

УДК 656.61.052

НЕКОТОРЫЕ ОТДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ СУДОВОДИТЕЛЯ В КОНЦЕПЦИИ Е-НАВИГАЦИИ ПРИ МАЛОЧИСЛЕННЫХ ЭКИПАЖАХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРИНЦИПАХ ПОСТРОЕНИЯ ХОДОВОГО МОСТИКА

Диденко О.В., аспирант кафедры «Судовождение», ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова»

В современном судовождении основные задачи управления судном на курсе, часть швартовых операций с буксирным порядом, крепление судна к автоматическим швартовкам, трюмно-грузовые и другие судовые работы возложены на Аппаратно-агрегатный программный комплекс - интегрированные системы судна, в целом это Единый Центр управления, навигацией судна, безопасностью судовождения и грузовыми операциями на терминалах. Однако профессиональная подготовка судоводителя подразумевает знания о физической основе судоходства, решении различных задач прикладного характера и безопасности судна в рейсе и при обработке в портах. Здесь показан ряд задач встречающихся в практике судоводителя.

Ключевые слова: минимизация фрахта, интенсивность, фрахтовая ставка, обратная загрузка, расширенный фильтр Кальмана, активная матрица, адаптивность, граф модели функционирования, маркированная сеть Петри, бинарное соотношение, адиабатический градиент, стратификация, элементы волн.

SOME SEPARATE TASKS FOR THE SKIPPER IN THE CONCEPT OF E-NAVIGATION WITH SMALL CREWS AND INTEGRATED PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF THE NAVIGATION BRIDGE

Didenko O., the post - graduate student of the Navigation chair, FSEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University»

In modern navigation, the main tasks of ship management on the course, part of the mooring operations with a towing order, fastening the vessel to automatic mooring, bilge-cargo and other ship works are assigned to the Hardware-aggregate software complex - integrated systems of the vessel, in General, it is a Single control Center, navigation of the vessel, safety of navigation and cargo operations at the terminals. However, the professional training of the boatmaster implies knowledge of the physical basis of navigation, the solution of various problems of applied character and safety of the vessel in voyage and at processing in ports. Here is shown a number of problems encountered in the practice of the skipper.

Keywords: minimization of freight intensity the freight rate, reverse loading, the extended Kalman filter, active matrix, the adaptability, the graph model of functioning, marked Petri net, binary ratio, adiabatic gradient, stratification, elements of waves.

Микрозадача 1. Управление работой флота, как грузоперевозчика.

Основная задача работы коммерческого флота качественное, своевременное и безопасное перемещение пассажиров и груза в экспортно-импортном маршруте.

Практическая реализация данного алгоритма заключается:

Модель, целевая функция которой минимизация фрахта при максимальной разности фрахтовых ставок и спроса [1]:

$$\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \cdot y_{ij} - \sum_{i \in I_j} f_{ij} \cdot x_{ij} \right) \rightarrow \max \quad (1)$$

решение выстраивается для каждого типа загрузки и типажа судна одновременно существуют определенные ограничения:

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} \leq \sum_{i \in I_j} x_{ij}, (i = \overline{1, m}) \quad (2)$$

Где:

- $x_{ij} \leq P_{ij} (j = \overline{1, n}; i \in I_j)$,
- $x_{ij} \leq C_{ij} (j = \overline{1, n}; i \in I_i)$,
- $x_{ij} \geq 0; y_{ij} \geq 0, C_{ij} (j = \overline{1, n}), (i = \overline{1, m})$,

Где:

- x_{ij} - тоннаж типа i компаний-конкурентов, имеющийся на j - м рынке, тыс. тндвт;
- y_{ij} - тоннаж типа i морской корпорации, который нужно отфрахтовать на j -м рынке, тыс. тндвт;
- f_{ij} - фрахтовая ставка на тоннаж типа i на j -м рынке, долл. тн;
- P_{ij} - суммарное предложение тоннажа типа i на j -м рынке, тыс.тндвт;
- C_{ij} - суммарный спрос на тоннаж типа i на j -м рынке, тыс. тндвт;
- I_j - множество типов тоннажа на рынке - j ;

- I_i - множество локальных рынков, на которых имеется тоннаж типа - i .

