

SMART LOGISTICS: МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СБОРНЫМИ ГРУЗАМИ ДЛЯ ВНУТРИРЕГИОНАЛЬНЫХ РАЗВОЗОК

П.О. Скобелев¹, А.Н. Лада², Д.С. Рыбак², И.А. Пустовой², Д.Г. Пейсахович²

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70
petr.skobelev@gmail.com

ООО «НПК «Разумные решения»
443013, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201
тел./факс: +7 (846) 279-37-78
lada@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: логистика, внутрирегиональные грузоперевозки, маршрут, адаптивное планирование, мультиагентные технологии

Abstract

The article describes main functionalities and developing principles of intellectual management system for consolidated cargoes within intra-regional deliveries. The application of adaptive scheduling mechanism for flexible solving the logistic problems is considered.

Введение

Проблема повышения эффективности внутрирегиональных грузовых перевозок является актуальной и значимой. Объемы расходов на логистические процессы в целом в структуре цены товара (включая процессы распределения, складирования, дистрибуции и др.) могут достигать до 40-45 %, при этом сама транспортировка составляет до 30% себестоимости производства продукции.

В этих условиях становится актуальной и значимой задача оптимизации издержек, связанных с логистическими процессами и, в первую очередь, внутрирегиональными транспортными перевозками. Согласно пресс-релизу международной консалтинговой компании *KMPG* [1], внедрение системы планирования на всех уровнях организации является одной из основных инициатив по сокращению издержек для компаний дорожной инфраструктуры, которые могут позволить улучшить показатели операционной эффективности и повысить конкурентоспособность организаций.

Решение столь сложной задачи требует применения развитых средств автоматизации управления, а также современных математических моделей, методов и алгоритмов решения сложных задач планирования и оптимизации мобильных ресурсов в реальном времени. При этом большинство существующих на рынке программных решений ориентированы на пакетную обработку, то есть подразумевают наличие полной и окончательной информации о заказах и ресурсах. В частности, автоматические планировщики, предлагаемые такими известными компаниями, как *SAP*, *Manugistics* (недавно приобретена компанией *JDA*), *i2*, *ILOG*, *Paradox*, *Antipor*, *IC* и ряд других, как правило, по-прежнему реализуют различные методы *Constraint programming* («программирования в ограничениях») и другие комбинаторные переборные методы, например, метод ветвей и границ [2, 3]. Но на практике всегда происходит множество непредвиденных событий, меняющих ситуацию: приходят срочные, а потому выгодные заказы, образуются пробки на дорогах, влекущие непредвиденные задержки, происходят поломки транспортных средств и т.д. При этом расчет оптимального плана для крупной транспортной компании в одном из имеющихся пакетов программ занимает 8-10 часов (при-

мерно для 300 грузовиков и 600 точек развозки в день), за это время, как отмечено выше, ситуация может существенно измениться, что потребует начать планирование заново. В то же время средства для планирования в реальном времени остаются весьма примитивными (например, только в открытые слоты времени), возможность гибкой адаптации на основе происходящих событий связывается преимущественно с возможностью ручной корректировки планов.

Один из новых подходов к решению сложных задач в настоящее время связывается с применением мультиагентных технологий, по своей значимости не уступающими био- и нанотехнологиям [4, 5]. Решение сложных задач планирования в этой технологии достигается за счет распределенного подхода (*Distributed Problem Solving*) на основе моделей, методов и алгоритмов самоорганизации агентов заказов и ресурсов [6].

По результатам расчетов, выполненных в кооперации с учеными Санкт-Петербургского университета [7], ожидается, что переход к принятию решений в реальном времени позволит транспортным предприятиям действовать на 25-40% эффективнее, а также избежать рисков «затарки», простоя или дефицита транспортных средств, снизить холостой пробег и ущерб для экологии. Возможность принятия решений в реальном времени особенно необходима в ситуации, когда от самого момента времени принятия решения зависит качество сервиса и экономическая эффективность транспортной услуги.

Таким образом, задача планирования и оптимизации внутрирегиональных транспортных перевозок в сложных цепочках поставок является чрезвычайно актуальной и значимой.

1 Мультиагентный подход к решению задачи управления сборными грузовыми перевозками

В статье [8] рассматривается развитие системы управления сборными грузовыми перевозками, которая позволяет решить проблему адаптивного перестроения расписания. По сравнению с предыдущей версией системы грузоперевозок, которая оперировала исключительно перевозками *FTL* (*Full Truck Load*) [9, 10], данная система предоставляет возможность планирования перевозок *LTL* (*Less Than Truckload*), что приводит к значительному увеличению прибыли от выполнения грузоперевозок [11].

