

УДК 681.322
ББК 30.17
Г15

Рецензенты:

академик РАН Ю. В. Гуляев; доктор техн. наук Э. Д. Аведьян

Галушкин А. И.

Г15 Нейронные сети: основы теории. – М.: Горячая линия–Телеком, 2024. – 496 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0082-0.

Изложена методика синтеза многослойных нейросетей различной структуры: с полными и неполными последовательными связями, перекрестными и обратными связями, функционирующими в режимах обучения, самообучения, обучения с учителями, обладающих конечной квалификацией. Приведены этапы исследования надежности и диагностики нейронных сетей. Представлены основные постановки задач перспективных исследований в области теории нейронных сетей.

Для научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся разработкой и применением сверхвысокопроизводительной вычислительной техники.

ББК 30.17

Научное издание

Галушкин Александр Иванович

Нейронные сети: основы теории

Тиражирование книги начато в 2010 г.

Все права защищены.

Любая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения правообладателя

© ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»

www.techbook.ru

© А. И. Галушкин (наследники)

Оглавление

| | |
|--|----|
| Предисловие..... | 3 |
| Профессор, Lotfi A. Zadeh Университет Беркли, штат Калифорния | 3 |
| Профессор, Robert Hecht-Nielsen Вычислительная нейробиология, Институт нейронных вычислений и факультет ECE Университета Калифорнии, Сан Диего | 6 |
| Профессор Shun-ichi Amari директор RIKEN Brain Science Institute, Токио | 9 |
| Введение | 10 |
| Раздел 1. Структура нейронных сетей | 51 |
| Глава 1. От логического базиса булевских элементов И, ИЛИ, НЕ к пороговому логическому базису | 51 |
| 1.1. Линейный пороговый элемент (нейрон)..... | 51 |
| 1.2. Многопороговая логика | 54 |
| 1.3. Непрерывная логика | 55 |
| 1.4. Частные виды функций активации | 56 |
| Глава 2. Качественные характеристики архитектур нейронных сетей..... | 60 |
| 2.1. Частные типы архитектур нейронных сетей | 60 |
| 2.2. Многослойные нейронные сети с последовательными связями | 62 |
| 2.3. Структурное и символическое описание многослойных нейронных сетей | 65 |
| Глава 3. Оптимизация структуры многослойных нейронных сетей с перекрестными связями | 72 |
| 3.1. О критерии сложности задачи | 72 |
| 3.2. Одномерный вариант нейронной сети с перекрестными связями..... | 73 |
| 3.3. Вывод верхней и нижней оценки количества областей..... | 75 |
| 3.4. Частная задача оптимизации | 78 |
| 3.5. Оптимизация структуры по некоторым основным топологическим характеристикам | 81 |
| 3.6. Оптимизация структуры многослойных нейронных сетей с K_p решениями..... | 85 |
| Глава 4. Континуальные нейронные сети | 89 |
| 4.1. Нейроны с континуумом признаков на входе | 89 |
| 4.2. Континуум нейронов в слое | 90 |
| 4.3. Континуум нейронов слоя и дискретное множество признаков | 91 |
| 4.4. Классификация континуальных моделей слоя нейронов..... | 92 |
| 4.4.1. Дискретное множество нейронов..... | 92 |
| 4.4.2. Одномерное и двумерное m_2 пространство признаков | 93 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.3. Континуум признаков. Одномерное m_1 для нескольких каналов | 94 |
| 4.4.4. Континуум признаков. Двумерное m_1 | 95 |
| 4.4.5. Слой нейронов с континуумом выходных значений | 95 |
| Раздел 2. Оптимальные модели нейронных сетей | 98 |
| Глава 5. Исследование характеристик входных сигналов | 98 |
| 5.1. Постановка задачи | 98 |
| 5.2. Совместный закон распределения вероятностей входного сигнала для двух классов образов | 100 |
| 5.3. Совместный закон распределения вероятностей входного сигнала для K классов образов | 107 |
| Глава 6. Построение оптимальных моделей нейронных сетей | 112 |
| 6.1. Общая структура оптимальной модели | 112 |
| 6.2. Аналитическое представление разделяющих поверхностей в типовых нейронных сетях | 114 |
| 6.3. Оптимальная модель нейронной сети для многомерных сигналов $e(n)$ и $y(n)$ | 138 |
| 6.4. Априорная информация о входном сигнале нейронной сети в режиме самообучения | 141 |
| 6.5. О критериях первичной оптимизации нейронной сети в режиме самообучения | 143 |
| 6.6. Оптимальные модели нейронной сети в режиме самообучения и при произвольной квалификации учителя | 145 |
| Глава 7. Анализ разомкнутых нейронных сетей | 151 |
| 7.1. Законы распределения аналоговой и дискретной ошибок нейронной сети | 151 |
| 7.1.1. Нейрон с двумя решениями | 151 |
| 7.1.2. Нейрон с континуумом решений | 154 |
| 7.1.3. Анализ нейрона с K_p решениями | 156 |
| 7.1.4. Анализ системы распознавания образов с нелинейной разделяющей поверхностью | 158 |
| 7.2. Выбор функционала вторичной оптимизации | 160 |
| 7.3. О выборе функционала вторичной оптимизации в системе «Адалин» | 162 |
| 7.4. Формирование функционалов вторичной оптимизации, соответствующих заданному критерию первичной оптимизации | 164 |
| 7.4.1. Критерий минимума средней функции | 164 |
| 7.4.2. Критерий минимума R при условии равенства $p_1r_1 = p_2r_2$... | 165 |
| 7.4.3. Критерий минимума R при условии $p_1r_1 = a = \text{const}$ | 166 |
| 7.5. Континуальные модели нейронной сети | 167 |
| 7.5.1. Нейронная сеть с континуумом решений: два класса образов | 168 |
| 7.5.2. Нейронная сеть с континуумом решений: континуум классов образов | 170 |
| 7.5.3. Нейронная сеть с K_p решениями; K классов образов | 171 |

