

УДК 656.61.052

DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.36-48

TARGET DANGER DOMAINS FOR CONSTRICTED WATERS AND ALGORITHMS FOR THEIR APPLICATION IN COLLISION ASSESSMENT

ДОМЕНИ НЕБЕЗПЕКИ ЦІЛЕЙ ДЛЯ ОБМЕЖЕНИХ ВОД ТА АЛГОРИТМИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ЗІТКНЕНЬ

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 "Odesa maritime academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The vessel domain of danger is a widely used construct in collision-avoidance research, yet definitions vary in methods, shapes, safety criteria, influencing factors, and interpretation. Prior studies have used circular, elliptical, polygonal, composite, and (a)symmetric domains, placed around targets, own ship, or both. This paper proposes two target-centred danger domains tailored for constricted waters. The first comprises two half-circles bridged by a rectangular insert; the second combines a half-ellipse, a half-circle, and a rectangular insert. These shapes are argued to be rational for close-quarters encounters. Domains are parameterized by target size, the speed ratio (target/own ship), and user-selected safe passing limits abeam and astern, with inputs sourced from radar and AIS. To include own-ship dimensions, a corrective expansion is applied based on own-ship length, beam, and the difference between true course and course relative to the target. Algorithms are developed to compute quantities needed for risk assessment and maneuver selection, notably the boundaries of dangerous courses and speeds of the own ship relative to a given target. Procedures are provided both neglecting and accounting for own-ship inertia. Worked examples demonstrate the algorithms' validity and illustrate practical use in identifying prohibited headings/speeds and determining feasible evasive actions under confined-water constraints. The approach offers a structured, sensor-driven framework for collision-risk quantification and maneuver planning that adapts to target characteristics, encounter geometry, hydrodynamic limitations, and operator-defined safety margins.

Keywords: collision avoidance, domain of danger, risk of collision, encounter situation, evading maneuver.

АНОТАЦІЯ

Судновий домен небезпеки є широко вживаним поняттям у дослідженнях уникнення зіткнень, проте його визначення відрізняються за методами побудови, формою доменів, критеріями безпеки, урахованими факторами, методологіями дослідження та інтерпретаціями. У попередніх роботах розглядалися кругові, еліптичні, багатокутні, комбіновані та (а)симетричні відносно курсу судна домени, розміщені навколо цілей, власного судна або обох одночасно. У цій роботі пропонуються два домени небезпеки для стіснених вод, центровані на цілі. Перший складається з двох півкіл, з'єднаних прямокутною вставкою; другий поєднує півеліпс, півколо та прямокутну вставку. Обрані форми є раціональними для зближень на малих дистанціях. Параметризація доменів здійснюється за розмірами цілі, відношенням її швидкості до швидкості власного судна та вибраними користувачем безпечними дистанціями проходу на траверзі й по кормі; вхідні дані надходять з РЛС і АІС. Щоб урахувати вплив габаритів власного судна на дистанцію розходження, застосовано коригувальне розширення домену залежно від

довжини й ширини судна та різниці між його істинним курсом і курсом відносно цілі. Розроблено алгоритми обчислення величин, необхідних для оцінювання ризику зіткнення та вибору маневрів, зокрема меж небезпечних курсів і швидкостей власного судна відносно заданої цілі. Подано методики розрахунку цих меж без урахування та з урахуванням інерційних властивостей судна. Валідність алгоритмів підтверджено на конкретних прикладах, що демонструють практичне визначення заборонених курсів/швидкостей і вибір досяжних ухильних дій в умовах обмежень стиснених вод. Запропонований підхід є структурованою, заснованою на даних датчиків рамкою для кількісної оцінки ризику зіткнення та планування маневру, яка адаптується до характеристик цілі, геометрії зближення, гідродинамічних обмежень і заданих оператором запасів безпеки.

Ключові слова: уникнення зіткнень, домен безпеки, не зіткнення, ситуація зближення, маневр розходження.

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

Проблема безпечного розходження суден у морі залишається однією з ключових у сфері навігаційної безпеки. Незважаючи на вдосконалення технічних засобів спостереження, автоматизацію навігації та впровадження сучасних систем управління рухом, рівень аварійності, пов'язаної із зіткненнями суден, залишається суттєвим. Особливо гостро ця проблема проявляється в умовах обмежених вод, де маневровий простір суден зменшений, а навігаційні ризики зростають унаслідок дії берегових ліній, мілин, течій та інтенсивного руху.

Поява та швидкий розвиток автономних і напіваавтономних суден, збільшення їхніх розмірів і кількості, а також розширення зон експлуатації у вузьких фарватерах та портових підходах вимагають перегляду існуючих методів оцінювання безпеки зближення. Традиційні підходи, розроблені для відкритих вод, не враховують вплив просторових обмежень, особливостей взаємодії суден у тісних умовах і різниці у швидкостях та габаритах.

Одним із базових понять у теорії уникнення зіткнень є судновий домен — область навколо судна, потрапляння до якої іншого судна вважається небезпечним. Проте більшість відомих моделей доменів побудовані для умов відкритого моря, де судна мають достатній простір для маневру. Для обмежених акваторій, де дистанції між суднами суттєво менші, форма і розміри домену мають визначатися з урахуванням геометрії фарватеру, розмірів і відносних швидкостей суден.

