

АНОТАЦІЯ

Литвінчук Ю.А. Побудова самоадаптивних алгоритмів на основі нейронних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича МОН України, Чернівці, 2024.

Дисертаційна робота присвячена побудові самоадаптивних алгоритмів за допомогою сумішей розподілів на основі розширеного алгоритму еволюційної стратегії з адаптацією коваріаційної матриці (СМА-ES) для оцінки параметрів складних систем.

Результати дисертаційної роботи є підґрунтям для подальших теоретичних і практичних наукових розробок у дослідженні теорії еволюційних алгоритмів та розв’язанні оптимізаційних задач.

Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, завдання, предмет, об’єкт та методи дослідження, вказано наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, проаналізовано зв’язок роботи з науковими дослідженнями та особистий внесок здобувача, а також наведено відомості про апробацію та публікації основних результатів дисертації. Описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі здійснено огляд наукової літератури, присвяченої основним напрямкам досліджень еволюційних алгоритмів, розглянуто ключові відомості з теорії складних мереж, наведено опис основних напрямів досліджень та визначено завдання, якими займається теорія еволюційних алгоритмів. Проведено детальний огляд основних генетичних алгоритмів та еволюційної стратегії, зокрема, а також їх сфери застосування. Детально проаналізовано хронологію розвитку метаевристичних алгоритмів для оптимізації складних

систем. У першому пункті розділу 1 розглянуто існуючі методи оптимізації параметрів нейронних мереж на базі генетичних алгоритмів, етапи роботи та математична модель генетичного алгоритму. У другому пункті зроблено огляд еволюційної стратегії з адаптацією коваріаційної матриці, як одного з потужних алгоритмів оптимізації, що використовується для розв'язування задач складних систем. Пункт три відображає огляд інших еволюційних алгоритмів оптимізації, їх математичні моделі та сфери застосування.

У другому розділі запропоновано розширений самоадаптивний алгоритм CMA-ES для оптимізації на областях з обмеженнями. Алгоритм враховує обмеження та використовує лише однопікові розподіли та цільові функції. Він ефективний для багатьох задач, але може бути неефективним для функцій з великою кількістю екстремумів. Загалом, модифікований алгоритм є перспективним для задач оптимізації зі складними обмеженнями на поведінку цільової функції. Також у другому розділі розроблено покращений самоадаптивний алгоритм CMA-ES для оптимізації параметрів складних систем, зокрема нейронних мереж. Алгоритм відрізняється від класичних тим, що динамічно підлаштовує кількість піків у суміші розподілів під час виконання, уникаючи зайвих обчислень.

Основні характеристики та переваги алгоритму:

- самоадаптивність: алгоритм підлаштовується під конкретну задачу, змінюючи розмірність суміші розподілів.
- універсальність: може використовуватись із різними типами розподілів та застосовуватись до інших еволюційних алгоритмів. При цьому від базового розподілу вимагається лише однопіковість.
- ефективність: дозволяє уникнути зайвих обчислень цільової функції.
- обґрунтованість: адаптивність базується на методах визначення оптимальної кількості кластерів в кластерному аналізі.

Розглянуто модифікацію алгоритму для задач з обмеженнями на область пошуку. Вона враховує обмеження та використовує лише однопікові розподіли. Ця модифікація ефективна для багатьох задач, але може бути неефективною для функцій з великою кількістю екстремумів.

Загалом, запропонований самоадаптивний алгоритм CMA-ES є перспективним інструментом для ефективною оптимізації складних систем, як зі стандартними, так і з обмеженими областями пошуку.

В загальному розширений CMA-ES алгоритм є ефективним інструментом для оптимізації складних нелінійних та неопуклих задач. Він має ряд переваг перед класичним CMA-ES, таких як:

- здатність враховувати мультимодальні цільової функції;
- збільшення шансів на знаходження глобального оптимуму в порівнянні із класичними евристичними алгоритмами;
- більш ефективний пошук гіперпараметрів складних систем.

Однак розширений CMA-ES алгоритм має один істотний недолік – необхідність задавати розмірність суміші. Даний параметр може впливати на ефективність алгоритму, оскільки занадто мала розмірність може призвести до того, що алгоритм не зможе врахувати всі екстремуми цільової функції, а отже призводить до повільної збіжності. З іншого ж боку, занадто велика розмірність може збільшити час роботи алгоритму.

У цілому, розширений CMA-ES алгоритм є потужним інструментом для оптимізації, який може бути корисним для вирішення задач з мультимодальними цільовими функціями.

