели, операнды In и Out могут представлять собой не только отдельные ЛП, но и набор ЛП, как взаимосвязанных, так и независимых.

В предыдущей лекции мы показали, что методы Фурье-оптики позволяют реализовать два оператора D – традиционный $D \equiv N$, где N – оператор отрицания, реализуемый посредством негативного процесса фоторегистрации, и $D=F$, где F – оператор Фурье-преобразования, реализуемый положительной линзой. Последнее заключение было сделано на основе формального сходства закона де-Моргана для инволюции [28] и реализуемой в классической 4-f схеме Фурье-голографии (Рис.3.3.1.) теоремы Бореля о свертке, что позволило определить свертку как операцию дизъюнкции, Фурье-дуальную конъюнкции

$$(Im_A \vee Im_B)_F = F (F(Im_B) \cdot \eta(F(Im_A))) ,$$

где η – оператор голографической регистрирующей среды, на которой записана Фурье-голограмма операнда Im_A , Im_B – операнд, восстанавливающий голограмму.

Обсудим правомочность такого формального подхода с точки зрения физики. Для этого используем аксиоматическое определение меры как положительной возрастающей оценки g на решетке $[0,1]^U$ такой, что

$$g(a \vee b) \bullet g(a \wedge b) = g(a) \bullet g(b)$$

$$\text{из } a \subset b \text{ следует } g(a) < g(b),$$

где $\bullet$ - абстрактная операция, которая задает на $[0,+\infty)$ группу с нулем 0.

Для конструктивного, физически обоснованного определения абстрактной операции $\bullet$ используем результаты работы [28], в которой показано, что искомая операция $\bullet$ связана с унарным оператором, задающим дуальность определяющих модель операций абстрактного сложения и умножения посредством аддитивного генератора φ , такого, что $\varphi(0) = 0$ и $\varphi(1)$ – ограничено, и порождающего как операцию $\bullet$

$$a \bullet b = \varphi^{-1}[\varphi(a) + \varphi(b)],$$

так и задающую дуальность операцию, в частности, отрицание N

$$N(a) = \varphi^{-1}[\varphi(1) - \varphi(a)],$$

где φ^{-1} – псевдоинверсный образ φ , определяемый через инверсный образ φ^* посредством

$$\begin{aligned} a \in [0, \varphi(1)] &\Rightarrow \varphi^*(a) = \varphi^{-1}(a) \\ a \geq \varphi(1) &\Rightarrow \varphi^*(a) = 1. \end{aligned}$$

Отсюда, операция, задающая дуальность определяющих модель операций, суть дополнение в смысле операции $\bullet$ и, таким образом, данный аппарат может быть применен не только к N -дуальности, но и к дуальности любого типа, имеющей физически обоснованный смысл дополнения.

Для оператора F в рамках алгебры дополнение имеет смысл и, с учетом классической формулы дифракционного размера элемента разрешения в Фурье-плоскости $d = \lambda f/U$ для прямоугольной апертуры U ,

может быть выражено в виде $F(Im) = (U1Im)/(U\oplus Im)$, где 1 и $\oplus$ - символы абстрактного вычитания и сложения, соответственно. Напомним, что вычитание здесь определено как сложение с аддитивно противоположным элементом. Как показано в [23], аддитивно противоположный элемент в схеме Рис.3.1. реализуется через комплексное сопряжение его Фурье-образа, т.е. такое определение вычитания имеет здесь физический смысл и реализуется в +1 порядке дифракции - операция корреляции в данной алгебре суть вычитание. Таким образом, трактовка теоремы Бореля о свертке как частного случая закона де-Моргана физически правомочна.

Еще раз напомним, что аксиома монотонности [28] для оператора F ограничена внутренней коррелированностью как фундаментальным атрибутом реальной информации. В результате, в отличие от адекватных приближению геометрической оптики поточечно определенных операторов, реализуемые Фурье-оптикой операторы учитывают внутреннюю коррелированность информации – операции определяются в целом над изображениями Im .