В процессе использования танкеров немаловажным является обратная загрузка тоннажа. Эмпирически вывели соотношение ожидания обратной перевозки [2]:

$$T_{optimum-t} = \frac{12500 - 578\sqrt{L_{er1}} + 7L_{er1} - 99350N_{Mr}^2 + 23475N_{Mr} + 94750N_{Mr}^3}{578\sqrt{L_{er1}} - 7L_{er1} + 99350N_{Mr}^2 - 23475N_{Mr} - 94750N_{Mr}^3}, \quad (3)$$

где:

- L_{er1} - длина рейса с грузом в прямом направлении, в км;

- N_{Mr} - интенсивность появления заявок на перевозку грузов в обратном направлении в пункте прямой выгрузки, ед./час.

Таким образом судоводитель решает, как оптимизировать фрахтовую ставку и спрос и получить загрузку обратного рейса.

Микрозадача 2. Управление судном на курсе. Авторулевой.

В океаническом плавании после прокладки курса автопрокладчиком, судно идет по траектории рейса в автоматическом режиме. Однако течения, ветер, волна и другие факторы постоянно изменяют прохождение судна по курсу, и вызывают необходимость вносить коррекцию в направление движения. На современных судах удержания судна на курсе осуществляет метод заложенный в физический принцип работы авторулевого, основанный на математическом фильтре Кальмана. Различаются вариации математического фильтра Кальмана: простой, дискретный, оптимальный, расширенный, и другие.

В авторулевых применяют технические разновидности физических принципов построенных на вариациях фильтра Кальмана. При этом варьируется сглаживание курса судна на траектории от 3-х до 12 градусов угла дуги от диссектрисы вправо-влево.

Последние разработки приборов, больше применяют оптимизированный (расширенный) фильтр Кальмана и достигают сглаживание и возврат на траекторию генерального курса при отклонении до 12 градусов. Расчет нового алгоритма для улучшения стабильности расширенного фильтра Кальмана в AutopilotYOKOGAWADENSHIKKIPT-500A-K-K2T

$$x_t = f(x_{t-1}) + w_t, \quad (4)$$

Рассмотренная нелинейная система дискретного времени в расширенном фильтре Кальмана представлена теоремой, вектора состояния и измерения в момент времени t , где:

$$x_t \in R, y_t \in R_m; \quad (5)$$

Для того, чтобы гарантировать стабильность фильтра Кальмана в приборе YOKOGAWADENSHIKKIPT-500A-K-K2T, возможен новый способ регулирования алгоритма РЕКФ, применяемом в авторулевом. Из анализа теоремы Кальмана граница x может управляться путем увеличения вычисленного значения ковариационной матрицы $\Sigma[t|t-1]$.

Тогда для РЕКФ, $\Sigma[t|t-1]$ можно увеличить путем уменьшения γ . Однако, невозможно выбрать подходящий γ такой, чтобы $\Sigma[t|t-1]$ было бы достаточно большим, при $L_t = I$. на самом деле эта проблема может быть решена, если матрица L_t в

$$\left(\sum_{t|t-1} = \left(P_{t|t-1}^{-1} - \gamma^{-2} L_t^T L_t^{-1} \right) \right) \quad (6)$$

определяется в отношении:

$$L_t = \gamma \left(P_{t|t-1}^{-1} - \lambda^{-1} P_{t|t-1} \right)^{1/2}; \quad (7)$$

тогда (4) обозначает квадратный корень матрицы, и λ_t параметр настройки, который должен быть достаточно большой, чтобы выполнить следующее неравенство:

$$\sum_{t|t-1} < \lambda_t P_{t|t-1}, \quad (8)$$

Проблема настраивать предписанный уровень γ будет отмена, и λ_t должен быть настроен вместо γ чтобы получить более надежное поведение. Практический путь настройки параметра λ_t получается по следующему алгоритму[3] Заменяя в формуле, на:

$$\left(\sum_{t|t-1} = \left(P_{t|t-1}^{-1} - \gamma^{-2} L_t^T L_t \right)^{-1} \right), \quad (9)$$

$$\left(\sum_{t|t-1} > \overline{\sum_{t|t-1}} \right)$$

легко проверить что достаточное условие в теореме Кальмана выполняется.

