

УДК 656.61.052

DOI: 10.31653/2306-5761.34.2023.10-20

DETERMINATION OF MANEUVER TO RETURN TO THE PASSAGE ROUTE

ВИЗНАЧЕННЯ МАНЕВРУ ДЛЯ ПОВЕРНЕННЯ ДО МАРШРУТУ ПЕРЕХОДУ

L.L. Vagushchenko, D.Sc., professor, A.J. Kozachenko, senior lecturer

Л.Л. Вагущенко, д.т.н., професор, О.Ю. Козаченко, ст. викладач

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська Морська Академія», Україна

ABSTRACT

This study presents an algorithmic approach to finding an effective ζ -maneuver for multi-ship situations, where a ship deviates from its transition route to avoid collision with other vessels. The proposed algorithm involves the enumeration of a representative discrete set of solutions to find a ζ -maneuver that ensures a safe return to the transition route. The maneuver starts at the minimum distance from the own ship and has the required lateral distance and angle of approach to the route. The algorithm also addresses situations with several targets by introducing virtual targets and automatically finding a maneuver that avoids collision.

To aid decision-making, the study develops a two-dimensional matrix that provides the coordinates of the angle of approach to the route and the distance from the own ship to the start of the maneuver, where the cross-track distance is equal to a given value. The matrix presents the sufficient, acceptable, and unacceptable ζ -maneuver variants based on the shortest distance from the own ship to the targets. The matrix is represented by a color-coded diagram that allows for easy selection of a suitable maneuver providing the necessary offset from the track line.

The study accounts for the dynamics of the own ship in a simplified way by assuming that course changes are made within a given radius. To validate the proposed algorithms, a program was implemented in Delphi programming language, and tests were carried out in various multi-ship situations. The results confirmed the effectiveness of the proposed algorithms in selecting ζ -maneuvers for returning to the transition route while avoiding collisions.

In summary, the study presents a novel algorithmic approach for selecting an effective ζ -maneuver in multi-ship situations, accounting for the dynamics of the own ship and using a color-coded diagram for easy selection. The proposed algorithms have been validated through simulations, highlighting their potential for improving the safety and efficiency of maritime navigation.

Keywords: collision avoidance, ζ -manoeuvre, enumerative method, diagram to select manoeuver.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Через ускладнення умов судноплавства потрібні постійні зусилля і нові підходи для забезпечення належного рівня безпеки розходження суден. На сучасному етапі ця проблема вирішується з урахуванням перспективи введення в експлуатацію автономних суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Послідовність дій для уникнення зіткнень із суднами зазвичай називають стратегією розходження, а скінченну дискретну множину, яка замінює з достатньою для цієї задачі повнотою безперервну множину можливих рішень, - представницькою (репрезентативною). У

роботах [1-5] проаналізовано методи визначення стратегій розходження із суднами, що базуються на різних концепціях, у ситуаціях із рухомими і нерухомими перешкодами. Для знаходження ефективних рішень у таких умовах використовують різні методи. Серед них і наближені процедури дискретної оптимізації, включно евристичні (природні) алгоритми: "генетичний", "поведінки рою бджіл", "поведінки колонії мурашок", "бактеріального пошуку їжі", "випадкового дерева, яке швидко досліджує" тощо. Наведемо низку робіт, у яких було застосовано процедури оптимізації з-поміж тих, що були використані для розв'язання задач розходження суден. У роботі [6] представлено заснований на алгоритмі розподіленої локальної оптимізації метод визначення маневру розходження в ситуації з кількома суднами. Для моделювання траєкторії уникнення зіткнення в статті [7] запропоновано засновану на генетичному алгоритмі процедуру. Алгоритм "мурашиної колонії" використовується під час планування шляху для уникнення зіткнень у дослідженнях [8, 9]. Розв'язання такої задачі, засноване на оптимізації за допомогою "рою бджіл", показано в роботі [10]. Простий біологічно орієнтований алгоритм для забезпечення навігації без зіткнень характеризується в статті [11]. У статті [12] звернено увагу на отримання розв'язку анти-колізійної задачі на основі використання нечіткої логіки із застосуванням розподіленого алгоритму перебору. Планування оптимальної стратегії розходження на базі алгоритму "випадкового дерева, яке швидко досліджує" висвітлюється в роботі [13].

Наближені алгоритми оптимізації призначені для пошуку рішень у ситуаціях із великою кількістю можливих варіантів, коли аналіз усіх із них займає надто великий, неприйнятний під час управління, час. Ці процедури значно зменшують час пошуку найкращого рішення шляхом врахування тільки однієї або кількох його властивостей, на основі чого скорочується перебір можливих варіантів. Але з іншого боку, таке обмеження ускладнює знаходження областей бажаних з різних точок зору допустимих стратегій. Оскільки зазвичай врахування всіх чинників, що впливають на процес розходження, є проблематичним, ці області можуть бути потрібні для контролю отриманого рішення і його корекції в разі потреби.

