

УДК 519.6
ББК 22.19
К26

Р е ц е н з е н т ы :

заведующий кафедрой «Информационные технологии в управлении»
Российской академии народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации, д-р техн. наук, профессор *А.Н. Данчул*;
профессор кафедры физико-математических методов управления
МГУ им. М.В. Ломоносова, главный научный сотрудник лаборатории
оптимизации управляемых систем ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН,
д-р техн. наук *Н.Б. Филимонов*

Карпенко, А. П.

К26 Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учебное пособие / А. П. Карпенко. — 3-е изд., испр. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — 446, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5563-8

Рассмотрены современные стохастические популяционные алгоритмы решения однокритериальной задачи глобальной оптимизации. Изложены методы повышения эффективности этих алгоритмов путем их гибридизации и метаоптимизации. Наряду с однокритериальной рассмотрена задача многокритериальной оптимизации и популяционные алгоритмы ее решения. Представлены методы распараллеливания указанных алгоритмов. Содержит большое число примеров решения тестовых и практически значимых задач оптимизации.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Может быть полезно для всех студентов, изучающих курс «Методы оптимизации» и близкие по тематике курсы. Материал пособия представляет интерес также для аспирантов и специалистов, использующих в своей работе методы, алгоритмы и программы оптимизации.

УДК 519.6
ББК 22.19

ISBN 978-5-7038-5563-8

© Карпенко А.П., 2014
© Карпенко А.П., 2021, с изменениями
© Оформление. Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2021

Оглавление

| | |
|--|------------|
| Предисловие..... | 3 |
| Основные обозначения..... | 5 |
| Введение..... | 8 |
| Глава 1. Постановка задачи поисковой оптимизации и непопуляционные стохастические алгоритмы ее решения..... | 14 |
| 1.1. Постановка и классификация алгоритмов решения детерминированной задачи поисковой оптимизации..... | 14 |
| 1.1.1. Постановка задачи..... | 14 |
| 1.1.2. Классификация задач оптимизации..... | 16 |
| 1.1.3. Классификация алгоритмов оптимизации..... | 19 |
| 1.2. Локальная безусловная оптимизация..... | 22 |
| 1.2.1. Одношаговые алгоритмы..... | 22 |
| 1.2.2. Многошаговые алгоритмы..... | 26 |
| 1.2.3. Многоточечные алгоритмы..... | 29 |
| 1.3. Локальная условная оптимизация..... | 33 |
| 1.3.1. Алгоритмы на основе сведения задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации..... | 34 |
| 1.3.2. Алгоритмы, не использующие редукцию задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации..... | 42 |
| 1.4. Глобальная оптимизация..... | 46 |
| 1.4.1. Алгоритмы одномерной редукции..... | 46 |
| 1.4.2. Алгоритмы случайного поиска..... | 53 |
| 1.4.3. Поиск с запретами..... | 62 |
| <i>Вопросы для самопроверки.....</i> | <i>63</i> |
| Глава 2. Эволюционные алгоритмы..... | 65 |
| 2.1. Биологические предпосылки и общая схема эволюционных алгоритмов..... | 66 |
| 2.2. Кодирование особей..... | 69 |
| 2.3. Операторы мутации..... | 75 |
| 2.3.1. Бинарные мутаторы..... | 75 |
| 2.3.2. Вещественные мутаторы..... | 77 |
| 2.4. Операторы скрещивания (кроссоверы)..... | 80 |
| 2.4.1. Бинарные кроссоверы..... | 80 |
| 2.4.2. Вещественные кроссоверы..... | 84 |
| 2.5. Операторы отбора..... | 88 |
| 2.5.1. Операторы управления популяцией..... | 88 |
| 2.5.2. Операторы селекции..... | 92 |
| 2.6. Другие операторы и процедуры..... | 96 |
| 2.7. Типовые генетические алгоритмы..... | 102 |
| 2.8. Теория шим..... | 106 |
| 2.9. Эволюционная стратегия..... | 109 |
| 2.10. Эволюционное программирование..... | 112 |
| 2.11. Дифференциальная эволюция..... | 114 |
| 2.12. Генетический коэволюционный алгоритм..... | 117 |
| 2.13. Пример применения генетического алгоритма..... | 121 |
| <i>Вопросы для самопроверки.....</i> | <i>125</i> |

