УДК 514.18

А.Н. Соболь, д.т.н., с.н.с.,
А.В. Панкратов, к.т.н.,
В.В. Комяк

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 2D УПАКОВКИ С ТРАССИРОВКОЙ НА ПРИМЕРЕ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ЭВАКУАЦИИ

Национальный университет гражданской защиты Украины (г. Харьков)
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины (г. Харьков)

Разработан подход к решению задачи 2D упаковки с трассировкой, позволяющий моделировать процесс эвакуации в пределах этажа. Приведены этапы решения данной задачи и построение оптимального плана эвакуации.

Постановка проблемы. При проектировании высотных зданий предусматриваются специальные противопожарные решения, которые должны создать необходимые условия успешной реализации процесса эвакуации. Среди этих решений важное значение имеют структура и размеры путей эвакуации. Поскольку пути эвакуации пронизывают все здание, а их площадь составляет значительную часть его общей площади, то их структура и размеры оказывают значительное влияние на экономические, эстетические и технические показатели проектных решений. В связи с этим, научно обоснованные планы эвакуации должны строиться на основе перечисленных решений, но преобладающим фактором при этом должна оставаться безопасность людей. Следует отметить, что одной из актуальных задач, способствующих решению проблемы обеспечения безопасной эвакуации из высотных зданий, является оптимизационная задача 2D упаковки и трассировки, которая позволяет моделировать процесс эвакуации в пределах этажа.

Анализ основных исследований и публикаций. Компьютерным моделям эвакуации посвящены, например, работы [1,2]. Общая модель и алгоритм оптимизации трассировки в задаче составления рациональных планов эвакуации приведены в работе [3]. В данной работе необходимо разработать подход к решению задачи 2D упаковки и трассировки с целью построения оптимальных планов эвакуации.

Основная часть. Для решения указанной задачи рассмотрим следующие этапы.

1. Распределение помещений (комнат) по этажам. Предполагается, что в доме N этажей, этаж с номером i разбит на L_i блоков B_{il} площадью S_{il}. Задано M_i комнат R_{im} с площадью P_{im} и количеством человек K_{im} в комнате. Необходимо распределить комнаты по блокам таким образом, чтобы:

– сумма площадей комнат, входящих в блок, не превышала площади блока;

– функция цели $\sum_{i=1}^{N}\alpha_i K_i'$ достигала минимума. Здесь $\alpha_i \le \alpha_{i+1}$, $i=1,2,...,N-1$ – некоторые коэффициенты (определяются из экспертных оценок) а K_i' – общее количество человек на i -м этаже.

Математическая постановка задачи может быть представлена в виде:

$$\sum_{i=1}^{N}\alpha_i(\sum_{l=1}^{L_i}\sum_{m=1}^{M_i} b_{ilm}K_{im}) \to \min, \tag{1}$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} b_{ilm}P_{im} \le S_{il},\ i=1,2,...,N,\ l=1,2,...,L_i, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{l=1}^{L_i} b_{ilm}=1,\ m=1,2,...,M_i, \tag{3}$$

$$b_{ilm}\in\{0,1\},\ i=1,2,...,N,\ l=1,2,...,L_i,\ m=1,2,...,M_i. \tag{4}$$

Задача решается как последовательность одномерных задач о ранце. При этом в качестве ранца рассматриваются последовательно блоки B_{il} с площадью S_{il} $i=1,2,...,N$, $l=1,2,...,L_i$, в качестве упаковываемых объектов – комнаты с площадями P_{im}, $m=1,2,...,M_i$, а в качестве веса – количество человек. Каждая из задач о ранце решается методом динамического программирования. «Жадность» метода регулируется штрафами на количество помещений. При этом всегда в случае равенства весов на более ранних этапах решения выбирается вариант с меньшим количеством упакованных объектов.

2. Построение плана эвакуации на этаже. Предполагается, что на каждом этаже заданы выходы и главные коридоры, подразделяющие этаж на блоки. В качестве модели используется планарный граф, вершинам которого соответствуют выходы и пересечения коридоров, а рёбрам – коридоры. Каждому ребру сопоставлен вес – длина соответствующего коридора. Требуется составить план движения по основным коридорам, минимизирующий максимальное время эвакуации.

