НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПАШЕНКО Олена Леонідівна

УДК 656.61.052:004.93

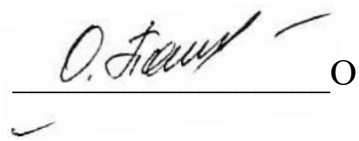
ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА МОНІТОРИНГУ НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Спеціальність 05.22.13 – «Навігація та управління рухом»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів має посилання на відповідне джерело.


О. Л. Пашенко

Науковий керівник Піпченко Олександр Дмитрович, д-р технічних наук, доцент

Одеса – 2026

АНОТАЦІЯ

Пашенко О. Л. Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об’єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 «Навігація та управління рухом». Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2026.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і запропоновано вирішення актуального **науково-прикладного завдання** підвищення інформаційної повноти та достовірності автоматизованого оцінювання надводної обстановки шляхом виявлення суден у відеоряді, класифікації їхнього ракурсу, визначення пеленгу (BRN) та спільного використання відеоданих із даними радіолокаційної станції (РЛС) і автоматичної ідентифікаційної системи (AIC або англ. Automatic Identification System, AIS) для асоціації спостережень і перевірки узгодженості AIC-кандидата. Отримані параметри відносного руху цілі, зокрема швидкість зміни пеленгу, слугують вхідними даними для оцінки ризику зіткнення відповідно до Правила 7 Міжнародних правил запобігання зіткненню суден (МПЗЗС-72 або англ. International Regulations for Preventing Collisions at Sea, COLREGs) [46]. Це набуває критичного значення за умов спуфінгу або відсутності AIC-сигналу, під час керування автономним судном, а також у разі зниження ефективності безпосереднього візуального спостереження вахтовим офіцером.

На основі аналізу сучасних наукових та науково-технічних джерел встановлено, що підставою для проведення досліджень стали такі **запити практики**:

– потреба в підвищенні достовірності оцінювання надводної навігаційної обстановки шляхом автоматизації візуального спостереження за суднами [10; 52; 56];

– неможливість використовувати дані АІС у випадках її штучного відключення та наявності зовнішніх завад [4; 5; 134];

– зменшення впливу людського чинника на прийняття рішень судноводієм [9; 15; 21; 98].

Мета дослідження – підвищення достовірності автоматизованого оцінювання навігаційної обстановки.

На основі мети дослідження було сформульовано **гіпотезу**: бортова відеосистема зі спеціалізованою моделлю комп'ютерного зору здатна автоматизовано виявляти судна, класифікувати їхній ракурс і визначати відносний пеленг, а спільне використання відеотреків, відеопеленгу та ознаки ракурсу з даними РЛС і АІС дає змогу уточнювати кутове положення фізичних цілей і перевіряти узгодженість АІС-призначень.

Головне завдання наукового дослідження полягає в розробленні комплексу методів і алгоритмічних рішень для автоматизованого отримання та взаємної перевірки інформації про судна за даними бортового відеоспостереження, РЛС і АІС.

Розв'язання головного завдання дисертаційного дослідження здійснено за рахунок розв'язання таких **допоміжних завдань**:

– обґрунтувати систему класів ракурсу, вимоги до формування й анотування відеоданих та до засобів бортового відеоспостереження;

– обґрунтувати вибір базової архітектури та донавчити на її основі модель комп'ютерного зору для виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу;

– обґрунтувати структуру бортової відеосистеми, розробити алгоритм визначення пеленгу;

– розробити метод асоціації й взаємної перевірки даних відеосистеми, РЛС і АІС та оцінити його засобами імітаційного моделювання;

– оцінити за натурними відеоданими показники виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу та визначити умови й обмеження застосування моделі.

Об’єктом дослідження є процес автоматизованого візуального спостереження та оцінювання надводної навігаційної обстановки з борту судна.

Предмет дослідження – методи й алгоритми автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення пеленгу за даними бортового відеоспостереження, а також асоціації й взаємної перевірки даних відеосистеми, РЛС і АІС.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

– уперше розроблено метод асоціації та взаємної перевірки відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень АІС, який поєднує просторово-кінематичне зіставлення з незалежним відеопеленгом та оцінкою впевненості відеомоделі щодо очікуваного ракурсу судна, враховує невизначеність вимірювань і відмінності точок їхньої геометричної прив’язки та забезпечує взаємно однозначне призначення з можливістю залишити фізичну ціль без установленого Maritime Mobile Service Identity (MMSI) за недостатньої узгодженості даних, що збільшило частку правильного відхилення хибного АІС-кандидата до 93,19 % при зменшенні частки помилкових MMSI-призначень з 31,67 % до 3,84 %;

– удосконалено підхід до автоматизованого візуального оцінювання надводної обстановки шляхом доповнення виявлення судна визначенням його ракурсу за вісьмома класами та відносного пеленгу, що, на відміну від підходів, орієнтованих переважно на виявлення суден або визначення їхнього комерційного типу, дає змогу отримувати з відеозображення додаткові ознаки просторового положення й орієнтації судна-цілі для подальшого комплексного використання з даними РЛС і АІС;

– набув подальшого розвитку метод визначення відносного пеленгу на судно-ціль за даними бортового відеоспостереження шляхом використання положення локалізованого об’єкта у відеокадрі, що дозволяє автоматизовано визначати напрямок на судно-ціль відносно діаметральної площини судна-спостерігача та використовувати отриманий відеопеленг як незалежну ознаку під час асоціації з даними РЛС і АІС.

Наукове положення сформульовано так: застосування моделі комп'ютерного зору YOLOv8n, донавченої на сформованому й анотованому наборі зображень суден, до даних незалежного каналу бортового відеоспостереження дає змогу автоматизовано виявляти судна й класифікувати їхній ракурс за вісьмома класами, а використання відеопеленгу та ознаки ракурсу під час асоціації з даними РЛС і АІС – уточнювати кутове положення цілі та відхиляти неузгоджені АІС-кандидати в досліджених імітаційних сценаріях.

Наукове положення обґрунтовано **науковими результатами**:

– обґрунтовано систему восьми класів ракурсу судна-цілі та сформовано методичні вимоги до підготовки й анотування цільового набору даних;

– донавчено модель YOLOv8n для виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу за вісьмома класами та оцінено показники її роботи;

– сформовано розрахункові вимоги до засобів бортового відеоспостереження, обґрунтовано структуру відеосистеми та розроблено алгоритм визначення пеленгу на судно-ціль;

– розроблено метод асоціації та взаємної перевірки відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень АІС;

– експериментально встановлено залежність частки правильних класифікацій ракурсу від масштабу зображення судна та визначено показники виявлення і класифікації за різних умов відеоспостереження.

Таким чином, **особистий внесок здобувача** полягає у:

– проведенні аналізу наукових і нормативних джерел та формулюванні завдання автоматизованого виявлення суден і визначення їхнього ракурсу за даними бортового відеоспостереження;

– обґрунтуванні поділу ракурсів судна-цілі на вісім класів, формуванні й анотуванні цільового набору зображень суден, аналізі його структури, балансуванні класів і застосуванні аугментації даних;

– донавчанні моделі YOLOv8n на сформованому цільовому наборі даних та оцінюванні показників виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу;

– обґрунтуванні структури багатокамерної системи та вимог до засобів бортового відеоспостереження, розробленні алгоритму визначення відносного пеленгу і розрахункового принципу визначення істинного пеленгу на виявлене судно;

– розробленні методу асоціації та взаємної перевірки відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень АІС та проведенні його імітаційного оцінювання для визначення впливу відеопеленга й ознаки ракурсу;

– розробленні методики, організації та проведенні натурних експериментальних досліджень за матеріалами бортового відеоспостереження, а також опрацюванні й інтерпретації їхніх результатів;

– оцінюванні показників виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу за різних дальностей, часу доби, масштабів зображення та класів ракурсу, а також установленні зростання частки правильних класифікацій ракурсу зі збільшенням масштабу зображення судна в дослідженій вибірці.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих рішень для побудови бортової системи комп'ютерного зору, призначеної для автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення пеленгу за даними незалежного відеоканалу з подальшою асоціацією відеоспостережень із даними РЛС і АІС.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено:

1. На борту суден:

– у проєктній документації компанії Minerva Marine Inc. для запланованого переобладнання судна «Minerva Alexandra» – щодо застосування моделі YOLOv8n для локалізації суден і принципу визначення істинного пеленгу на локалізований об'єкт;

– під час встановлення системи відеоспостереження компанією Peter Döhle Schiffahrts-KG на судні «Edgar».

2. В освітньому процесі Національного університету «Одеська морська академія»:

– в Інституті післядипломної освіти «Центр підготовки та атестації плавскладу» у навчальний процес для слухачів курсів підготовки судноводіїв. Зазначені матеріали використовуються з метою ознайомлення операторів із роботою систем розпізнавання на базі штучного інтелекту.

Ключові слова: комп’ютерний зір, ракурс судна, YOLOv8n, безпека мореплавства, надводна обстановка, пеленг судна, істинний пеленг, виявлення судна, класифікація судна, локалізація судна, Pan-Tilt-Zoom (PTZ) камера, ситуаційна обізнаність, підтримка прийняття рішень, автономне судноплавство.

ANNOTATION

Pashenko O.L. Improving the Accuracy of Identification and Monitoring of Surface Objects. – Qualification scientific work presented as a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.22.13 “Navigation and Traffic Control”. National University “Odesa Maritime Academy” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2026.

The dissertation scientifically substantiates and proposes a solution to the pressing scientific and applied task of improving the information completeness and reliability of automated assessment of the maritime surface navigational situation through vessel detection in video sequences, aspect classification, bearing determination, and the joint use of video data with radar and AIS data to associate observations and check the consistency of AIS candidates. The resulting parameters of the target’s relative motion, in particular the rate of change of bearing, serve as input data for assessing the risk of collision in accordance with Rule 7 of the COLREGs [46]. This is of critical importance in cases of AIS spoofing or the absence of an AIS signal, during autonomous vessel operation, and when the effectiveness of direct visual observation by the officer of the watch is reduced.

An analysis of current scientific and technical literature identified the following **practical needs** as the basis for the research:

– improving the reliability of the assessment of the maritime surface navigational situation by automating visual surveillance of vessels [10; 52; 56];

– the inability to use AIS data in cases of intentional deactivation of the system and the presence of external interference [4; 5; 134];

– reducing the influence of the human factor on navigators’ decision-making [9; 15; 21; 98].

The aim of the research is to improve the reliability of automated navigational situation assessment.

Based on the research aim, the following **hypothesis** was formulated: an onboard video system with a specialised computer vision model can automatically detect vessels,

classify their aspects and determine relative bearings, while the joint use of video tracks, video-derived bearings and the aspect feature with radar and AIS data makes it possible to refine the angular positions of physical targets and verify the consistency of AIS assignments.

The main research task is to develop a set of methods and algorithmic solutions for the automated acquisition and cross-checking of information about vessels using onboard video surveillance, radar and AIS data.

The main task of the dissertation research was addressed by completing the following **supporting tasks**:

– to substantiate the system of aspect classes, the requirements for the collection and annotation of video data, and the requirements for onboard video surveillance equipment;

– to substantiate the choice of a base architecture and fine-tune a computer vision model based on it for vessel detection and aspect classification;

– to substantiate the structure of the onboard video system and develop a bearing-determination algorithm;

– to develop a method for the association and cross-checking of video system, radar and AIS data and evaluate it through simulation;

– to evaluate vessel-detection and aspect-classification performance using real-world video data and determine the conditions and limitations of the model's application.

The object of the research is the process of automated visual surveillance and assessment of the maritime surface navigational situation from aboard a vessel.

The subject of the research comprises methods and algorithms for automated vessel detection, aspect classification and bearing determination using onboard video surveillance data, as well as for the association and cross-checking of video system, radar and AIS data.

The scientific novelty of the results is as follows:

– for the first time, a method for the association and cross-checking of video tracks, radar tracks, and AIS messages has been developed. The method combines spatial-kinematic matching with an independent video-derived bearing and the video model's

confidence estimate for the expected vessel aspect, accounts for measurement uncertainty and differences in the geometric reference points of the data sources, and provides one-to-one assignment while allowing a physical target to remain without an assigned Maritime Mobile Service Identity (MMSI) when the data are insufficiently consistent; in the simulated spoofing scenario, the proportion of correct rejections of the false AIS candidate reached 93.19%, while the proportion of erroneous MMSI assignments decreased from 31.67% to 3.84%;

– the approach to automated visual assessment of the surface navigational situation has been improved by supplementing vessel detection with vessel-aspect classification into eight classes and relative-bearing estimation. Unlike approaches focused primarily on vessel detection or identification of its commercial type, the proposed approach makes it possible to obtain additional features of the spatial position and orientation of the target vessel from video imagery for subsequent integrated use with radar and AIS data;

– the method for determining the relative bearing to a target vessel from onboard video surveillance data has been further developed by using the position of the localised object in the video frame, which enables automatic determination of the direction to the target vessel relative to the observer vessel's centreline and the use of the resulting video-derived bearing as an independent feature during association with radar and AIS data.

The **scientific proposition** is formulated as follows: applying the YOLOv8n computer vision model, fine-tuned on the developed and annotated vessel image dataset, to data from an independent onboard video surveillance channel enables automated vessel detection and vessel aspect classification, while the use of video-derived bearing and the aspect feature during association with radar and AIS data makes it possible to refine the target's angular position and reject inconsistent AIS candidates in the investigated simulation scenarios.

The scientific proposition is substantiated by the following **scientific results**:

– a system of eight target-vessel aspect classes was substantiated, and methodological requirements for the preparation and annotation of the target dataset were formulated;

– the YOLOv8n model was fine-tuned for vessel detection and classification of vessel aspect into eight classes, and its performance metrics were evaluated;

– calculation-based requirements for onboard video surveillance equipment were established, the structure of the video system was substantiated, and an algorithm for determining the bearing to the target vessel was developed;

– a method for the association and cross-checking of video tracks, radar tracks, and AIS messages was developed;

– the relationship between the proportion of correct vessel-aspect classifications and the vessel image scale was experimentally established, and vessel-detection and aspect-classification performance metrics were determined under different video observation conditions.

The author's personal contribution consists of:

– analysing scientific and regulatory sources and formulating the task of automated vessel detection and aspect determination using onboard video surveillance data;

– creating and annotating a specialised vessel image dataset divided into eight aspect classes, analysing its structure, balancing the classes and applying data augmentation;

– fine-tuning the YOLOv8n model on the developed task-specific dataset and evaluating vessel-detection and aspect-classification performance;

– substantiating the structure of the multi-camera system and the requirements for onboard video surveillance equipment, developing an algorithm for determining the relative bearing and a calculation principle for determining the true bearing to a detected vessel;

– developing a method for the association and cross-checking of video tracks, radar tracks and AIS messages, and evaluating it through simulation to determine the contributions of video-derived bearings and the aspect feature;

– developing the methodology, organising and conducting field experiments aboard merchant vessels, and processing and interpreting the results;

– evaluating vessel-detection and aspect-classification performance at different ranges, times of day, image scales and aspect classes, and establishing an increase in the

proportion of correct aspect classifications with increasing vessel image scale in the investigated sample.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed solutions to develop an onboard computer vision system designed for automated vessel detection, vessel aspect classification and bearing determination using an independent video channel, followed by the association of video observations with radar and AIS data.

The results of the dissertation research have been implemented:

Aboard vessels:

– in the design documentation of Minerva Marine Inc. for the planned retrofit of the vessel “Minerva Alexandra”, concerning the use of the YOLOv8n model for vessel localisation and the principle of determining the true bearing to a localised object;

– during the installation of a video surveillance system by Peter Döhle Schiffahrts-KG aboard the vessel “Edgar”.

In the educational process of the National University “Odesa Maritime Academy”:

– in the navigator training courses at the Institute of Postgraduate Education “Centre for Training and Certification of Seafarers”. These materials are used to familiarise operators with the operation of artificial-intelligence-based recognition systems.

Keywords: computer vision, vessel aspect, YOLOv8n, navigational safety, maritime surface situation, vessel bearing, true bearing, vessel detection, vessel classification, vessel localisation, PTZ camera, situational awareness, decision support, autonomous shipping.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

– Пашенко О. Л., Піпченко О. Д. Розробка моделі штучного зору на базі алгоритму YOLO для визначення ракурсу судна. *Судноводіння (Shipping & Navigation)*. 2025. Вип. 38. С. 10–21. DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.10-21.

– Пашенко О. Л. Використання аугментації для покращення якості навчання моделі штучного зору для визначення ракурсу судна. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії.* 2025. № 2 (31). С. 52–63. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.052-063.

– Пашенко О. Л. Дослідження ефективності використання моделі комп'ютерного зору для визначення ракурсу суден в реальних умовах. *Судноводіння (Shipping & Navigation)*. 2026. Вип. 39. С. 53–64. DOI: 10.31653/2306-5761.39.2026.53-64.

– Pashenko O., Pipchenko O. D., Shevchenko V. Designing a YOLOv8n-based Video Surveillance System for Ship Aspect Recognition. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2026. Vol. 20, No. 2. P. 375–385. DOI: 10.12716/1001.20.02.12.

ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ І ЯКІ ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

– Пашенко О. Л. Аналіз впливу технік аугментації на продуктивність моделі штучного зору при визначенні ракурсу судна. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі / Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2025)» :* збірник матеріалів конференції (03–04 грудня 2025 р., м. Одеса). Одеса : Херсонська державна морська академія, 2025. С. 309–312.

– Пашенко О. Л. Використання алгоритму YOLO для покращення навігаційної безпеки мореплавства. *Судноводіння, морські перевезення та технології (NST-2025) :* матеріали науково-теоретичної конференції (19–20 листопада 2025 р., м. Одеса). Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2025. С. 146–149.

– Пашенко О. Л. Вплив природного освітлення на точність розпізнавання ракурсу суден тренованою моделлю комп’ютерного зору YOLOv8n. *Інформаційні та операційні технології в судноплавстві (IOTS-2026) :* збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної конференції (23–24 квітня 2026 р., м. Одеса). Одеса : Одеський національний морський університет, 2026. С. 247–251. DOI: 10.5281/zenodo.19830666.

– Пашенко О. Л. Вплив дальності розташування суден-цілей на здатність моделі YOLOv8n розрізняти їх ракурси. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2026) :* збірник матеріалів XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (26–28 травня 2026 р., м. Одеса). Одеса : Херсонська державна морська академія, 2026. С. 57–60.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 17
ВСТУП 19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА МОНІТОРИНГУ НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ... 27
1.1 Аналіз процесу візуального спостереження та нормативних вимог до несення вахти 27
1.2 Сучасні технічні засоби спостереження за надводною обстановкою 29
1.3 Застосування методів комп'ютерного зору для виявлення надводних об'єктів 32
1.4 Аналіз застосування архітектур глибокого навчання у задачах морського спостереження 35
Висновки за розділом 1 39
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ 41
2.1 Вибір теми наукового дослідження та визначення шляхів досягнення завдань дослідження 41
2.2 Методологічні та технологічні аспекти дослідження 44
Висновки за розділом 2 51
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ НАБОРУ ДАНИХ ТА ДОНАВЧАННЯ МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАКУРСУ СУДНА .. 54
3.1 Основні визначення 54
3.2 Формалізація задачі класифікації ракурсу судна-цілі 55
3.3 Початковий набір даних зображень 58
3.4 Процес донавчання на основі початкового набору даних 60
3.5 Проміжні результати донавчання 67
3.6 Оновлений набір даних 71
3.7 Підсумкові результати донавчання моделі 73
Висновки за розділом 3 76

РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ЗАСОБІВ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА СТРУКТУРИ ВІДЕОСИСТЕМИ 79
4.1 Вимоги до розташування засобів відеоспостереження 79
4.2 Аналіз та обґрунтування вибору типу камер відеоспостереження 83
4.3 Технічні вимоги до параметрів PTZ-камер..... 86
4.4 Розподіл секторів відповідальності PTZ-камер..... 89
4.5 Розрахунковий принцип визначення відносного пеленгу на локалізований об’єкт 92
4.6 Розрахунковий принцип визначення істинного пеленгу..... 96
4.7 Динамічне позиціонування PTZ-камер 103
4.8 Метод асоціації та взаємної перевірки даних АІС, РЛС і відеосистеми 106
4.9 Аналітичне та імітаційне оцінювання точності та стійкості методу асоціації 121
Висновки за розділом 4..... 137
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ РОБОТИ МОДЕЛІ КОМП’ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАКУРСУ СУДЕН 142
5.1 Ефективність роботи моделі залежно від відстані та часу доби 142
5.2 Ефективність роботи моделі за використання цифрового масштабування. 154
Висновки за розділом 5..... 165
ВИСНОВКИ 168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 175
ДОДАТОК А Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження..... 191
ДОДАТОК Б Протокол анотування ракурсу судна-цілі..... 194
ДОДАТОК В Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації 196

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АІС – автоматична ідентифікаційна система (англ. AIS)

Гбайт – гігабайт

Гбайт/с – гігабайт за секунду

ГНСС – глобальна навігаційна супутникова система (англ. GNSS)

ДІ – довірчий інтервал

ЗАРП – засоби автоматичного радіолокаційного прокладання (англ. ARPA)

МПЗЗС-72 – Міжнародні правила запобігання зіткненню суден у морі 1972 року (англ. COLREGs)

РЛС – радіолокаційна станція

AIS – Automatic Identification System

AP – Average Precision

ARPA – Automatic Radar Plotting Aid

BRN – Bearing

CCRP – Consistent Common Reference Point

COG – Course Over Ground

COLREGs – International Regulations for Preventing Collisions at Sea

CPA – Closest Point of Approach

CUDA – Compute Unified Device Architecture

DFL – Distribution Focal Loss

EMSA – European Maritime Safety Agency

FN – False Negative

FP – False Positive

FPS – Frames Per Second

GNSS – Global Navigation Satellite System

GPS – Global Positioning System

HDT – Heading True

HFOV – Horizontal Field of View

IFOV – Instantaneous Field of View
IMO – International Maritime Organization
IoU – Intersection over Union
mAP – mean Average Precision
MMSI – Maritime Mobile Service Identity
MSC – Maritime Safety Committee
NMEA – National Marine Electronics Association
NTP – Network Time Protocol
PPS – Pulse Per Second
PTZ – Pan-Tilt-Zoom
R-CNN – Region-based Convolutional Neural Network
RMSE – Root Mean Square Error
ROT – Rate of Turn
SAR – Synthetic Aperture Radar
SOG – Speed Over Ground
SOLAS – International Convention for the Safety of Life at Sea
SSD – Single Shot MultiBox Detector
STCW – Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers
TCPA – Time to Closest Point of Approach
THD – Transmitting Heading Device
THS – True Heading and Status
TP – True Positive
VFOV – Vertical Field of View
YOLO – You Only Look Once
YOLOv8n – You Only Look Once, version 8, nano

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми. Безпека мореплавства значною мірою залежить від своєчасного виявлення суден, оцінювання їхнього взаємного розташування та визначення наявності небезпеки зіткнення. Для формування уявлення про надводну обстановку судноводій використовує візуальне спостереження, РЛС, АІС та інші доступні джерела інформації. Кожне із цих джерел має свої можливості й обмеження, тому достовірне оцінювання навігаційної ситуації потребує їх комплексного використання [129].

Розвиток систем відеоспостереження та технологій комп'ютерного зору відкриває нові можливості для автоматизованого опрацювання візуальної інформації про об'єкти в морському середовищі. Одним із перспективних напрямів є застосування моделей комп'ютерного зору для виявлення суден у відеоряді, класифікації їхнього ракурсу та визначення відносного пеленгу. Такі дані характеризують різні складові ситуації, що спостерігається: виявлення підтверджує наявність об'єкта класу «судно»; ракурс відображає орієнтацію судна відносно лінії спостереження; відносний пеленг визначає напрямок на нього відносно діаметральної площини власного судна.

Ракурс сам по собі не визначає курс або напрямок фактичного руху судна, однак є важливою допоміжною ознакою для первинної інтерпретації його положення та орієнтації. У поєднанні з відносним пеленгом і послідовним спостереженням він підвищує інформаційну повноту оцінювання надводної обстановки. Контроль зміни відносного пеленгу дає змогу отримувати інформацію, необхідну для попереднього оцінювання небезпеки зіткнення. За сталого курсу власного судна відсутність помітної зміни такого пеленгу може свідчити про наявність небезпеки зіткнення. Для визначення істинного пеленгу, а також для коректного оцінювання пеленгової інформації під час зміни курсу власного судна необхідно додатково враховувати істинний курс власного судна.

Зазначені можливості безпосередньо пов'язані із загальною логікою Правил 5 і 7 МПЗЗС-72 [46]. Відповідно до Правила 5 на судні має постійно здійснюватися

належне спостереження за допомогою зору, слуху та всіх доступних засобів для повної оцінки ситуації й небезпеки зіткнення. Система комп'ютерного зору може доповнювати цей процес шляхом автоматизованого виявлення суден у відеопотоці та визначення їхнього положення в полі зору. Водночас вона не замінює належного спостереження, оскільки не охоплює всі джерела інформації, передбачені Правилом 5.

Правило 7 МПЗЗС-72 [46] вимагає використання всіх доступних засобів для встановлення наявності небезпеки зіткнення. Однією з важливих ознак такої небезпеки є відсутність помітної зміни пеленгу на судно, що наближається. Тому послідовне автоматизоване визначення відносного пеленгу може формувати частину вихідних даних для оцінювання розвитку ситуації зближення. Однак для остаточного висновку необхідно враховувати рух власного судна, відстань до цілі та іншу доступну навігаційну інформацію. Отже, система комп'ютерного зору доповнює дані радіолокаційного спостереження, АІС та інших суднових систем, але не замінює їх.

Автоматизоване розпізнавання ситуацій зближення та обґрунтування дій суден за Правилами 11–18 МПЗЗС-72 [46] потребують спільного врахування умов видимості, параметрів руху, дистанції, навігаційного статусу та інших обставин. У цій роботі таке розпізнавання не оцінювали. Отримані відеопеленг і ракурс розглядаються як додаткові вхідні дані, а дослідження їх використання для автоматизованого оцінювання ситуацій зближення визначено напрямом подальшої роботи.

Особливого значення незалежний візуальний канал набуває у випадках відсутності або недостовірності АІС-даних. АІС-сигнал може бути відсутнім або вимкненим, а передані відомості можуть бути неповними, помилковими чи навмисно спотвореними [3; 14; 116; 133]. РЛС дає змогу виявляти об'єкти та визначати їхні координати незалежно від АІС, однак радіолокаційне відображення не завжди забезпечує достатньо інформації про візуальний ракурс судна. Застосування комп'ютерного зору дає можливість доповнити наявну навігаційну інформацію шляхом автоматизованого аналізу відеозображення.

Для автономних і дистанційно керованих суден [2; 51; 103] здатність автоматизованої системи виявляти судно, визначати його ракурс і відносний пеленг є важливою складовою машинного сприйняття навколишньої обстановки. Така система може підтримувати формування ситуаційної обізнаності та надавати вихідні дані для подальшої оцінки взаємного руху і прийняття навігаційних рішень. Водночас застосування МПЗЗС-72 [46] потребує комплексного аналізу даних про рух, відстань, навігаційний статус суден, умови видимості та інші обставини, тому результати аналізу відеозображення повинні використовуватися разом з інформацією від інших суднових систем.

Переважна більшість наявних досліджень [16; 57; 90; 100; 101] зосереджена на виявленні суден як об’єктів або розпізнаванні їхнього типу за попередньо підготовленими наборами зображень. Задача класифікації суден за ракурсом досліджена значно менше [54]. Недостатньо дослідженою залишається також ефективність моделей комп’ютерного зору в умовах реального бортового відеоспостереження, зокрема залежність точності виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу від відстані до об’єкта, рівня освітлення, масштабу зображення та інших зовнішніх чинників. Окремого розгляду потребують визначення пеленгу на виявлене судно з урахуванням орієнтації камери відносно діаметральної площини власного судна, а також використання відеопеленга й ракурсу разом із даними РЛС та АІС для асоціації спостережень і перевірки узгодженості АІС-кандидата.

Таким чином, актуальним є **науково-прикладне завдання** підвищення інформаційної повноти та достовірності автоматизованого оцінювання надводної обстановки шляхом виявлення суден у відеоряді, класифікації їхнього ракурсу, визначення пеленгу та спільного використання відеоданих із даними РЛС і АІС для асоціації спостережень і перевірки узгодженості АІС-кандидата. Необхідність донавчання й оцінювання моделі комп’ютерного зору, а також розроблення відповідних методів і алгоритмічних рішень зумовила вибір теми дисертаційного дослідження «Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об’єктів».

У межах дисертаційного дослідження поняття ідентифікації та моніторингу надводних цілей використовуються в такому значенні:

Ідентифікація надводної цілі – процес установлення та підтвердження відповідності між фізичним судном, його радіолокаційною трасою, відеоспостереженням і АІС-повідомленням, у результаті якого супроводжуваній цілі призначається її АІС-ідентичність, насамперед MMSI.

Моніторинг надводної цілі – безперервне або періодичне спостереження за ціллю з оновленням параметрів її положення і руху та зі збереженням правильної відповідності між радіолокаційною трасою, відеоспостереженням і АІС-ідентичністю протягом часу.

Мета дослідження – підвищення достовірності автоматизованого оцінювання навігаційної обстановки.

Головне завдання дослідження полягає в розробленні комплексу методів і алгоритмічних рішень для автоматизованого отримання та взаємної перевірки інформації про судна за даними бортового відеоспостереження, РЛС і АІС.

Для досягнення поставленої мети та розв’язання головного завдання сформульовано такі допоміжні завдання:

– обґрунтувати систему класів ракурсу, вимоги до формування й анотування відеоданих та до засобів бортового відеоспостереження;

– обґрунтувати вибір базової архітектури та донавчити на її основі модель комп’ютерного зору для виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу;

– обґрунтувати структуру бортової відеосистеми, розробити алгоритм визначення пеленгу;

– розробити метод асоціації й взаємної перевірки даних відеосистеми, РЛС і АІС та оцінити його засобами імітаційного моделювання;

– оцінити за натурними відеоданими показники виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу та визначити умови й обмеження застосування моделі.

Об’єктом дослідження є процес автоматизованого візуального спостереження та оцінювання надводної навігаційної обстановки з борту судна.

Предмет дослідження – методи й алгоритми автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення пеленгу за даними бортового відеоспостереження, а також асоціації й взаємної перевірки даних відеосистеми, РЛС і АІС.

Методи дослідження. Теоретичною та методологічною основою дослідження є сучасні методи комп'ютерного зору, цифрового оброблення зображень та математичної статистики. У роботі використано:

– аналіз, порівняння та узагальнення наукових і науково-технічних джерел – для визначення сучасного стану задачі та обґрунтування вимог до автоматизованого візуального спостереження;

– методи системного аналізу – для декомпозиції головного завдання дослідження та формування структури запропонованої відеосистеми;

– методи комп'ютерного зору і глибокого навчання – для донавчання й оцінювання моделі виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу;

– методи цифрової обробки зображень та аугментації даних – для підготовки й розширення цільового набору та підвищення стійкості моделі до варіативності умов спостереження;

– методи аналітичної геометрії та тригонометрії – для розробки алгоритму визначення відносного пеленга й принципу переходу до істинного пеленга;

– імітаційне моделювання методом Монте-Карло та статистичний аналіз – для оцінювання впливу відеопеленга й ознаки ракурсу на результати асоціації та супроводження в різних модельних сценаріях;

– натурний експеримент та методи описової статистики – для кількісного оцінювання роботи донавченої моделі комп'ютерного зору залежно від дальності, часу доби, масштабу зображення і класу ракурсу;

– порівняльний аналіз опублікованих результатів – для обґрунтування вибору архітектури YOLOv8n.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

– уперше розроблено метод асоціації та взаємної перевірки відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень АІС, який поєднує просторово-кінематичне

зіставлення з незалежним відеопеленгом та оцінкою впевненості відеомоделі щодо очікуваного ракурсу судна, враховує невизначеність вимірювань і відмінності точок їхньої геометричної прив'язки та забезпечує взаємно однозначне призначення з можливістю залишити фізичну ціль без установленого MMSI за недостатньої узгодженості даних, що збільшило частку правильного відхилення хибного AIC-кандидата до 93,19 % при зменшенні частки помилкових MMSI-призначень з 31,67 % до 3,84 %;

– удосконалено підхід до автоматизованого візуального оцінювання надводної обстановки шляхом доповнення виявлення судна визначенням його ракурсу за вісьмома класами та відносного пеленгу, що, на відміну від підходів, орієнтованих переважно на виявлення суден або визначення їхнього комерційного типу, дає змогу отримувати з відеозображення додаткові ознаки просторового положення й орієнтації судна-цілі для подальшого комплексного використання з даними РЛС і AIC;

– отримало подальший розвиток метод визначення відносного пеленгу на судно-ціль за даними бортового відеоспостереження шляхом використання положення локалізованого об'єкта у відеокадрі, що дозволяє автоматизовано визначати напрямок на судно-ціль відносно діаметральної площини судна-спостерігача та використовувати отриманий відеопеленг як незалежну ознаку під час асоціації з даними РЛС і AIC.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих рішень для побудови бортової системи комп'ютерного зору, призначеної для автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення пеленгу за даними незалежного відеоканалу з подальшою асоціацією відеоспостережень із даними РЛС і AIC.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено:

– у проєктній документації компанії Minerva Marine Inc. для запланованого переобладнання судна «Minerva Alexandra» – щодо застосування моделі YOLOv8n для локалізації суден і принципу визначення істинного пеленгу на локалізований об'єкт;

– під час встановлення системи відеоспостереження компанією Peter Döhle Schiffahrts-KG на судні «Edgar»;

– у навчальному процесі Інституту післядипломної освіти «Центр підготовки та атестації плавскладу» Національного університету «Одеська морська академія» – для ознайомлення слухачів курсів підготовки судноводіїв із роботою систем розпізнавання на основі штучного інтелекту.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що виносяться на захист, отримано здобувачем особисто. Особистий внесок здобувача полягає у:

– проведенні аналізу наукових і нормативних джерел та формулюванні завдання автоматизованого виявлення суден і визначення їхнього ракурсу за даними бортового відеоспостереження;

– обґрунтуванні поділу ракурсів судна-цілі на вісім класів, формуванні й анотуванні цільового набору зображень суден, аналізі його структури, балансуванні класів і застосуванні аугментації даних;

– донавчанні моделі YOLOv8n на сформованому цільовому наборі даних та оцінюванні показників виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу;

– обґрунтуванні структури багатокамерної системи та вимог до засобів бортового відеоспостереження, розробленні алгоритму визначення відносного пеленгу і розрахункового принципу визначення істинного пеленгу на виявлене судно;

– розробленні методу асоціації та взаємної перевірки відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень АІС та проведенні його імітаційного оцінювання для визначення впливу відеопеленга й ознаки ракурсу;

– розробленні методики, організації та проведенні натурних експериментальних досліджень за матеріалами бортового відеоспостереження, а також опрацюванні й інтерпретації їхніх результатів;

– оцінюванні показників виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу за різних дальностей, часу доби, масштабів зображення та класів ракурсу, а також установленні зростання частки правильних класифікацій ракурсу зі збільшенням масштабу зображення судна в дослідженій вибірці.