«Биологически мотивированный» подход к формированию интегральной оценки по набору входных ЛП

В предыдущей лекции мы рассмотрели реализацию классического примера правила вывода «Обобщенный Modus Ponens» «Если яблоко красное, то оно спелое». Для большинства практических задач интерес представляет более сложная схема рассуждений включающая набор ЛП на входе (каждая ЛП принимает значения на своей ЛШ) и одну ЛП на выходе. Для реализации такой схемы рассуждений необходимо ответить на два вопроса: выбор семантического оператора и связанный с ним метод градуировки шкал, и выбор метода представления значения входных ЛП.

Выбор семантического оператора и градуировка шкал. Семантический оператор (3.4.2), традиционно используемый в задаче ЛМ, не обеспечивает формирование интегральной оценки и, тем самым, не позволяет решить задачу. Эту задачу позволяет решить оператор (14.1). Однако, поскольку оператор (14.1) имеет смысл вычитания, то при использовании традиционной методики [4] система оказывается нечувствительной к значениям выходной ЛП, меньшим, чем эталонное. Градуировка выходной лингвистической шкалы реализуется посредством формирования двух отсчетов на шкале – аддитивного нуля, физически реализуемого точечным опорным источником, и эталонного значения Im_{OutR} . Текущий отсчет Im_{Out} оператором (3.4.1) формируется по правилу

$$Im_{Out} = Im_{In} \cdot Im_{InH},$$

где Im_{In} –совокупность значений входных ЛП, Im_{InH} – значение набора входных ЛП, записанное на голограмме. Таким образом,

$$Im_{InH} \cdot Im_{InH} = \delta,$$

т.е. нулю, так как δ -функция (точечный опорный источник) здесь суть аддитивный ноль, и для всех $Im_{In} \leq Im_{InH}$ также будет

$$Im_{In} \cdot Im_{InH} = \delta,$$

поскольку отрицательные элементы в схеме Рис.3.1. не реализуемы. Поэтому для обеспечения чувствительности системы в области значений ЛП, меньших, чем эталонное, должно быть выполнено условие

$$Im_{InR} \geq N (Im_{InH}), \quad (3.4.3)$$

где Im_{InR} – эталонное значение набора входных ЛП, N – число требуемых градаций в области значений выходной ЛП Out , меньших, чем Im_{OutR} . Иными словами, в рамках вышеприведенного примера, система должна обучаться не посредством предъявления эталона цвета помидора, а посредством предъявления самого плохого из всех возможных (зеленого, не спелого) помидора.

Метод представления и ввода в систему значений ЛП

Внутренние репрезентации информации в мозгу, в отличие от компьютера, реализуются не посредством чисел, пусть даже и нечетких, но в виде паттернов – картин нейронной активности коры головного мозга [18]. Принцип образности мышления реализуется посредством обработки этих паттернов. Вспомним также материал лекции 1, когда мы говорили о том, что мозг здорового человека представляет собой предельно неустойчивую систему с хаотической динамикой при отсутствии воспринимаемой информации [29]. При обработке распознаваемой информации картина нейронной активности коры мозга меняется [30,31]. По некоторым данным при этом она характеризуется появлением фрактальной структуры с достаточно большой длиной корреляции. Отметим, что на сегодня среди исследователей нет единства мнений [31] относительно фундаментальных причин существования именно такого типа динамики нейронной активности коры головного мозга, равно как и относительно ряда иных упомянутых здесь вопросов. В данном случае для нас важно то, что поскольку модель обработки информации определяется физическими свойствами материального носителя интеллекта, в данном случае схемы ФГ, то, следуя [11,18], мы заимствуем от биологических прототипов не конкретные модели, но лишь общие принципы,

конкретизируя их применительно к используемой физической схеме. Исходя из этих положений, представляется интересной следующая методика:

1. В качестве паттерна, представляющего совокупность значений набора входных ЛП на соответствующих шкалах (внутренняя репрезентация воспринимаемой информации), используется реализация двумерного фрактального Броуновского движения (ФБД);
2. Удельный вес каждой ЛП в общем массиве воспринимаемой информации определяет относительный размер фрагмента паттерна, модулируемого этой ЛП;
3. Нечеткие числа (НЧ), представляющие текущие значения каждой ЛП на соответствующей ЛШ, связаны с характеристиками соответствующего фрагмента паттерна следующим образом:

$$\text{Re}(F(Im_i)) = \text{Re}(F(N_i)) , \quad (3.4.4)$$

где Im_i – фрагмент паттерна, используемый для репрезентации i -ой ЛП, N_i – НЧ, описывающее значение i -ой ЛП на i -ой ЛШ.

Экспериментальная иллюстрация

Рассмотрим для наглядности следующий условный пример, связывающий 4 входных ЛП (цвет, размер, свежесть и вкус) и одну выходную - качество:

Если яблоко красное, большое, сочное и вкусное, то оно хорошее.

Эталонное значение 4-х входных ЛП представим реализацией ФБД размерностью 1024x1024 со значением параметра Хёрста $H=0.1$. (Качество хорошее 4 (Im_4)). Каждой ЛП присвоим свою область изображения, размер которой определяется экспертом в соответствии с субъективной оценкой важности соответствующей ЛП. Текущее значение каждой ЛП задается соответствии с правилом (13.4) изменением параметров этой области; для простоты операция проводилась в редакторе «Photoshop» применением операций увеличения резкости/размытия изображения, контроль проводился по гистограмме.

Изображение, использованное для записи голограммы, представляет набор значений входных ЛП, который по мнению эксперта соответствует значению выходной ЛП «самое плохое яблоко» (качество 1 (Im_1)). Оно получено из эталонного изображения применением операции «увеличение резкости». Применением этих операций к отдельным фрагментам получены еще три паттерна, представляющие по мнению эксперта различные образцы качества яблок.

С изображения Im_1 в схеме Рис.3.1. записаны три голограммы, отличающиеся условиями экспозиции. На Рис.3.4.1. приведены сечения дифракционной эффективности этих голограмм. На Рис.14.2. приведены значения ширины откликов по уровню 0.5, полученных от каждой из голограмм в +1 порядке дифракции схемы Рис.3.3.1., при предъявлении этих изображений $Im_1 - Im_5$. Таким образом, шкала значений ширины откликов по уровню 0.5 в данном случае суть выходная метрическая шкала.