Такого недоліку немає у точних методів дискретної оптимізації, зокрема, методу перебору. Через велику кількість варіантів дій для уникнення зіткнення в недалекому минулому цей метод не давав змоги в бортових системах для уникнення зіткнень отримувати рішення в реальному часі. На сучасному етапі, завдяки істотному підвищенню швидкодії комп'ютерів, це стало можливим, і питання оптимізації розходження на основі перебору представницької множини рішень стало на порядок денний.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Мета дослідження - розробка для ситуацій із кількома суднами заснованих на методі перебору репрезентативної дискретної множини рішень процедур знаходження і корекції ζ -маневру (ZM) для повернення на маршрут переходу після відхилення від нього для уникнення зіткнення.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися завдання:

- розроблення алгоритму, що дає змогу в ситуаціях із кількома суднами автоматично знаходити ефективний ζ -маневр для повернення на маршрут переходу після відхилення від цього маршруту для уникнення зіткнення за допомогою комбінованого ζ -маневру;
- отримання діаграми областей достатніх, допустимих і неприпустимих ζ -маневрів, що полегшує судноводівці оцінку і корекцію знайденого комп'ютером рішення.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Нижче використані скорочення: OS - own ship; TS - target ship; CPA - closest point of approach; DCPA - distance at CPA; TCPA - time to CPA; CZM - combined ζ -maneuver (маневр, що включає зміну курсу разом зі швидкістю в одній точці і повернення в іншій точці до початкових значень цих параметрів); ZM - окремий випадок CZM, коли в першій і другій точці

змінюється тільки курс. Для ДСПА і ТСПА також застосовуються позначення d і τ . Відповідні умовам плавання межі ДСПА, ТСПА і мінімально допустиме в цих умовах значення ДСПА позначалися d_z , τ_z і d_p . OS було присвоєно номер "0", а цілям - від 1 до n ,

Стратегії уникнення зіткнень можуть бути різними. Для забезпечення на суднах високого рівня розуміння анти-колізійних дій, яких вживає те чи інше судно, бажано, якщо дають змогу обставини, використовувати для розходження стратегію одного типу. На нашу думку, як таку стандартну процедуру може бути прийнято послідовність дій OS, що містить:

- ухилення за допомогою CZM від зіткнення зміщенням на паралельну исходній лінії шляху, по якій рух безпечний;
- проходження цією лінією повз ціль, що становила небезпеку;
- повернення за допомогою ZM на маршрут переходу.

Заснований на переборі представницької дискретної множини варіантів алгоритм визначення CZM для розходження з кількома цілями та навігаційними перешкодами представлено в роботі [14]. Охарактеризуємо тут пропоновану процедуру отримання ZM для повернення на маршрут переходу. Це завдання може вирішуватися або разом із визначенням CZM для ухилення від небезпеки, або в процесі виконання CZM, або після його завершення. У перших двох випадках параметри маневру повернення розраховуються на момент закінчення CZM, а в останньому - на момент початку розв'язання задачі. Під час пошуку ZM динаміку OS враховували спрощено. Вважалося, що зміни курсу будуть виконуватися із заданим радіусом (R_z). Траєкторія таких поворотів досить точно може бути представлена сукупністю прямолінійного відрізка AK і дуги KF кола з цим радіусом (рис. 1). Довжину прямолінійного відрізка брали такою, що дорівнює $c \cdot L_{os}$, де L_{os} і c - довжина судна і коефіцієнт, що враховує його початкову поворотність.

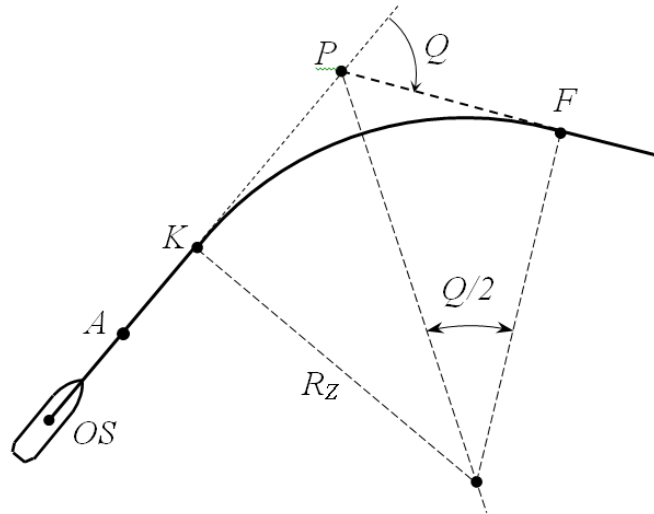


Рис. 1. Представлення траєкторії зміни курсу:
 Q - кут повороту; A і F - точки його початку і кінця; P - шляхова точка.

Параметри повороту знаходили за відомими формулами

$$AP = AK + R_z \cdot \sin(Q/2); \quad PF = R_z \cdot \sin(Q/2); \quad (1)$$

$$S_Q = AK + R_z \cdot Q; \quad t_Q = S_Q / V_{os}; \quad (2)$$

де V_{os} – швидкість OS; S_Q , t_Q – довжина траєкторії та час повороту.

Обрана стратегія повернення OS на маршрут переходу показана на рис. 2.

