МАРШРУТИЗАЦИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ. ЗАДАЧА ЛЕТАЮЩЕГО ПОМОЩНИКА КОММИВОЯЖЕРА

ROUTING OF UNMANNED AIRCRAFT. FLYING ASSISTANT COMMISSIONER CHALLENGE

УДК 629

Зайко Роман Дмитриевич, магистрант 2 курса, факультет Автоматики и Вычислительной Техники (АВТФ), Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск

Zaiko R.D. romanzayko@gmail.com

Аннотация

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) или дроны обладают потенциалом значительно сократить стоимость и время доставки последней мили. Несмотря на весь потенциал, достаточно немного работы проделано в области решения задачи построения маршрутов транспортных средств в применении к сценариям характерным дронам. Существующие решения являются неэффективными, так как не учитывают специфику БПЛА: множественные полеты в депо, приводящие к ситуации, когда доставки осуществляются в малом радиусе; либо не учитывается влияние веса груза и дальности полета на техническую возможность осуществления доставки. Эта работа рассматривает задачу построения сложного маршрута и взаимодействия системы грузовик-БПЛА для осуществления доставки грузов. Решение этой задачи позволит адаптировать и более эффективно применять беспилотные летательные аппараты для логистики последней мили. Ожидается, что такая система позволит совершать более быстрые доставки конечным клиентам при

меньших финансовых и временных затратах, равно как и сократить влияние на окружающую среду.

Annotation

Unmanned aerial vehicles (UAVs) or drones have the potential to significantly reduce the cost and delivery time of the last mile. Despite all the potential, quite a bit of work has been done in the area of solving the problem of building routes of vehicles as applied to scenarios for typical drones. The existing solutions are ineffective, since they do not take into account the specifics of the UAV: multiple flights to the depot, leading to a situation when deliveries are carried out in a small radius; or the effect of the weight of the cargo and the flight range on the technical feasibility of delivery is not considered. This work examines the problem of constructing a complex route and the interaction of the truck-UAV system for the delivery of goods. Solving this problem will make it possible to adapt and more effectively use unmanned aerial vehicles for logistics of the last mile. It is expected that such a system will allow for faster deliveries to end customers with less financial and time costs, as well as reducing the impact on the environment.

Ключевые слова: Беспилотные летательные аппараты, задача построения маршрута, задача коммивояжера, доставка грузов, эвристика, смешанное целочисленное линейное программирование, логистика.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, route planning problem, traveling salesman problem, cargo delivery, heuristics, mixed integer linear programming, logistics.

Введение

Использование беспилотных летательных аппаратов или воздушных дронов приобретает всё большую значимость в различных областях промышленности отличных от военной: от высокоточного сельского хозяйства до логистики и контроля за стихийными бедствиями, и т.д. Растущей

популярностью и распространению в широком диапазоне областей применения они обязаны своим преимуществам, обусловленными их гибкостью, точностью и удобством использования, а также тому факту, что присутствие человека на борту не является необходимостью. Области применения дронов можно грубо разделить на две группы: сбор данных и информации, и доставка грузов. Мы будем рассматривать второй случай, в частности мы берем в рассмотрение проблему, связанную с доставкой посылок. Взрывообразный рост электронной коммерции и обещание всё более быстрой доставки поставило компании, занимающиеся электронной коммерцией и экспресс доставкой перед затруднительной задачей. Среди первых компаний, исследующих возможность использования дронов в доставке посылок такие компании, как Alibaba, Alphabet, Amazon и JD.com. Например, проект Amazon PrimeAir, который совершил свою первую демонстрационную доставку на территории США в марте 2017. Это событие подняло проблему последующей оптимизации. Представьте, у вас есть парк грузовиков, и вам выдают груз, который необходимо доставить в заданные точки на плоскости. Кроме того, имеется число дронов, которые грузовик может перевозить на своей крыше, и каждый дрон может доставить один (произвольный) пакет за один полёт.

Каждый раз после доставки груза дрон должен вернуться к грузовику, чтобы встать на зарядку на его крыше хотя бы на одном отрезке (имеется в виду между двумя точками доставки груза) маршрута грузовика. В таком случае вероятной целью является минимизирование среднего времени до того, как груз доставлен.

