

## Оценка вероятности корректного определения типа взаимодействия судов в ситуации опасного сближения

А. В. Янчецкий

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина  
Corresponding author. E-mail: burmaka1964@gmail.com

Paper received 10.01.21; Accepted for publication 23.01.21.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2021-250IX31-10>

**Аннотация.** Рассмотрены причины появления неопределенности во взаимодействии судов в процессе расхождения, возникающие из-за недостатков МППСС-72. Произведена формализация возможных исходов оценки начальной ситуации сближения судов, исходя из субъективной интерпретации требований МППСС-72. Показано, что система бинарной координации МППСС-72 характеризуется частичной координируемостью и оценена вероятность корректного определения типа взаимодействия судов при их расхождении.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, расхождение судов, бинарная координация, МППСС-72, типы взаимодействия судов.

**Введение.** Несмотря на принимаемые меры, аварийность судов от столкновений остается на довольно высоком уровне. В последнее время суда оснащаются интегрированными мостиковыми системами, подходы ко всем крупным портам и транзитным районам интенсивного судоходства оборудуются системами управления движением, развиваются методы Е-Навигации. Однако проблема предупреждения столкновений судов остается не решенной. Одной из существенных причин этого является субъективность оценки ситуаций сближения и принятия решений. Следовательно, в настоящее время разработка методов повышения эффективности процессов расхождения судов является актуальной.

**Краткий обзор публикаций по теме.** Для выбора маневра расхождения предложено многочисленных методов: нелинейной интегральной инвариантности, оптимальных дискретных процессов, ситуационного управления, теории игр, линейного и нелинейного программирования и другие, обзор большинства из которых представлен в статье [1].

Формализация взаимодействия судов в ситуации опасного сближения предложена в работе [2] и показано, что основным способом описания взаимодействия пары опасно сближающихся судов является бинарная координация, которая реализована в МППСС-72, а в работах [3, 4] рассмотрены вопросы бинарной координации и мера их эффективности.

На современном этапе основные разработки по рассматриваемой проблематике посвящены методам для систем предупреждения столкновений автономных судов и распределенным алгоритмам для ситуаций сближения нескольких судов, в которых они могут обмениваться намерениями, используя систему AIS, что рассматривается в работе [5]. В ней обсуждаются как методы, которые базируются на математических моделях, так и способы, использующие искусственный интеллект. В работах [6,7] предложены процедуры получения маневров расхождения для автономных судов. Распределенные алгоритмы для ситуаций сближения нескольких судов представлены в работе [8].

Работы [9-11] посвящены вопросу учета имеющихся в районе предстоящего расхождения навигационных опасностей при выборе маневра расхождения изменением курса.

Работа [12] посвящена методам определения комбинированного Z-маневра собственного судна для расхождения с несколькими целями.

**Цель.** Целью настоящей статьи является разработка

процедуры оценки вероятности корректного определения типа взаимодействия судов в ситуации их опасного сближения.

**Материалы и методы.** В работе [13] рассмотрены этапы процесса принятия решения по оценке необходимости расхождения судов в ситуации их сближения и показано, что процесс принятия решения содержит следующие этапы:

1. Контроль окружающей обстановки, т. е. относительных положений и параметров движения окружающих подвижных объектов.
2. Обнаружение ситуации сближения судов.
3. Оценка степени опасности в случае сближения судов.
4. Выбор параметров маневра расхождения.

На втором этапе процесса принятия решения по параметрам окружающей обстановки следует рассчитать скорость изменения дистанции между судами с помощью выражения:

$$\dot{D} = V_j \cos(K_j - \alpha) - V_i \cos(K_i - \alpha),$$

где  $K_i$ ,  $V_i$ ,  $K_j$  и  $V_j$  - параметры движения судов;

$\alpha$  - пеленг с  $i$ -го судна на  $j$ -е судно.

При отрицательном значении  $\dot{D}$  суда сближаются.

На третьем этапе процесса принятия решения производится оценка степени его опасности. Для этого необходимо рассчитать дистанцию  $D_{\min}$  кратчайшего сближения.

