

УДК [656.61.08:519.1:519.71]

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ИНФРАСТРУКТУР АССОЦИАТИВНЫХ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

© 2010 Л.Ф. Борисова

Мурманский государственный технический университет

Поступила в редакцию 02.11.2010

Рассмотрены возможности повышения безопасности судоходства с помощью использования территориально локализованных мобильных систем управления движением судов (МСУДС) и принципы моделирования информационных инфраструктур, обеспечивающих функциональное объединение различных морских транспортных систем в единую ассоциацию.

Ключевые слова: *морская транспортная система, безопасность судоходства, система управления движением судов, граф кодовых пересечений, конвергенция систем*

В условиях роста интенсивности морского судоходства наблюдается тенденция увеличения числа смертельных случаев от морских аварий, среди которых одним из самых опасных видов являются столкновения судов. Столкновения судов в наибольшей степени свидетельствуют о проблемах, существующих в организации движения. Проблема обеспечения безопасности мореплавания особенно остра для районов с интенсивным судоходством. Для решения данной проблемы, как известно, в настоящее время используются системы управления движением судов (СУДС / VTS – Vessel Traffic Services). СУДС представляет собой сложный комплекс стационарных технических сооружений вблизи береговых служб. К основным недостаткам современных СУДС относятся стационарность размещения (местоположения), «привязка» к береговым службам конкретного района, громоздкость, сложность применяемых процедур управления, которые требуют дорогостоящего специализированного оборудования и развитой инфраструктуры энергоснабжения.

Основные мероприятия по повышению безопасности судоходства в береговых и прибрежных районах, отличающихся повышенной интенсивностью, направлены на совершенствование технической оснащённости СУДС, что делает эти системы еще более дорогостоящими и громоздкими. Использование современных СУДС наиболее эффективно в экономически развитых районах с достаточно мощной транспортной инфраструктурой порта, связанной с

обслуживанием крупнотоннажных судов. Вместе с тем имеется ряд характерных проблем в области судоходства, которые не попадают в сферу деятельности СУДС и создают реальную проблему безопасности: маломерные и спортивные суда – моторные, парусные, гребные, несамоходные и малые рыболовецкие суда, катера, яхты, шлюпки и другие плавсредства, не подконтрольные морскому регистру; удаленные морские и прибрежные районы промысла биоресурсов, спонтанно возникающие в пути, перемещающиеся при изменении местоположения рыбных скоплений и мешающие судоходству на традиционных транспортных путях; районы добычи природных ископаемых в прибрежном шельфе, в которых судоходство характеризуется повышенной степенью экологического риска, и где развертывание стационарных служб СУДС экономически неоправданно или невозможно; средние и мелкие портовые районы с недостаточно развитой производственно-хозяйственной инфраструктурой, не имеющие достаточной мощности для поддержания работоспособности СУДС.

Решение подобных проблем может быть получено с помощью использования территориально локализованных мобильных систем управления движением судов (МСУДС / MVTS – Mobile Vessel Traffic Services, по аналогии с СУДС / VTS). Эти системы не имеют «привязки» к конкретному району базирования, отличаются простотой и быстротой развертывания и прекращения действия, не требовательны к техническим и программным ресурсам и благодаря этому способны обеспечить безопасное мореплавание в любом районе

*Борисова Людмила Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и телекоммуникационных систем. Email: lfborisova@mail.ru*