Отже, виникає науково-практична задача — розробити раціональні форми доменів безпеки цілей для обмежених вод та створити алгоритми їх застосування під час оцінювання ситуацій зближення і вибору безпечних маневрів. Розв'язання цієї задачі сприятиме підвищенню ефективності систем попередження зіткнень, як у традиційному, так і в автономному судноводінні.

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

Суднові домени широко використовуються у сфері оцінювання безпеки зіткнення суден і прийняття рішень щодо їх запобігання. У науковій літературі представлено велику кількість моделей доменів — кругових, еліптичних, полігональних, симетричних і несиметричних, а також таких, що поєднують різні геометричні форми. Дослідження спрямовані на вдосконалення визначення розмірів доменів, адаптацію до конкретних умов плавання та інтеграцію в системи підтримки навігаційних рішень.

У роботі [1] подано узагальнений аналіз понад сорока публікацій у 21 журналі за період 1970–2016 рр., присвячених концепції суднового домену. Перевагою є системність та статистичний підхід до класифікації напрямів досліджень. Водночас, праця має оглядовий характер і не пропонує нових моделей або кількісних залежностей, а отже не вирішує питань практичної реалізації доменів.

У статті [2] запропоновано метод визначення багатокутного домену, що поєднує аналітичний і статистичний підходи та враховує досвід судноводіїв. Основною перевагою є інтеграція суб'єктивного (людського) фактору, однак недоліком — обмежена валідація та недостатня кількість експериментальних перевірок у різних типах акваторій.

У дослідженні [3] представлено систему підтримки прийняття рішень на основі нечіткої полігональної моделі домену. Метод забезпечує врахування асиметрії й невизначеності у русі цілей. Серед недоліків — складність обчислень і відсутність порівняння з класичними моделями доменів у реальних сценаріях.

У роботі [4] запропоновано алгоритм попередження зіткнень на основі зон перешкод від цілей (OZT). Рішення є фундаментальним для формування сучасних систем уникнення зіткнень. Водночас метод залежить від точності AIS-даних і не враховує змін маневрових характеристик суден під час зближення.

Модель [5] поєднує концепцію домену із просторовим картуванням ризику у регіональному масштабі. Перевагою є можливість візуалізації просторового розподілу небезпеки, але відсутня оцінка точності моделі та її придатності для реального часу.

У статті [6] розроблено динамічні моделі доменів для обмежених водних шляхів, які враховують тип судна, його швидкість і ширину каналу. Ця робота має безпосереднє значення для аналізу пропускну здатності каналів. Недоліком є відсутність універсальних параметрів, що обмежує застосування за межами конкретних сценаріїв.

Робота [7] поєднує концепцію домену з підходом «near-miss» для управління ризиком. Її сильна сторона — практична орієнтація на прибережні води, проте метод слабо формалізований і важко інтегрується в автоматизовані системи.

Дослідження [8] зосереджене на впливі розмірів і швидкості судна на ефективний домен. Автори використовують емпіричні залежності, що дозволяє кількісно оцінювати домен залежно від параметрів судна, але модель є статичною і не враховує динамічних змін під час маневрування.

У статті [9] наведено практичний приклад застосування аналізу домену на річці Темза. Результати підтверджені реальними спостереженнями, однак дослідження має локальний характер і не розробляє загальної методології.

Робота [10] демонструє використання глибокого навчання з підкріпленням (RL) для автоматичного уникнення зіткнень. Серед переваг — адаптивність і здатність до самооптимізації, однак відсутнє урахування геометрії домену як частини алгоритму.

У статті [11] проведено систематичний і критичний огляд моделей судових доменів, визначено основні підходи та суперечності у трактуванні концепції. Праця має значну бібліографічну цінність, але не пропонує нових моделей.

У дослідженні [12] розроблено модель оцінювання ризику зіткнення на основі домену, придатну для систем попередження «near-miss». Недоліком є відсутність адаптації до обмежених вод і фокус переважно на відкритих акваторіях.

У роботі [13] представлено параметр домену, що враховує маневрові характеристики та тип ситуації зближення. Сильна сторона — врахування динаміки судна, слабка — відсутність практичних прикладів і валідації.

Дослідження [14] запропонувало емпірично відкалібрований домен безпеки для обмежених вод, що враховує локальні умови навігації. Серед недоліків — вузька область застосування (тільки канали, для яких проводилась калібровка).

Робота [15] аналізує вплив доступної зони маневрування на форму домену у відкритих і обмежених водах. Вона підтверджує важливість просторових обмежень, але не подає конкретного математичного опису домену.

Нарешті, у статті [16] розглянуто інтелектуальний алгоритм уникнення зіткнень на основі глибоких Q-мереж (DDQN) з урахуванням правил COLREGs. Метод є перспективним для автономних суден, однак не забезпечує пояснюваності рішень і не інтегрує концепцію суднового домену безпосередньо.

Отже, попри значну кількість підходів і напрацювань, єдиної думки щодо оптимальної форми та параметрів домену, придатного для використання в автоматизованих системах уникнення зіткнень у вузьких водах, поки що не сформовано. Це визначає актуальність подальших досліджень, спрямованих на розроблення раціональних форм доменів безпеки цілей, адаптованих до умов обмеженого простору.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування раціональних форм доменів безпеки цілей для умов обмежених вод, які враховують геометричні характеристики суден, співвідношення їхніх швидкостей і особливості маневрування у звужених акваторіях.

