

УДК 656.13: 681.3

UDC 656.13: 681.3

**МОДЕЛЬ УЧАСТКА ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ
С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ**

**MODEL OF LAND TRANSPORT NETWORK IN
A VIEW OF UNCERTAINTY OF TIME
TRAFFIC**

Черкасов Олег Николаевич
д.т.н., главный специалист
*Закрытое акционерное общество «Лот»,
Воронеж, Россия*

Cherkasov Oleg Nikolaevich
Dr.Sci.Tech., chief specialist
Closed Joint Stock Company 'Lot', Voronezh, Russia

Аникеев Евгений Александрович
к.т.н., доцент кафедры вычислительной техники и
информационных систем
*Воронежская государственная лесотехническая
академия, Воронеж, Россия*

Anikeev Evgeniy Aleksandrovich
Cand.Tech.Sci., associate professor of Department of
Computer Science and Information Systems
*Voronezh State Academy of Forestry Engineering,
Voronezh, Russia*

В статье рассмотрена модель участка транспортной сети, учитывающая вероятностные характеристики времени движения транспортного средства, а именно возможные задержки при транспортировке, под погрузкой или разгрузкой. Приведен критерий оптимальности маршрута по величине дохода от перевозки

The article describes a model section of the transport network, taking into account the probabilistic characteristics of the time the vehicle, namely a possible delay in transportation, a loading or unloading. The optimality criterion for route with the largest revenue from transportation is shown

Ключевые слова: МОДЕЛЬ, АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ, ОПТИМАЛЬНЫЙ МАРШРУТ, НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ

Keywords: MODEL, ROAD TRANSPORT, OPTIMAL ROUTE, AN UNCERTAINTY TIME MOVEMENT

Одним из основных требований к перевозчику является соблюдение сроков доставки грузов. Важным фактором, влияющим на прибыльность перевозок, является степень использования каждого транспортного средства. Чем больше поездок планируется для каждого из автомобилей, тем труднее становится соблюдать сроки доставки. Это вызвано, во-первых, неопределённостью времени поездки и, во-вторых, неопределённостью времени нахождения автомобиля у клиента, включающего в себя ожидание в очереди, погрузка/разгрузка, оформление документов и т.д. При увеличении числа рейсов, назначаемых какому-либо автомобилю, задержки обоих типов накапливаются, что приводит к увеличению вероятности опоздания в последних рейсах.

Таким образом, неопределенность времени поездки может быть вызвана как действиями перевозчика, так и клиента. Ритмичность

грузоперевозок может обеспечиваться материальной заинтересованностью участников перевозочного процесса. Было бы целесообразным устанавливать размер оплаты услуг перевозчика зависящим от времени доставки (т.е. в зависимости от времени опоздания уменьшать уровень оплаты), а также штрафовать на определённую сумму клиентов, допустивших задержку транспорта. Это позволило бы подходить с единых позиций к прибыльности перевозок и к соблюдению их сроков. Главным критерием оценки качества плана будем считать прибыль перевозчика за вычетом штрафов за опоздания.

Вопросы управления автотранспортными перевозками рассматривались в работах [1, 2, 4]. Однако здесь не учитывались вероятностные характеристики времени движения автотранспорта. Большинство известных моделей транспортной сети и алгоритмов планирования грузоперевозок используют для оценки эффективности плана перевозок средние значения времён транспортировки и обслуживания клиентов. В таких условиях оценка эффективности плана состоит из суммирования значений функций оплаты от расчетного времени прибытия автомобиля. Рассмотрение же вероятностных характеристик времени транспортировки и обслуживания делает невозможным использование такого способа оценки.

В ряде работ [5, 6] для решения подобной задачи предлагается использовать прибыль перевозчика, но рассматривать только те планы, вероятность успешного выполнения которых больше некоторой величины (например, 90%). Однако, такой подход не очень удачен для систем ситуационного управления: когда из-за непредвиденных ситуаций своевременное обслуживание всех заявок невозможно, критерий оценки должен позволять выбирать план, ведущий к минимизации ущерба.