с интенсивным судоходством, включая удаленные морские акватории [1]. Однако территориальная локальность и функциональная ограниченность не позволяет этим системам заменить собой традиционные СУДС. В основе построения и функционирования МСУД лежат формализованные процедуры представления схем движения судов на подконтрольной акватории с помощью графов кодовых пересечений (ГКП) [2]. ГКП – это регулярные избыточные графы с топологиями ячеистого типа, которые хорошо описываются аналитически с помощью трех структурных параметров. В работе ГКП используются для моделирования и отображения схем движения судов в МСУДС. Для этого необходимо создать программными методами виртуальную сеть полос движения судов (ВСПД) и специальным образом закодировать номера поворотных точек (узлов) в этой сети. ВСПД является информационным образом инфраструктуры МСУДС для решения различных задач управления и обеспечения информационно-технологических процессов. При таком представлении становится возможным применение кодовых методов для реализации базовых функций по обеспечению безопасного судоходства в зоне действия МСУДС. Использование свойств ГКП и современных цифровых технологий позволяет формализовать основные процедуры управления по перемещению судов, сведя их к простейшим операциям над кодовыми комбинациями, которые соответствуют номерам, присвоенным поворотным точкам (узлам) виртуальной сети в ходе ее создания. Например, для определения кратчайшего по числу транзитных узлов пути в системе достаточно знать кодированные номера поворотных точек отправления и назначения. Кратчайший путь определяется в виде его кодированной записи, которая легко читается с использованием специального правила. Кроме того, могут быть определены альтернативные пути любой кратности. При необходимости, например, в случае обнаружения возможности опасного схождения судов, кодированная запись пути может быть оптимально скорректирована в процессе движения судна по маршруту. Вычисленные маршруты всех судов в виде сокращенных кодированных записей хранятся в базе МСУДС и позволяют без труда вести тотальный контроль движения на акватории, предотвращая принципиально опасные сближения судов, находящихся на обслуживании. Таким образом, упрощаются функции, и уменьшается нагрузка оператора (диспетчера) Центра управления МСУДС.

К основным достоинствам МСУДС относятся: простота и экономичность процедур

управления, ориентация на использование доступных стандартных технических средств навигации и телекоммуникации, возможность использования классических сред разработки программных продуктов, нетребовательность к объему памяти ЭВМ, быстрота развертывания и прекращения деятельности, мобильность, маневренность, позволяющая системе без проблем менять местоположение, перемещаясь в пространстве, отсутствие привязки к конкретной местности, нетребовательность к необходимости наземного базирования. Достоинства МСУДС предоставляют возможность для широкого распространения этих систем на практике. Не имея территориальных ограничений, МСУДС могут быть использованы как автономно, в удаленных морских районах, так и в качестве дополнительного средства, расширяющего функциональные возможности стационарных СУДС.

Конвергенция традиционных стационарных и мобильных СУДС в зоне морского порта является перспективным средством получения дополнительных возможностей предоставления новых и традиционных услуг по обеспечению безопасности движения судов и позволяет снизить эксплуатационные затраты путем использования единых ресурсов, таких как средства навигации и телекоммуникации, единые системы эксплуатации, администрации, менеджмента и прочие. Конвергенция стационарных и мобильных СУДС связана с эффективным обеспечением навигационных, телекоммуникационных, информационных и сервисных возможностей систем УДС, которые не зависят от применяемых технологий доступа к средствам связи и навигации. Это не обязательно предполагает физическую конвергенцию и полное слияние систем. В предлагаемой концептуальной модели каждая из систем сохраняет свою автономность и возможность самостоятельно функционировать и определять стратегию своего развития. Конвергенция означает развитие конвергируемых возможностей на основе использования преимуществ обоих типов систем, взаимной компенсации ограничений в их применении и дополнении друг друга доступными услугами для получения максимального эффекта. Использование согласованных и единых стандартов и протоколов может быть использовано для выработки ряда непротиворечивых услуг, предоставляемых судам средствами стационарных и мобильных СУДС. В общем случае схемы движения судов в МСУДС не обязательно в точности соответствуют ГКП. Схеме движения судов может соответствовать любая топология, наилучшим образом учитывающая особенности акватории, и условия эксплуатации системы.

СУДС и МСУДС должны рассматриваться как составная часть единой мультимодальной ассоциативной транспортной системы (МАТС) морского порта [3]. Требования к МАТС могут быть сформулированы в следующем виде: 1) МАТС имеет единое информационное виртуальное бизнес-пространство, обеспечивающее выработку и доставку решений по технологическому взаимодействию различных видов транспорта с учетом требований по безопасности перемещения; 2) МАТС гибко включает в себя произвольное число произвольных транспортных сетей (локальных), имеющих различные топологии, физические среды, виды транспорта, тарифные политики; 3) локальная сеть, входящая в состав МАТС, работает автономно и независимо при транспортировке объектов перемещения в пределах сети; 4) транспортировка объектов перемещения из пункта одной локальной сети в пункт, расположенный в пределах другой локальной сети, обеспечивается по кратчайшему по числу транзитных пунктов пути транзитом через любые другие локальные сети, входящие в состав МАТС.