Задача летающего помощника коммивояжёра – одна из тех двух моделей, где один грузовик и один дрон (с ограниченной дальностью полёта) должны доставить грузы. Имеются также некоторые тонкости, например, некоторые пакеты не могут быть доставлены дроном (например, из-за того, что они слишком тяжелые). Заметим, что в нашей модели мы абстрагируемся от таких тонкостей. Цель состоит в том, чтобы уменьшить обратный путь грузовика или дрона после доставки всех грузов.

Данная задача обобщает задачу коммивояжёра, таким образом она является NP-сложной, в действительности, на практике эта проблема выглядит гораздо сложнее задачи коммивояжёра.

Литературный обзор

Задача Летающего Помощника Странствующего Торговца (FSTSP) является обобщением Задачи Странствующего Торговца (TSP) и Задачи Транспортной Маршрутизации (VRP – Vehicle Routing Problem), таким образом данная задача также относится к классу NP-трудных задач. Количество литературы, посвященной оптимизационным задачам для дронов или грузовиков и дронов ограничено, однако в последние годы можно наблюдать повышенный интерес к проблеме.

Мюррей и Чу [1] предлагают Параллельное Планирование Дронов Задачи Странствующего Торговца (Parallel Drone Scheduling TSP – PDSTSP), когда флот беспилотных транспортных средств выполняет доставки вылетая только непосредственно из депо. Другие доставки выполняет грузовик. Они предлагают смешанное целочисленное линейное программирование (СЦЛП) выражение и простые жадные эвристики для обеих задач. В FSTSP грузовик и дрон могут взаимодействовать для обслуживания заказов. В таком случае дрон запускается с автомобиля в каком-то из узлов сети, выполняет доставку клиенту и возвращается к автомобилю в другом узле сети. Грузовик и дрон должны быть синхронизированы, чтобы ожидать друг друга в точке встречи. Главной целью поставленной задачи, как правило является сокращение времени доставки. Каждый клиент должен быть посещен только один раз, некоторые доставки должен выполнить грузовик, потому что дрон не может выполнить их. Дрон не может возвращаться в точку запуска.

Улмер и Томас [2] изучают динамический вариант PDSTSP, который назвали Доставка одним днем при помощи гетерогенного флота дронов и автомобилей, в данной модели заказы на доставку поступают динамически, и необходимо выделять дроны либо грузовики, чтобы максимизировать число

доставленных грузов. Они решают проблему приближенным динамическим программированием.

Савуран и Каракайя [3] исследуют задачу, в которой грузовик следует по линейному маршруту, в то время как БПЛА запускается с грузовика и должен вернуться на грузовик, выполнив доставку грузов в соответствии с TSP, для решения задачи они используют генетический алгоритм.

Моурело Ферранез и др. [4], а также Чэн и Ли [5] независимо предлагают схему работы для дрона и грузовика, при которой имеется некий заранее известный набор грузов, которые необходимо доставить различным клиентам; клиенты объединяются в кластеры методом k-средних. Таким образом TSP решается относительно геометрических центров образованных кластеров, именно в этих точках останавливается грузовик для запуска одного или нескольких дронов. TSP предлагается решать с помощью генетического алгоритма.

Мы в свою очередь рассматриваем задачу, в которой грузовики помимо грузов также транспортируют дроны, оба типа транспортных средств могут быть использованы для доставки грузов клиентам, а синхронизация между грузовиком и дроном обязательна. Отто и др. [6] классифицируют эту задачу, как дроны и автомобили, как синхронизованные рабочие единицы.

Задача летающего помощника коммивояжера

Две машины работают в тандеме таким образом, что дрон может покинуть грузовик и обязан вернуться к нему, после доставки для одного клиента, выполняя полеты, не превышающие запас хода на одном заряде аккумулятора. Каждый клиент может быть посещен только один раз, а некоторые заказы может выполнить только грузовик, потому что требования этих клиентов невыполнимы для дрона ввиду дальности расположения, массы или габаритов груза. Дроны не могут возвращаться в точку вылета. В таком случае каждый из клиентов должен быть посещен хотя бы одним транспортным средством, но могут быть посещены более 1 раза грузовиком для запуска или возвращения дрона. Время взлета и посадки считается пренебрежительно малым.