Роботи [128], [129] виконані автором самостійно.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [130] – методика донавчання моделі штучного зору для розпізнавання ракурсу, підбір зображень для формування навчальної вибірки, призначеної для донавчання моделі; [74] – розробка принципів побудови системи відеоспостереження для визначення не лише ракурсу судна-цілі, а й істинного пеленга.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися й обговорювалися на таких наукових конференціях:

– V Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (PSDMI-2025), 03–04 грудня 2025 р., м. Одеса;

– Науково-теоретична конференція «Судноводіння, морські перевезення та технології» (NST-2025), 19–20 листопада 2025 р., м. Одеса;

– I Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні та операційні технології в судноплавстві» (IOTS-2026), 23–24 квітня 2026 р., м. Одеса;

– XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT-2026), 26–28 травня 2026 р., м. Одеса.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, з яких: 3 – статті у наукових фахових виданнях України (категорії Б), у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, 1 – стаття в іноземному виданні, яке індексується у міжнародних наукометричних базах Scopus (квартиль Q3) та Web of Science (квартиль Q4); 4 – праці у збірниках матеріалів міжнародних і всеукраїнських конференцій, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку прийнятих скорочень, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 197 сторінок, список використаних джерел наведено на 18 сторінках. Робота містить 35 рисунків, 20 таблиць, 3 додатки. Список використаних джерел налічує 134 найменування.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА МОНІТОРИНГУ НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Аналіз процесу візуального спостереження та нормативних вимог до несення вахти

Відповідно до міжнародних вимог забезпечення безпеки судноплавства одним із ключових обов'язків судноводія є здійснення безперервного спостереження за навколишньою обстановкою. Згідно з МПЗЗС-72 [46] кожне судно повинно постійно підтримувати належне спостереження за допомогою зору, слуху та всіх доступних засобів з урахуванням поточних умов і обставин. Такий підхід спрямований на своєчасне виявлення інших суден, оцінку ризику зіткнення та прийняття відповідних рішень щодо маневрування [6].

У процесі несення вахти судноводій здійснює комплексну оцінку навколишньої обстановки, що включає визначення положення об'єктів відносно судна, їхнього пеленгу, дистанції, курсу та швидкості руху [36; 37]. З метою повної та своєчасної оцінки ситуації й ризику зіткнення вимоги Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (SOLAS) [36] регламентують оглядовість з містка та спрямовані на мінімізацію сліпих зон, проте конструктивні особливості суден не дозволяють повністю їх усунути. Важливим елементом є визначення наявності судна, його ракурсу та пеленгу, що дозволяє оцінити та прогнозувати його подальші дії. Дальність, на якій система повинна забезпечувати надійне визначення ракурсу судна, має орієнтуватися на нормативно встановлені дистанції завчасного виявлення суден, що традиційно застосовуються в морській практиці для оцінки ситуації розходження [46]. Для цього використовуються як безпосереднє візуальне спостереження, так і дані від технічних засобів, зокрема РЛС та АІС.

Незважаючи на наявність нормативної бази та технічних засобів підтримки прийняття рішень, ефективність спостереження значною мірою залежить від

людського фактору [7; 115; 118; 121]. Положення Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року (STCW) [37] акцентують увагу на цьому, зокрема на втомі та когнітивному навантаженні, що впливають на ефективність несення вахти. Вплив зовнішніх умов, таких як обмежена видимість, нічний час доби або несприятливі погодні умови, також може призводити до зниження точності оцінки параметрів навколишніх об'єктів [119; 125]. За результатами дослідження [19] частка аварій, пов'язаних з людськими помилками, перевищує 75 %.

Згідно з даними Європейського агентства морської безпеки (EMSA) [21] за період 2014–2023 років 58,4 % аварійних подій (accident events) були безпосередньо спричинені діями людини, а людський поведінковий фактор (human behaviour) фігурував як один із чинників, що сприяли виникненню у 49,8 % випадків. Ці два показники не підсумовуються, оскільки належать до різних аналітичних категорій (подія-причина та супутній чинник) і значною мірою перетинаються: більшість аварій одночасно характеризуються і людською дією, і поведінковим чинником. Тому людський елемент оцінювався за об'єднанням обох категорій – тобто враховувалася частка аварій, у яких наявна хоча б одна з цих ознак. Саме такий підхід дав змогу встановити, що людський елемент стосується 80,1 % усіх розслідуваних морських аварій та інцидентів – величини, яка перевищує кожен з окремих показників (58,4 % та 49,8 %), через часткове перекриття цих двох груп подій. Тобто більшість аварій відбуваються одночасно під дією людини та факторів поведінки людини. Найнижчий рівень впливу зафіксовано на риболовних суднах (76,0 %), а найвищий – на суднах інших типів (89,2 %). Вантажні судна показують 80,3 % впливу людини, пасажирські судна – 79,9 %, а службові судна – 82,5 % [21]. Узагальнення статистичних даних (рис. 1.1) дозволяє встановити, що одним із домінуючих факторів людського чинника є недостатній рівень підготовки [120; 131; 132] та професійних навичок, із яким пов'язано 253 випадки інцидентів у 2014–2023 роках. Це підтверджує критичну роль обмежень людського сприйняття та прийняття рішень у процесі навігації [21; 115; 118].

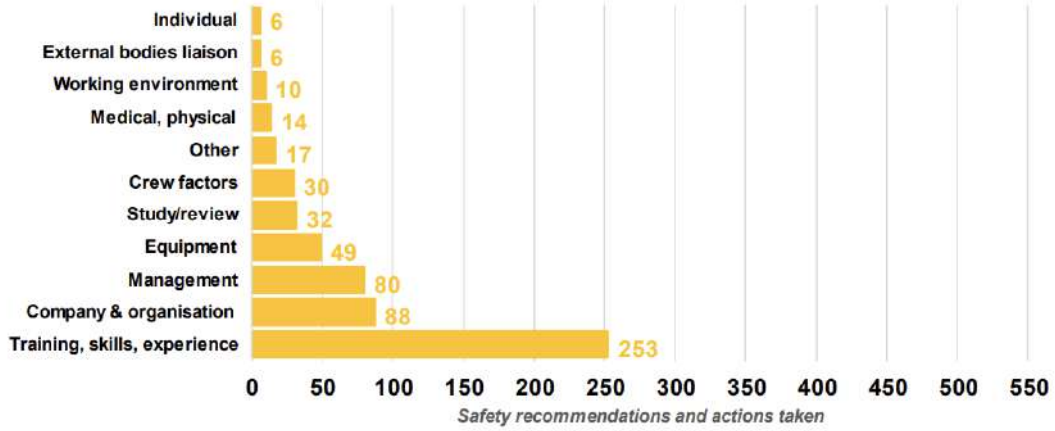


Рисунок 1.1 – Ключові напрями впливу людського чинника на аварійність (2014–2023 рр.) [21]

Аналіз зіткнень суден, проведений у роботах [9; 19], показав, що значна частина навігаційних інцидентів пов’язана з помилками сприйняття та інтерпретації навігаційної ситуації. Зокрема, до типових помилок належать неправильне оцінювання параметрів руху іншого судна, зокрема його курсу і швидкості, а також запізніле розпізнавання зміни курсу та ризику зіткнення [80]. Такі помилки зумовлені обмеженнями ситуаційної обізнаності оператора та можуть призводити до несвоєчасного прийняття рішень.

Таким чином, аналіз процесу несення вахти та існуючих обмежень підтверджує необхідність розробки ефективних методів автоматизованого визначення параметрів надводних об’єктів, що визначає актуальність даного дослідження.

1.2 Сучасні технічні засоби спостереження за надводною обстановкою

Забезпечення своєчасного виявлення, ідентифікації та моніторингу надводних об’єктів на сучасних морських суднах досягається шляхом використання комплексу технічних засобів спостереження, до складу якого входять АІС, радіолокаційні та радіонавігаційні системи, що взаємодоповнюють одна одну та формують узгоджену інформаційну картину навколишньої обстановки.

До основних засобів спостереження належать РЛС, які дають змогу виявляти об’єкти незалежно від умов освітленості та за обмеженої видимості. Разом з тим

вони мають обмеження, пов’язані з роздільною здатністю, впливом завад від морської поверхні [29; 79; 110], а також складністю інтерпретації радіолокаційного зображення, особливо у районах з інтенсивним судноплавством або за наявності дрібних цілей [29; 108].

Важливу роль у сучасних системах навігації відіграє АІС, яка дозволяє отримувати дані про ідентифікацію судна, його координати, курс, швидкість та інші параметри руху. Однак ефективність АІС обмежується тим, що система залежить від наявності та коректності переданих даних, а також не забезпечує виявлення об’єктів, не обладнаних відповідними передавачами. Невеликі судна не обов’язково обладнані АІС, хоча і є активними учасниками руху на морі. В дослідженні [98] наведено приклад: у портових умовах засобами АІС було зафіксовано лише 35 суден за фактичної кількості 169, що свідчить про значну неповноту даних.

Дані АІС можуть бути фальсифіковані, а їх передавання може супроводжуватися пропусками та затримками [3; 4; 5; 83]. Необхідність урахування таких загроз передбачена рекомендаціями International Maritime Organization (IMO) щодо управління морськими кіберризиками [30]. В умовах зростання загроз, пов’язаних з відключенням або спуфінгом суднових АІС, традиційні електронні засоби ідентифікації суден стають недостатньо надійними [134]. За даними інцидентів у Червоному морі, Перській затоці та Чорному морі у 2024–2025 роках [3; 14], екіпажі все частіше стикаються з ситуаціями, коли АІС-сигнал відсутній, вимкнений або містить свідомо спотворені дані. У таких умовах відеоспостереження в поєднанні з моделями комп’ютерного зору набуває критичного значення, оскільки дозволяє отримувати незалежну від зовнішніх передавачів інформацію про наявність суден. Це дає змогу судноводію безпосередньо оцінювати ситуацію розходження відповідно до вимог МПЗЗС-72, навіть за повної відсутності або недостовірності АІС-даних.

З метою підвищення ефективності спостереження на сучасних суднах впроваджуються інтегровані навігаційні системи, що об’єднують дані від різних сенсорів, таких як РЛС, АІС, відеокамери та інші джерела інформації [1; 31; 50; 61].

Такий підхід дозволяє отримати більш повне уявлення про навколишню обстановку та зменшити ймовірність помилок. Однак навіть у цьому випадку остаточне рішення, як правило, залишається за судноводієм, що не усуває повністю вплив людського фактору.

Традиційне спостереження за суднами здійснюється екіпажами суден і операторами берегових служб із використанням візуального спостереження, радіолокаційних засобів, АІС та інших джерел навігаційної інформації. Візуальне спостереження залежить від уваги й досвіду людини, умов видимості та безперервної присутності оператора. У зв'язку з розвитком автономного та дистанційно керованого судноплавства актуальним є автоматизоване опрацювання відеозображень за допомогою технологій комп'ютерного зору. Вони знаходять своє використання при виконанні багатьох задач, а саме моніторингу надводної поверхні та підводної акваторії, екологічної безпеки, охорони навколишнього середовища [18; 112]. У військовій сфері виявлення кораблів допомагає визначати порушення кордонів [88].

Таким чином, аналіз сучасних технічних засобів спостереження свідчить, що радіолокаційні засоби, АІС та системи відеоспостереження надають взаємодоповнювальну інформацію про надводну обстановку, але мають різні функціональні можливості й обмеження. РЛС дає змогу виявляти об'єкти, визначати відстань і пеленг та оцінювати параметри їхнього відносного руху, тоді як АІС передає ідентифікаційні й навігаційні дані за умови належної роботи суднового обладнання. Відеозображення містить незалежну візуальну інформацію про наявність судна, його положення в полі зору та ракурс, однак її автоматизована інтерпретація потребує застосування спеціалізованих методів комп'ютерного зору. У зв'язку з цим актуальним є розробка методів автоматизованого виявлення суден у відеоряді, класифікації їхнього ракурсу та визначення відносного пеленгу. Отримані результати можуть доповнювати інформацію від інших суднових систем і використовуватися як вихідні дані для подальшого оцінювання надводної обстановки та небезпеки зіткнення.

1.3 Застосування методів комп'ютерного зору для виявлення надводних об'єктів

В умовах зростаючого попиту на додаткові джерела інформації для підвищення безпеки мореплавства все частіше увага дослідників приділяється засобам відеоспостереження на основі комп'ютерного зору [109; 117; 122; 124]. Такі підходи дозволяють отримувати додаткову інформацію про навколишню обстановку незалежно від роботи традиційних навігаційних систем, зокрема АІС та РЛС.

Значна кількість досліджень у сфері виявлення та класифікації надводних об'єктів [16; 57; 104] зосереджена на визначенні комерційного типу судна, наприклад танкера, балкера або контейнеровоза. Однак така класифікація має обмежене значення для оцінювання ситуації зближення відповідно до МПЗЗС-72 [46], оскільки комерційний тип судна зазвичай не визначає порядок взаємодії суден. Для цього необхідні інші дані: відносний пеленг і характер його зміни, дистанція та її зміна, параметри відносного руху, взаємне положення суден, а також їхній навігаційний статус. За відеозображенням система штучного зору може виявляти судно, визначати його положення в полі зору, відносний пеленг і ракурс, а за результатами послідовних спостережень – формувати дані для оцінювання зміни пеленгу та напрямку руху.

Залежно від підходу до формування навчальних даних існуючі дослідження доцільно поділити на дві основні групи. До першої групи належать публікації, в яких дослідники використовують створені самостійно набори даних на основі даних відеоспостереження або синтетично змодельованих сцен [52; 56; 101]. Власні набори даних розробляються під вирішення конкретної задачі, поставленої в дослідженні. Такий підхід дозволяє адаптувати дані під конкретну задачу дослідження, враховувати специфіку морського середовища, а саме: різні погодні умови, умови освітлення, наявність опадів, ракурс спостереження та інші. Разом з тим використання власних наборів даних обмежує можливість порівняння

результатів з іншими дослідженнями через різні критерії класифікації об’єктів при застосуванні за певних умов роботи.

Низка досліджень [18; 24; 52; 112; 123] зосереджена на розробці спеціалізованих наборів даних для розпізнавання плавучого сміття, підтримки пошуково-рятувальних операцій та ін. У статті [60] автори використовують як фотографії, здобуті за реальних умов спостереження, так і синтетично згенеровані набори даних. Проте ця праця має оглядовий характер і не містить конкретних реалізацій розпізнавання ракурсу або інтеграції апаратного забезпечення. В іншій статті [52] авторами наведено результати випробувань за реальних умов експлуатації системи. Однак основною метою дослідження є оцінка відстані до об’єкта, а не визначення його ракурсу.

До другої групи можна віднести дослідження, що базуються на використанні відкритих наборів даних [82; 93; 105; 106; 108]. У таких роботах переважно проводиться порівняння алгоритмів комп’ютерного зору і оцінка їх ефективності [16]. Шляхом порівняння різних моделей комп’ютерного зору дослідники виявляють найбільш продуктивну та ефективну архітектуру для задач виявлення об’єктів. Основною метою робіт є пояснення алгоритмів роботи моделі та порівняння ключових показників, а не оцінка практичної користі для задач навігації. Проте маючи набір даних, промаркований під задачі розпізнавання комерційних типів суден, навіть попри покращення характеристик розпізнавання, такі системи мають обмежене практичне використання.

Як окремий напрям досліджень можна виділити публікації, пов’язані з підвищенням стійкості архітектур моделей до впливу морського середовища, де якість відеозображення може суттєво змінюватися залежно від часу доби, атмосферних явищ та дистанції до об’єктів спостереження [10; 11; 107]. В статті [10] дослідники приділяють увагу розробці архітектури моделі комп’ютерного зору для покращення характеристик за ускладнених погодних умов, проте оцінка відбувається на основі статичних зображень зі штучно створеними завадами, що може ставити під сумнів стабільність результатів за реальних умов спостереження. У дослідженні [107] був проведений порівняльний аналіз моделей за різних

погодних умов, проте дослідження ґрунтується на даних, отриманих на внутрішніх водних шляхах, відповідно не враховує умови спостереження з борту судна у відкритому морі. Камера відеоспостереження закріплена на березі, відповідно відсутній вплив різкої зміни сцени за рахунок хитавиці.

Крім задач виявлення та класифікації, у наукових дослідженнях розглядаються питання оцінювання параметрів руху об’єктів, зокрема визначення їхнього пеленга, швидкості та траєкторії. У своєму дослідженні Gorad та співавтори [28] використовують застарілу архітектуру YOLOv5 у поєднанні з тепловізійними та оптичними даними, однак із обмеженою стійкістю до реальних морських умов і використанням архітектур попереднього покоління. В роботі [61] автори наводять результати дослідження для визначення пеленгу та відстані, проте оцінювання результатів відбувається за даними AIC, яка може бути навмисно вимкнений, недоступний для малих суден або містити помилкові дані внаслідок кібератак чи радіоперешкод. Такий підхід переважно орієнтовано на аналіз руху об’єкта в координатах зображення і не забезпечує визначення ракурсу судна відносно спостерігача. Як і в попередній публікації [28], для виявлення судна була обрана технологія комп’ютерного зору YOLOv5. Запропонована система розрахована на об’єднання отриманих результатів. За відсутності даних AIC ціль в кращому випадку буде лише ідентифікована.

Попри значний обсяг наявних досліджень та використання технологій комп’ютерного зору, кожен дослідник ставить за мету вирішення різних практичних задач, від вдосконалення та створення власних алгоритмів роботи до виявлення та класифікації об’єктів на воді за різними ознаками. У зв’язку з цим порівняльна оцінка таких робіт за єдиними критеріями є недоцільною.

Відповідно до вимог МПЗЗС-72 [46] оцінювання ситуації небезпечного зближення та вибір належного маневру ґрунтуються на комплексному аналізі низки факторів: зміни пеленга, дистанції, відносного руху, найближчої точки зближення (CPA) і часу до точки найближчого зближення (TCPA), курсу та швидкості судна, його навігаційного статусу, вогнів і знаків, виду маневру, а також умов видимості. Разом з тим ракурс відіграє допоміжну роль на етапі первинної

інтерпретації ситуації за даними відеоспостереження і дає орієнтовне уявлення про взаємне розташування та зближення суден. Проте у більшості існуючих досліджень задача визначення ракурсу судна або не розглядається взагалі, або вирішується опосередковано через оцінювання напрямку руху. Окремі роботи все ж торкаються задачі оцінювання орієнтації судна, проте здебільшого на основі РЛС-знімків, а не оптичного відеопотоку: наприклад, у дослідженні [99] запропоновано метод одночасного виявлення суден та оцінювання їх орієнтації на зображеннях Synthetic Aperture Radar (SAR). Слід звернути увагу на те, що дані AIC, як зазначалося раніше, можуть бути навмисно фальсифікованими або спотвореними. Крім того, РЛС не вимірює безпосередньо ракурс судна: курс, обчислюваний за послідовними відмітками цілі, не збігається з фактичним ракурсом під час дрейфу, маневрування чи руху з малою швидкістю. Усунення зазначених недоліків потребує розробки нових методів і алгоритмів, які можуть бути засновані на сучасних технологіях комп'ютерного зору, що і стало одним із ключових завдань даного дослідження.

1.4 Аналіз застосування архітектур глибокого навчання у задачах морського спостереження

З метою виявлення об'єктів у морському середовищі дослідниками використовується низка архітектур глибокого навчання [17; 114], зокрема двоступеневі Region-based Convolutional Neural Network (R-CNN), Fast R-CNN, Faster R-CNN [26; 122; 124] та серія одноступеневих алгоритмів You Only Look Once (YOLO), Single Shot MultiBox Detector (SSD) та EfficientDet [66; 78]. Ці алгоритми широко застосовуються для виявлення суден, морського сміття, малих плавучих об'єктів та мікроорганізмів у складних умовах спостереження – як на супутникових, так і на аерофотознімках чи даних із бортових камер [105; 106; 112]. Двоступеневі архітектури використовують за підвищених вимог до точності класифікації об'єктів, проте вони вимагають великої кількості обчислень. Такі архітектури знаходять своє застосування за низької швидкості руху суден. Важливою умовою застосування таких архітектур у суднових системах є опрацювання відеопотоку з допустимою затримкою. У динамічній навігаційній

обстановці, особливо в портових водах і на малих дистанціях, надмірний час обчислення призводить до того, що визначені положення, ракурс і відносний пеленг характеризують уже минулий стан цілі. Тому під час оцінювання архітектури необхідно враховувати не лише точність розпізнавання, а й частоту видачі результатів, повну затримку оброблення та стабільність супроводження цілі. Для експериментальної системи доцільно забезпечити оновлення результатів щонайменше двічі на секунду. Тому дослідники все частіше віддають перевагу одноступеневим моделям сімейства YOLO [16; 18; 59; 78; 82; 102; 113; 129]. Більшість нових робіт у сфері морського виявлення об’єктів базуються саме на різних модифікаціях архітектур YOLO завдяки їхньому балансу швидкості, точності та зручності розгортання на бортовому обладнанні.

Архітектури YOLO обробляють вхідне зображення у три етапи: зображення змінюється до певного розміру, одноразово запускається згорткова нейронна мережа, отримані результати фільтруються за порогом довіри. Такий простий алгоритм роботи дозволяє використовувати цю архітектуру для обробки зображень в реальному часі. На відміну від інших архітектур обробки зображення, YOLO має інформацію про усе зображення під час донавчання і під час передбачення, тому має інформацію про контекст об’єктів та їхній вигляд. Тобто архітектура YOLO паралельно передбачає об’єкти на зображенні, їхні межі та класи [81].

У рамках огляду сучасних досягнень в галузі одноступеневих архітектур виявлення об’єктів YOLOv8 демонструє суттєві переваги порівняно з попередніми версіями та класичними двоступеневими. Їхній аналіз, опублікований у [91], показує еволюцію від YOLOv1 до YOLOv8, підкреслюючи зростання продуктивності й точності кожної версії.

Результати порівняння різних версій архітектур YOLOv8, YOLOv7 та YOLOv5 [86] зображені на рис. 1.2. Опубліковане порівняння продуктивності відбувалось на базі платформи NVIDIA Jetson AGX Orin 32 Гбайта, вбудованому комп’ютері зі штучним інтелектом, дискретній відеокарті NVIDIA GeForce RTX 4070 Ti. Значення середніх показників точності mAP@0,5 та mAP@0,5:0,95 та показник швидкодії моделі в режимі реального часу зведені в таблицю 1.1.

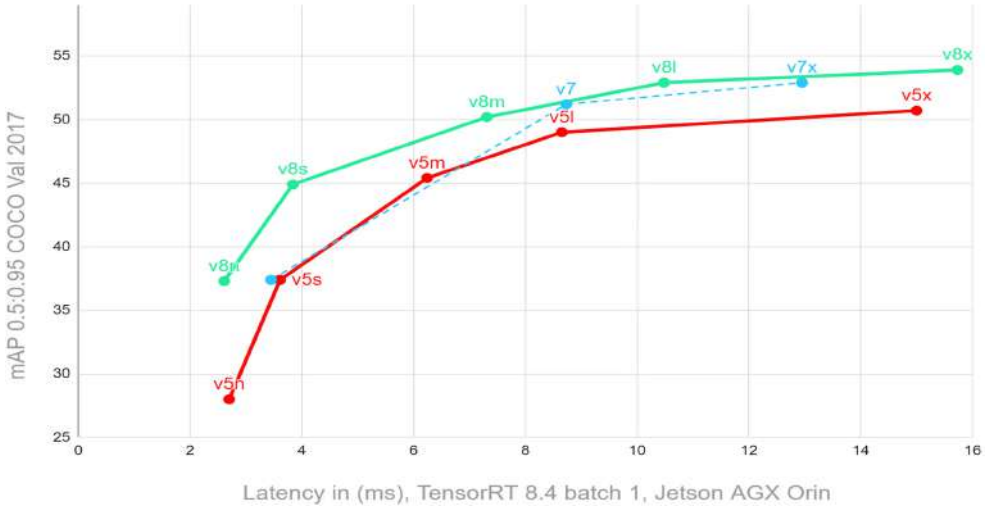


Рисунок 1.2 – Порівняння архітектур YOLOv8, YOLOv7 та YOLOv5 на платформах NVIDIA Jetson AGX Orin 32 Гбайт та RTX 4070 Ti. Вісь абсцис – швидкодія Frames Per Second (FPS) (кадри/с), вісь ординат – mAP@0,5:0,95 (%) [86]

Порівняння ефективності моделей здійснюється за показниками точності виявлення об’єктів та швидкодії обробки зображень. Показник mAP є узагальнювальною характеристикою якості виявлення. За порогом Intersection over Union (IoU) – коефіцієнтом перекриття передбаченої та істинної обмежувальних рамок об’єкта, що дорівнює 0,5, тобто виявлення вважається правильним за умови перекриття рамок не менше ніж на 50 % (mAP@0,5). Показник mAP@0,5:0,95, на відміну від нього, є усередненим значенням mAP за діапазоном порогів IoU від 0,5 до 0,95 з кроком 0,05, що робить його більш вимогливим критерієм оцінки, оскільки враховується не лише факт виявлення об’єкта, а й точність визначення його меж. Показник FPS характеризує швидкодію архітектур та відображає кількість кадрів відеопотоку, які можуть бути оброблені за одну секунду, що є визначальним чинником для застосування архітектури в системах реального часу.

Як видно з таблиці 1.1, найкращі показники виявлення об’єктів показує архітектура YOLOv8x, проте така точність безпосередньо впливає на швидкодію системи. YOLOv8n пропонує компактну архітектуру, яка забезпечує баланс між точністю виявлення та обчислювальною ефективністю, що робить її придатною для використання на суднах з обмеженими можливостями бортової обробки даних [18;

58; 106] і, що найважливіше, забезпечує оперативне реагування. Серед усіх архітектур він забезпечує найбільшу швидкодію, тому підходить для систем реального часу з високою швидкістю руху об’єктів виявлення [95].

Таблиця 1.1 – Порівняння архітектур YOLOv8, YOLOv7 та YOLOv5

Архітектура	mAP@0,5:0,95	mAP@0,5	AGX Orin (FPS)	RTX 4070 Ti (FPS)
v5n	28,0	45,7	370	934
v8n	37,3	52,5	383	1163
v7-tiny	37,4	55,2	290	917
v5s	37,4	56,8	277	877
v8s	44,9	61,8	260	925
v5m	45,4	64,1	160	586
v8m	50,2	67,2	137	540
v5l	49,0	67,3	116	446
v7	51,2	69,7	115	452
v8l	52,9	69,8	95	391
v5x	50,7	68,9	67	252
v7x	52,9	71,1	77	294
v8x	53,9	71,0	64	236

Як показує огляд [55], YOLOBench та YOLOv8 забезпечують більш ефективний баланс між часовими витратами на обробку та якістю виявлення (mAP), що робить їх більш придатними для систем реального часу. У порівняльному дослідженні [33] проведено оцінювання архітектур YOLOv5, YOLOv8, YOLOv9, YOLOv10 та YOLOv11 для задачі розпізнавання елементів електрообладнання. Модель YOLOv8 досягла mAP@0,5 ≈ 55,5 %, поступаючись лише YOLOv11 (≈ 57,2 %), але перевищуючи результати YOLOv5 (≈ 54,4 %) та YOLOv10 (≈ 48 %).

Висновки за розділом 1

За результатами аналізу нормативних вимог і сучасних засобів спостереження встановлено, що оцінювання навігаційної обстановки має здійснюватися всіма доступними засобами, відповідними до наявних умов. РЛС, АІС і візуальне спостереження надають взаємодоповнювальну інформацію, але кожне із цих джерел має певні обмеження. РЛС залежить від характеристик обладнання, умов спостереження та правильності інтерпретації отриманих даних, а АІС – від наявності, своєчасності й достовірності інформації, переданої судном-ціллю. Відеоканал може використовуватися як додаткове джерело інформації, що не потребує передачі даних судном-спостерігачем.

Аналіз досліджень у сфері комп'ютерного зору показав, що більшість розробок зосереджена на виявленні суден і класифікації їхнього комерційного типу. Водночас комерційний тип судна зазвичай не визначає порядок взаємодії суден відповідно до МПЗЗС-72. Для оцінювання ситуації зближення необхідні відносний пеленг і характер його зміни, дистанція та її зміна, параметри відносного руху, взаємне положення і навігаційний статус суден.

У межах цього дослідження система комп'ютерного зору розглядається як засіб виявлення судна, визначення його відносного пеленгу та класифікації ракурсу. Ракурс характеризує орієнтацію судна відносно спостерігача та може використовуватися як допоміжна ознака разом з іншими навігаційними даними. Самостійно він не визначає небезпеку зіткнення, характер ситуації зближення або навігаційний статус судна.

Порівняльний аналіз архітектур комп'ютерного зору показав доцільність застосування одноступеневих моделей сімейства YOLO у системах, що потребують опрацювання відеопотоку в реальному часі. Модель YOLOv8n може розглядатися як кандидат для використання на бортовій обчислювальній платформі завдяки її порівняно низькій обчислювальній складності та високій швидкості обробки даних. Остаточний висновок про її придатність має ґрунтуватися на результатах випробувань на цільовому наборі морських відеоданих з урахуванням

точності й повноти виявлення, частки правильних класифікацій ракурсу, похибки визначення пеленгу та затримки обробки.

Отже, актуальним науковим завданням є розробка та експериментальне дослідження методу автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення відносного пеленгу за відеозображенням. Результати роботи мають розглядатися як додаткове джерело інформації для підвищення ситуаційної обізнаності, а не як заміна належного спостереження, РЛС або АІС.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір теми наукового дослідження та визначення шляхів досягнення завдань дослідження

Проведений у першому розділі аналіз показав, що одним із напрямів розвитку сучасних суднових систем спостереження є використання відеоданих як додаткового джерела інформації про надводну обстановку. На відміну від АІС, візуальний канал не залежить від наявності й коректності передачі даних судном-ціллю та дає змогу безпосередньо підтверджувати наявність об’єкта, оцінювати його положення у полі зору і візуальні ознаки ракурсу судна.

Водночас автоматизоване визначення ракурсу судна за бортовим відеопотоком ускладнюється значною варіативністю вхідних даних, зумовленою зміною дальності спостереження, масштабу зображення цілі, освітленості, метеорологічних умов, типу судна та складності сцени навколо [129]. Більшість розглянутих підходів орієнтована переважно на виявлення суден або класифікацію їхнього типу, тоді як автоматизоване визначення ракурсу як додаткової ознаки взаємного положення суден досліджено недостатньо.

Слід відзначити, що значна частина морських інцидентів продовжує бути пов’язаною з людським фактором [9; 21; 115; 118], зокрема помилками сприйняття навігаційної ситуації, неправильною оцінкою параметрів руху суден та несвоєчасним реагуванням на зміну надводної обстановки. Водночас із зростанням рівня автоматизації флоту підвищуються вимоги до достовірності та стійкості навігаційної інформації, що використовується автоматизованими системами керування та підтримки судноводіння.

Окремою проблемою сучасного судноплавства є вразливість супутникових та радіонавігаційних систем до навмисного або ненавмисного впливу, зокрема атак, пов’язаних з глушінням або підміною сигналу. Це, в свою чергу, може призводити

до викривлення координат, втрати сигналу або передачі недостовірної інформації про надводну навігаційну обстановку [5; 14; 83; 125; 133].

Таким чином, наукове протиріччя визначається потребою у підвищенні безпеки мореплавства шляхом забезпечення достовірності ідентифікації та моніторингу надводних об’єктів і обмеженими можливостями наявного автоматизованого інформаційного забезпечення судноводіння, що ґрунтується переважно на даних РЛС та АІС і не забезпечує незалежного візуального підтвердження інформації за умов відсутності, неповноти або неузгодженості даних окремих каналів. Необхідність розв’язання зазначеного протиріччя визначила напрям дослідження, що полягає в розробленні методів використання додаткового незалежного візуального каналу для автоматизованого підтвердження навігаційної інформації та підвищення надійності функціонування автоматизованих і автономних комплексів судноводіння за умов часткової недоступності, неповноти або неузгодженості даних окремих навігаційних засобів, а також зумовила вибір теми дисертації: «Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об’єктів».

Зміст дисертаційного дослідження відповідає спеціальності 05.22.13 «Навігація та управління рухом», яка охоплює методи та засоби навігації, дистанційного спостереження за об’єктами, технічного забезпечення й організації управління рухом транспортних засобів та інших рухомих об’єктів, а також системи і процеси навігаційного обслуговування. Тема, мета та одержані результати дисертаційної роботи безпосередньо пов’язані з такими напрямами досліджень, визначеними паспортом спеціальності:

– дослідження закономірностей процесів навігації й управління рухом, розроблення методів і засобів управління рухом і орієнтації транспортних засобів і їх потоків;

– розроблення методологічних основ створення систем вимірювання координат, параметрів руху, розпізнавання цілей, визначення оптимальних траєкторій руху об’єктів;

– розроблення теоретичних засад й основ побудови систем і алгоритмів обробки сигналів для ефективного виявлення об'єктів, підвищення точності та надійності інформації про параметри руху, просторове положення та стан об'єктів спостереження, розпізнавання об’єктів, розділення цілей;

– розроблення методологічних основ, теорії та принципів побудови систем дистанційного виявлення, спостереження та розпізнавання об’єктів у різних діапазонах електромагнітних і акустичних коливань на засадах активної, напівактивної, пасивної, первинної та вторинної локації, однопозиційних і багатопозиційних локаційних і навігаційних систем;

– розроблення методів комплексної обробки інформації та способів їх застосування в системах спостереження, розпізнавання об’єктів, навігації й управління рухом;

– розроблення методів і засобів дистанційного виявлення та розпізнавання небезпечних об’єктів на траєкторії руху або в зоні відповідальності, дослідження зв’язків інформаційних параметрів активного та пасивного дистанційного зондування середовища з характеристиками об'єктів та/або небезпекою об’єктів і траєкторій руху;

– дослідження методів підвищення ефективності процесів навігації й управління рухом, засобів й систем навігаційного обслуговування.

Відповідність зазначеним напрямам визначається розробленням у дисертаційній роботі методів і алгоритмів автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення відносного пеленгу за даними пасивного оптичного спостереження, а також методу асоціації й взаємної перевірки відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень АІС.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Актуальність проведення дослідження підтверджується положеннями Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та операційного плану заходів з її реалізації у 2025–2027 роках, схвалених постановою Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1550, якими передбачено підвищення рівня безпеки на транспорті, цифровізацію транспортної галузі, розвиток систем моніторингу та

інформаційного обміну щодо руху суден, а також положеннями Указу Президента України від 30.09.2019 № 722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» в частині створення стійкої інфраструктури та сприяння інноваціям.