Теоретические принципы решения данной задачи сводятся к общей топологической задаче формирования единой ВСПД, являющейся информационным образом ассоциативной морской транспортной системы. Дальнейшая детализация функций и учет технологических особенностей функционирования позволят моделировать различные ассоциации транспортных систем для конкретных применений. Обобщенную аналитическую формулировку задачи объединения разнородных транспортных систем и ее решение получаем с использованием введенного понятия виртуальной сети и математического аппарата теории графов кодовых пересечений. Для этого отобразим топологии локальных ВСПД с помощью графов. В общем случае эти графы являются произвольными. Формирование единого информационного виртуального бизнес-пространства заключается в построении единого связного надграфа, изоморфного заданным исходным произвольным графам, который является порожденным подграфом ГКП (ПП ГКП), и присвоении вершинам исходных графов кодированных номеров из кодового пространства номеров ПП ГКП.

Пусть  $T$  автономных сетей с произвольными топологиями представлены в виде  $T$  ориентированных графов  $G(X_t, Y_t)$ , имеющих множества вершин  $X_t$ , мощностями  $|X_t|=p_t$ , и множества дуг  $Y_t$  мощностями  $|Y_t|$ ,  $t=\overline{1, T}$ , и не имеющих истоков и стоков. Тогда задачу по-

строения топологической модели ассоциативной сети формулируем следующим образом.

**Задача построения единой сети.** Построить для  $T$  ориентированных графов  $G(X_t, Y_t)$ ,  $t=\overline{1, T}$ , связный изоморфный надграф  $G(A, V)$  с множеством вершин  $A \sim \bigcup_{t=1}^T X_t$  и множеством дуг  $V \supseteq \bigcup_{t=1}^T Y_t$ , являющийся порожденным подграфом ГКП  $(n, k, r)$  с параметрами  $n$  – длиной кодовой комбинации номера вершины,  $k$  – основанием кода,  $r$  – мощностью пересечения кодовых комбинации номеров вершин, т.е.

$$\bigcup_{t=1}^T G(X_t, Y_t) \cup \bar{V} \sim G(A, V) \subseteq \text{ГКП}(n, k, r),$$

где  $\bar{V} = V \setminus \bigcup_{t=1}^T Y_t$  – есть дополнение, которое представляет собой множество дуг, соединяющих вершины непересекающихся графов. Множество  $\bar{V}$  может быть пустым. Элементы множества  $\bar{V}$  называются мостами.

Алгоритм решения поставленной задачи включает следующую последовательность процедур: 1. Построение блочно-диагональных матриц БДМ  $G(X_t, Y_t)$ ,  $t=\overline{1, T}$ . 2. Построение матриц пересечений номеров вершин МПН  $G(X_t, Y_t)$ ,  $t=\overline{1, T}$ . 3. Построение объединенной матрицы пересечений номеров вершин МПН  $G(A, V)$ . 4. Выбор процедуры нумерования вершин графов – совмещенное или раздельное нумерование. 5. Определение параметров  $n$ , и  $r$  при заданном значении параметра  $k$  порожденного подграфа  $\text{ГКП}(n, k, r)$ . 6. Кодирование вершин произвольных графов. В ходе присвоения вершинам графов кодированных номеров вершин ГКП производится формирование структуры ассоциативной ВСПД, состоящей из нескольких автономных сетей.

Разработанный алгоритм не критичен к числу объединяемых графов и позволяет для сформированного единого ПП ГКП вычислить минимальные по величине структурные параметры  $n$  и  $r$  при заданном параметре  $k$ . Процедура кодировки узлов сети проста и экономична в отношении машинного времени. Она может быть легко проведена вновь в случае изменения топологии МАТС.