На протяжении всего маршрута БПЛА может совершить несколько вылазок, каждая из которых состоит из трех точек. Перед запуском требуется некоторое время на обслуживание: водитель грузовика должен заменить батарею, а также загрузить посылку в дрон. Вторая точка – клиент, которому БПЛА доставляет груз. Последняя точка вылазки может быть либо депо, либо местоположение грузовика. Если вылазка завершается у грузовика, то необходимо вновь учесть время на обслуживание, чтобы водитель забрал дрон и загрузил обратно в грузовик. После запуска БПЛА должен доставить груз и вернуться в конечную точку в рамках своей дальности полета. Задача FSTSP заключается в снижении времени необходимого на осуществление всех доставок и возвращение обоих транспортных средств в депо.

Синхронизация между двумя машинами является основополагающим условием, а время завершения в конце каждой операции должно быть минимизировано.

Грузовик и БПЛА должны отправляться и возвращаться в одно депо (логистический хаб) равно один раз. Два транспортных средства могут отправляться (или возвращаться) как вместе, так и по-отдельности; перемещаясь тандемом, грузовик перевозит БПЛА, таким образом не расходуя запас батареи дрона.

Условия рассматриваемой задачи:

1. Несмотря на то, что БПЛА за одну вылазку может доставить груз только одному клиенту, грузовик за то же время может доставить несколько грузов.

2. Предполагается, что БПЛА постоянно находится в полете, кроме момента «выдачи» груза клиенту. Таким образом, БПЛА не может экономить заряд на обратном пути к грузовику и должен прибыть на точку встречи раньше грузовика.

3. Если БПЛА встретился с грузовиком в некой точке доставки клиенту, он может совершить свою следующую вылазку из этой же точки. Однако, вернуться в эту же точку он не может.

4. Если на последнем отрезке пути дрон должен встретиться с грузовиком, это должно произойти в точке обслуживания клиента. БПЛА не может встретиться с грузовиком посередине пути последнего. Более того, грузовик не может вновь посетить любого из клиентов, чтобы подобрать БПЛА.

5. Ни грузовик, ни БПЛА не имеют права посещать любые другие точки, кроме точек обслуживания клиентов и депо. К тому же ни одно транспортное средство не имеет права посещать одного и того же клиента дважды.

6. В случае, если БПЛА завершает вылазку в депо, БПЛА выводится из обслуживания клиентов (т. е. не может быть запущен из депо вновь). Так как FSTSP подразумевает ситуации, в которых отправлять дроны из депо не выгодно, считаем, что такое условие разумно.

Для решения задачи мы предлагаем использование смешанного целочисленного линейного программирования (СЦЛП), в частности: три индексированных и пара из двух индексированных выражений.

Введем следующую систему обозначений для смешанного целочисленного линейного программирования задачи FSTSP. Пусть $C = \{1, 2, \ldots, c\}$ – множество всех клиентов, и пусть $C' \subseteq C$ – подмножество клиентов, которые могут быть обслужены БПЛА. Несмотря на то, что депо представлено лишь одной точкой, мы присвоим ему два номера, таким образом, что все транспортные средства отправляются из депо с номером узла 0, а возвращаются в депо с номером узла $c + 1$. Таким образом, $N = \{0, 1, 2, \ldots, c+1\}$ представляет множество всех узлов графа. Чтобы подробнее задать структуру графа в приложении к нашей задаче, укажем $N_0 = \{0, 1, 2, \ldots, c\}$ – множество узлов, из которых транспортное средство может отправиться, а $N^+ = \{1, 2, \ldots, c+1\}$ – множество узлов, которые транспортное средство может посетить на протяжении своего маршрута.

Время, которое требуется грузовику для того, чтобы переместиться из точки $i \in N_0$ в точку $j \in N^+$ обозначим τ_{ij}. Параметр τ'_{ij} – представляет аналогичную величину для БПЛА. Разница между временем перемещения для

транспортных средств обусловлена различной скоростью передвижения грузовика и БПЛА. Таким образом БПЛА может летать между клиентами игнорируя дорожную инфраструктуру и знаки, в то же время грузовик должен будет перемещаться по дорогам общего пользования с соблюдением правил дорожного движения. Так как мы предполагаем, что ни одно транспортное средство не может возвращаться к уже посещенному клиенту, то время τ_{ij} и τ'_{ij} не определены для любого $i \in N$. Для полноты отметим также, что $\tau_{0,c+1} = 0$, для вырожденного случая, когда клиент один и обслуживается дроном напрямую из депо.

