

13. Stryukov R.K., Shashkin A.I. O modernizatsii metoda blizhayshikh sosedey [On the modernization of the nearest neighbors method], *Vestnik VGU, seriya: sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Vestnik VSU, series: system analysis and information technologies], 2015, No. 1, pp. 114-120.
14. Annaeva M., Atanapesova A. Odnofaktornyy dispersionnyy analiz: metody i primeneniye v statistike [One-factor analysis of variance: methods and application in statistics], *Vsemirnyy uchenyy* [World Scientist], 2023, No. 9 (1), pp. 267-271.
15. Le Minh Nhut, Le Ha Dong Quan. Study on Chiller Fault Detection and Diagnosis Method Based on KNN Algorithm and ANOVA, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2023, pp. 223-230.
16. Borisov P.D., Kosolapov Yu.V. Sposob otsenki pokhozhesti programm metodami mashinnogo obucheniya [A method for assessing the similarity of programs using machine learning methods], *Tr. Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2022, № 5 (34), pp. 63-75.
17. Cuentas S., Peñabaena-Niebles R., Garcia E. Support vector machine in statistical process monitoring: a methodological and analytical review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, Vol. 91, No. 1, pp. 485-500.
18. Nemat Saberi A., Belahcen A., Sobra Ja., Vaimann T. LightGBM-Based Fault Diagnosis of Rotating Machinery Under Changing Working Conditions Using Modified Recursive Feature Elimination, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 81910-81925.
19. Escanilla N.S., Hellerstein L., Kleiman R., Kuang Z., Shull JD, Page D. Recursive Feature Elimination by Sensitivity Testing, *17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications*, 2018, pp. 40-47.
20. Pyrko S.A., Mitiglo A.M., Ishmet'ev E.N. Avtonomnye izmeritel'nye moduli dlya sistem diagnostiki elektrodvigateley [Autonomous measuring modules for electric motor diagnostic systems], *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after. G.I. Nosova], 2020, Vol. 18, No. 1, pp. 80-89.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Криницин Павел Геннадьевич – ООО «ИСО» филиал в г. Братск; e-mail: alfa_reklama@mail.ru; г. Братск, Россия; тел.: +79501228427; аспирант; менеджер по надежности.

Ченцов Сергей Васильевич – Сибирский федеральный университет; e-mail: schentsov@sfu-kras.ru; г. Красноярск, Россия; тел.: +73912912235; кафедра систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования; д.т.н.; профессор.

Krinitzin Pavel Gennadievich – LLC "ISO" branch in Bratsk; e-mail: alfa_reklama@mail.ru; Bratsk, Russia; phone: +79501228427; postgraduate student; reliability manager.

Chentsov Sergey Vasilievich – Siberian Federal University; e-mail: schentsov@sfu-kras.ru; Krasnoyarsk, Russia; phone: +73912912235; the Department of Systems Automation, Automated Control and Design; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-98-107

В.В. Курейчик, А.Ю. Халенков

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОИСК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДВУМЕРНОЙ УПАКОВКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФИГУР СЛОЖНЫХ ФОРМ

Рассмотрена задача двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм. Задачи данного класса отнесены к классу NP-трудных проблем комбинаторной оптимизации. Помимо этого, упаковка фигур сложных геометрических форм, является одним из наиболее сложных подтипов задачи двумерной упаковки. В связи с этим необходима разработка эффективных эвристических подходов к решению данной задачи. В статье дана постановка задачи, описаны ее основные особенности, приведены ограничения и условия характерные для данного подтипа задачи двумерной упаковки. Описан критерий для подсчета эффективности решения. Для решения данной задачи в статье предлагается архитектура комбинированного поиска, состоящая из двух метаэвристических вычислительных алгоритмов. В данной архитектуре в качестве оптимизационных методов были реализованы модифицированный генетический и роевой мультиагентный биоинспирирован-

ный алгоритм, основанный на поведении пчелиной колонии. Данные алгоритмы позволяют получать наборы квазиоптимальных решений за полиномиальное время. Приведены преимущества от использования предлагаемого подхода. Для проверки эффективности предложенного подхода был разработан программный продукт, который использует предложенную архитектуру и метаэвристические вычислительные алгоритмы при решении поставленной задачи. Разработка программного продукта велась на языке программирования C++ и написана в среде разработки Microsoft Visual Studio Code. Проведен вычислительный эксперимент на наборе тестовых примеров-бенчмарков. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод об эффективности предложенного комбинированного поиска при решении задачи двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм в сравнении с решениями, базирующимися на классических алгоритмах.