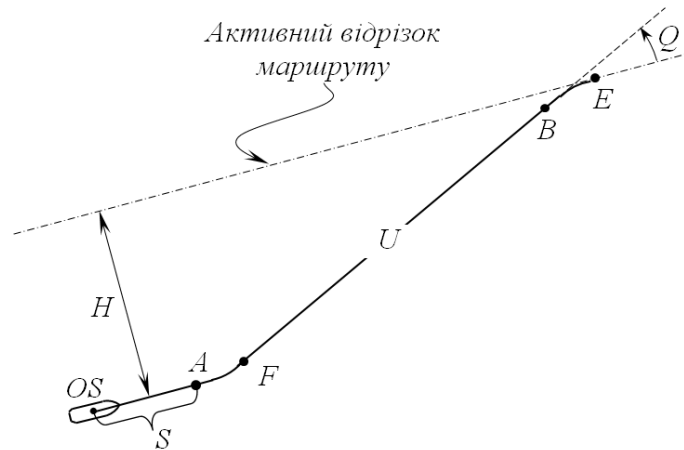


Рис. 2. ZM для повернення на маршрут переходу:
A і E - точки початку і кінця ZM; H - бічне відхилення від маршруту; S - відстань до початку ZM; U=FB - прямолінійна ділянка шляху повернення

Для ZM, що намічається, найменше з ДСПА цілей на курсі повернення позначалося d_{m1} , на активному відрізку маршруту (з моменту приходу на нього) - d_{m2} , а менше з цих значень - d_m . Ефективним для приходу на маршрут за заданих значень H_Z і Q_Z вважали ζ -маневр, що не супроводжується загрозою зіткнення, початок якого розташований на мінімальній відстані (S_m) від OS. Блок-схему алгоритму розв'язання цієї задачі методом перебору значень S за умови, що цілі не будуть маневрувати, наведено на рис. 3, де Δ_S - крок перебору.

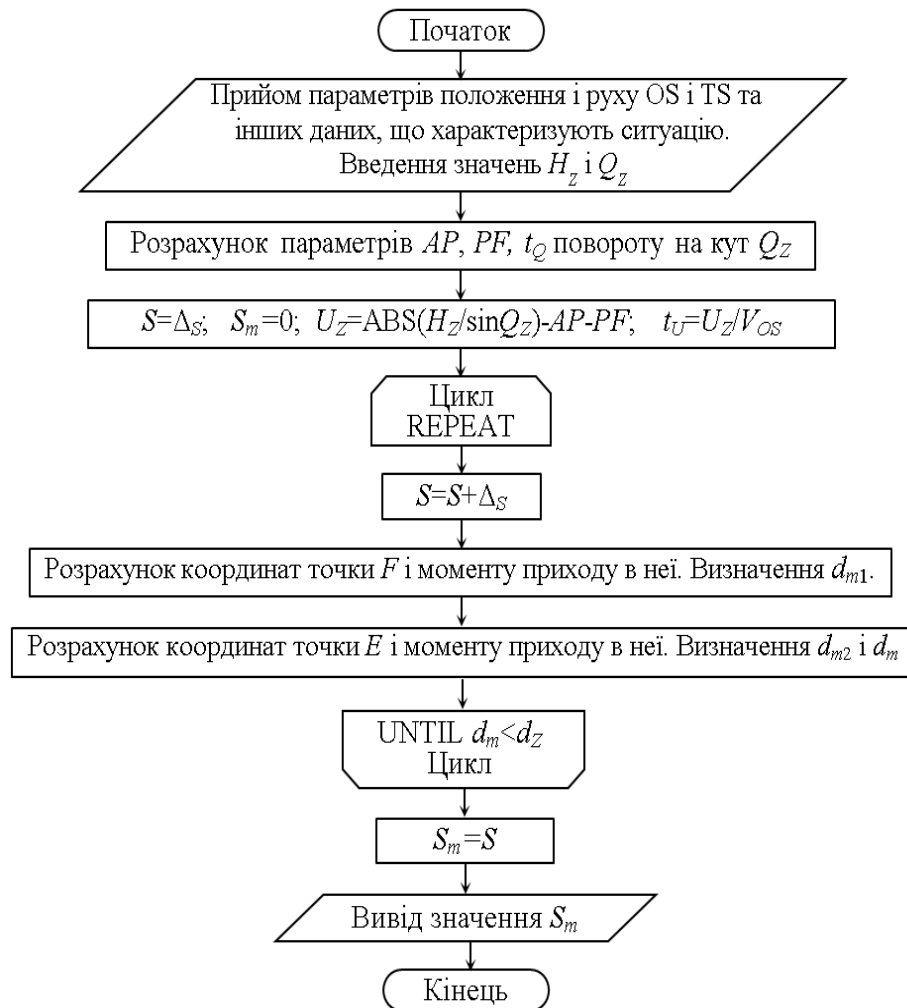


Рис. 3. Алгоритм розрахунку S_m безпечного ζ -маневру повернення на маршрут

До такого випадку зводилося і знаходження S_m за намічених однією або кількома TS змін параметрів руху в одній або у двох точках. Траєкторія TS у цьому випадку містить відповідно два або три відрізки. Перетворення задачі до варіанта з неманевруючими цілями виконували шляхом введення однієї або двох додаткових (віртуальних) цілей. Елементами руху самої цілі та її віртуальних доповнень вважалися відповідно значення курсу і швидкості на першому, другому і третьому (якщо він є) відрізку її траєкторії. Інтервали обліку руху цієї групи цілей виділялися накладенням обмежень на ТСРА. На рис. 4 наведено приклад введення віртуальних суден 2a, 2b для ділянок "II" і "III" траєкторії цілі 2. Положення цих суден, як і реальних цілей, відповідає моменту початку розв'язання задачі.