В статье предложена модель участка транспортной сети, являющаяся основой для алгоритма поиска маршрута автотранспорта при

неопределённости времени движения. Она обеспечивает адекватное представление структуры дорожной сети и вероятностные характеристики времени движения.

Пусть $T = \{T_i\}_{i=1...N_T}$ – множество отрезков времени, на которые разбиты сутки; N_T – количество отрезков. Время модели транспортной сети поделено на дискретные отрезки, так как на практике используются именно интервалы времени. Длину интервалов для почасового планирования можно принять равной 5 мин. Введём множество временных слоёв $L = \{L_i\}_{i=1...N_L}$, где N_L – количество временных слоёв. Также введём множество типов транспортных средств $TTS = \{TTS_i\}_{i=1...N_{TTS}}$, где N_{TTS} – количество типов. Тогда описание дуги между i -й и j -й вершинами модели можно представить в виде кортежа

$$E_{ij} = \langle d_{ij}, f_{ij}(T, L), S_{ij}(TTS), C_{ij}(L, TTS), O_{ij} \rangle,$$

где d_{ij} – длина моделируемого участка транспортной сети; $f_{ij}(T, L) \rightarrow [0, 1]$ – закон распределения времени прохождения участка ТС эталонного типа, для каждого временного слоя; $S_{ij}: TTS \rightarrow (0, +\infty)$ – коэффициент замедления для каждого типа ТС; $C_{ij}(L, TTS)$ – ограничения на прохождения ТС; O_{ij} – описание физического размещения моделируемого участка дорожной сети.

Рассмотрим параметры, описывающие путь между двумя точками для некоторого транспортного средства типа TTS_k . Отдельный участок транспортной сети, который входит в путь, описывается кортежем E_{ij} . В тоже время, весь путь является последовательностью таких участков. Следовательно, характеристики NW маршрута W от вершины v_0 до вершины v_{N_w} для транспортного средства TTS_k в течение временного слоя L_q следующим кортежем:

$$HW(v_0, v_{N_w}, TTS_k, L_q) = \langle d_w, m_w, \sigma_w^2, C_w, O_w \rangle,$$

где d_w – длина маршрута; C_w – ограничения, которым должно удовлетворять транспортное средство для прохождения по маршруту; O_w – описание маршрута, предназначенное для генерации понятных водителю текстовых описаний.

Длина маршрута d_w является суммой длин всех участков, его составляющих:

$$d_w = \sum_{i=0}^{N_w-1} d_{v_i, v_{i+1}}.$$

Для расчёта математического ожидания m_w и стандартного отклонения σ_w^2 прохождения маршрута используются формулы:

$$m_w = \sum_{i=1}^{N_w} S_{v_{i-1}, v_i}(TTS_k) \cdot m_{v_{i-1}, v_i},$$

$$\sigma_w^2 = \sum_{i=1}^{N_w} S_{v_{i-1}, v_i}^2(TTS_k) \sigma_{v_{i-1}, v_i}^2.$$

Ограничения C_w на транспортное средство для прохождения маршрута должны быть наиболее свободными при условии, что удовлетворяющий им автомобиль может пройти каждый участок маршрута:

$$\tilde{N}_w = \langle CT_w, CH_w, CPM_w, CMO_w \rangle,$$

где $CT_w \in \{0,1\}$ – ограничение на время проезда транспортного средства; $CH_w \in [0, \infty)$ – ограничение на высоту транспортного средства; $CPM_w \in (0, \infty)$ – ограничение на полную массу; $CMO_w \in (0, \infty)$ – ограничение нагрузки на ось.

Величина $CT_w \in \{0,1\}$ описывает разрешение проезда транспортному средству типа TTS_k по маршруту W в течение временного слоя L_q . Значение 0 – запрет проезда, 1 – разрешение. Зависимость от L_q введена ввиду запрета на проезд для некоторых типов грузовых ТС в ночное время.

