

# АНАЛИЗ ГИБРИДНОГО ИМИТАЦИОННОГО ОТЖИГА С ТАБУ ПОИСКОМ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ОРИЕНТИРОВАНИЯ

**М.А. Шекунов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: baozorp@gmail.com

**Е.Б. Барашов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: barashov.eb@gmail.com

**Ключевые слова:** стохастическая оптимизация, эвристики, гибридный метод.

**Аннотация:** Доклад посвящен исследованию проблемы маршрутизации в автономной системе транспортировки, которая соответствует известной задаче ориентирования в области исследования операций. Путем расширения классической задачи ориентирования до стохастической со случайным временем перемещения и временем обслуживания проведено исследование с целью оптимизации выбора маршрутов с максимизацией общего собранного вознаграждения в соответствии с доступным временем для самоадаптивного агента. В рамках динамической и стохастической задачи ориентирования предложена стратегия коррекции на основе многоступенчатой эвристики для обеспечения автономного агента возможностью коррекции маршрутов в реальном времени. Наконец, для проверки эффективности предложенной эвристики проведены эксперименты, демонстрирующие конкурентоспособность предложенного метода.

## 1. Введение

Рассматривается задача ориентирования с временными окнами, входящая в класс проблем маршрутизации и планирования, возникающих при физическом распределении. Задача охватывает узлы с прибылью и временным окном обслуживания, а также ребра с определенным временем. Основная цель — построить оптимальный ациклический маршрут с максимальной прибылью, учитывая временные ограничения на узлах и общее временное ограничение. Сложность задачи подтверждается ее классификацией как NP-трудной [1], что подразумевает отсутствие точного алгоритма с разумным временем выполнения. Задача ориентирования представляет собой задачу комбинаторной оптимизации, направленную на выбор оптимальных мест и последовательности маршрутов с целью максимизации общего вознаграждения, полученного при посещении узлов. Эта задача развивается из классической задачи о коммивояжере, широко применяемой в туризме, транспортном планировании, цепочках поставок и маршрутизации автономных транспортных средств [2]. Существенное различие между этими двумя классическими задачами заключается в том, что агент в TSP должен посетить все заранее определенные места без ограничения

бюджета времени, в то время как агент в задаче ориентирования может выборочно посещать и обслуживать некоторые из доступных мест. Он также определяет последовательность маршрутов с целью максимизации общего вознаграждения, назначенного каждому месту, при ограниченном бюджете времени [3].

В литературе содержится небольшое количество исследований, посвященных стохастической и динамической задаче ориентирования. Например, в [4] и [5] разработали подход, в котором время в пути изменяется случайно при известном распределении вероятности. В работе [6] исследовали стохастическое время в пути для ОП, в котором штраф накладывался на запланированные, но не обслуживаемые места, и оценили влияние динамической корректировки маршрутов при раскрытии времени в пути. В [7] рассматривалась стохастическая задача ориентирования с неопределенным временем ожидания в каждом месте перед началом обслуживания, в которой они разработали динамический двухэтапный эвристический алгоритм. На первом этапе алгоритм решает, оставаться ли в текущем месте или отправиться в другое место. Если отправиться из текущего места, то на втором этапе он выбирает следующее место.

Когда интеллектуальный агент осуществляет выполнение задач в процессе передвижения, временные параметры, такие как время в пути и время обслуживания, становятся известными лишь после посещения и обслуживания конкретного места. Это происходит из-за неопределенности, связанной с временем в пути и временем обслуживания. Вследствие этого план маршрутизации должен подвергаться коррекции в режиме реального времени в соответствии с оставшимся временным бюджетом. Например, агент выполняет транспортную миссию по заранее определенному маршруту, где времена в пути между точками и времена обслуживания подвержены стохастической природе. После посещения и обслуживания определенных точек агент может обнаружить, что у него недостаточно времени для своевременного выполнения заранее заданных задач или, наоборот, имеется избыточное время для сбора дополнительных вознаграждений. В таких случаях агент вынужден корректировать исходный маршрут, при этом необходимо обеспечить высокую вероятность успешного возвращения в точку отправления до истечения временного бюджета. С учетом этого контекста мы оптимизируем маршруты в реальном времени, применяя стратегии самоадаптации коррекции, с целью максимизации общего количества собранных вознаграждений, при этом обеспечивается высокая вероятность прибытия автономного агента до истечения временного бюджета.

Процесс исследования начался с тщательного анализа алгоритма гибридного имитационного отжига с табу поиском, выявляя его ключевые особенности и преимущества в контексте стохастических задач ориентирования. Затем были разработаны и сгенерированы уникальные примеры задач, которые позволили нам тестировать алгоритм в разнообразных условиях и оценивать его производительность в различных сценариях. Экспериментальное сравнение включало в себя применение разработанного алгоритма к созданным тестовым наборам и последующую проверку полученных результатов. Важным этапом стало также проведение сравнения с решением, полученным при помощи библиотеки OR-Tools. Этот этап обеспечил точную базу для оценки эффективности алгоритма гибридного имитационного отжига с табу поиском, а также позволил выявить области его применимости и возможные улучшения.

## **2. Генерация данных и работа с алгоритмами**

Исходя из анализа открытых наборов данных для этой задачи для тестирования алгоритма был разработан генератор данных, в котором координаты вершин

генерировались случайным образом из нормального распределения с математическим ожиданием равным 0 и среднеквадратичным отклонением равным 20. На основе местоположений вершин высчитывалась матрица расстояний как сумма евклидова расстояния между каждой парой точек, умноженного на коэффициент 0.1, и значений, взятых случайным образом из равномерного распределения на интервале [0, 2]. Время обслуживания каждой точки равнялось сумме значения, взятого из равномерного распределения на интервале [0, 10], умноженного на коэффициент 0.1, и значения, взятого из равномерного распределения на интервале [0, 2]. Награды за посещения вершин брались случайным образом из нормального распределения с математическим ожиданием 25 и среднеквадратичным отклонением 5. Количество точек и временное ограничение регулировались вручную.