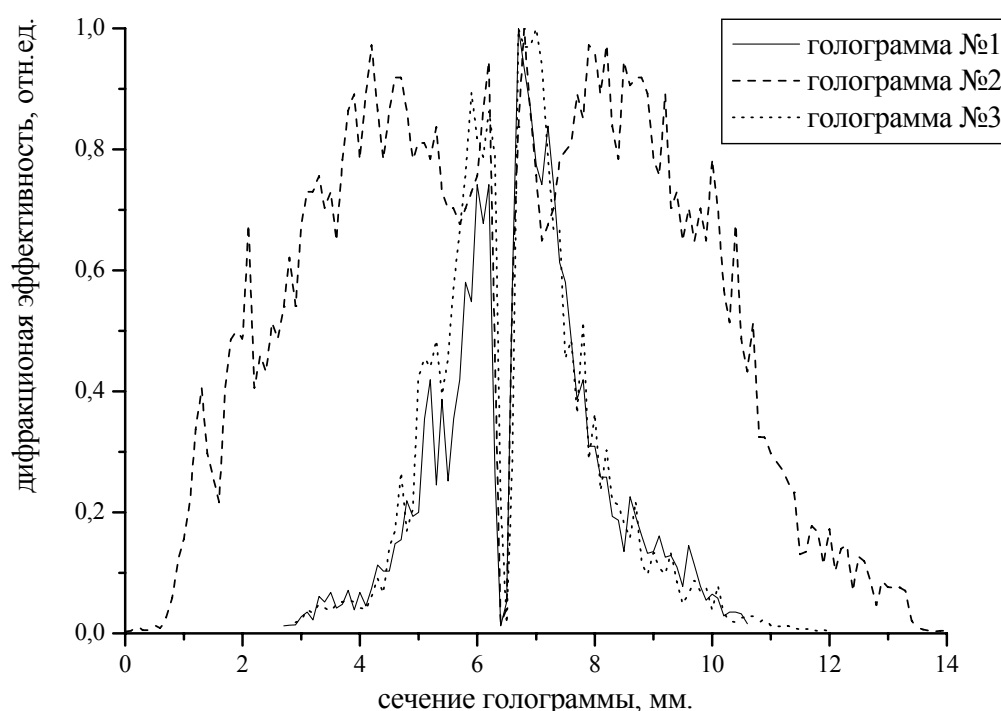


Рис. 14.1. Нормированная дифракционная эффективность по сечению голограмм

Из Рис.3.4.2. видно, что каждая голограмма формирует свою зависимость между выходной метрической шкалой (ось Y) и одинаковым для всех голограмм набором значений входных ЛП, условно размещенных по оси X. Таким образом, выбор условий записи голограмм позволяет реализовать принцип субъективности градуировки ЛШ. Действительно, в рамках использованного примера, два эксперта совершенно по-разному могут оценить качество одного и того же помидора, даже соглашаясь в оценке текущих значений каждой из описывающих его ЛП.

При анализе приведенной иллюстрации возможности настройки селективной чувствительности как перераспределения числа градаций между участками шкалы необходимо иметь в виду, что в эксперименте использовалась стандартная голографическая регистрирующая среда ПФГ-03м с процессом ГП-8. Традиционно, усилия разработчиков регистрирующих сред направлены на максимально возможное расширение квазилинейного участка динамического диапазона.

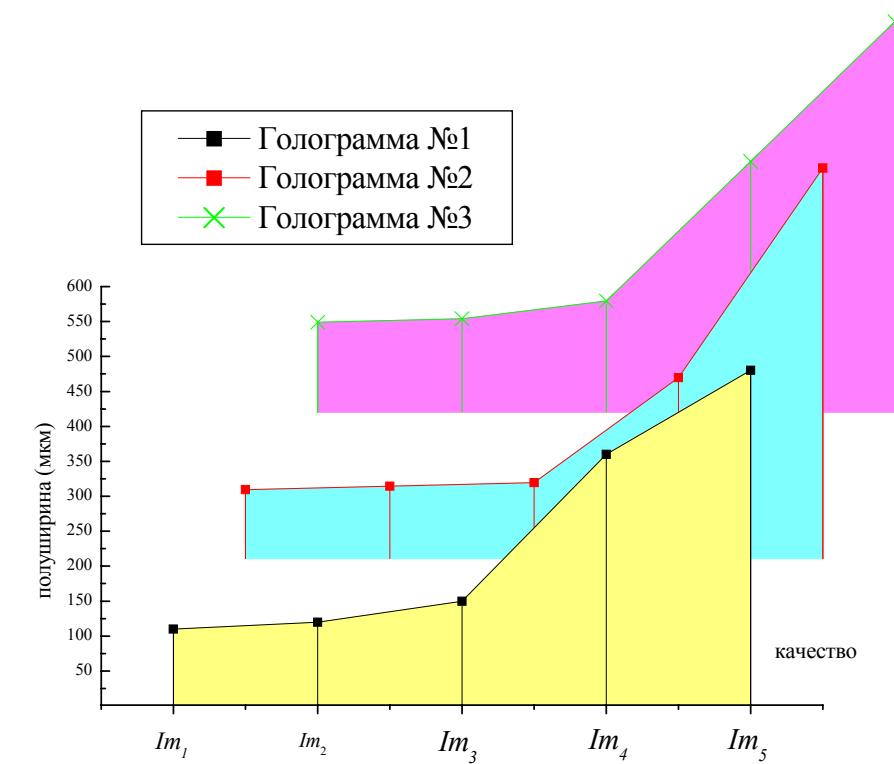


Рис. 14.2. Согласование лингвистической и метрической шкал

Как видно из (3.3.1), большего эффекта настройки системы на чувствительность в том или ином диапазоне можно добиться при использовании регистрирующих сред с более выраженными нелинейными характеристиками, в том числе, с наличием участков как прямой, так и инверсной зависимости дифракционной эффективности от экспозиции.