Эта величина вычисляется по формуле:

$$CT_w = \prod_{i=0}^{N_w-1} CT_{v_i, v_{i+1}}.$$

Остальные ограничения вычисляются по формулам:

$$CH_w = \min_{i=0..N_w-1} \{CH_{v_i, v_{i+1}}\},$$

$$CPM_w = \min_{i=0..N_w-1} \{CPM_{v_i, v_{i+1}}\},$$

$$CMO_w = \min_{i=0..N_w-1} \{CMO_{v_i, v_{i+1}}\}.$$

Ограничение на скорость не входит в характеристики маршрута, так как на разных его участках может поддерживаться разная скорость.

Ограничения на прохождение ТС по моделируемым участкам транспортной сети представим в виде кортежа:

$$C_{ij}(TTS, L) = \langle CV_{ij}, CT_{ij}(TTS, L), CH_{ij}, CPM_{ij}, CMO_{ij} \rangle,$$

где $CV_{ij} \in [0, \infty]$ – ограничение на скорость транспортного средства;

$CT_{ij}(TTS, L) \rightarrow \{0, 1\}$ – ограничение на тип ТС на каждом участке маршрута W на определённом временном слое L_q ;

$CH_{ij} \in [0, \infty)$ – ограничение на высоту ТС;

$CPM_{ij} \in [0, \infty)$ – ограничение на массу ТС;

$CMO_{ij} \in [0, \infty)$ – ограничение нагрузки на ось ТС.

Возможно введение дополнительных видов ограничений.

Зададим полную модель дорожной сети:

$$RN = \langle T, TTS, L, V, E, V_{in}, V_{out} \rangle.$$

В ней множества T , TTS и L определены выше; $V = \{V_i\}_{i=1..N_V}$ – множество вершин дорожной сети; N_V – количество вершин; $V_{in} \subset V$ и $V_{out} \subset V$ – подмножества «входов» и «выходов» дорожной сети (въезды и выезды в сети города); $E = \{E_{ij} | V_i \in V, V_j \subset V\}$ – множество дуг, представляющих участки дорожной сети.

Отметим, что в данной модели регулируемые перекрёстки, выезды и прочие участки малой длины представляются не вершинами, а дугами, что позволяет упростить алгоритмы, основанные на данной модели.

Для применения предложенной модели обосновано вычисление математического ожидания времени прохождения автомобилем дуги E_{v_{i-1}, v_i} маршрута W и квадрата стандартного отклонения той же величины.

Решение задачи построения критерия оценки плана перевозок в условиях неопределённости проводилось на основе работ [1, 6]. Однако, проведена доработка предложенных решений с целью учёта двух важных факторов: неопределённости времени начала поездки и необходимость ожидания в случае прибытия транспортного средства раньше назначенного срока и связанные с этим расходы.

Пусть автомобиль следует некоторым путём W к клиенту. Время начала поездки t_s – дискретная случайная величина с распределением вероятности $p_s(t_s)$, длительность поездки τ – также дискретная случайная величина с распределением вероятности, заданным функцией $p_\tau(\tau)$. Длину пути обозначим как d . Функция оплаты услуг перевозчика клиентом в зависимости от времени t прибытия груза – $q_t(t)$.

Она отражает тот факт, что в случае досрочного прибытия груза у клиента возникнут дополнительные трудности – например, затраты, на организацию разгрузки, временное складирование, и т.д.

Поэтому в случае слишком раннего приезда автомобиль может просто подождать, не разгружаясь. Время, ранее которого не следует начинать разгрузку, обозначим t_{\min} , а время поездки вместе с временем ожидания – $\Delta\tau$.