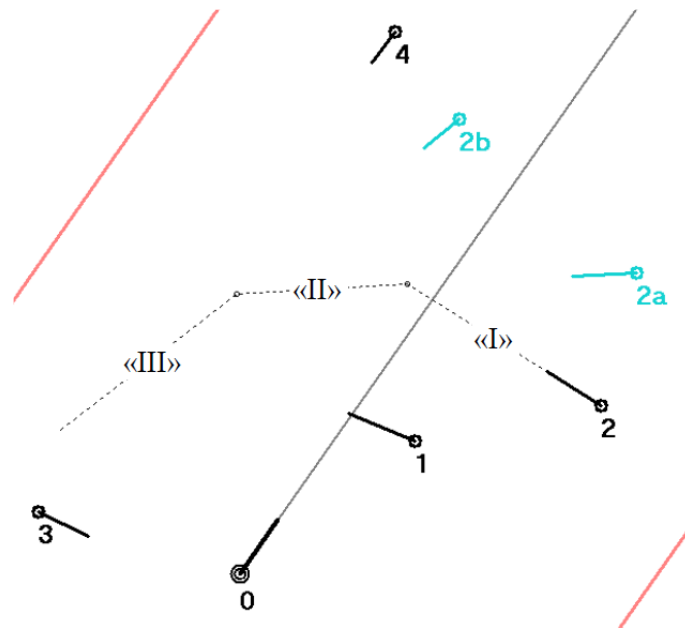


Рис. 4. Приклад із віртуальними цілями

Блок-схему алгоритму розв'язання другої поставленої задачі показано на рис. 5. У цьому алгоритмі достатнім за ДСРА ($d_m \geq d_z$) варіантам маневру присвоєно значення «1» ($Z_{JK}=1$); допустимим ($d_p \leq d_m \leq d_z$) - «2» ($Z_{JK}=2$), а неприпустимим ($d_m < d_p$) - «3» ($Z_{JK}=3$).

Матриця Z значень Z_{JK} представляється QS -діаграмою, в якій області Z_1 , Z_2 , Z_3 відповідно достатніх, недостатніх допустимих, і неприпустимих за ДСРА варіантів ZM мають світло-зелений, світло-коричневий і темно-червоний колір. За цією діаграмою легко вибрати відповідний для повернення на маршрут маневр.

Запропоновані алгоритми було реалізовано в програмі, складеній мовою програмування Delphi. У цій програмі "горизонт" цілей, що враховуються під час визначення маневру, прийнято рівним 12 М. Число TS і відрізків у траєкторії цілей, які змінюватимуть параметри свого руху, обмежено відповідно значеннями 20 і 3. Крок перебору для S було прийнято рівним 1 cb, а для Q - 2° .

Охарактеризуємо отримання за цією програмою ZM для повернення до маршруту переходу на прикладі ситуації з 5 цілями з механічним двигуном. У цьому прикладі OS , що відстоїть на 16 cb праворуч від активного відрізка маршруту переходу, має безпечно повернутися на нього під кутом $Q_z = 30^\circ$. Межа (d_z) достатніх ДСРА, і мінімально допустима (d_p) ДСРА вважалися рівними 5 cb і 3 cb. Довжина (L) суден, початкові параметри руху OS (K , V), TS (K_0 , V_0) і положення TS відносно OS (P - пеленг, D дистанція) наведено в табл. 1 і 2.