Также для нас существенно то, что оператор η , в дополнение к отмеченному выше перераспределению градаций между участками шкалы, управляет также и радиусом корреляции, т.е. возможна согласованная настройка трех параметров — двух параметров шкалы и степени учета взаимовлияния лингвистических переменных. Последнее открывает возможность реализации в рамках данной схемы также и принципа *контекстности* восприятия информации.

Литература к Лекции 3.4.

1. *Поспелов Д.А.*, Логико-лингвистические модели в системах управления, М. Энергоиздат, 1981.
2. *Кузнецов О.П., Тарасов В.Б., Аверкин А.Н., Вагин В.Н.*, Круглый стол «Парадигмы искусственного интеллекта» // Новости искусственного интеллекта, 1998, №3.
3. *Белов С.В.*, Шкалы в системах мягких измерений// Труды П Межд. Конф. По мягким вычислениям и измерениям СПб, 25-28 мая 1999, т.1.

4. Заде Л., Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений // Математика. Новое в зарубежной науке, вып.3, 1976.
5. D.Dubois, H.Prade, Fuzzy numbers: an overview, in: Ed. by J.C.Bezdek, Analysis of Fuzzy Information, Boca Raton, FL, 1987, v.1, pp.3-39.
6. W.Pedricz, A.Vasilakos, Linguistic Models and Linguistic Modeling// IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 1999, v.29, 6, p.745-759.
7. Г.Н.Мальцев, Ю.А.Ветринский, Логико-лингвистическое описание функционирования сложных радиотехнических систем с элементами искусственного интеллекта в управляющих вычислительных комплексах // Изв. ВУЗов, Приборостроение, 1999, т.42, в.3-4, с.3-7.
8. Кокушкин Ю.А., Усов В.М., Богомолов А.В., Автоматизированное оценивание риска нарушений состояния здоровья человека с помощью компьютерных вопросников на основе нечеткой логики // Информационные Технологии, 2002, №10.
9. Ю.А.Романенко, С.Г.Данилюк, Теоретические основы применения лингвистических переменных в диагностических моделях // Измерительная техника, 1997, в.1, с.13-16.
10. А.Н.Аверкин, И.З.Батыршин., А.Ф.Блишун, В.Б.Силов, В.Б.Тарасов, Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта, под.ред.Д.А.Поспелова, М., 1986.
11. Кузнецов О.П., Неклассические парадигмы в ИИ// Известия АН, сер. Теория и системы управления, 1995, №5, с.3-23
12. Zadeh L.A., Nikraves M., Aminzadeh F., Computing with Words and the BISC Decision Support System // Proceedings of IV Int. Conference on Soft Computing and Measurements, 2002, v.1, pp.18-21.
13. Валькман Ю.Р. и др., Тесты, контексты, универсумы в графических образах и языках // Труды Международной Конференции «Интеллектуальные системы», 3-10 сент., 2003, Дивноморское, Россия, Изд. Физ-мат. Литературы, Т.1, с.213-219.
14. Кольер, Оптическая голография, М.Мир, 1972.
15. Арбиб М., Метафорический мозг, М.Мир, 1976
16. Прибрам К., Языки мозга, М.Прогресс, 1975.
17. Судаков К.В., Голографический принцип системной организации процессов жизнедеятельности. - Успехи физиол.наук. 1997. 28, С.3-32.
18. Прибрам К., «Нелокальность и локализация: голографическая гипотеза о функционировании мозга в процессе восприятия и памяти», // В сб. «Синергетика и психология». Вып.1. "Методологические вопросы" Издательство МГСУ "Союз", 1997.
19. Owechko Y., "Nonlinear holographic associative memories", //IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, v.25, N3, p.619-634.
20. Kosko B., Adaptive Bidirectional Associative Memories, //Applied Optics, 1987, Vol.26, No23, pp.4947-4960.