Задача состоит в определении правил движения для каждого перекрестка, поскольку при эвакуации не допускаются пересечения и разветвления потоков. Математически проблему выбора правил движения через перекрестки можно свести к поиску на графе всевозможных множеств деревьев, содержащих все вершины исходного графа, с корневыми вершинами, соответствующими выходам. При этом некоторые ребра исходного графа могут не принадлежать ни одному из деревьев.

Из очевидных соображений ограничимся в дальнейшем рассмотрением множеств деревьев, для которых переход любой вершины от одного дерева к другому приводит к росту максимальной длины пути на построенных деревьях.

Пусть, к примеру, задан граф, показанный на рис. 1 а), с длиной коридоров, показанных у соответствующих ребер (следует отметить, что данный граф не является моделью прямоугольного помещения с прямыми коридорами). Для данного графа выделено восемь множеств деревьев, показанных на рис. 1 б) – и). Возле каждой вершины показана длина пути.

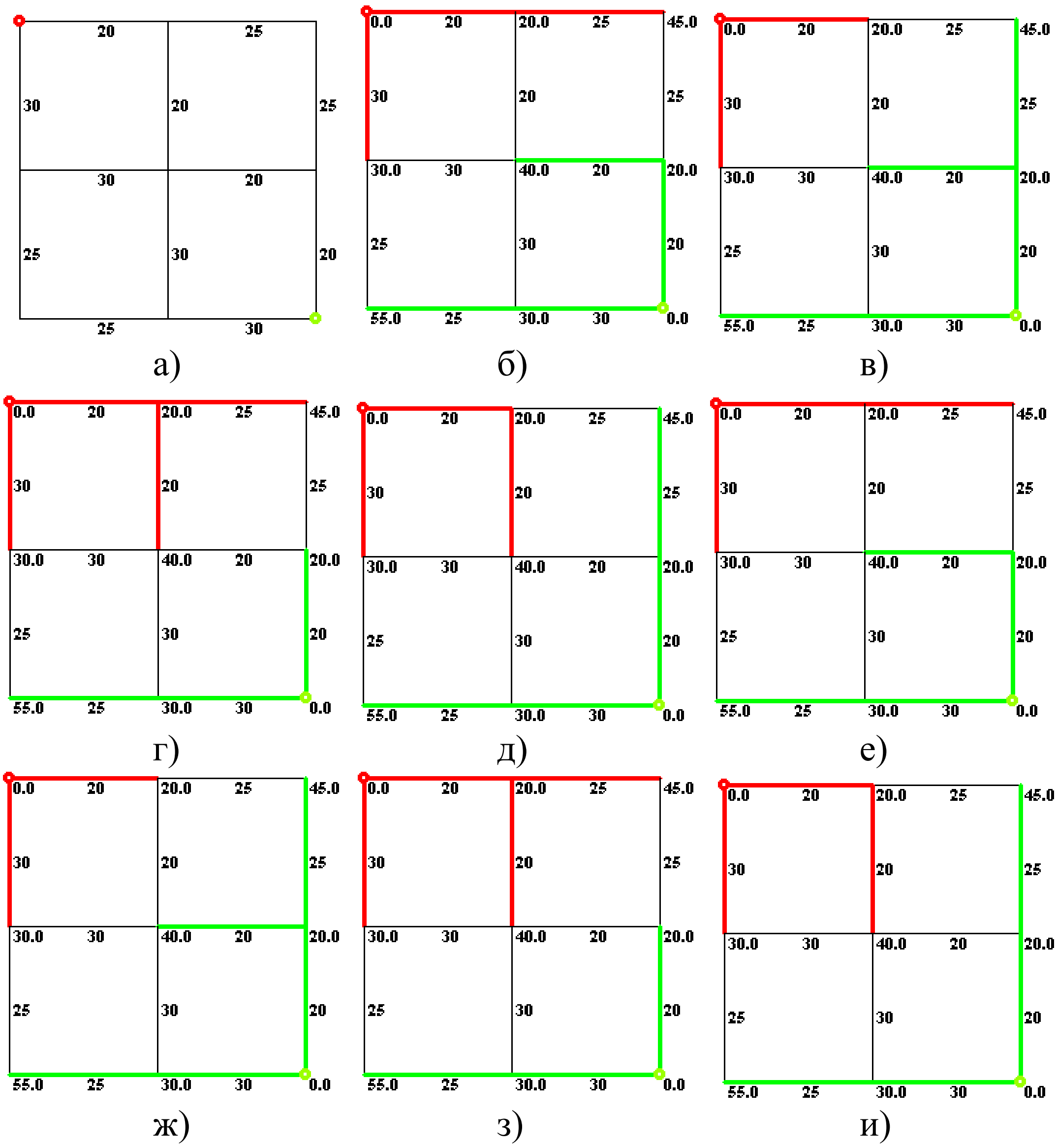

Рис. 1. Граф, соответствующий плану этажа (а) и множества деревьев, выделенных на графе (б)-(и)

После построения множеств деревьев переходим ко второму этапу – определению направления движения по ребрам, не вошедшим ни в одно из деревьев. В общем случае такое ребро разбивается на две части. Как легко убедиться, для данного примера оценки вершин для всех восьми случаев одинаковы, и оптимальный план эвакуации изображен на рис. 2.

При этом два ребра разбиты на части, одно из них «поделено» между разными деревьями, второе – между двумя узлами дерева с корневой вершиной в правом нижнем углу. Максимальная длина пути равна 50 и достигается на ребрах (40+10 и 30+20).

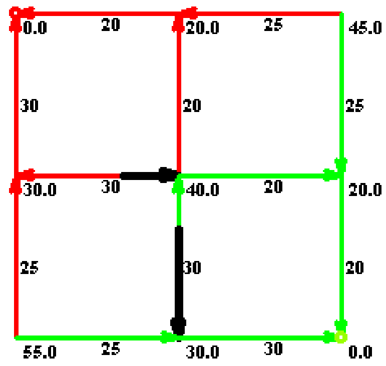

Рис. 2. Оптимальный план эвакуации

