

# НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

## Полный курс

Издание второе, исправленное

Саймон Хайкин

Университет McMaster  
Гамильтон, Онтарио, Канада



Москва • Санкт-Петербург • Киев  
2017

**Хайкин, С.** Нейронные сети : полный курс / Саймон Хайкин ; [пер. с англ. и ред. Н. Н. КуССуль]. — Изд. 2-е, испр. — Москва [и др.] : Вильямс, 2017. — 1103 с. : ил. — Парал. тит. англ. — Библиография : с. 996—1069. — Предм. указ. : с. 1070—1103.

УДК 004.032.26

ББК 32

**Аб. №1 — 2 экз.**

**Ч/З №1 — 2 экз.**

Все названия программных продуктов являются зарегистрированными торговыми марками соответствующих фирм.

Никакая часть настоящего издания ни в каких целях не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, если на это нет письменного разрешения издательства Prentice Hall, Inc.

Authorized translation from the English language edition published by Prentice Hall, Copyright © 1998.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Russian language edition was published by Williams Publishing House according to the Agreement with R&I Enterprises International, Copyright © 2017.

# Оглавление

---

Предисловие	22
1. Введение	31
2. Процессы обучения	89
3. Однослойный персептрон	171
4. Многослойный персептрон	219
5. Сети на основе радиальных базисных функций	341
6. Машины опорных векторов	417
7. Ассоциативные машины	458
8. Анализ главных компонент	509
9. Карты самоорганизации	573
10. Модели на основе теории информации	622
11. Стохастические машины и их аппроксимации в статистической механике	691
12. Нейродинамическое программирование	760
13. Временная обработка с использованием сетей прямого распространения	799
14. Нейродинамика	835
15. Динамически управляемые рекуррентные сети	919
16. Заключение	989
Библиография	996
Предметный указатель	1069

# Содержание

Энциклопедия

<b>Предисловие</b>	<b>22</b>
Благодарности	25
Важные символы	27
Открытые и закрытые интервалы	29
Минимумы и максимумы	29
<b>1. Введение</b>	<b>31</b>
1.1. Что такое нейронные сети	31
Преимущества нейронных сетей	33
1.2. Человеческий мозг	37
1.3. Модели нейронов	42
Типы функций активации	45
Стохастическая модель нейрона	48
1.4. Представление нейронных сетей с помощью направленных графов	49
1.5. Обратная связь	52
1.6. Архитектура сетей	55
Однослойные сети прямого распространения	55
Многослойные сети прямого распространения	55
Рекуррентные сети	56
1.7. Представление знаний	58
Как встроить априорную информацию в структуру нейронной сети	63
Как встроить инварианты в структуру нейронной сети	65
1.8. Искусственный интеллект и нейронные сети	70
1.9. Историческая справка	75
Задачи	83
Модели нейрона	83
Сетевые архитектуры	86
Представление знаний	88
<b>2. Процессы обучения</b>	<b>89</b>
2.1. Введение	89
Структура главы	90
2.2. Обучение, основанное на коррекции ошибок	91
2.3. Обучение на основе памяти	93
2.4. Обучение Хебба	95

Усиление и ослабление синаптической связи	97
Математические модели предложенного Хеббом механизма модификации синаптической связи	98
2.5. Конкурентное обучение	101
2.6. Обучение Больцмана	104
2.7. Задача присваивания коэффициентов доверия	106
2.8. Обучение с учителем	107
2.9. Обучение без учителя	108
Обучение с подкреплением, или нейродинамическое программирование	109
Обучение без учителя	110
2.10. Задачи обучения	111
Ассоциативная память	111
Распознавание образов	113
Аппроксимация функций	114
Управление	116
Фильтрация	118
Формирование диаграммы направленности	120
2.11. Память	122
Память в виде матрицы корреляции	127
Извлечение из памяти	129
2.12. Адаптация	132
2.13. Статистическая природа процесса обучения	134
Дилемма смещения и дисперсии	138
2.14. Теория статистического обучения	140
Некоторые основные определения	142
Принцип минимизации эмпирического риска	143
VC-измерение	146
Важность VC-измерения и его оценка	149
Конструктивные, независимые от распределения пределы обобщающей способности обучаемых машин	151
Минимизация структурного риска	154
2.15. Вероятностно-корректная в смысле аппроксимации модель обучения	156
Сложность обучающего множества	159
Вычислительная сложность	160
2.16. Резюме и обсуждение	161
Задачи	163
Правила обучения	163
Парадигмы обучения	166
Память	167
Адаптация	168
Статистическая теория обучения	169