| | |
|---|------------|
| Глава 3. Алгоритмы роя частиц, колонии муравьев и пчелиного роя..... | 127 |
| 3.1. Оптимизация роем частиц..... | 127 |
| 3.1.1. Канонический алгоритм роя частиц..... | 127 |
| 3.1.2. Модификации канонического алгоритма роя частиц..... | 133 |
| 3.1.3. Топологии соседства частиц..... | 137 |
| 3.1.4. Алгоритмы с динамической топологией соседства частиц..... | 141 |
| 3.1.5. Гибридный алгоритм на основе роя частиц и имитации отжига..... | 143 |
| 3.1.6. Пример решения задачи с использованием алгоритма роя частиц..... | 146 |
| 3.2. Муравьиная оптимизация..... | 147 |
| 3.2.1. Бионические предпосылки..... | 148 |
| 3.2.2. Алгоритм непрерывной оптимизации колонией муравьев..... | 150 |
| 3.2.3. Алгоритм непрерывно взаимодействующей колонии муравьев..... | 153 |
| 3.2.4. Непрерывный ортогональный алгоритм муравьиной колонии..... | 159 |
| 3.2.5. Гибридный алгоритм непрерывно взаимодействующей муравьиной колонии..... | 163 |
| 3.2.6. Пример применения модифицированного алгоритма <i>CIAC</i> | 170 |
| 3.3. Оптимизация пчелиным роем..... | 175 |
| 3.3.1. Бионические предпосылки..... | 175 |
| 3.3.2. Пчелиный алгоритм..... | 176 |
| 3.3.3. Алгоритм колонии искусственных пчел..... | 183 |
| 3.3.4. Гибридный алгоритм | 190 |
| <i>Вопросы для самопроверки.....</i> | <i>193</i> |
| Глава 4. Другие популяционные алгоритмы, вдохновленные живой природой..... | 195 |
| 4.1. Искусственные иммунные системы..... | 195 |
| 4.1.1. Биологические основы..... | 195 |
| 4.1.2. Оптимизация с помощью модели иммунной сети..... | 198 |
| 4.1.3. Алгоритм на основе искусственной микроиммунной системы..... | 200 |
| 4.1.4. Пример алгоритма искусственной иммунной сети..... | 201 |
| 4.2. Бактериальная оптимизация..... | 204 |
| 4.2.1. Бионические предпосылки..... | 204 |
| 4.2.2. Канонический алгоритм бактериальной оптимизации..... | 205 |
| 4.2.3. Кооперативная бактериальная оптимизация..... | 210 |
| 4.2.4. Алгоритм, использующий эффект роения бактерий..... | 211 |
| 4.2.5. Гибридные бактериальные алгоритмы..... | 212 |
| 4.3. Алгоритмы, вдохновленные роем светлячков..... | 213 |
| 4.3.1. Алгоритм светлячков..... | 213 |
| 4.3.2. Алгоритм оптимизации роем светлячков..... | 216 |
| 4.4. Сорняковый алгоритм..... | 218 |
| 4.4.1. Биологические основы..... | 218 |
| 4.4.2. Схема алгоритма..... | 219 |
| 4.5. Кукушкин поиск..... | 221 |
| 4.5.1. Биологические предпосылки..... | 221 |
| 4.5.2. Схема алгоритма..... | 222 |
| 4.5.3. Эффективность алгоритма..... | 223 |
| 4.6. Алгоритмы, вдохновленные поведением обезьян..... | 227 |
| 4.6.1. Обезьяний поиск..... | 227 |
| 4.6.2. Обезьяний алгоритм..... | 228 |
| 4.7. Прочие алгоритмы..... | 230 |