Дослідження за темою дисертації виконувалися у межах держбюджетної науково-дослідної роботи Національного університету «Одеська морська академія» «Удосконалення систем морського радіозв'язку і навігації для забезпечення кібербезпеки водного транспорту» № ДР 0123U100010 (2022–2024 рр.), у якій здобувачка брала участь, виконуючи окремий розділ.

Мета дослідження – підвищення достовірності автоматизованого оцінювання навігаційної обстановки. У межах роботи підвищення достовірності автоматизованого оцінювання навігаційної обстановки пов'язується з підвищенням точності ідентифікації та моніторингу надводних об'єктів.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення **головного завдання дослідження**, яке полягає в розробленні комплексу методів і алгоритмічних рішень для автоматизованого отримання та взаємної перевірки інформації про судна за даними бортового відеоспостереження, РЛС і АІС.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого візуального спостереження та оцінювання надводної навігаційної обстановки з борту судна.

Предмет дослідження – методи й алгоритми автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення пеленгу за даними бортового відеоспостереження, а також асоціації й взаємної перевірки даних відеосистеми, РЛС і АІС.

2.2 Методологічні та технологічні аспекти дослідження

Задача автоматизованого визначення ракурсу судна та пеленгу за даними бортового відеоспостереження має багатокомпонентний і багатофакторний характер. Її розв'язання передбачає послідовне виконання взаємопов'язаних процедур: формування та анотування набору даних, донавчання моделі комп'ютерного зору, виявлення суден у відеопотоці, класифікацію їхнього ракурсу, перетворення координат локалізованої цілі у пеленг, асоціації відеотреків із

радіолокаційними трасами та повідомленнями АІС, а також експериментальне й імітаційне оцінювання отриманих результатів.

Методологічною основою дослідження обрано системний підхід, який дав змогу представити запропонований візуальний канал як сукупність взаємопов'язаних компонентів [126; 127]:

- підсистеми отримання відеоданих;
- донавченої моделі виявлення суден і класифікації ракурсу;
- модуля визначення пеленгу локалізованої цілі;
- модуля асоціації даних відеоспостереження, РЛС та АІС;
- програмно-технічної підсистеми оброблення і відображення результатів;
- підсистеми експериментального оцінювання ефективності.

Застосування системного підходу забезпечило декомпозицію головного завдання дослідження, визначення зв'язків між окремими етапами дослідження та узгодження одержаних часткових результатів.

Проведений у першому розділі аналіз показав, що задача виявлення та розпізнавання суден містить як добре структуровані компоненти, пов'язані з математичним описом архітектур нейронних мереж та оцінюванням якості їх роботи, так і слабоструктуровані елементи, обумовлені невизначеністю морського середовища та складністю формалізації всіх факторів, що впливають на якість виявлення об'єктів. У зв'язку з цим для вирішення поставленої наукової задачі використано комплекс методів, що включає:

– аналіз, порівняння та узагальнення наукових і науково-технічних джерел – для визначення сучасного стану задачі та обґрунтування вимог до автоматизованого візуального спостереження;

– методи системного аналізу – для декомпозиції головного завдання дослідження та формування структури запропонованої відеосистеми;

– методи комп'ютерного зору і глибокого навчання – для донавчання й оцінювання моделі виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу;

– методи цифрової обробки зображень та аугментації даних – для підготовки й розширення навчального набору та підвищення стійкості моделі до варіативності умов спостереження;

– методи аналітичної геометрії та тригонометрії – для розробки алгоритму визначення відносного пеленга й принципу переходу до істинного пеленга;

– імітаційне моделювання методом Монте-Карло та статистичний аналіз – для оцінювання впливу відеопеленга й ознаки ракурсу на результати асоціації та супроводження в різних модельних сценаріях;

– натурний експеримент та методи описової статистики – для кількісного оцінювання роботи донавченої моделі комп’ютерного зору залежно від дальності, часу доби, масштабу зображення і класу ракурсу;

– порівняльний аналіз опублікованих результатів – для обґрунтування вибору архітектури YOLOv8n.

На рис. 2.1 показано технологічну карту методологічного забезпечення дисертаційного дослідження, у якій головне завдання розв’язується методами системного підходу. Технологічна карта містить головне завдання дослідження та п’ять допоміжних завдань. У ній наведено науковий результат головного завдання і кожного з допоміжних завдань.

Наведено загальну характеристику методологічного забезпечення дослідження за темою дисертації та проаналізовано його технологічну карту.

Сучасним **запитом практики** є потреба в підвищенні достовірності оцінювання надводної навігаційної обстановки шляхом автоматизації візуального спостереження за суднами [10; 52; 56], неможливість використовувати дані АІС у випадках її штучного відключення та наявності зовнішніх завад [4; 5; 134] та зменшення впливу людського чинника на прийняття рішень судноводієм [9; 15; 21; 98].

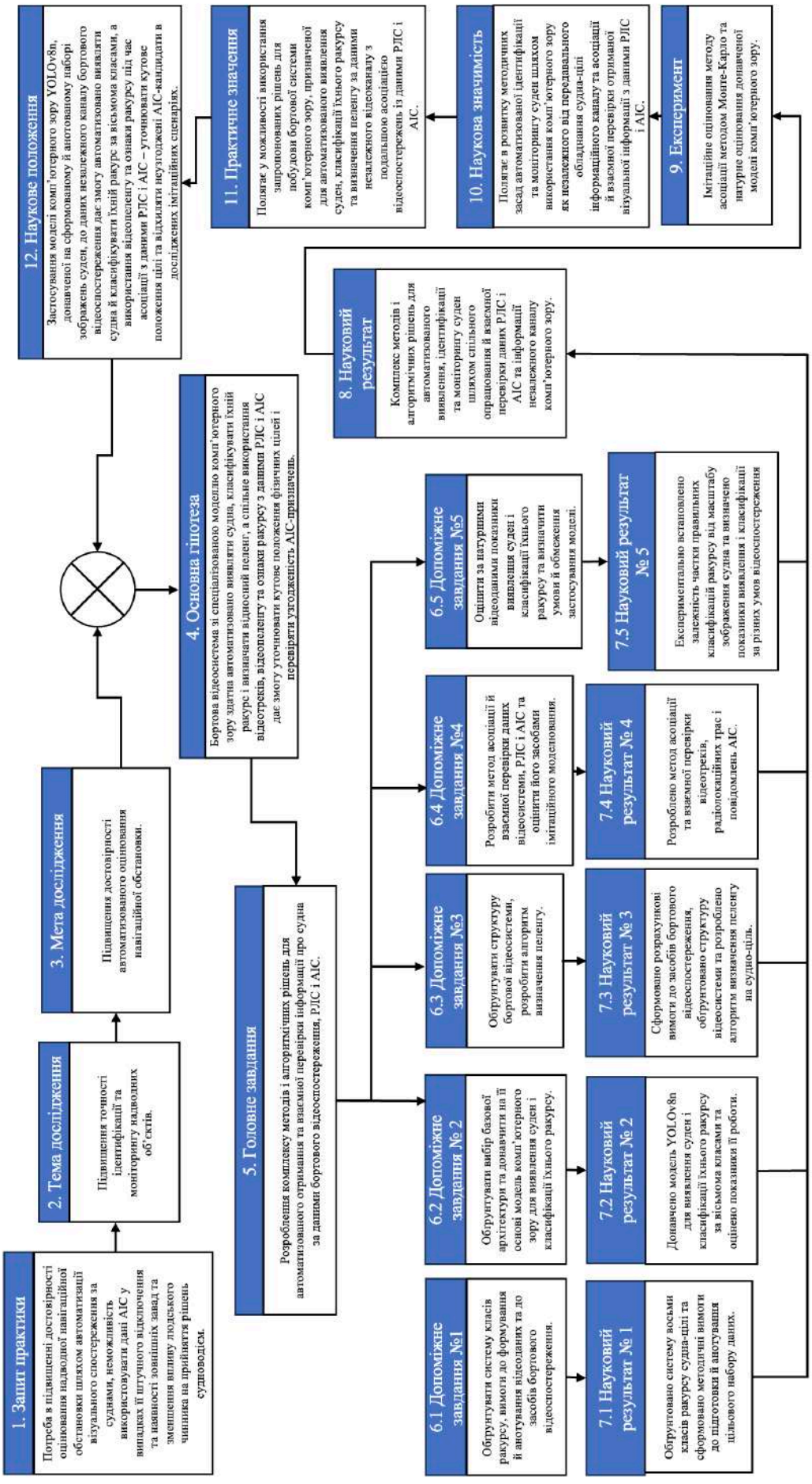


Рисунок 2.1 – Технологічна карта методологічного забезпечення дисертаційного дослідження

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що бортова відеосистема зі спеціалізованою моделлю комп’ютерного зору здатна автоматизовано виявляти судна, класифікувати їхній ракурс і визначати відносний пеленг, а спільне використання відеотреків, відеопеленгу та ознаки ракурсу з даними РЛС і АІС дає змогу уточнювати кутове положення фізичних цілей і перевіряти узгодженість АІС-призначень.

Для вирішення головного завдання дисертації виявилося доцільним розбити його на п’ять **допоміжних завдань**:

– обґрунтувати систему класів ракурсу, вимоги до формування й анотування відеоданих та до засобів бортового відеоспостереження;

– обґрунтувати вибір базової архітектури та донавчити на її основі модель комп’ютерного зору для виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу;

– обґрунтувати структуру бортової відеосистеми, розробити алгоритм визначення пеленгу;

– розробити метод асоціації й взаємної перевірки даних відеосистеми, РЛС і АІС та оцінити його засобами імітаційного моделювання;

– оцінити за натурними відеоданими показники виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу та визначити умови й обмеження застосування моделі.

Розв’язання завдань дисертаційного дослідження потребувало широкого використання наявного та розроблення нового програмного забезпечення. Технологічною основою дослідження є онлайн-платформа Make Sense AI, програмні засоби Python, бібліотеки OpenCV, PyTorch та програмне середовище Ultralytics YOLOv8 [93; 95; 96], а також розроблений програмний імітаційний стенд для оцінювання методу асоціації даних АІС, РЛС і відеосистеми. Обчислювальну частину стенда реалізовано мовою JavaScript у середовищі Node.js, а інтерфейс – як локальний вебзастосунок із використанням HTML, CSS і JavaScript без застосування додаткових вебфреймворків. За допомогою онлайн-платформи Make Sense AI було виконано розмітку об’єктів на зображеннях шляхом створення

обмежувальних рамок та експортування анотацій у форматі YOLO, сумісному з моделлю YOLOv8.

Донавчання й оцінювання показників моделі комп'ютерного зору у межах проведеного дослідження виконувалися у хмарному середовищі Google Colaboratory (Google Colab), що надає доступ до обчислень в середовищі Python 3 із використанням апаратного прискорення на основі графічного процесора NVIDIA T4. Цей графічний процесор має 2560 Compute Unified Device Architecture (CUDA) ядер, оснащений 16 Гбайт пам'яті GDDR6 та забезпечує пропускну здатність пам'яті до 300 Гбайт/с, що забезпечує ефективне виконання обчислень, пов'язаних із глибинним навчанням, та суттєво зменшує час донавчання моделей. У результаті використання зазначених програмних засобів отримано модель комп'ютерного зору, донавчену для визначення ракурсу судна на основі алгоритму YOLOv8n.

Під час виконання дослідження та підготовки тексту дисертації використовувалися інструменти генеративного штучного інтелекту ChatGPT і Claude різних версій. Відповідно до таксономії делегування завдань генеративному штучному інтелекту Generative AI Delegation Taxonomy (GAIDeT) (2026), їх застосування охоплювало оптимізацію програмного коду мовами Python і JavaScript, вичитування та редагування тексту, а також коригування його стилістичного тону відповідно до вимог наукового викладу. Зазначені завдання виконувалися із застосуванням штучного інтелекту під контролем авторки. Повну відповідальність за остаточний текст дисертації, програмну реалізацію та достовірність наведених результатів несе авторка.

Виконання поставлених допоміжних завдань дає змогу одержати такі **наукові результати**:

– обґрунтовано систему восьми класів ракурсу судна-цілі та сформовано методичні вимоги до підготовки й анотування цільового набору даних;

– донавчено модель YOLOv8n для виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу за вісьмома класами та оцінено показники її роботи;

– сформовано розрахункові вимоги до засобів бортового відеоспостереження, обґрунтовано структуру відеосистеми та розроблено алгоритм визначення пеленгу на судно-ціль;

– розроблено метод асоціації та взаємної перевірки відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень АІС;

– експериментально встановлено залежність частки правильних класифікацій ракурсу від масштабу зображення судна та визначено показники виявлення і класифікації за різних умов відеоспостереження.

Підсумковим **науковим результатом є** комплекс методів і алгоритмічних рішень для автоматизованого виявлення, ідентифікації та моніторингу суден шляхом спільного опрацювання й взаємної перевірки даних РЛС і АІС та інформації незалежного каналу комп’ютерного зору.

Отриманим результатам наукового дослідження притаманна **наукова новизна**, яка полягає в такому:

– уперше розроблено метод асоціації та взаємної перевірки відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень АІС, який поєднує просторово-кінематичне зіставлення з незалежним відеопеленгом та оцінкою впевненості відеомоделі щодо очікуваного ракурсу судна, враховує невизначеність вимірювань і відмінності точок їхньої геометричної прив’язки та забезпечує взаємно однозначне призначення з можливістю залишити фізичну ціль без установленого MMSI за недостатньої узгодженості даних, що збільшило частку правильного відхилення хибного АІС-кандидата до 93,19 % при зменшенні частки помилкових MMSI-призначень з 31,67 % до 3,84 %;

– удосконалено підхід до автоматизованого візуального оцінювання надводної обстановки шляхом доповнення виявлення судна визначенням його ракурсу за вісьмома класами та відносного пеленгу, що, на відміну від підходів, орієнтованих переважно на виявлення суден або визначення їхнього комерційного типу, дає змогу отримувати з відеозображення додаткові ознаки просторового положення й орієнтації судна-цілі для подальшого комплексного використання з даними РЛС і АІС;

– набув подальшого розвитку метод визначення відносного пеленгу на судно-ціль за даними бортового відеоспостереження шляхом використання положення локалізованого об’єкта у відеокадрі, що дозволяє автоматизовано визначати напрямок на судно-ціль відносно діаметральної площини судна-спостерігача та використовувати отриманий відеопеленг як незалежну ознаку під час асоціації з даними РЛС і АІС.

Наукова значимість одержаних результатів полягає в розвитку методичних засад автоматизованої ідентифікації та моніторингу суден шляхом використання комп’ютерного зору як незалежного від передавального обладнання судна-цілі інформаційного каналу та асоціації й взаємної перевірки отриманої візуальної інформації з даними РЛС і АІС.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих рішень для побудови бортової системи комп’ютерного зору, призначеної для автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення пеленгу за даними незалежного відеоканалу з подальшою асоціацією відеоспостережень із даними РЛС і АІС.

Отримані наукові результати, натурне оцінювання моделі комп’ютерного зору та імітаційне оцінювання методу асоціації обґрунтовують таке **наукове положення**: застосування моделі комп’ютерного зору YOLOv8n, донавченої на сформованому й анотованому наборі зображень суден, до даних незалежного каналу бортового відеоспостереження дає змогу автоматизовано виявляти судна й класифікувати їхній ракурс за вісьмома класами, а використання відеопеленгу та ознаки ракурсу під час асоціації з даними РЛС і АІС – уточнювати кутове положення цілі та відхиляти неузгоджені АІС-кандидати в досліджених імітаційних сценаріях.

Висновки за розділом 2

У другому розділі дисертаційної роботи обґрунтовано вибір теми дослідження, визначено його мету, об’єкт, предмет і завдання. Сформульовано науково-прикладне завдання підвищення інформаційної повноти та достовірності

автоматизованого оцінювання надводної обстановки шляхом виявлення суден у відеоряді, класифікації їхнього ракурсу, визначення пеленгу та спільного використання відеоданих із даними РЛС і АІС для асоціації спостережень і перевірки узгодженості АІС-кандидата. Необхідність донавчання й оцінювання моделі комп'ютерного зору, а також розроблення відповідних методів і алгоритмічних рішень зумовила вибір теми дисертаційного дослідження.

Для декомпозиції головного завдання застосовано системний підхід. Дослідження поділено на етапи формування й оброблення цільового набору відеоданих, донавчання та оцінювання моделі комп'ютерного зору, обґрунтування структури бортової відеосистеми, розробки алгоритму визначення пеленгу, розробки та імітаційного оцінювання методу асоціації даних АІС, РЛС і відеоспостереження та натурного оцінювання показників роботи моделі.

Сформульовано гіпотезу дослідження та визначено напрями її перевірки засобами натурного й імітаційного оцінювання.

Сформовано методологічне забезпечення дослідження, що охоплює методи системного аналізу, комп'ютерного зору, глибокого навчання, цифрового оброблення зображень, аналітичної геометрії, тригонометрії, імітаційного моделювання, натурного експерименту та описової статистики.

Визначено технологічну основу дослідження, що включає засоби анотування зображень, середовище Python, бібліотеки OpenCV і PyTorch, програмне середовище Ultralytics YOLOv8 та хмарне середовище Google Colaboratory з графічним процесором NVIDIA T4. Обчислювальну частину імітаційного стенда реалізовано мовою JavaScript.

За результатами розділу сформовано послідовність подальшого дослідження та обґрунтовано вибір архітектури YOLOv8n як основи спеціалізованої моделі комп'ютерного зору для виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу з урахуванням вимог до швидкодії та обчислювальних ресурсів. Визначення відносного й істинного пеленга передбачено здійснювати окремими алгоритмічними засобами на основі координат локалізованої цілі, параметрів камери та даних про курс судна-спостерігача, а отримані відеотреки

використовувати разом із даними РЛС і АІС для асоціації спостережень, що належать одному фізичному об’єкту.

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ НАБОРУ ДАНИХ ТА ДОНАВЧАННЯ МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАКУРСУ СУДНА

3.1 Основні визначення

З метою забезпечення однозначного трактування результатів дослідження у дисертаційній роботі використано такі основні визначення:

– ракурс судна (aspect angle) – це орієнтація корпусу судна відносно спостерігача, яка визначається кутом між діаметральною площиною судна та напрямком на спостерігача (рис. 3.1);

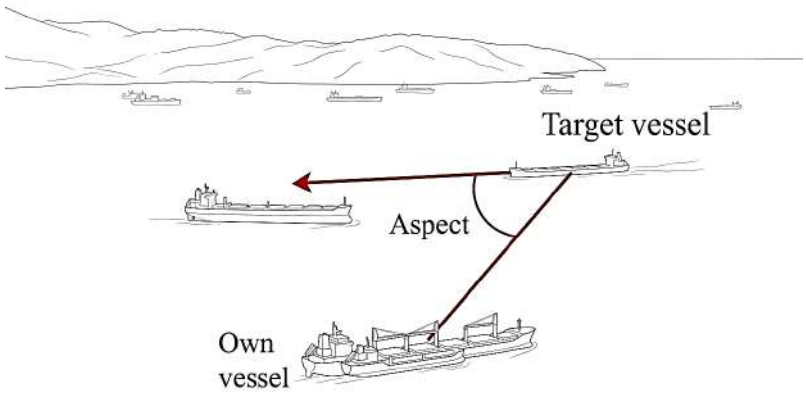


Рисунок 3.1 – Схема визначення ракурсу цільового судна відносно спостерігача

– обмежувальна рамка (bounding box) – це прямокутна область на зображенні, що визначає просторове положення виявленого об'єкта та охоплює об'єкт відповідно до прийнятого протоколу анотування. Обмежувальна рамка формується моделлю під час виявлення об'єкта та використовується для локалізації об'єктів у межах зображення;

– виявлення об'єктів (object detection) – це задача комп'ютерного зору, що полягає в одночасному визначенні місця розташування об'єкта на зображенні та віднесенні його до певного класу (класифікації). Результатом роботи алгоритму є побудова обмежувальної рамки та присвоєння класу об'єкта.

Слід зазначити, що факт виявлення об’єкта на зображенні не гарантує високу частку правильних класифікацій ракурсу. Після локалізації об’єкта модель визначає його клас, однак за складних умов спостереження можливі помилки класифікації, коли об’єкт правильно локалізовано, але віднесено до неправильного класу;

– локалізація об’єкта (object localization) – це процес визначення просторового положення об’єкта на зображенні шляхом побудови обмежувальної рамки, що охоплює область, у якій знаходиться об’єкт;

– класифікація об’єктів (object classification) – це задача комп’ютерного зору, що полягає у визначенні категорії об’єкта на зображенні. У даному дослідженні класифікація використовується для визначення ракурсу судна відносно судна-спостерігача;

– впевненість моделі (confidence score) – це числовий показник, який формується моделлю для кожного виявлення та відображає оцінку впевненості для конкретного виявлення та присвоєного класу. Значення показника знаходиться в інтервалі від 0 до 1, де більші значення відповідають більшій впевненості моделі у класифікаціях.

3.2 Формалізація задачі класифікації ракурсу судна-цілі

Ракурс судна-цілі є неперервною кутовою величиною, тоді як модель комп’ютерного зору розв’язує задачу класифікації, тобто працює зі скінченною множиною класів. У навігаційній практиці та оцінюванні ситуації зближення ракурс судна визначають як відносний пеленг судна-спостерігача, виміряний із судна-цілі від його діаметральної площини, із зазначенням борта – правого або лівого. Ракурс судна-цілі визначається:

$$\theta = (T_{t\to o} - H_t + 360^\circ) \bmod 360^\circ, \tag{3.1}$$

де θ – ракурс судна-цілі;

$T_{t\to o}$ – істинний пеленг (судна-спостерігача, виміряний із судна-цілі);

H_t – істинний курс судна-цілі; mod 360° – приведення до інтервалу [0°; 360°).

Область визначення [0°; 360°) поділено на вісім рівних секторів шириною 45°. Центри секторів відповідають характерним ракурсам (forward, port bow, port side, starboard bow, starboard quarter, starboard side, stern, port quarter), а межі секторів проходять через непарні кратні 22,5°. Кутові межі класів, їх відповідність традиційному позначенню ракурсу та основні візуальні ознаки наведено на рис. 3.2 та у таблиці 3.1.

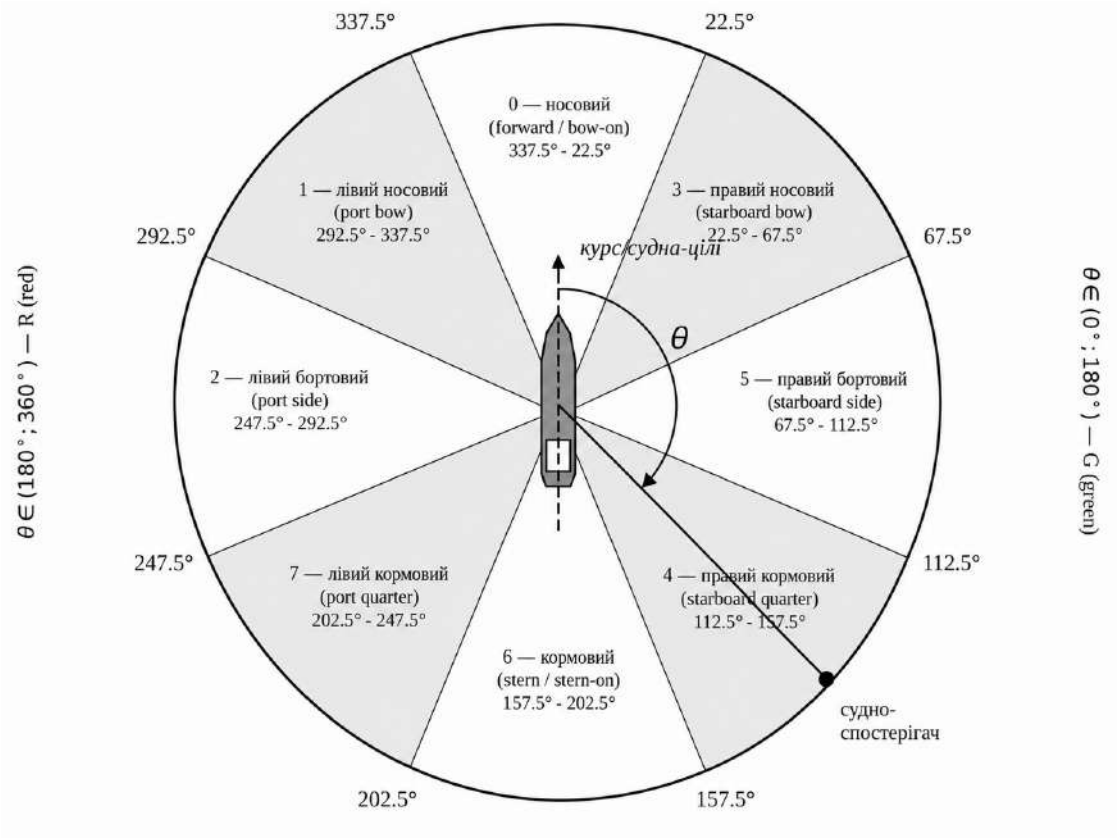


Рисунок 3.2 – Кутові межі восьми класів ракурсу судна-цілі

Для однозначного віднесення екземпляра до класу прийнято такі правила:

1) кутові інтервали є замкненими зліва і відкритими справа, тобто $\theta \in [\theta_1; \theta_2)$; значення, що точно дорівнює межі сектора, відноситься до сектора з більшим θ;

2) клас 0 (forward) перекриває нуль шкали і визначається як $\theta \in [337{,}5°; 360°) \cup [0°; 22{,}5°)$;

Таблиця 3.1 – Кутові межі класів ракурсу судна-цілі

№ класу	Назва класу	Інтервал θ	Візуальна ознака сектора
0	forward	[337,5°; 360°) ∪ [0°; 22,5°)	спостерігається переважно носова частина корпусу; борт практично не проєктується
1	port bow	[292,5°; 337,5°)	одночасно видимі носова частина та лівий борт; носова частина праворуч у кадрі
2	port side	[247,5°; 292,5°)	видимий переважно лівий борт; корпус проєктується майже на повну довжину
3	starboard bow	[22,5°; 67,5°)	одночасно видимі носова частина та правий борт; носова частина ліворуч у кадрі
4	starboard quarter	[112,5°; 157,5°)	одночасно видимі правий борт та кормова частина; корма ліворуч у кадрі
5	starboard side	[67,5°; 112,5°)	видимий переважно правий борт; корпус проєктується майже на повну довжину
6	stern	[157,5°; 202,5°)	спостерігається переважно кормова частина; видимий транець, борт майже не проєктується
7	port quarter	[202,5°; 247,5°)	одночасно видимі лівий борт та кормова частина; корма праворуч у кадрі

3) номери класів (0–7) збережено такими, як у цільовому наборі даних, щоб не порушувати відповідність із донавченою моделлю;

Оскільки для зображень відсутні дані AIC, референтна мітка класу визначалася експертно – шляхом візуальної оцінки за формалізованою процедурою (додаток Б). Основні ознаки, на які спирається оцінка:

– співвідношення видимої проєкції діаметральної площини та видимої проєкції мідель-шпангоута;

– видимість транця та кормового підзору – ознака кормової напівсфери;

– видимість форштевня, розвалу борту в носовій частині, бульба – ознака носової напівсфери;

– положення надбудови та комінів відносно видимих країв корпусу;

– положення носової частини в кадрі відносно корми – ознака борта, що спостерігається;

– форма кільватерного струменя та носових вусів.

3.3 Початковий набір даних зображень

Для проведення донавчання моделі комп'ютерного зору було сформовано власний набір даних. Початковий набір даних складався з 925 зображень (1913 анотованих екземплярів). Кожному анотованому екземпляру на зображенні був присвоєний один з восьми ракурсів: forward, port bow, port side, starboard bow, starboard quarter, starboard side, stern, port quarter (рис. 3.3) [46; 69].

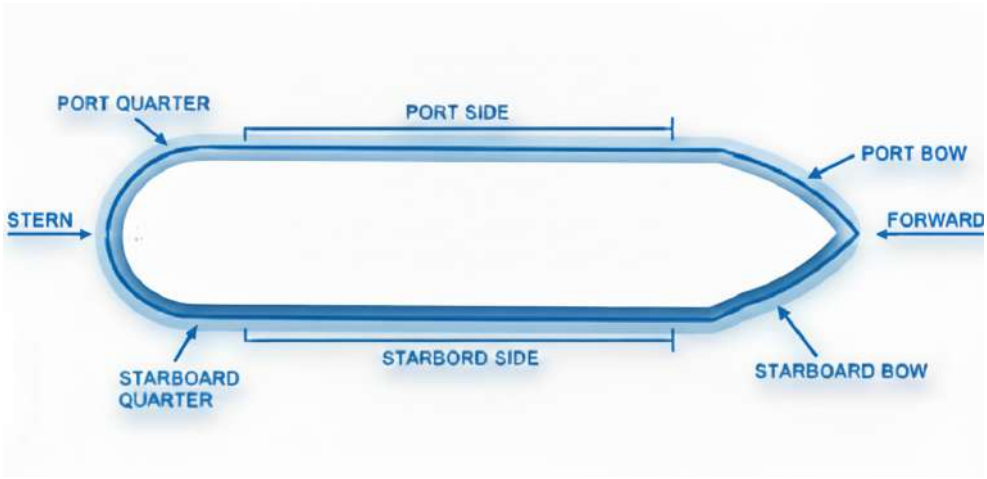


Рисунок 3.3 – Варіанти ракурсів цільового судна

Загальна кількість анотованих екземплярів наведена в таблиці 3.2. Приблизний розподіл: 70 % – дані для тренування, 20 % – перевірочна вибірка, 10 % – дані для тестування [67]. Перевірочна вибірка використовувалася для контролю процесу донавчання та вибору параметрів моделі, тоді як тестова вибірка призначалася для незалежного оцінювання остаточно обраної моделі. Такі пропорції є стандартними для задач комп'ютерного зору в машинному навчанні, оскільки дозволяють виділити переважну частину даних на тренування моделі [77; 84]. Розподіл зображень між вибірками здійснювався автоматично та випадковим чином пропорційно до зазначених часток за допомогою спеціально розробленого програмного засобу мовою програмування Python. Такий поділ є приблизним, адже зображення реальних морських сцен можуть містити декілька суден одночасно, що унеможливлює їх ідеально пропорційний поділ. Фактичні пропорції, наведені в таблиці, можуть незначною мірою відрізнятися у зв'язку з округленням або необхідністю збереження цілісності зображень. Одне зображення могло містити декілька анотованих екземплярів, тому загальна кількість екземплярів не збігається з кількістю зображень у цільовому наборі даних.

Для формування бази даних було використано зображення з відкритих ресурсів, а також авторські фотознімки, зроблені під час морських переходів. Зйомка здійснювалася як з борту судна, так і з берега, з висоти, що відповідає рівню бортової апаратури, на якій передбачається встановлення системи комп'ютерного зору. Це забезпечило наближення умов зйомки до реального середовища експлуатації моделі. Усі використані зображення знаходяться у відкритому доступі або створені самостійно, що забезпечує дотримання етичних та юридичних вимог щодо авторських прав.

Під час створення навчальної вибірки було відібрано зображення з урахуванням таких факторів: різні умови освітлення (день, ніч, ранковий та вечірній час), ускладнені метеоумови (наявність опадів, шторм), різний масштаб, максимальне різноманіття типів суден та ракурсів зйомки (рис. 3.4). Набір даних містить зображення з різних географічних регіонів. Для формування цільового

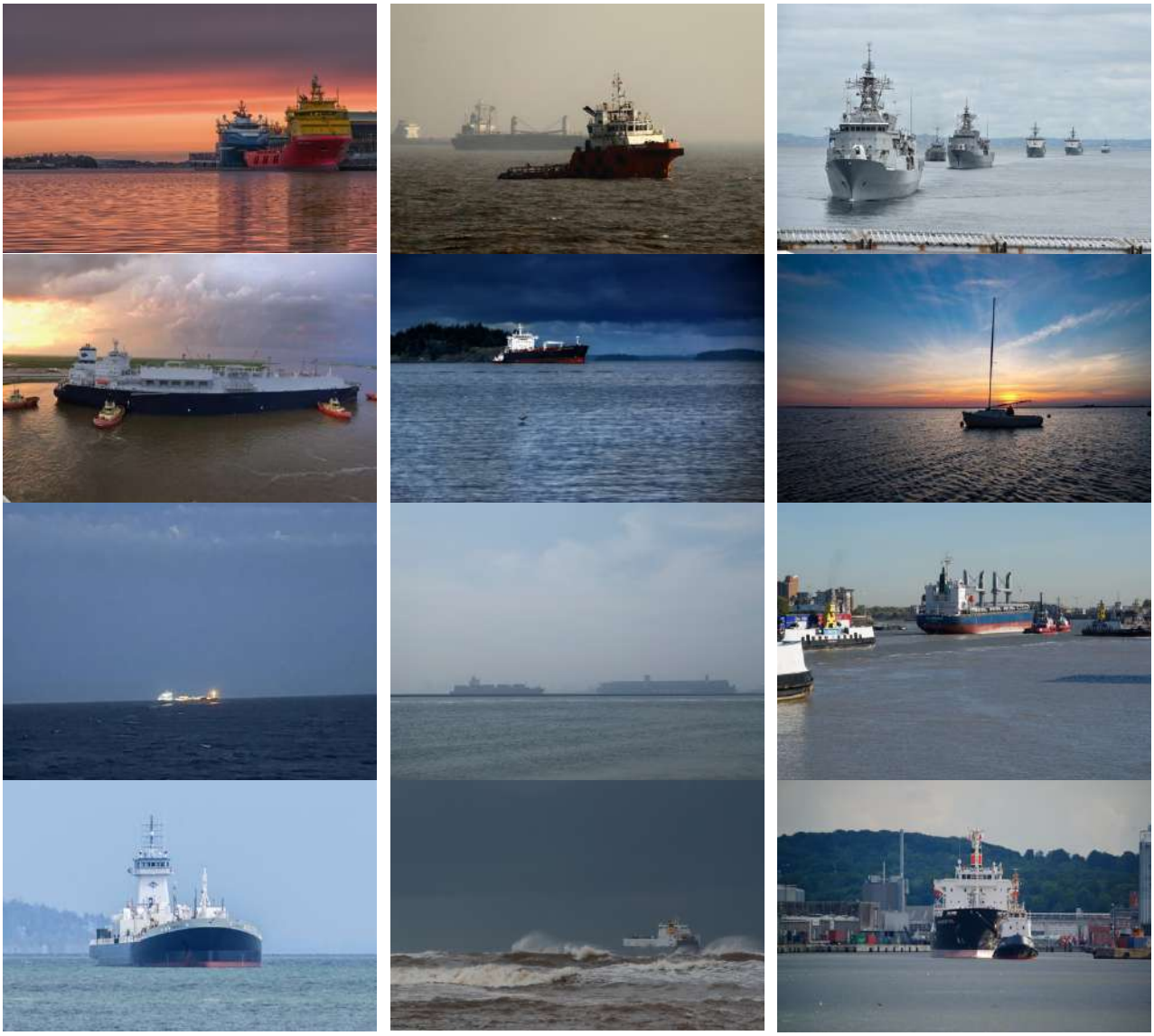
набору даних було емпірично встановлено мінімальний розмір зображення 672 × 672 пікселі.