Очікуваним результатом є створення практично придатного методу оцінювання ситуацій безпеки зіткнення в обмежених водах, який може бути інтегрований у бортові навігаційні системи підтримки прийняття рішень.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Під час висвітлення результатів дослідження використовували такі скорочення та позначення:

OS або A - власне судно (Own ship), буквою A позначається також центр маси OS;

TS або B - ціль (Target ship), буквою B позначається також центр маси TS;

L_A , S_A і L_B , S_B – довжина, ширина OS і TS;

BCR або σ - відстань перетину OS курсу цілі по носі від її центру маси (Bow crossing range);

CPA – точка найкоротшого зближення (Closest point of approach);

DCPA або δ - відстань найкоротшого зближення центрів мас суден (Distance at CPA);

X_M , Y_M – координати будь-якої точки (тут точки M) у прямокутній системі координат XOY , початок якої пов'язаний із точкою земної поверхні в районі знаходження OS, вісь OY спрямована на північ, а вісь OX - на схід.

D_{MN} і P_{MN} – дистанція між двома будь-якими точками (тут між точками M і N) і пеленг з першої точки на другу;

K_A , V_A і K_B , V_B – курс, швидкість OS і TS;

K_W , V_W – курс і швидкість OS відносно TS.

Під час розв'язання поставленої задачі передбачалося, що: дані про цілі надходять від радіолокаційного обладнання та транспондера AIC; параметри положення, руху, взаємного

розташування OS і TS відносяться до центрів маси цих суден; контури судна можна уявити прямокутником зі сторонами, що дорівнюють його довжині та ширині.

Різні варіанти розміщення доменів суден — біля власного судна, біля цілей або одночасно біля обох — розглядалися у низці досліджень [11; 15; 16]. Вибір конкретного підходу залежить від призначення моделі: домени власного судна частіше використовуються для оцінювання безпечного простору навігації, тоді як домени цілей — для виявлення зон потенційної небезпеки зближення.

У цьому дослідженні обрано другий варіант — формування доменів навколо цілей, оскільки саме він дає змогу:

- оцінювати небезпеку з боку кожної конкретної цілі незалежно від характеристик власного судна;
- зменшити обчислювальні витрати, оскільки порівняння виконується лише щодо цільових доменів;
- спростити інтеграцію методу у бортові системи, які працюють із даними AIS та РЛС щодо зовнішніх об'єктів.

Домен цілі (Target Domain of Danger, **TTD**) — це область навколо судна-цілі, потрапляння до якої власного судна вважається небезпечним або таким, що створює загрозу зіткнення.

Основними факторами, що впливають на форму і розміри доменів, є: тип району плавання і щільність руху в ньому; особливості (розміри, маневреність, швидкість) OS і TS; похибки визначення положення і параметрів руху TS. При використанні інформації AIS про цілі, похибки їхніх параметрів незначні, і ними можна знехтувати.

Під час розв'язання завдань запобігання зіткненням у водах, де судна розходяться на невеликих відстанях, доцільно використовувати домени спеціальної форми, що поєднують простоту геометричного опису з можливістю точного відображення меж безпечного зближення.

Подібні комбіновані форми доменів — із двох півкіл, з'єднаних прямокутною вставкою, або з напівеліпсом у носовій частині — запропоновані авторами цієї роботи на основі аналізу існуючих моделей [6; 8; 14; 15]. Вибір саме таких геометрій зумовлений тим, що:

- півкола та прямокутна частина забезпечують просте аналітичне задання меж домену, придатне для реалізації в алгоритмах реального часу;
- напівеліптична форма у носовій частині краще відображає збільшену небезпечну зону попереду судна, що виникає при високих відносних швидкостях;
- обидва варіанти дають змогу урахувати розміри цілі та співвідношення швидкостей суден, що особливо важливо в умовах обмеженого простору маневрування.

Основними операціями, що виконуються на основі доменів небезпеки при визначенні та вирішенні колізійних ситуацій, є:

- знаходження параметрів, що характеризують небезпеку зіткнення, для підтримуваних або запланованих значень курсу і швидкості.
- розрахунок меж небезпечних значень курсу або швидкості при виборі дії для розходження.

Розрахунок параметрів цих операцій включає формули для вирішення трикутника швидкостей (рис. 1). У судноводінні визначальними елементами цього трикутника зазвичай

вважають напрямки (K_A, K_B, K_W) і модулі (V_A, V_B, V_W) що утворюють його вектори швидкостей. Кути (α, β, γ) трикутника швидкостей знаходяться за значеннями K_A, K_B, K_W

$$\alpha = K_W - K_A; \quad \beta = 180^\circ - K_W + K_B; \quad \gamma = K_B - K_A. \quad (1)$$

Формули для знаходження одних елементів трикутника за значеннями інших добре відомі і нижче не наводяться.

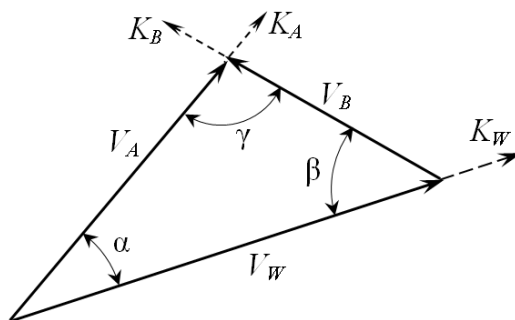


Рис. 1. Елементи трикутника швидкостей

Оцінка небезпеки зіткнення за першим доменом. Форма першого домену показана на рис. 2, на якому межа безпечних відстаней проходження TS по бортах і кормі позначена r , а по носі – $a = k_r \cdot r$, де $k_r > 1$ – коефіцієнт, що враховує відношення швидкостей TS і OS (V_B/V_A) і величину r .