3. Определение возможного положения дверей и вспомогательных коридоров. Предполагается, что типы входов в основные коридоры из комнат (как двери, так и вспомогательные коридоры) заданы парой чисел (w_i, ρ_i), $i = 1,...,T$, где w_i – минимально требуемая длина стены основного коридора, необходимая для размещения элемента i-го типа, а ρ_i – нормативная плотность потока, проходящего через элемент типа i в секунду (его пропускная способность). Предполагается, что у элементов с большим w_i больше не только абсолютная, но и относительная пропускная способность по сравнению с элементами, обладающими меньшей минимально требуемой длиной.

В зависимости от условий конкретной задачи предусмотрены разные режимы работы модуля – от «режима жесткой экономии» до «режима наибольшего благоприятствования». В последнем случае предполагается, что коридоры и выходы достаточно широки, чтобы обеспечить прохождение максимально возможного потока, порождаемого дверьми и вспомогательными коридорами.

Режимы экономии обеспечивают снижение потоков в коридорах за счет роста времени на эвакуацию и реализованы на основе «режима наибольшего благоприятствования» с вводом дополнительных ограничений на ширину и/или количество входов в основные коридоры. По этой причине ограничимся рассмотрением «режима наибольшего благоприятствования».

Таким образом, задача состоит в поиске для каждого блока возможных типов и положений дверей и вспомогательных коридоров, обеспечивающих максимально быструю эвакуацию при произвольном количестве находящегося в нем людей. Такая задача в свою очередь сводится к решению ряда задач поиска для каждой из стен типов и положений входов, обеспечивающих максимально быструю эвакуацию.

Пусть длина стены коридора равна d. Задача сводится к решению задачи рюкзака для случая, когда количество предметов каждого типа не ограничено, при этом в рюкзак размера d надо упаковать предметы размеров w_i, $i = 1,...,\mathrm{T}$, максимизировав их суммарный вес (пропускную способность). После решения задачи элементы с большим весом (пропускной способностью) размещаются в коридорах обратно пропорционально времени эвакуации, рассчитанной на предыдущем этапе.