Ситуационное возмущение  $\omega$  возникает при прогнозируемом попадании судов в домен недопустимых позиций, т. е., когда прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения  $D_{\min}$  меньше значения предельно-допустимой дистанции сближения  $D_d$ , величина которой зависит от формы домена недопустимых позиций и ракурса сближения судов.

Ситуационное возмущение  $\omega$  может принимать три значения:

$$\omega = \begin{cases} 0, & D_{\min} > D_d, \\ 1, & D_{\min} \leq D_d, t_{zij} > 0, \\ 2, & D_{\min} \leq D_d, t_{zij} \leq 0, \end{cases}$$

где  $t_{zij}$  - интервал времени до попадания судна в подмножество недопустимых позиций.

Значениям ситуационного возмущения  $\omega$  соответствуют первая, вторая и третья области взаимных обя-

занностей.

В зависимости от степени опасности ситуации сближения, т. е. значения ситуационного возмущения  $\omega > 0$ , на четвертом этапе принятия решения следует выбрать стратегию расхождения.

В качестве показателя эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов целесообразно предложить вероятность безопасного завершения процесса расхождения  $P_S$ , которая является произведением вероятностей  $P_i$  успешного исхода этапов процесса принятия решения по выбору стратегии расхождения:

$$P_S = P_1 P_2 P_3 P_4.$$

**Результаты и их обсуждение.** Исходя из анализа особенностей системы координации, которая реализована в МППСС-72, в данной работе рассмотрим вероятность успешного исхода второго и третьего этапов, как вероятность  $P_k$  корректного определения типа взаимодействия судов.

Неопределенность во взаимодействии судов возникает еще на этапе определения уровня опасности ситуации сближения. Мерой опасного сближения судов является соотношение дистанции кратчайшего сближения и предельно - допустимой дистанцией кратчайшего сближения. И, хотя величину предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения МППСС – 72 не регламентируют, в морской практике в открытом море принята величина этой дистанции равная примерно двум милям.

Отсутствие алгоритма определения ситуации опасного сближения ведет к тому, что в реальных условиях плавания величина предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения определяется субъективно судоводителем, причем на одном из судов сближение могут расценивать как опасное, а на втором считать, что суда расходятся чисто.

Последствия такой совместной противоречивой оценки могут оказаться непредсказуемыми и привести к аварийной ситуации.

В случае определения области взаимных обязанностей возможны два варианта: оба судна определили одну и ту же область или разные смежные области. Если обозначить через  $S_1$  и  $S_2$  области взаимных обязанностей, которые определены соответственно первым и вторым судами, то возможны следующие исходы  $Z_i$ , как показано в табл. 1.

При наличии исхода  $Z_0$ , когда одно из судов расценивает ситуацию сближения безопасной, а второе судно полагает наличие первой области взаимных обязанностей, возможны следующие типы взаимодействий:

**Таблица 1.** Возможные исходы

| Исход $Z_i$ | $S_1$ | $S_2$ |
|-------------|-------|-------|
| $Z_0$       | 0(1)  | 1(0)  |
| $Z_1$       | 1     | 1     |
| $Z_2$       | 2     | 2     |
| $Z_3$       | 3     | 3     |
| $Z_4$       | 1     | 2     |
| $Z_5$       | 2     | 1     |
| $Z_6$       | 2     | 3     |
| $Z_7$       | 3     | 2     |

- одно из судов следует с неизменными параметрами ( $S_i=0$ ), а второе судно полагает, что оно пассивное ( $S_j=0$ );

- одно из судов следует с неизменными параметрами ( $S_i=0$ ), а второе судно полагает, что оно активное ( $S_j=1$ ).

В первом случае (исход  $Z_{01}$ ) допустим первое из судов оценило сближение как опасное, и таким, как судно, которому уступают дорогу. Второе же судно считает сближение безопасным и вообще не намерено маневрировать. Через некоторое время первое судно, согласно Правилу 17, предпринимает меры по предупреждению столкновения и начинает маневрировать вблизи второго судна, вызывая возможную реакцию второго судна, что может ухудшить ситуацию вплоть до столкновения.