Затраты на доставку груза (себестоимость перевозки) обозначим как q_τ . Принято разделять эти затраты на зависящие от пробега и времени части:

$$q_{\tau} = -(c_d \cdot d + c_{\tau} \cdot \Delta\tau)$$

где c_d – себестоимость одного километра пробега, c_{τ} – себестоимость единицы времени работы транспортного средства. Знак «минус» показывает, что эти расходы несёт перевозчик, т.е. они вычитаются из суммы, получаемой перевозчиком.

Время доставки $\Delta\tau$ включает в себя и время ожидания начала разгрузки. Отметим, что время обслуживания транспортного средства клиентом, также оплачиваемое по тарифу c_{τ} за единицу времени, правильнее включить в функцию штрафа в зависимости от времени обслуживания. Это позволит стимулировать клиента к оптимизации процесса погрузки/разгрузки путём предоставления детальной информации о компонентах, составляющих стоимость работ.

Итак, если не учитывать возможность досрочного прибытия автомобиля, то время начала обслуживания $t_s + \Delta\tau$ будет равным t , т.е. $\Delta\tau = t - t_s$. С учётом возможного ожидания,

$$\Delta\tau = \begin{cases} \tau, & \text{иначе } t_s + \tau \geq t_{\min} \\ t_{\min} - t, & \text{иначе } t_s + \tau < t_{\min} \end{cases},$$

или, компактнее,

$$\Delta\tau = (t_{\min} - t_s) + \max\{0, t_s + \tau - t_{\min}\}$$

Доход q от обслуживания клиента может быть вычислен следующим образом:

$$q(d, t_{\min}, t_s, \tau) = q_t(t_s + \Delta\tau) + q_{\tau}(d, \Delta\tau)$$

Соответственно,

$$S_N = N \sum_{\hat{t}_s \in \text{dom}(t_s)} p_s(\hat{t}_s) \sum_{\hat{\tau} \in \text{dom}(\tau)} p_{\tau}(\hat{\tau}) \cdot q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}),$$

где $\text{dom}(t_s)$, $\text{dom}(\tau)$ – множество значений, принимаемых дискретными переменными t_s и τ .

Смысл этого критерия – суммарная прибыль, полученная от N экспериментов (поездки) в одинаковых условиях. Это выражение получено, исходя из следующих соображений. Доход, равный $q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau})$ получают (при фиксированном маршруте, к фиксированному клиенту) те из N автомобилей, которые начинают поездку в момент времени \hat{t}_s и находятся в пути в течение $\hat{\tau}$ временных интервалов. Эти события являются независимыми, поэтому из N экспериментов (поездки) сразу двум этим условиям будут удовлетворять $N \cdot p_s(\hat{t}_s) \cdot p_\tau(\hat{\tau})$ автомобилей (строго говоря, стремиться к этой величине при $N \rightarrow \infty$). Доход от такого количества автомобилей будет равен $N \cdot p_s(\hat{t}_s) \cdot p_\tau(\hat{\tau}) \cdot q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau})$, а суммирование по всем возможным значениям t_s и τ даст формулу для критерия суммарной прибыли.

Полученное значение S_N , при некотором фиксированном N , можно использовать в качестве критерия «прибыльности» маршрута и для выбора между двумя альтернативными маршрутами можно принять следующее правило: $w_1 \underset{S_N}{\mathbf{f}} w_2 \Leftrightarrow S_N(w_1) > S_N(w_2)$.

К недостаткам такого критерия следует отнести невозможность определить степень рискованности маршрута. Например, пусть в 2-х случаях из 3-х следование по маршруту даёт 10 т.р. прибыли, а в оставшемся – 15 т.р. убытка, тогда $S_3(W) = 5$. Такая степень риска может быть недопустимой и разумнее выбрать маршрут W' с $S_3(W') = 3$, но дающий стабильную прибыль в 1 т.р. в каждом случае. Для решения этой проблемы введём критерии S_N^+ и S_N^- дохода от перевозки груза по заданному маршруту [3], которые вычисляются в соответствии с выражениями:

$$S_N^+ = N \sum_{\hat{t}_s \in \text{dom}(t_s)} p_s(\hat{t}_s) \sum_{\hat{\tau} \in \text{dom}(\tau)} p_\tau(\hat{\tau}) q^+(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau});$$

$$S_N^- = N \sum_{\hat{t}_s \in \text{dom}(t_s)} p_s(\hat{t}_s) \sum_{\hat{\tau} \in \text{dom}(\tau)} p_\tau(\hat{\tau}) q^-(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}),$$