Таблиця 3.2 – Розподіл анотованих екземплярів суден восьми класів ракурсу для тренування, перевірки та тестування

№ класу	Назва класу	Тренування	Перевірка	Тестування
0	forward	105	26	17
1	port bow	164	42	19
2	port side	372	112	52
3	starboard bow	153	29	17
4	starboard quarter	109	33	13
5	starboard side	273	94	41
6	stern	72	17	6
7	port quarter	110	21	16
	Усього	1358	374	181

3.4 Процес донавчання на основі початкового набору даних

Донавчання моделі комп’ютерного зору відбувалося в кілька етапів. Гіперпараметри виконаних тренувань зібрані в таблиці 3.3. Після кожного етапу донавчання проводився аналіз отриманих результатів та приймалося рішення щодо доцільності подальшого використання отриманої моделі. Кожний наступний етап виконувався не з нуля, а як продовження донавчання моделі, збереженої на епосі з найкращими показниками попереднього етапу. Файл цієї моделі (best.pt) використовувався як початкові ваги для наступного етапу. Сірим кольором виділені ті етапи донавчання, які були неуспішними у зв’язку з погіршенням показників (таблиця 3.3), та в подальшому не бралися до уваги.



а) б) в)

Рисунок 3.4 – Приклад навчальної вибірки: а) різні умови освітлення; б) ускладнені метеоумови; в) різний масштаб, різноманіття суден та ракурсів

На першому етапі було виконано базове донавчання моделі. Усі зображення було масштабовано до розміру за шириною 416 пікселів, що забезпечило уніфікацію вхідних даних. Надалі для більш тонкого налаштування моделі поступово розмір вхідного зображення збільшувався до 672 пікселів за шириною, що є оптимальним розміром вхідного зображення для моделі YOLOv8n та дозволило покращити її загальні характеристики [130].

Таблиця 3.3 – Гіперпараметри виконаних донавчань на базі початкового набору даних

Параметр	Етап 1	Етап 2	Етап 3	Етап 4	Етап 5	Етап 6	Етап 7	Етап 8
Кількість епох (epochs)	100	50	30	20	20	25	10	30
Розмір зображення (image size)	416×416	416×416	416×416	512×512	640×640	672×672	672×672	672×672
Розмір пакету (batch size)	16	16	16	8	4	4	4	4
Швидкість донавчання (learning rate)	0,01	0,003	0,003	0,001	0,0005	0,0003	0,0001	0,0002
Заморожені шари (frozen layers)	0	0	10	0	0	0	0	0

Вибір кількості епох, тобто тренувальних циклів, є одним із ключових параметрів, що визначає якість та стабільність донавчання. На першому етапі була виконана базова оцінка моделі. Тренування тривало протягом 100 епох. На подальших етапах донавчання кількість епох значно скорочена у зв’язку з ризиком перенавчання. Це дозволило своєчасно реагувати на погіршення параметрів.

Параметр batch size визначає кількість зображень, що одночасно подаються моделі для обробки під час одного кроку оптимізації. Його вибір впливає на швидкість донавчання, стабільність градієнтів і споживання обчислювальних ресурсів. На перших етапах цей параметр становив 16, проте в подальшому він був зменшений до 8 та 4 для більш тонкого налаштування, а саме покращення деталізації та точності.

Параметр learning rate визначає початкову швидкість донавчання моделі, тобто темп, з яким вона оновлює свої ваги під впливом помилки. Високе значення цього параметру може призвести до нестабільності або перенавчання, тоді як занадто низьке – до дуже повільного донавчання. На першому етапі було використано початкове значення lr0 = 0,01, що дало змогу моделі оцінити задачу в загальних

рисах. На подальших етапах це значення зменшувалося з метою покращення деталізації.

З метою підвищення ефективності донавчання та розширення варіативності навчальних даних було використано техніку аугментації. Її використання дозволяє розширити навчальний набір шляхом генерації нових варіацій на основі наявних зображень без необхідності збору додаткових даних. Це, у свою чергу, зменшує ризик перенавчання, оскільки модель не фокусується виключно на унікальних особливостях вихідних даних. Крім того, аугментація сприяє покращенню здатності моделі до узагальнення, що дає змогу ефективніше розпізнавати об’єкти в умовах, що відрізняються від навчальних. У результаті підвищується загальна точність розпізнавання перевірочних і тестових даних, що є критично важливим для практичного застосування в реальних сценаріях [10; 11; 104].

При виборі технік аугментації був врахований характер морського середовища: завжди присутній горизонт, море знаходиться унизу, а небо зверху. Ці особливості повинні бути також збережені в аугментованих зображеннях. Як зазначено в [89], при невеликому обсязі даних і специфічних умовах «фонова» експертиза є критичною при виборі аугментацій. Тобто саме знання особливостей зображення морського середовища (хвилі на воді, метеорологічні опади, перепади освітлення в денний та нічний час тощо) були вирішальними при виборі ефективних методів трансформацій. Тому було використано: аугментації кольорового простору, геометричні трансформації та просторово-локальні перетворення [63; 92]. Інші стандартні аугментації могли призвести до зниження якості донавчання. Обертання, віддзеркалення, композиційні трансформації було виключено, оскільки вони можуть змінювати просторову структуру або напрямок об’єкта, що є критичним у задачах визначення ракурсу. Наприклад, дзеркальне відображення об’єктів є недоцільним, оскільки повністю спотворює результати визначення ракурсу.

З метою підвищення стійкості моделі до незначних коливань у кольоровому представленні зображень, спричинених варіативністю умов зйомки, та розширення бази даних, у процесі донавчання було застосовано кольорові аугментації у вигляді випадкового регулювання відтінку (Hue Shift), насиченості (Saturation Shift) та

яскравості (Brightness Shift). Регулювання відтінку особливо ефективне для задач комп'ютерного зору в умовах змінного природного освітлення, коли вигляд об'єктів може суттєво змінюватися. Техніка регулювання насиченості дозволяє моделі краще адаптуватися до різноманітних умов зйомки, зокрема до змін погоди чи налаштувань камери. При донавчанні моделей, які повинні працювати за реальних умов освітлення, закладається зміна яскравості. На рис. 3.5 наведено прийнятні для розпізнавання анотованих екземплярів у морському середовищі приклади зміни відтінку, насиченості та яскравості.

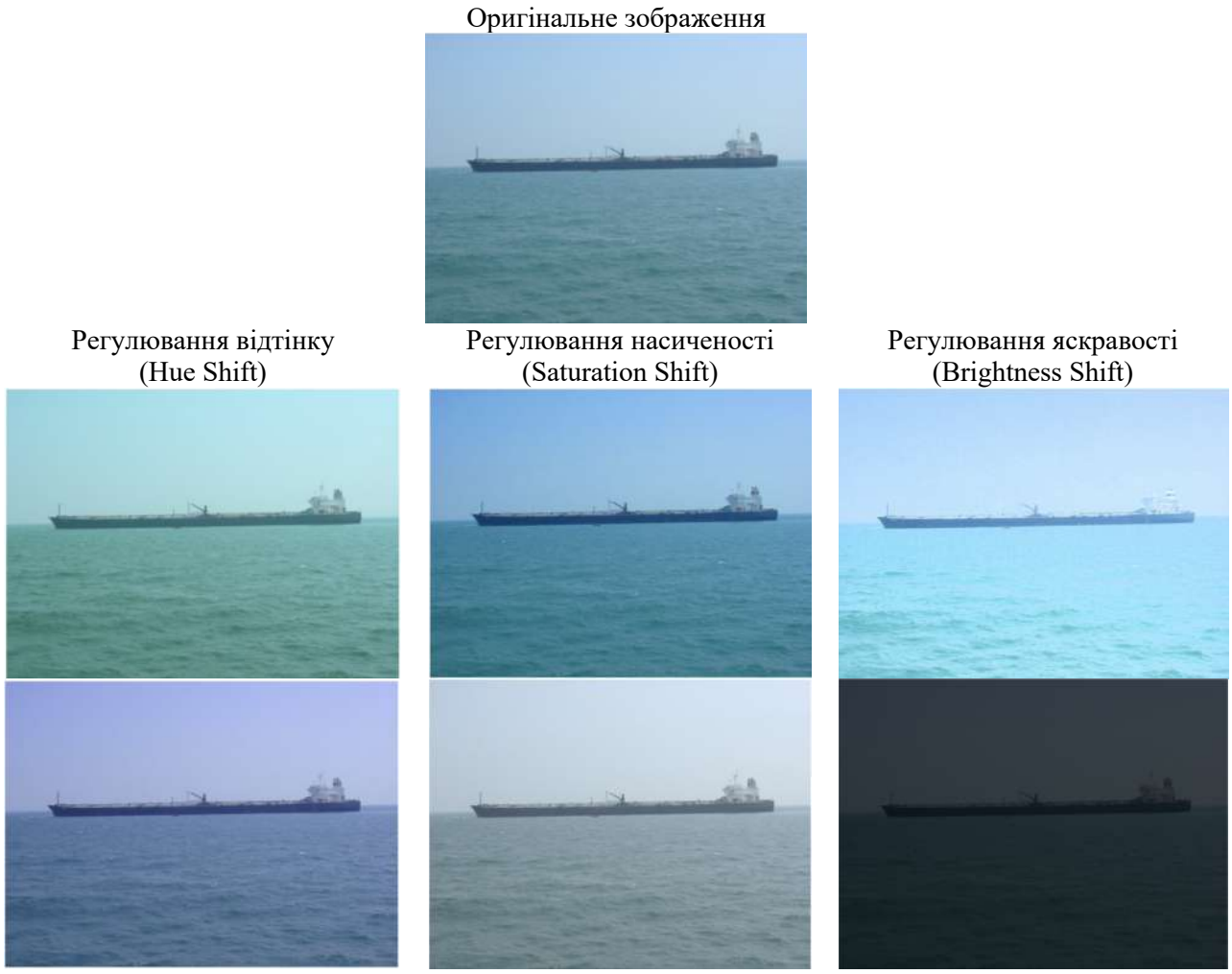


Рисунок 3.5 – Приклади аугментацій кольорового простору

Серед основних методів геометричної трансформації були використані: зсув (translate), масштабування (scaling), зсув по осі (shear), перспективне викривлення (perspective) (рис. 3.6). Для цілей розпізнавання суден, а саме їх ракурсу, зсув

(translate) є одним із базових типів геометричних аугментацій, який полягає у випадковому зміщенні зображення вздовж горизонтальної та вертикальної осей. У задачах розпізнавання суден на морській поверхні цей метод дозволяє моделі ефективно адаптуватися до зміни положення об’єкта в кадрі, що є типовим при зйомці з борту судна. Це імітує зміщення судна в полі зору камери внаслідок хитавиці, маневрування або змін кута спостереження, забезпечуючи більш стійке розпізнавання незалежно від положення.

Зміна розміру об’єктів (scaling) на зображенні дозволяє моделі краще розпізнавати судна, незалежно від їхньої відстані до камери. Така трансформація сприяє адаптації до різних масштабів, без втрати ключової інформації. Цей параметр відповідає за діапазон масштабування, регулює ступінь збільшення або зменшення розміру, забезпечуючи різноманіття цільового набору. Це особливо актуально для систем автономного керування, де судна можуть знаходитись на різній відстані від камери, що впливає на їхній візуальний розмір у кадрі.

Зсув по осі (shear) і перспективне викривлення (perspective) імітують реальні деформації форми суден, спричинені кутом огляду або рухом камери. Вони дозволяють донавчити модель коректно розпізнавати анотовані екземпляри навіть при геометричних викривленнях, що особливо актуально для динамічних сцен. Цей тип аугментації особливо важливий при знаходженні камери під нахилом, де такі об’єкти, як будівлі чи судна, можуть сприйматися стиснутими або витягнутими. Завдяки перспективній трансформації модель отримує здатність адаптуватися до змін оглядової точки та зберігати точність у реальних умовах [53; 65].



Рисунок 3.6 – Приклади геометричної та просторово-локальної аугментацій

Такі класичні види аугментації, як горизонтальне або вертикальне віддзеркалення (flip) та повороти (rotation) не можна використовувати в моделях розпізнавання ракурсу суден. Попри те, що ці трансформації допомагають моделям краще узагальнювати випадки, будь-які оберти чи віддзеркалення анотованих екземплярів змінюють місцями класи, що призводить до помилок класифікації ракурсу судна.

Одним із поширених методів просторово-локальної аугментації є випадкове стирання (erasing) (рис. 3.6). Суть методу полягає у випадковому маскуванні прямокутної області зображення, що імітує часткову втрату візуальної інформації внаслідок оклюзії, шуму, відблисків чи фонових перешкод, притаманних реальним морським умовам. Застосування даної техніки дозволяє зменшити перенавчання моделі на локальних або найбільш конкретних ознаках (наприклад, форма надбудови чи характер носової частини), змушуючи її враховувати ширший контекст зображення, включно з навколишньою водною поверхнею та формою корпусу [128].

3.5 Проміжні результати донавчання

Для оцінки якості моделі було використано метрики mAP при різних порогах перекриття IoU, а саме mAP@0,5 та mAP@0,5:0,95, що є загальноприйнятими показниками у задачах розпізнавання об’єктів (таблиця 3.4) [22; 73; 97].

Коефіцієнт IoU характеризує ступінь перекриття між передбаченим і еталонним обмежувальними прямокутниками. Його значення змінюється від 0 до 1: IoU = 1 відповідає повному збігу обмежувальних рамок, а IoU = 0 – відсутності їх перекриття. mAP@0,5 використовується як базовий індикатор якості локалізації об’єктів і їх класифікації. mAP@0,5:0,95 обчислюється як середнє значення AP для всіх класів при різних порогах IoU в межах від 0,5 до 0,95 з кроком 0,05, що дозволяє більш суворо оцінити якість виявлення та локалізації об’єктів. Для аналізу проведених досліджень після кожного етапу донавчання обиралася модель із найвищим значенням показника precision серед етапів із близьким до найкращого значенням mAP@0,5:0,95, оскільки для задачі класифікації ракурсу судна

першочергове значення має достовірність віднесення об’єкта до правильного класу. Отримані в ході дослідження результати (таблиця 3.4) свідчать про середній рівень якості роботи моделі.

Таблиця 3.4 – Результати донавчання моделі на перших 8 етапах

Параметр	Етап 1	Етап 2	Етап 3	Етап 4	Етап 5	Етап 6	Етап 7	Етап 8
Загальна кількість епох	100	50	30	20	20	25	10	30
Епоха з найкращими показниками	78	45	28	19	18	25	10	16
Втрати за межами рамки (box loss)	0,6674	0,9141	0,9229	0,5973	0,0043	0,0045	0,0061	0,8889
Втрати класифікації (classification loss)	0,8893	2,1515	2,1077	0,6454	0,6759	0,6963	2,1691	1,7754
Втрати розподільчої фокусної функції (distribution focal loss)	0,9214	1,0123	1,0289	0,8846	0,9245	0,9371	1,1605	1,0959
Точність (precision)	0,2888	0,3549	0,4108	0,3606	0,3642	0,3964	0,3246	0,3372
Повнота (recall)	0,5167	0,3986	0,3317	0,4393	0,4253	0,4174	0,4798	0,4653
Середня точність при порозі 0,5 (mAP@0,5)	0,3748	0,3508	0,3601	0,3649	0,3501	0,3714	0,3752	0,3477
Середня точність у діапазоні 0,5:0,95 (mAP@0,5:0,95)	0,3007	0,2868	0,2976	0,2967	0,2851	0,3040	0,3082	0,3008

Параметри box loss (val) та class loss (val) показують втрати при визначенні обмежувальних рамок та класифікації об’єктів. Чим менші ці параметри, тим краще працює уся модель. На п’ятому та шостому етапах box loss (val) були мінімальними і становили лише 0,0043 та 0,0045 відповідно. Оптимальним вважається значення менше 0,05. Тобто отримані результати свідчать про хорошу динаміку, але показник class loss (val), на противагу box loss (val), має високі значення (0,6759 та 0,6963). Distribution Focal Loss (DFL) (val) відображає якість донавчання функції Distribution Focal Loss, яка апроксимує неперервний розподіл відстаней від опорної точки до кожної з чотирьох меж обмежувальної рамки замість прямої регресії координат. Завдяки такому підходу модель точніше локалізує межі об’єкта, зокрема забезпечує стабільніше передбачення координат рамки за умов часткового перекриття, розмитості чи змінного масштабу зображення. Отримане значення DFL loss (val) на сьомому та восьмому етапах є високим (1,1605 та 1,0959). Значення метрик втрат у процесі донавчання повинні стабільно знижуватись. Їх критичне зменшення, а саме ситуація, коли значення показників втрат у процесі донавчання швидко зменшується до дуже малих величин, свідчить про наближення моделі до стану, коли вона може правильно розпізнавати нові, раніше невідомі дані після завершення донавчання без втрати якості внаслідок перенавчання. Натомість їх ріст або коливання може бути ознакою малої кількості епох тренування, перенавчання або недоліків бази даних.

Оскільки модель призначена для розпізнавання ракурсу судна, показник precision у межах донавчання та перевірки характеризує частку правильних багатокласових виявлень серед усіх виявлень моделі. Правильним вважається виявлення, для якого коректно локалізовано об’єкт і правильно визначено відповідний клас ракурсу. Помилка класифікації ракурсу при коректній локалізації об’єкта знижує значення цього показника. Якщо клас ракурсу визначено неправильно, таке виявлення вважається хибним. Саме через зниження точності 7-й та 8-й етапи були виключені з подальших досліджень.

Параметр повнота (recall) допомагає сформувати висновок про наявність пропущених об’єктів під час роботи моделі. Показник recall характеризує частку

еталонних об’єктів відповідних класів, які модель правильно локалізувала та класифікувала. Високе значення recall свідчить про здатність моделі не пропускати об’єкти, однак не гарантує відсутність хибних спрацювань. Найвищий показник recall був досягнутий на першому етапі (0,5167). Проте загалом значення recall залишалися нижчими за оптимальні для задач виявлення (0,6–0,9) [94].

Таким чином, результати донавчання, отримані на етапах 2; 3; 7 та 8, були визнані неефективними та виключені з подальшого процесу донавчання і аналізу результатів. Це було спричинене тим, що кількість помилок у визначенні класу та обмежувальних рамок мала тенденцію до збільшення, що погіршувало загальні показники моделі.

Окрім вищезазначених параметрів, оцінку якості роботи моделі дає візуальний аналіз помилок. Їх можна поділити на дві основні групи:

– хибнопозитивні спрацювання, коли модель помилково вважає, що на зображенні присутній об’єкт певного класу, хоча насправді його там немає (рис. 3.7, обведені в червону рамку);

– хибнонегативні спрацювання, коли модель ігнорує об’єкти, які насправді розташовані на зображенні (рис. 3.7, обведені в жовту рамку) [20; 75].

Модель демонструє схильність до хибнопозитивної класифікації елементів навколишнього середовища як цільових об’єктів, тому оновлений набір навчальних даних доцільно було доповнити негативними зображеннями (negative examples), які відображають різноманіття навколишнього середовища та портової інфраструктури без анотованих екземплярів суден [87]. Наявність хибнонегативних спрацювань на чітких зображеннях свідчила про значний дисбаланс класів, що призводило до ігнорування класів, які представлені меншою кількістю анотованих екземплярів суден (port quarter, stern, forward).

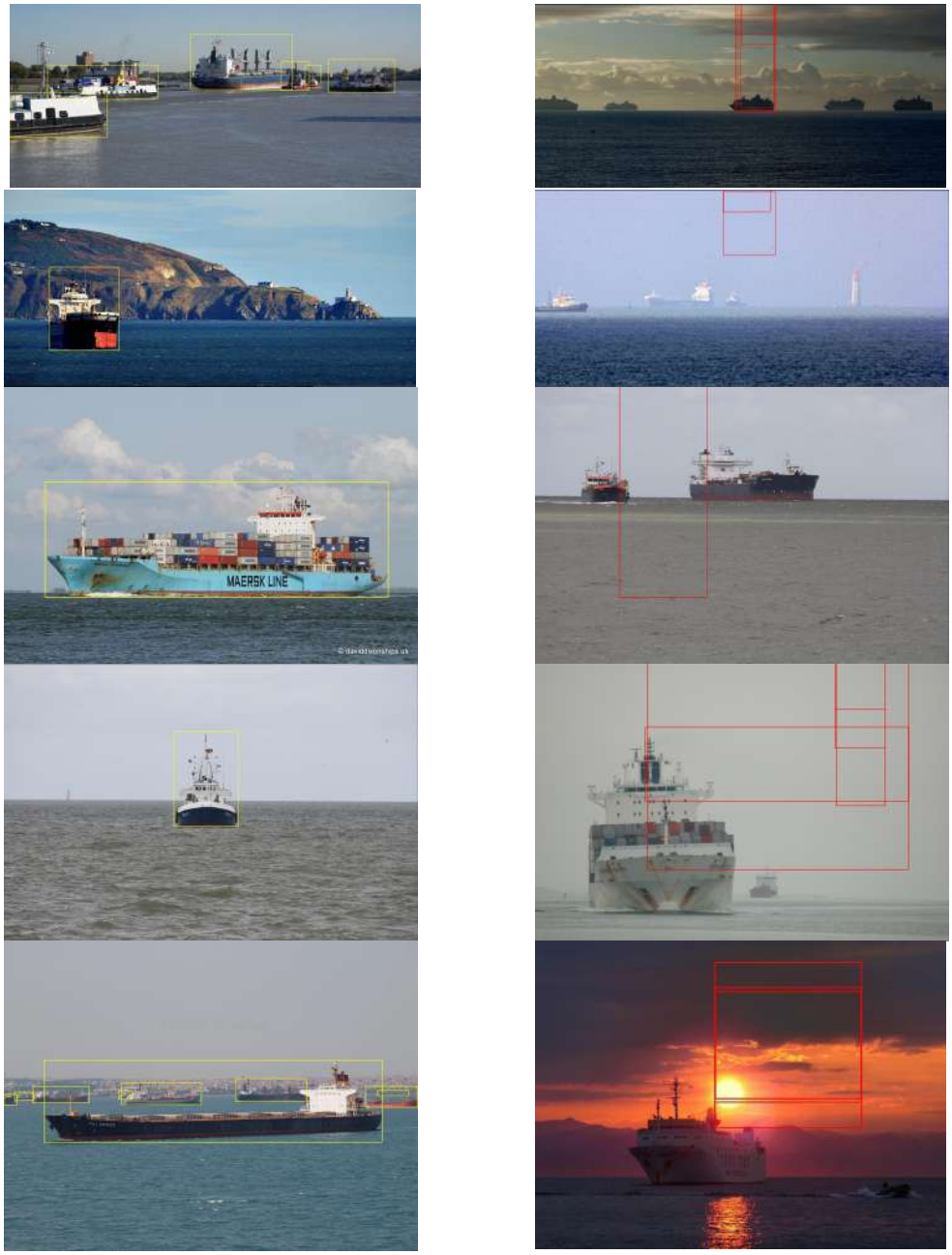


Рисунок 3.7 – Приклади хибнонегативних (обведені в жовту рамку) та хибнопозитивних спрацювань (обведені в червону рамку)

3.6 Оновлений набір даних

Аналіз отриманих результатів показав, що початковий набір даних потребував доопрацювання. Оновлена база даних складалася з 1742 зображень (3327 анотованих екземплярів суден) та 115 негативних зображень (negative examples) [25], без об’єктів для розпізнавання. Варто зазначити, що в таблиці 3.5

наводиться не кількість зображень, а кількість анотованих екземплярів суден. Це зумовлено тим, що зображення може містити декілька суден з різних ракурсів.

Таблиця 3.5 – Розподіл анотованих екземплярів суден восьми класів ракурсів оновленого набору даних для тренування, перевірки та тестування

№ класу	Назва класу	Тренування	Перевірка	Тестування	Загальна кількість анотованих екземплярів суден
0	forward	266	70	29	365
1	port bow	291	77	64	432
2	port side	494	166	63	723
3	starboard bow	285	66	37	388
4	starboard quarter	223	65	33	321
5	starboard side	443	84	50	577
6	stern	150	49	22	221
7	port quarter	213	55	32	300
	Усього	2365	632	330	3327

Попри доповнення бази даних зображень, спостерігався дисбаланс кількості об’єктів серед окремих класів. Зокрема, найчисленніший клас port side у тренувальній вибірці (494) мав у понад три рази більше анотованих екземплярів суден, ніж найменш представлений stern (150). Такий дисбаланс серед класів навчальної вибірки є типовою проблемою для практичних задач комп’ютерного зору. Зазначений дисбаланс спричиняє схильність моделі до перенавчання на більш представлених класах, ігноруючи менш численні [8]. Це, у свою чергу, призводить до низької точності (precision) і повноти (recall) на менш численних класах, зростання помилок класифікації (confusion), а також погіршення якості загальної поведінки моделі.

Для компенсації дисбалансу класів застосовано метод зважування, за якого вага кожного класу визначається обернено пропорційно кількості його представників відносно найбільш представленого класу – тобто класу 2, який має найбільше анотованих екземплярів (494) [13; 32; 64]:

$$w_i = \frac{N_{\max}}{N_i}, \tag{3.2}$$

де w_i – ваговий коефіцієнт *i*-го класу;

$N_{\max}$ – кількість об’єктів у найбільш представленому класі;

N_i – кількість анотованих екземплярів для класу *i*.

В результаті розрахунку було отримано такі вагові коефіцієнти для класів від 0 до 7, відповідно (таблиця 3.6). Це дозволило дати більшу вагу класам, представленим незначною кількістю анотованих екземплярів, для уникнення їх ігнорування моделлю в подальшому процесі донавчання.

Таблиця 3.6 – Розрахунок вагових коефіцієнтів для кожного класу ракурсу

Клас	Кількість анотованих екземплярів для тренування	Розрахунок	Ваговий коефіцієнт
0	266	494 / 266 = 1,857	1,86
1	291	494 / 291 = 1,697	1,70
2	494	494 / 494 = 1,000	1,00
3	285	494 / 285 = 1,733	1,73
4	223	494 / 223 = 2,215	2,22
5	443	494 / 443 = 1,115	1,11
6	150	494 / 150 = 3,293	3,29
7	213	494 / 213 = 2,319	2,32

3.7 Підсумкові результати донавчання моделі

До підсумкового порівняння включено дев’ять відібраних етапів із сумарною тривалістю 445 епох. Загальний обсяг усіх проведених експериментів становив 565 епох. Всі результати донавчання зведені в таблицю 3.7. З використанням

початкового набору даних було проведено перші 4 тренування (етап 1–4). У розділі 3.4 вони позначені як етап 1; 4–6. Оновлений набір даних був використаний при проведенні останніх 5 тренувань (етапи 5–9).

Таблиця 3.7 – Результати донавчання моделі комп'ютерного зору для розпізнавання ракурсу судна

Показник	1 етап	2 етап	3 етап	4 етап	5 етап	6 етап	7 етап	8 етап	9 етап
Загальна кількість епох	100	20	20	25	60	60	60	50	50
Епоха з найкращими показниками	78	19	18	25	56	57	59	28	17
Втрати за межами рамки (Box loss)	0,6674	0,5973	0,0043	0,0045	0,0028	0,0030	0,0029	0,0027	0,0048
Втрати класифікації (Classification loss)	0,8893	0,6454	0,6759	0,6963	1,3078	1,3240	1,0118	0,8444	0,7362
Втрати розподільчої фокусної функції (Distribution focal loss)	0,9214	0,8846	0,9245	0,9371	0,7845	0,8135	0,8004	0,7672	0,6883
Точність (precision)	0,2888	0,3606	0,3642	0,3964	0,5979	0,6379	0,6585	0,6792	0,7034
Повнота (recall)	0,5167	0,4393	0,4253	0,4174	0,5667	0,5975	0,6397	0,6445	0,6098
Середня точність при порозі 0,5 (mAP@0,5)	0,3748	0,3649	0,3501	0,3714	0,5985	0,6420	0,6687	0,6728	0,6747
Середня точність у діапазоні 0,5–0,95 (mAP@0,5:0,95)	0,3007	0,2967	0,2851	0,3040	0,4775	0,5151	0,5428	0,5477	0,5404

Порівняння показників 8-го та 9-го етапів (таблиця 3.7) показує, що етап 8 мав дещо вищі значення повноти (recall) 0,6445 проти 0,6098 та mAP@0,5:0,95 0,5477 проти 0,5404, тоді як етап 9 забезпечив помітно вищу точність (precision) 0,7034 проти 0,6792 та практично однакове значення mAP@0,5 0,6747 проти 0,6728. Відповідно до прийнятого критерію відбору, за якого пріоритет надається зниженню кількості хибнопозитивних спрацювань за збереження високого рівня

mAP@0,5:0,95, для подальшого використання обрано модель, отриману на 9-му етапі донавчання. Її показники якості: точність (precision) становить 0,7034; повнота (recall) – 0,6098; середня точність при пороговому значенні IoU 0,5 (mAP@0,5) – 0,6747; показник середньої точності в діапазоні IoU 0,5:0,95 (mAP@0,5:0,95) – 0,5404. Втрати за межами обмежувальних рамок на цьому етапі становили 0,0048 [74].

На 9 етапі тренування тривало протягом 50 циклів, на 17-му з яких було отримано найкраще значення показника mAP@0,5:0,95. У процесі донавчання моделі комп'ютерного зору програмним середовищем Google Colab автоматично формуються графіки зміни функцій втрат та метрик якості моделі (рис. 3.8). Ці графіки дозволяють здійснювати моніторинг процесу донавчання, його стабільності та можливості перенавчання. На рис. 3.8 наведено автоматично сформовані графіки зміни функцій втрат та метрик якості моделі залежно від кількості епох донавчання на 9-му етапі. Аналіз графіків показує стабілізацію функцій втрат та метрик якості, що свідчить про завершення процесу донавчання моделі та відсутність перенавчання.

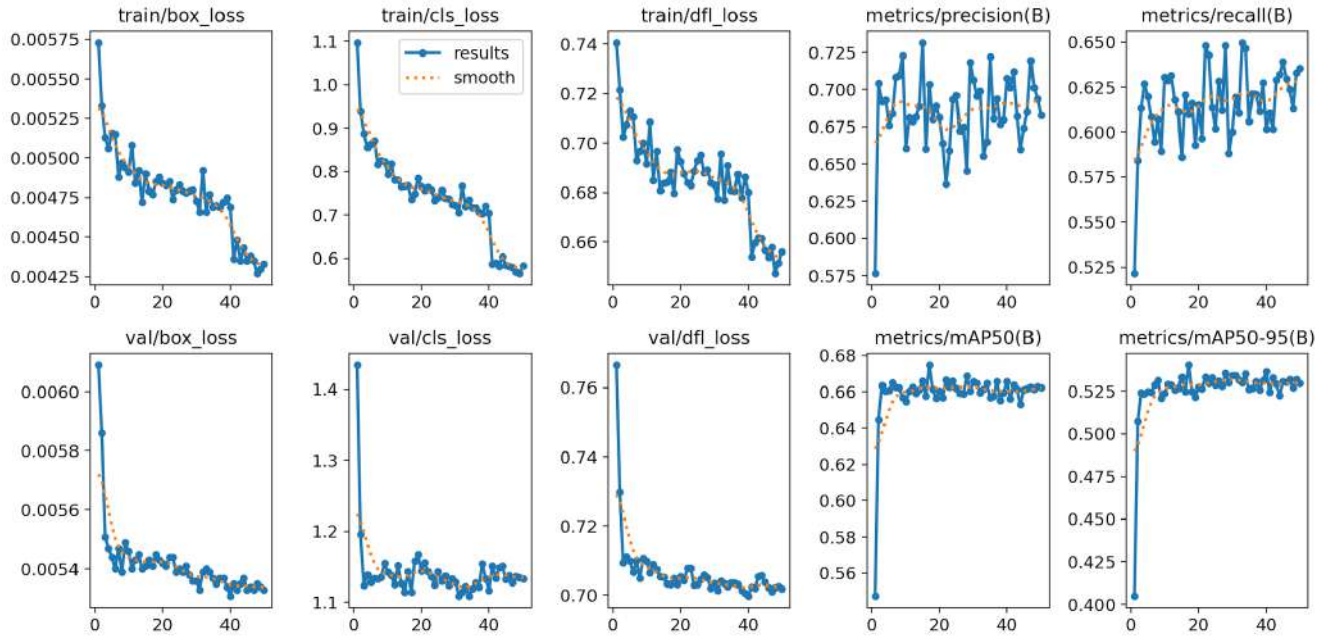


Рисунок 3.8 – Динаміка зміни функцій втрат та метрик якості моделі комп'ютерного зору в процесі донавчання на 9 етапі

Оскільки показники перевірочної вибірки використовувалися для порівняння етапів донавчання та вибору остаточної моделі, її підсумкове оцінювання було виконано окремо на тестовій вибірці. Для моделі 9-го етапу на тестовій вибірці отримано precision – 0,6531; recall – 0,6404; mAP@0,5 – 0,6955 та mAP@0,5:0,95 – 0,5580. Отримані результати свідчать про співставний рівень якості моделі на перевірочній і тестовій вибірках (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Показники якості остаточної моделі на перевірочній та тестовій вибірках

Показник	Перевірочна вибірка	Тестова вибірка
Precision	0,7034	0,6531
Recall	0,6098	0,6404
mAP@0,5	0,6747	0,6955
mAP@0,5:0,95	0,5404	0,5580

Висновки за розділом 3

У третьому розділі на основі архітектури YOLOv8n донавчено та експериментально оцінено спеціалізовану модель комп’ютерного зору для виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу. Як основу було обрано архітектуру YOLOv8n, яку обрано з урахуванням її відносно невисокої обчислювальної складності та потенціалу застосування для оброблення відео в реальному часі.

Обґрунтовано поділ кутового діапазону ракурсу судна-цілі на вісім класів шириною 45°, визначено кутові межі та візуальні ознаки кожного класу. Сформовано правила експертного віднесення зображень до відповідних класів і методичні вимоги до формування та анотування цільового набору даних.