Для сравнения использовался решатель от OR-Tools типа «Dimension». Решатель маршрутов использует объект, называемый *измерением*, для отслеживания величин, которые накапливаются на маршруте транспортного средства, таких как время в пути или, если транспортное средство осуществляет погрузку и доставку, общий вес, который оно перевозит. В случае данной задачи в качестве веса использовалась награда за посещение вершины. Для решения был выбран один агент, для которого строился маршрут посещения вершин. Вместо ограничения расстояния было задано ограничение по времени маршрута. Поскольку OR-Tools работает только с целыми числами, а исходные сгенерированные данные представлены в виде float, то в соответствии с рекомендациями официальной документации, значения матрицы расстояний и временное ограничение были умножены на 10000, после чего они автоматически округлялись до целочисленных значений встроенными инструментами OR-Tools. Из-за данных преобразований длина любого маршрута увеличивалась в 10000 раз, но само решение не менялось. Величина округления мала и не оказывала существенного влияния на решение. Также в алгоритм были добавлены штрафы за непосещение локаций. Каждый пропущенный пункт назначения добавлял штраф к общему расстоянию. Затем решатель находил маршрут, который минимизировал общее расстояние и сумму всех штрафов за пропущенные местоположения.

В качестве второго алгоритма был реализован алгоритм HSATS. Для генерации первоначального решения, доступного к оптимизации, использовался «жадный алгоритм». Необходимость «подбора» параметров имитационного отжига, используемого в данном алгоритме, усложняет работу и является существенным недостатком относительно алгоритма из OR-Tools. После генерации данных, интеграции решателя OR-Tools, реализации алгоритма HSATS была проведена серия экспериментов, результаты которых представлены в таблице 1.

Из результатов можно увидеть, что на малом количестве вершин HSATS может обрабатывать в десятки раз быстрее, чем OR-Tools, выдавая схожий результат целевой функции, однако разница довольно быстро нивелируется при увеличении количества вершин. Также увеличении количества вершин и увеличении длины маршрута, разница между значениями целевой функции алгоритмов HSATS и OR-Tools постепенно уменьшается, и они начинают выдавать схожие результаты.

**Таблица 1.** Результаты экспериментов.

№	Алгоритм	N	TL	T	OV	MR	OV/MR (%)
1	OR-Tools	50	20	1.00263	304	1252	24.281
	HSATS			0.05637	278		22.204
2	OR-Tools	50	50	1.00271	696	1263	55.106

	HSATS			0.19117	654		51.781
3	OR-Tools	50	100	1.00269	1006	1208	83.278
	HSATS			0.18015	975		80.711
4	OR-Tools	100	100	1.01825	1619	2552	63.440
	HSATS			0.20913	1577		61.794
5	OR-Tools	100	150	1.00532	1952	2536	76.971
	HSATS			0.30696	1937		76.380

где  $N$  – общее количество узлов,  $TL$  – ограничение по времени,  $T$  – время работы алгоритма,  $OV$  – значение целевой функции,  $MR$  – сумма наград за посещение всех вершин.

### 3. Заключение

В результате данного исследования мы провели сравнение двух алгоритмов – решателя OR-Tools и алгоритма HSATS – в контексте оптимизации маршрутов, учитывая временные и прочие ограничения. Создавая реалистичные сценарии с использованием генератора данных, основанного на случайных координатах вершин, мы выявили, что разница в целевых функциях этих алгоритмов оказывается невелика. Однако стоит отметить, что алгоритм HSATS демонстрирует высокую эффективность и всегда опережает OR-Tools по времени выполнения, сохраняя при этом практически равные целевые функции.

Особенно важно отметить, что на задачах больших размерностей, где количество вершин значительно увеличивается, алгоритм HSATS подтверждает свою производительность, предоставляя быстрое решение при сохранении невысокой разницы в целевых функциях. Таким образом, HSATS является отличной альтернативой в ситуациях, где скорость выполнения имеет критическое значение, и разница в результате оказывается минимальной. В предстоящих исследованиях планируется сфокусироваться на дополнительном анализе параметров и оптимизации алгоритмов для более точного понимания их поведения в различных сценариях.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта 22-71-10131.

### Список литературы

1. Golden B. L., Levy L., Vohra R. The orienteering problem // *Nav. Res. Logistics*, 1987. Vol. 34, No. 3. P. 307-318.
2. Gelareh S., Gendron B., Hanafi S., Neamatian Monemi R., Todosijević R. The selective traveling salesman problem with draft limits // *J. Heuristics*. 2020.
3. Keshtkaran M., Ziarati K. A novel GRASP solution approach for the orienteering problem // *J. Heuristics*. 2016.
4. Lau H.C., Yeoh W., Varakantham P., Nguyen D.T., Chen H. Dynamic stochastic orienteering problems for risk-aware applications. In: *Uncertainty in Artificial Intelligence // Proceedings of the 28th Conference. UAI 2012*.
5. Verbeeck C. Optimizing practical orienteering problems with stochastic time-dependent travel times: towards congestion free routes // *4OR*. 2017.
6. Dolinskaya I., Shi Z., Smilowitz K. Adaptive orienteering problem with stochastic travel times // *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 2018. Vol. 109. 1-19.
7. Zhang S., Ohlmann J.W., Thomas B.W. Dynamic orienteering on a network of queues // *Transp. Sci.* 2018.