Время, которое требуется водителю грузовика, чтобы подготовить БПЛА к запуску, и чтобы подобрать БПЛА в точке встречи зададим параметрами $s_з$ и $s_п$ соответственно. Значение e – дальность полета БПЛА будем измерять в единицах измерения времени (минутах).

Определим в нашей системе обозначений все возможные «вылазки» БПЛА, состоящие из трех узлов графа. Пусть P – множество кортежей вида $\langle i,j,k \rangle$. Некоторый кортеж $\langle i,j,k \rangle$ принадлежит множеству P, если:

1. Начальная точка i не должна совпадать с точкой депо возврата, т.е. $i \in N_0$.
2. Точка доставки j такая, что находящийся в ней клиент может быть обслужен БПЛА, и должна не совпадать с начальной точкой i, т.е. $j \in C'$, $j \neq i$.
3. Точка встречи k может быть, как клиентом, так и точкой депо возврата, она должна быть отличной от i и j, а время полета БПЛА по маршруту i-j-k не должно превышать дальность полета БПЛА, т.е. $k \in N^+$ $k \neq i,j$, $\tau'_{ij} + \tau'_{jk} \leq e$.

Теперь, когда у нас определены параметры, необходимо задать переменные, на основании которых будут приниматься решения. Пусть $x_{ij} \in \{0,1\}$ равно 1, если грузовик перемещается из узла $i \in N_0$ в $j \in N+$, $j \neq i$. Вылазки БПЛА обозначим $y_{ijk} \in \{0,1\}$ принимает значение 1, когда БПЛА запущен из узла $i \in N0$ и направляется в узел $j \in C$ для доставки груза клиенту без сопровождения грузовика, и возвращается к грузовику или депо возврата в узле $k \in N^+$, $\langle i,j,k \rangle \in P$. Момент времени в который грузовик приезжает в точку $j \in N^+ - t_j \geq 0$.

Аналогично, время в которое БПЛА прибывает в точку $j \in N^+ - t'_j \geq 0$. Время отправки грузовика и БПЛА из депо вместе или по отдельности мы определяем, как $t_0 = t'_0 = 0$.

Нам также понадобятся две вспомогательные переменные принятия решений. Первая – $p_{ij} \in \{0,1\}$ равна единице, если клиента $i \in C$ грузовик посетил раньше клиента $j \in C$. Смысл этой переменной заключается в том, чтобы обеспечить уверенность в том, что вылазки БПЛА не пересекаются с доставками грузовика. Если заказы клиентов i и j были доставлены БПЛА, то значение p_{ij} будет несущественно в ограничениях. Значение $p_{0j} = 1$ для любой $j \in C$, чтобы обозначить, что депо (в своей начальной точке) должно быть стартовой точкой для грузовика. Так же, как и в классической задаче коммивояжера введем ограничения, которые позволят избавиться от вложенных маршрутов: $1 \leq u_i \leq c + 2$ – позиция узла $i \in N^+$ в маршруте грузовика. Однако, в отличие от задачи коммивояжера FSTSP подразумевает использование нескольких транспортных средств (грузовика и дрона), и узлы, в которые должен отправиться грузовик не известны заранее. Таким образом, значения, которые принимает u_i для узлов, в которые отправится грузовик являются критически важными, чтобы избежать появления вложенных маршрутов для грузовика, в то же время значения u_i для узлов, в которые отправится дрон не влияют на ограничения.

Перейдем к построению маршрута БПЛА. Построение маршрута – задача поиска оптимального маршрута из заданной точки в целевую, которая учитывает различные осложнения. Осложнения могут быть разных типов: области с запретом полетов, сложные погодные условия, а также различные виды препятствий и т.д. Данная задача в общем виде является NP-трудной, а алгоритмы, решающие её за полиномиальное время, являются исключением и применимы в узком спектре условий.

