

2. National Rail Freight Infrastructure Capacity and Investment Study. — Cambridge Systematics, 2007.
3. Le-Griffin, H. D. Container terminal productivity: Experiences at the ports of Los Angeles and Long Beach / H. D. Le-Griffin, M. Murphy // *NUF Conference*. — 2006. — Pp. 1–21.
4. Leachman, R. C. “Port and modal allocation of waterborne containerized imports from Asia to the United States.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44.2(2008): 313–331. DOI:10.1016/j.tre.2007.07.008
5. Luo, M., and T. A. Grigalunas. “A spatial-economic multimodal transportation simulation model for US coastal container ports.” *Maritime Economics & Logistics* 5.2(2003): 158–178.
6. The Tioga Group, Inc., Containerized Intermodal Goods Movement Assessment, Report, 2013. Web. 14 Sept. 2015 <<http://tiogagroup.com/>>.
7. U.S. Department of Transportation, U.S. Water Transportation Statistical Snapshot. 2012. United States. Marine Administration. Web. 14 Sept. 2015 <http://marad.dot.gov/data_and_statistics/Data_and_Statistics.htm>.
8. Wilson, W. W., and B. Dahl. *Container Shipping: Rail and Ocean Shipping Rates*. Report. North Dakota State University, 2008.
9. Wilson, W. W., and D. Benson. *Analysis of Container Flows: World Trade, US Waterborne and Commerce and Rail Shipments in North American Markets*. Report. North Dakota State University, 2008.
10. Wilson, W.W. and E. DeVuyst. *Optimization Models of Container Shipments in North America: Spatial Competition and Projections*. Report. North Dakota State University, 2008.
11. Rivera, L., and Y. Sheffi. *Logistics: Shipping on the Panama Canal*. Web. 23 Sept. 2015 <<http://www.americasquarterly.org/node/2455>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русинов Игорь Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
RusinovIA@gumrf.ru
Эглит Ян Янович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
JeglitJJ@gumrf.ru
Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_gsk@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rusinov Igor Aleksandrovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
RusinovIA@gumrf.ru
Jeglit Jan Janovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
JeglitJJ@gumrf.ru
Kolosov Mihail Aleksandrovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
kaf_gsk@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2015 г.

УДК 656.61.052

С. В. Смоленцев

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ НАВИГАЦИОННОЙ СИТУАЦИИ В МОРЕ

В статье рассматривается проблема безопасности мореплавания, для решения которой разрабатывается автоматизированная система расхождения судов в море. Важным компонентом этой системы является модуль навигационной ситуации. Оценка навигационной ситуации проводится на основе прогноза траекторий движения собственного судна и судов-целей. При этом учитывается как риск столкновения с судами в районе плавания, так и наличие навигационных опасностей и ограничений. Разработана шкала опасности и предложена система правил для оценки степени опасности каждого из судов-

целей. Для оценки опасности столкновения с судном-целью используются параметры сближения судов: время, дистанция и скорость кратчайшего сближения. Представлена продукционная система, которая для каждого из судов-целей определяет оценку опасности столкновения в терминах предложенной шкалы опасности. На основе оценки опасности каждого из судов строится комплексная оценка безопасности навигационной обстановки.

Ключевые слова: система расхождения судов, оценка навигационной ситуации, риск столкновения.

ПРОБЛЕМА безопасности мореплавания имеет множество аспектов, одним из которых является обеспечение безопасности расхождения судов в море. Сейчас проблемами предупреждения столкновений занимаются специалисты различных видов транспорта, но наибольшие успехи в этой области достигнуты в авиации с использованием Traffic alert and Collision Avoidance System (TCAS). Разработкой судовых систем предупреждения столкновений V-CAS Vessel Collision Avoidance System в настоящее время заняты специалисты различных компаний. В частности, известно решение компании Totem в виде подключаемого к ECDIS модуля Decision Support Tool.

Для решения проблемы предупреждения столкновений в 1972 г. была принята «Конвенция о международных правилах предупреждения столкновений судов в море», приложением к которой, собственно, и являются Правила МППСС-72 [1] (далее — МППСС). Выполнение МППСС является обязательным для гражданских судов. Однако применение этих правил не гарантирует безопасности мореплавания, поскольку МППСС не учитывают навигационных ограничений в районе плавания, регламентируют расхождение двух судов, но не применимы в случае встречи нескольких судов. Таким образом, использование только МППСС не позволяет обеспечить безопасность мореплавания в узкостях, где в настоящее время скапливаются большие судовые потоки.