1.1 Описание объектной модели системы управления грузоперевозками

Для описания предметной области системы были использованы следующие ключевые сущности: Заказ, Требование, Состояние, Груз и Ресурс. На рисунке 1 представлена диаграмма классов.

Заявка (*Order*) является ключевой сущностью системы и описывает введенный пользователем заказ на перевозку грузов. В заявке определена стратегия перевозки (конкретный способ выполнения данного заказа), а также ряд важных полей, необходимых для корректного планирования заявки (например, «стоимость перевозки»). Заявка содержит список Грузов (*Cargo*), которые вводятся пользователем. Эти грузы будут перевезены в рамках данной заявки. Далее в заявку вводится список Требований (*Requirement*). Требования предназначены для указания системе планирования, какие действия с грузом необходимо выполнить (например, погрузка, разгрузка или стоянка). Требование может включать список предпочитаемых ресурсов. В этом случае оно может быть запланировано только с использованием указанных ресурсов. После планирования заявки система планирования выдает результат в виде списка Состояний (*State*), которые содержат данные о местоположении ресурсов и размещении грузов (*CargoPart*) в определенный момент времени (отметка на временной шкале).

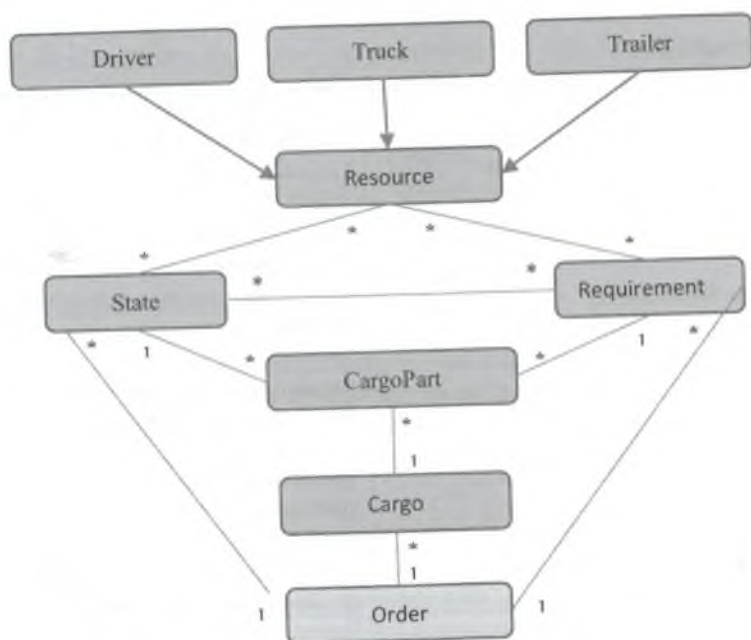


Рисунок 1 – Диаграмма классов объектной модели

1.2 Виды агентов, используемых в системе управления грузоперевозками

В системе используются агенты 8 видов, которые представлены в таблице 1, каждый из них имеет отношение к одному из 2 типов в соответствии с функциональным назначением: агент потребности (*Demand*) или агент возможности (*Resource*) [12]. Основные типы сообщений, которыми обмениваются агенты при переговорах, представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Типы агентов

Вид агента	Назначение
Требование погрузки (<i>D</i>)	Обеспечить погрузку в заданном интервале времени и в заданной локации.
Требование разгрузки (<i>D</i>)	Обеспечить разгрузку в заданном интервале времени и в заданной локации.
Требование стоянки (<i>D</i>)	Обеспечить стоянку ресурса, либо выполнение каких-либо работ с его использованием, в течение заданного интервала времени.
Требование техобслуживания (<i>D</i>)	Обеспечить техобслуживание ресурса в заданный промежуток времени (не связано с конкретной заявкой).
Заявка (<i>D</i>)	Отслеживать получаемую прибыль и, в случае неудовлетворённости, инициировать поиск других вариантов.
Сервисный (<i>R</i>)	Обеспечить завершение цикла планирования и промежуточное сохранение текущих результатов в БД через заданные промежутки времени во время цикла планирования.
Грузовик (<i>R</i>)	Предоставить возможность для перевозки грузов из точки отгрузки в точку назначения.
Трейлер (<i>R</i>)	Отслеживать состав грузов и разрешать конфликты, в случае возникновения.