<b>3. Однослойный персептрон</b>	<b>171</b>
3.1. Введение	171
Структура главы	172
3.2. Задача адаптивной фильтрации	173
3.3. Методы безусловной оптимизации	175
Метод наискорейшего спуска	177
Метод Ньютона	179
Метод Гаусса–Ньютона	181
3.4. Линейный фильтр, построенный по методу наименьших квадратов	183
Фильтр Винера как ограниченная форма линейного фильтра, построенного по методу наименьших квадратов, для эргодической среды	184
3.5. Алгоритм минимизации среднеквадратической ошибки	185
Граф передачи сигнала для алгоритма минимизации среднеквадратической ошибки	187
Условия сходимости алгоритма LMS	188
Преимущества и недостатки алгоритма LMS	190
3.6. Графики процесса обучения	191
3.7. Изменение параметра скорости обучения по модели отжига	193
3.8. Персептрон	194
3.9. Теорема о сходимости персептрона	196
3.10. Взаимосвязь персептрона и байесовского классификатора в гауссовой среде	204
Байесовский классификатор	204
Байесовский классификатор и распределение Гаусса	207
3.11. Резюме и обсуждение	210
Задачи	212
Безусловная оптимизация	212
Алгоритм LMS	213
Персептрон Розенблатта	216
<b>4. Многослойный персептрон</b>	<b>219</b>
4.1. Введение	219
Структура главы	221
4.2. Вводные замечания	222
Обозначения	224
4.3. Алгоритм обратного распространения	225
Случай 1. Нейрон $j$ — выходной узел	229
Случай 2. Нейрон $j$ — скрытый узел	229
Два прохода вычислений	232
Функция активации	233

Скорость обучения	235
Последовательный и пакетный режимы обучения	238
Критерий останова	240
4.4. Алгоритм обратного распространения в краткой форме	241
4.5. Задача XOR	243
4.6. Эвристические рекомендации по улучшению работы алгоритма обратного распространения	245
4.7. Представление выхода и решающее правило	253
4.8. Компьютерный эксперимент	256
Байесовская граница решений	257
Экспериментальное построение оптимального многослойного персептрона	260
4.9. Извлечение признаков	268
Связь с линейным дискриминантом Фишера	272
4.10. Обратное распространение ошибки и дифференцирование	274
Матрица якобиана	275
4.11. Гессиан	276
4.12. Обобщение	278
Достаточный объем примеров обучения для корректного обобщения	279
4.13. Аппроксимация функций	281
Теорема об универсальной аппроксимации	282
Пределы ошибок аппроксимации	283
"Проклятие размерности"	285
Практические соображения	286
4.14. Перекрестная проверка	288
Выбор модели	289
Метод обучения с ранним остановом	291
Варианты метода перекрестной проверки	294
4.15. Методы упрощения структуры сети	295
Регуляризация сложности	296
Упрощение структуры сети на основе Гессиана	299
4.16. Преимущества и ограничения обучения методом обратного распространения	304
Связность	306
Извлечение признаков	307
Аппроксимация функций	309
Вычислительная эффективность	310
Анализ чувствительности	310
Робастность	311
Сходимость	311
Локальные минимумы	312
Масштабирование	313
4.17. Ускорение сходимости процесса обучения методом обратного распространения	315

