

Т. Кохонен

Самоорганизующиеся карты

Перевод 3-го английского издания
В. Н. Агеева

под редакцией Ю. В. Тюменцева

4-е издание, электронное



Москва
Лаборатория знаний
2025

УДК 517.11+519.92
ББК 22.18
К75

Серия основана в 2005 г.

Кохонен Т.

К75 Самоорганизующиеся карты / Т. Кохонен ; пер. 3-го англ. изд. — 4-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2025. — 660 с. — (Адаптивные и интеллектуальные системы). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-179-8

Самоорганизующиеся карты вместе с их разновидностями представляют собой одну из наиболее популярных нейросетевых архитектур, ориентированных на обучение без учителя. Они широко используются в таких областях, как статистика, обработка сигналов, теория управления, финансовый анализ, экспериментальная физика, химия, медицина, для решения сложных, многомерных, нелинейных задач, связанных с извлечением признаков, обработкой и классификацией изображений, адаптивным управлением и т. п. В книге дается детальное изложение математического аппарата и применений для самоорганизующихся карт.

Для специалистов в области теории и применений нейросетевого моделирования, а также студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 517.11+519.92
ББК 22.18

Деривативное издание на основе печатного аналога: Самоорганизующиеся карты / Т. Кохонен ; пер. 3-го англ. изд. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 655 с. : ил., [2] с. цв. вкл. — (Адаптивные и интеллектуальные системы).

ISBN 978-5-94774-352-4.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

Translation from the English
language edition: *Self-Organizing
Maps* by Teuvo Kohonen
Physica-Verlag Heidelberg
1995,1997,2001
All rights Reserved

Copyright ©

© Перевод, оформление. Лаборатория
знаний, 2015

ISBN 978-5-00101-179-8

Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Предисловие к третьему изданию | 5 |
| Предисловие ко второму изданию | 7 |
| Предисловие к первому изданию | 8 |
| Глава 1. Математическое введение | 15 |
| 1.1. Математические понятия и обозначения | 16 |
| 1.1.1. Векторное пространство и связанные с ним понятия . | 16 |
| 1.1.2. Матричные обозначения | 24 |
| 1.1.3. Собственные векторы и собственные значения матриц | 28 |
| 1.1.4. Дополнительные свойства матриц | 32 |
| 1.1.5. Матричное дифференциальное исчисление | 35 |
| 1.2. Измерение расстояний между образами | 37 |
| 1.2.1. Измерение сходства и расстояния в векторных про- | |
| странствах | 37 |
| 1.2.2. Измерение сходства и расстояния между символьны- | |
| ми строками | 42 |
| 1.2.3. Средние для совокупностей не векторных величин ... | 52 |
| 1.3. Статистический анализ образов | 55 |
| 1.3.1. Основные понятия теории вероятностей | 55 |
| 1.3.2. Проекционные методы | 60 |
| 1.3.3. Классификация с учителем | 68 |
| 1.3.4. Классификация без учителя | 75 |
| 1.4. Классификация методами подпространств | 78 |
| 1.4.1. Основной метод подпространств | 78 |
| 1.4.2. Адаптация моделирующего подпространства к под- | |
| пространству входов | 82 |
| 1.4.3. Обучающийся метод подпространств | 87 |
| 1.5. Векторное квантование | 95 |
| 1.5.1. Определения | 95 |
| 1.5.2. Вывод алгоритма векторного квантования | 96 |
| 1.5.3. Точечная плотность в векторном квантовании | 99 |
| 1.6. Динамически расширяющийся контекст | 102 |
| 1.6.1. Постановка задачи | 102 |
| 1.6.2. Автоматическое формирование контекстно- | |
| независимых продуктов | 105 |
| 1.6.3. Бит конфликта | 106 |
| 1.6.4. Формирование памяти для контекстно-зависимых | |
| продукций | 107 |
| 1.6.5. Алгоритм корректировки новых строк | 108 |
| 1.6.6. Оценочная процедура для неудачного поиска | 109 |
| 1.6.7. Практические эксперименты | 109 |