Таблица 2 – Типы сообщений

Тип сообщений	Агент	Описание сообщения
<i>Перепланирование</i>	<i>Требование</i>	Запрос на перепланирование требования.
<i>Дефрагментация</i>	<i>Требование</i>	Сигнал о необходимости дефрагментации своей части расписания, с учетом заданных параметров.
<i>Обслуживание допустимого сдвига</i>	<i>Требование</i>	В зависимости от содержимого сообщения выполняется одно из действий: сообщение текущего допустимого сдвига требования; уменьшение текущего допустимого сдвига требования в соответствии с параметрами сообщения; увеличение текущего допустимого сдвига требования в соответствии с параметрами сообщения.
<i>Предоставление ресурса</i>	<i>Требование</i>	Запрос на наличие возможности перевозки грузов данным грузовиком.
<i>Вытеснение груза</i>	<i>Треилер</i>	Предписание требованию извлечь перевозимые грузы из трейлера.
<i>Изменение стоимости поездки</i>	<i>Заявка</i>	Оповещение об изменении стоимости поездки, в которой участвует заявка.
<i>Внешние изменения</i>	<i>Сервисный</i>	Сообщение о произведённых пользователем изменениях.

2 Адаптивное планирование сборных грузовых перевозок

В качестве решения задачи управления сборными грузоперевозками предлагается метод адаптивного планирования, разработанный на основе мультиагентного подхода. Процесс решения в общем виде можно разделить на следующие этапы:

- 1) Инициализация;
- 2) Построение первоначального плана;
- 3) Переход к проактивному циклу планирования;
- 4) Цикл проактивного планирования;
- 5) Завершение цикла проактивного планирования.

2.1 Инициализация

На этапе инициализации система загружает все необходимые объекты из базы данных (БД) и создает агентов для каждой сущности из следующего набора:

- 1) Заявка;
- 2) Требование;
- 3) Грузовик;
- 4) Треилер.
- 5) Основная очередь планирования заполняется агентами грузовиков.

2.2 Этап пакетного планирования

Менеджер агентов последовательно передает управление агентам грузовиков из основной очереди. Каждый грузовик, ведя переговоры с агентами заявок, выполняет построение собст-

венного первоначального плана. На данном этапе планирование происходит на уровне поез-
док.

2.3 Переход к проактивному циклу планирования

После завершения построения первоначального плана для каждого грузовика, выполня-
ется подсчет ключевых показателей эффективности (*Key Performance Indicators (KPI)*) и со-
хранение результата в БД. Полученный *KPI* запоминается системой. Основная очередь плани-
рования заполняется агентами заявок, участвующих в сцене.

2.4 Цикл проактивного планирования

Менеджер агентов последовательно выполняет передачу управления агентам из основной
очереди. Агент, получивший управление, из очереди исключается. Во время работы он может
ставить агентов других заявок как в основную, так и в экстренную очередь. Экстренная оче-
редь для менеджера агентов имеет приоритет, он не переходит к основной очереди, пока не
будет обработана экстренная. При этом алгоритм гарантирует целостность расписания, если
экстренная очередь пуста. После завершения обработки очередей данные готовы к записи в
БД.

2.5 Завершение очередного цикла проактивного планирования

При завершении очередного цикла проактивного планирования выполняется повторный
подсчет *KPI* и, в случае его улучшения, производится сохранение результата в БД.

Далее, цикл проактивного планирования повторяется периодически с изменением поряд-
ка следования заявок в очереди. Новый цикл планирования может быть инициирован любым
изменением со стороны пользователя либо прямым перезапуском планировщика.

2.6 Этап пакетного планирования

Пакетный планировщик разработан с целью быстрого построения первоначального плана
консолидированных грузоперевозок. Для планирования используется следующий меха-
низм:

- управление последовательно передается каждому грузовику;
- грузовик собирает информацию о ближайших заявках (локации, временные окна, грузы);
- планирование заключается в последовательном наполнении рейсов;
- каждый рейс начинается с пустого грузовика;
- на каждом шаге оценивается прибыль, которую принесет каждая отдельная заявка, если
будет взята на рейс;
- по завершению оценки на рейс берется наиболее выгодная заявка;
- шаги повторяются до тех пор, пока не будет отсутствовать возможность взять на рейс
очередную заявку;
- после завершения формирования рейса, он накладывается на расписание, и алгоритм пе-
реходит к формированию следующего рейса.

