

Т. Кохонен

# Самоорганизующиеся карты

Перевод 3-го английского издания  
В. Н. Агеева

под редакцией Ю. В. Тюменцева

4-е издание, электронное



Москва  
Лаборатория знаний  
2021

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, 2021. — 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

Copyright © Physica-Verlag Heidelberg 1995,1997,2001  
 All rights Reserved

© Перевод, оформление. Лаборатория знаний, 2015

ISBN 978-5-00101-179-8

# Оглавление

<b>Предисловие к третьему изданию</b> .....	5
<b>Предисловие ко второму изданию</b> .....	7
<b>Предисловие к первому изданию</b> .....	8
<b>Глава 1. Математическое введение</b> .....	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-	37
странствах .....	
1.2.2. Измерение сходства и расстояния между символьными	42
строками .....	
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-	82
пространству входов .....	
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-	105
независимых продукций .....	
1.6.3. Бит конфликта .....	106
1.6.4. Формирование памяти для контекстно-зависимых	107
продукций .....	
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. <b>Нейронное моделирование</b> .....	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. <b>Основной вариант самоорганизующейся карты</b> .....	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
<b>Глава 4.</b>	<b>Физиологическая интерпретация SOM</b>	<b>251</b>
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
<b>Глава 5.</b>	<b>Варианты самоорганизующихся карт</b>	<b>268</b>
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. <b>Обучающееся векторное квантование</b> .....	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. <b>Применения самоорганизующихся карт</b> .....	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. Стагистические модели документов .....	395
7.8.2. Формирование очень больших карт WEBSOM мето-	
дом проекций .....	405
7.8.3. Карта WEBSOM для электронных аннотаций патен-	
тов .....	410
7.9. Управление роботизированной рукой .....	413
7.9.1. Одновременное обучение по входным и выходным па-	
раметрам .....	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 ампли-	
тудной 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. <b>Средства программного обеспечения для SOM</b> .....	429
8.1. Обязательные требования к программам, реализующим SOM .	429
8.2. Желательные дополнительные свойства программ, реализую-	
щих 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
<b>Глава 9. Аппаратные реализации самоорганизующихся карт</b>	<b>455</b>
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 СОКОС	473
9.7. Микросхема TInMHC	474
9.8. Микросхема NBISOM_25	477
<b>Глава 10. Обзор литературы по самоорганизующимся картам</b>	<b>479</b>
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
<b>Литература</b> .....	<b>556</b>