У ході дослідження сформовано та анотовано набір даних, в якому представлені зображення суден різних типів і ракурсів. Початковий набір даних включав 925 зображень; у процесі дослідження його було розширено до 1742 зображень суден (3327 анотованих екземплярів) з доповненням

115 негативними зображеннями (negative examples), що не містять анотованих екземплярів. Для покращення донавчання, підвищення здатності моделі до узагальнення та розширення варіативності навчальних даних без необхідності збору додаткових даних, було використано техніки аугментації. Було використано колірні, геометричні та просторово-локальні трансформації, обрані таким чином, щоб імітувати характерні для морського середовища спотворення зображення – зміну освітлення, зміщення кадру внаслідок хитавиці та часткове перекриття об’єктів. Такий вибір аугментацій спрямований на підвищення стійкості моделі до цих факторів.

Оцінювання ефективності роботи моделі було виконано за основними показниками якості, серед яких precision, recall, box loss (val), class loss (val), DFL loss (val), mAP@0,5 та mAP@0,5:0,95. Отримані результати підтвердили можливість ефективного використання YOLOv8n для задач виявлення та класифікації ракурсів суден у відеопотоці.

Був проведений проміжний аналіз результатів. На основі хибнонегативних і хибнопозитивних спрацювань було виявлено значний дисбаланс класів, через що виникали труднощі під час розпізнавання окремих схожих ракурсів суден. Зокрема, за умов часткового відображення об’єктів або значної зміни масштабу найменш представлені класи ігнорувалися. Відповідно, модель рідко виявляла об’єкти цих класів. Вона демонструвала схильність до хибнопозитивної класифікації елементів навколишнього середовища як цільових об’єктів, тому оновлений набір навчальних даних доцільно було доповнити negative examples. Для часткової компенсації виявленого дисбалансу класів було застосовано вагові коефіцієнти класів, обернено пропорційні кількості анотованих екземплярів у кожному класі відносно найбільш представленого класу.

У результаті проведення тренувань протягом 445 епох було обрано остаточну модель 9-го етапу, для якої на перевірочній вибірці отримано precision – 0,7034; recall – 0,6098; mAP@0,5 – 0,6747 та mAP@0,5:0,95 – 0,5404. Після завершення донавчання модель додатково оцінено на незалежній тестовій вибірці, що не використовувалася під час донавчання та вибору моделі. На тестовій вибірці

отримано precision – 0,6531, recall – 0,6404, mAP@0,5 – 0,6955 та mAP@0,5:0,95 – 0,5580. Отримані результати підтвердили збереження показників якості моделі на незалежних даних. Саме ця модель використана в подальших експериментальних дослідженнях ефективності визначення ракурсу суден.

РОЗДІЛ 4
ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ЗАСОБІВ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА СТРУКТУРИ ВІДЕОСИСТЕМИ

4.1 Вимоги до розташування засобів відеоспостереження

Розташування засобів відеоспостереження є ключовим етапом у проєктуванні систем кругового огляду, оскільки воно безпосередньо впливає на охоплення території, мінімізацію сліпих зон та ефективність подальшої обробки даних. За відсутності нормативної бази ІМО щодо розміщення засобів спостереження на борту судна було прийнято як еталон стандарти для радіолокаційних станцій [41; 42; 44]. Оскільки РЛС забезпечують спостереження, як і камери відеоспостереження, та можуть бути об’єднані в спільну систему, було зроблено припущення, що основні вимоги до їхнього розміщення є подібними.

Відповідно до [42] було виявлено, що конструктивні елементи судна, зокрема носова надбудова, щогли, труби, вантажні пристрої та елементи палубного обладнання, не повинні створювати протяжних або критичних сліпих секторів у горизонтальному чи вертикальному полі зору камер. Критично важливим для раннього виявлення інших суден, навігаційних небезпек та берегових об’єктів є забезпечення безперервного огляду морської поверхні у напрямку курсу судна та в бортових напрямках.

Важливою вимогою щодо забезпечення належного кругового огляду є допустимі межі сліпих зон. У загальній зоні огляду вперед від траверза кутова ширина кожного окремого сліпого сектора, спричиненого конструктивними елементами судна або вантажем, не повинна перевищувати 10°. Сумарна кутова протяжність усіх сліпих секторів у цій зоні не повинна перевищувати 20°. Між суміжними сліпими секторами повинні забезпечуватися прозорі сектори огляду шириною не менше 5°. Ця вимога має принципове значення, оскільки гарантує наявність регулярних візуальних секторів для спостереження за морською поверхнею та об’єктами навіть за наявності конструктивних перешкод.

Резолюцією [42] в межах вужчого сектора, обмеженого ±10° від напрямку прямо по курсу, встановлено більш жорсткі обмеження порівняно із загальною зоною огляду попереду траверзу: кутова ширина кожного індивідуального сліпого сектора в цій зоні не повинна перевищувати 5°, що підкреслює важливість безперервного контролю за навігаційною обстановкою безпосередньо перед судном (рис. 4.1).

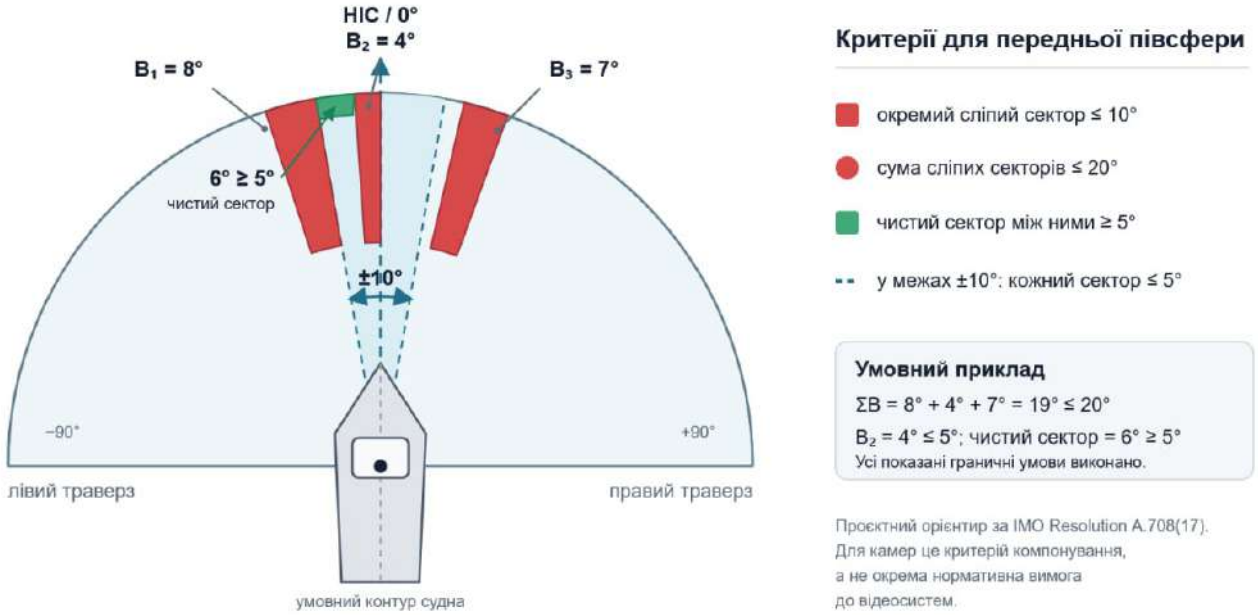


Рисунок 4.1 – Схема проєктних обмежень сліпих секторів у передній півсфері судна

В рамках системи відеоспостереження на базі комп’ютерного зору для розпізнавання ракурсу судна заплановане розміщення камер на одній з щогл судна. Технічною особливістю розглянутої конфігурації є можливість спільного розміщення антени РЛС та засобів відеоспостереження на одній щоглі. За розрахункову висоту розміщення антени РЛС, відносно якої сформульовано експлуатаційні вимоги щодо виявлення цілей, прийнято 15 метрів [44]. Кріплення камери на такому ж рівні неможливе з огляду на вимоги електромагнітної сумісності та безпеки, пов’язані з випромінюванням антени РЛС. Камери повинні встановлюватися поза небезпечною зоною випромінювання антени РЛС із

дотриманням відстаней, встановлених виробником відповідного радіолокаційного обладнання [38].

З метою визначення впливу висоти розміщення було розглянуто алгоритм оцінки мінімальної висоти розміщення камери (4.1) для дальності спостереження. Цей алгоритм базується на наближеній формулі видимого горизонту з урахуванням стандартної атмосферної рефракції, яка враховує кривизну Землі та забезпечує видимість поверхні моря без значних сліпих зон [69]:

$$d = 2.07 \cdot \sqrt{h}, \tag{4.1}$$

де d – дальність спостереження, морських миль;

h – висота розміщення камери над рівнем моря.

Відповідно до Правила 22 МПЗЗС-72 [46] номінальна дальність видимості топового вогню судна довжиною 50 м або більше становить 6 морських миль. Ця величина відображає загальноприйняту в морській практиці мінімальну дистанцію завчасного виявлення іншого судна для оцінки ситуації розходження. У цій роботі значення 6 морських миль використовується виключно як проєктний орієнтир для геометричного розрахунку параметрів розміщення засобів відеоспостереження, зокрема висоти встановлення камер та положення видимого горизонту. Воно не розглядається як експериментально підтверджена дальність виявлення судна або визначення його ракурсу донавченою моделлю комп’ютерного зору. Дальність видимості навігаційного вогню та дальність автоматизованого розпізнавання корпусу судна є різними характеристиками і залежать від різних факторів. Тому розрахунок для 6 морських миль у цьому розділі характеризує потенційну геометричну зону огляду проєктованої відеосистеми, а фактично досліджений діапазон роботи моделі визначається окремо за результатами натурних експериментів.

З метою ілюстрації залежності дальності спостереження від висоти наведено таблицю розрахунків для висот розміщення камери від 8,4 до 14,5 м з кроком 0,5 м. Отримані розрахунки було зведено в таблицю 4.1, що дозволило оцінити

мінімальну розрахункову висоту розміщення засобів відеоспостереження у межах прийнятого розрахункового діапазону висот до 15 м.

Таблиця 4.1 – Розрахункова геометрична дальність видимого горизонту залежно від висоти розміщення камери

Висота розміщення, м	Розрахункова дальність видимого горизонту, морських миль
8,4	6,00
9,0	6,21
9,5	6,38
10,0	6,55
10,5	6,71
11,0	6,87
11,5	7,02
12,0	7,17
12,5	7,32
13,0	7,46
13,5	7,61
14,0	7,75
14,5	7,88

За прийнятою розрахунковою моделлю висота 8,4 м забезпечує пряму геометричну видимість поверхні моря до горизонту на відстані близько 6 морських миль. Це значення не визначає дальність автоматизованого виявлення суден або класифікації їхнього ракурсу, оскільки ці можливості додатково залежать від розмірів цілі, характеристик оптичної системи, просторової роздільної здатності зображення, умов освітлення, видимості та властивостей моделі комп’ютерного зору.

Для забезпечення стійкості системи до динамічних умов морського середовища, таких як хитавиця судна, передбачається встановлення кожної камери

на гіростабілізуючій платформі. За аналогією з нормами для РЛС [44], де обладнання повинно витримувати хитавицю до ±10°, що є типовим для морських умов, системи відеоспостереження доцільно проєктувати з урахуванням забезпечення стабільності зображення за таких зовнішніх факторів. В противному випадку це може призвести до мерехтіння зображення, помилок у виявленні об’єктів моделлю комп’ютерного зору та можливих неточностей у розрахунках. Гіростабілізуюча платформа, базована на гіроскопах та акселерометрах, здатна активно компенсувати ці рухи в реальному часі, утримуючи оптичну вісь стабільною з точністю до 0,1°–0,5°, залежно від моделі платформи [34].

4.2 Аналіз та обґрунтування вибору типу камер відеоспостереження

Ефективність роботи моделі для визначення ракурсу судна безпосередньо залежить від якості та деталізації вхідного зображення. У морському середовищі, де об’єкти спостерігаються на значних відстанях, при низькій освітленості та динамічних умовах, критичним є забезпечення достатньої кількості пікселів на об’єкті.

Для оцінки необхідної роздільної здатності камери в роботі було використано критерії Джонсона [12; 48; 85], які є стандартним емпіричним інструментом для визначення мінімальної кількості пікселів на критичному розмірі об’єкта. Першочергово вони були розроблені для візуального сприйняття оператором, проте сучасні дослідження підтверджують їхню придатність як орієнтир для систем комп’ютерного зору в задачах виявлення та класифікації надводних об’єктів [35].

Для досягнення поставленої мети було розглянуто вимоги до класифікації об’єктів, а саме ракурсу судна, відповідно до яких розмір об’єкта повинен складати не менше 32 × 32 пікселі. Для ефективної роботи сучасних моделей комп’ютерного зору сімейства YOLO, зокрема YOLOv8n, емпірично встановлено потребу в значно більшій деталізації. Об’єкти, менші за 32 × 32 пікселі, традиційно класифікуються як малі, і на них точність класифікації суттєво знижується через втрату дрібних особливостей. Тому за робочу вимогу прийнято, що об’єкт має займати щонайменше 32 пікселі вздовж критичного розміру [71; 102].

Розрахунок проведено для середнього розміру судна L = 20 м, проєктної дистанції d = 6 морських миль (11112 м), розміру пікселя p = 1,55 × 10^{-6} м та горизонтального кута поля зору (англ. Horizontal Field of View, HFOV), що становить 60° (1,047 рад), що є мінімально прийнятним для ширококутного режиму роботи засобів відеоспостереження.

Кутовий розмір об'єкта θ_{object} обчислено як:

$$\theta_{\text{object}} = 2\arctan(\frac{L}{2d}), \quad \theta_{\text{object}} = 2\arctan(\frac{20}{2\times 11112}) = 0,001799(\text{рад}). \tag{4.2}$$

Фокусна відстань об'єктива задає масштаб зображення та пов'язана з компромісом між деталізацією і охопленням сцени: чим вона більша, тим більшою кількістю пікселів відображається об'єкт, але тим вужче поле зору камери [48]. Розрахунок здійснювався за формулою:

$$f = \frac{N_{\text{object}} \cdot p \cdot d}{L}, \quad f = \frac{32 \cdot 1,55 \cdot 10^{-6} \cdot 11112}{20} = 0,0276(\text{м}), \tag{4.3}$$

де f – фокусна відстань об'єктива;

N_{object} – кількість пікселів на об'єкт.

Параметр Instantaneous Field of View (IFOV) характеризує кут, що припадає на один піксель зображення, та пов'язує геометричні параметри сцени з її дискретним представленням. Зменшення IFOV підвищує здатність системи розрізняти дрібні деталі, зокрема на великих відстанях. Розрахунок IFOV здійснювався за такою формулою:

$$IFOV = \frac{\theta_{\text{object}}}{N_{\text{object}}}, \quad IFOV = \frac{0,0017996}{32} = 0,000056(\text{рад}). \tag{4.4}$$

Здатність камери відтворювати дрібні деталі вздовж горизонтальної осі та мінімальний розмір об’єкта, що підлягає розрізненню, характеризує горизонтальна роздільна здатність засобів відеоспостереження res_h. Цей параметр впливає на точність виявлення та класифікації об’єктів в кадрі:

$$res_h = \frac{HFOV}{IFOV}, \quad (4.5)$$

$$res_h = \frac{1,047}{0,000056} = 18696(\text{пікселів}).$$

Припустимо, що співвідношення сторін за горизонталлю та вертикаллю кадру можна визначити як 4:3. Тоді вертикальна роздільна здатність res_v визначається за формулою:

$$res_v = res_h \cdot \frac{3}{4}, \quad (4.6)$$

$$res_v = 18696 \cdot \frac{3}{4} = 14022(\text{пікселя}).$$

Загальна роздільна здатність відеозображення:

$$R = \frac{res_h \cdot res_v}{10^6}, \quad (4.7)$$

$$R = \frac{18696 \cdot 14022}{10^6} = 262(\text{мегапікселя}).$$

Отримані результати демонструють, що для забезпечення необхідної деталізації в ширококутному режимі без оптичного чи цифрового наближення навіть при $HFOV = 60°$ потрібна роздільна здатність від 262 мегапікселів та фокусна відстань 27,6 мм. Такі значення можуть призводити до надмірного обчислювального навантаження. Крім того, саме широке поле зору, незалежно від досягнутої роздільної здатності, спричиняє зростання геометричної похибки та оптичної дисторсії ближче до країв кадру. Як рішення в роботі використано PTZ-камери, які поєднують широкий кут огляду для первинного виявлення з можливістю динамічного оптичного наближення для розпізнавання. Це дозволяє у ширококутному режимі виконувати первинне виявлення, а в режимі оптичного

наближення забезпечувати $N \geq 32$ пікселів на об’єкті, що відповідає прийнятій у роботі вимозі для алгоритму YOLOv8n.

4.3 Технічні вимоги до параметрів PTZ-камер

У роботі було розглянуто вимоги до двох з основних параметрів камер відеоспостереження: це HFOV та вертикальне поле зору (VFOV) [111]. HFOV є ключовим параметром у системах відеоспостереження, що визначає кількість камер у складі системи та необхідний запас перекриття між ними. Для реалізації системи були обрані PTZ-камери, характерною особливістю яких є варіативність HFOV залежно від наближення. Максимальні значення HFOV змінюються в межах від 90° до 60°, а мінімальні – від 2° до 1,5°, залежно від моделі.

Режим роботи камери без наближення, в якому HFOV приймає максимальне значення, був названий ширококутним. Цей режим дозволяє відстежувати трафік в безпосередній близькості до судна. Ініційоване оператором наближення дозволяє адаптувати систему для далекого спостереження без втрати деталізації. Цей параметр критично впливає на конфігурацію створеної системи кругового огляду, оскільки визначає необхідну кількість камер і ступінь перекриття, що забезпечує відсутність сліпих зон.

VFOV є другим із фундаментальних параметрів, що визначає ефективність виявлення та моніторингу об’єктів на морській поверхні. VFOV характеризує вертикальний кут охоплення камери, який безпосередньо впливає на здатність системи фіксувати об’єкти на близьких дистанціях, тобто поблизу судна, з урахуванням геометричних та динамічних факторів середовища. Він визначається як кут між верхньою та нижньою межею зображення, що було захоплене сенсором камери, і залежить від фокусної відстані об’єктива та розміру матриці. У морських умовах, де поверхня моря є динамічною (хвилі, хитавиця), VFOV повинен забезпечувати баланс між широким охопленням та деталізацією об’єктів. Для PTZ-камер характерним є використання змінного VFOV: у ширококутному режимі забезпечується огляд значної частини сцени (30°–60°), тоді як при ручному

управлінні та наближенні кут огляду суттєво звужується, що дозволяє фокусуватися на деталях.

Відповідно до [42] огляд поверхні моря з позиції управління судном не повинен бути перекритий більш ніж на дві довжини судна або 500 м вперед від носа, залежно від того, що менше. Ця норма діє до 10° у кожен бік від носа судна, незалежно від осадки, диференту та наявності палубного вантажу.

Для відповідності до зазначених норм було розглянуто алгоритм визначення висоти розміщення камери та оптимального кута нахилу вниз. Це дозволило уникнути сліпих зон більших за вказану норму. Для цього камеру нахилено вниз таким чином, щоб нижній край VFOV торкався поверхні моря на відстані, що не перевищує радіус максимально дозволеної сліпої зони $r_{\max} = \min(500, 2L)$.

За відсутності конкретного судна у розрахунках було припущено, що $r_{\max}$=500(м) приймає максимальне значення. Для конкретно взятих суден це ідеалізоване значення потребує перерахунку. Попри те, що вимоги щодо $r_{\max}$ стосуються лише носової частини судна, було використано цей же підхід для оцінки сліпої зони навколо усього судна.

Припущено, що камеру встановлено на висоті h над рівнем моря, тоді:

$$\theta_{\text{lower}} = \theta_{\text{axis}} + \frac{VFOV}{2}, \tag{4.8}$$

$$\theta_{\text{upper}} = \theta_{\text{axis}} - \frac{VFOV}{2}, \tag{4.9}$$

де θ_{axis} – кут нахилу оптичної осі вниз від горизонталі;

θ_{lower} – кут нижньої межі поля зору;

θ_{upper} – кут верхньої межі поля зору.

Оптимальний кут нахилу вниз θ_{lower} обчислено за формулою:

$$\theta_{\text{lower}} = \arctan\left(\frac{h}{r_{\max}}\right), \tag{4.10}$$

де $r_{\max}$ – максимально дозволений радіус сліпої зони;

h – висота розміщення камери над рівнем моря.

Оптимальний кут верхньої межі поля зору θ_{upper} обчислено за формулою:

$$\theta_{upper} = \theta_{lower} - VFOV \,. \tag{4.11}$$

Для забезпечення максимальної дальності спостереження камера має бути орієнтована в напрямку видимого горизонту. Надмірний нахил оптичної осі призводить до зменшення дальності огляду. З урахуванням кривизни Землі лінія видимого горизонту розташована під малим додатним кутом відносно геометричної горизонталі. Для висоти встановлення h кут до видимого горизонту може бути наближено визначений як:

$$\theta_{hor} \approx \frac{2h}{d} \,, \tag{4.12}$$

де d – дальність видимого горизонту наближено визначено за формулою (4.1).

Умовою включення лінії видимого горизонту до VFOV є її розташування в межах цього поля. Це означає, що кутове положення горизонту має належати інтервалу, обмеженому верхньою та нижньою межами поля зору камери. Математично ця умова записується у вигляді нерівності:

$$\theta_{upper} \le \theta_{hor} \le \theta_{lower} \,. \tag{4.13}$$

За виконання цієї нерівності лінія горизонту повністю потрапляє в межі VFOV та не буде втрачена внаслідок надмірного нахилу оптичної осі.

В таблиці 4.2 наведено результати розрахунку кута нижньої межі поля зору та кута до видимого горизонту залежно від висоти розміщення камери відеоспостереження.

Таким чином, для розглянутого діапазону висот і прийнятого VFOV лінія видимого горизонту залишається в межах вертикального поля зору камери. Зі збільшенням висоти встановлення зростають кут нижньої межі поля зору та кут до видимого горизонту.

Таблиця 4.2 – Кут нижньої межі поля зору та кут до видимого горизонту залежно від висоти розміщення камери

Висота розміщення *h,* м	Кут нижньої межі поля зору θ_{lower}, градуси	Кут до видимого горизонту θ_{hor}, градуси
8,4	0,96	0,087
9,00	1,03	0,090
9,50	1,09	0,092
10,00	1,15	0,094
10,50	1,20	0,097
11,00	1,26	0,099
11,50	1,32	0,101
12,00	1,37	0,104
12,50	1,43	0,106
13,00	1,49	0,108
13,50	1,55	0,110
14,00	1,60	0,112
14,50	1,66	0,114

4.4 Розподіл секторів відповідальності PTZ-камер

В ширококутному режимі основний сектор покриття *W,* що припадає на одну камеру, визначає кутову область зору, яку контролює окрема камера для забезпечення суцільного огляду заданої зони спостереження:

$$W = \frac{S}{N_c}, \tag{4.14}$$

де S – загальна кутова область огляду (для кругового огляду $S = 360°$);

N_c – кількість камер.

Основний сектор покриття можна вважати базовим поділом, але він не враховує перекриття секторів, через що система може бути вразливою до динамічних змін. Додаткове перекриття сприяє усуненню неточностей монтажу,

дисторсії лінз чи динамічних змін, полегшуючи алгоритми стикування зображень, особливо для великих об’єктів. Перекриття ΔW закладене як запас міцності системи та розподілене рівномірно з обох боків по відношенню до зображення сусідніх камер. Через відсутність нормативної бази розмір перекриття напряму залежить від особливостей сцени та *HFOV* обраної камери. Основний сектор покриття та перекриття пов’язані між собою наступним рівнянням:

$$HFOV = W + 2 \times (\frac{\Delta W}{2}) . \tag{4.15}$$

В роботі номінальний сектор огляду камери визначено як кутову область, яку вона охоплює в ширококутному режимі. Ширина цього сектора дорівнює *HFOV*. Хоча механізм PTZ допускає поворот камери в горизонтальній площині, у розглянутій системі ручне переміщення оптичної осі обмежується закріпленим за камерою сектором відповідальності. Це запобігає переходу камери до секторів відповідальності інших камер.

Резервування основного сектора сусідньою камерою в системі не передбачено – під час ручного керування однією з камер відповідна ділянка залишається непокритою до завершення ручного режиму. З метою обмеження тривалості існування сліпого сектора після завершення активного ручного керування реалізовано автоматичне повернення камери у ширококутний режим за відсутності активності оператора протягом однієї хвилини.

Оптична вісь ψ_i *i*-ї камери в ширококутному режимі визначається рівномірним розподілом по колу і задається співвідношенням

$$\psi_i = (i-1) \cdot W , \tag{4.16}$$

де $i = 1, ..., N_c$ – номер камери.

Межі горизонтального кутового діапазону D_i кожної камери описуються наступним рівнянням:

$$D_i = \left[\psi_i - \frac{HFOV}{2}; \psi_i + \frac{HFOV}{2} \right]. \quad (4.17)$$

Ці межі можуть бути змінені залежно від того, який режим роботи використовує оператор: ширококутний чи режим ручного управління з наближенням.

Загальний вигляд одного з варіантів розміщення камер в горизонтальній площині представлено на рис. 4.2. Для ілюстрації роботи системи було припущено, що до складу системи входять шість PTZ-камер, з фіксованими номінальними секторами. Для $N_c = 6$ основний сектор покриття кожної камери становить $W = 60°$.

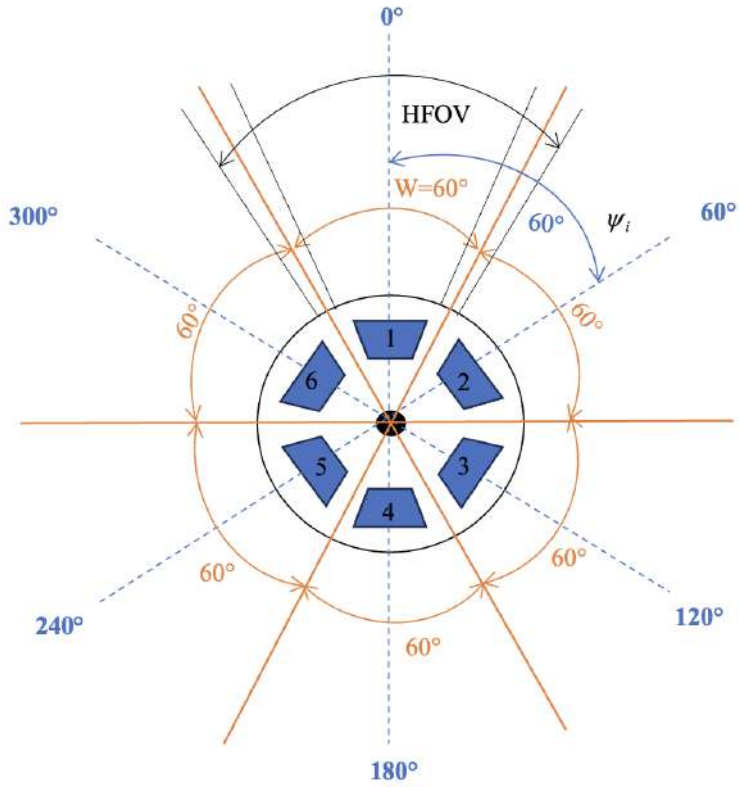


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд розміщення камер в горизонтальній площині

Кожну з камер було пронумеровано від 1 до 6 за годинниковою стрілкою. Номінальний сектор першої камери позначений чорною стрілкою та прирівняний до HFOV. Основний сектор покриття кожної з камер, тобто область основного огляду, позначений помаранчевою стрілкою. Оптична вісь у ширококутному режимі в стані спокою, без фокусування та оптичного наближення, позначена

синьою пунктирною лінією. Оптична вісь першої камери чітко спрямована на ніс судна. Відстань між оптичними осями в ширококутному режимі фіксована та позначена синьою стрілкою.

4.5 Розрахунковий принцип визначення відносного пеленгу на локалізований об’єкт

У цьому підрозділі розглядається розрахунковий принцип отримання відносного пеленгу на локалізований об’єкт за координатами його положення у відеокадрі. Запропоновані співвідношення формують геометричну основу для подальшої апаратної реалізації системи, однак у межах дисертаційного дослідження не виконувалося натурне метрологічне оцінювання похибки визначення пеленгу шляхом порівняння отриманих значень з еталонними вимірюваннями. Тому наведені результати характеризують алгоритмічний принцип визначення пеленгу, а не експериментально підтверджену точність його вимірювання.

Кожна з камер забезпечує спостереження в межах визначеного горизонтального кутового діапазону, формуючи основний сектор покриття з додатковим суміжним перекриттям з обох боків. У разі потрапляння обмежувальної рамки виявленого об’єкта в межі горизонтального кутового діапазону D_i певної камери, об’єкт відноситься до зони відповідальності цієї камери, і система обчислює значення відносного пеленга на основі координат центра обмежувальної рамки в межах даного діапазону. Відносний пеленг на об’єкт вимірюється в межах від 0 до 360°. Приклад можливого розміщення зон відповідальності кожної з камер представлений на рис. 4.2.

Визначення відносного пеленга на виявлений об’єкт полягає у переході від піксельної системи координат кадру до системи координат, зв’язаної з судном-спостерігачем.

Координати обмежувальної рамки визначаються наступними параметрами: $x_{\min}$, $y_{\min}$, $x_{\max}$, $y_{\max}$, тоді координати центральної точки цієї рамки можна визначити:

$$x_{\text{center}} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}, \quad y_{\text{center}} = \frac{y_{\min} + y_{\max}}{2}. \tag{4.18}$$

Залежно від моделі PTZ-камери, отриманий відеопотік має чітко визначену роздільну здатність, розміром $X \times Y$, тоді $x_{\min}$ може коливатися в межах від 0 до $X - 1$ за горизонталлю, а $y_{\min}$ – від 0 до $Y - 1$ за вертикаллю. Максимальні значення, а саме $x_{\max}$ може коливатися в межах від 1 до X за горизонталлю, а $y_{\max}$ – від 1 до Y за вертикаллю. Отримана точка (x_{center}, y_{center}) приймається за координату виявленої цілі у площині зображення та використовується для визначення напрямку на неї.

Кутове відхилення центра виявленого об’єкта відносно оптичної осі камери визначається з урахуванням перспективної проєкції зображення за формулою:

$$\delta = \operatorname{arctg}\left[(2\frac{x_{\text{center}}}{X} - 1)\operatorname{tg}\frac{HFOV}{2} \right], \tag{4.19}$$

де x_{center} – горизонтальна координата центра обмежувальної рамки виявленого об’єкта;

X – ширина кадру в пікселях;

$HFOV$ – горизонтальне поле зору камери в поточному режимі.

Відносний пеленг на виявлений об’єкт визначається з урахуванням положення оптичної осі відповідної камери:

$$R = \left[\psi_i + \delta \right] \bmod 360^\circ, \tag{4.20}$$

де ψ_i – відносний пеленг оптичної осі i-ї камери;

δ – кутове відхилення об’єкта від оптичної осі.

Застосована залежність враховує нелінійний характер перетворення горизонтальної координати точки зображення в кутове положення відносно оптичної осі камери. Водночас розрахунок не враховує оптичну дисторсію об’єктива та похибки встановлення камери, урахування яких потребує калібрування конкретної оптичної системи.

При переміщенні об’єкта центр рамки оновлюється з кожним кадром. Отримане від камери зображення обробляється обчислювальною платформою в порядку пріоритетності. Окрім виявлення об’єктів обчислювальна платформа розраховує відносний пеленг для кожного локалізованого об’єкта. У разі виходу об’єкта за межі горизонтального кутового діапазону система передає його сусідній камері для уникнення обертання. В реальних умовах об’єкт може бути присутнім у кадрі частково, проте система все одно визначатиме центр обмежувальної рамки, хоча цей центр не відповідає центру корпусу судна, і обраховує пеленг для частини судна.

Для демонстрації принципу роботи системи використано імітаційне моделювання на основі заздалегідь записаних відео. Обробка відео відбувалася за тими ж алгоритмами, що і можлива обробка відеопотоку в реальних умовах. На рис. 4.3 представлено варіант аналізу відеопотоку з одночасним виявленням декількох суден. На рис. 4.4 було виявлено лише одне судно камерою номер шість. Кожне виявлене судно поміщено моделлю комп’ютерного зору в обмежувальну рамку зеленого кольору. Над лівим верхнім кутом рамки рожевим кольором позначається відносний пеленг у форматі R-BRN: XXX.XX, а нижче зеленим кольором позначаються ракурс судна та впевненість моделі щодо призначення класу.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Виявлення кількох об’єктів (зображення з камери № 6): а) кадр 1; б) кадр 2



а)



б)

Рисунок 4.4 – Виявлення одного об’єкта (зображення з камери № 6): а) кадр 1; б) кадр 2

Наведені приклади демонструють програмну реалізацію розрахункового принципу формування значення відносного пеленгу за координатами локалізованого об’єкта у кадрі. Отримані значення R-BRN у цьому моделюванні не використовувалися для кількісної оцінки точності визначення пеленгу, оскільки для відповідних відеозаписів не формувалася синхронізована вибірка еталонних пеленгів на судна-цілі. Тому наведений результат підтверджує працездатність алгоритму обчислення, але не є натурною метрологічною перевіркою його похибки.

4.6 Розрахунковий принцип визначення істинного пеленгу

Для формування розрахункового принципу отримання істинного пеленгу розглянуто можливість інтеграції відносного пеленгу, визначеного за даними відеозображення, з істинним курсом судна-спостерігача. Істинний пеленг T на об’єкт у запропонованій архітектурі може бути визначений за формулою (4.21), що враховує відносний пеленг R, визначений PTZ-камерою, та істинний курс судна H:

$$T(t) = \mathrm{mod}\left[H(t) + R(t), 360^\circ \right] . \qquad (4.21)$$

Відносний пеленг R було отримано в результаті обробки зображень з камер, як описувалося раніше. Якщо значення істинного курсу $H(t_H)$отримано в момент часу t_H, а відеокадр відповідає моменту t_f, то для приведення курсу до моменту формування кадру його значення може бути визначене з урахуванням кутової швидкості повороту судна:

$$H(t_f) = H(t_H) + \int_{t_H}^{t_f} \omega(\tau) d\tau. \tag{4.22}$$

За малих значень $\Delta t = t_f - t_H$ та припущення про практично сталу кутову швидкість у межах цього інтервалу співвідношення набуває вигляду:

$$H(t_f) = H(t_H) + \omega \Delta t. \tag{4.23}$$

Джерелом інформації про істинний курс судна-спостерігача обрано гірокомпас, який виконує функцію передавального пристрою курсу (THD). Альтернативним джерелом такого сигналу може бути магнітний компас із відповідним пристроєм зчитування азимута, вимоги до якого встановлено стандартом ISO 25862:2009 [45], проте, на відміну від магнітного компаса, гірокомпас є обов'язковим навігаційним обладнанням для визначених категорій суден відповідно до вимог SOLAS [36]. Вимоги до точності такого пристрою встановлено резолюцією IMO Maritime Safety Committee (MSC).116(73) [43]; згідно з п. 4.3.2 цієї резолюції THD має забезпечувати на своєму виході, за умов моря, визначених резолюціями A.424(XI) або A.821(19), похибки, наведені в таблиці 4.3.