Для оценки прибыльности рейса используется критерий (1).

$$(1) \quad KPI_{tr} = \sum_i pr_i - \sum_i \left(c_{fixed} * t_i^{fixed} + c_{op} * t_i^{op} + c_{transport} * s_i^{transport} + c_{empty} * s_i^{empty} \right) \rightarrow \max$$

где:

- pr_i – прибыль от заявки;
- c_{fixed} – стоимость использования ресурса в час;

- c_{op} – добавочная стоимость использования ресурса в час во время выполнения операций (погрузка, разгрузка, транспортировка);
- $c_{transport}$ – стоимость 1 км пробега с грузом;
- c_{empty} – стоимость 1 км пробега без груза;
- t_i^{fixed} – общее время использования ресурса в часах;
- t_i^{op} – время использования ресурса для выполнения операций;
- $s_i^{transport}$ – длина пробег ресурса с грузом в метрах;
- s_i^{empty} – длина пробега ресурса без груза в метрах.

Количество рассматриваемых вариантов для заявки после каждого шага построения рейса растёт, в то время как количество подходящих заявок падает. Например, на первом шаге для каждой заявки рассматривается 1 опция погрузки и 1 опция разгрузки, на втором – 2 опции погрузки и 4 опции разгрузки (по 2 на каждую опцию погрузки). Таким образом, количество опций для погрузки равно $N+1$, в то время как количество опций для разгрузки составляет $(N+1)*2$, где N – количество заявок, уже присутствующих в рейсе.

2.7 Построение и анализ опций планирования для требования

Процесс планирования каждой заявки на этапе проактивного планирования состоит из последовательного планирования ее требований. Рассмотрим механизм построения опций планирования требования.

Для построения опций планирования используется общий механизм для всех типов требований, который имеет следующие этапы:

- выборка групп ресурсов;
- фильтрация групп ресурсов;
- для каждой группы ресурсов:
 - определение вариантов планирования,
 - фильтрация вариантов планирования (первая стадия фильтрации),
 - построение и анализ опций планирования,
 - фильтрация опций планирования (вторая стадия фильтрации),
- оценка опций планирования.

Анализ опции планирования состоит из следующих этапов:

- построение цепочки операций;
- построение набора требований для дальнейшей проверки на наличие конфликтов;
- анализ каждого требования набора обработчиками конфликтов.

На текущий момент система поддерживает следующие типы конфликтов: по времени, объему, весу, температуре, типу трейлера, совместимости грузов и «неразрешимый» (при обнаружении конфликта данного типа опция далее не рассматривается).

2.8 Обработка конфликтов

В системе существуют 2 обработчика конфликтов:

- по времени;
- по совместимости грузов.

Обработчик конфликтов по времени проводит анализ следующего условия:

$$(2) \quad t_{end} + \delta_{bc} \leq t_{start} + \delta_{stop} + \delta_{ac},$$

где:

t_{end} – время окончания выполнения планируемого требования;

t_{start} – время начала выполнения рассматриваемого требования;

- a – локация, с которой начинается выполнение планируемого требования;
- b – локация, в которой заканчивается выполнение планируемого требования;
- c – локация, с которой начинается выполнение рассматриваемого требования;

δ_{stop} – время, на которое возможно смещение рассматриваемого требования.

Если условие (2) выполнено, существует возможность планирования без конфликта по времени с рассматриваемым требованием.

Для обработки конфликтов по совместимости грузов перед анализом выполняется построение «карты загрузки» для планируемого требования, которая является набором пар «время, индекс загрузки». Индекс загрузки отражает несколько показателей:

- объем грузов;
- вес грузов;
- минимально допустимая температура для набора грузов;
- максимально допустимая температура для набора грузов;
- словарь <груз, количество> для подробного отражения текущей загрузки.

Далее производится анализ для каждого требования, входящего в интервал времени, на который построена «карта загрузки», и оценивается возможность разместиться с грузами в трейлере с учетом всех ограничений. Если размещение невозможно, регистрируется конфликт до ближайшего требования погрузки.

3 Архитектура и функции системы управления сборными грузовыми перевозками

В процессе создания системы управления сборными грузоперевозками была разработана архитектура системы, представленная на рисунке 2. Центральным узлом данной системы является Сервер, через который осуществляются коммуникации и взаимодействия между остальными компонентами системы.

Система состоит из следующих компонент: Веб-портал, Мобильный Веб-портал, Модуль поставщика GPS-данных, Мобильный интерфейс водителя, Модуль поставщика географических данных, Модуль планирования.