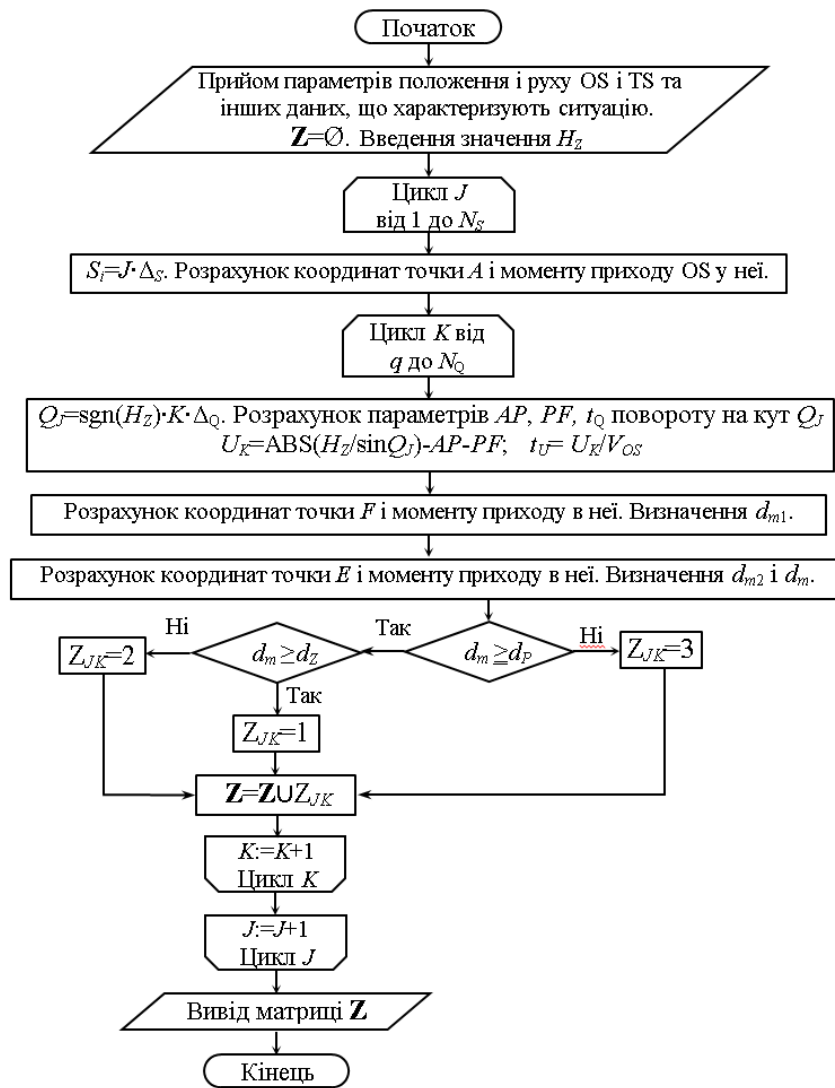


Рис. 5. Алгоритм розрахунку матриці Z для побудови діаграми, що полегшує вибір ζ -маневру

Таблиця 1 - Дані OS

L, m	K, dg	V, kn	Rz, cb	c
220	345	17,1	3,5	1,0

Таблиця 2 - Дані TS

TS	1	2	3	4	5
L, m	250	140	175	330	80
P, dg	53	65	287	12	358
D, cb	19.2	34.9	18.5	55.4	62.2
K0, dg	293	302	116	217	122
V0, kn	19.1	16.9	14.8	10.1	9.4

Під час розв'язання першого з розглянутих завдань відстань S_m до початку достатнього за DCPA ζ -маневру вийшла рівною 15 cb. Знайдена під час виконання другого завдання QS -діаграма показана на рис. 6 (a).

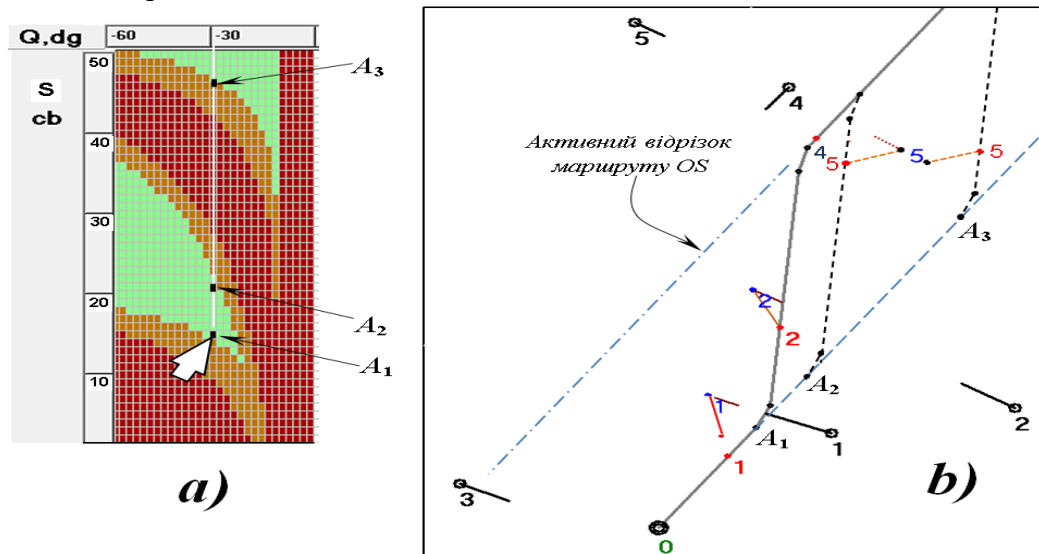


Рис. 6. До визначення початку безпечного ЗМ для повернення на маршрут

За цією діаграмою можна встановити, що початок достатніх за DCPA ζ -маневрів із $Q=30^\circ$ розташований на відрізку A_1A_2 і після точки A_3 . Відстані від OS до точок A_1, A_2, A_3 дорівнюють відповідно $S_1=15$ cb, $S_2=23$ cb і $S_3=47$ cb. "Коридор", який визначається значеннями S_1 і S_2 , не має бути надто вузьким, щоб залишалася можливість, за необхідності, скорегувати в ньому рух OS. За діаграмою можна встановити, що в цьому випадку відстань між A_1, A_2 стає більшою при збільшенні Q .