4.18. Обучение с учителем как задача оптимизации	316
Метод сопряженных градиентов	319
Нелинейный алгоритм сопряженных градиентов в сжатом виде	326
Квазиньютоновские методы	327
Сравнение квазиньютоновских методов с методом сопряженных градиентов	329
4.19. Сети свертки	330
4.20. Резюме и обсуждение	333
Задачи	335
Задачи XOR	335
Обучение методом обратного распространения	335
Перекрестная проверка	336
Приемы упрощения сети	337
Ускорение сходимости алгоритма обратного распространения	337
Методы оптимизации второго порядка	338
Компьютерное моделирование	338
<b>5. Сети на основе радиальных базисных функций</b>	<b>341</b>
5.1. Введение	341
Структура главы	342
5.2. Теорема Ковера о разделимости множеств	343
Разделяющая способность поверхности	347
5.3. Задача интерполяции	349
Теорема Мичелли	352
5.4. Обучение с учителем как плохо обусловленная задача восстановления гиперповерхности	353
5.5. Теория регуляризации	355
Дифференциал Фреше функционала Тихонова	358
Уравнение Эйлера–Лагранжа	360
Функция Грина	361
Решение задачи регуляризации	363
Определение коэффициентов разложения	364
Многомерные функции Гаусса	367
5.6. Сети регуляризации	369
5.7. Обобщенные сети на основе радиальных базисных функций	371
Взвешенная норма	373
Рецептивные поля	375
5.8. Задача XOR (повторное рассмотрение)	376
5.9. Оценивание параметра регуляризации	378
Среднеквадратическая ошибка	379
Обобщенная перекрестная проверка	382
Оптимальное свойство обобщенной функции перекрестной проверки $V\lambda$	384
Заключительные комментарии	385
5.10. Свойства аппроксимации сетей RBF	385



Универсальная теорема об аппроксимации	386
"Проклятие размерности" (продолжение)	386
Связь между сложностью обучающего множества, вычислительной сложностью и эффективностью обобщения	388
5.11. Сравнение сетей RBF и многослойных перцептронов	389
5.12. Регрессия ядра и ее связь с сетями RBF	390
Многомерное распределение Гаусса	395
5.13. Стратегии обучения	396
Случайный выбор фиксированных центров	396
Выбор центров на основе самоорганизации	399
Выбор центров с учителем	401
Строгая интерполяция с регуляризацией	403
5.14. Компьютерное моделирование: классификация образов	405
5.15. Резюме и обсуждение	408
Задачи	409
Радиальные базисные функции	409
Сети регуляризации	410
Порядок аппроксимации	413
Оценка ядра	414
Выбор центров с учителем	414
Компьютерное моделирование	415
<b>6. Машины опорных векторов</b>	<b>417</b>
6.1. Введение	417
Структура главы	418
6.2. Оптимальная гиперплоскость для линейно-разделимых образов	419
Квадратичная оптимизация и поиск оптимальной гиперплоскости	422
Статистические свойства оптимальной гиперплоскости	425
6.3. Оптимальная гиперплоскость для неразделимых образов	426
6.4. Как создать машину опорных векторов для задачи распознавания образов	431
Ядро скалярного произведения	433
Теорема Мерсера	434
Оптимальная архитектура машины опорных векторов	436
Примеры машин опорных векторов	437
6.5. Пример: задача XOR (продолжение)	438
6.6. Компьютерное моделирование	442
Заключительные замечания	443
6.7. $\varepsilon$ -нечувствительные функции потерь	444
6.8. Машины опорных векторов для задач нелинейной регрессии	445
6.9. Резюме и обсуждение	449
Задачи	453
Оптимальная разделяющая гиперплоскость	453
Ядро скалярного произведения	454

Классификация множеств	455
Нелинейная регрессия	455
Преимущества и недостатки	456
Компьютерное моделирование	457

## **7. Ассоциативные машины** **458**

---

7.1. Введение	458
Структура главы	459
7.2. Усреднение по ансамблю	460
7.3. Компьютерный эксперимент 1	464
7.4. Метод усиления	465
Усиление за счет фильтрации	466
Алгоритм адаптивного усиления AdaBoost	470
Изменение ошибки	473
7.5. Компьютерный эксперимент 2	474
7.6. Ассоциативная гауссова модель смешения	476
Вероятностная порождающая модель	478
Модель смешения мнений экспертов	479
7.7. Модель иерархического смешения мнений экспертов	484
7.8. Выбор модели с использованием стандартного дерева решений	486
Алгоритм CART	487
Использование алгоритма CART для инициализации модели НМА	489
7.9. Априорные и апостериорные вероятности	490
7.10. Оценка максимального подобия	492
7.11. Стратегии обучения для модели НМЕ	495
7.12. Алгоритм EM	497
7.13. Применение алгоритма EM к модели НМЕ	498
7.14. Резюме и обсуждение	503
Задачи	505
Усреднение по ансамблю	505
Усиление	505
Смешение мнений экспертов	505
Иерархическое смешение мнений экспертов	506
Алгоритм EM и его применение в модели НМЕ	506