В условиях большого количества окружающих судов-целей судоводитель физически не может самостоятельно оценить навигационную обстановку и принять правильное решение по управлению своим судном. Решением данной проблемы является создание автоматизированной системы предупреждения столкновений судов. Рассмотрение различных аспектов подобных систем содержится в литературе [2] – [9]. В статье [10] рассматриваются принципы работы и архитектура разрабатываемой автоматизированной системы расхождения судов, одним из подсистем которой является подсистема оценки навигационной ситуации. Основной задачей, решаемой данной подсистемой, является задача комплексной оценки текущей навигационной ситуации, включая оценку опасности столкновения с другими судами, выходом на мелководье и т.п.

В автоматизированной системе генерируется последовательность векторов навигационной ситуации:

$$S = \{S_t\}_{t \in [-T, 0]},$$

где T — глубина истории (количество хранимых векторов навигационных ситуаций);

S_t — вектор навигационной ситуации,

$$S_t = \langle S_t^c, S_t^f, S_t^e, S_t^d \rangle.$$

Здесь S_t^c — текущая навигационная ситуация; S_t^f — прогноз навигационной ситуации; S_t^e — оценка навигационной ситуации; S_t^d — решение по управлению судном в данной навигационной ситуации.

В данной статье рассматриваются основные принципы формирования одной из компонент вектора навигационных ситуаций, а именно компоненты оценок S_t^e . Для оценки навигационной ситуации используется информация о районе плавания, которая может быть получена от судовой ECDIS. Кроме того, необходимо формировать прогноз развития ситуации на заданный промежуток времени.

Компонента оценок может быть представлена в следующем виде:

$$S_i^e = \langle e(Tr_0), \{e(Tr_0 \circ Tr_j)\}_{j \in J} \rangle = E(S_i^f, \mathbf{R}, K_e),$$

где S_i^f — вектор прогноза навигационной ситуации (динамическая составляющая); $\mathbf{R}$ — информация о районе плавания, маршруте судна и т.п. (статическая составляющая); K_e — когнитивная составляющая оценки (знания о возможных оценках различных навигационных ситуаций).

Для построения вектора прогноза навигационной ситуации S_i^f используются прогнозные траектории движения как собственного судна, так и окружающих его судов:

$$S_i^f = \langle Tr_0, \{Tr_j\}_{j \in J} \rangle = F(\mathbf{S}_{-1}, \mathbf{R}, M, K_f),$$

где Tr_0 — прогноз траектории собственного судна; Tr_j — прогноз траектории j -го судна-цели; M — множество моделей динамики судов (собственного судна и судов-целей); $\mathbf{S}_{-1} = \{S_i\}_{i \in [-T, -1]}$ — последовательность векторов предыдущих навигационных ситуаций; K_f — когнитивная составляющая (знания о возможных вариантах построения прогнозов траектории судна с учетом навигационных и иных ограничений).

Каждая из траекторий (как собственного судна, так и судов-целей) прогнозируется с использованием модели динамики данного судна. Для собственного судна модель динамики хорошо известна и выбирается в зависимости от загрузки судна (груз / балласт). Модель динамики судна-цели выбирается из базы данных таких моделей в соответствии с информацией о типе судна и его характеристиках, которая может быть получена из сообщений АИС, принимаемых системой от каждого судна. Кроме того, для построения прогноза траекторий используется информация о заданных маршрутах движения судов. Для собственного судна планируемый маршрут известен и может быть введен в систему заранее или получен от судовой ECDIS. С заданными маршрутами движения судов-целей подобной однозначности нет. В системе АИС существует возможность передачи планируемого маршрута, но как показывает практика, эта функциональность в настоящее время не задействована. Поэтому проблема прогнозирования маршрутов движения судов-целей пока остается открытой. Таким образом, прогнозируемая навигационная ситуация включает в себя прогноз траекторий собственного судна и судов целей относительно друг друга и навигационных опасностей и ограничений.

При построении оценки опасности данной ситуации принимаются во внимание следующие риски:

- выход в зоны, запретные для плавания,
- пересечение границ СРД (систем разделения движения),
- выход на навигационные опасности,
- выход на мелководье,
- столкновение с каким-либо судном.