Тем не менее, использование верхней границы $\lambda_t P_{t|t-1}$ может быть слишком консервативным. Слишком большой акцент сделан на приспособлении наихудшего случая (наибольшей ошибки линеаризации) за счет оптимальности [4]. Для того чтобы улучшить стабильность фильтра без снижения точности, адаптивную схему для настройки $\Sigma[t|t-1]$ в ответ на изменение окружающих условий приводят в виде :

$$\sum_{t|t-1} = \begin{cases} P_{t|t-1}, & P_{y,t} > \alpha \overline{P_{y,t}} \\ \left(P_{t|t-1}^{-1} - \gamma^{-2} L_t^T L_t \right)^{-1}, & \end{cases}$$

$$P_{y,t} = E(\tilde{y}_t, \tilde{y}_t^T | \tilde{x}_{t-1}), \quad (10)$$

реальная матрица ковариации нового выражения параметра:

$$\tilde{y} = y_t - H_t x_{t|t-1}, \quad (11)$$

Параметр $\alpha > 0$ вводится для обеспечения дополнительной степени свободы настройки порога в процессе реализации.

Хотя $P_{y,t}$ неизвестный на практике, его можно оценить по:

$$\overline{P}_{y,t} \approx \begin{cases} \tilde{y}_t \tilde{y}_t^T, t = 0 \\ \frac{\rho \overline{P}_{y,t} + \tilde{y}_t \tilde{y}_t^T}{\rho + 1}, t > 0 \end{cases}; \quad (12)$$

где: $c = 0,98$ -фактор забывания.

Адаптивный устойчивый расширенный фильтр Кальмана (KF) имеет структуру REKF, за исключением что ковариация ошибки прогнозирования вычисляется с помощью:

$$\left(\sum_{t|t-1} = \left(P_{t|t-1}^{-1} - \gamma^{-2} L_t^T L_t \right)^{-1} \right), \quad (13)$$

С этой точки зрения, когда существует слишком большое усиление сглаживания $\sum_{t|t-1}$, то устанавливается для

$$\sum_{t|t-1} = \left(P_{t|t-1}^{-1} - \gamma^{-2} L_t^T L_t \right)^{-1}$$

Когда сглаживание невелико $\sum_{t|t-1}$, применимо, как $P_{t|t-1}$, что не искажает оценку внешних воздействий [4].

Так с помощью расширенного фильтра Кальмана в авторулевом создается алгоритм сглаживания адаптивного движения судна на траектории маршрута в автоматическом режиме до 12 градусов дуги по курсу.

Микрозадача 3. Математическая модель функционирования ходовой вахты судна на переходе.

В каждый момент времени любой орган управления находится в каком-либо состоянии (например: может находиться в состоянии ожидания, полной готовности совершить незапланированный маневр, совершения остановки на маршруте для выполнения аварийных или спасательных работ, выполнения поставленных задач капитаном и т. д.).

Переход из одного состояния в другое осуществляется в соответствии с распоряжениями, информационными сообщениями и т.п. После перехода в новое состояние капитан судна докладывает о выполнении (или невыполнении) поставленной задачи диспетчеру компании - оператора. При этом могут появиться новые документы (например: распоряжения подчиненным органам управления судовладельца или оператора фрахта).

Таким образом, модель функционирования ходовой вахты судна должна включать 3 группы элементов: состояния $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$; документы (распоряжения, отчеты о выполнении) $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$; процессы перехода из состояния в состояние $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$. Элементы этих групп объектов связаны бинарными отношениями, описывающими причинно-следственные связи между ними: $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Таким образом, модель функционирования представляет собой граф

$$G = \{S \cup D \cup P, E\}. \quad (14)$$

Полное описание такого функционирования кроме графа G должна включать привязку к временной оси каждого элемента (например, момент появления документа, промежутки времени, находящийся в состоянии, и т. п.)