## **8. Анализ главных компонент** **509**

---

8.1. Введение	509
Структура главы	510
8.2. Некоторые интуитивные принципы самоорганизации	510
Анализ признаков на основе самоорганизации	513
8.3. Анализ главных компонент	514
Структура анализа главных компонент	516
Основные представления данных	520

Сокращение размерности	520
8.4. Фильтр Хебба для выделения максимальных собственных значений	523
Матричная формулировка алгоритма	527
Теорема об асимптотической устойчивости	528
Анализ устойчивости фильтра для извлечения максимального собственного значения	530
Общие свойства фильтра Хебба для извлечения максимального собственного значения	535
8.5. Анализ главных компонент на основе фильтра Хебба	537
Исследование сходимости	541
Оптимальность обобщенного алгоритма Хебба	542
Алгоритм ГНА в сжатом виде	543
8.6. Компьютерное моделирование: кодирование изображений	544
8.7. Адаптивный анализ главных компонент с использованием латерального торможения	546
Интенсивность обучения	556
Алгоритм APX в сжатом виде	557
8.8. Два класса алгоритмов PCA	558
Подпространство главных компонент	558
8.9. Пакетный и адаптивный методы вычислений	559
8.10. Анализ главных компонент на основе ядра	561
Алгоритм PCA на основе ядра в сжатом виде	565
8.11. Резюме и обсуждение	567
Задачи	570
Фильтр Хебба для извлечения максимального собственного значения	570
Анализ главных компонент на основе правила Хебба	571
PCA на основе ядра	572

## **9. Карты самоорганизации 573**

---

9.1. Введение	573
Структура главы	574
9.2. Две основные модели отображения признаков	575
9.3. Карты самоорганизации	577
Процесс конкуренции	579
Процесс кооперации	580
Процесс адаптации	583
Два этапа адаптивного процесса: упорядочивание и сходимость	585
9.4. Краткое описание алгоритма SOM	586
9.5. Свойства карты признаков	588
9.6. Компьютерное моделирование	597
Двумерная решетка, полученная на основе двумерного распределения	597
Одномерная решетка на основе двумерного распределения	599
Описание параметров моделирования	600

9.7. Квантование вектора обучения	602
9.8. Компьютерное моделирование: адаптивная классификация множеств	604
9.9. Иерархическая квантизация векторов	606
9.10. Контекстные карты	611
9.11. Резюме и обсуждение	613
Задачи	615
Алгоритм SOM	615
Квантизация векторов обучения	616
Компьютерные эксперименты	617
<b>10. Модели на основе теории информации</b>	<b>622</b>
10.1. Введение	622
Структура главы	623
10.2. Энтропия	623
Дифференциальная энтропия непрерывной случайной переменной	627
Свойства дифференциальной энтропии	628
10.3. Принцип максимума энтропии	629
10.4. Взаимная информация	632
Взаимная информация непрерывных случайных переменных	635
10.5. Дивергенция Кулбека–Лейблера	636
Декомпозиция Пифагора	638
10.6. Взаимная информация как оптимизируемая целевая функция	640
10.7. Принцип максимума взаимной информации	641
10.8. Принцип Infomax и уменьшение избыточности	646
Моделирование систем восприятия	646
10.9. Пространственно связанные признаки	649
10.10. Пространственно несвязные признаки	652
10.11. Анализ независимых компонентов	654
Критерий статистической независимости	659
Определение дифференциальной энтропии $h(Y)$	660
Определение граничной энтропии $\tilde{h}(Y_i)$	660
Функция активации	664
Алгоритм обучения для ICA	666
Свойство эквивариантности	668
Условия устойчивости	670
Условия сходимости	672
10.12. Компьютерное моделирование	672
10.13. Оценка максимального правдоподобия	675
Связь между максимальным подобием и анализом независимых компонентов	677
10.14. Метод максимальной энтропии	678
Алгоритм обучения для слепого разделения источников	682
10.15. Резюме и обсуждение	684