где

$$q^+(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) = \begin{cases} 0, & \text{if } q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) < 0; \\ q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}), & \text{if } q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) \geq 0 \end{cases};$$

$$q^-(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) = \begin{cases} 0, & \text{if } q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) > 0; \\ q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}), & \text{if } q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) \leq 0 \end{cases}.$$

Каждый маршрут характеризуется значениями S_N^+ и S_N^- , первое из которых тем больше, чем большая прибыль ожидается при следовании по маршруту W , а второй тем больше, чем возможен больший убыток. Для выбора из множества маршрутов можно строить множество Парето-оптимальных решений. Критерии оценки маршрута S_N^+ и S_N^- позволяют выбрать лучший маршрут из нескольких уже найденных.

Требования к памяти при расчёте по приведённым выше формулам крайне малы, а время расчётов, пропорциональное $\text{dom}(t_s)$ и $\text{dom}(\tau)$, также невелико на современных ЭВМ. Поэтому для решения данной задачи приведённый подход и более рационален, чем, например, способ на основе метода Монте-Карло.

Задача поиска оптимальных по S_N^+ и S_N^- маршрутов сводится к задаче поиска маршрутов, оптимальных по характеристикам $HW = \langle d_w, m_w, \sigma_w^2, C_w, Q_w \rangle$ и исключению неоптимальных.

На основании приведенной выше модели транспортной сети необходимо разработать алгоритм поиска оптимального маршрута. Характеристики времени движения транспортных средств по

транспортной сети имеют вероятностный характер. Поэтому при поиске оптимального маршрута использование мультиагентного алгоритма является более эффективным, чем детерминированного.

Мультиагентный алгоритм поиска оптимального маршрута в транспортной сети позволит водителю выбрать экономичный маршрут от начала движения до места назначения. Кроме того, рассматриваемый алгоритм позволяет предоставить водителю и диспетчеру грузоперевозок данные о характеристиках оптимальных маршрутов между произвольными точками для планирования перевозок.

Представленная модель была внедрена на ряде транспортных предприятий г. Воронежа, что способствовало повышению эффективности их работы. Кроме того она была внедрена в учебный процесс Воронежской государственной лесотехнической академии по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» и «Основы безопасности движения»

Литература

1. Вельможин А.В., Гудков В.А., Миротин Л.Б. Технология организации и управление грузовыми автомобильными перевозками: учеб. для вузов; Волгоград: Волгоградский гос. техн. ун-т. 1999. 296 с.
2. Горев А.Э. Грузовые автомобильные перевозки./ А.Э. Горев.–М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 288 с.
3. Затворницкий А.П. Оценка надёжности и экономической эффективности плана перевозок в условиях возможных задержек и наличия штрафных санкций за опоздание / А.П. Затворницкий // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления: межвуз. сб. научн. тр. / Воронеж. гос. лесотех. акад. – Воронеж, 2006. – Вып. 11. – С. 174-178
4. Луканан В.Н., Буслаев А.П. Автотранспортные потоки и окружающая среда; М.: ИНФА, 2001. 646 с.
5. Черкасов О.Н., Анিকেев Е.А. Системы MRP/ERP, CSRP; проблемы их применения и развития в решении задач управления автотранспортными предприятиями // Приводная техника. 2006. №6(64) С. 38–43.
6. Jula, H. Dessouky, M. Ioannou, P.A.; Truck route planning in nonstationary stochastic networks with time windows at customer locations/IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, vol.7, pp. 51-62.