Двумерная упаковка; комбинированный поиск; размещение; генетический алгоритм; биоинспирированная логика; алгоритм пчелиной колонии; оптимизация.

V.V. Kureichik, A.J. Khalenkov

COMBINED SEARCH FOR SOLVING THE PROBLEM OF TWO-DIMENSIONAL PACKING OF GEOMETRIC FIGURES OF COMPLEX FORMS

The article considers the problem of two-dimensional packing of geometric shapes of complex shapes. The problems of this class are classified as NP-hard problems of combinatorial optimization. In addition, the packaging of shapes of complex geometric shapes is one of the most difficult subtypes of the two-dimensional packaging problem. In this regard, it is necessary to develop effective heuristic approaches to solving this problem. The article presents the formulation of the problem, describes its main features, and presents the limitations and conditions characteristic of this subtype of the two-dimensional packaging problem. The criterion for calculating the effectiveness of the solution is described. To solve this problem, the article proposes a combined search architecture consisting of two metaheuristic computational algorithms. In this architecture, a modified genetic and swarm multi-agent bioinspired algorithm based on the behavior of a bee colony was implemented as optimization methods. These algorithms allow us to obtain sets of quasi-optimal solutions in polynomial time. The advantages of using the proposed approach are given. To test the effectiveness of the proposed approach, a software product was developed that uses the proposed architecture and metaheuristic computational algorithms to solve the problem. The software product was developed in the C++ programming language and written in the Microsoft Visual Studio Code development environment. A computational experiment was conducted on a set of benchmark test cases. Based on the results of experimental studies, it is concluded that the proposed combined search is effective in solving the problem of two-dimensional packing of geometric shapes of complex shapes in comparison with solutions based on classical algorithms.

Two-dimensional packing; generalized approach; packing of geometric shapes of complex shapes; placement; genetic algorithm; bioinspired logic; Bee Colony algorithm; optimization.

Введение. В настоящее время этап проектирования систем имеет наибольшую важность. Системы автоматизированного проектирования решают широкий спектр задач от рассмотрения технического задания до написания полной документации используя как технические средства, так и средства математического обеспечения [1]. Такие системы находят широкое применение в промышленности, например при решении задач комбинаторной оптимизации, связанных с оптимальным распределением различных ресурсов. К таким задачам относятся задачи упаковки и рассматриваемая задача двумерной упаковки, в частности. Задачи упаковки отнесены к классу NP-трудных задач, это означает, что для них не представляется возможным найти конкретное решение [2]. Решением в таких задачах является максимальное приближенное значение или набор значений. В данной статье внимание уделяется одному из самых сложных подвидов задачи, а именно задаче двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм. Рассматриваемый подвид задачи в разной реализации имеет значительную актуальность в промышленности, где при раскрое листовых материалов весьма важным является оптимальная компоновка разнородных объектов на листе. Размещаемые фигуры могут иметь сложную форму, что снижает эффективность существующих методов оптимизации. Для эффективного решения подобных задач в последнее время активно применяют решения, основанные на различных эвристических алгоритмах. Например, основанных на биоинспирированной логике [3–8].