Задачи	686
Принцип максимума энтропии	686
Взаимная информация	686
Принцип Infomax	687
Анализ независимых компонентов	688
Метод максимальной энтропии	690
<b>11. Стохастические машины и их аппроксимации в статистической механике</b>	<b>691</b>
11.1. Введение	691
Структура главы	692
11.2. Статистическая механика	692
Свободная энергия и энтропия	694
11.3. Цепи Маркова	695
Вероятности перехода	696
Свойства рекуррентности	698
Несохраняемые цепи Маркова	698
Эргодические цепи Маркова	699
Сходимость к стационарным распределениям	700
Классификация состояний	703
Принцип детального баланса	703
11.4. Алгоритм Метрополиса	704
Выбор вероятности перехода	705
11.5. Метод моделирования отжига	707
Расписание отжига	709
Моделирование отжига для комбинаторной оптимизации	710
11.6. Распределение Гиббса	711
11.7. Машина Больцмана	713
Квантование Гиббса и моделирование отжига в машине Больцмана	715
Правило обучения Больцмана	718
Потребность в отрицательной фазе и ее применение	721
11.8. Сигмоидальные сети доверия	722
Фундаментальные свойства сигмоидальных сетей доверия	722
Обучение в сигмоидальных сетях доверия	724
11.9. Машина Гельмгольца	728
11.10. Теория среднего поля	730
11.11. Детерминированная машина Больцмана	733
11.12. Детерминированные сигмоидальные сети доверия	734
Нижняя граница функции логарифмического правдоподобия	735
Процедура обучения для аппроксимации среднего поля сигмоидальной сети доверия	738
11.13. Детерминированный отжиг	742
Кластеризация посредством детерминированного отжига	743
Аналогия с алгоритмом EM	748
11.14. Резюме и обсуждение	748

Задачи	752
Цепи Маркова	752
Приемы моделирования	752
Машина Больцмана	754
Сигмоидальные сети доверия	757
Машина Гельмгольца	757
Детерминированная машина Больцмана	758
Детерминированная сигмоидальная сеть доверия	758
Детерминированный отжиг	758
<b>12. Нейродинамическое программирование</b>	<b>760</b>
12.1. Введение	760
Структура главы	762
12.2. Марковский процесс принятия решений	762
Постановка задачи	765
12.3. Критерий оптимальности Беллмана	766
Алгоритм динамического программирования	767
Уравнение оптимальности Беллмана	768
12.4. Итерация по стратегиям	770
12.5. Итерация по значениям	773
12.6. Нейродинамическое программирование	778
12.7. Приближенный алгоритм итерации по стратегиям	780
12.8. Q-обучение	784
Теорема о сходимости	786
Приближенное Q-обучение	787
Исследование	788
12.9. Компьютерный эксперимент	790
12.10. Резюме и обсуждение	793
Задачи	796
Критерий оптимальности Беллмана	796
Итерация по стратегиям	798
Итерация по значениям	798
Q-обучение	798
<b>13. Временная обработка с использованием сетей прямого распространения</b>	<b>799</b>
13.1. Введение	799
Структура главы	800
13.2. Структуры кратковременной памяти	801
Память на основе линии задержки с отводами	803
Гамма-память	804
13.3. Сетевые архитектуры для временной обработки	806
NETalk	806
Нейронные сети с задержкой по времени	807