Із наведених вимог слідує, що MSC.116(73) не регламентує частоту видавання даних про курс: п. 4.4 вимагає лише, щоб щонайменше один вихід відповідав чинному міжнародному стандарту морського інтерфейсу [40]. Отже, гірокомпас надає дані про істинний курс судна та кутову швидкість повороту судна з частотою, визначеною конфігурацією конкретної моделі приладу [62]. Інтеграцію відносного пеленгу з курсом гірокомпаса для отримання істинного пеленгу запропоновано на рівні архітектури системи; її програмну реалізацію та перевірку в реальному часі віднесено до подальших робіт. Можлива схема реалізації системи зображена

на рис. 4.5. Гірокомпас під’єднується до обчислювальної платформи через інтерфейс National Marine Electronics Association (NMEA) 0183 або через перетворювач NMEA 0183/Ethernet. PTZ-камери під’єднуються до платформи через мережевий комутатор [72]. Обчислювальна платформа, отримавши мережевий трафік, виконує декодування відеоданих і передає їх у модуль комп’ютерного зору.

Таблиця 4.3 – Гранично допустимі похибки передавального пристрою курсу згідно з MSC.116(73)

Складова похибки	Гранично допустиме значення
Похибка передавання (роздільної здатності)	менше ± 0,2°
Статична похибка	менше ± 1,0°
Динамічна похибка (амплітуда)	менше ±1,5°; за амплітуди понад ± 0,5° частота менше 0,033 Гц (період не коротший за 30 с)
Похибка відстеження кутової швидкості повороту до 10°/с	менше ± 0,5°
Похибка відстеження кутової швидкості повороту від 10°/с до 20°/с	менше ± 1,5°

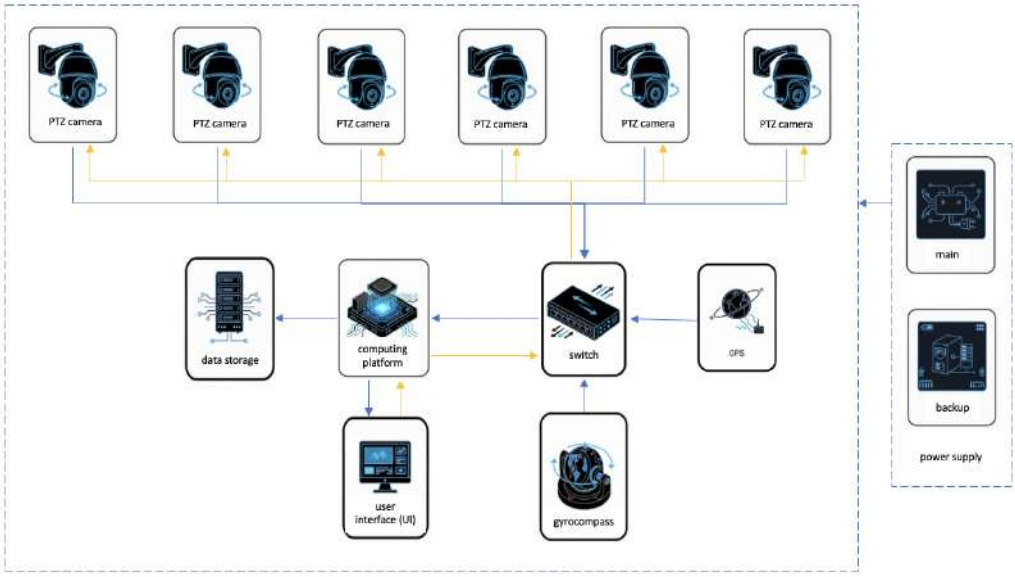


Рисунок 4.5 – Система визначення ракурсу та пеленгу судна-цілі

Передбачається, що обробка даних з гірокомпаса здійснюватиметься в реальному часі з використанням протоколу NMEA 0183 [40; 70]. Відповідно до заявленої виробником періодичності гірокомпас надає дані про істинний курс судна та кутову швидкість повороту судна [62]. Heading True (HDT) подається в такому форматі $HEHDT,123.456,T*hh, де HE – ідентифікатор джерела даних гірокомпаса; HDT – тип речення, в якому зазначається істинний курс судна; 123.456 – значення курсу в градусах; T – індикатор істинного курсу судна; *hh – контрольна сума для перевірки цілісності даних. ROT – кутова швидкість повороту передається окремим реченням [40; 70]. Дані про істинний курс можуть додатково передаватися реченням True Heading and Status (THS), яке, на відміну від HDT, містить індикатор режиму джерела курсу [40]. Формат речення: $HETHS,123.4,A*hh, де 123.4 – значення істинного курсу в градусах; A – індикатор режиму (статусу) джерела курсу: A – автономний режим (дані достовірні), E – оцінене (розрахункове) значення, M – ручне введення, S – імітований режим, V – дані недостовірні або прилад у режимі очікування; hh – контрольна сума. Наявність поля статусу дозволяє системі додатково контролювати достовірність отриманого курсу до його використання у розрахунку істинного пеленга.

Істинний пеленг обчислюється за формулою (4.21) на основі двох величин, отриманих з різних джерел і в різні моменти часу: відносного пеленга, визначеного за відеокадром, та істинного курсу, отриманого від гірокомпаса. У межах розглянутої архітектури для аналізу даних на обчислювальній платформі запропоновано використання бібліотеки pynmea2, яка дає змогу отримувати ключові параметри, такі як істинний курс судна, статус даних та контрольна сума. Для забезпечення синхронізації даних гірокомпаса та відеопотоку можуть бути використані точні часові мітки, які забезпечують їх узгодження в єдиній часовій шкалі. Таким чином, точність істинного пеленга залежить не лише від точності кожної з цих величин, а й від їх часового узгодження. Під час прямолінійного руху розсинхронізація майже не впливає на результат, тоді як під час повороту судна вона створює систематичну похибку. Ця похибка складається з двох незалежних складових: похибки слідкування самого гірокомпаса, нормованої залежно від

кутової швидкості повороту, та похибки, зумовленої використанням значення курсу, отриманого із запізненням:

$$\Delta\psi_{курс} = \omega_c \cdot \Delta t \tag{4.24}$$

де Δt – різниця між моментами, до яких фактично відносяться відеокадр і значення курсу;

ω_c – кутова швидкість повороту судна-спостерігача визначається за формулою:

$$\omega_c = ROT / 60, \tag{4.25}$$

де ROT – кутова швидкість повороту.

Сумарна розсинхронізація складається із затримок обох каналів даних. Час передавання речення NMEA послідовним каналом визначається розрахунком:

$$t_{NMEA} = \frac{n_{симв} \cdot 10}{B}, \tag{4.26}$$

де $n_{симв}$ – довжина речення в символах;

10 – кількість бітів на символ за форматом 8N1 (один старт-біт, вісім бітів даних, один стоп-біт);

B – швидкість передачі.

Загальна оцінка розсинхронізації визначається як сума складових:

$$\Delta_t = t_{відео} + t_{обч} + t_{THD} + t_{NMEA} + \frac{T_{оновл}}{2} + t_{годин}, \tag{4.27}$$

де $t_{відео}$ – затримка формування, кодування, передачі та декодування відеокадру;

$t_{обч}$ – час обчислення відносного пеленга;

t_{THD} – внутрішня затримка передавального пристрою курсу;

$T_{оновл}$ – інтервал оновлення даних про курс;

$t_{годин}$ – залишкова розсинхронізація годинників джерел даних. Кількісний розрахунок загальної оцінки розсинхронізації Δ_t потребує визначення складових, що встановлюються вимірюванням на конкретній апаратній реалізації системи; за

відсутності проведеного експериментального дослідження такий розрахунок не виконувався і віднесений до подальших робіт.

Для приведення обох потоків даних до спільної шкали часу кожне повідомлення та кожен відеокадр позначаються часовою міткою монотонного годинника обчислювальної платформи в момент надходження, а сам годинник синхронізується за сигналом секундної синхронізації (PPS) приймача глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС або англ. Global Navigation Satellite System, GNSS) [39] або, за його відсутності, за протоколом Network Time Protocol (NTP). Використання PPS забезпечує розсинхронізацію на рівні мікросекунд, тоді як точність синхронізації за NTP у локальній мережі залежить від її навантаження і підлягає окремому вимірюванню. У разі виявлення аномалій, наприклад втрати сигналу або невідповідності контрольної суми, система потенційно дозволяє активувати режим резервного обчислення курсу на основі попередніх даних з використанням фільтра Калмана [49] для прогнозування зміни курсу. Це очікувано забезпечить безперервність обчислення істинного пеленгу. Слід зазначити, що механізм часової синхронізації запропоновано на рівні архітектури системи, а підтвердження визначення істинного пеленга в реальному часі віднесено до подальших робіт.

У загальному випадку похибка визначення істинного пеленга формується похибкою даних про істинний курс, похибкою визначення положення центра обмежувальної рамки у відеокадрі, параметрами калібрування та встановлення камери, а також похибкою часового узгодження відеокадру і навігаційних даних. Кількісне визначення сукупної похибки потребує експериментального визначення зазначених складових для конкретної апаратної реалізації системи.

Передбачається, що значення істинного пеленгу відображатиметься за таким же принципом, як і значення відносного пеленгу. На рис. 4.6 показаний приклад відеопотоку, обробленого обчислювальною платформою, цілі в якому позначено зеленою рамкою. У лівому верхньому куті, у верхньому рядку білим кольором вказано істинний пеленг у форматі T-BRN: XXX.XX, де XXX.XX – градуси та соті долі градусів. У лівому верхньому куті, у нижньому рядку вказано клас, до якого

віднесено об’єкт, та впевненість моделі щодо такої класифікації. На рис. 4.6 показано приклад відображення відеопотоку, відзнятого камерою номер шість. Судно рухається істинним курсом 040°.



а)



б)

Рисунок 4.6 – Оброблений обчислювальною платформою відеопотік від камери № 6: а) кадр 1; б) кадр 2

Описаний механізм забезпечує розрахунок істинного пеленгу шляхом інтеграції відносного пеленгу, отриманого за даними відеозображення, з даними про істинний курс судна-спостерігача. Запропонований підхід доповнює

результати автоматизованого виявлення судна та визначення його ракурсу інформацією про напрямок на локалізований об’єкт.

4.7 Динамічне позиціонування PTZ-камер

Динамічне позиціонування камер у системах відеоспостереження дозволяє адаптуватися до змін середовища, забезпечуючи пріоритетне фокусування на релевантних об’єктах. Запропонована система розрахована на роботу з камерами в двох режимах: ширококутний режим та ручне управління.

Передбачається, що система починає відеоспостереження з ширококутного режиму сканування, тобто горизонтальний кутовий діапазон чітко визначений, а оптична вісь кожної з камер зберігає свій початковий напрямок (рис. 4.2). Весь отриманий відеопотік з PTZ-камер надходить до обчислювальної платформи. Запропонована система потенційно дозволяє аналізувати відеопотік у режимі реального часу. Для кожного виявленого об’єкта система визначає рівень впевненості щодо його віднесення до одного з восьми ракурсів та розраховує істинний пеленг відповідно до алгоритмів, описаних у підрозділах 4.5 і 4.6.

З метою аналізу отриманої інформації система може працювати у двох режимах: із фільтрацією виявлених об’єктів за встановленим порогом впевненості та без такої фільтрації.

У першому режимі об’єкти з рівнем впевненості нижче 0,5 не відображаються. Якщо рівень впевненості дорівнює або перевищує 0,5, навколо об’єкта будується обмежувальна рамка із зазначенням визначеного класу, рівня впевненості системи та істинного пеленга. Такий підхід дозволяє відсіювати малоймовірні виявлення та не створювати зайвого візуального шуму для судноводія.

У другому режимі фільтрація за рівнем впевненості не застосовується, тому система відображає всі виявлені об’єкти. Це дозволяє судноводію отримувати інформацію навіть про малоймовірні цілі. У такому разі розташування об’єкта, навіть за низького рівня впевненості або помилкової класифікації, може вважатися цінною інформацією.

Система підтримує режим ручного управління для ситуацій, коли оператор потребує наближення або додаткової деталізації для точного розрізнення об’єктів, наприклад, для класифікації судна. Ручне керування дозволяє оператору вручну регулювати поворот камери в межах визначеного номінального сектору, забезпечуючи фокусування на конкретному об’єкті.

Запропонована система передбачає реалізацію ручного режиму управління положенням камер через інтеграцію керуючого інтерфейсу, що включає сенсорний монітор для візуалізації відеопотоків. Використання сенсорного монітору потенційно дозволяє оператору взаємодіяти з системою, використовуючи оптичний зум для фокусування на об’єктах. Перехід до ручного режиму може бути активований оператором за допомогою програмного інтерфейсу. У цьому режимі передбачається передача контролю над системою оператору, але за відсутності активності зі сторони оператора система дозволяє забезпечити автоматичне повернення до ширококутного режиму через хвилину для обмеження тривалості існування сліпого сектора під час моніторингу.

Як альтернатива сенсорному екрану, для більш зручного ручного управління може бути використаний джойстик. Це потенційно дозволяє оператору контролювати фізичний рух камери. Таке управління може бути реалізоване для динамічного фокусування на об’єктах, де необхідно оперативно змінити HFOV для кращого розрізнення деталей, наприклад, в умовах інтенсивного трафіку.

У межах запропонованої архітектури передбачено застосування засобів стабілізації даних відеопотоку на фізичному та програмному рівнях. Це набуває особливої актуальності для спостереження в морському середовищі через те, що рух судна, хвиль, зміна освітлення та рух об’єктів спостереження призводять до шумів у виявленнях. Мерехтіння може призводити до зниження точності систем відеоспостереження та сприяти прийняттю помилкових рішень у реальному часі. На фізичному рівні передбачається обладнання системи гіростабілізуючими платформами, робота яких спрямована на підтримку стабільності функціонування

камер за дії зовнішніх факторів [34]. На програмному рівні може бути використаний фільтр Калмана, який забезпечує згладжування траєкторій та стабілізацію параметрів відстеження на основі ймовірнісного прогнозування та корекції станів [47].

Користувацький інтерфейс системи передбачає декілька варіантів організації відображення відеопотоків від камер. Очікується, що основним може бути режим одночасного відображення всіх потоків у вигляді мозаїчної структури. Зокрема, для шести камер може застосовуватися компонування у вигляді двох рядів по три зображення (рис. 4.7), що може забезпечити безперервний моніторинг навколишнього простору без необхідності прокручування.

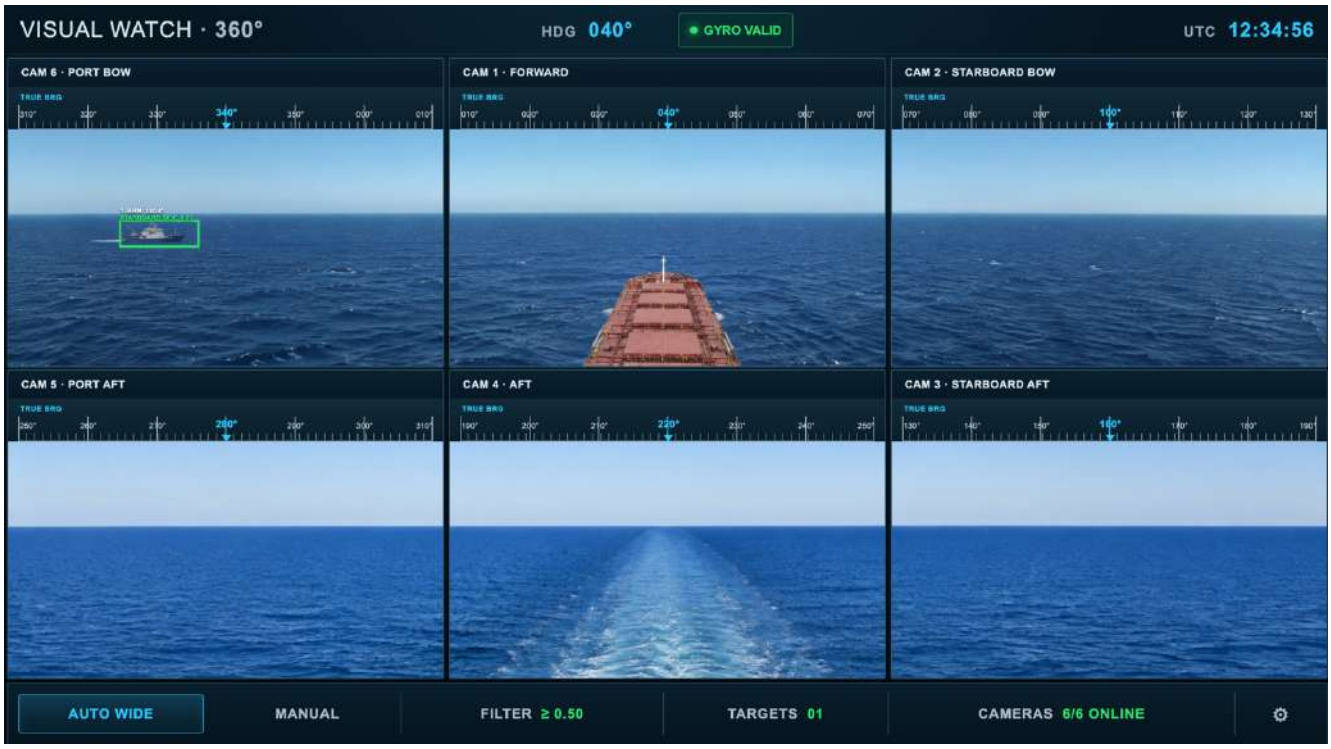


Рисунок 4.7 – Розміщення шести потоків у форматі мозаїки

У разі необхідності фокусування на окремому відеопотоці оператор може здійснити його вибір, після чого буде активований режим ручного керування. Це дозволить вивести відеопотік з конкретної камери на весь екран. PTZ-камери

дозволяють застосовувати оптичний зум. Відповідно, оператор може фокусуватися на конкретному об’єкті для виявлення ознак.

Альтернативним варіантом відображення відеопотоку може бути прокручування по колу. Після переходу до повноекранного режиму оператору може бути надана можливість навігації між відеопотоками за допомогою переміщення вправо або вліво, що дасть змогу переглядати відеопотоки сусідніх камер та може мати циклічний характер, що забезпечує безперервний перегляд зображення з усіх доступних PTZ-камер. Цей режим дозволить сфокусуватися на об’єктах в районах інтенсивного судноплавства, де розрізнити судна як окремі цілі для оператора може викликати ускладнення. Великий масштаб дозволяє покращити ситуаційну обізнаність оператора. За необхідності він має можливість перейти з ширококутного режиму до ручного управління.

4.8 Метод асоціації та взаємної перевірки даних АІС, РЛС і відеосистеми

Метод поєднує дані трьох каналів, які виконують різні функції. АІС передає MMSI, координати та параметри руху судна. РЛС/ Automatic Radar Plotting Aid (ARPA) незалежно виявляє фізичну ціль, вимірює дистанцію і пеленг та формує радіолокаційну трасу. Відеосистема також незалежно спостерігає ціль, уточнює її пеленг і визначає ракурс. Завдання асоціації полягає в тому, щоб установити, які спостереження належать одному судну, і не підтверджувати сумнівну відповідність.

Під функціональним резервуванням у роботі розуміють збереження спостереження за фізичною ціллю після втрати АІС та використання незалежних вимірювань для перевірки узгодженості АІС -ідентичності. Це не означає повної взаємозамінності каналів: MMSI надходить лише з АІС.

У межах дослідження використано такі поняття:

– радіолокаційна траса цілі (радіолокаційний трек) – сформована за послідовністю радіолокаційних відміток оцінка поточного положення та параметрів руху надводної цілі, яка супроводжується;

– відеотрек – послідовність виявлень одного об’єкта на суміжних кадрах, об’єднаних алгоритмом супроводження;

– асоціація цілей – установлення відповідності між даними різних каналів спостереження (АІС, РЛС та відеоспостереження), що належать одному фізичному об’єкту;

– стробування – попередній відсів кандидатів на асоціацію, за якого до подальшого оброблення допускаються лише ті спостереження, розбіжності яких із прогнозованими значеннями не перевищують установлених допусків;

– АІС-кандидат – АІС-ціль, дані якої після попереднього стробування розглядаються як можлива відповідність конкретній радіолокаційно-візуальній цілі під час асоціації спостережень; остаточна відповідність установлюється за результатами оцінювання просторово-кінематичної та ракурсної узгодженості даних;

– АІС-ціль — представлення судна за даними автоматичної ідентифікаційної системи, що містить його ідентифікаційні та навігаційні параметри.

Ідентифікаційні атрибути, зокрема MMSI, назва та позивний, надходять з АІС (табл. 4.4). Відеосистема не визначає MMSI самостійно, а надає незалежні ознаки для перевірки АІС -кандидата. Якщо надійної відповідності немає, радіолокаційно-візуальна ціль продовжує супроводжуватися без установленого MMSI. Такий стан є передбаченим результатом роботи методу, а не відмовою супроводження.

Відповідно до п. 5.30 резолюції IMO MSC.192(79) дані про ціль від різних суднових систем мають автоматично зіставлятися, щоб один фізичний об’єкт не відображався як декілька незалежних цілей. Пункт 5.30.1 передбачає зіставлення, зокрема, за місцеположенням і параметрами руху. Запропонований метод розвиває такий підхід: до просторово-кінематичної перевірки додаються незалежний відеопеленг і ракурс цілі [44].

Таблиця 4.4 – Дані інформаційних каналів, використані для асоціації

Джерело	Основні дані	Роль у методі
AIC	MMSI; координати опорної точки; курс відносно ґрунту (COG); швидкість відносно ґрунту (SOG); курс судна; відстані від місця встановлення GNSS-антени до носа, корми, лівого та правого бортів судна (відповідно A, B, C і D); час повідомлення	надання ідентифікаційних даних судна; прогноз положення; розрахунок пеленга, дистанції, геометричних допусків і очікуваного ракурсу
РЛС/ ARPA	номер траси; відносний пеленг; дистанція; COG і SOG цілі; час оновлення	незалежне виявлення та супровід фізичної цілі; основа просторово-кінематичної асоціації
Відеосистема	номер відеотреку; відносний пеленг; визначений клас ракурсу; оцінка впевненості моделі; час кадру; номер камери	уточнення кутового положення; підтвердження наявності об’єкта; використання ракурсу для розрізнення цілей

Для формалізації методу введено три множини спостережень, приведених до спільного моменту часу t_k:

$$A(t_k) = \left\{A_j\right\}_{j=1}^{N_A}, R(t_k) = \left\{R_i\right\}_{i=1}^{N_R}, V(t_k) = \left\{V_l\right\}_{l=1}^{N_V}, \tag{4.28}$$

де A – множина повідомлень AIC;

R – множина трас РЛС/ARPA;

V – множина відеотреків після усунення міжкамерних дублікатів;

N_A, N_R, N_V – кількість відповідних спостережень.

Для подальшого зіставлення з радіолокаційними та AIC-даними використовують не окремі кадрові виявлення, а узагальнені дані, отримані в процесі супроводження судна на послідовності відеокадрів.

4.8.1 Приведення вимірювань до спільного часу та опорної точки

Відеокадри, повідомлення АІС і траси РЛС позначаються часовими мітками єдиної обчислювальної платформи. Дані про *j*-ту АІС-ціль, отримані в момент t_m, екстраполюються до моменту асоціації t_k на короткому інтервалі за припущення про сталі *COG* і *SOG*:

$$\begin{aligned} x_j(t_k) &= x_j(t_m) + SOG_j(t_m)\sin COG_j(t_m)(t_k - t_m), \\ y_j(t_k) &= y_j(t_m) + SOG_j(t_m)\cos COG_j(t_m)(t_k - t_m) \end{aligned}, \qquad (4.29)$$

де *j* – індекс АІС-цілі;

m і *k* – індекси моментів часу;

t_m – момент, до якого належать вихідні дані про ціль;

t_k – момент асоціації;

COG_j і SOG_j – шляховий кут і швидкість *j*-ї цілі відносно ґрунту, прийняті сталими на інтервалі екстраполяції.

Координати *x* та *y* відповідають східній і північній складовим локальної системи. Одиниці швидкості та часу у формулі (4.29) мають бути узгоджені. Чим більше часу минуло від моменту надходження АІС-повідомлення, тим менш надійним є прогноз поточного положення судна, що враховується збільшенням коваріації прогнозу. Якщо з моменту надходження повідомлення минуло більше встановленого граничного часу, його не використовують для автоматичного підтвердження ідентичності цілі. Граничний інтервал установлюється з урахуванням того, чи перебуває судно на ходу, на якорі або біля причалу, оскільки періодичність передачі АІС-повідомлень у цих станах відрізняється.

Географічні координати судна-цілі та власного судна перетворюються в локальну дотичну площину. Для розглянутих у роботі дистанцій застосовується наближення:

$$x_j^A = R_E \cos\overline{\varphi}(\lambda_j - \lambda_o), y_j^A = R_E(\varphi_j - \varphi_o), \qquad (4.30)$$

де R_E – радіус Землі;

φ_o, λ_j – широта і довгота АІС-цілі;

$\bar{\varphi}$, λ_o – координати власного судна;

φ_j – середня широта.

Кутові величини у формулі (4.30) задаються в радіанах.

Розрахункові дистанція та істинний пеленг на AIC-ціль становлять:

$$D_j^A = \sqrt{(x_j^A)^2 + (y_j^A)^2}, T_j^A = \left[\operatorname{atan} 2(x_j^A, y_j^A)\right]_0^{360^\circ}, \quad (4.31)$$

де D_j^A – дистанція від власного судна до AIC-цілі *j*;

T_j^A – істинний пеленг на AIC-ціль *j*;

x_j^A, y_j^A – складові вектора на ціль, визначені за формулою (4.30).

Для порівняння напрямків *a* та *b* поблизу переходу через 0° використовується циклічна різниця:

$$d_\angle(a,b) = \operatorname{atan} 2(\sin(a-b), \cos(a-b)), d_\angle \in \left[-180^\circ, 180^\circ\right]. \quad (4.32)$$

Відповідно до п. 5.9.1 резолюції IMO MSC.192(79) [44] радіолокаційні вимірювання мають бути приведені до спільної опорної точки судна (CCRP) з урахуванням зміщення антени відносно цієї точки. У п. 5.27.4 цієї резолюції передбачено використання CCRP для узгодження положення символів радіолокаційних та AIC-цілей з іншою інформацією на дисплеї. Якщо $\mathbf{l}_s$ – вектор від CCRP до сенсора *s* у зв'язаній із судном системі, а $\mathbf{r}_{s,n}$ – виміряний сенсором вектор на ціль, положення зафіксованої сенсором точки цілі в локальній системі координат визначається як:

$$\mathbf{p}_{s,n}^E = \mathbf{p}_o^E + \mathbf{R}(H_o)(\mathbf{l}_s + \mathbf{r}_{s,n}), \quad (4.33)$$

де $\mathbf{p}_o^E$ – положення власного судна;

H_o – курс власного судна;

$\mathbf{R}(H_o)$ – матриця повороту зі зв'язаної системи в локальну східно-північну систему. Формула (4.33) усуває систематичну різницю, спричинену рознесенням антени РЛС, камер і GNSS-приймача на власному судні.

Додатково враховується, що різні канали можуть спостерігати різні точки корпусу цілі. AIC передає координати антени ГНСС, РЛС – положення ефективного центра відбиття, а відеосистема – напрямок на видиму частину або центр обмежувальної рамки. За даними статичного повідомлення AIC довжина і ширина прямокутної моделі цілі визначаються як $L_j = A_j + B_j$ та $W_j = C_j + D_j$. Тут A_j і B_j – відстані від GNSS-антени судна-цілі до носа та корми відповідно, а C_j і D_j – до лівого та правого бортів; j – індекс AIC -кандидата. Ці величини характеризують геометрію судна-цілі. Зміщення опорної точки AIC відносно геометричного центра судна та габарити корпусу вздовж і поперек лінії візування визначаються за формулами:

$$\begin{gathered}\mathbf{o}_j^A = \left[(A_j - B_j)/2, (D_j - C_j)/2\right]^T, \\ r_{\parallel,j}(\theta) = 1/2(L_j|\cos\theta| + W_j|\sin\theta|), \\ r_{\perp,j}(\theta) = 1/2(L_j|\sin\theta| + W_j|\cos\theta|).\end{gathered} \tag{4.34}$$

Перед визначенням координат геометричного центра судна вектор $\mathbf{o}_j^A$ перетворюється зі зв'язаної із судном системи координат у локальну систему з урахуванням курсу цілі. Величини $r_{\parallel,j}$ та $r_{\perp,j}$ характеризують габарити корпусу відповідно вздовж лінії візування та перпендикулярно до неї. Вони використовуються як геометричні допуски, що враховують можливу різницю між точками цілі, положення яких визначають AIC, РЛС і відеосистема, та не розглядаються як похибки сенсорів. Якщо значення *A–D* відсутні або недостовірні, використовуються попередньо визначені розміри для відповідного класу судна, а такий випадок позначається окремо.

4.8.2 Усунення дублікатів у зонах перекриття камер

У зоні перекриття двох сусідніх камер може одночасно спостерігатися один об'єкт кількома камерами, тому виконується міжкамерне усунення дублікатів. Нехай $\tilde{V}_q$ – множина необроблених відеотреків камери *q*. Позначимо $u_{q,m} = a_R(\tilde{V}_{q,m})$ як радіолокаційну трасу, попередньо зіставлену з відеотреком *m* камери *q*. Для відеотреків різних камер $q \neq q'$ строгий критерій об'єднання має вигляд:

$$\begin{aligned} &\left|t_{q,m} - t_{q',n}\right| \le \tau_V, \\ &\left|d_{\angle}(\beta^V_{q,m}, \beta^V_{q',n})\right| \le \gamma_{dup}, \\ &u_{q,m} = u_{q',n} \neq \varnothing \end{aligned} \tag{4.35}$$

де $t_{q,m}$ та $t_{q',n}$ – часові мітки відеотреків;

τ_V – допустима різниця між часовими мітками;

$\beta^V_{q,m}$ і $\beta^V_{q',n}$ – відносні пеленги на об'єкт, визначені за відеотреками *m* і *n* камер *q* і *q*' відповідно;

$d_{\angle}(\cdot)$ – найменша кутова різниця з урахуванням переходу через 0°/360°;

γ_{dup} – допустима різниця між пеленгами;

$u_{q,m}$ і $u_{q',n}$ – траси РЛС, попередньо зіставлені з відповідними відеотреками.

За формулою (4.35) два відеотреки визнаються зображеннями одного судна, якщо одночасно виконуються три умови: вони отримані майже одночасно, визначені камерами пеленги на судно майже збігаються, обидва відеотреки попередньо зіставлено з тією самою радіолокаційною трасою.

Після підтвердження того, що відеотреки різних камер відповідають одній радіолокаційній цілі, для подальшої обробки вибирається спостереження тієї камери, у якій об'єкт розташований найближче до оптичної осі. Відеотреки, пов'язані з радіолокаційною трасою R_i та такі, що задовольняють умови (4.35), утворюють множину V_i^R. Вибір спостереження здійснюється за формулою:

$$(q^*, m^*) = \arg \min_{(q,m) \in V_i^R} \left|\alpha_{q,m}\right|, \tag{4.36}$$

де q^* номер вибраної камери;

m^* – номер відповідного відеотреку;

β_i^R – кут між напрямком на об'єкт відеотреку m та оптичною віссю камери q.

Отже, вибирається спостереження, для якого абсолютне значення цього кута є найменшим. Замість вибору одного спостереження дані камер можуть бути об'єднані з урахуванням невизначеності кожного вимірювання. Самої лише близькості пеленгів недостатньо для об'єднання відеотреків, оскільки вони можуть відповідати різним суднам. Якщо попередній зв'язок із радіолокаційною трасою відсутній, дублікат усувається за положенням об'єкта відносно оптичних осей камер лише в попередньо відкаліброваній зоні їх перекриття.

4.8.3 Попередня асоціація відеотреків із трасами РЛС

Оскільки монокулярна відеосистема безпосередньо не вимірює дистанцію, первинне зіставлення відеотреку V_l із трасою R_i виконується за відносним пеленгом та, після накопичення кількох відліків, за швидкістю його зміни:

$$J_{il}^{RV} = \frac{d_{\angle}(\beta_i^R, \beta_l^V)^2}{(\sigma_{\beta,R})^2 + (\sigma_{\beta,V})^2} + \frac{(\dot{\beta}_i^R - \dot{\beta}_l^V)^2}{(\sigma_{\dot{\beta},R})^2 + (\sigma_{\dot{\beta},V})^2} \tag{4.37}$$

де J_{il}^{RV} – значення критерію відповідності між радіолокаційною трасою R_i і відеотреком V_l;

i – номер радіолокаційної траси;

l – номер відеотреку;

β_l^R і β_l^V – відносні пеленги на ціль, визначені відповідно РЛС і відеосистемою;

$d_{\angle}(\cdot)$ –найменша кутова різниця з урахуванням переходу через 0°/360°;

$\dot{\beta}_i^R$ і $\dot{\beta}_l^V$ – швидкості зміни відповідних пеленгів;

$\sigma_{\beta,R}$ і $\sigma_{\beta,V}$ – стандартні відхилення похибок визначення пеленга РЛС і відеосистемою;

$\sigma_{\dot{\beta},R}$ та $\sigma_{\dot{\beta},V}$ – стандартні відхилення похибок оцінювання швидкості зміни пеленга. Перша складова критерію характеризує розбіжність між пеленгами, визначеними РЛС і відеосистемою, а друга – розбіжність між швидкостями їх зміни. Що менше значення J_{il}^{RV}, то більш узгодженими є радіолокаційна траса R_i і відеотрек V_l.

На першому циклі, коли похідні пеленга ще не оцінено надійно, друга складова не використовується. Перед розв'язанням задачі призначення виконується стробування – попередній відсів пар, у яких розбіжності перевищують допустимі межі. Пара $R_i - V_l$ проходить стробування, якщо:

$$\left|d_{\angle}(\beta_i^R, \beta_l^V)\right| \le \gamma_{RV}, J_{il}^{RV} \le J_{RV}^{\max}, \tag{4.38}$$

де γ_{RV} – допустима кутова розбіжність між пеленгами, визначеними РЛС і відеосистемою;

$J_{RV}^{\max}$ – гранично допустиме значення критерію відповідності. Обидва пороги визначаються на калібрувальній вибірці.