| | |
|---|------------|
| Глава 2. Нейронное моделирование | 111 |
| 2.1. Модели, парадигмы и методы | 111 |
| 2.2. История основных идей нейронного моделирования | 113 |
| 2.3. Работы по искусственному интеллекту | 118 |
| 2.4. О сложности биологических нервных систем | 119 |
| 2.5. Чем не являются мозговые схемы | 121 |
| 2.6. Связь между биологическими и искусственными нейронными сетями | 124 |
| 2.7. Какие функции мозга обычно моделируют? | 125 |
| 2.8. Когда следует использовать нейронные вычисления? | 126 |
| 2.9. Преобразование, релаксация и декодирование | 128 |
| 2.10. Виды искусственных нейронных сетей | 131 |
| 2.11. Простая нелинейная динамическая модель нейрона | 134 |
| 2.12. Три этапа развития нейронных моделей | 137 |
| 2.13. Правила обучения | 139 |
| 2.13.1. Правило Хебба | 139 |
| 2.13.2. Правило обучения типа Риккати | 140 |
| 2.13.3. Правило обучения, основанное на анализе главных компонент | 145 |
| 2.14. Некоторые действительно трудные проблемы | 146 |
| 2.15. Карты мозга | 151 |
| Глава 3. Основной вариант самоорганизующейся карты | 159 |
| 3.1. Качественное введение в самоорганизующиеся карты | 160 |
| 3.2. Исходный пошаговый алгоритм SOM | 164 |
| 3.3. Алгоритм SOM, основанный на скалярном произведении | 172 |
| 3.4. Другие предварительные примеры отображений, сохраняющих топологию | 175 |
| 3.4.1. Упорядочение эталонных векторов во входном пространстве | 175 |
| 3.4.2. Демонстрации упорядочения откликов в выходном пространстве | 179 |
| 3.5. Основные математические подходы к процессам самоорганизации | 188 |
| 3.5.1. Одномерный случай | 188 |
| 3.5.2. Конструктивное доказательство упорядоченности еще для одной одномерной SOM | 194 |
| 3.6. Пакетный вариант алгоритма SOM | 201 |
| 3.7. Инициализация алгоритмов SOM | 206 |
| 3.8. Об «оптимальном» коэффициенте скорости обучения | 207 |
| 3.9. Влияние вида функции соседства | 211 |
| 3.10. Следует ли алгоритм SOM из меры искажения? | 212 |
| 3.11. Попытка оптимизации алгоритма SOM | 214 |
| 3.12. Точечная плотность модельных векторов | 220 |
| 3.12.1. Ранние исследования | 220 |
| 3.12.2. Численная проверка точечных плотностей в конечной одномерной SOM | 222 |
| 3.13. Практические советы, облегчающие получение хороших карт | 229 |
| 3.14. Примеры анализа данных с помощью SOM | 232 |
| 3.14.1. Карты признаков в случае полной матрицы данных | 232 |
| 3.14.2. Карта для матрицы с неполными данными (случай пропущенных данных): «карта благосостояния» | 236 |
| 3.15. Использование оттенков серого цвета при отображении кластеров в SOM | 238 |
| 3.16. Интерпретация отображения SOM | 240 |
| 3.16.1. «Локальные главные компоненты» | 240 |
| 3.16.2. Влияние некоторых величин на структуру кластеров | 241 |