На рис. 6 (b) наведено схему, що містить положення суден на початковий момент часу, і траєкторії ζ -маневру OS з початком у точках A_1, A_2, A_3 . Біля цих траєкторій показано CPA-мітки цілей на момент їхнього найкоротшого зближення з OS. CPA-мітка цілі з номером J містить прогнозовані положення OS і TS_J на момент їхнього найкоротшого зближення, базовий відрізок завдовжки d_z з початком у прогнозованому місці TS_J , спрямований на прогнозоване положення OS, і короткий допоміжний відрізок, що вказує на TS_J . Якщо базовий відрізок CPA-мітки TS_J перетинає траєкторію OS, то в процесі розходження відстань між OS і TS_J буде недостатньою. У програмі ця обставина використовується для перевірки впливу на безпеку обраного OS маневру можливої або відомої зміни параметрів руху цілі в одній або у двох точках. Дані такої цілі включають довжину відрізків її траєкторії та параметри руху на них. Комп'ютером із кроком 1 с. обчислюються майбутні відстані між власним судном, рух якого відповідатиме обраній для розходження стратегії, і ціллю, що виконує план свого руху. На карті відображається траєкторія ζ -маневру OS з початком у визначеній на діаграмі курсором точці, і відповідні їй CPA-мітки цілей. Вони показують, чи буде такий варіант ζ -маневру небезпечним щодо цілі, яка змінює параметри руху. Переміщаючи курсор по діаграмі з візуальним контролем на карті траєкторії OS з CPA-мітками, можна вибрати кращий варіант маневру.

Побудуємо QS -діаграму, вважаючи, що цілі зберігатимуть свій курс і швидкість. Припустимо, що TS_2 у точці P_1 знижуватиме швидкість до 14.2 вузла, а в точці P_2 ляже на курс 6° . Відображувана в цьому разі з CPA-мітками траєкторія маневру OS з початком у точці A_1 ($S_1=15$ cb) показана на рис. 7. Цей варіант маневру небезпечний, оскільки базовий відрізок CPA-мітки TS_2 перетинає траєкторію OS.

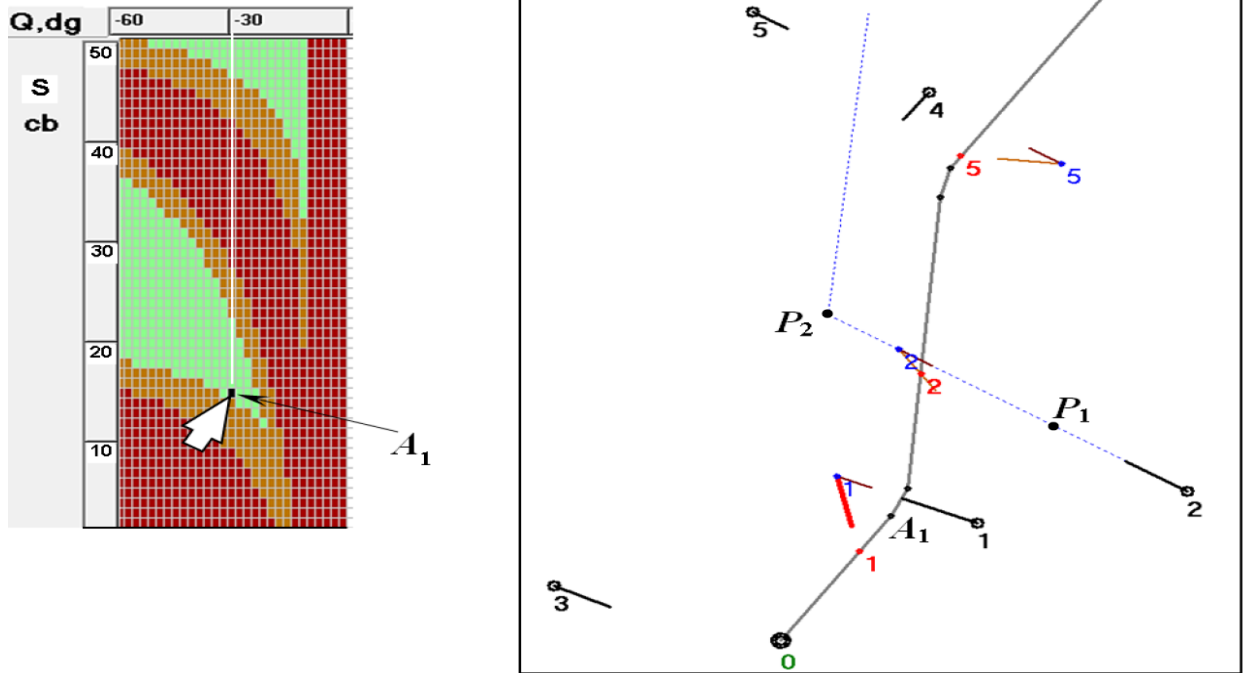


Рис. 7. CPA-мітки цілей і траєкторія маневру OS з початком у точці A_1

Пересуваючи курсор по діаграмі, і забезпечуючи, щоб жоден із базових відрізків CPA-міток цілей не перетинав траєкторію OS, оператор може вибрати параметри найкращого, з його точки зору, маневру. На рис. 8 такий маневр обрано в точці з $Q_Z = 30^\circ$ і $S = 21$ cb.