Серед допустимих пар знаходиться взаємно однозначне призначення з мінімальною сумою J_{il}^{RV}. Такий підхід запобігає присвоєнню одного відеотреку кільком радіолокаційним цілям.

РЛС і відеосистема використовують одне значення курсу власного судна для переходу від відносного до істинного пеленга. Тому похибка курсу є спільною для обох каналів і не може вважатися двома незалежними вимірювальними похибками. Щоб не враховувати цю складову двічі, спочатку об'єднуються відносні пеленги:

$$\hat{\beta}_i^{RV} = \left[\operatorname{atan} 2(w_R \sin\beta_i^R + w_V \sin\beta_l^V, w_R \cos\beta_i^R + w_V \cos\beta_l^V)\right]_0^{360^\circ}, \tag{4.39}$$

$$w_R = \frac{1}{\sigma_{\beta,R}^2}, w_V = \frac{1}{\sigma_{\beta,V}^2},$$

де $\hat{\beta}_i^{RV}$ – об'єднана оцінка відносного пеленга на об'єкт *i*, отримана за даними РЛС і відеосистеми;

w_R, w_V – вагові коефіцієнти, обернені до дисперсій похибок відносного пеленга відповідного каналу.

Після цього курс додається один раз. За малих незміщених похибок незалежних складових одержуємо:

$$T_i^* = \left[H_o + \hat{\beta}_i^{RV} \right]_0^{360^\circ},$$

$$(\sigma_\beta^{RV})^2 = \left(\frac{1}{\sigma_{\beta,R}^2} + \frac{1}{\sigma_{\beta,V}^2} \right)^{-1}, \tag{4.40}$$

$$(\sigma_T^{RV})^2 = \sigma_H^2 + (\sigma_\beta^{RV})^2,$$

де T_i^* – уточнений істинний пеленг на об'єкт *i*;

σ_β^{RV} – стандартне відхилення похибки об'єднаного відносного пеленга;

σ_T^{RV} – стандартне відхилення похибки уточненого істинного пеленга;

σ_H – стандартне відхилення похибки курсу власного судна, спільне для обох каналів;

T_i^R – істинний пеленг на об'єкт *i* за даними РЛС.

Якщо допустимого відеотреку немає, використовується резервне правило $T_i^* = T_i^R$. Співвідношення (4.39) відокремлює спільну похибку курсу σ_H від незалежних похибок відносного пеленга. Граничні похибки пристрою передавання курсу, наведені в MSC.116(73), не є стандартними відхиленнями; значення σ_H має визначатися калібруванням або задаватися як фактор чутливості.

4.8.4 Визначення очікуваного ракурсу за даними AIC

Для перевірки відеокласифікації для кожного AIC-кандидата розраховується ракурс, який мав би спостерігатися за його координатами та курсом. За наявності достовірного значення курсу AIC-цілі H_j^A визначається кут між напрямком її носової частини та напрямком від цілі на власне судно. Кут відлічується за годинниковою стрілкою:

$$\theta_j^A = (T_j^A + 180^\circ - H_j^A) \bmod 360^\circ, c_j^A = Q(\theta_j^A), \tag{4.41}$$

де *j* – номер AIC-кандидата;

T_j^A – істинний пеленг від власного судна на АІС-ціль;

H_j^A – курс АІС-цілі;

θ_j^A– кут між напрямком носової частини цілі та напрямком від неї на власне судно;

$Q(\cdot)$– функція віднесення отриманого кута до одного з восьми класів ракурсу;

c_j^A – клас ракурсу АІС-цілі, що очікується. Відповідність кутів восьми класам ракурсу наведено в таблиці 3.1. Межі секторів розташовано на ± 22,5° відносно їх центральних напрямків.

У запропонованому методі відеомодель формує значення впевненості для всіх восьми класів ракурсу. Повний вектор цих значень зберігається для подальшої обробки, а на екран виводиться лише клас із найбільшим значенням упевненості. Після узгодження даних за часом для кожного АІС-кандидата за його координатами та курсом визначається очікуваний клас ракурсу. Зі збереженого вектора вибирається значення впевненості, що відповідає цьому класу. Воно характеризує узгодженість результату відеокласифікації з даними АІС і надалі враховується у комплексному критерії асоціації.

Значення COG і курсу не є взаємозамінними ознаками. Параметри COG та SOG характеризують кінематику руху, тоді як очікуваний ракурс залежить від орієнтації корпусу та лінії візування. Якщо курс за АІС відсутній або недостовірний, складова ракурсу вимикається. Заміна курсу на COG допускається лише для судна зі сталим прямолінійним рухом і достатньою SOG, причому такий режим має оцінюватися окремо.

4.8.5 Комплексний критерій асоціації з АІС

Після зіставлення відеотреків із трасами РЛС кожна отримана пара «траса РЛС – відеотрек» порівнюється з можливими АІС-кандидатами. Для кожної комбінації (i, j), де i – номер отриманої пари «траса РЛС – відеотрек», а j – номер АІС -кандидата, обчислюються розбіжності між даними РЛС і АІС про положення та рух судна. Ці розбіжності об’єднуються у вектор:

$$\mathbf{e}_{ij} = \begin{bmatrix} d_{\angle}(T_i^*, T_j^A) \\ D_i^R - D_j^A \\ d_{\angle}(COG_i^R, COG_j^A) \\ SOG_i^R - SOG_j^A \end{bmatrix}, \tag{4.42}$$

де T_j^A – істинний пеленг на АІС-кандидата *j*;

$\rho_{\theta,j} \geq 0$ – найменша кутова різниця з урахуванням переходу через 0°/360°;

$d_{\angle}(\cdot)$ – дистанція до об'єкта *i*, визначена РЛС;

D_j^A – дистанція до АІС-кандидата *j*, розрахована за його координатами;

COG_i^R і COG_j^A – напрямки руху об'єкта за даними РЛС і АІС відповідно;

SOG_i^R і SOG_j^A – швидкості руху об'єкта за даними РЛС і АІС відповідно. Верхні індекси *R* та *A* позначають дані РЛС та АІС.

Розбіжності за пеленгом, дистанцією, напрямком і швидкістю оцінюються спільно з урахуванням їхньої невизначеності. Оскільки похибки визначення положення власного судна, синхронізації даних і прогнозування руху можуть одночасно впливати на декілька складових, зв'язок між ними враховується за допомогою коваріаційної матриці:

$$J_{ij} = \mathbf{e}_{ij}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Sigma}_{ij}^{-1} \mathbf{e}_{ij} - 2\rho_{\theta,j} \ln\left[p_l^V(c_j^A) + \varepsilon \right], \tag{4.43}$$

де J_{ij} – значення критерію відповідності радіолокаційно-візуального об'єкта *i* та АІС -кандидата *j*;

$\mathbf{e}_{ij}$ – вектор розбіжностей, визначений за формулою (4.42);

$\boldsymbol{\Sigma}_{ij}$ – коваріаційна матриця вектора розбіжностей $\mathbf{e}_{ij}$, рядки та стовпці якої відповідають пеленгу, дистанції, напрямку руху та швидкості. Діагональні елементи характеризують дисперсії цих розбіжностей, а позадіагональні – їхні взаємні коваріації;

$p_l^V(c_j^A)$ – нормоване значення впевненості відеомоделі для очікуваного класу ракурсу c_j^A за даними відеотреку V_l, попередньо зіставленого з радіолокаційною трасою R_i;

$\varepsilon > 0$ – мала величина, що запобігає обчисленню логарифма нуля;

$d_{\angle}(\cdot)$ – калібрована вага візуальної ознаки ракурсу. За відсутності надійного значення курсу, відеотреку або достатньої якості класифікації приймається $\rho_{\theta,j} = 0$.

Просторово-кінематична та ракурсна складові характеризують різні властивості однієї цілі. Перша враховує її положення, напрямок і швидкість руху, а друга – орієнтацію корпусу відносно власного судна. Тому інформація про ракурс доповнює, а не повторює дані про рух цілі. Критерій (4.43) є евристичною мірою відповідності, призначеною для ранжування AIC-кандидатів, і не інтерпретується як повна імовірнісна модель. За різної невизначеності даних кандидатів їх ранжування може залежати від прийнятих коваріацій. Перевірка чутливості до цього чинника та порівняння з імовірнісним критерієм, що містить доданок $\ln|\mathbf{\Sigma}_{ij}|$, становлять напрям подальшого дослідження.

Перед остаточним вибором відповідностей виконується стробування за пеленгом і дистанцією: пари, для яких розбіжності перевищують допустимі межі, відкидаються без обчислення критерію. Ці межі визначаються з урахуванням дистанції до цілі та розмірів її корпусу:

$$,$$

$$\left|d_{\angle}(T_i^*, T_j^A)\right| \le \gamma_T(D_j^A, \theta_j^A) = k_T \sigma_{\Delta T,ij} + \arctan\frac{r_{\perp,j}(\theta_j^A)}{D_j^A},$$

$$\left|D_i^R - D_j^A)\right| \le \gamma_D(D_j^A, \theta_j^A) = k_D \sigma_{\Delta D,ij} + r_{\parallel,j}(\theta_j^A), \qquad (4.44)$$

$$J_{ij} \le J_{\max},$$

де γ_T, γ_D – допустимі розбіжності за пеленгом і дистанцією;

k_T, k_D – коефіцієнти стробування, що задають ширину строба в одиницях стандартного відхилення;

$\sigma_{\Delta T,ij}$, $\sigma_{\Delta D,ij}$ – стандартні відхилення відповідних розбіжностей для пари i та j;

$r_{\perp,j}$, $r_{\parallel,j}$ – габарити корпусу цілі поперек і вздовж лінії візування, визначені за (4.34);

$J_{\max}$ – гранично допустиме значення критерію (4.43).

Допустима розбіжність складається з двох частин. Перша враховує випадкові похибки вимірювання та прогнозування. Друга враховує розміри корпусу: АІС, РЛС і відеосистема визначають положення різних точок одного судна, тому розбіжність між їхніми показаннями має геометричну природу і не є похибкою. Урахування розмірів особливо важливе на малих дистанціях, коли одне судно займає значний кут у полі зору.

Нехай Ω_i – множина АІС-кандидатів, які пройшли стробування. Остаточна відповідність визначається як лінійне взаємно однозначне призначення з можливістю залишити трасу без АІС-ідентичності:

$$\pi^* = \arg\min_{\pi} \left[\Sigma_{i:\pi(i)\neq\varnothing} J_{i,\pi(i)} + \kappa N_{\varnothing}(\pi) \right], \tag{4.45}$$

де $N_{\varnothing}$ – кількість непризначених трас;

κ – визначена вартість непризначення, яка використовується у формулі (4.45) для варіанта залишення радіолокаційно-візуальної траси без АІС-ідентичності.

Мінімізація виконується за всіма взаємно однозначними відображеннями π, для яких $\pi(i) \in \Omega_i \cup \{\varnothing\}$. Така постановка не примушує систему обирати хибний MMSI за відсутності допустимого кандидата. Задача розв'язується стандартним алгоритмом лінійного призначення з фіктивними вузлами.

Запропонована послідовність «відео – РЛС, потім об'єднана траса – АІС» поділяє триканальну задачу на два зрозумілі етапи. Спочатку відеоспостереження пов'язується з радіолокаційною трасою, яка надає дистанцію. Потім об'єднана

траса зіставляється з AIC-кандидатами за положенням, рухом і ракурсом. На кожному етапі використовується взаємно однозначне призначення, тому один запис не може бути одночасно приписаний кільком цілям.

Для подання відносної переваги AIC-кандидатів запропоновано використовувати експоненційне нормування оцінок відповідності [6]. Значення критерію (4.43) перетворюються на нормовані оцінки з урахуванням альтернативи непризначення AIC-ідентичності:

$$S_{ij}^{assoc} = \frac{\exp(-J_{ij}/2)}{\exp(-J_{\varnothing}/2) + \Sigma_{m\in\Omega_i}\exp(-J_{im}/2)}, \tag{4.46}$$

де S_{ij}^{assoc} – оцінка впевненості у відповідності траси i та AIC-кандидата j;

$J_{\varnothing}$ – вартість непризначення, узгоджена з параметром κ у (4.45);

m – індекс підсумовування за кандидатами, що пройшли стробування.

Меншому значенню критерію невідповідності відповідає більша нормована оцінка. Сума оцінок усіх допустимих AIC-кандидатів та альтернативи непризначення дорівнює одиниці. Близькі значення оцінок кількох кандидатів указують на неоднозначність вибору. Ця оцінка характеризує відносну перевагу кандидата за прийнятим критерієм і не інтерпретується як імовірність правильного призначення AIC-ідентичності.

Отримана оцінка набуває значень від 0 до 1 і характеризує ступінь узгодженості радіолокаційної траси з AIC-кандидатом. Вона використовується для ранжування кандидатів і формування станів «попередня відповідність», «підтверджена відповідність» та «ціль без установленої AIC-ідентичності». Останній стан дає змогу продовжити спостереження за фізичною ціллю, не присвоюючи їй сумнівний MMSI. Пороги та потрібна тривалість стабільного призначення задаються до основного оцінювання.

Для виконання розрахунків зазначені в нормативних джерелах межі похибок умовно перераховано у стандартні відхилення з припущенням про нормальний розподіл похибок і довірчу ймовірність 0,95.

Отже, канали взаємно доповнюють один одного. АІС надає ідентичність і параметри руху, РЛС забезпечує незалежне виявлення та дистанцію, а відеосистема уточнює кутове положення і перевіряє, чи узгоджується ракурс фізичної цілі з АІС-кандидатом. Якщо АІС відсутній або кандидат суперечить незалежним спостереженням, метод дозволяє зберегти трасу без примусового призначення MMSI.

4.9 Аналітичне та імітаційне оцінювання точності та стійкості методу асоціації

Оцінювання методу побудовано за трьома практичними функціями: точність визначення пеленга; якість призначення або непризначення MMSI; стійкість супроводження за відсутніх чи суперечливих АІС-даних. Такий поділ дає змогу окремо оцінити внесок відеопеленга та перевірки ракурсу.

Аналітична частина визначає очікуване зменшення похибки пеленга та умову, за якої ракурс допомагає відсіяти конкурентний АІС-кандидат. Імітаційна частина перевіряє ці властивості на однакових багатоцільових сценах для конфігурацій M_0, M_1 і M_2, а також у сценаріях припинення та підміни АІС-повідомлень.

4.9.1 Аналітична оцінка точності моніторингу

Точність моніторингу кутового положення характеризується дисперсією похибки істинного пеленга: чим меншою є дисперсія, тим вищою є точність. Тому аналітична оцінка виконується через порівняння дисперсій до і після залучення візуального пеленга.

Похибку істинного пеленга, визначеного за даними РЛС і відеосистеми, представимо як суму спільної та незалежної складових. Спільна складова e_C, переважно зумовлена похибкою визначення курсу власного судна, однаково впливає на результати обох каналів. Складова e_R характеризує похибку визначення відносного пеленга РЛС, а e_V – відеосистемою; ці складові вважаються взаємно незалежними. Позначимо їхні дисперсії як:

$$c = \sigma_c^2, r = \sigma_{R,i}^2, v = \sigma_{V,i}^2,$$
$$e_c \perp e_R, e_c \perp e_V, e_R \perp e_V, \quad (4.47)$$

де c – дисперсія спільної складової;

r, v – дисперсії незалежних складових відносного пеленга РЛС і відеосистеми для об'єкта i;

символ ⊥ позначає некорельованість відповідних складових.

Тоді дисперсія пеленга РЛС становить $c+r$, а після об'єднання незалежних відносних пеленгів і одноразового додавання спільної складової одержуємо:

$$\sigma_{RV}^2 = c + \frac{rv}{r+v}. \quad (4.48)$$

Відносне зменшення дисперсії порівняно з використанням лише РЛС дорівнює:

$$G_{\sigma^2} = 1 - \frac{c + rv/(r+v)}{c+r} = \frac{r^2}{(r+v)(c+r)}. \quad (4.49)$$

Відносне зменшення середньоквадратичної похибки має вигляд:

$$G_{\sigma} = 1 - \sqrt{\frac{c + rv/(r+v)}{c+r}}. \quad (4.50)$$

У граничному випадку $v \to 0$, що відповідає наближенню дисперсії незалежної похибки відеосистеми до нуля, спільна складова похибки c зберігається. Отже, максимально можливі значення відносного зменшення дисперсії $G_{\sigma}^{\max}$ та середньоквадратичної похибки $G_{\sigma^2}^{\max}$ визначаються за формулами:

$$G_{\sigma^2}^{\max} = \frac{r}{c+r}, G_{\sigma}^{\max} = 1 - \sqrt{\frac{c}{c+r}}. \quad (4.51)$$

Формули (4.49)–(4.51) показують, що незалежний відеопеленг зменшує випадкову складову похибки, але не усуває спільну похибку курсу власного судна. Нормативні межі похибок не є стандартними відхиленнями, тому в імітаційному оцінюванні використано явно зазначене припущення про їх розподіл. Кількісний

виграш визначено на стенді за параметрами, наведеними в підрозділі 4.9.3, із одноразовим урахуванням спільної складової похибки курсу.

4.9.2 Аналітична оцінка внеску ракурсу

Для визначення умов, за яких урахування ознаки ракурсу зменшує неоднозначність асоціації, розглянуто модель розподілу кількості хибних AIC-кандидатів у межах кутового строба. Нехай λ – локальна кутова щільність хибних AIC-кандидатів, а γ_T – півширина кутового строба для кандидата *j*, визначена за формулою (4.44). За пуассонівської моделі очікувана кількість конкурентів дорівнює:

$$\mu = 2\gamma_T \lambda \,. \tag{4.52}$$

Нехай p_t – імовірність того, що істинна ціль проходить жорсткий секторний тест ракурсу, а q_f – імовірність проходження цього тесту хибним кандидатом. Припустимо, що кількість хибних AIC-кандидатів у кутовому стробі має пуассонівський розподіл, а результати перевірки кандидатів за ракурсом є незалежними. Без урахування ракурсу рішення вважається однозначним, якщо у стробі немає хибних AIC-кандидатів. У разі врахування ракурсу однозначне рішення отримується, якщо істинний кандидат проходить перевірку за ракурсом, а жоден із хибних кандидатів її не проходить. За цих припущень відповідні ймовірності однозначного рішення без використання ракурсу P_0 та з його використанням P_V становлять:

$$\begin{aligned} P_0 &= \exp(-\mu), \\ P_V &= p_t \exp(-\mu q_f) \end{aligned} \,. \tag{4.53}$$

У цій моделі врахування ознаки ракурсу підвищує ймовірність однозначного визначення відповідності між ціллю та AIC-кандидатом, якщо:

$$\mu(1 - q_f) > \ln\left(\frac{1}{p_t}\right) \,, \tag{4.54}$$

де ліва частина відповідає очікуваній кількості хибних кандидатів, відсіяних секторним тестом, а права – втратам від можливого відкидання істинної цілі.

Умова (4.54) показує, коли користь від відсіювання хибних кандидатів переважає втрати через можливе відхилення правильної відповідності. Що більше близьких конкурентів і що надійніше визначено ракурс, то кориснішою стає ця перевірка. Співвідношення (4.52) описує загальний принцип; його числову дію далі перевірено імітаційно за восьмикласовою моделлю ракурсу.

4.9.3 Побудова імітаційного експерименту

У кожній реалізації імітаційного експерименту формується сукупність модельованих надводних цілей. Еталонний вектор стану n-ї цілі в момент часу t_k містить її координати, курс, *COG*, *SOG*, геометричні розміри, а також положення опорних точок, за якими формуються дані АІС, РЛС і відеосистеми:

$$\mathbf{x}_{n,k}^{ref} = \left[x, y, H, COG, SOG, A, B, C, D, \mathbf{o}_A, \mathbf{o}_R, \mathbf{o}_V \right]_{n,k}^{\mathrm{T}},$$

$$\mathbf{z}_{s,n,k} = h_s(\mathbf{x}_{n,k}^{ref}) + \boldsymbol{\varepsilon}_{s,n,k}, \tag{4.55}$$

де $x_{n,k}^{ref}$ – еталонний стан судна-цілі n у момент t_k;

x, y – її координати;

H – курс цілі;

COG, *SOG* – курс і швидкість відносно ґрунту;

A, B, C, D – відстані від місця встановлення GNSS-антени відповідно до носа, корми, лівого та правого бортів судна, передані у статичному АІС -повідомленні;

$\mathbf{o}_A$, $\mathbf{o}_R$, $\mathbf{o}_V$ – вектори зміщення опорних точок АІС, РЛС і відеосистеми відносно спільної опорної точки;

$\mathbf{z}_{s,n,k}$ – вектор спостережень каналу s;

h_s – функція спостереження цього каналу;

$\boldsymbol{\varepsilon}_{s,n,k}$ – вектор похибок вимірювання.

Функції спостереження h_s описують формування даних для кожного каналу $s \in \{A, R, V\}$. Канал АІС передає координати встановленої на судні GNSS-антени із заданою затримкою. РЛС визначає дистанцію та пеленг до змодельованої точки ефективного радіолокаційного відбиття, а відеосистема – пеленг на центр обмежувальної рамки цілі. Випадкові похибки вимірювання задаються

коваріаційними матрицями, а систематичні похибки – відповідними зміщеннями. Пропуски виявлення моделюються розподілом Бернуллі, поява хибних радіолокаційних трас – пуассонівським процесом, затримка передавання повідомлень AIC – окремим розподілом, а результат класифікації ракурсу – категоріальним розподілом, сформованим за матрицею помилок C_V:

$$C_{V,pq} = P(\hat{c}^V = q \,|\, c^{ref} = p),$$
$$\sum_{q=1}^{8} C_{V,pq} = 1 \quad , \tag{4.56}$$

де $C_{V,pq}$ – імовірність того, що класифікатор ракурсу віднесе ціль до класу q за еталонного класу p;

c_{ref} – еталонний клас ракурсу;

$\hat{c}^V$ – клас, передбачений відеомоделлю;

p, q – номери класів із восьми можливих.

Друга рівність відображає нормування за рядками: сума ймовірностей усіх передбачень за фіксованого еталонного класу дорівнює одиниці.

Для імітаційного оцінювання матрицю C_V задано до запуску: правильний із восьми класів ракурсу обирався з імовірністю 0,78, а решта 0,22 рівномірно розподілялася між сімома іншими класами. Задана матриця помилок ракурсу є умовою імітаційного оцінювання, а не емпіричною характеристикою донавченої моделі комп'ютерного зору. Результати конфігурації M_2 характеризують внесок ракурсної ознаки за прийнятої моделі її помилок. Натурні результати, наведені в таблиці 5.4, оцінюють роботу відеомоделі окремо; їх використання для формування імітаційної матриці потребує врахування нестабільних класифікацій і пропусків. Для коректного попарного порівняння M_0, M_1 і M_2 однакові реалізації похибок, пропусків, затримок AIC, хибних радіолокаційних відміток і класів ракурсу генерувалися один раз і залишалися незмінними для трьох конфігурацій. Їх визначення наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Конфігурації методу для попарного порівняння

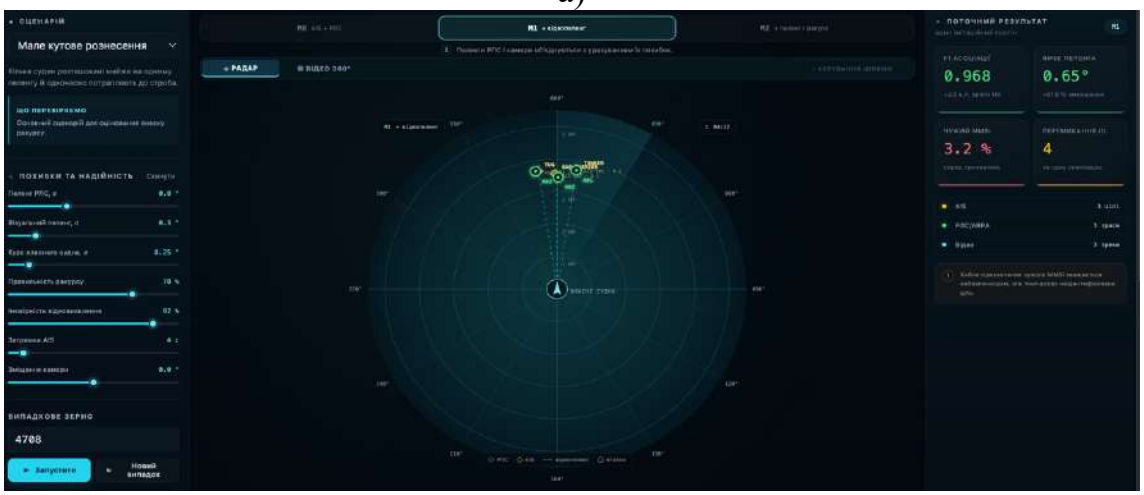
Позначення	Використані канали та ознаки	Оцінюваний внесок
M_0	РЛС + АІС	базова асоціація без візуального каналу
M_1	РЛС + АІС + візуальний пеленг	внесок незалежної складової візуального пеленга
M_2	РЛС + АІС + візуальний пеленг + ракурс	окремий внесок ракурсу та сумарний внесок відеосистеми

Порівняння результатів конфігурацій $M_1–M_0$ дає змогу оцінити внесок візуального пеленга, конфігурацій $M_2–M_1$ – внесок ознаки ракурсу, а конфігурацій $M_2–M_0$ – сукупний ефект використання відеосистеми. В усіх конфігураціях використовуються однакові еталонні траєкторії та реалізації змодельованих спостережень. Параметри стробування і порогові значення визначаються на окремому калібрувальному етапі, після чого залишаються незмінними під час оцінювання.

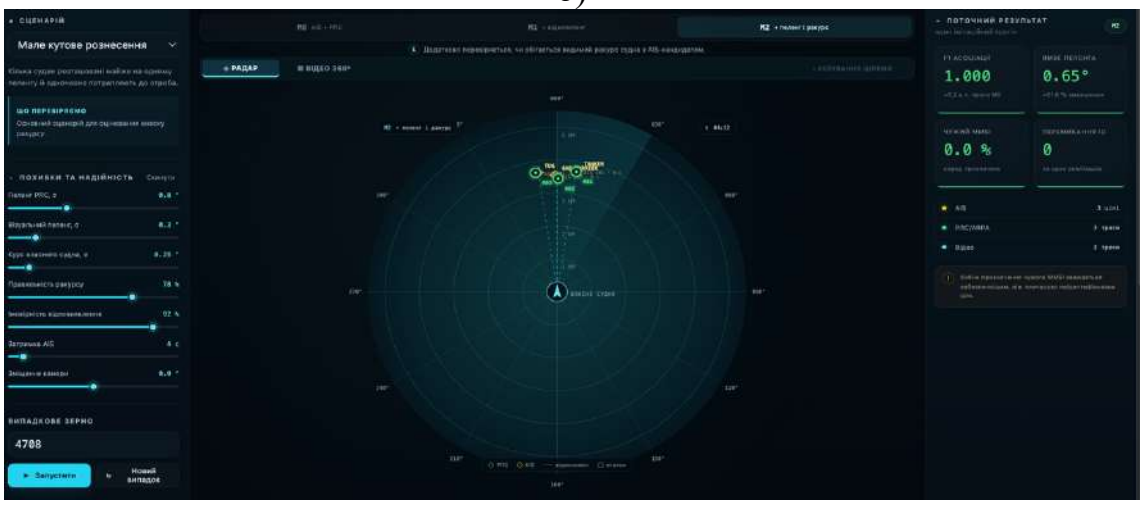
Для проведення імітаційного експерименту розроблено програмний стенд, який забезпечує формування модельних даних АІС, РЛС і відеосистеми, вибір конфігурації комплексування та обчислення показників якості асоціації. Інтерфейс стенда для конфігурацій M_0, M_1 та M_2 наведено на рис. 4.8. Для забезпечення коректності попарного порівняння в усіх конфігураціях використано однаковий сценарій, однакові параметри похибок і те саме початкове значення генератора псевдовипадкових чисел.



а)



б)



в)

Рисунок 4.8 – Інтерфейс програмного імітаційного стенда для конфігурацій комплексування: а) M_0 (АІС і РЛС); б) M_1 (АІС, РЛС і відеопеленг); в) M_2 (АІС, РЛС, відеопеленг та ознака ракурсу)

Ліва панель інтерфейсу призначена для вибору сценарію та задання параметрів похибок і надійності інформаційних каналів (рис. 4.8). У центральній частині відображаються взаємне положення цілей, радіолокаційні траси, повідомлення АІС і результати формування відеопеленгів. На правій панелі наведено поточні значення показників якості асоціації: $F1$, середньоквадратичної похибки пеленга, частки помилкових призначень MMSI та кількості перемикань ідентифікатора. Перемикання між конфігураціями M_0, M_1 та M_2 дає змогу послідовно оцінити внесок відеопеленга та ознаки ракурсу.

Базове імітаційне оцінювання охоплює шість сценаріїв: розріджену обстановку, малі кутові відстані між цілями, перетин траєкторій, затримані АІС-повідомлення, ціль без АІС і погіршення видимості. Додатково в сцені з близькими цілями перевірено припинення АІС-повідомлень однієї цілі та появу суперечливого підміненого АІС-кандидата.

Числові параметри сенсорів, алгоритму та сценаріїв зафіксовано в програмі й протоколі до початку моделювання та не змінювали після отримання результатів.

У базовому та додатковому імітаційному дослідженні стандартне відхилення похибки пеленга РЛС прийнято рівним $\sigma_{\beta,R} = 1{,}02°$. Резолюція IMO MSC.192(79) задає граничну похибку пеленга, а не стандартне відхилення. Тому 1,02° є розрахунковим значенням для імітаційної моделі: межу 2° на рівні 95 % поділено на 1,96 за припущення про нормальний розподіл похибки з нульовим середнім [44].

Для видимого каналу відеосистеми використано $\sigma_{\beta,V} = 0{,}43°$. Gorad та співавтори в роботі [28] отримали Root Mean Square Error (RMSE) пеленга близько 0,43° для YOLOv5 + DeepSORT у видимому каналі. Значення 0,17° не використано, оскільки воно отримане після об’єднання видимого й теплового каналів із фільтрацією та не характеризує окрему камеру видимого діапазону.

Значення 0,43° описує випадкову похибку відеопеленга. Воно не охоплює різницю між центром рамки відеодетектора, точкою ефективного радіолокаційного відбиття, АІС /ГНСС-антеною та геометричним центром корпусу. Такі розбіжності враховано окремими геометричними допусками підрозділу 4.8. Значення 1,02° і 0,43° зафіксовано до запуску та не змінювали після отримання результатів.

Імовірність правильного визначення ракурсу 0,78 є заздалегідь установленою умовою моделювання. Вона потрібна для відтворюваного оцінювання алгоритму асоціації й не змінювалася після перегляду результатів.

Додатково розглянуто два порушення роботи AIC у сцені з малими кутовими відстанями між трьома цілями. В обох випадках вплив починався на 300-й секунді для цілі T2 з MMSI 272110202. Основне оцінювання починалося з 360-ї секунди, коли останнє правильне AIC-повідомлення вже перевищувало межу актуальності 60 с.

У сценарії глушіння після 300-ї секунди повідомлення цілі T2 були відсутні до кінця реалізації; моделювався лише наслідок глушіння, без опису радіосигналу. У сценарії підміни замість правильних повідомлень надходив кандидат з MMSI 272119999, зміщений на 0,05 морської милі праворуч від фактичного курсу, а напрям його носа відрізнявся на 180°. Усі параметри підміни встановлено до запуску. Для кожного сценарію виконано 1000 парних реалізацій; M_0, M_1 і M_2 отримували однакові траєкторії, похибки та випадкові значення. У цьому дослідженні розглянуто один варіант підміни AIC-даних, який поєднує просторову та ракурсну суперечності з даними спостереження за фізичною ціллю.

4.9.4 Показники точності пеленга, якості асоціації та стійкості

Для кожної конфігурації обчислюються кількість правильних призначень True Positive (*TP*), кількість помилкових призначень чужого MMSI False Positive (*FP*) та кількість пропущених допустимих відповідностей False Negative (*FN*). Показник $Precision_{assoc}$ трактується вузько – як частка правильних призначень серед усіх виконаних. Таке трактування відрізняє його від точності системи в ширшому розумінні:

$$Precision_{assoc} = \frac{TP}{TP + FP},$$
$$Recall_{assoc} = \frac{TP}{TP + FN},$$
$$F1_{assoc} = \frac{2Precision_{assoc}Recall_{assoc}}{Precision_{assoc} + Recall_{assoc}} \quad . \tag{4.57}$$

Показник $F1_{\text{assoc}}$ використовується як агрегований, але допоміжний показник балансу між $Precision_{\text{assoc}}$ і $Recall_{\text{assoc}}$. Основними для поставленого завдання є $RMSE_T$, частка помилкових призначень R_{FA}, частота перемикань r_{IDSW}, частка правильного непризначення R_{NA} та частка відхилення підміни. Це враховує, що помилкове присвоєння чужого MMSI небезпечніше за тимчасове збереження цілі без установленої ідентичності.

Точність моніторингу кутового положення оцінюється циклічною середньоквадратичною похибкою:

$$RMSE_T = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} d_{\angle}(\hat{T}_n, T_n^{ref})^2}, \tag{4.58}$$

де N – кількість оцінюваних пеленгів;

$\hat{T}_n$ – оцінене значення істинного пеленга для n-го відліку;

T_n^{ref} – відповідне еталонне значення пеленга;

$d_{\angle}(\cdot)$ – циклічна різниця кутів.

В імітаційному експерименті еталонне значення T_n^{ref} обчислюється безпосередньо за згенерованою траєкторією цілі. Під час подальшої натурної перевірки еталонні значення пеленга можуть визначатися за відомими геодезичними координатами нерухомих об’єктів або за даними незалежної високоточної системи позиціонування, установленої на судні-цілі. Радіолокаційний пеленг, який є вхідною величиною методу, не використовується як еталон під час обчислення $RMSE_T$.

Частка помилкових AIC-призначень визначається як:

$$R_{FA} = \frac{N_{ID}^{wrong}}{N_{ID}^{assigned}}, \tag{4.59}$$

де R_{FA} – частка помилкових AIC-призначень;

N_{ID}^{wrong} – кількість випадків призначення цілі MMSI, що не відповідає її еталонній ідентичності;

$N_{ID}^{assigned}$ – загальна кількість виконаних AIC-призначень.

Для цілей, щодо яких дані AIC відсутні, окремо визначається частка випадків, у яких система коректно не призначила MMSI:

$$R_{NA} = \frac{N_{noAIS}^{correct_unassigned}}{N_{noAIS}^{ref}}, \tag{4.60}$$

де R_{NA} – частка випадків, у яких цілі без AIC коректно залишено без MMSI;

$N_{noAIS}^{correct_unassigned}$ – кількість випадків, коли цілі без AIC не було призначено чужого MMSI;

N_{noAIS}^{ref} – загальна кількість еталонних випадків спостереження цілей без AIC.