У третьому розділі розглянуто задачу пошуку оптимального керування для динамічних систем, що описуються стохастичними диференціальними рівнянням Іто із пуассонівськими збуреннями та марковськими перемиканнями. В даному розділі неведено достатні умови синтезу оптимального керування для стохастичної динамічної системи випадкової структури з пуассонівськими

збуреннями та марковськими перемиканнями, причому керування спрямоване на стабілізацію системи за ймовірністю. Достатні умови асимптотичної стійкості за ймовірністю отримані за допомогою другого методу Ляпунова, в якому важливу роль відіграє побудова відповідних функцій Ляпунова. Також наведено загальну схему дослідження задачі оптимальної стабілізації для стохастичних диференціальних рівнянь випадкової структури.

Для лінійної систем з квадратичним функціоналом якості розроблено метод синтезу оптимального керування на основі розв'язку рівнянь Ріккати. Також, для автономних систем побудовано систему диференціальних рівнянь для отримання невідомих матриць, які використовуються для задання оптимального керування. Ще один підхід синтезу оптимального керування ґрунтуються на методів малого параметру із послідовним визначенням коефіцієнтів оптимального керування. Цей підхід пропонує нове вирішення проблеми оптимальної керування для стохастичної динамічної системи з випадковою структурою та марковськими переключеннями. Крім теоретичних здобутків, у третьому розділі розглянуто порівняльний аналіз класичних евристичних алгоритмів пошуку оптимальних керувань для різних значень горизонту проблеми оптимізації. Відзначено ряд переваг та недоліків нового розширеного CMA-ES алгоритму, основні з яких стосуються середньої кількості виклику цільової функції та точності субоптимальних розв'язків.

У висновках підсумовано основні результати дисертаційного дослідження. **У додатках** подано наукові публікації, в яких відображено основні наукові результати роботи.

Теоретичне значення. Результати роботи, отримані в ході наукового дослідження, є удосконаленням теорії еволюційних алгоритмів. Підходи, запропоновані у дисертації, можуть використовуватися для подальших досліджень у цій галузі, у навчальних курсах кафедри прикладної математики та інформаційних технологій Чернівецького національного університету імені Юрія

Федьковича (та інших ЗВО), пов'язаних з інтелектуальним аналізом даних, машинним навчанням, у методичних розробках, навчальних посібниках для освітнього процесу та науково-дослідної роботи студентів та аспірантів.

Практичне значення. Розроблені у дисертаційній роботі алгоритми можуть в подальшому використовуватися для практичного дослідження складних мереж. Основні результати роботи ґрунтуються на твердженнях теорії ймовірності, теорії машинного навчання, випадкових процесів та методу Монте-Карло.

Отримані результати дисертації збагачують і методи еволюційних алгоритмів, і теорію машинного навчання, зокрема методи та підходи вирішення проблеми оптимізації гіперпараметрів нейронних мереж та інших складних систем. Практичну цінність роботи проілюстровано на оцінюванні оптимального керування для стохастичних диференціальних систем Іто випадкової структури. Результати роботи знайдуть застосування у подальших дослідженнях із даної тематики.

Ключові слова: нейронні мережі, машинне навчання, суміш розподілів, оптимізація гіперпараметрів, коваріаційна матриця, СМА-ES алгоритм, моделювання, алгоритми кластеризації, оптимізаційна задача, генетичний алгоритм, метод рою часток, випадкове оточення, випадкове блукання, система стохастичних диференціальних рівнянь, марковські перемикання.

ABSTRACT

Litvinchuk Yu.A. Construction of self-adaptive algorithms based on neural networks. – Qualifying scientific work with manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 113 – Applied Mathematics. – Chernivtsi National University named after Yury Fedkovich, Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, 2024.

The dissertation is devoted to the construction of self-adaptive algorithms using mixtures of distributions based on the extended algorithm of the evolutionary

adaptation strategy based on the covariance matrix (CMA-ES) for estimating the parameters of complex systems.

The results of the dissertation work are the basis for further theoretical and practical scientific developments in achieving the theory of evolutionary algorithms and solving optimization problems.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of used sources and appendix.

The introduction substantiates the relevance of the research topic, formulates the goal, task, subject, object and research methods, indicates the scientific novelty, theoretical and practical significance of the obtained results, analyzes the connection of the work with scientific research and the personal contribution of the recipient, and also provides information about the approval and publication of the main results of the dissertation. The structure and scope of the dissertation work are described.

In the **first chapter**, a review of the scientific literature devoted to the main areas of evolutionary algorithm research is carried out, key information from the theory of complex networks is considered, a description of the main areas of research is given, and the tasks that the theory of evolutionary algorithms deals with are defined. A detailed review of the main genetic algorithms and evolutionary strategy, in particular, as well as their scope of application, is carried out. The chronology of the development of metaheuristic algorithms for the optimization of complex systems is analyzed in detail. In the first point of section I, the existing methods of optimization of parameters of neural networks based on genetic algorithms, the stages of work and the mathematical model of the genetic algorithm are considered. In the second point, an overview of the evolutionary strategy with the adaptation of the covariance matrix is made, as one of the powerful optimization algorithms used to solve the problems of complex systems. Point three reflects an overview of other evolutionary optimization algorithms, their mathematical models and areas of application.