В приведенной постановке задачи объединения графов получить оптимальную структуру сети невозможно из-за неопределенности критериев оптимальности. Учитывая сложность и трудоемкость оптимизационной задачи, оптимальное решение можно получить

методами динамического программирования. При этом целью оптимизации является получение максимально однородного и плотного объединенного графа, т.к. такой граф обладает высокой надежностью и живучестью, является компактным и экономичным в задании маршрутов и обеспечивает наилучшие вероятностно-временные показатели движения судов в системе. Оптимальному графу соответствует ПП ГКП( $n, k, r$ ) с минимальными по величине структурными параметрами  $n$  и  $r$  при заданном параметре  $k$ .

При представлении ПП ГКП в виде объединенной  $l \times l$  МПН мерой степени структурной однородности может служить функция энтропии:

$$H\{p_{ij}^t\} = \sum_{ij=1}^l p_{ij} \lg(1/p_{ij}),$$

$$p_{ij} = |A_{ijt}|/|A|, A = \bigcup_{t=1}^T X_t, i, j \in [1, l],$$

где  $\{p_{ij}\}$  – вектор вероятностей наличия вершин исходных произвольных графов в  $(i, j)$ -той позиции объединенной МПН,  $A_{ijt} = \bigcup_{i, j \in L} A_{ij}^t$ , – вектор, содержащий  $t$  векторов  $A_{ij}^t$  вершин  $T$  исходных графов, полученный объединением по  $i$  и  $j$  в  $ij$ -ой позиции  $l \times l$  объединенной МПН ПП ГКП,  $t$  различных векторов из всех  $T$  объединяемых МПН.

Общую оптимизационную задачу формулируем в следующем виде.

**Задача (нелинейного программирования).** Построить для  $T$  неоднородных и несоизмеримых  $L_t \times L_t$  матриц  $M_t = \|A_{ij}^t\|$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, L_t$ , вида МПН, элементами которых являются векторы  $A_{ij}^t$ ,  $t \in T$ , объединенную  $L \times L$  матрицу МПН

$$M = \|A_{ijt}\| = \bigcup_{t=1}^T M_t,$$

$$A_{ijt} = \bigcup_{i, j \in L} A_{ij}^t, L = k \wedge (n_{opt} r_{opt}),$$

$$r_{opt} = \left\lceil \log_k \max_{i, j=1, l_{opt}} |A_{ijt}| \right\rceil + \left\lceil \log_k l_{opt} \right\rceil,$$

$$n_{opt} = r_{opt} + \left\lceil \log_k l_{opt} \right\rceil,$$

которая соответствует псевдографу кодовых пересечений ПП ГКП ( $n, k, r$ ) с параметрами  $n_{opt}$  и  $r_{opt}$  при заданном параметре  $k$  и удовлетворяет условию

$$\max H\{p_{ij}\} = \max_{l \in \mathfrak{S}} \sum_{i, j=1}^l p_{ij} \log \frac{1}{p_{ij}},$$

$$p_{ij} = |A_{ijt}|/|A|, |A| = \sum_{t=1}^T \sum_{i, j=1}^L |A_{ijt}|,$$

$$l_{opt} = i_{max} = j_{max} \left\lceil \max H\{p_{ij}\} \right\rceil,$$

где  $\mathfrak{S}$  – множество значений  $l$ , полученных при различных вариантах объединения  $T$  графов,  $\lceil x \rceil$  – наименьшее целое, не меньшее  $x$ , « $\wedge$ » – операция возведения в степень.

В приведенной постановке задача имеет нелинейный характер, а получение абсолютного максимума целевой функции может потребовать неприемлемо больших временных затрат, либо является недостижимым при больших значениях  $T$ . Однако в большинстве случаев практических применений вполне удовлетворительным является использование локального оптимума, удовлетворяющего заданным ограничениям. При этом время, затрачиваемое на получение результата, значительно сокращается. Для достижения поставленной цели предлагается использовать алгоритм систематического приоритетного порождения, сочетающий свойства алгоритмов систематического порождения и эвристического поиска типа «восхождения на гору». Сложность решения оптимизационной задачи связана с необходимостью получения реализаций на множестве трехмерных объектов. Для упрощения задачи и снижения ее размерности предлагается модифицировать структуры используемых математических объектов путем замены трехмерных двоичных массивов МПН двумерными десятичными массивами ММП, построенными по специальному алгоритму. В результате операция объединения трехмерных объектов заменяется операцией суммирования двумерных объектов, а оптимизационная задача формулируется как линейная.

