УДК 519.854.2

Исследование сведения задачи календарного планирования портовых операций к задаче удовлетворения ограничений

В.А. Киселёв[1], Д.С. Чивилихин[1], А.Г. Топаж[2]
[1]Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики г. Санкт-Петербург;
[2]ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург

Основные задачи оперативного планирования, возникающие в ходе эксплуатационной деятельности порта, можно описать в виде простой модели – есть множество причалов, транспортных судов, бункеровщиков, буксиров, грузового оборудования (например, кранов и насосов), хранилищ грузов и типов грузов. Задано множество операций, которые можно выполнять с портовыми объектами:

- Операции перемещения вида – транспорт S перемещается от причала A к причалу B, используя множество буксиров $b_1, \dots, b_k$, за время T.
- Операции швартовки/отшвартовки – транспорт S швартуется (или отшвартовывается) к причалу A, используя множество буксиров $b, \dots, b_k$, за время T.
- Операции грузообработки – транспорт S на причале A может загружать груз C в из внутреннего хранилища в хранилище R объёмом V в единицу времени, используя заданное множество ресурсов (из заданного перечня оборудования, которое, в общем случае, также способно перемещаться самостоятельно или с помощью буксиров).

Кроме того, каждая операция может иметь «окна погоды» – явно заданные интервалы, в которые её выполнение допустимо по прогнозу погодных условий.

Заданы естественные ограничения, следующие из смысла операций и устройства порта, например – к каждому причалу одновременно не может быть пришвартовано более одного судна; в любой момент времени в каждом хранилище объём определённого груза не отрицателен и не превышает максимальную вместительность; если судно или вспомогательное оборудование задействовано в операции перемещения, то оно не может участвовать в других операциях в данный момент и т. д.

Дано начальное положение всех объектов и наполненность всех хранилищ. У некоторых хранилищ задан требуемый объём груза, как и у части судов задано требуемое состояние на момент окончания интервала планирования.

И основная задача – требуется удовлетворить всем ограничениям и минимизировать момент времени, в который выполнялась последняя операция. Эту задачу и будем называть «задачей оперативного календарного планирования портовых операций».

Отметим, что основная сложность и отличие от обычных задач календарного планирования состоит в том, что в общем случае для каждой операции неизвестно, будет ли она точно задействована в оптимальном решении, а если и будет – то сколько раз. Например, буксировщик развозит суда от причала А к В и самостоятельно возвращается назад – в этом случае операция следования буксира из В в А будет выполнена неоднократно. Так же, судно может пришвартоваться/отшвартоваться к одному причалу несколько раз – например, при необходимости уступить другому судну, подвозящему нужный груз или в случае необходимости прерывания операции грузообработки из-за прекращения «окна погоды».

Более того, можно заметить, что в общем случае сформулированная задача относится к классу NP-hard – достаточно показать, что к ней сводится одна из постановок задачи о коммивояжёре, являющейся NP-complete. Для этого на N причалов введём N типов грузов, у каждого причала можно загрузить только один уникальный тип груза. Есть судно, которое должно загрузить в себя по единице каждого груза, и соответствующие правила перемещения. В итоге, для выполнения условий судно посетит все причалы, и если судно может посетить все причалы, то условия могут быть выполнены. Для задач этого класса не известно полиномиальных решений.

В реальных портах количество техники (транспортных судов, буксиров, бункеровщиков, грузового оборудования), рассматриваемое на ограниченном горизонте планирования (несколько дней) обычно небольшое – редко превышает несколько десятков, количество операций, определенных для судна в среднем так же невелико, поэтому есть смысл представить задачу в виде проблемы удовлетворения ограничений (Constraint satisfaction problem, CSP), и рассчитывать, что существующие решатели (Solvers) смогут найти решение на реальных данных за приемлемое время.

Для решения проблемы с неизвестным заранее числом экземпляров каждой операции в решении был использован следующий подход – весь ресурс времени в границах от нуля (текущий момент перепланирования) до конца горизонта планирования разбивается на равные участки, соответствующие по длительности выбранному элементарному «кванту времени». В его качестве разумно выбрать такую величину, чтобы ей были кратны все характерные времена операций, описанных в задаче. Если при этом количество интервалов будет велико, то можно выбрать его фиксированным в зависимости от требуемой точности и округлять все времена вверх до кратности с интервалом.

С учётом проведённого “квантования” временной оси в качестве набора основных переменных задачи оптимизации принимаются факты того, выполняется ли операция данного типа в данный квант времени. Иными словами, основными переменными оптимизации выступают величины X_{ij}, определяющие, осуществляется или нет экземпляр операции типа i в квант времени j, то есть в интервал времени $t \in [(j-1) * \Delta t; j * \Delta t]$, где

Δt – выбранный квант времени

$i = 1..N$ – все, определенные для данной задачи, типы операций в количестве N штук.

$j = 1..M$ – все M элементарных интервалов времени, на которые разбивается текущий горизонт планирования, равный по длительности $M * \Delta t$.

Переменные X_{ij} естественным образом представляют собой логические величины с двумя возможными значениями – “истина” и “ложь”.

Для наглядности приведём пример подобной постановки:

Порт состоит из трёх причалов. Есть два судна, оба в начале стоит на причале 1, каждое может перемещаться между парой причалов за 1 интервал. Есть два хранилища с текущим объёмом груза 1000, у причала номер 2 суда могут выкачивать из хранилища 1 нефть со скоростью 10 единиц в интервал, а у причала номер 3 – со скоростью 5. Каждое судно должно набрать по 100 единиц нефти и оказаться у причала 1. В таблице 1 показан вид полученного оптимального решения, а именно величины X_{ij} – отмеченные клетки отвечают за истинность.

Отметим, что в данном случае рассматривается именно сведение к задаче удовлетворения ограничениям – непосредственно нахождением решений занимается выбранный внешний решатель (Solver).

Таблица 1 – Одно из оптимальных решений для примера 1

Операция	Интервалы горизонта планирования															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Судно 1 перемещается от причала 1 к причалу 2																
2. Судно 2 перемещается от причала 1 к причалу 3																
3. Судно 1 качает нефть у причала 2																
4. Судно 2 качает нефть у причала 3																
5. Судно 2 перемещается от причала 3 к причалу 2																
6. Судно 1 перемещается от причала 2 к причалу 3																
7. Судно 1 качает нефть у причала 3																
8. Судно 2 качает нефть у причала 2																
9. Судно 1 перемещается от причала 3 к причалу 1																
10. Судно 2 перемещается от причала 2 к причалу 1																

Для ускорения работы решателя могут быть использованы дополнительные ограничения для устранения симметричных или заведомо неэффективных решений. Одним из подобных использовавшихся ограничений было выбрано “Сдвиг в начало”, основная идея которого формулируется следующим образом – в оптимальном решении не должно присутствовать операций, которые можно сдвинуть на один квант к началу без нарушения всех остальных ограничений. Введение такого дополнительного искусственного ограничения позволяет ускорить работу на характерных примерах при больших горизонтах планирования ($M > 50$) более чем в 10 раз.

В настоящее время продолжаются исследования по ускорению быстродействия и поиск более эффективных вариантов сведений.