Описание и постановка задачи. Задача двумерной упаковки представляет из себя задачу по упаковке двумерных объектов в двумерный контейнер, который может быть как ограниченный, так и неограниченный. Как например упаковка прямоугольников в квадрат или упаковка в полуограниченную полосу [9–13]. Задача двумерной упаковки фигур сложных геометрических форм является наиболее сложным подвидом задачи двумерной. Фигуры сложных геометрических форм заведомо имеют большее количество вариантов расположения друг с другом, нежели простые. Увеличение числа вариантов, сказывается на скорости и качестве решений. Однако данная задача имеет высокую практическую значимость, поскольку производствам, связанным с раскроем листовых материалов, часто приходится иметь дело с заготовками сложных форм. Такие заготовки неудобно располагать на карте раскроя, образуется много отходов при неоптимальном размещении.

Формально опишем основные условия задачи двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм. Задается двумерный контейнер, в который будут вписываться фигуры. Контейнер имеет ширину и длину. Пусть $M = \{m_x, m_y\}$, где m_x и m_y определены как длина и ширина. Задается набор разнородных двумерных фигур, у которых более 4 углов. $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$. Каждая фигура представлена в виде набора вершин, соединенных между собой, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Набор фигур сложных геометрических форм

Фигуры: A_i внутри контейнера определяется по: $x_{\min i}$, $y_{\min i}$, t_i , где $x_{\min i}$ – проекция самой левой точки фигуры относительно контейнера; $y_{\min i}$ – проекция самой нижней точки; t_i – параметр угла поворота фигуры в контейнере на плоскости. Фигуры требуется поместить внутри контейнера, в таком порядке, чтобы высота занятой ими площади в виде прямоугольной области была как можно меньше [9]. Пример расположения фигур внутри контейнера показан на рис. 2.

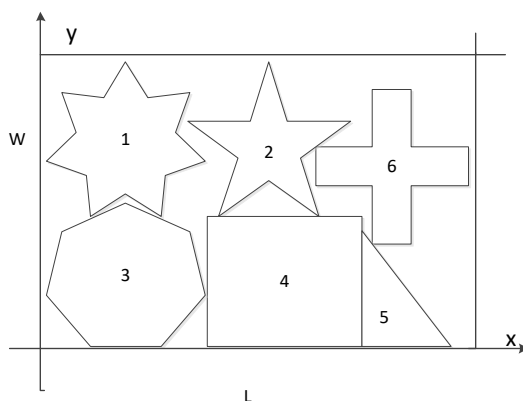


Рис. 2. Пример расположения элементов

Размещение является корректным если оно соответствует следующим ограничениям:

- ♦ Суммарная площадь всех фигур меньше площади самого контейнера:

$$\sum_{i=1}^n S_i \leq S_{\text{общ}}, \quad (1)$$

где S_i – площадь i -ой фигуры в контейнере, $S_{\text{общ}}$ – площадь контейнера;

- ♦ Фигуры не пересекаются между собой:

$$f_{ij}(x_i, y_i, t_i, x_j, y_j, t_j, \dots, x_n, y_n, \varphi_n) \geq 0 \quad i \neq j; \quad i, j = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

- ♦ Фигуры не выходят за пределы контейнера:

$$\begin{cases} x_{\min i} \geq 0; \\ y_{\min i} \geq 0; \\ x_{\max i} \leq m_x; \\ y_{\max i} \leq m_y. \end{cases} \quad (3)$$

ЦФ определяется как оставшееся незанятое пространство внутри контейнера. Чтобы конкретизировать достижение ЦФ введем коэффициент раскроя К, который будет рассчитываться согласно следующей формуле:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_{\text{общ}}}, \quad (4)$$

где S_i – площадь i -того объекта расположенного на поверхности поля (суммарная площадь занятой части), $S_{\text{общ}}$ – общая площадь поля. После размещения всех фигур контейнер будет содержать незанятую ими область. Для подсчета эффективности результатов решения задачи этого следует выделить деловой отход рис. 3.