13.4. Фокусированные сети прямого распространения с задержкой по времени	809
13.5. Компьютерное моделирование	812
13.6. Универсальная теорема миопического отображения	813
13.7. Пространственно-временные модели нейрона	815
Аддитивная модель	818
13.8. Распределенные сети прямого распространения с задержкой по времени	820
13.9. Алгоритм обратного распространения во времени	821
Ограничения причинности	827
13.10. Резюме и обсуждение	829
Задачи	830
Фокусированные TLFN	830
Пространственно-временные модели нейронов	831
Обратное распространение во времени	831
Компьютерное моделирование	832
<b>14. Нейродинамика</b>	<b>835</b>
14.1. Введение	835
Структура главы	836
14.2. Динамические системы	837
Пространство состояний	838
Условие Лившица	840
Теорема о дивергенции	841
14.3. Устойчивость состояний равновесия	842
Определения устойчивости	843
Теоремы Ляпунова	846
14.4. Аттракторы	848
Гиперболические аттракторы	849
14.5. Нейродинамические модели	849
Аддитивная модель	850
Связанная модель	853
14.6. Управление аттракторами как парадигма рекуррентных сетей	854
14.7. Модель Хопфилда	856
Соотношение между устойчивыми состояниями дискретной и непрерывной версии модели Хопфилда	860
Дискретная модель Хопфилда как ассоциативная память	862
Ложные состояния	870
Емкость сети Хопфилда	871
14.8. Компьютерное моделирование 1	876
14.9. Теорема Коэна–Гроссберга	880
Модель Хопфилда как частный <u>случай теоремы Коэна–Гроссберга</u>	883
14.10. Модель BSB	884
Функция Ляпунова модели BSB	885

Динамика модели BSB	888
Кластеризация	889
14.11. Компьютерное моделирование 2	891
14.12. Странные аттракторы и хаос	893
Инвариантные характеристики хаотической динамики	894
14.13. Динамическое восстановление	899
Рекурсивное прогнозирование	901
Две возможные формулировки рекурсивного прогнозирования	903
Динамическое восстановление как плохо обусловленная задача фильтрации	903
14.14. Компьютерное моделирование 3	904
Выбор параметров $m$ и $\lambda$	907
14.15. Резюме и обсуждение	908
Задачи	912
Динамические системы	912
Модели Хопфилда	912
Теорема Козна–Гроссберга	917
<b>15. Динамически управляемые рекуррентные сети</b>	<b>919</b>
15.1. Введение	919
Структура главы	920
15.2. Архитектуры рекуррентных сетей	921
Рекуррентная модель “вход-выход”	921
Модель в пространстве состояний	923
Рекуррентный многослойный персептрон	925
Сеть второго порядка	925
15.3. Модель в пространстве состояний	928
Управляемость и наблюдаемость	930
Локальная управляемость	932
Локальная наблюдаемость	934
15.4. Нелинейная автогрессия с внешней моделью входов	936
15.5. Вычислительная мощность рекуррентных сетей	937
15.6. Алгоритмы обучения	941
Некоторые звристики	942
15.7. Обратное распространение во времени	943
Обратное распространение по эпохам во времени	945
Усеченное обратное распространение во времени	946
Некоторые практические соглашения	947
15.8. Рекуррентное обучение в реальном времени	949
Усиление учителем	955
15.9. Фильтр Калмана	956
Фильтр Калмана на основе квадратного корня	960
15.10. Несвязный расширенный фильтр Калмана	960



Искусственный шум процесса	964
Полное описание алгоритма DEKF	965
Вычислительная сложность	965
15.11. Компьютерное моделирование	965
15.12. Обращение в нуль градиентов в рекуррентных сетях	968
Долгосрочные зависимости	971
15.13. Системная идентификация	973
Идентификация систем с использованием модели в пространстве состояний	974
Модель в терминах "вход-выход"	976
15.14. Адаптивное управление на основе эталонной модели	977
15.15. Резюме и обсуждение	979
Задачи	982
<i>Модель в пространстве состояний</i>	982
Модель нелинейной авторегрессии с экзогенными входами (NARX)	983
Алгоритм ВРТТ	985
Алгоритм рекуррентного обучения в реальном времени	985
Алгоритм несвязной расширенной фильтрации Калмана	986
Рекуррентные сети второго порядка	987
<b>16. Заключение</b>	<b>989</b>
16.1. Интеллектуальные системы	990
<b>Библиография</b>	<b>996</b>
<b>Предметный указатель</b>	<b>1069</b>