| | |
|--|------------|
| 7.5.4. Нейронная сеть с N^* -выходными каналами; K_0 градаций сигнала по каждому классу..... | 172 |
| 7.5.5. Нейронные сети с N^* -выходными каналами; континуум решений нейронных сетей | 172 |
| 7.6. Нейронная сеть в режимах самообучения и при произвольной квалификации учителя..... | 173 |
| Глава 8. Поиск экстремума функций многих переменных | 175 |
| 8.1. Организация процедуры поиска экстремума функционала вторичной оптимизации в многослойных нейронных сетях | 175 |
| 8.2. Анализ итерационного метода поиска экстремума функций многих переменных | 176 |
| 8.3. О методе стохастической аппроксимации | 179 |
| 8.4. Итерационные методы поиска экстремума функций многих переменных при наличии ограничений типа равенств на переменные..... | 179 |
| 8.4.1. Алгоритм поиска..... | 180 |
| 8.4.2. Анализ матрицы вторых производных функции Лагранжа . | 181 |
| 8.4.3. Оптимальность по быстрдействию итерационной процедуры поиска экстремума при ограничениях типа равенств | 182 |
| 8.4.4. Оптимальность по быстрдействию при ограничениях (8.6).... | 182 |
| 8.4.5. Случай ограничений типа равенств, решаемых относительно переменных | 183 |
| 8.4.6. Устойчивость итерационного процесса при ограничениях типа равенств | 184 |
| 8.4.7. Сходимость итерационного метода поиска при ограничениях типа равенств | 185 |
| 8.5. Итерационные методы поиска экстремума функций многих переменных при наличии ограничений типа неравенств на переменные..... | 186 |
| 8.5.1. Условия оптимальности..... | 186 |
| 8.5.2. Алгоритм поиска экстремума при наличии ограничений типа неравенств | 187 |
| 8.6. Алгоритм случайного поиска локальных и глобального экстремумов функций многих переменных..... | 188 |
| 8.7. Построение алгоритмов адаптации в многослойных нейронных сетях с использованием оценок производных второго порядка функционала вторичной оптимизации..... | 190 |
| 8.7.1. Построение алгоритмов поиска | 190 |
| 8.7.2. Одномерный случай..... | 193 |
| Раздел 3. Адаптивные нейронные сети | 196 |
| Глава 9. Алгоритмы настройки нейронных сетей | 196 |
| 9.1. Постановка задачи..... | 196 |
| 9.2. Нейрон с двумя и континуумом решений..... | 197 |