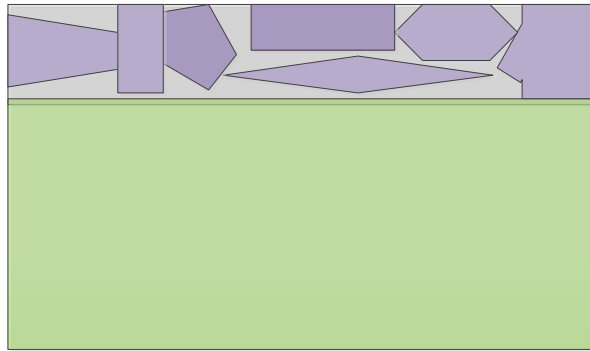


Рис. 3. Выделение делового отхода

Деловой отход – остаточное незанятое пространство контейнера, который используется при подсчёте КИМ (коэффициент использованного материала), он будет вычтен из $S_{\text{общ}}$. Деловым отходом является наибольшая прямоугольная площадь свободного листа [9, 10, 13]. Для того чтобы оценить качество полученного в результате решения задачи расчётного коэффициента, необходимо знать его теоретически максимальное значение, поскольку во многих случаях достижение КИМ = 0 невозможно. Зная это значение, и сравнив его с полученным, при решении задачи, можно сделать вывод о качестве полученного раскроя. Если коэффициент при одном решении равен 0.5, а при другом 0.4, то, последний будет являться более эффективным расположением фигур, поскольку занятое при таком расположении место в контейнере минимально.

Архитектура комбинированного поиска используется для решения задач конструкторского проектирования, при ее использовании применяется распараллеливание процесса поиска, с целью уменьшения размерности задачи [14]. Использование комбинированной логики позволяет сокращать временные затраты и получать оптимальные и квазиоптимальные результаты за полиномиальное время. Предлагается архитектура комбинированного поиска рис. 4, включающая в себя модифицированный генетический алгоритм (МГА) [3, 4, 15–17] и модифицированный алгоритм пчелиной колонии (МАПК) [18–21].



Рис. 4. Укрупненная схема архитектуры поиска

МГА быстрее работает с большой размерностью данных, позволяя оперативно отсеять заведомо неоптимальные решения. Алгоритм пчелиной колонии содержит достаточно развитую ролевую реализацию и ориентирован на улучшение качества решений, но хуже справляется с большой размерностью. Таким образом архитектура продолжает работу до тех пор, пока не будет достигнут критерий останова или исчерпан лимит числа итераций.

Рассмотрим работу архитектуры поиска поэтапно. В первом блоке задается размер популяции и число итераций цикла. Во втором блоке инициализируется цикл по алгоритмам либо МГА, либо МАПК (модифицированный алгоритм пчелиной колонии). Далее в третьем блоке происходит генерация стартовой популяции, после чего в четвертом блоке определяется алгоритм, который будет использоваться на текущей итерации цикла. Выбор алгоритма в ходе работы на каждой итерации происходит на основании размерности алгоритма, если по ЦФ МГА становится слабо эффективен и блок анализа перспективных решений регистрирует, что прирост по ЦФ упал ниже 5%, то выбирается МАПК. После выхода из цикла производится вывод наилучшего решения.

Предлагаемая архитектура поиска имеет следующие преимущества:

- ◆ Позволяет находить наиболее оптимальные решения за приемлемое время.
- ◆ Использует модифицированный генетический алгоритм, эффективность которого выше с учетом большой сложности рассматриваемой задачи, при умеренных временных затратах.
- ◆ Использован продвинутой роевой алгоритм, обеспечивающий высокое качество решений.
- ◆ Работа поиска происходит не с одним решением, а с множеством альтернативных решений.

Модифицированный генетический алгоритм – это алгоритм, основанный на механизмах натуральной селекции и генетики, направленный на поиск квазиоптимальных решений с помощью наследования и усиления полезных свойств [3, 4, 16]. Генетические алгоритмы являются случайно – направленными методами перебора множества решений, которые используются для решения NP-полных задач. Для улучшения работы генетического алгоритма, предлагается, дополнить базовую архитектуру блоками «Эволюционной адаптации» и «Анализа перспективности решений». Будут использованы следующие механизмы отбора: наследование «Благоприобретенных признаков» и «Выживание сильнейших». Как итог получаем архитектуру модифицированного генетического алгоритма (МГА) рис. 5.