Веб-портал представляет собой веб-интерфейс, через который осуществляется ввод заявок, мониторинг ресурсов, просмотр отчетов, ввод фактической информации о расположении ресурсов и этапах выполнения заявок. Мобильный Веб-Портал также предоставляет собой веб-приложение, предназначенное для внесения водителями информации о выполнении некоторых операций.

Модуль планирования является ключевым в данной системе и обеспечивает возможность автоматического планирования заявок, добавленных в систему пользователем. Модуль поддерживает возможность отслеживания внешних изменений в расписании, свойствах ресурсов, ввода новых заявок и т.п.

Мобильный интерфейс водителя – программно-аппаратное решение, позволяющее водителю указывать фактические отметки времени в процессе выполнения заявок, а также просматривать информацию о состоянии автомобиля, показаниях датчиков, дату и место ближайшего технического обслуживания и ряд других параметров. Модуль поставщика географических данных предоставляет информацию о скорости и времени движения по дорогам, которую он получает из внешнего сервиса *CloudMade*. Модуль поставщика *GPS* передает в систему данные о фактическом месторасположении грузовиков, основываясь на данных бортовых устройств *GPS*.



Рисунок 2 – Архитектура системы управления сборными грузовыми перевозками

Заключение

Интеллектуальная мультиагентная система управления внутрирегиональными грузоперевозками *SmartLogistics* позволяет решить поставленные задачи: составление сборок грузов, назначение ресурсов на их доставку, построения близких к оптимальным маршрутов развозки, построения, мониторинга и актуализации плана перевозок и т.д.

В дальнейшем планируется реализация возможности предоставления функциональных возможностей системы по модели «программное обеспечение как услуга» (*SaaS - Software as a Service*). Такой подход сделал бы возможным использование системы небольшими транспортными компаниями, не имеющими возможности покупки полноценного решения, что особенно актуально на рынке внутрирегиональных перевозок.

Кроме этого планируется реализация автоматической корректировки построенного плана с учетом актуальных данных, поступающих от бортовых *GPS/ГЛОНАСС* устройств. Это позволит адаптивно уточнять план развозок, снизить нагрузку на водителей и диспетчеров, и как следствие повысить уровень сервиса для клиентов системы.

Список литературы

- [1] Перспективы развития рынка дорожной инфраструктуры в России. – Режим доступа: <http://www.kpimg.com/RU/ru/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/press-releases/Pages/Prospects-for-the-development-of-the-road-infrastructure-market-in-Russia.aspx> (04.12.2013)
- [2] Leung, J.: Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis. Chapman & Hall, CRC Computer and Information Science Series. – 2004.
- [3] Stefan, V.: Meta-heuristics: The State of the Art, Local Search for Planning and Scheduling. / Nareyek, A. (eds.)// ECAI 2000 Workshop, Germany, August 21, 2000/ Springer-Verlag, Germany. – 2001.
- [4] Wooldridge, M. An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley & Sons. – 2002.

- [5] Bonabeau, E., Theraulaz, G. Swarm Smarts. What computers are learning from them? *Scientific American*. – 2000, 282(3). – P. 54-61.
- [6] Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // *Мехатроника, управление, автоматизация*. – 2011. № 12. – С. 33-46
- [7] Амелина Н., Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени. // *Проблемы управления*. – 2011. №6. – С. 31-37
- [8] Diyazitdinova A., Ivashenko A, Skobelev P., Tsarev A., Martyshkin D., Syusin I. Multi-Agent Platform for Full Truck Load Scheduling // *Interactive Systems and Technologies: The problems of Human-Computer Interaction. Volume III. – Collection of scientific papers. – Ulyanovsk: UISTU, 2009. – P.132–143.*
- [9] Н.О. Амелина, А.Н. Лада, И.В. Майоров, П.О. Скобелев, А.В. Царев. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // *Проблемы управления*. – № 6, 2011. – С. 31-37.
- [10] Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Comparing adaptive and non-adaptive models of cargo transportation in multi-agent system for real time truck scheduling. – *Proceedings of the 4th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA'2012), October 5-7, 2012, Barcelona, Spain. – SciTePress, 2012. –P. 282-285.*
- [11] Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system // *Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013), February 15-18, 2013, Barcelona, Spain. – SciTePress, Portugal, 2013, Vol. 2. – P. 244-249.*
- [12] Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // *Автоматика и Телемеханика*, 2003. №1. – С. 162-169.