По информации от судовой ECDIS возможно получение множества стационарных объектов, в число которых входят навигационные опасности, зоны мелководья, запретные для плавания зоны, границы СРД и др. Зоны мелководья определяют с учетом заданной судоводителем безопасной глубины. Для каждого объекта из этого множества формируются параметры его опасности для прогнозируемой траектории движения собственного судна. В качестве таких параметров используются время и дистанция кратчайшего сближения с соответствующей опасностью. Таким образом, для множества стационарных объектов L получим следующее множество параметров оценок риска:

$$P^N = \{P_l^N\}_{l \in L};$$

$$P_l^N = \langle D_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l), T_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l) \rangle.$$

Оценка риска столкновения с динамическими объектами (судами-целями) проводится с использованием прогнозируемых траекторий собственного судна и каждого из судов-целей. Для оценки уровня опасности столкновения используются стандартные параметры сближения: время и дистанция кратчайшего сближения. Таким образом, для множества судов-целей J получим следующее множество параметров оценок риска:

$$P^s = \{P_j^s\}_{j \in J};$$

$$P_j^s = \langle D_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j), T_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j) \rangle.$$

Общее множество параметров риска получим, объединив приведенные ранее множества:

$$P = P^s \cup P^N = \{P_i\}_{i \in I}.$$

Отдельной задачей является задача построения оценки степени опасности каждого из объектов (стационарного или динамического) на основе полученных параметров. Данная оценка должна не только характеризовать степень опасности того или иного объекта в прогнозируемом промежутке времени, но и быть интуитивно понятной и удобной для восприятия судоводителем. В качестве удобной и естественной шкалы степени опасности предложено использовать шкалу RYG = <RED><YELLOW><GREEN>, в которой используются три категории:

<RED> (опасно) — объект из этой категории является опасным и необходимо предпринять действия по управлению судном, целью которых будет такое изменение траектории движения собственного судна, которое позволит вывести данный объект из этой категории;

<YELLOW> (внимание) — объект из этой категории не является опасным, но траектория собственного судна проходит вблизи данного объекта или траектории его движения и необходимо следить за возможным изменением условий или траектории данного объекта, которые могут привести этот объект в категорию <RED>;

<GREEN> (безопасно) — объект из данной категории не является опасным.

Предложенная маркировка окружающих судно объектов (как статических, так и динамических) с помощью разработанной цветовой шкалы является весьма наглядной и удобной для восприятия судоводителем.

Отнесение каждого из объектов к той или иной категории по шкале RYG, т.е. оценка степени опасности этого объекта, проводится с помощью продукционной (интеллектуальной) системы, основанной на правилах. Однако все правила в данной системе являются параметрическими, т.е. они зависят от параметров, которые задаются судоводителем:

D^* — радиус опасной зоны (сближение на дистанцию, меньшую этой величины, считается опасным);

$D^{**} > D^*$ — радиус зоны усиленного внимания (сближение на дистанцию менее D^{**} , но более D^* считается потенциально опасным и требует внимания со стороны судоводителя);

T^* — максимальное время опасного сближения (большее время кратчайшего сближения не считается опасным).

Эти параметры могут быть различными в разных навигационных ситуациях и задаются судоводителем в соответствии с текущими условиями плавания, характеристиками собственного судна, близостью навигационных опасностей, погодными условиями и любыми другими соображениями. В зависимости от значения этих параметров изменяются размеры опасных зон вокруг собственного судна.

Продукционная система определения степени опасности объектов преобразует параметры оценок риска (D_{ki} — дистанция кратчайшего сближения и T_{ki} — время кратчайшего сближения) в оценку по шкале RYG по следующим правилам:

$$(D_{ki} > D^{**}) \rightarrow Q_i = G;$$

$$(D_{ki} > D^*) \& (\dot{D}_{ki} > 0) \rightarrow Q_i = G;$$

$$(D_{ki} > D^*) \rightarrow Q_i = Y;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \& (T_{ki} > T^*) \rightarrow Q_i = Y;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \& (\dot{D}_{ki} > 0) \rightarrow Q_i = Y;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \rightarrow Q_i = R.$$

С использованием приведенной системы правил выполняется оценка степени опасности каждого статического и динамического объекта (навигационных опасностей и судов-целей):

$$e(Tr_0) = \min(Q_l), l \in L;$$

$$e(Tr_0 \circ Tr_j) = Q_j, j \in J.$$

Результирующая оценка степени опасности навигационной ситуации определяется по минимальной (наиболее опасной) оценке:

$$S_i^e = \min(e(Tr_0), \{e(Tr_0 \circ Tr_j)\}_{j \in J}).$$

Изложенная в статье методика не только позволяет наглядно представить судоводителю оценку опасности текущей навигационной ситуации, но и определить какие из объектов (навигационные опасности или окружающие суда-цели) являются наиболее опасными, требующими решения задачи по расхождению.

Таким образом, в ходе проведенных исследований были получены следующие результаты.

1. Предложена шкала RYG (<RED> <YELLOW> <GREEN>). Представление степени опасности как отдельных судов-целей, так и комплексной оценки навигационной ситуации в категориях данной шкалы является с одной стороны достаточно простой, а с другой — весьма информативной и наглядной для судоводителя. Такая оценка является предпочтительной по сравнению с численной оценкой степени опасности.