| | |
|--|------------|
| 4.7.1 Тасующий алгоритм прыгающих лягушек..... | 230 |
| 4.7.2. Алгоритм, инспирированный летучими мышами..... | 231 |
| 4.7.3. Поиск косяком рыб..... | 234 |
| 4.7.4. Алгоритм растущих деревьев..... | 237 |
| <i>Вопросы для самопроверки.....</i> | <i>238</i> |
| Глава 5. Популяционные алгоритмы, инспирированные неживой природой, человеческим обществом, и другие популяционные алгоритмы..... | 239 |
| 5.1. Гармонический поиск..... | 239 |
| 5.1.1. Канонический алгоритм..... | 240 |
| 5.1.2. Некоторые модификации алгоритма гармонического поиска..... | 242 |
| 5.1.3. Пример применения модифицированного алгоритма гармонического поиска..... | 243 |
| 5.2. Алгоритм гравитационного поиска..... | 246 |
| 5.3. Электромагнитный поиск..... | 250 |
| 5.3.1. Электромагнитный алгоритм..... | 250 |
| 5.3.2. Алгоритм поиска системой зарядов..... | 254 |
| 5.4. Алгоритм эволюции разума..... | 255 |
| 5.4.1. Простой алгоритм эволюции разума..... | 256 |
| 5.4.2. Расширенный алгоритм..... | 257 |
| 5.4.3. Улучшенный алгоритм..... | 259 |
| 5.4.4. Хаотический алгоритм эволюции разума..... | 260 |
| 5.5. Стохастический диффузионный поиск..... | 261 |
| 5.6. Культурный алгоритм..... | 263 |
| 5.6.1. Общая схема алгоритма..... | 263 |
| 5.6.2. Построение и коррекция пространства убеждений..... | 265 |
| 5.6.3. Культурная модификация генетических операторов..... | 267 |
| 5.7. Меметические алгоритмы..... | 268 |
| 5.7.1. Общая схема алгоритма..... | 268 |
| 5.7.2. Гиперэвристические мультимемные адаптивные алгоритмы..... | 269 |
| 5.7.3. Самоадаптирующиеся мультимемные алгоритмы..... | 271 |
| 5.8. Самоорганизующийся миграционный алгоритм..... | 272 |
| 5.9. Алгоритмы рассеянного поиска и прокладки путей..... | 274 |
| 5.9.1. Алгоритм рассеянного поиска..... | 274 |
| 5.9.2. Алгоритм прокладки путей..... | 278 |
| <i>Вопросы для самопроверки.....</i> | <i>279</i> |
| Глава 6. Гибридизация популяционных алгоритмов..... | 280 |
| 6.1. Общие принципы гибридизации..... | 280 |
| 6.1.1. Одноуровневая классификация Ванга..... | 280 |
| 6.1.2. Двухуровневая классификация Эль-Абда и Камэла..... | 282 |
| 6.1.3. Четырехуровневая классификация Рейдла..... | 283 |
| 6.2. Вложенные алгоритмы..... | 285 |
| 6.2.1. Высокоуровневая гибридизация вложением..... | 285 |
| 6.2.2. Низкоуровневая гибридизация вложением..... | 287 |
| 6.3. Гибридизация по схеме препроцессор / постпроцессор..... | 288 |
| 6.3.1. Последовательная гибридизация..... | 288 |
| 6.3.2. Конвейерная гибридизация..... | 290 |
| 6.4. Коалгоритмы..... | 296 |
| 6.4.1. Классификация коэволюционных алгоритмов..... | 296 |
| 6.4.2. Пример коалгоритма..... | 299 |
| <i>Вопросы для самопроверки.....</i> | <i>301</i> |