21. *Kosko B.*, "Neural Networks and Fuzzy Systems: A dynamical systems approach to machine intelligence", Englewood Cliffs, Prentice Hall int.ed., 1992.
22. *Павлов А.В.*, Применение методов Фурье-голографии для построения логических процессоров // *Оптический журнал*, 2002, т.69, №10, с.42-48.
23. *Павлов А.В.*, Об алгебраических основаниях оптических измерений // *Измерительная техника*, 1999, 12, с.23-26.
24. *Gupta M.M., Qi J.*, Theory of T-norms and Fuzzy Inference Methods // *Fuzzy Sets and Systems*, 1991, v.40, pp.431-450.
25. *Weber S.*, A General Concept of Fuzzy Connectives, Negations and Implications Based on t-norms and t-conorms // *Fuzzy Sets & Systems*, 1983, v.11, pp.115-134.
26. *Yager R.R.*, On global requirements for implication operators in fuzzy modus ponens // *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.106, i.1, pp.3-10
27. *Dubois D., Prade H.*, A Review of Fuzzy Sets Aggregation Connectives // *Information Sciences*, 1985, v.36, pp.85-121.
28. *Трильяс Э., Альсина К., Вальверде А.*. Нужны ли в теории нечетких множеств операции MAX, MIN и 1-j? // В кн. "Нечеткие множества и теория возможностей" под ред. Р.Р. Ягера. - М.: 1986. – С. 199-228.
29. *Пригожин И.Р., Стенгерс И.*, «Время, хаос, квант», Пер. с англ. – М. Наука, 1989, 322с.
30. *Ижикевич Е.М., Малинецкий Г.Г.*, «Модель нейронной сети с хаотическим поведением», Ин-т прикладной математики им.М.В.Келдыша. Препринт №17, М., 1993.
31. *Борисюк Г.Н., Борисюк Р.М., Казанович Я.Б., Иваницкий Г.Р.*, «Модели динамики нейронной активности при обработке информации мозгом – итоги «десятилетия» // *Успехи Физических наук*, 2002, т.172, №10, с.1189-1214.

Заключение

В настоящем курсе лекций мы рассмотрели только некоторые из существующих на сегодня оптических информационных технологий, наиболее соответствующих сегодняшнему пониманию актуальности задач и перспектив развития ИИ. Ряд технологий вынужденно остался за рамками курса, например, технологии ассоциативной памяти, основанные на эффекте фотонного эха. Некоторые из не рассмотренных здесь технологий будут изучены в рамках других курсов (регистрирующих материалов, нелинейной оптики и т.п.); знаний, полученных в рамках курса должно хватить для того, чтобы самостоятельно увидеть области возможного применения этих технологий в задачах ИИ.

Мы увидели, что информационная технология, претендующая на соответствие современной парадигме искусственного интеллекта, должна соответствовать следующим критериям:

- Образное представление информации;
- Распределенность информации;
- Реализация отношения сходства (толерантности);
- Обучаемость и адаптивность в смысле самообучения;
- Параметричность;
- Контекстность восприятия и обработки информации;
- Неразрывность процессов восприятия и обработки.

Как следует из проведенного рассмотрения, этому набору требований достаточно полно соответствует Фурье-голография как технический метод и, тем самым, потенциально перспективна в плане создания систем ИИ. При этом еще раз подчеркнем – разговоры о т.н. голографическом мозге в значительной своей части являются профанацией и свидетельствуют о некомпетентности авторов. Голография, как и любая иная технология, как и оптика в целом, не может претендовать на всеохватность решения такой сложной, имеющей комплексный характер задачи, как ИИ. Для каждой технологии существует свой круг задач, своя область, в которой эта технология вне конкуренции по сравнению с другими в силу наиболее полного соответствия технологии тем моделям, для реализации которых она используется.