Во втором случае (исход  $Z_{02}$ ) второе судно выполняет маневр расхождения и столкновение предупреждается.

Если каждое из судов определило первую область взаимных обязанностей, т. е. реализовался исход  $Z_1$ , то судам необходимо определить свои маневры, которые составляют стратегию расхождения.

В первой области взаимных обязанностей одной из наиболее неопределенных является ситуация расхождения двух судов, имеющих, согласно Правилу 18, одинаковый повышенный приоритет, например, двух рыбаков, либо судов, ограниченных своей осадкой и т. п. В такой ситуации МППСС – 72 не координируют взаимодействие расходящихся судов, что усугубляет и без того их затруднительное положение, увеличивая риск опасности столкновения при их расхождении.

Данную ситуацию будем характеризовать не координируемым исходом  $Z_{11}$ .

Однако и в случае расхождения судов с механическим двигателем возникает ряд неопределенных ситуаций. Одной из таких ситуаций является ситуация, когда суда с механическим двигателем движутся прямо навстречу друг другу. Согласно Правилу 14 два судна с механическим двигателем, следующие навстречу друг другу (на контркурсах) должны отвернуть вправо и чисто расходясь левыми бортами. Отметим, что такой маневр расхождения требует определенной синхронизации в маневрировании обоих судов, что Правилами никак не регламентировано. Поэтому возможно возникновение опасности столкновения. Описанная ситуация соответствует исходу  $Z_{12}$ .

Также возможна ситуация, в которой два судна с механическим двигателем находятся на встречных параллельных курсах, однако курсовые углы превосходят значения, характерные для ситуации Правила 14, причем дистанция кратчайшего сближения меньше предельно-допустимой дистанции. К примеру, если дистанция между судами около трех миль, то при предельно-допустимой дистанции 0.5 мили курсовые углы могут достигать не менее 10 градусов. Такая ситуация сближения является опасной и может характеризоваться первой областью взаимных обязанностей. Однако приведенная ситуация не попадает ни под Правило 14, ни под Правило 15 (пересекающиеся курсы). Следовательно, такая ситуация МППСС – 72 не регламентируется четкой и однозначной координацией, что создает неопределен-

ность при маневрировании и появляется угроза столкновения расходящихся судов. Рассмотренную ситуацию отнесем к исходу  $Z_{13}$ .

Рассмотрим исход  $Z_2$ , когда оба судна идентифицировали вторую области взаимных обязанностей. Объективные критерии оценки такой области в МППСС – 72 отсутствуют, зато имеются субъективные критерии для второй области взаимных обязанностей «... это другое судно, когда для него становится очевидным, что судно обязанное уступить дорогу, не предпринимает соответствующего действия, ..., может предпринять действие, чтобы избежать столкновения только собственным маневром» [10].

Неопределенные требования в условиях взаимодействия двух судов, с учетом индивидуальных субъективных оценок судоводителей каждого из судов, прежде всего, аннулирует основной принцип координации МППСС – 72, т. е. возможность четкого прогноза в поведении каждого из взаимодействующих судов, в результате чего действие судов будут не согласованы, что может повести к тяжелым последствиям. Правило 17, определяющее вторую область взаимных обязанностей и разрешающее пассивному судну маневрировать для расхождения, лишает прогноза каждое из расходящихся судов в части поведения партнера. Так судно, которое должно уступать дорогу, во второй области взаимных обязанностей лишено информации о предполагаемом поведении пассивного судна, которое, согласно МППСС – 72, имеет право, как продолжать движение с неизменными параметрами, так и предпринять маневр для расхождения собственными силами. С другой стороны судно, которому должны уступать дорогу, намереваясь предпринять маневр расхождения, может ожидать как маневрирования со стороны другого активного судна, так и его дальнейшего неизменного движения. Потеря прогноза в усложняющейся ситуации опасного сближения и фактическое отсутствие координации во второй области взаимных обязанностей резко снижает безопасность процесса расхождения. Следовательно, исход  $Z_2$  является не координируемым исходом.