Рис. 5. Архитектура модифицированного ГА

Модифицированный алгоритм пчелиной колонии. Представляет собой метаэвристический мультиагентный алгоритм, реализующий роевую модель поведения пчел [4–8, 18–21]. Агенты определяются следующими ролями: пчелы-фуражиры (рабочие) и пчелы-разведчики. Основная механика работы заключается в том, что пчела-разведчик, найдя участок с нектаром с помощью танца сообщает об этом улью, после чего пчелы-фуражиры летят к участку. Рассмотрим работу алгоритма пчелиной колонии поэтапно. Сначала вводятся стартовые параметры: количество рабочих пчел, число пчел-разведчиков на элитных участках, общее число участков, число элитных участков, размер участков и время работы. Далее происходит генерация участков для последующего поиска. Производится оценка решений, расчет целевой функции (ЦФ). Количество нектара на источнике обратно пропорционально ЦФ. Затем определяются лучшие участки, и фуражиры отправляются для их исследования. На следующем шаге свободные пчелы разведчики осуществляют случайный поиск участков, на которых производится локальный поиск. Для улучшения работы базовая структура алгоритма дополняется блоком «Анализа тенденции качества получаемых решений», который следит за тем, насколько сильно в сравнении с прошлыми итерациями получен прирост в ЦФ. После чего идет расчет полезности участка, по количеству нектара. В конце по достижению критерия останова алгоритм завершает работу и выводит наилучшее решение. На рис. 6 представлена схема реализации алгоритма роя пчел.

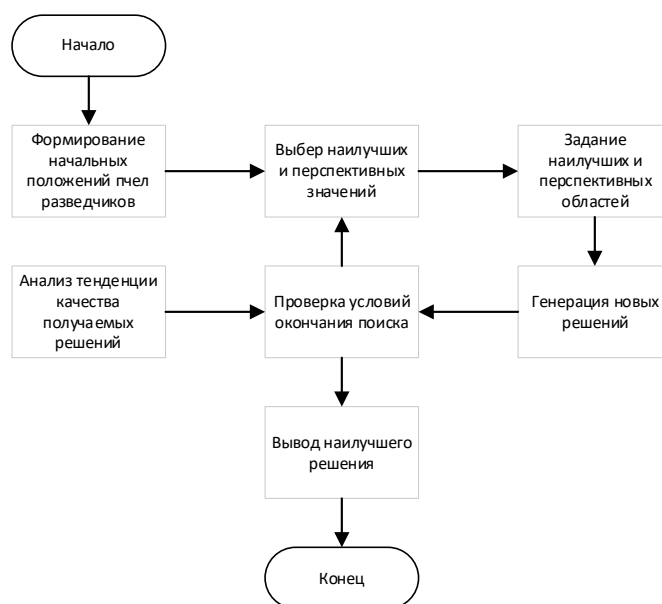


Рис. 6. Схема алгоритма модифицированного алгоритма пчелиной колонии

Вычислительный эксперимент. Для подтверждения эффективности разработанного решения был разработан программный продукт, имплементирующий предложенную архитектуру. Продукт разработан на языке программирования C++, использовалась среда разработки Microsoft Visual Studio Code. При помощи данного программного продукта проведен вычислительный эксперимент на наборе бенчмарков [22] зависимости ЦФ от размерности задачи. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и на рис. 7.