Для превращения упомянутых в курсе теоретических и экспериментальных результатов в коммерческие продукты необходимо развитие соответствующей элементной базы. В первую очередь, представляется актуальным развитие реверсивных голографических сред, работающих в реальном времени, в направлении реализации передаточных характеристик с существенной нелинейностью, параметризуемых условиями питания, экспозиции, etc.



В 2007 году СПбГУ ИТМО

стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

Кафедра фотоники и оптоинформатики

<http://phoi.ifmo.ru>

**Заведующий – профессор, д.ф.-м.н., лауреат премии Ленинского Комсомола
С. А. Козлов**

Кафедра фотоники и оптоинформатики создана в 2002 году и работает под руководством лауреата премии Ленинского комсомола по науке и технике профессора С.А.Козлова. Одной из важнейших задач кафедры является организация учебного процесса и подготовка специалистов по оптоинформатике – стремительно развивающейся новой области науки и техники, в которой разрабатываются оптические технологии сверхбыстрой передачи, обработки и записи информации, создаются быстродействующие оптические компьютеры и системы искусственного интеллекта. Разработка таких оптических информационно-телекоммуникационных технологий, представляющих собой информационные технологии нового поколения, является приоритетным направлением развития российской науки, техники и технологий.

В рамках образовательного направления 200600 студентам читаются лекционные курсы по оптической физике, теории информации и кодирования, архитектуре вычислительных систем, технологии программирования, цифровым оптическим вычислениям, оптическим технологиям искусственного интеллекта, голографическим системам записи и отображения информации, другим актуальным проблемам оптоинформатики, а также по квантовой информатике. Эти лекционные курсы поддержаны эксклюзивными учебно-исследовательскими экспериментальными практикумами.

Научные подразделения кафедры:

- Проблемная лаборатория волновых процессов, основная задача которой – организация научного руководства студентами и аспирантами молодежной научной ассоциации «Оптика-XXI век», руководитель: д.ф.м.н., проф.С.А.Козлов.

- Научно-образовательный центр фемтосекундной оптики и фемтотехнологий – руководитель: д.ф.м.н., проф. В.Г.Беспалов.
- Лаборатория параллельных вычислений, нанофотоники и оптоинформатики – руководитель: д.ф.м.н., проф. Н.Н.Розанов.
- Лаборатория квантовой информатики – руководитель: к.ф.м.н., доцент С.А.Чивилихин.
- Лаборатория прикладной голографии – руководитель: к.ф.м.н., доцент О.В.Андреева

На кафедре сформирована признанная научно-педагогическая школа по фемтосекундной оптике и фемтотехнологиям – руководители: д.ф.м.н., проф. С.А.Козлов и д.ф.м.н., проф. В.Г.Беспалов.

Среди студентов и аспирантов кафедры – стипендиаты Президента и Правительства Российской Федерации, победители конкурсов научных работ, проводимых Российской Академией наук, крупнейшими мировыми научными обществами, такими как INTAS (Фонд научно-исследовательских работ Европейского сообщества), SPIE (Международное общество инженеров-оптиков), CRDF (Американский фонд гражданских исследований и развития), OSA (Оптическое общество Америки).

Кафедра фотоники и оптоинформатики постоянно занимает призовые места по итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов Университета ИТМО.

Владимир Николаевич Васильев, Александр Владимирович Павлов

Оптические технологии искусственного интеллекта

Учебное пособие

В авторской редакции

Компьютерная верстка

А.В.Павлов

Дизайн

А.В. Павлов

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского Государственного
Университета Информационных Технологий, Механики и Оптики

Лицензия ИД №00408 от 05.11.99

Зав. редакционно-издательским отделом

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати 05.07.08

Отпечатано на ризографе

Тираж ____ экз.

Заказ № 1197