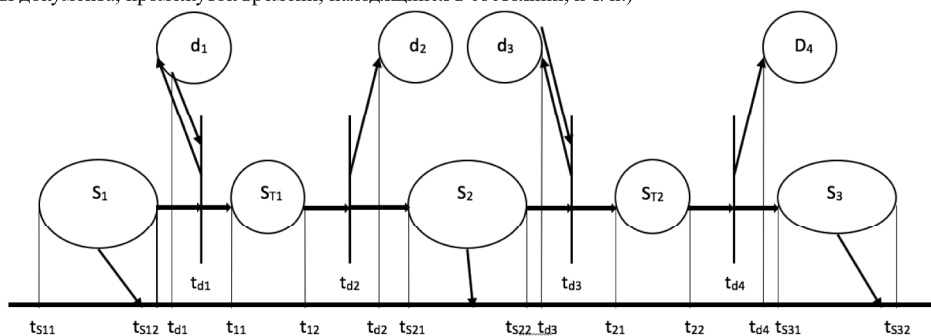


Рис. 1. Преобразование графа фрагмента модели функционирования управления ходовой вахты судна

Алгоритм действий ходовой вахты на основе математической модели описывается алгоритмом реализации полученной модели в виде сетей Петри. Для определения сети используются две матрицы D^+ и D^- , представляющие входную и выходную функции. Каждая матрица имеет m строк (по одной на переход) и n столбцов (по одному на позицию).

Обозначим:

$$D^- [j, i] = \#(p_i, I(t_j)), D^+ [j, i] = \#(p_i, O(t_j)), \quad (15)$$

где $\#(p_i, I(t_j))$ — количество дуг, идущих от позиции p_i к переходам;

$\#(p_i, O(t_j))$ — а количество дуг, идущих от переходов t_j к позициям p_i .

Матричная форма определения сети Петри позволяет дать определения в терминах векторов и матриц. Для того чтобы показать полезность такого матричного подхода к сетям Петри, исследуем фрагмент сети [6].

Матрицы позволяют осуществлять проверку выполнения перехода. Если

$$\mu \geq e[j] \cdot D^-, \quad (16)$$

Где: μ — начальная маркировка;

t — текущий переход, то переход разрешен. Для рассмотрения задачи сеть Петри должна быть спроектирована таким образом, чтобы в один и тот же момент времени мог выполняться один и только один переход. Это вызвано тем, что ходовая вахта в каждый момент времени находится в одном и только в одном состоянии или в процессе перехода из одного состояния в другое [7].

Для рассмотренного фрагмента модели матрицы D^+, D^- имеют конфигурацию, в виде маркированной сети Петри:

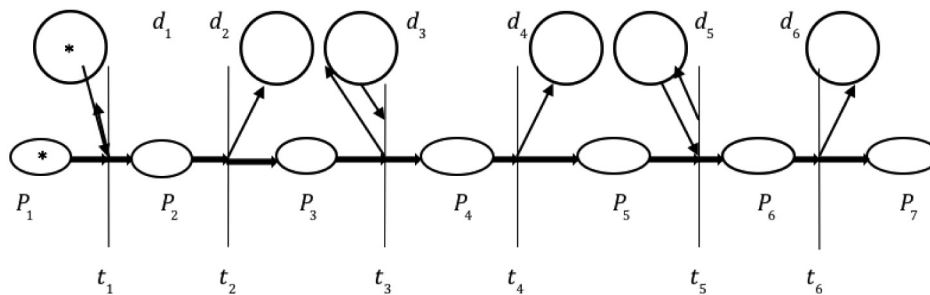


Рис. 2. Маркированная сеть Петри для фрагмента модели функционирования ходовой вахты