Таблица 1

Сравнение гибридного алгоритма с ГА и АСК

Количество блоков	ГА	АПК	Предлагаемый подход
50	0,55	0,72	0,72
250	0,53	0,64	0,68
500	0,51	0,6	0,66
750	0,49	0,5	0,6
1000	0,46	0,43	0,57
Среднее значение	0,51	0,58	0,64

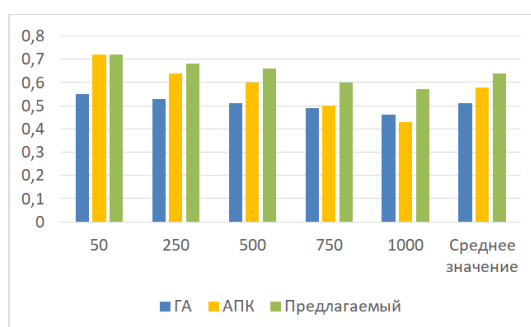


Рис. 7. Гистограмма сравнения эффективности разработанного подхода

Заключение. В данной статье рассмотрена задача двумерной упаковки геометрических фигур сложных форм. Дана постановка задачи. Описаны характерные особенности рассматриваемого подтипа задачи. Предложена архитектура комбинированного подхода к решению данной задачи. Приведена схема работы архитектуры, дано ее пояснение. Разработан модифицированный генетический алгоритм, в котором использован блок анализа перспективности решений. А также использован алгоритм пчелиной колонии. Для измерения эффективности был написан программный продукт, в котором для поиска решения задачи используется предложенная архитектура поиска. Для его разработки использовался язык программирования C++, программа написана в среде разработки Microsoft Visual Studio Code. С помощью данного ПО был проведен вычислительный эксперимент. По результатам эксперимента сделан вывод о том, что предложенная архитектура справляется вне зависимости от размерности на 6.6% лучше нежели обычный алгоритм пчелиной колонии и на 13% лучше обычного генетического алгоритма. Вычислительный эксперимент позволяет сделать вывод об эффективности использования данного подхода для решения задачи двумерной упаковки геометрических фигур сложной форм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования: учебник. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. – 336 с.
2. *Кормен, Т. Лейзерсон И., Ривест Р.* Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: МЦМО, 2000.
3. *Kureichik V.V., Kureichik V.M.* Genetic Search-Based Control // Automation and Remote Control. – 2001. – Vol. 62, 10. – P. 1698-1710.
4. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
5. *Родзин С.И., Курейчик В.В.* Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 3. – С. 51-79.
6. *Abraham A., Ramos V., Grosan G.* Swarm Intelligence in Data Mining. – Berlin. Heidelberg: Springer Verlag, 2007. – 267 p.
7. *Hassanien E. Emary E.* Swarm Intelligence: Principles Advances, and Applications. – CRC Press, 2015. – 228 p.
8. *Mourelle M., Nedjah L.* De Swarm intelligent systems. – Berlin: Heidelberg: Springer Verlag, 2006. – 217 p.
9. *Мухачева Э.А., Верхотуров М.А., Мартынов В.В.* Модели и методы расчета раскроя – упаковки геометрических объектов. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 216 с.
10. *Левин М.Ш.* Упаковка в контейнеры (перспективные модели, примеры) // Информационные процессы. – 2017. – № 1. – С. 43-60.
11. *Кулиев Э.В., Герасименко Е.М., Халенков А.Ю., Семенова М.М., Игнатьева С.В.* Разработка биоинспирированного алгоритма решения задачи двумерной упаковки // Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 78-85.
12. *Ванидовский В.А., Лебедев О.Б., Пантелюк Е.А., Кулиева Н.В.* Двумерная упаковка в полуограниченную полосу на основе моделирования адаптивного поведения муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9. – С. 21-27.
13. *Орлов А.Н., Курейчик В.В., Глуценко А.Е.* Комбинированный генетический алгоритм решения задачи раскроя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 6 (179). – С. 5-13.
14. *Курейчик В.В., Бова В.В., Курейчик В.В.* Комбинированный поиск при проектировании // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2 (5). – С. 90-94.
15. *Lawrence Davis.* Handbook of Genetic Algorithms / Ed. by Lawrence Davis. – USA: Van Nostrand Reinhold, New York, 1991. – 100 p.
16. *Holland John H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control, and Artificial Intelligence. – USA: University of Michigan, 1975. – 183 p.
17. *Goldberg David E.* Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. – USA: Addison-Wesley Publishing Company. Ind., 1989. – 196 p.
18. *Karaboga D.* An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. – Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005. – 110 p.