| | |
|--|-----|
| 9.3. Двухслойные нейронные сети..... | 201 |
| 9.4. Многослойные нейронные сети из нейронов с континуумом решений..... | 204 |
| 9.5. Построение нейронных сетей, настраивающихся по замкнутому циклу при ограничениях на переменные | 204 |
| 9.6. Реализация критериев первичной оптимизации в нейронах с двумя решениями | 208 |
| 9.7. Реализация критерия минимума средней функции риска в нейронах с континуумом и K_p решениями..... | 210 |
| 9.8. Реализация критерия минимума средней функции риска в нейронных сетях с N'' выходными каналами (слой нейронов) | 212 |
| 9.9. Реализация критерия минимума средней функции риска в многослойных нейронных сетях | 214 |
| 9.10. Построение замкнутых нейронных сетей нестационарных образов | 216 |
| 9.11. Построение нейронных сетей с перекрестными и обратными связями, настраивающихся по замкнутому циклу | 219 |
| 9.12. Построение замкнутых нейронных сетей в режимах самообучения и произвольной квалификации учителя | 221 |
| 9.13. Вывод выражений для оценок производных второго порядка функционала вторичной оптимизации | 223 |
| Глава 10. Настройка континуальных нейронных сетей..... | 226 |
| 10.1. Настройка нейрона с континуумом признаков | 227 |
| 10.2. Настройка слоя, состоящего из континуума нейронов | 227 |
| 10.3. Выбор параметрической матрицы для процедуры обучения континуального слоя нейронов на основе данных случайных выборок..... | 227 |
| 10.4. Выбор параметрической функции $K^*(l, j)$ на основе данных случайных выборок для процедуры обучения нейрона с континуумом признаков | 230 |
| 10.5. Особенности алгоритма настройки континуальной двухслойной нейронной сети | 233 |
| 10.6. Три варианта реализации весовых функций континуального слоя нейронов и соответствующие им процедуры обучения..... | 233 |
| 10.7. Алгоритм обучения двухслойной континуальной нейронной сети с функционалом вторичной оптимизации a_{2g} (в пространстве пяти признаков) | 236 |
| 10.7.1. Алгоритм обучения второго слоя (нейрон с континуумом признаков) | 237 |
| 10.7.2. Алгоритм обучения первого слоя (континуальный слой нейронов) | 238 |