| | |
|--|-----|
| <i>Оглавление</i> | 445 |
| Глава 7. Метаоптимизация популяционных алгоритмов | 302 |
| 7.1. Постановка метазадачи оптимизации | 302 |
| 7.1.1. Статическая параметрическая метаоптимизация | 302 |
| 7.1.2. Динамическая параметрическая метаоптимизация | 304 |
| 7.1.3. Структурная метаоптимизация | 307 |
| 7.1.4. Структурно-параметрическая метаоптимизация | 308 |
| 7.2. Классификация методов метаоптимизации | 309 |
| 7.2.1. Классификация Эйбена | 309 |
| 7.2.2. Классификация Смита – Фогарти | 312 |
| 7.3. Однократная настройка параметров | 313 |
| 7.3.1. Статическая параметрическая метаоптимизация | 313 |
| 7.3.2. Динамическая параметрическая метаоптимизация | 315 |
| 7.4. Перманентная настройка параметров | 316 |
| 7.4.1. Схема подхода | 316 |
| 7.4.2. Задачи кластеризации и собственно метаоптимизации | 317 |
| 7.4.3. Особенности программной реализации подхода | 318 |
| 7.4.4. Исследование эффективности подхода | 320 |
| 7.5. Адаптивное управление параметрами | 324 |
| 7.5.1. Гомогенные методы | 325 |
| 7.5.2. Гетерогенные методы | 326 |
| 7.6. Самоадаптивное управление параметрами | 327 |
| 7.6.1. Расширение вектора варьируемых параметров базовой задачи | 327 |
| 7.6.2. Козволюция типа соперничества | 328 |
| 7.7. Структурная метаоптимизация | 328 |
| <i>Вопросы для самопроверки</i> | 330 |
| Глава 8. Популяционные алгоритмы многоцелевой оптимизации | 332 |
| 8.1. Задача многоцелевой оптимизации (МЦО-задача) и алгоритмы ее решения | 332 |
| 8.1.1. Постановка задачи | 333 |
| 8.1.2. Классификация алгоритмов решения МЦО-задачи | 336 |
| 8.2. Непопуляционные алгоритмы Парето-аппроксимации | 340 |
| 8.2.1. Сеточные алгоритмы | 340 |
| 8.2.2. Алгоритмы на основе свертки целевых функций | 341 |
| 8.3. Популяционные алгоритмы Парето-аппроксимации | 345 |
| 8.3.1. Лексикографическая турнирная селекция | 345 |
| 8.3.2. Алгоритмы чередующихся целевых функций | 346 |
| 8.3.3. Алгоритмы на основе ранжирования агентов | 349 |
| 8.3.4. Алгоритмы, не использующие ранжирование агентов | 353 |
| 8.4. Критерии оценки качества Парето-аппроксимации | 357 |
| 8.4.1. Унарные критерии | 358 |
| 8.4.2. Бинарные критерии | 360 |
| 8.5. Методы обеспечения качества Парето-аппроксимации | 365 |
| 8.5.1. Нишевание | 366 |
| 8.5.2. Другие методы | 367 |
| 8.6. Примеры Парето-аппроксимации | 370 |
| 8.6.1. Парето-аппроксимация на основе генетического алгоритма | 370 |
| 8.6.2. Аппроксимация с помощью алгоритма роя частиц | 373 |
| 8.6.3. Аппроксимация на основе алгоритма колонии муравьев | 379 |
| 8.6.4. Аппроксимация на основе пчелиного алгоритма | 380 |
| <i>Вопросы для самопроверки</i> | 383 |

| | |
|--|-----|
| Глава 9. Параллельные популяционные алгоритмы поисковой оптимизации | 384 |
| 9.1. Классификация и основные типы параллельных ЭВМ | 384 |
| 9.1.1. Классификация параллельных вычислительных систем | 385 |
| 9.1.2. Основные типы параллельных ЭВМ | 389 |
| 9.2. Балансировки загрузки параллельной ЭВМ | 393 |
| 9.2.1. Задача оптимального отображения алгоритма на архитектуру параллельной ЭВМ | 393 |
| 9.2.2. Постановка задачи балансировки загрузки | 395 |
| 9.2.3. Методы статической балансировки загрузки | 396 |
| 9.2.4. Методы динамической балансировки загрузки | 400 |
| 9.2.5. Задача согласования алгоритма с архитектурой параллельной ЭВМ | 403 |
| 9.3. Методы распараллеливания популяционных алгоритмов оптимизации | 404 |
| 9.3.1. Глобальная модель параллелизма | 405 |
| 9.3.2. Островная модель параллелизма | 407 |
| 9.3.3. Диффузная модель параллелизма | 409 |
| 9.3.4. Другие модели параллелизма | 409 |
| 9.4. Примеры параллельного решения задач оптимизации | 411 |
| 9.4.1. Параллельный алгоритм роя частиц <i>GIPSO</i> | 411 |
| 9.4.2. Параллельный алгоритм Парето-аппроксимации роем частиц | 417 |
| <i>Вопросы для самопроверки</i> | 419 |
| Литература | 420 |
| Приложение А. История разработки популяционных алгоритмов поисковой оптимизации | 422 |
| Приложение Б. Тестовые функции для одноцелевой задачи глобальной оптимизации | 424 |
| Приложение В. Тестовые задачи многоцелевой оптимизации | 432 |
| Предметный указатель | 434 |