В начальной маркировке $\mu = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$, изображённой на рисунке, переход t_1 разрешен и приводит к маркировке μ' , где

$$D^- = \begin{bmatrix} 1000000010000 \\ 0100000000000 \\ 00100000001000 \\ 00010000000100 \\ 01000000000010 \\ 00000100000001 \end{bmatrix}, D^+ = \begin{bmatrix} 010000010000000 \\ 001000001000000 \\ 000100000000000 \\ 0000010000001000 \\ 000000010000010 \\ 000000001000001 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} -110000000000000 \\ 0-1100000010000 \\ 00-1100000000000 \\ 000-110000001000 \\ 0000-11000000000 \\ 00000-100000001 \end{bmatrix}$$

В итоговом варианте матрица примет вид:

$$D = D^+ - D^-, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mu' &= (1, 000000, 1, 00000) + (1, 00000) \cdot D = \\ &= (1, 000000, 1, 00000) + (1, 1, 000000000000) = \\ &= (0, 1, 00000, 1, 00000). \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом предложена модель управления вахтой в рейсе, с целью оптимизации распорядительно-управленческих решений.

Микрозадача 4. Погодные и климатические условия в работе судоводителя.

А) В средних широтах в условиях смены климатических времен года, в высоких широтах в период максимальных зимних температур часто возникает погодное явление – туман. Крайне неприятное при работе караванов судов, скученности и работе в узостях и на подходах к портам. Особенно при нестабильной работе РЛС и ГНСС.

Туман – природное явление:

$$\delta = Q - \alpha(T), \quad (19)$$

где: δ – водность тумана;

α – абсолютная влажность воздуха;

T – абсолютная температура;

Q – абсолютное влагосодержание.

Количественно, при высоком содержании влаги в воздухе при физическом теплопереносе, дифференцируются по виду [8]:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= -u \frac{dT}{dx} - \omega \frac{dT}{dt} - \omega \frac{dS}{dz} - \frac{d}{dz} k(\gamma - \gamma_a) + \frac{1}{cp} \frac{dk}{dz} + \frac{hm}{cp}; \\ \frac{dS}{dt} &= -\frac{dS}{dz} - \omega \frac{dS}{dz} k \frac{dS}{dz} - m; \end{aligned} \quad (20)$$

Где:

t – температура;

u – скорость ветра;

x – горизонтальная ось координат в направлении ветрового градиента;

z – вертикальная координата;

k – коэффициент турбулентности;

S – абсолютная влажность воздуха в условной концентрации, удельная влажность;

m – скорость конденсации водяного пара;

$\gamma - \gamma_a$ – фактический и адиабатический градиент температур.

Туман начинается при достижении относительной влажности 100% к воде:

$$f = \frac{S}{S_m} 100; \quad (21)$$

тогда условие отсутствия радиационных и адвекционных критериев вертикального градиента температур приводит к безразличной стратификации образования аэрогеля:

$$\rho = c \rho k \left(\frac{dT}{dz} - \gamma \right), \text{ безразличная стратификация,}$$

$$\frac{dT}{dz} - \gamma \quad (22)$$

Из уравнения баланса турбулентной энергии с критерием Ричардсона, получим [9]:

$$\gamma = \gamma - \frac{T}{g} \left(\frac{du}{dz} \right) = \gamma - \frac{T}{g} \left(\frac{u - u_a}{H} \right); \quad (23)$$

Таким образом находим достаточное условие тумано-образования.

Б) Судоводителю приходится выбирать маршрут в обход штормов, ураганов и просто сильной зыби (особенно встречного направления), что рассчитывается по известным методикам.

Остановимся на энергетическом методе, предложенном Н.А. Лабзовским из которого Тульчинским Ю.И. были получены формулы, позволяющие рассчитывать любые необходимые элементы волн. Для получения результатов в данной работе нам необходима только высота волнения – h , которая можно вычислить по следующей формуле [10]:

$$h = 0,073U \left(1 + e^{-0,4 \frac{D}{U}} \right) \sqrt{\frac{D}{0,9\sqrt{100 + U^2}}}; \quad (24)$$

Где: U – скорость ветра;

D – разгон ветрового волнения;