**Задача (линейного программирования).** Построить для заданного множества  $T$  неоднородных и несоизмеримых квадратных  $L_t \times L_t$  матриц  $M_t = \|w_{ij}^t\|$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, L_t$ ,  $t=1, 2, \dots, T$ , объединенную квадратную  $L \times L$  матрицу вида ММП

$$M = \|w_{ij}\| = \sum_{t=1}^T M_t,$$

$$w_{ij} = \sum_{t \in T} \sum_{i, j \in [1, l]} w_{ij}^t, L = k \wedge (n_{opt} - r_{opt}),$$

$$r_{opt} = \left\lceil \log_k W_{opt} \right\rceil + \left\lceil \log_k l_{opt} \right\rceil,$$

$$n_{opt} = r_{opt} + \left\lceil \log_k l_{opt} \right\rceil,$$

которая соответствует псевдографу кодовых пересечений ПП ГКП( $n, k, r$ ) с параметрами  $n$  и  $r$  при заданном параметре  $k$  и удовлетворяет критерию оптимальности

$$W_{opt} = \max_{i, j \in [1, l]} w_{ij} \leq W_0, l_{opt} = \max_{l \in \mathfrak{S}} l \leq L_0,$$

$$W_0 = k^{\left\lceil \log_k \max_{t \in T} \max_{i, j \in [1, L_t]} w_{ijt} \right\rceil}, \quad L_0 = k^{\left\lceil \log_k \max_{t \in T} L_t \right\rceil}.$$

где  $\mathfrak{Z}$  – множество значений  $l$ , полученных при различных вариантах объединения  $T$  графов,  $\lceil x \rceil$  – наименьшее целое, не меньшее  $x$ , « $\wedge$ » – операция возведения в степень,  $\{W_0, L_0\}$  – окно поиска. Варьируя размеры окна поиска можно изменять величины параметров  $n$  и  $r$  при заданном параметре  $k$  и моделировать различные структуры ВСПД.

**Выводы:** комбинированное использование в конвергируемой системе управления движением судов морского порта возможностей стационарных и мобильных СУДС и перспективных телекоммуникационных и навигационных технологий позволит при сохранении функциональных возможностей традиционных СУДС практически снять территориальные ограничения, повысить гибкость, мобильность

и маневренность и расширить спектр предоставляемых услуг по обеспечению проводки различных плавательных средств. Благодаря этому такая система способна существенно повысить безопасность судоходства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Борисова, Л.Ф.* Мобильная система управления движением судов для обеспечения безопасности мореплавания на акватории с интенсивным судоходством: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.19 Мурманск, 2005, 175 с.
2. *Борисова, Л.Ф.* Прикладные вопросы теории графов кодовых пересечений / *Л.Ф. Борисова* // Вестник МГТУ: Труды Мурманского гос. техн. ун-та. - 2006. Т.9, №2. С. 291-300.
3. *Борисова, Л.Ф.* Метод информационно-графического отображения сетевых топологий для решения транспортных задач / *Л.Ф. Борисова* // Вестник МГТУ: Труды Мурманского гос. техн. ун-та. 2007. Т.10, №4. С. 581-589.

## NUMERICAL MODELING OF INFORMATIONAL INFRASTRUCTURES OF ASSOCIATIVE MARINE TRANSPORT SYSTEMS

© 2010 L.F. Borisova

Murmansk State Technical University

Opportunities of heightening the safety of navigation by means of use the territorially localized Mobile Vessel Traffic Services (MVTS) and principles of modeling the informational infrastructures ensuring functional integration of various marine transport systems into a single association are considered.

Key words: *marine transport system, safety of navigation, mobile vessel traffic services, columns of code intersections, systems convergence*