Задача построения маршрута для БПЛА имеет ряд специфических отличий. Во-первых, из-за сравнительно малых размеров БПЛА, в первую очередь относительно окружения, в построенной модели размер БПЛА

принимается за размер физической точки. Данное обстоятельство значительно упрощает задачу.

Во-вторых, из-за того, что БПЛА перемещаются на высокой скорости в неплотной среде с низким коэффициентом трения, они не способны на резкие маневры на своем пути. Поэтому построенный маршрут должен избегать резких поворотов. Сложность маршрутов также возрастает с ростом числа препятствий, которые возникают на пути дрона. Также стоит учитывать, что БПЛА не способны выполнить два последовательных поворота, из-за чего при построении маршрута необходимо каждые два поворота связывать прямым участком.

Третье отличие от традиционной задачи построения маршрута заключается в том, что БПЛА перемещаются не на плоскости, а в пространстве, значит необходимо строить маршрут с учетом всех трех измерений.

Для автоматизации построения маршрутов БПЛА, необходимо моделирование пространства, в котором осуществляется полёт. Местность, на которой будут совершаться полёты будет задаваться при помощи графа: на рассматриваемую географическую область наложим сеть, состоящую из квадратных полигонов с ортогональными ребрами, центр каждого полигона представляет собой узел графа.

Необходимо определить размер ребра полигона, для этого необходимо учесть две особенности проектируемого пространства: оно должно обладать достаточной точностью, чтобы доставка грузов происходила точно по адресу и представляла достаточную детализацию пространство, но при этом позволяла сохранять невысокую вычислительную сложность алгоритма построения маршрута.

Относительно малая дальность полета БПЛА позволяет выбрать нам достаточно малый размер ребра полигона, в нашем исследовании примем значение равное 10 метрам. Размер вертикальных ребер примем равным 5 метрам, что должно соответствовать и несколько превышать высоту одного этажа административного здания. После отметки в 50 метров от уровня земли, размер ребра увеличим до 20 метров, так как на этой отметке плотность

высотного строительства ниже, это решение позволит снизить вычислительную сложность.

Для построения маршрута БПЛА в заданном пространстве используем алгоритм A*. Алгоритм A*является улучшенной версией алгоритма Дейкстры и нашёл своё применение в играх. A* присваивает вес каждому известному узлу равный весу ребра, ведущего к этому узлу, прибавляя к этому значению приближенное оставшееся расстояние до конца маршрута. Это приближенное значение вычисляется эвристически, и являет собой минимальное возможное расстояние от этого узла до конца маршрута. Такая операция позволяет отказываться от более длинных маршрутов, как только начальный маршрут найден. Если существует маршрут длиной x, и минимальная дистанция между рассматриваемым узлом и финишем больше x, данный узел отбрасывается.

Заключение

Применяя два описанных подхода для составления маршрутов комплекса грузовик-БПЛА, а также алгоритма A* для построения маршрута БПЛА в заданном пространстве, мы можем разработать масштабирую автоматизированную систему для логистических центров. Такие комплексы, состоящие из грузовиков и БПЛА способны значительно сократить время доставки грузов локальным потребителям, а также снизить нагрузку на транспортную инфраструктуру городов.

Литература

1. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery, Transportation Research Part C: / C. C. Murray, A. G. Chu // Emerging Technologies – 2015 – iss. 54.

2. Same-day delivery with heterogeneous fleets of drones and vehicles / M. W. Ulmer, B. W. Thomas, // Networks 72 – 2018.

3. Route optimization method for unmanned air vehicle launched from a carrier / H. Savuran, M. Karakaya, // Lecture Notes on Software Engineering 3 – 2015.

4. Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm / S. M. Ferrandez, T. Harbison, T. Weber, R. Sturges, R. Rich, // Journal of Industrial Engineering and Management– 2016.

5. Optimal delivery routing with wider drone delivery areas along a shorter truck-route / Y. S. Chang, H. J. Lee, // Expert Systems with Applications – 2018.

6. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (uavs) or aerial drones/ A. Otto, N. Agatz, J. Campbell, B. Golden, E. Pesch, // Networks 72 – 2018.