Далее применим условие так называемого «порогового значения разгона волн» (D_{II}), после которого при данной скорости ветра рост высоты волны фактически прекратится:

$$D_{II} = 19,736U; \quad (25)$$

Другими словами, при условиях, когда $D > D_{II}$ возьмем для расчетов вместо фактического значения разгона волн значение «порогового разгона волн». Поскольку на переходе действует ещё и течение, то необходимо учесть и его. Тогда по рекомендованной сводки формул:

$$q_T = K_T - \text{Лок} \cdot K; \quad (26)$$

где: q_T – курсовой угол течения, град;

K_T – направление течения, град;

ЛокК – локсодромический курс, град.

$$m = \frac{v_T}{v_{cp}}; \quad (27)$$

где: m – промежуточный коэффициент;

v_T – скорость течения, узлы;

v_{cp} – средняя путевая скорость с учетом ветроволновых потерь, узлы.

$$\gamma = \sqrt{1 + 2m \cos q_T + m^2}; \quad (28)$$

где: γ – коэффициент пропорциональности между путевой скоростью и средней путевой скоростью с учетом ветроволновых потерь;

m – промежуточный коэффициент;

q_T – курсовой угол течения, град.

$$v_{II} = v_{cp} \cdot \gamma; \quad (29)$$

где: γ – коэффициент пропорциональности между путевой скоростью и средней путевой скоростью с учетом ветроволновых потерь;

v_{II} – путевая скорость, узлы;

v_{cp} – средняя путевая скорость с учетом ветроволновых потерь, узлы.

Тогда средняя путевая скорость на переходе:

$$(v_{II}) = \frac{v_{II1} \cdot S_1 + v_{II2} \cdot S_2 + \dots + v_{IIm} \cdot S_m}{S}, \quad (30)$$

где: $v_{II1}, v_{II2}, v_{IIm}$ – величина путевых скоростей в пятиградусных квадратах, узлы;

S_1, S_2, S_m – расстояния в каждом пятиградусном квадрате, мили;

S – длина маршрута, мили.

С учетом приведенной методики создаются программы по расчетам ветроволновых потерь и времени перехода с учетом течения, а также влияния туманов на функционирование вахты на переходе.

Таким образом судоводитель при решении локальных задач прокладывает оптимальный путь на курсе судна, выполняет коммерческую эффективную эксплуатацию и использование судна. Автоматика АПК и НУИК позволяет рационально использовать, как технические, так и людские элементы судового комплекса.

Литература:

1. Эглит Я.Я. Управление транспортными системами/Я.Я. Эглит, К.Я. Эглит, В.А. Прокофьев. – СПб.: Феникс, 2014.
2. Лимонов Э.Л. Внешнеторговые операции морского транспорта и мультимодальные перевозки/Э.Л. Лимонов. – СПб.: Информационный центр «Выбор», 2011.
3. Axelrad, P. & Brown, R. G. (1996). GPS navigation algorithms, in Global Positioning System: Theory and Applications: B. W. Parkinson, J. J.
4. Bar-Shalom, Y.; Li, X. R. & Kirubarajan, T. (2001). Estimation with Applications to Tracking and Navigation, John Wiley & Sons, Inc.
5. Blair, W. D. (1993). Fixed gain two-stage estimators for tracking manoeuvring targets. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 29(3), pp. 1004-1014.
6. Котов В.Е. Сети Петри/В.Е. Котов. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
7. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем/ Дж. Питерсон. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
8. Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я. Климатическая обработка метеорологической информации. - Л.: Гидрометеониздат, 1978. - 296 с.
9. Логвинов К.Т. Динамическая метеорология. - Л.: Гидрометеониздат, 1981. -148 с.
9. Тульчинский Ю.И. Разработка комплексной модели прогноза и анализа поведения судна на волнении: Автореферат диссертации кандидата технических наук. – Новороссийск: НГМА, 2003. – 510 с.
10. Ермолаев Г.Г.- «Морская лоция». - М.: «Транспорт», 1982.- 392 с.
11. Притула Т.Ю. Физическая география материков и океанов / Т.Ю. Притула, В.А. Еремина, А.Н.Сплярин. – М.: 2003. – 286 с.