| | |
|--|------------|
| 3.17. Ускорение вычислений при формировании SOM | 242 |
| 3.17.1. Быстрый поиск победителя | 242 |
| 3.17.2. Увеличение числа элементов в SOM | 245 |
| 3.17.3. Сглаживание | 248 |
| 3.17.4. Комбинация сглаживания, увеличения размера решетки и алгоритма SOM | 250 |
| Глава 4. Физиологическая интерпретация SOM | 251 |
| 4.1. Условия существования карт абстрактных признаков в мозгу .. | 251 |
| 4.2. Два различных латеральных механизма управления | 253 |
| 4.2.1. WTA-функция, основанная на латеральном управлении активностью | 254 |
| 4.2.2. Латеральное управление пластичностью | 259 |
| 4.3. Уравнение обучения | 261 |
| 4.4. Системные модели SOM и их применение | 262 |
| 4.5. Резюме свойств физиологической модели SOM | 265 |
| 4.6. Сходства между картами мозга и моделируемыми картами признаков | 266 |
| 4.6.1. Фактор размера | 266 |
| 4.6.2. Карты с изъятиями | 267 |
| 4.6.3. Перекрывающиеся карты | 267 |
| Глава 5. Варианты самоорганизующихся карт | 268 |
| 5.1. Обзор идей, связанных с видоизменениями основного варианта самоорганизующейся карты | 268 |
| 5.2. Адаптивные тензорные веса | 273 |
| 5.3. Поиск решения для совокупности самоорганизующихся карт с древовидной структурой связей между ними | 276 |
| 5.4. Различные определения соседства | 277 |
| 5.5. Области соседства в пространстве сигналов | 280 |
| 5.6. Динамические элементы, добавляемые в SOM | 285 |
| 5.7. Самоорганизующиеся карты для символьных строк | 286 |
| 5.7.1. Инициализация SOM для строк | 287 |
| 5.7.2. Пакетный вариант самоорганизующейся карты для строк | 287 |
| 5.7.3. Выявление победителя в ситуации неразличимости сравниваемых строк | 288 |
| 5.7.4. Простой пример: SOM для фонетической транскрипции | 289 |
| 5.8. Операторные карты | 289 |
| 5.9. Самоорганизующиеся карты с эволюционным обучением | 294 |
| 5.9.1. Эволюционно-обучающиеся фильтры | 294 |
| 5.9.2. Самоорганизация с использованием функции приспособленности | 295 |
| 5.10. Самоорганизующиеся карты, формируемые с учителем | 300 |
| 5.11. Адаптивно-подпространственная самоорганизующаяся карта .. | 301 |
| 5.11.1. Проблема инвариантных признаков | 301 |
| 5.11.2. Соотношение между инвариантными признаками и линейными подпространствами | 305 |
| 5.11.3. Алгоритм ASSOM | 309 |
| 5.11.4. Получение алгоритма ASSOM с использованием стохастической аппроксимации | 316 |
| 5.11.5. Эксперименты с алгоритмом ASSOM | 318 |
| 5.12. Адаптивно-подпространственная SOM, управляемая с помощью обратных связей (FASSOM) | 335 |

| | |
|--|-----|
| Глава 6. Обучающееся векторное квантование | 338 |
| 6.1. Оптимальное решение | 339 |
| 6.2. Алгоритм LVQ1 | 340 |
| 6.3. Алгоритм LVQ1 с оптимальной скоростью обучения (OLVQ1) | 344 |
| 6.4. Пакетный алгоритм LVQ1 | 346 |
| 6.5. Пакетный алгоритм LVQ1 для символьных строк | 347 |
| 6.6. Алгоритм LVQ2 (LVQ2.1) | 348 |
| 6.7. Алгоритм LVQ3 | 349 |
| 6.8. Различия между алгоритмами LVQ1, LVQ2 и LVQ3 | 350 |
| 6.9. Общий анализ алгоритмов LVQ | 350 |
| 6.10. Алгоритм LVQ-гиперкарты | 353 |
| 6.11. Алгоритм LVQ-SOM | 361 |
| Глава 7. Применения самоорганизующихся карт | 362 |
| 7.1. Предобработка оптических образов | 364 |
| 7.1.1. Размывание | 365 |
| 7.1.2. Разложение по глобальным признакам | 365 |
| 7.1.3. Спектральный анализ | 367 |
| 7.1.4. Разложение по локальным свойствам (вейвлетам) | 367 |
| 7.1.5. Выводы относительно признаков оптических образов | 368 |
| 7.2. Акустическая предобработка | 369 |
| 7.3. Мониторинг процессов и машин | 370 |
| 7.3.1. Выбор входных величин и их масштабирование | 371 |
| 7.3.2. Анализ больших систем | 372 |
| 7.4. Диагностирование речевых характеристик | 377 |
| 7.5. Транскрибирование слитной речи | 378 |
| 7.6. Текстуальный анализ | 386 |
| 7.7. Контекстные карты | 388 |
| 7.7.1. Искусственно сформированные выражения | 390 |
| 7.7.2. Текст на естественном языке | 394 |
| 7.8. Организация больших информационных массивов | 394 |
| 7.8.1. Статистические модели документов | 395 |
| 7.8.2. Формирование очень больших карт WEBSOM методом проекций | 405 |
| 7.8.3. Карта WEBSOM для электронных аннотаций патентов | 410 |
| 7.9. Управление роботизированной рукой | 413 |
| 7.9.1. Одновременное обучение по входным и выходным параметрам | 413 |
| 7.9.2. Другой пример управления роботизированной рукой | 418 |
| 7.10. Телекоммуникация | 419 |
| 7.10.1. Адаптивный детектор для квантованных сигналов | 419 |
| 7.10.2. Коррекция канала в адаптивной квадратурной амплитудной модуляции | 421 |
| 7.10.3. Помехозащищенная передача изображений с помощью пары SOM | 422 |
| 7.11. SOM как алгоритм оценивания | 425 |
| 7.11.1. Симметричное (автоассоциативное) отображение | 426 |
| 7.11.2. Асимметричное (гетероассоциативное) отображение | 427 |
| Глава 8. Средства программного обеспечения для SOM | 429 |
| 8.1. Обязательные требования к программам, реализующим SOM | 429 |
| 8.2. Желательные дополнительные свойства программ, реализующих SOM | 433 |