Следует отметить, что на данном этапе определяются возможные, а не реальные положения дверей и вспомогательных коридоров.

4. Планировка расположения комнат. Пусть на этаже L_i блоков B_{il}. Каждому B_{il}, в результате решения задачи (1)-(4), сопоставлены комнаты R_{im}, $m = 1,2,...,M_i$, с количеством человек K_{im}, а также возможные положения входов v_{il}, $l = 1,2,...,L_i$ с пропускной способностью ρ_{il} и расчетным временем движения до выхода t_{il}. Модель расположения комнат можно записать в виде:

$$t \to \min, \tag{5}$$

$$t \geq t_{il} \cdot \mathrm{sgn}\left(\sum_{m=1}^{M_i} b_{iml}\right) + \sum_{m=1}^{M_i} \frac{b_{iml} K_{im}}{\rho_{il}},\ i = 1,2,...,N,\ l = 1,2,...,L_i, \tag{6}$$

$$\sum_{l=1}^{L_i} b_{iml} = 1,\ i = 1,2,...,N,\ m = 1,2,...,M_i, \tag{7}$$

$b_{iml} \in \{0,1\}$, где sgn – знаковая функция (время движения до входов, которым не сопоставлена ни одна комната, не учитываются).

Данную задачу можно трактовать как одномерную задачу раскроя в специфической постановке: заданы прутки неограниченной длины v_{il}, $i = 1,2,...,N$, $l = 1,2,...,L_i$, одинаковой плотности с разной площадью сечения ρ_{il}, от которых отрезаны куски длиной t_{il}. Необходимо отрезать R_{im}, $i = 1,2,...,N$, $m = 1,2,...,M_i$, кусков массы K_{im} таким образом, чтобы получить при этом минимально возможную длину максимальной из использованных частей прутков.

Решение задачи производится при помощи метода улучшения по группам переменных (последовательно-одиночного размещения) с неполным перебором перестановок в окрестности лучшего на данный момент решения.

После нахождения решения задачи (5)-(7) может быть проведена процедура выравнивания мощности потоков. Для этого определяется вход, порождающий поток с наихудшим временем полной эвакуации $t_{\max}$, и производится уменьшение пропускной способности остальных входов при условии, что время полной эвакуации после снижения пропускной способности для них не превышает $t_{\max}$.

Выводы. В данной работе рассмотрен подход к решению задачи 2D упаковки и трассировки на примере построения оптимального плана эвакуации. Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование движения стационарного потока людей с целью определения максимальной ширины подъездов и максимального времени эвакуации из высотного здания.

Литература

1. Холщевников В.В. Исследование людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре / В.В. Холщевников – М.: Мин-во образования РФ, МВД РФ, МГСУ, МИПБ, 1999. – 92 с.
2. Егоров А.А. Математические модели и алгоритмы эвакуации людей в аварийных ситуаций в учебных заведениях: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Саратовский ГТУ. - Саратов, 2008. - 19 с.
3. Комяк В.М. Математическая модель и алгоритм оптимизации трассировки в задаче составления рациональных планов эвакуации / В.М. Комяк, В.К. Мунтян, А.Н. Соболь, В.В. Комяк // Труды VI Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2013». – М.: РУДН, 2013. – С. 220-225.

ПІДХІД ДО РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ 2D ПАКУВАННЯ З ТРАСУВАННЯМ НА ПРИКЛАДІ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНУ ЕВАКУАЦІЇ

О.М. Соболь, О.В. Панкратов, В.В. Комяк

Розроблено підхід до розв’язання задачі 2D пакування з трасуванням, що дозволяє моделювати процес евакуації в межах поверху. Наведено етапи розв’язання даної задачі та побудову оптимального плану евакуації.

APPROACH TO SOLUTION THE PROBLEM OF 2D PACKING WITH TRACE ON EXAMPLE CONSTRUCTION OPTIMUM PLAN OF EVACUATION

A. Sobol, A. Pankratov, V. Komyak

Approach to solution the problem of 2D packing with trace, which allow modeling process of evacuation on the floor, is given. Phases of solution the problem and construction optimum plan of evacuation are showed.