In the **second chapter**, an extended self-adaptive CMA-ES algorithm for optimization on constrained domains is proposed. The algorithm takes into account the constraints and uses only single-peak distributions and objective functions. It is efficient for many problems, but may be inefficient for functions with a large number of extrema. In general, the modified algorithm is promising for optimization problems with complex constraints on the behavior of the objective function. Also, in the second chapter, an improved self-adaptive CMA-ES algorithm is developed for optimizing the parameters of complex systems, in particular neural networks. The algorithm differs from classical ones in that it dynamically adjusts the number of peaks in the mixture of distributions during execution, avoiding unnecessary calculations.

The main characteristics and advantages of the algorithm:

- self-adaptability: the algorithm adapts to a specific task by changing the dimension of the mixture of distributions.
- versatility: can be used with different types of distributions and applied to other evolutionary algorithms. At the same time, only single-peakedness is required from the basic distribution.
- efficiency: avoids unnecessary calculations of the objective function.
- reasonableness: adaptability is based on methods of determining the optimal number of clusters in cluster analysis.

The modification of the algorithm for problems with restrictions on the search area is considered. It takes into account the constraints and uses only single-peak distributions. This modification is effective for many problems, but may be inefficient for functions with a large number of extrema.

In general, the proposed self-adaptive CMA-ES algorithm is a promising tool for efficient optimization of complex systems with both standard and restricted search domains.

In general, the extended CMA-ES algorithm is an effective tool for the optimization of complex nonlinear and non-convex problems. It has a number of advantages over the classic CMA-ES, such as:

- the ability to take into account multimodal objective functions;
- increasing the chances of finding the global optimum in comparison with classical heuristic algorithms;
- more effective search for hyperparameters of complex systems.

However, the extended CMA-ES algorithm has one significant drawback – the need to specify the dimension of the mixture. This parameter can affect the efficiency of the algorithm, because too small a dimension can lead to the fact that the algorithm will not be able to take into account all extrema of the objective function, and therefore leads to slow convergence. On the other hand, too large a dimension can increase the running time of the algorithm.

Overall, the extended CMA-ES algorithm is a powerful optimization tool that can be useful for solving problems with multimodal objective functions.

In **the third chapter**, deals with the problem of finding optimal control for dynamic systems described by the stochastic Ito differential equation with Poisson disturbances and Markov switches. This section does not present sufficient conditions for the synthesis of optimal control for a stochastic dynamic system of a random structure with Poisson disturbances and Markov switches, and the control is aimed at stabilizing the system by probability. Sufficient conditions for asymptotic stability in terms of probability are obtained using the second Lyapunov method, in which the construction of the corresponding Lyapunov functions plays an important role. The general scheme of the study of the problem of optimal stabilization for stochastic differential equations of a random structure is also given.

For linear systems with a quadratic quality function, a method of synthesis of optimal control based on the solution of Riccati equations has been developed. Also, for autonomous systems, a system of differential equations was built to obtain unknown

matrices, which are used to specify optimal control. Another approach to the synthesis of optimal control is based on small parameter methods with sequential determination of optimal control coefficients. This approach offers a new solution to the optimal control problem for a stochastic dynamic system with a random structure and Markov switches. In addition to theoretical achievements, the third chapter deals with a comparative analysis of classical heuristic algorithms for finding optimal controls for different values of the horizon of the optimization problem. A number of advantages and disadvantages of the new extended CMA-ES algorithm are noted, the main of which relate to the number of calls to the objective function and the accuracy of suboptimal solutions.

The main results of the dissertation research are summarized in the conclusions. The appendix presents scientific publications that reflect the main scientific results of the work.

Theoretical significance. The results of the work obtained in the course of scientific research are an improvement of the theory of evolutionary algorithms. The approaches proposed in the dissertation can be used for further research in this field, in educational courses of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies of the Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University (and other higher educational institutions), related to intellectual data analysis, machine learning, in methodological developments, teaching aids for the educational process and research work of students and graduate students.

Practical meaning. Algorithms developed in the dissertation can be used in the future for practical research of complex networks. The main results of the work are based on the statements of the theory of probability, the theory of machine learning, random processes and the Monte Carlo method.

The obtained results of the dissertation enrich the methods of evolutionary algorithms and the theory of machine learning, in particular the methods and approaches of solving the problem of hyperparameter optimization of neural networks

and other complex systems. The practical value of the work is illustrated by the estimation of optimal control for stochastic differential Ito systems of random structure. The results of the work will be used in further research on this topic.

Keywords: neural networks, machine learning, mixture of distributions, optimization of hyperparameters, covariance matrix, CMA-ES algorithm, modeling, clustering algorithms, optimization problem, genetic algorithm, particle swarm method, random environment, random walk, system of stochastic differential equations, Markov switching.