| | |
|--|------------|
| 8.3. Пакеты программ, реализующие SOM | 435 |
| 8.3.1. Пакет SOM_PAK | 436 |
| 8.3.2. Пакет SOM_Toolbox | 438 |
| 8.3.3. Инструментальный пакет Nenet (Neural Networks Tool) | 439 |
| 8.3.4. Пакет Viscovery SOMine | 441 |
| 8.4. Примеры использования пакета SOM_PAK | 442 |
| 8.4.1. Форматы файлов | 442 |
| 8.4.2. Описание программ пакета SOM_PAK | 446 |
| 8.4.3. Типовая обучающая последовательность | 451 |
| 8.5. Нейросетевые пакеты программ, включающие средства работы с SOM | 453 |
| Глава 9. Аппаратные реализации самоорганизующихся карт | 455 |
| 9.1. Аналоговое классифицирующее устройство | 456 |
| 9.2. Быстрые цифровые классифицирующие схемы | 460 |
| 9.3. Реализация самоорганизующихся карт с использованием SIMD-машин | 466 |
| 9.4. Транспьютерные реализации самоорганизующихся карт | 470 |
| 9.5. Реализации самоорганизующихся карт с использованием систематических матриц | 472 |
| 9.6. Микросхема COKOS | 473 |
| 9.7. Микросхема TInMHC | 474 |
| 9.8. Микросхема NBISOM_25 | 477 |
| Глава 10. Обзор литературы по самоорганизующимся картам | 479 |
| 10.1. Книги и обзорные статьи | 480 |
| 10.2. Ранние работы по соревновательному обучению | 480 |
| 10.3. Состояние математических исследований | 482 |
| 10.3.1. Результаты для топологии нулевого порядка (классическое векторное квантование) | 482 |
| 10.3.2. Альтернативные топологические отображения | 483 |
| 10.3.3. Альтернативные архитектуры | 483 |
| 10.3.4. Функциональные варианты | 485 |
| 10.3.5. Теория базисной самоорганизующейся карты | 486 |
| 10.4. Обучающееся векторное квантование | 494 |
| 10.5. Различные применения самоорганизующихся карт | 495 |
| 10.5.1. Машинное зрение и анализ изображений | 495 |
| 10.5.2. Оптическое распознавание печатных и рукописных символов | 498 |
| 10.5.3. Анализ и распознавание речи | 498 |
| 10.5.4. Акустические и музыкальные исследования | 500 |
| 10.5.5. Обработка сигналов и радиолокационные измерения | 500 |
| 10.5.6. Телекоммуникации | 501 |
| 10.5.7. Промышленные и другие измерения в реальных ситуациях | 501 |
| 10.5.8. Управление процессами | 502 |
| 10.5.9. Робототехника | 503 |
| 10.5.10. Проектирование электронных схем | 504 |
| 10.5.11. Физика | 505 |
| 10.5.12. Химия | 505 |
| 10.5.13. Биомедицинские исследования, не связанные с обработкой изображений | 506 |
| 10.5.14. Нейрофизиологические исследования | 506 |
| 10.5.15. Анализ и обработка данных | 507 |
| 10.5.16. Лингвистика и проблемы искусственного интеллекта | 508 |

| | |
|---|------------|
| 10.5.17. Математические и другие теоретические проблемы .. | 509 |
| 10.6. Применения обучающегося векторного квантования | 511 |
| 10.7. Обзор реализаций самоорганизующихся карт и обучающегося векторного квантования | 513 |
| Глава 11. Толковый словарь «нейронных» терминов | 515 |
| Литература | 556 |