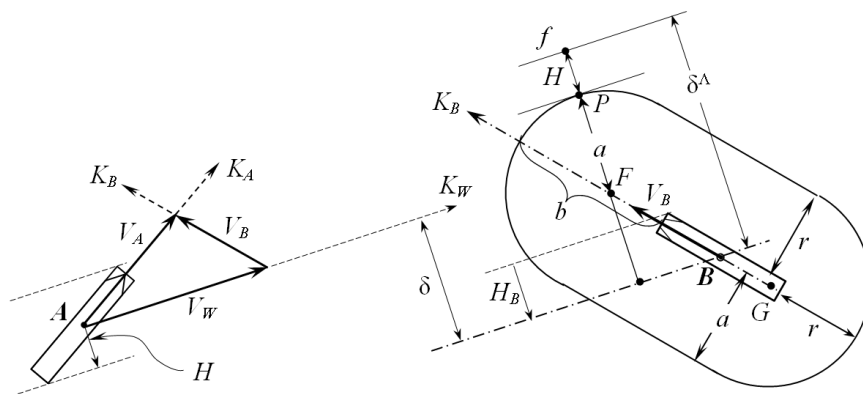


Рис. 2. До оцінки небезпеки зіткнення за першим доменом

На рис.2: F, G і $a = r + S_B/2$ – центри носового, кормового півколів та їхній радіус; H_B – відстань від лінії K_W , що проходить через центр маси TS, до крайньої точки контуру TS, H – відстань від лінії K_W , що проходить через центр маси OS, до крайньої точки контуру OS; δ^A – межа безпечних значень δ .

Межі домену повністю визначаються за значеннями r, V_A, V_B, L_B, S_B . Значення r вибирають залежно від типу району плавання і щільності руху в ньому. Нижньою його межею зазвичай вважається відстань, на якій під час руху на паралельних курсах виникає явище присмоктування суден, а верхньою межею – найчастіше значення $r_{\mu} = 20$ кб. Для отримання значень k_r , відповідних різним значенням r, V_A, V_B , запропонована авторами формула

$$k_r = 1,0 + k_1 V_B/V_A (1 - k_2 \cdot r/r_{\mu}) \quad (2)$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти.

На відміну від зазвичай використовуваного постійного або залежного тільки від V_B/V_A збільшенні відстані проходження по носі цілі додатково враховується її залежність від межі безпечних відстаней проходження TS по бортах і кормі.

У табл. 1 подано значення k_r для різних значень V_B/V_A і r , коли $r_{\mu}=20$ кб, $k_1=1,5$ і $k_2=0,95$.

Таблиця 1. Коефіцієнт k_r , що відповідає різним значенням V_B/V_A і r

$r, \text{кб} \setminus V_B/V_A$	0	0,5	1,0	1,5	2,0
1,0	1,0	1,7	2,4	3,1	3,9
2,5	1,0	1,7	2,3	3,0	3,6
5,0	1,0	1,6	2,1	2,7	3,3
10,0	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6
15,0	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9
20,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2

При оцінці небезпеки зіткнення з TS виконуються такі операції.

Визначаються курс K_W і швидкість V_W OS щодо TS. Якщо курси суден не перетинаються, то $H=S_A/2$, $H_B=S_B/2$. У ситуації перетину курсів, ці параметри виходять із трикутника швидкостей.

За K_W і координатам суден знаходяться відстань δ найкоротшого зближення і значення BCR:

Коли OS перетинає курс TS по носі/кормі; межа δ^A безпечних відстаней між центрами маси суден знаходиться за формулою (3)/(4)

$$\delta^A = D_{BF} \cdot \sin(\beta) + a + H. \quad (3)$$

$$\delta^A = D_{BG} \cdot \sin(\beta) + a + H. \quad (4)$$

У цих виразах

$$D_{BF} = \frac{L_B}{2} + k_r \cdot r - a; \quad H = (L_A \cdot \sin(\alpha) + S_A \cdot \cos(\alpha))/2 \quad (5)$$

$$D_{BG} = (L_B - S_B)/2; \quad H_B = (L_B \cdot \sin(\beta) + S_B \cdot \cos(\beta))/2. \quad (6)$$

Коли $|\delta| \leq \delta^A$, ціль вважається небезпечною. Якщо $|\delta| < H + H_B$, то за незмінних параметрів руху суден буде їхній контакт наприкінці зближення.

Оцінка небезпеки зіткнення за другим доменом. Форма другого домену показана на рис. 3. На відміну від першого домену вона містить замість носового півкола напівеліпс із півосьми $b=k_r \cdot r$; $a=r+S_B/2$.