| | |
|---|-----|
| 10.8. Континуальный слой нейронов с кусочно-постоянными весовыми функциями | 238 |
| 10.8.1. Разомкнутая структура слоя..... | 238 |
| 10.8.2. Рекуррентная процедура настройки кусочно-постоянных весовых функций..... | 240 |
| 10.8.3. К вопросу об оценке матрицы $K^*(l)$ | 241 |
| 10.9. Континуальный слой нейронов с кусочно-линейными весовыми функциями | 241 |
| 10.9.1. Разомкнутая структура слоя нейронов | 241 |
| 10.9.2. Рекуррентная процедура настройки кусочно-линейных весовых функций..... | 242 |
| 10.10. Континуальный слой нейронной сети с кусочно-постоянными весовыми функциями (случай фиксированных величин «ступенек») | 244 |
| 10.10.1 Разомкнутая структура слоя..... | 244 |
| 10.10.2. Рекуррентная процедура настройки кусочно-постоянных весовых функций с изменяемыми длинами отрезков τ_s | 245 |
| Глава 11. Выбор начальных условий при настройке нейронных сетей. | |
| Типовые входные сигналы многослойных нейронных сетей | 247 |
| 11.1. О методах выбора начальных условий..... | 247 |
| 11.2. Алгоритм детерминированного выбора начальных условий в алгоритмах настройки многослойных нейронных сетей | 248 |
| 11.3. Выбор начальных условий в многослойных нейронных сетях.. | 251 |
| 11.4. Формирование начальных условий для настройки коэффициентов нейронных сетей в различных задачах оптимизации..... | 256 |
| 11.4.1. Системы линейных уравнений..... | 257 |
| 11.4.2. Системы линейных неравенств | 258 |
| 11.4.3. Аппроксимация и экстраполяция функции | 258 |
| 11.4.4. Распознавание образов | 259 |
| 11.4.5. Кластеризации..... | 261 |
| 11.4.6. Задача коммивояжера | 262 |
| 11.4.7. Моделирование динамических систем | 262 |
| 11.4.8. Заключение..... | 263 |
| 11.5. Типовые входные сигналы многослойных нейронных сетей | 263 |
| Глава 12. Исследование замкнутых многослойных нейронных сетей | 266 |
| 12.1. Постановка задачи синтеза контура настройки многослойных нейронных сетей по замкнутому циклу | 266 |
| 12.2. Исследование нейрона при многомодальном распределении входного сигнала | 267 |
| 12.2.1. Одномерный случай; поисковый алгоритм настройки..... | 267 |
| 12.2.2. Многомерный случай. Аналитический алгоритм настройки..... | 271 |
| 12.3. Исследование динамики частного вида нейронных сетей для распознавания нестационарных образов | 277 |

| | |
|---|-----|
| 12.4. Исследование динамики трехслойной нейронной сети в режиме обучения..... | 283 |
| 12.5. Исследование нейронной сети частного вида с обратными связями..... | 288 |
| 12.6. Исследование динамики однослойных нейронных сетей в режиме самообучения..... | 293 |
| 12.6.1. Нейронная сеть с поиском центров мод распределения $f(x)$ | 293 |
| 12.6.2. Нейронная сеть с N^* выходными каналами..... | 297 |
| 12.6.3. Нейрон с K решениями..... | 301 |
| 12.7. Двухслойная нейронная сеть в режиме самообучения..... | 302 |
| 12.8. О некоторых инженерных методах выбора параметров матриц в алгоритмах настройки многослойных по замкнутому циклу..... | 312 |
| 12.9. Построение многослойной нейронной сети для решения задачи обращения матрицы..... | 313 |
| 12.10. Построение многослойной нейронной сети для решения задачи перевода чисел из двоичной системы исчисления в десятичную..... | 316 |
| 12.11. Исследование многослойной нейронной сети при произвольной квалификации учителя..... | 318 |
| 12.12. Аналитические методы исследования нейронных сетей, настраивающихся по замкнутому циклу..... | 319 |
| Глава 13. Синтез многослойных нейронных сетей с переменной структурой..... | 332 |
| 13.1. Последовательный алгоритм обучения нейронов первого слоя многослойной нейронной сети..... | 332 |
| 13.2. Алгоритм обучения нейронов первого слоя многослойной нейронной сети с применением метода случайного поиска локальных и глобального экстремумов функций..... | 337 |
| 13.3. Анализ сходимости алгоритмов при увеличении числа гиперплоскостей..... | 341 |
| 13.4. Алгоритм обучения нейронов второго слоя двухслойной нейронной сети..... | 344 |
| 13.4.1. Условие реализуемости логической функции $\varepsilon(y)$ на одном нейроне..... | 344 |
| 13.4.2. Синтез нейрона методом минимизации функционала..... | 347 |
| 13.4.3. Синтез нейрона по таблицам пороговых функций..... | 352 |
| 13.5. Алгоритм обучения второго и третьего слоев нейронов трехслойной нейронной сети..... | 353 |
| 13.6. Общая методика последовательного синтеза многослойных нейронных сетей..... | 356 |