2. Разработаны общие принципы оценки риска столкновения с судами-целями, а также навигационными опасностями, выхода на мелководье, пересечения границ СРД, входа в запретные для плавания зоны и др., основанные на использовании прогнозов траекторий собственного судна и судов-целей.

3. Предложена продукционная система, позволяющая строить оценки степени опасности столкновения с судами-целями. С помощью этой системы измеренные параметры кратчайшего сближения (время, дистанция и скорость сближения) отображаются в оценку степени опасности по шкале RYG.

4. Комплексная оценка безопасности навигационной ситуации строится из частных оценок опасности судов-целей и навигационных опасностей и ограничений как минимум оценок по шкале RYG.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.
2. Васильев С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев, А. К. Жерлов, Е. А. Федосов [и др.]. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
3. Дмитриев С. П. Система интеллектуальной поддержки судоводителя при расхождении судов / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 98–105.
4. Викулин П. В. Алгоритм безопасного движения судна по контрольным точкам маршрут / П. В. Викулин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 109–113.
5. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
6. Вагущенко Л. Л. Мультиагентный подход к решению задач расхождения судов / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко // Судовождение: сб. науч. трудов ОНМА. — 2008. — № 15. — С. 35–43.
7. Цымбал Н. Н. Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении / Н. Н. Цымбал, Р. Ю. Бужбецкий // Судовождение. — 2006. — № 12. — С. 124–129.
8. Емельянов М. Д. Применение условных рисков для оценки безопасности морских судов / М. Д. Емельянов // Транспорт РФ. — 2009. — №. 3–4 (22–23). — С. 40–45.

9. Дорожко В. М. Экспертные представления об основных ситуационных моделях коллективного движения судов / В. М. Дорожко, А. Н. Лебедева // Проблемы управления. — 2006. — № 4. — С. 43–49.

10. Смоленцев С. В. Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев, Б. В. Афанасьев, А. Е. Филяков, Д. В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.

THE PROBLEM OF ESTIMATION OF NAVIGATION SITUATION IN THE SEA

The article discusses the problem of maritime safety. To solve it developed an automated vessels collision avoidance system. An important component of this system is the module of estimation of the navigation situation. Estimation of the navigation situation is based on the forecast trajectories own ship and other vessels. This takes into account the risk of collisions with vessels sailing in the area, as well as the availability of navigation dangerous and restrictions. The Safety scale was developed. A system of rules for the risk assessment of each of the target vessels was proposed. To estimate the risk of collision with a target vessel use parameters of approach: time, distance and the speed of closest approach. The article presents a production system by which risk assessment is carried out of each of the vessels on the proposed scale. Based on the risk assessment of each of the vessels constructed a comprehensive estimation of safety to navigation.

Keywords: collision avoidance system, the estimation of navigation situation, risk of collision.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnye pravila preduprezhdenija stolknovenij sudov v more 1972 g. (MPPSS-72). 5-e izd.* M.: Morkniga, 2011.
2. Vasilev, S. N., A. K. Zherlov, E. A. Fedosov, and et al. *Intellektualnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami.* M.: Fizmatlit. 2000.
3. Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, A. V. Osipov, and G. N. Romanycheva. "System of intelligent support of a ship navigator for collision avoidance." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 42.2 (2003): 256-263.
4. Vikulin, P. V. "Algorithm of safe ship movement along control points of the route." *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2011): 109-113.
5. Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. *Podderzhka reshenij po rashozhdeniju s sudami.* Odessa: Feniks, 2010.
6. Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. "Multiagentnyj podhod k resheniju zadach rashozhdenija sudov." *Sudovozhdenie: Sb. nauch. trudov ONMA* 15 (2008): 35-43.
7. Cymbal, N. N., and R. Ju. Buzhbeckij. "Formalizacija MPPSS-72 v chasti koordinacii vzaimodejstviya sudov pri rashozhdenii." *Sudovozhdenie* 12 (2006): 124-129.
8. Emeljanov, M. D. "Primenenie uslovnyh riskov dlja ocenki bezopasnosti morskikh sudov." *Transport RF* 3-4(22-23) (2009): 40-45.
9. Dorozhko, V. M., and A. N. Lebedeva. "Expert judgments about basic situational models of collective movements of ships." *Control Sciences* 4 (2006): 43-49.
10. Smolentsev, S. V., B. V. Afanasiev, A. E. Filyakov, and D. V. Kunits. "Concept of automated intelligent system for ships collision avoidance." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4(70) (2012): 11-14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Smolentsev Sergey Victorovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 октября 2015.