Тут розглядається тільки визначення δ^A , коли OS перетинає курс TS по носі, оскільки при перетині курсу по кормі δ^A знаходиться як за першим доменом. Щоб знайти δ^A , потрібно визначити точку P торкання еліпса прямою, паралельною лінії K_W . Для знаходження координат цієї точки розглянемо функцію, що описує еліпс, та її похідну в системі UFZ з початком у точці F (див. рис. 3)

$$Z = \frac{b}{a} (a^2 - U^2)^{1/2}; \quad Z' = c_B = -\frac{b}{a} U (a^2 - U^2)^{-1/2}. \quad (7)$$

Враховуючи, що $c_B = \tan(90^\circ - K_W + K_B)$ з виразів (7) отримаємо формули для знаходження координат U_P і Z_P точки P :

$$U_P = \pm c_B a^2 \cdot (b^2 + c_B^2 \cdot a^2)^{-1/2}; \quad Z_P = \frac{b}{a} (a^2 - U_P^2)^{1/2}. \quad (8)$$

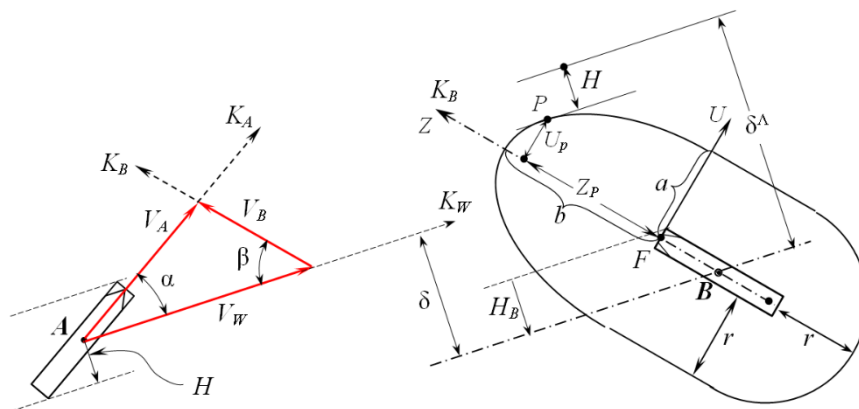


Рис. 3. До оцінки небезпеки зіткнення за допомогою другого домену

За цими значеннями обчислюється δ^A

$$\delta^A = (Z_P + L_B/2) \cdot \sin(K_W - K_B) - U_P \cdot \cos(K_W - K_B) + H. \quad (9)$$

де H знаходиться за другою з формул (5).

Визначення меж небезпечних курсів за першим доменом. Знайдемо спочатку ці межі без урахування динаміки OS. При обраному для розходження курсі корпус OS не повинен потрапляти в домен TS.

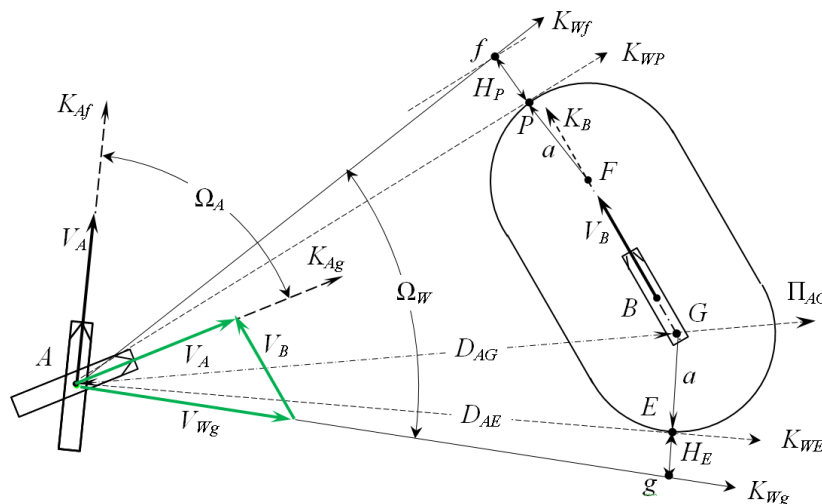


Рис. 4. До визначення меж секторів небезпечних курсів

Отримання меж небезпечних курсів пояснимо на визначенні їхніх значень K_{Wg} і K_{Ag} при перетині OS курсу TS по кормі (рис. 4). На рисунку позначено: K_{Wg} і K_{Wf} – носова і кормова щодо TS межі сектора по відношенню до TS (Ω_W) небезпечних відносних курсів OS; K_{Af} і K_{Ag} – носова і кормова щодо TS межі сектора (Ω_A) небезпечних істинних курсів OS. Принцип визначення меж K_{Wf} і K_{Af} при проходженні OS у TS по носі аналогічний. Розрахунок K_{Wg} і K_{Ag} передбачає такі операції

- Визначення за координатами центру маси і розмірами цілі координат точки G .
- Розрахунок за координатами точок A і G значень D_{AG} , Π_{AG} .
- Обчислення за гіпотенузою D_{AG} , катету a прямокутного трикутника AGE і пеленгу Π_{AG} відстані D_{AE} і відносного курсу K_{We} , лінія якого торкається межі домену.

- Знаходження за елементами K_{WE} , V_A і K_B , V_B трикутника швидкостей (на рисунку не показаний) курсу K_{AE} .
- Визначення за K_{WE} , K_{AE} та розмірами OS значення H_E , через другу з формул (5).
- Розрахунок за катетами D_{AE} , H_E прямокутного трикутника AEG і курсу K_{WE} межі K_{Wg} небезпечних відносних курсів OS.
- Обчислення за елементами K_{Wg} , V_A і K_B , V_B трикутника швидкостей, виділеного на рисунку зеленим кольором, межі K_{Ag} небезпечних курсів OS.