19. Xiuqin P, Yun W, Yong L, Na S. Improved artificial bee colony algorithm based on two-dimensional queue structure for complex optimization problems // Alexandria Engineering Journal. – 2024. – Vol. 86. – P. 669-679.
20. Курейчик В.В., Полупанова Е.Е. Эволюционная оптимизация на основе алгоритма колонии пчёл // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 12 (101). – С. 41-46.
21. Pham D.T., Castellani M. The Bees Algorithm – Modelling Foraging Behaviour to Solve Continuous Optimization Problems // Proc. ImechE, Part C. – 2009. – 223 (12). – P. 2919-2938.
22. Weiss M.A. Data Structures and Algorithm Analysis in C++. – Boston: Pearson Education, 2014. – 656 p.

REFERENCES

1. Norenkov I.P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya: uchebnik [Fundamentals of computer-aided design: textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU imeni N.E. Bauman, 2006, 336 p.
2. Kormen, T. Leyzerson I., Rivest R. Algoritmy. Postroenie i analiz [Algorithms. Construction and analysis]. Moscow: MTSMO, 2000.
3. Kureichik V.V., Kureichik V.M. Genetic Search-Based Control, *Automation and Remote Control*, 2001, Vol. 62, 10, pp. 1698-1710.
4. Karpenko A.P. Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: textbook. Allowance]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014.
5. Rodzin S.I., Kureychik V.V. Teoreticheskie voprosy i sovremennyye problemy razvitiya kognitivnykh bioinspirirovannykh algoritmov optimizatsii (obzor) [Theoretical issues and modern problems in the development of cognitive bioinspired optimization algorithms (review)], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and Programming], 2017, No. 3, pp. 51-79.
6. Abraham A., Ramos V., Grosan G. Swarm Intelligence in Data Mining. Berlin. Heidelberg: Springer Verlag, 2007, 267 p.
7. Hassanien E. Emary E. Swarm Intelligence: Principles Advances, and Applications. CRC Press, 2015, 228 p.
8. Mourelle M., Nedjah L. De Swarm intelligent systems. Berlin: Heidelberg: Springer Verlag, 2006, 217 p.
9. Mukhacheva E.A., Verkhoturov M.A., Martynov V.V. Modeli i metody rascheta raskroya – upakovki geometricheskikh ob'ektov [Models and methods for calculating cutting - packaging of geometric objects]. Ufa: UGATU, 1998, 216 p.
10. Levin M.Sh. Upakovka v konteynery (perspektivnye modeli, primery) [Packaging in containers (promising models, examples)], *Informatsionnye protsessy* [Information processes], 2017, No. 1, pp. 43-60.
11. Kuliev E.V., Gerasimenko E.M., Khalekov A.Yu., Semenova M.M., Ignat'eva S.V. Razrabotka bioinspirirovannogo algoritma resheniya zadachi dvumernoy upakovki [Development of a bioinspired algorithm for solving the two-dimensional packaging problem], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and Communication], 2021, No. 3, pp. 78-85.
12. Vanidovskiy V.A., Lebedev O.B., Pantelyuk E.A., Kulieva N.V. Dvumernaya upakovka v poluogranichennuyu polosyu na osnove modelirovaniya adaptivnogo povedeniya murav'inoi kolonii [Two-dimensional packing in a semi-limited strip based on modeling the adaptive behavior of an ant colony], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9, pp. 21-27.
13. Orlov A.N., Kureychik V.V., Glushchenko A.E. Kombinirovannyi geneticheskiy algoritm resheniya zadachi raskroya [Combined genetic algorithm for solving the cutting problem], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 6 (179), pp. 5-13.
14. Kureychik V.V., Bova V.V., Kureychik V.V. Kombinirovannyi poisk pri proektirovanii [Combined search in design], *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii* [Educational resources and technologies], 2014, No. 2 (5), pp. 90-94.
15. Lawrence Davis. Handbook of Genetic Algorithms, Ed. by Lawrence Davis. USA: Van Nostrand Reinhold, New York, 1991, 100 p.
16. Holland John H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control, and Artificial Intelligence. USA: University of Michigan, 1975, 183 p.
17. Goldberg David E. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. USA: Addison-Wesley Publishing Company. Ind., 1989, 196 p.
18. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005, 110 p.
19. Xiuqin P, Yun W, Yong L, Na S. Improved artificial bee colony algorithm based on two-dimensional queue structure for complex optimization problems, *Alexandria Engineering Journal*, 2024, Vol. 86, pp. 669-679.