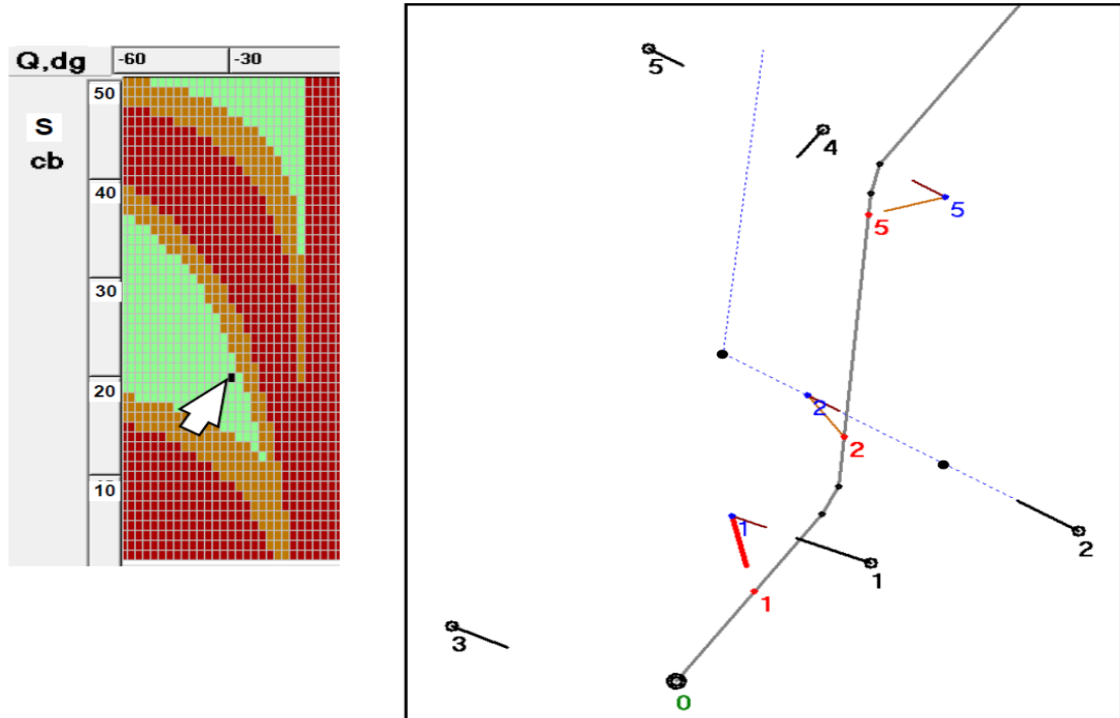


Рис. 8. До вибору безпечного ζ -маневру OS курсором

Програма також дає можливість отримання QS-діаграми з урахуванням відомої або передбачуваної зміни параметрів руху однієї або декількох цілей.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Розроблений алгоритм дає змогу автоматично знаходити найближчий початок ζ -маневру OS для повернення на маршрут переходу під заданим кутом після відхилення від цього маршруту для уникнення зіткнення в ситуаціях із кількома цілями, коли всі вони зберігатимуть курс і швидкість, і коли деякі з них змінять ці параметри відомим чином,

Пропонована діаграма областей достатніх, припустимих і неприпустимих варіантів ζ -маневру повернення на маршрут переходу дає можливість просто і швидко судноводієві самому знайти підходящий ЗМ, а також оцінити розрахований комп'ютером варіант, і, в разі необхідності, скорегувати його.

Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності бортових систем для уникнення зіткнень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Huang Y., Chen L., Chen P., Negenborn R.R., P.H.A.J.M. van Gelder, "Ship collision avoidance methods: State-of-the-art," *Safety Science*, vol. 121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.018>, pp. 451–473, 2020.
2. Tam C., Bucknall R., Greig A., "Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters," *The Journal of Navigation*, vol. 62 (3), doi: <https://doi.org/10.1017/S0373463308005134>, pp. 455-476, 2009.
3. Бурмака И.А., *Теория и методы внешнего оптимального управления судами в ситуации опасного сближения: монография*. Одесса: НУ "ОМА", 2019.
4. Мальцев А.С., Тюпиков Е.Е., Ворохобин И.И., *Маневрирование судов при расхождении. 3-е изд., перераб. и доп.* Одесса: Морской тренажерный центр, 2013.
5. Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е., *Гибкие стратегии расхождения судов*. Одесса: КП ОГТ, 2007.
6. Kim, D.G., Hirayama K., Park G.K., "Collision Avoidance in Multiple-Ship Situations by Distributed Local Search," *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 18(5), doi: 10.20965/jaciii. 2014.p0839, pp. 839-848, 2014.
7. Smierzchalski, R., Michalewicz Z., "Modeling of ship trajectory in collision situations by an evolutionary algorithm," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 4(3), doi: 10.1109/4235.873234, pp. 227-241, 2000.
8. Lazarowska, A., "Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation," *Journal of Navigation*, vol. 68(02), doi: <https://doi.org/10.1017/S0373463314000708>, pp. 291-307, 2014.
9. Tsou M.C., Hsueh C.K., "The Study of Ship Collision Avoidance Route Planning by Ant Colony Algorithm," *Journal of Marine Science and Technology - Taiwan*, vol. 18(5), doi: 10.51400/2709-6998.1929, pp. 746-756, 2010.
10. Kang, Y.T., Chen W.J., Zhu D.Q., Wang J.H., Xie Q.M., "Collision Avoidance Path Planning for Ships by Particle Swarm Optimization," *Journal of Marine Science and Technology - Taiwan*, vol. 26(6), doi: 10.6119/JMST.201812_26(6).0003, pp 777-786, 2018.
11. Savkin, A.V., Wang C., "A simple biologically inspired algorithm for collision-free navigation of a unicycle-like robot in dynamic environments with moving obstacles," *Robotica*, vol. 31(06), doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574713000313>, pp. 993-1001, 2013.
12. Zhang, J.F., Zhang D., Yan X.P., Haugen S., Soares C.G., "A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs," *Ocean Engineering*, vol. 105, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.054>, pp. 336-348, 2015.

13. Zaccone R.A., “COLREG-Compliant Optimal Path Planning for Real-Time Guidance and Control of Autonomous Ships,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol 9 (4), doi: <https://doi.org/10.3390/jmse9040405>, pp. 405, 2021.
14. Вагущенко А.А., Вагущенко Л.Л., “Численный метод выбора маневров расхождения с несколькими судами,” *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VIII(27), issue: 224, doi: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-19>, с. 74-80, 2020.

REFERENCES

1. Huang Y., Chen L., Chen P., Negenborn R.R., P.H.A.J.M. van Gelder, “Ship collision avoidance methods: State-of-the-art,” *Safety Science*, vol. 121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.018>, pp. 451–473, 2020.
2. Tam C., Bucknall R., Greig A., “Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters,” *The Journal of Navigation*, vol. 62 (3), doi: <https://doi.org/10.1017/S0373463308005134>, pp. 455-476, 2009.
3. Burmaka I.A., *Teoria i metody vneshnego optimal'nogo upravleniya sudami v situacii opasnogo sblizhenia: monografiya*. Odessa: NU "OMA", 2019. [in Russian].
4. Malcev A.S., Tjupikov E.E., Vorohobin I.I., *Manevrirovanie sudov pri rashozdenii*. Odessa: Morskoy trenazernyi centr, 2013. [in Russian].
5. Tsymbal N.N., Burmaka I.A., Tjupikov E.E. *Gibkie strategii rashozdeniya sudov*. Odessa: KP OGT, 2007. [in Russian].
6. Kim, D.G., Hirayama K., Park G.K., “Collision Avoidance in Multiple-Ship Situations by Distributed Local Search,” *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 18(5), doi: 10.20965/jaciii.2014. p 0839, pp. 839-848, 2014.
7. Smierzchalski, R., Michalewicz Z., “Modeling of ship trajectory in collision situations by an evolutionary algorithm,” *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 4(3), doi: 10.1109/4235.873234, pp. 227-241, 2000.
8. Lazarowska, A., “Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation,” *Journal of Navigation*, vol. 68(02), doi: <https://doi.org/10.1017/S0373463314000708>, pp. 291-307, 2014.
9. Tsou M.C., Hsueh C.K., “The Study of Ship Collision Avoidance Route Planning by Ant Colony Algorithm,” *Journal of Marine Science and Technology - Taiwan*, vol. 18(5), doi: 10.51400/2709-6998.1929, pp. 746-756, 2010.
10. Kang, Y.T., Chen W.J., Zhu D.Q., Wang J.H., Xie Q.M., “Collision Avoidance Path Planning for Ships by Particle Swarm Optimization,” *Journal of Marine Science and Technology - Taiwan*, vol. 26(6), doi: 10.6119/JMST.201812_26(6).0003, pp 777-786, 2018.
11. Savkin, A.V., Wang C., “A simple biologically inspired algorithm for collision-free navigation of a unicycle-like robot in dynamic environments with moving obstacles,” *Robotica*, vol. 31(06), doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574713000313>, pp. 993-1001, 2013.
12. Zhang, J.F., Zhang D., Yan X.P., Haugen S., Soares C.G., “A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs,” *Ocean Engineering*, vol. 105, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.054>, pp. 336-348, 2015.

13. Zaccone R.A., “COLREG-Compliant Optimal Path Planning for Real-Time Guidance and Control OF AUTONOMOUS SHIPS,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol 9 (4), doi: <https://doi.org/10.3390/jmse9040405>, pp. 405, 2021.
14. Vagushchenko A.A., Vagushchenko L.L. “Numerical method for selection of maneuvers to avoid collisions with several vessels,” *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VIII(27), issue: 224, doi: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-19>, pp. 74-80, 2020.