Розрахунок меж небезпечних курсів за другим доменом. У цьому випадку межі K_{Wg} і K_{Ag} визначаються так само, як під час їхнього розрахунку за першим доменом. Тому розглянемо тільки отримання меж K_{Wf} і K_{Af} . Розв'язання цієї задачі ґрунтується на знаходженні прямої лінії AP , що проходить через точку A і торкається еліпса в точці P (рис. 5). Координати точок A і P у системі UFZ з початком у точці F позначимо U_A , Z_A і U_P , Z_P . Формули для переходу від координат точок у системі XOY до координат в іншій прямокутній системі добре відомі.

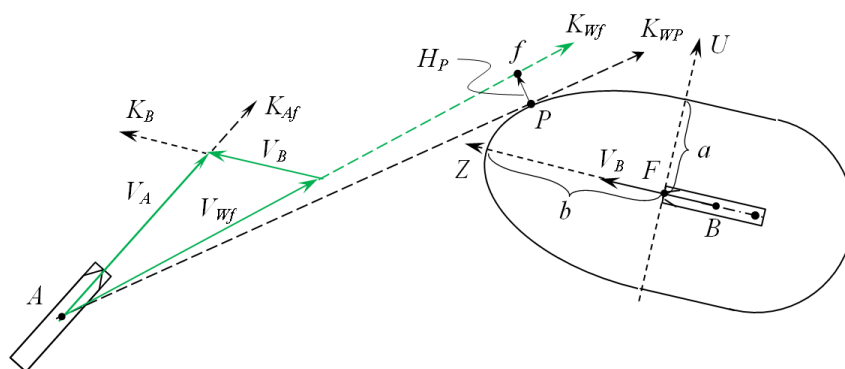


Рис. 5. До визначення межі небезпечних курсів за другим доменом

Коли пряма AP (див. рис. 5), що проходить через точку A , торкається еліпса, значення похідної рівняння еліпса ($c_B = Z'_M$) дорівнює кутовому коефіцієнту (c_A) прямої AP . Значення цих коефіцієнтів знаходять за формулами

$$c_B = -\frac{b}{a} U_P (a^2 - U_P^2)^{-1/2}; \quad c_A = \frac{Z_A - Z_P}{U_A - U_P} = \frac{Z_A - \frac{b}{a}(a^2 - U_P^2)^{1/2}}{U_A - U_P}. \quad (10)$$

Перетворивши рівність правих частин цих виразів, отримуємо рівняння для визначення U_P .

$$c_2 U_P^2 + c_1 U_P + c_0 = 0; \quad (11)$$

$$\text{де } c_2 = \frac{a^2}{b^2} \cdot Z_A^2 + U_A^2; \quad c_1 = -2a^2 U_A; \quad c_0 = a^4 - \frac{a^4}{b^2} \cdot Z_A^2$$

З цього рівняння знаходиться U_P , і за ним за другою з формул (8) обчислюється Z_P . Після цього виконуються такі операції.

По U_P , Z_P обчислюються координати X_P , Y_P точки P в системі XOY .

За координатами точок A і P у системі XOY розраховується відстань D_{AP} і відносний курс K_{WP} .

За елементами K_{WP} , V_A і K_B , V_B трикутника швидкостей (на рисунку не показаний) розраховується курс K_{AP} .

По K_{WP} , K_{AP} і розмірами OS за другою з формул (5) обчислюється значення H_P .

За катетами D_{AP} , H_P прямокутного трикутника APf і курсом K_{WP} знаходиться межа K_{WP} небезпечних відносних курсів OS.

За елементами K_{pf} , V_A і K_B , V_B трикутника швидкостей, виділеного на рис. 4 зеленим кольором, знаходиться межа K_{Af} небезпечних курсів OS.

Принцип урахування інерційності судна в ситуації з небезпекою зіткнення. Курс OS у ситуації з небезпекою зіткнення позначений K_A . Якщо TS не змінюватиме параметрів свого руху, то слідування OS цим курсом призведе до надмірного зближення суден або до їхнього зіткнення. Розрахунок сектора небезпечних курсів у такій ситуації з урахуванням динаміки OS може виконуватися таким чином.

Спочатку, як подано вище, знаходяться межі K_{Af} і K_{Ag} цього сектора без урахування динаміки судна. Будемо вважати цей результат першим наближенням шуканих значень. Подальший розрахунок розглянемо тільки для першої з цих меж, оскільки для другої він аналогічний.

Отриманому першому наближенню K_{Af} відповідає кут повороту $\theta = K_{Af} - K_A$. Для використовуваного для повороту способу за тією чи іншою моделлю динаміки судна виходять час повороту і координати OS і TS на момент кінця повороту OS. Якщо за способу повороту із заданим радіусом (R) траєкторію зміни курсу вважати дугою кола з цим радіусом, то час повороту буде $t_\theta = R \cdot \theta / V_A$. Координати суден наприкінці повороту (позначимо їх X_a , Y_a , і X_b , Y_b) будуть такими

$$X_a = X_A + 2R \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin (K_A \pm \frac{\theta}{2}), \quad Y_a = Y_A + 2R \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos (K_A \pm \frac{\theta}{2}); \quad (12)$$

$$X_b = X_B + V_B \cdot t_\theta \cdot \sin K_B, \quad Y_b = Y_B + V_B \cdot t_\theta \cdot \cos K_B. \quad (13)$$

Знак «+» у формулах (12) відповідає зміні курсу вправо, а знак «-» - вліво.