В ситуации, когда оба судна идентифицировали третью область взаимных обязанностей, реализуется исход  $Z_3$ , который характеризуется полной неопределенностью во взаимодействии судов и отсутствием координации. В такой ситуации очень большой риск столкновения судов.

Рассмотрим исход  $Z_4$ , когда одно из судов определяет первую область взаимных обязанностей и должно уступить дорогу, а второе судно идентифицировало вторую область взаимных обязанностей и себя как пассивное судно. В такой ситуации Правилами не координируется взаимодействие судов и маневр второго судна может повести к возникновению риска столкновения. Следовательно, исход  $Z_4$  относится к не координируемым исходам.

В случае реализации исхода  $Z_5$ , при котором одно из судов определяет первую область взаимных обязанностей и себя как пассивное судно, а другое судно - вторую область взаимных обязанностей и должно уступить дорогу, действуя согласно Правилам суда произведут согласованный маневр расхождения. Поэтому исход  $Z_5$  является координируемым исходом.

Исходы  $Z_6$  и  $Z_7$  имеют место, когда одно из судов идентифицировало вторую область взаимных обязанностей, а другое - третью область. Если судно во второй области взаимных обязанностей является активным, то реализован исход  $Z_6$ , причем маневры обоих судов не координируемые. Если же судно со второй областью взаимных обязанностей является пассивным, то возникает исход  $Z_7$ , при котором не возникает риск столкновения судов.

Следует отметить, что МППСС – 72 координирует взаимодействие только двух судов в условиях открытого моря, т.е. наличие второй опасной цели или мешающего судна, как и навигационных опасностей, в Правилах не предусмотрено. Поэтому возможны еще два исхода -  $Z_8$ , в ситуации опасного сближения судов при наличии третьего судна и  $Z_9$ , в случае, если в районе проведения маневра расхождения находятся навигационные опасности. Перечисленные два исхода нарушают координируемость взаимодействия судов при расхождении.

Подведем итоги относительно рассмотренных исходов, поместив результаты в табл. 2.

Таблица 2. Результаты анализа исходов

| № п/п | Исход    | Характеристика координируемости | Показатель |
|-------|----------|---------------------------------|------------|
| 1     | $Z_{01}$ | частично координируемый         | 0,5        |
| 2     | $Z_{02}$ | координируемый                  | 1          |
| 3     | $Z_{11}$ | отсутствие координации          | 0          |
| 4     | $Z_{12}$ | частично координируемый         | 0,5        |
| 5     | $Z_{13}$ | частично координируемый         | 0,5        |
| 6     | $Z_2$    | отсутствие координации          | 0          |
| 7     | $Z_3$    | отсутствие координации          | 0          |
| 8     | $Z_4$    | отсутствие координации          | 0          |
| 9     | $Z_5$    | координируемый                  | 1          |
| 10    | $Z_6$    | отсутствие координации          | 0          |
| 11    | $Z_7$    | координируемый                  | 1          |
| 12    | $Z_8$    | частично координируемый         | 0,5        |
| 13    | $Z_9$    | частично координируемый         | 0,5        |

Следует отметить, что исходы, предусмотренные Правилами 9-15, являются координируемыми с показателями равными 1. Всего число исходов равно 20. Сумма показателей координируемости равна 12,5, следовательно, средний показатель равен 0,625. Поэтому МППСС – 72, как система бинарной координации, согласно среднему показателю, ближе всего характеризуется частичной координируемостью. Исходя из изложенного, можно допустить, что при отсутствии координируемости два из трех случаев завершаются благополучно, а при полной координации все три случая благополучны, поэтому вероятность благополучного завершения этого этапа  $P_k$  может быть оценена, как отношение  $2,625/3$ , т. е.  $P_k = 0,875$ .

#### Выводы

1. Рассмотрены причины появления неопределенности во взаимодействии судов в процессе расхождения,

возникающие из-за недостатков МППСС-72.

2. Произведена формализация возможных исходов оценки начальной ситуации сближения судов, исходя из субъективной интерпретации требований МППСС-72.