20. Kureychik V.V., Polupanova E.E. Evolyutsionnaya optimizatsiya na osnove algoritma kolonii pchel [Evolutionary optimization based on the bee colony algorithm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 12 (101), pp. 41-46.
21. Pham D.T., Castellani M. The Bees Algorithm – Modelling Foraging Behaviour to Solve Continuous Optimization Problems, *Proc. ImechE, Part C*, 2009, 223 (12), pp. 2919-2938.
22. Weiss M.A. Data Structures and Algorithm Analysis in C++. Boston: Pearson Education, 2014, 656 p.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Курейчик Владимир Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Халенков Александр Юрьевич – e-mail: van-de-cristo@yandex.ru; тел.: +79289652190; кафедра САПР.

Kureichik Vladimir Victorovich – SouthernFederalUniversity; e-mail: vkur@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the Department of Computer Aided Design; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

Khalenkov Alexander Jurevich – e-mail: van-de-cristo@yandex.ru; phone: +79289652190; the Department of Computer Aided Design.

УДК 621.397.13

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-107-117

С.Н. Мелешкин, И.Б. Силес

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ С ПОВОРОТОМ СИГНАЛЬНОГО СОЗВЕЗДИЯ В СТАНДАРТЕ DTMB НА БАЗЕ SIMULINK МОДЕЛИ В СРЕДЕ MATLAB

Рассматриваются модифицированные алгоритмы с поворотом сигнального созвездия примененные в стандарте цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания принятом на Кубе. По сравнению с использованием созвездий без поворота, эти алгоритмы дают значительное увеличение производительности системы в сложных условиях приема, с промышленными помехами и низким соотношением сигнала к шуму. В данной работе проведен анализ влияния угла и направления поворота сигнального созвездия на устойчивость системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания. Основной целью данной работы является анализ влияния угла и направления поворота сигнального созвездия на устойчивость системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания. Для исследования была разработана собственная архитектура системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания, принятая на Кубе, реализованная в Simulink в среде Matlab. Указанная Simulink модель позволяет проводить анализ зависимости коэффициента битовых ошибок от значения белого гауссовского шума для различных конфигураций системы. В исследованиях широко применяется модель аддитивного белого гауссовского шума, который подмешивается к сформированному сигналу. Предложенные модификации позволяют вести прием цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания в каналах без замираний при равных значениях коэффициента битовых ошибок для всех анализируемых случаев. При этом, для получения существенного выигрыша от поворота созвездия, порядка семи децибел, квадратурные и синфазные компоненты предлагается передавать на разных поднесущих и в разные моменты времени. В схеме с поворотом сигнального созвездия, квадратурную компоненту нужно передавать не на той же самой поднесущей, а с задержкой и на другой поднесущей. Тогда из одной квадратурной амплитудной модуляции получается фактически две амплитудные двоичные модуляции в синфазной и квадратурной проекции, которые передаются на независимых поднесущих, и поражаются помехами по-разному, что обеспечивает надежность демодуляции при более низких значениях соотношения сигнала к шуму и воздействию промышленных помех. Недостатком алгоритма является недостаточное противодействие зашумлению гауссовским шумом.

Цифровое наземное телевизионное мультимедийное вещание; Matlab; Simulink; сигнальные созвездия; аддитивный белый гауссовский шум; коэффициент битовых ошибок; модуляция; кодирование.