З координатами суден на момент кінця повороту розрахунок межі K_{Af} повторюється, і виходить її друге наближення. Зазвичай двох наближень достатньо для знаходження K_{Af} , з необхідною точністю.

Вхідні дані та умови розрахунків. Обчислення параметрів, наведених у формулах (1)–(13), виконуються у складі програмного модуля оцінювання ситуацій зближення, який може бути реалізований у навігаційній системі судна або підсистемі підтримки прийняття рішень.

Вхідними даними для розрахунків є вимірювані в реальному часі параметри, що надходять від радіолокаційної станції (РЛС) та автоматичної ідентифікаційної системи (AIS): координати цілей, курси, швидкості, пеленги та дистанції. Положення суден описується у прямокутній системі координат XOY, пов'язаній з районом плавання.

Вимірювані параметри містять похибки, проте при використанні даних AIS і сучасних РЛС їх середні значення не перевищують 1–2 % за дистанцією та 0,5–1° за пеленгом, що є достатнім для розрахунків у задачах уникнення зіткнень. Для зменшення впливу випадкових відхилень застосовується усереднення даних у короткому часовому інтервалі (1–3 с).

Отримані за формулами значення параметри використовуються для оцінювання ситуації небезпеки зближення та визначення безпечних напрямків маневрування, які можуть бути безпосередньо подані оператору або передані до автоматизованої системи управління рухом.

Достовірність розроблених алгоритмів підтверджено на прикладах розрахунків. Один із таких прикладів наведено нижче. Передбачається, що дані про ціль надходять із системи AIS, а поточні координати власного судна (OS) і судна-цілі (TS) подано в прямокутній системі координат XOY.

Геометричні параметри суден, а також їх положення та характеристики руху наведено в табл. 2. Для наведеного прикладу прийнято: $r=5,00$ кб, $k_r=2,1$.

Таблиця 2. Розміри суден, параметри їхнього положення і руху

L_A , м	S_A , м	X_A , кб	Y_A , кб	K_A	V_A , уз	L_B , м	S_B , м	X_B , кб	Y_B , кб	K_B	V_B , уз
224	37	2,00	2,50	33°	18,0	180	30	22,41	4,39	334°	14,2

Розраховані при оцінці небезпеки зіткнення параметри подано в табл. 3, де $\delta^{\wedge}(1)$ і $\delta^{\wedge}(2)$ – значення $\delta^{\wedge}$, отримані за першим і другим доменом.

Таблиця 3. Значення, отримані при оцінці небезпеки зіткнення

K_W	V_W , уз	H , кб	H_B , кб	σ , кб	δ , кб	$\delta^{\wedge}(1)$, кб	$\delta^{\wedge}(2)$, кб
82°	16,2	0,49	0,49	1,37	1,33	2,84	2,95

Курс цілі OS перетинає по носі. Значення $\delta < \delta^{\wedge}$ і $\delta < H + H_B$. Звідси випливає, що ціль небезпечна, і якщо судна не змінять параметрів руху, то наприкінці зближення буде контакт цих суден (зіткнення).

При розрахунку меж небезпечних значень курсу OS за першим доменом було отримано значення параметрів, що наведені в табл. 4.

Таблиця 4. Розраховані за першим доменом значення параметрів

Прохід у TS по носі	D_{AP} , кб	K_{WP}	K_{AP}	H_P , кб	K_{Wf}	K_{Af}
	18,54	53°	2°	0,53	51°	1°
Прохід у TS по кормі	D_{AE} , кб	K_{WE}	K_{AE}	H_E , кб	K_{Wg}	K_{Ag}
	21,30	100°	61°	0,49	102°	63°

Таким чином, секторами небезпечних відносних і небезпечних істинних OS курсів є: $51^\circ \leq K_W \leq 102^\circ$ і $1^\circ \leq K_A \leq 63^\circ$.

Під час розрахунку за другим доменом меж небезпечних курсів OS були отримані значення параметрів, наведені в табл. 5.

Таблиця 5. Розрахункові значення параметрів

Прохід у TS по носі	c_2	c_1	c_0	U_P , кб	Z_P , кб	D_{AP} , кб	K_{WP}	K_{AP}	H_P , кб	K_{Wf}	K_{Af}
	378	990	389	-0,48	10,45	19,05	53°	2°	0,53	51°	1°

Таким чином, для проходження OS біля цілі по носі межами небезпечних відносних і істинних курсів є 51° і 1° .

Розрахунок меж небезпечних курсу OS з урахуванням динаміки судна. Вважалося, що використовується поворот із заданим радіусом $R=4,0$ кб. Для простоти приймалося, що траєкторія повороту є дугою кола з цим радіусом. Оскільки принцип врахування динаміки судна під час розрахунку меж секторів небезпечних курсів OS за першим доменом і за другим доменом однаковий, наведемо тільки результати розрахунку за першим доменом меж небезпечних OS курсів проходження у TS по кормі (табл. 6).