3. Показано, что система бинарной координации МППСС-72 характеризуется частичной координируемостью и оценена вероятность корректного определения типа взаимодействия судов при их расхождении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tam C. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / C.Tam, R.Bucknall, A.Greig //The Journal of Navigation. - 2009. - 62 (3). - P. 455-476.
2. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбetsкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
3. A. Volkov. Appraisal of the Coordinability of the Vessels for Collision Avoidance Maneuvers by Course Alternation / A. Volkov, E.Pyatarov & A. Yakushev// Activites in Navigation.-Adam Weintrit/ - 2015, P. 195 – 200.
4. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков., С.И. Заичко // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.15. - Одесса: "Изда-тИнформ", 2008. – С. 166 – 171.
5. Statheros T. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / T. Statheros, G. Howells, K. M. Maier //Journal of Navigation. - 2008. - 61(1). - P.129–142.
6. Kuwata Y. Safe maritime autonomous navigation with colregs, using velocity obstacles / Y. Kuwata, M. T. Wolf, D. Zarzhitsky, T. L. Huntsberger // IEEE Journal of Oceanic Engineering. - 2014. - 39(1). - P. 110–119.
7. Woerner K.L. Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles / K.L.Woerner, M.R.Benjamin, M.Novitzky, J. J.Leonard // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE. - 2016. - P. 1–6.
8. Hirayama K. DSSA+: Distributed Collision Avoidance Algorithm in an Environment where Both Course and Speed Changes are Allowed / K.Hirayama, K.Miyake, T.Shiota, T.Okimoto //TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2019. - 13(1). - P. 23-29.
9. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103 - 107.
10. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
11. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.
12. Вагущенко Л.Л. Улучшение поддержки решений по предупреждению столкновений //Л.Л.Вагущенко, А.А.Вагущенко //Судовождение: Сб. науч. трудов НУ «ОМА». – 2018. – Вып. 28. - С. 24-34.
13. Янчetsкий А.В. Способ оценки эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов / Янчetsкий А.В.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2020): Матеріали XII Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2020 – Херсон: ХДМА, 2020. – С. 127–130.

#### REFERENCES

2. Pyatakov E.Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / Pyatakov E., Buzhbetskiy R., Burmaka I., Bulgakov A., Kherson: Grin D.S., 2015. - 312 p.
4. Pyatakov E. N. Estimation of efficiency of pair strategies of going away vessels / Pyatakov E. N., Zaichko S.I.// Sudovozhdenie.- 2008.- №15.- P. 166 – 171.
9. Petrichenko E.A. Conclusion of condition of existence of great number of possible manoeuvres of divergence taking into account navigation dangers/ Petrichenko E.A. // Sudovozhdenie.- 2003.- №6.- p. 103 – 107.
10. Tsymbal N. Flexible strategies of divergence of vessels / N. Tsymbal, I. Burmaka, E. Tyupikov, Odessa: KP OGT, 2007. – 424 p.
11. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A.- LAP LAMBERT Academic Publishing, - Saarbrücken (Germany), – 2016. - 585 p.
12. Vagushchenko L.L. Improved collision avoidance support /L.L.Vagushchenko, A.A.Vagushchenko //Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov NU OMA. - 2018.- №28. - P. 24 – 34.
13. Yanchetskiy A. Method of estimation of efficiency of the analytical collision avoidance systems vessels / Yanchetskiy A.// Modern information and innovative technologies on a transport (MINTT-2020): Materials XII International sciences. conf., 27-29 apr., 2020. – P. 127–130.

#### Estimation of probability of correct determination of type of cooperation of vessels in the situation of dangerous rapprochement

**O. V. Yanchetskiy**

The reasons of appearance of vagueness in cooperation of vessels in the process of divergence are considered, arising up from the Colregs failings. Formalization of possible ends of estimation of initial situation of rapprochement of vessels is produced, coming subjective interpretation of the Colregs requirements from. It is shown that the system of the binary coordination Colregs is characterized partial coordination and probability of correct determination of type of cooperation of vessels at their divergence is appraised.

**Keywords:** safety of navigator, divergence of vessels, binary coordination, Colregs, types of cooperation of vessels.