| | |
|---|------------|
| 13.7. Метод обучения нейронов первого слоя многослойной нейронной сети с континуумом признаков | 357 |
| 13.8. Использование алгоритма настройки многослойных нейронных сетей с переменной структурой для решения задачи выбора начальных условий | 357 |
| 13.9. Об алгоритме самообучения многослойных нейронных сетей с переменной структурой | 359 |
| Глава 14. Выбор информативных признаков в многослойных нейронных сетях..... | 360 |
| 14.1. Постановка задачи выбора информативных признаков в режиме обучения | 360 |
| 14.2. О структурных методах выбора информативных признаков в многослойных нейронных сетях с фиксированной структурой | 363 |
| 14.3. Выбор информативных признаков исходного пространства с помощью многослойных нейронных сетей с последовательными алгоритмами настройки нейронов первого слоя | 366 |
| 14.4. Минимизация числа нейронов | 368 |
| 14.5. О выборе информативных признаков в многослойных нейронных сетях в режиме самообучения..... | 370 |
| Раздел 4. Надежность и диагностика нейронных сетей..... | 372 |
| Глава 15. Надежность нейронных сетей | 372 |
| 15.1. Методы исследования функциональной надежности нейронных сетей..... | 372 |
| 15.2. Исследование функциональной надежности восстанавливающих органов, выполненных в виде многослойных нейронных сетей..... | 375 |
| 15.3. Исследование функциональной надежности многослойных нейронных сетей..... | 378 |
| 15.4. Исследование параметрической надежности нейронных сетей..... | 380 |
| 15.5. Исследование функциональной надежности многослойных нейронных сетей при наличии катастрофических отказов..... | 390 |
| Глава 16. Диагностика нейронных сетей | 395 |
| 16.1. Граф состояний нейронной сети. Основные понятия и определения | 397 |
| 16.2. Алгоритм локализации отказов в нейронных сетях | 398 |
| 16.3. Алгоритм построения минимального теста для отказов типа логических констант на выходах нейронов | 409 |
| 16.4. Метод адаптивной диагностики отказов в нейронных сетях | 411 |
| Раздел 5. Резюме..... | 420 |
| Глава 17. Методика решения задач в нейросетевом логическом базисе..... | 420 |
| 17.1. Нейроматематика – новый перспективный раздел вычислительной математики | 420 |

| | |
|---|-----|
| 17.2. Теория нейронных сетей – логический базис разработки нейросетевых алгоритмов решения задач | 423 |
| 17.3. Выбор задач, адекватных сетевому логическому базису | 424 |
| 17.4. Общая структура пакета программ решения задач в нейросетевом логическом базисе..... | 430 |
| 17.5. Многослойные нейронные сети с переменной структурой | 432 |
| 17.6. Нейронная сеть с фиксированной структурой | 437 |
| 17.6.1. Формирование входного сигнала нейронной сети..... | 437 |
| 17.6.2. Формирование выходного сигнала многослойной нейронной сети..... | 441 |
| 17.6.3. Формирование критериев первичной оптимизации | 441 |
| 17.6.4. Выбор структуры разомкнутой нейронной сети | 442 |
| 17.6.5. Примечания к выбору структуры разомкнутой нейронной сети в соответствии с классом решаемых задач | 443 |
| 17.6.6. Примечания к выбору функции активации | 445 |
| 17.6.7. Выбор структуры многослойных нейронных сетей в соответствии с технологией аппаратной реализации | 445 |
| 17.6.8. Формирование функционала вторичной оптимизации в многослойных нейронных сетях..... | 447 |
| 17.6.9. Формирование алгоритма поиска экстремума функционала вторичной оптимизации..... | 447 |
| 17.6.10. Формирование алгоритмов адаптации в многослойных нейронных сетях..... | 452 |
| 17.7. Верификация настроенной многослойной нейронной сети..... | 453 |
| 17.8. Разработка плана экспериментов | 454 |
| 17.9. О важности проблемы унификации обозначений в процессе синтеза алгоритмов настройки нейронных сетей..... | 456 |
| 17.10. О мифах на пути теории нейронных сетей | 456 |
| 17.11. Заключение | 457 |
| Общее заключение..... | 467 |
| Приложение. Научные работы – основа данной монографии | 469 |