Таблиця 6. Значення параметрів, отримані під час розрахунку

θ	t_0 , хв	X_a , кб	Y_a , кб	X_b , кб	Y_b , кб	D_{aE} , кб	K_{WE}	K_{aE}	H_E , кб	K_{Wg}	K_{ag}
30°	0,69	3,52	3,88	21,69	5,86	19,14	101°	62°	0,46	103°	65°

Розв'язування задач виконували і шляхом їх графічного представлення для контролю проведених обчислень. Результати обчислень не вийшли за межі похибок результатів

графічних побудов. Це дозволило вважати достовірними отримані способи розрахунку параметрів безпеки за запропонованими доменами.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Розроблено дві нові раціональні форми доменів небезпеки цілі для умов обмежених вод:

- домен, утворений двома півколами та прямокутною вставкою між ними;
- домен з межею, сформованою напівеліпсом і півколом.

Такі геометрії забезпечують коректне відображення небезпечних зон при маневруванні суден на малих дистанціях.

Запропоновано аналітичну залежність для коефіцієнта подовження домену, яка враховує співвідношення швидкостей суден і тип району плавання. Це дозволяє адаптивно змінювати форму домену залежно від навігаційної ситуації.

Розроблено алгоритми визначення меж небезпечних курсів і швидкостей власного судна відносно цілі як без урахування, так і з урахуванням його інерційності. Алгоритми дають змогу здійснювати динамічну оцінку небезпеки зіткнення.

Проведено перевірку коректності запропонованих алгоритмів на конкретних прикладах розрахунків, що підтвердило їхню достовірність і практичну придатність для реалізації у системах підтримки навігаційних рішень.

Отримані результати мають прикладне значення для підвищення безпеки судноплавства в умовах вузьких вод і можуть бути використані під час розроблення або вдосконалення бортових систем попередження зіткнень та автоматизованих засобів управління рухом суден.

REFERENCES

- [1] Baran A., Fiskin R., Kişi H. A Research on Concept of Ship Safety Domain. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 12, No. 1, 2018. pp. 43-47. <https://doi.org/10.12716/1001.12.01.04>.
- [2] Dinh G. H., Im N. K., The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area, International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, vol. 4, 2016. pp. 97-108, <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.009>
- [3] Fişkın R., Nasibov E., Yardımcı M.O. Polygonal Type Fuzzy Ship Domain-Based Decision Support System for Collision Avoidance Route Planning. Journal of ETA Maritime Science. 11 (1). 2023. pp. 2-13. <https://doi.org/10.4274/jems.2023.23245>.
- [4] Fukuto J, Imazu H. New collision alarm algorithm using obstacle zone by target (OZT). 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. The International Federation of Automatic Control, Osaka, Japan. 2013. pp. 91-96. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00044>.
- [5] Liu, Z.; Wu, Z.; Zheng, Z.; Yu, X.; Bu, X.; Zhang, W. A Domain-Based Model for Identifying Regional Collision Risk and Depicting Its Geographical Distribution. J. Mar. Sci. Eng. 2023, pp.11, <https://doi.org/10.3390/jmse11112092>.
- [6] Liu J., Feng Z., Li Z., Wang M., Wen L. R., Dynamic Ship Domain Models for Capacity Analysis of Restricted Water Channels, Journal of Navigation, vol. 69, 2016. pp. 481-503. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000764>

- [7] Marcjan K, Gucma L, Kotkowska D. The Collision Risk Management Method for Ships Navigating on Coastal Waters Based on Ship Domain and Near-Miss Concept. *European Research Studies Journal* Volume XXIV, Issue 4, 2021. pp. 127-146. <https://doi:10.35808/ersj/2567>.
- [8] Pietrzykowski Z, Wielgosz M. Effective ship domain – Impact of ship size and speed. *Ocean Engineering*. Volume 219, 2021, pp.1-20. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108423>.
- [9] Rawson A, Rogers E, Foster D, Phillips D Practical Application of Domain Analysis: Port of London Case Study, *Journal of Navigation*, vol. 67, 2014. pp. 193-209. <https://doi:10.1017/S0373463313000684>.
- [10] Sawada R, Sato K, Majima T. Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces. *Journal of Marine Science and Technology*, 26(1). 2021. pp. 509-524. <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00755-0>
- [11] Szlapczynski R., Szlapczynska J., Review of ship safety domains: Models and applications, *Ocean Engineering*, vol. 145, 2017. pp. 277-289. <https://doi:10.1016/j.oceaneng.2017.09.020>
- [12] Szlapczynski R, Szlapczynska J. A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. Volume 214, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107766>.
- [13] Tianyu Yang, Xin Wang and Zhengjiang Liu. A Novel Ship Domain-oriented Parameter of Ship Collision Risk Considering the Ship Maneuverability and Encounter Situation. *Journal of Marine Science and Application*. 22. 2023. pp. 181-198. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00330-0>
- [14] Wang Y, Chin H-C. An Empirically-Calibrated Ship Domain as a Safety Criterion for Navigation in Confined Waters. *Journal of Navigation*. 69(2). 2016, pp. 257-276. <https://doi:10.1017/S0373463315000533>.
- [15] Wielgosz M.. Ship Domain in Open Sea Areas and Restricted Waters: an Analysis of Influence of the Available Maneuvering Area. *Transnav*. Volume 11. Number 1. March 2017. pp. 99-104. <https://doi: 10.12716/1001.11.01.11>.
- [16] Zhai P., Zhang Y., Shaobo W. Intelligent Ship Collision Avoidance Algorithm Based on DDQN with Prioritized Experience Replay under COLREGs. *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 585. 2022. pp. 1-29. <https://doi.org/10.3390/jmse10050585>.