Стабільність ідентифікації цілі оцінюють за нормованою кількістю змін призначеного їй MMSI протягом періоду супроводу:

$$r_{IDSW} = \frac{N_{IDSW}}{\sum_n L_n}, \tag{4.61}$$

де r_{IDSW} – нормована частота змін призначеного MMSI;

N_{IDSW} – загальна кількість переходів між різними значеннями MMSI, послідовно призначеними одній і тій самій трасі;

L_n – тривалість еталонної траси n у циклах оброблення;

n – номер еталонної траси;

$\sum_n L_n$ – сумарна тривалість усіх еталонних трас у циклах оброблення.

Окремий показник загальної «частки правильних ідентифікацій» не вводиться, оскільки він дублював би $Recall_{assoc}$ за прийнятої одиниці спостереження.

Абсолютну зміну $F1$-міри подають у відсоткових пунктах, а відносне зменшення середньоквадратичної похибки пеленга – у відсотках.

$$\Delta F1_{pp}(M_a, M_b) = 100\left[F1_{assoc}^{M_a} - F1_{assoc}^{M_b} \right],$$

$$G_{RMSE}^{M_a} = 100\left(1 - \frac{RMSE_T^{M_a}}{RMSE_T^{M_0}} \right), \tag{4.62}$$

де M_a – конфігурація, результат якої оцінюють;

M_b – конфігурація, з якою виконують порівняння;

G_{RMSE}^{Ma} – емпіричне відносне зменшення циклічної середньоквадратичної похибки конфігурації M_a порівняно з базовою конфігурацією M_0;

$RMSE_T^{Ma}$ та $RMSE_T^{M0}$ – значення циклічної середньоквадратичної похибки пеленга для конфігурацій M_a і M_0, обчислені за формулою (4.58).

Емпіричне значення G_{RMSE} зіставляється з аналітичною оцінкою G^{σ} за (4.50) для перевірки адекватності прийнятих значень дисперсій.

Оцінки порівнюються попарно на рівні незалежної реалізації Монте-Карло або повної траєкторії. Для різниць показників застосовується парний кластерний бутстреп за реалізаціями, що зберігає часову залежність спостережень усередині траси. Окремі цикли однієї траси не вважаються незалежними статистичними спостереженнями.

До початку моделювання зафіксовано строгий критерій одночасного поліпшення $F1$ щонайменше на 2 відсоткові пункти та непревищення R_{FA}. Він використовується для перевірки одночасного виконання цих двох умов, а не як загальний висновок про корисність усіх функцій методу:

$$\begin{aligned} &\Delta F1_{pp}(M_2, M_0) \geq 2, \\ &0 \notin CI_{95\%}(\Delta F1_{pp}), \\ &R_{FA}(M_2) \leq R_{FA}(M_0). \end{aligned} \tag{4.63}$$

Умова щодо R_{FA} надає пріоритет недопущенню хибного MMSI. Для $M_1 - M_0$ і $M_2 - M_1$ також подаються точкові оцінки та 95 % довірчі інтервали, щоб окремо показати внесок відеопеленга і ракурсу.

Таким чином, протокол окремо оцінює точність пеленга, якість рішення щодо призначення MMSI та стійкість за відсутніх або суперечливих AIC-даних. Усі конфігурації порівнюються попарно на однакових реалізаціях, а параметри моделі залишаються незмінними після початку оцінювання.

Для сценарію глушіння додатково визначали R_{NA} – частку циклів, у яких атакована фізична ціль продовжувала супроводжуватися, але залишалася без призначеного MMSI. Для сценарію підміни визначали частку циклів, у яких правдоподібний, але суперечливий AIC-кандидат було правильно відхилено.

Для $F1_{assoc}$, R_{FA}, r_{IDSW}, R_{NA}, частки відхилення підміни та $RMSE_T$ наведено різниці $M_1 - M_0$, $M_2 - M_1$ і $M_2 - M_0$. Межі 95 %-х довірчих інтервалів отримано парним повторним вибиранням повних реалізацій, тому однакові випадкові умови не розриваються між режимами.

4.9.5 Результати імітаційного моделювання

Для базового імітаційного оцінювання виконано шість сценаріїв по 1000 парних реалізацій без зміни методу асоціації та конфігурацій M_0, M_1 і M_2. У межах кожної реалізації всі три конфігурації отримували той самий пакет спостережень. Для довірчих інтервалів використано 10 000 парних повторних вибірок.

У таблиці 4.6 зведено точність пеленга, $F1$, *Recall* і частку помилкових призначень. Числа характеризують роботу алгоритму на імітаційному стенді за зафіксованих параметрів, зокрема за модельної ймовірності правильного визначення ракурсу 0,78.

Після додавання відеопеленга $RMSE_T$ зменшилася в усіх шести сценаріях: від 8,34 % у разі поганої видимості до 46,50 % у сцені з малими кутами. Значення $RMSE_T$ для M_1 і M_2 однакові за побудовою, оскільки ознака ракурсу не змінює оцінку пеленга.

У п’яти сценаріях усі виконані AIC-призначення були правильними: *Precision* дорівнював 1,000, а R_{FA} – 0 %. У сценарії без AIC *Precision* залишався в межах 0,989–0,990, а R_{FA} – 0,98–1,07 %. Отже, додаткові перевірки не спричинили загального зростання частки помилкових призначень MMSI.

$F1_{assoc}$ для M_2 був нижчим за M_0 на 0,325–4,715 відсоткового пункту. Це співвідношення пояснюється тим, що за незмінно високої *Precision* зменшився *Recall*, тобто додаткові перевірки частіше залишали сумнівну відповідність непідтвердженою. Це є компромісом між повнотою та обережністю призначення. За критерієм (4.63) одночасного поліпшення $F1$ і непревищення R_{FA} умову в шести сценаріях не виконано.

Таблиця 4.6 – Точність пеленга та показники якості AIC-призначень у базовому імітаційному оцінюванні

Сценарій	$RMSE_{\text{Т}}$: $M_0 \rightarrow M_1$, °	G_{RMSE}, %	$F1$ (0–1): $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2$	*Recall* (0–1): $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2$	$\Delta F1$ $M_2 - M_0$, в.п.; 95 % ДІ	R_{FA}: $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2$, %
Розріджена	1,045 → 0,571	45,35	0,9636 → 0,9612 → 0,9323	0,9300 → 0,9256 → 0,8737	-3,131 [-3,219; -3,046]	0,00 → 0,00 → 0,00
Малі кути	1,046 → 0,560	46,50	0,9626 → 0,9622 → 0,9328	0,9282 → 0,9274 → 0,8746	-2,976 [-3,061; -2,892]	0,00 → 0,00 → 0,00
Перетин	1,050 → 0,615	41,39	0,9626 → 0,9554 → 0,9154	0,9282 → 0,9149 → 0,8447	-4,715 [-4,825; -4,605]	0,00 → 0,00 → 0,00
Затримка AIC	1,050 → 0,588	44,03	0,9549 → 0,9506 → 0,9163	0,9141 → 0,9062 → 0,8462	-3,865 [-3,965; -3,765]	0,00 → 0,00 → 0,00
Без AIC	1,048 → 0,700	33,25	0,9550 → 0,9369 → 0,9092	0,9227 → 0,8903 → 0,8413	-4,582 [-4,719; -4,445]	0,99 → 1,07 → 0,98
Погана видимість	1,048 → 0,961	8,34	0,9633 → 0,9600 → 0,9600	0,9294 → 0,9234 → 0,9234	-0,325 [-0,368; -0,283]	0,00 → 0,00 → 0,00

Перемикань MMSI в базових сценаріях не зафіксовано. Для цілі без AIC частка правильного непризначення R_{NA} становила 98,07–98,34 %, що підтверджує здатність алгоритму залишати фізичну ціль без чужої ідентичності.

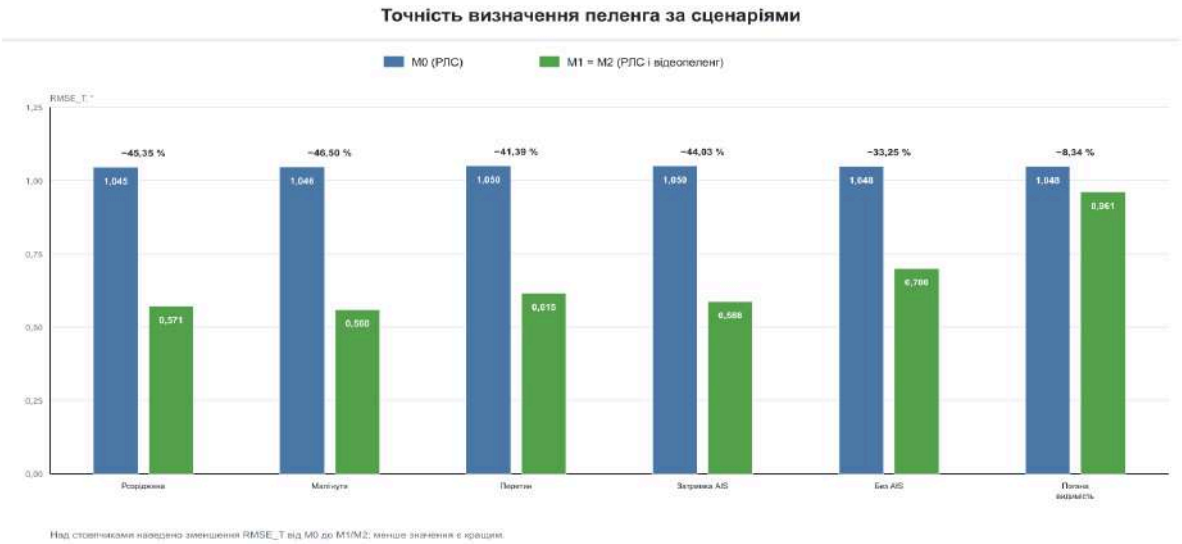


Рисунок 4.9 – Зменшення середньоквадратичної похибки пеленга після додавання відеопеленга у шести сценаріях

На рис. 4.9 показане стійке зменшення $RMSE_T$ у всіх розглянутих умовах. Найбільший відносний виграш отримано за малих кутів між цілями, а найменший – за поганої видимості, коли можливості відеоканалу навмисно обмежено умовами сценарію.

4.9.6 Оцінювання стійкості методу у разі глушіння та підміни AIC

У додатковому імітаційному дослідженні перевірено наслідки двох порушень роботи AIC: повне припинення повідомлень однієї цілі та появу просторово й ракурсно неузгодженого підміненого кандидата. До початку впливу правильний MMSI було встановлено хоча б один раз у 100 % реалізацій для кожної конфігурації.

Після припинення AIC атакована ціль супроводжувалася без чужого MMSI у 100 % оцінюваних циклів для M_0, M_1 і M_2. Помилкових призначень та перемикань MMSI не зафіксовано. Це результат функціонального резервування всієї системи, оскільки M_0 також зберіг супроводження. Власний внесок відеоканалу в цьому сценарії проявився у зменшенні $RMSE_T$ з 1,047° до 0,558°.

Таблиця 4.7 – Результати імітаційного експерименту з порушенням роботи AIC

Сценарій	Показник	M_0	M_1	M_2	$\Delta M_1 - M_0$; 95 % ДІ	$\Delta M_2 - M_1$; 95 % ДІ	$\Delta M_2 - M_0$; 95 % ДІ
Глушіння AIC	R_{NA}, %	100	100	100	0,00 [0,00; 0,00]	0,00 [0,00; 0,00]	0,00 [0,00; 0,00]
Глушіння AIC	R_{FA}, %	0,00	0,00	0,00	0,00 [0,00; 0,00]	0,00 [0,00; 0,00]	0,00 [0,00; 0,00]
Глушіння AIC	r_{IDSW}, %	0,00	0,00	0,00	0,00 [0,00; 0,00]	0,00 [0,00; 0,00]	0,00 [0,00; 0,00]
Глушіння AIC	$RMSE_T$, °	1,047	0,558	0,558	–0,489 [–0,494; –0,483]	0,000 [0,000; 0,000]	–0,489 [–0,494; –0,483]
Глушіння AIC	$F1_{assoc}$, %	76,50	76,31	72,35	–0,18 [–0,27; –0,10]	–3,96 [–4,07; –3,86]	–4,14 [–4,27; –4,01]
Підміна AIC	Відхилення підміни, %	13,78	33,52	93,19	19,74 [19,21; 20,28]	59,67 [59,09; 60,22]	79,41 [78,92; 79,90]
Підміна AIC	R_{FA}, %	31,67	26,40	3,84	–5,28 [–5,43; –5,12]	–22,56 [–22,76; –22,35]	–27,84 [–28,03; –27,64]
Підміна AIC	r_{IDSW}, %	0,64	0,66	0,06	0,02 [–0,02; 0,06]	–0,61 [–0,64; –0,57]	–0,59 [–0,62; –0,55]
Підміна AIC	$RMSE_T$, °	1,044	0,560	0,560	–0,484 [–0,489; –0,479]	0,000 [0,000; 0,000]	–0,484 [–0,489; –0,479]
Підміна AIC	$F1_{assoc}$, %	65,00	67,17	71,42	2,17 [2,07; 2,28]	4,25 [4,12; 4,38]	6,43 [6,28; 6,57]

За суперечливої підміни частка правильного відхилення хибного кандидата зросла з 13,78 % для M_0 до 33,52 % для M_1 і 93,19 % для M_2. Порівняно з M_0 конфігурація M_2 зменшила R_{FA} з 31,67 % до 3,84 %, підвищила $F1_{assoc}$ на 6,43 відсоткового пункту та знизила r_{IDSW} з 0,64 % до 0,06 %. Саме тут ракурс дав незалежну перевірку, оскільки напрям корпусу, переданий підміненим повідомленням, суперечив відеоспостереженню.

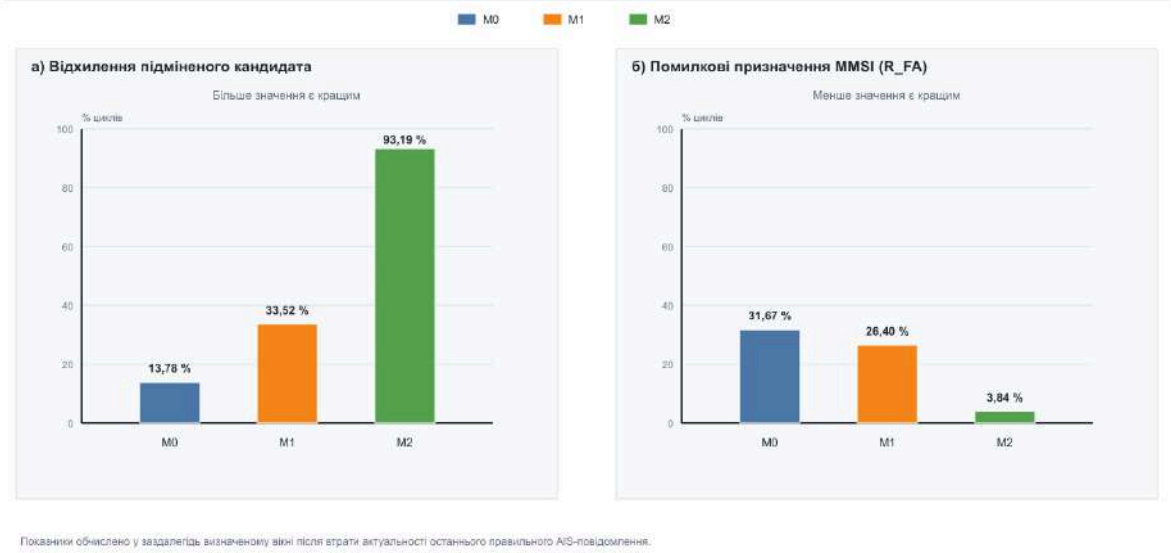


Рисунок 4.10 – Перевірка суперечливої підміни AIC: а) частка відхилених хибних кандидатів; б) частка помилкових призначень MMSI

Метод перевіряє спостережувану узгодженість AIC-кандидата з положенням, рухом і ракурсом фізичної цілі. Якщо змінено лише MMSI, а координати, параметри руху та ракурс залишаються повністю узгодженими, поточний метод не має ознаки для виявлення такої підміни. Автентифікація самого MMSI належить до іншого класу засобів.

Наведені числа характеризують алгоритм на імітаційному стенді за зафіксованих параметрів, зокрема за модельної ймовірності правильного визначення ракурсу 0,78.

Висновки за розділом 4

У четвертому розділі обґрунтовано вимоги до суднової відеосистеми кругового огляду, призначеної для виявлення надводних об’єктів, визначення їхнього ракурсу і пеленга та спільного використання з даними РЛС і AIC. Визначено допустимі сліпі сектори, умови розміщення камер на щоглі та принцип розподілу секторів відповідальності. За прийнятою моделлю оптичного горизонту встановлення камери на висоті 8,4 м забезпечує геометричну видимість поверхні моря до горизонту на відстані близько 6 морських миль. Це значення визначає геометричну зону огляду, тоді як фактична дальність автоматизованого виявлення

суден і розпізнавання їхнього ракурсу залежить від розміру цілі, характеристик оптики, освітлення, видимості та властивостей моделі комп’ютерного зору.

Для подальших розрахунків прийнято, що критичний розмір зображення цілі має становити не менше 32 пікселів. Розрахунок для судна з розрахунковим розміром 20 м, відстані 6 морських миль і горизонтального поля зору 60° показав, що використання однієї ширококутної камери без наближення потребувало б роздільної здатності близько 262 Мп. Тому обґрунтовано використання PTZ-камер: ширококутний режим призначено для загального спостереження, а оптичне наближення – для отримання зображення з деталізацією, необхідною для визначення ракурсу судна.

Визначено зв’язок між горизонтальним полем зору камер, їх кількістю, секторами відповідальності та перекриттям суміжних зображень. Для розглянутої схеми із шести камер основний сектор відповідальності кожної камери становить 60°. Розраховано вертикальне поле зору та кут нахилу оптичної осі, за яких обмежується сліпа зона поблизу судна і водночас зберігається видимість горизонту. Для практичної роботи передбачено ширококутний режим загального спостереження та режим ручного керування з оптичним наближенням вибраної цілі. Після припинення дій оператора камера має автоматично повертатися до свого основного сектора. Для зменшення впливу хитавиці та нестійких виявлень запропоновано фізичну стабілізацію камер і програмне згладжування результатів супроводження.

Запропоновано метод визначення відносного пеленга за положенням центра обмежувальної рамки судна у відеокадрі, поточним полем зору та відкаліброваним напрямком оптичної осі камери. Саме відносний пеленг, тобто напрямок на ціль відносно носа власного судна, безпосередньо визначається за відеозображенням. Відносні пеленги РЛС і відеосистеми узгоджуються та об’єднуються з урахуванням їхніх похибок. Після цього до отриманої оцінки один раз додається істинний курс власного судна. Так визначається істинний пеленг – напрямок на ціль відносно півночі, необхідний для спільної роботи з даними АІС.

Дані про істинний курс надходять від суднового джерела курсу, наприклад гірокомпаса, і передаються пристроєм THD, вимоги до точності якого встановлено резолюцією IMO MSC.116(73) [43]. Повідомлення NMEA 0183 HDT і THS містять дані про істинний курс, а повідомлення ROT – про кутову швидкість повороту. Для зменшення похибки під час повороту судна відеокадри та навігаційні повідомлення запропоновано приводити до спільного часу за часовими мітками обчислювальної платформи із синхронізацією за сигналом PPS або протоколом NTP.

Розроблено метод асоціації та взаємної перевірки даних AIC, РЛС і відеосистеми. AIC надає MMSI, координати та параметри руху судна. РЛС незалежно виявляє фізичну ціль, вимірює дистанцію і відносний пеленг, а відеосистема надає додатковий відносний пеленг і визначає ракурс судна. Під час зіставлення враховується, що AIC-антена, точка ефективного радіолокаційного відбиття, центр обмежувальної рамки та геометричний центр корпусу можуть відповідати різним точкам одного судна.

MMSI надходить лише з AIC. Якщо надійну відповідність між фізичною ціллю та AIC-кандидатом не встановлено, радіолокаційно-візуальна траса продовжує супроводжуватися без MMSI. Такий стан є передбаченим результатом роботи методу і дозволяє не присвоювати цілі сумнівну або чужу ідентичність.

Для оцінювання методу використано три конфігурації. M_0 – базова конфігурація, у якій для супроводження та асоціації використовуються дані РЛС і AIC без відеоканалу. У конфігурації M_1 до M_0 додано відеопеленг. У конфігурації M_2 додатково до відеопеленга використовується визначений за відеозображенням ракурс судна. Отже, порівняння M_1 з M_0 показує внесок відеопеленга, а порівняння M_2 з M_1 – внесок ракурсу.

На імітаційному стенді виконано шість базових сценаріїв по 1000 парних реалізацій для кожної конфігурації. У шести базових сценаріях за прийнятих параметрів імітаційної моделі додавання відеопеленга зменшило середньоквадратичну похибку істинного пеленга на 8,34–46,50 % порівняно з конфігурацією M_0. Величина отриманого виграшу залежить від прийнятих характеристик похибок інформаційних каналів; її кількісне підтвердження для

запропонованої бортової системи потребує натурного визначення цих характеристик. У базових сценаріях конфігурація M_2 характеризувалася нижчою повнотою асоціації порівняно з M_0, що зумовило зменшення показника $F1$ – узагальненого показника балансу точності та повноти асоціації. Перевага повної конфігурації за критерієм (4.63) у цих умовах не підтвердилася. Це свідчить про залежність ефекту комплексного використання відеопеленга та ракурсу від сценарію спостереження. У п’яти базових сценаріях помилкових призначень MMSI не зафіксовано. У сценарії, що містив ціль без AIC, частка помилкових призначень MMSI серед усіх виконаних призначень становила 0,98–1,07 % залежно від конфігурації методу. У всіх досліджених сценаріях частка правильних AIC-призначень серед усіх виконаних призначень *Precision* становила 98,9–100 %.

Після припинення AIC-повідомлень фізична ціль не була втрачена. У конфігурації M_0 вона продовжувала супроводжуватися за даними РЛС, а в конфігураціях M_1 і M_2 – за даними РЛС та відеосистеми. У всіх трьох конфігураціях цілі не було присвоєно MMSI іншого судна у 100 % оцінюваних циклів. Отже, втрата AIC не призвела до припинення супроводження або помилкового присвоєння чужої ідентичності. Збереження супроводження після припинення AIC-повідомлень забезпечувалося радіолокаційною трасою в усіх трьох конфігураціях. Тому перевагу відеоканалу щодо безперервності супроводження в цьому сценарії не встановлено. Додаткова функція відеоканалу полягала в наданні інформації про ракурс судна та уточненні пеленга. В окремому сценарії припинення AIC-повідомлень середньоквадратична похибка істинного пеленга становила 1,047° у конфігурації M_0 та 0,558° у конфігураціях M_1 і M_2, що використовують відеопеленг.

У змодельованому сценарії просторово і ракурсно суперечливої підміни частка правильного відхилення хибного AIC-кандидата становила 13,78 % для M_0, 33,52 % для M_1 і 93,19 % для M_2. Отже, відеопеленг уже в конфігурації M_1 підвищив здатність системи виявляти просторову суперечність, а додавання ракурсу в M_2 дало найбільший результат. У цьому сценарії частка помилкових призначень MMSI

зменшилася з 31,67 % для M_0 до 3,84 % для M_2, показник $F1$ підвищився на 6,43 відсоткового пункту, а частота перемикань MMSI зменшилася з 0,64 % до 0,06 %.

Крім того, відеоканал забезпечує незалежне візуальне спостереження за силуетом і ракурсом судна, що відповідає загальній вимозі належного спостереження, визначеній Правилом 5 МПЗЗС-72 [46]. Окремим напрямом подальшої роботи є дослідження можливості використання цих даних для розпізнавання ситуацій зближення відповідно до Правил 11–18 МПЗЗС-72 [46].

РОЗДІЛ 5
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ РОБОТИ МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАКУРСУ СУДЕН

5.1 Ефективність роботи моделі залежно від відстані та часу доби

5.1.1 Умови та організація експериментального дослідження

При використанні систем відеоспостереження в реальних умовах морського середовища якість зображення може суттєво змінюватися залежно від часу доби, атмосферних явищ [68] та дистанції до об'єктів спостереження. У таких умовах ефективність донавчених моделей комп'ютерного зору може суттєво знижуватися, що потребує експериментального дослідження та кількісної оцінки стабільності їх роботи [76].

Для перевірки працездатності моделі комп'ютерного зору на базі YOLOv8n, призначеної для розпізнавання ракурсів суден, було проведено експериментальне дослідження на основі відеоданих, зібраних у період з 10 лютого по 25 лютого 2026 року. Відеозйомка здійснювалася з борту судна-спостерігача, яке перебувало на рейді поблизу порту Chittagong Port (Bangladesh). Координати судна: 21°53′ N, 91°48′ E (рис. 5.1).

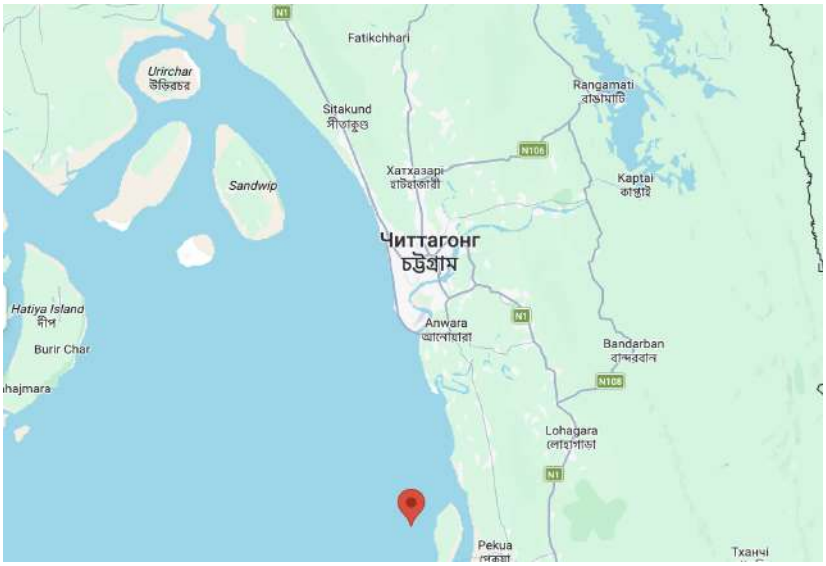


Рисунок 5.1 – Розташування судна-спостерігача в акваторії Chittagong Port (Bangladesh) [27]

Зйомка виконувалася за допомогою камери з матрицею з роздільною здатністю 12 мегапікселів та об’єктивом з діафрагмою f/1,6, що забезпечує достатню світлочутливість під час зйомки в різних умовах освітлення. Відео записувалося у форматі 4K з частотою 30 кадрів за секунду, що забезпечує достатню просторову та часову роздільну здатність для подальшої обробки донавченою моделлю комп’ютерного зору.

Більшість суден, що потрапляли в поле зору камери, перебували на якорі та не здійснювали поступального руху. Водночас через хвильові коливання морської поверхні та зміну вітрових умов спостерігалося незначне обертання суден навколо якоря, а також мінімальні зміни їх просторового положення відносно камери. Таким чином, попри відносну статичність сцени, розміщення об’єктів спостереження не було сталим. Загалом протягом експерименту переважно фіксувалися одні й ті самі судна, що дало змогу оцінити стабільність роботи моделі комп’ютерного зору за умов повторюваних об’єктів, але зі змінними кутами огляду та освітленням.

Експериментальна база даних налічує 81 відео, які відображають незалежні сцени морського простору навколо судна-спостерігача без активного переміщення самого судна. Перед обробкою роздільна здатність відео була зменшена до 1280 x 720 пікселів. Частота відеозапису становить 30 кадрів за секунду. Тривалість відео становить до 7 секунд. Анотація кожного відео містить інформацію про поточний місцевий час та відстані до об’єктів спостереження. Значення відстані визначалися за даними AIC відповідних суден на момент відеозйомки. Загальна кількість суден на відео – 236.

Відеозйомка відбувалася в проміжку з 06:00 ранку до 19:30 вечора за місцевим часом. Оновлення даних відбувалося з інтервалом у 30 хвилин, що дозволило отримати відеозаписи за різних умов освітлення.

У процесі експериментальних спостережень судна знаходилися на різних дистанціях від судна-спостерігача – від безпосередньої близькості до борту судна до 1,9 морської милі. Верхня межа дистанції визначалась максимальною дальністю, на якій об’єкти залишалися у видимому діапазоні камери та могли бути зафіксовані

на відеозображенні. Параметри оптичного та цифрового збільшення камери залишалися незмінними. Таким чином, розмір об’єкта в кадрі зменшувався чи збільшувався лише зі зміною дистанції, що безпосередньо впливало на якість розпізнавання.

У процесі відеозйомки спостерігалися судна різних типів, зокрема балкери, контейнеровози та інші.

Таким чином, сформована експериментальна база даних охоплює різні дистанції спостереження, умови освітлення та конфігурації ракурсів суден, що дозволяє оцінити роботу моделі комп’ютерного зору за умов, наближених до умов реальної експлуатації.

5.1.2 Оцінка результатів роботи моделі

Оцінювання ефективності роботи моделі комп’ютерного зору здійснювалося на основі аналізу результатів виявлення об’єктів на відео. Основною метою оцінювання є визначення здатності моделі коректно виявляти судна в полі зору камери, а саме правильно визначати їх локалізацію та клас ракурсу.

Одиницею оцінювання в межах експерименту вважалося окреме судно в окремому відеофрагменті. Для кожного такого спостереження за результатами аналізу послідовності кадрів визначався підсумковий результат локалізації та класифікації. Еталонний клас ракурсу встановлювався дослідником відповідно до прийнятої в роботі класифікації ракурсів. Судно вважалося правильно локалізованим, якщо обмежувальна рамка, сформована моделлю, відповідала положенню судна в кадрі та охоплювала його основний видимий контур. Порогове значення IoU не застосовувалося, оскільки для експериментальних відеоматеріалів еталонні координати обмежувальних рамок не формувалися.

Під час аналізу результатів роботи моделі розглядалися такі можливі варіанти результатів:

– правильне виявлення об’єкта (True Positive Correct, TP_c) – ситуація, за якої модель коректно визначає положення об’єкта на відео у вигляді обмежувальної

рамки та правильно класифікує його відповідно до заданого класу (рис. 5.2). Таке виявлення свідчить про вірну локалізацію та класифікацію;

– помилка класифікації (True Positive Misclassified, TP_m) – ситуація, коли об’єкт локалізований, проте віднесений до неправильного класу. Попри те, що ракурс судна невідомий, локалізація свідчить про наявність об’єкта. В подальшому це є джерелом інформації для визначення пеленгу на об’єкт і, як наслідок, підвищення безпеки мореплавства (рис. 5.2).

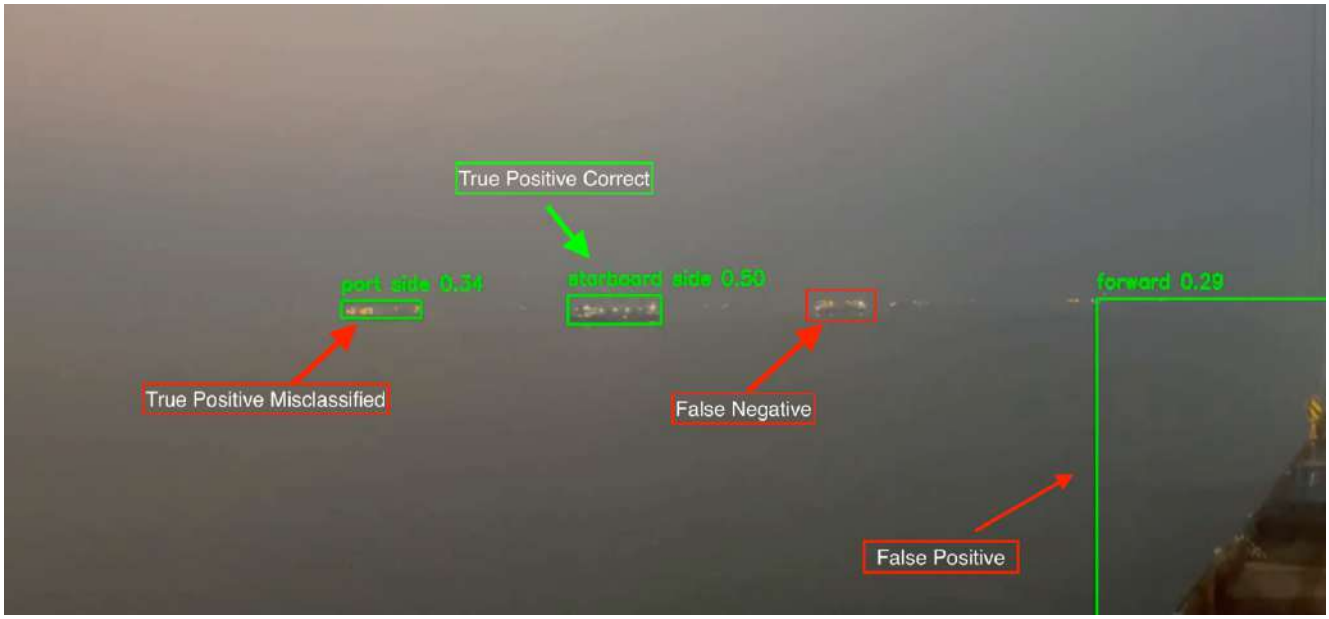


Рисунок 5.2 – Можливі варіанти результатів роботи моделі

У межах проведеного дослідження неточність локалізації не розглядалася як окрема категорія. Це пов’язано з тим, що основною метою системи розпізнавання ракурсу є виявлення судна та визначення його ракурсу, тоді як незначні відхилення положення обмежувальної рамки не впливають на результат класифікації. Крім того, аналіз проведено для безперервного відеопотоку, у якому об’єкт спостерігається протягом послідовності кадрів, що зменшує вплив короткочасних неточностей локалізації. У випадках, коли неточність побудови обмежувальної рамки призводила до неправильної класифікації ракурсу судна, такі випадки відносилися до помилок класифікації:

– хибнопозитивне спрацювання (False Positive, *FP*) – випадок, коли модель визначає наявність об’єкта у кадрі, хоча фактично судно відсутнє (рис. 5.2);

– пропуск об’єкта (False Negative, *FN*) – ситуація, за якої об’єкт присутній у кадрі, однак модель його не виявляє. На рис. 5.2 він вручну промаркований червоним кольором [20; 23].

Таким чином, загальна кількість локалізованих об’єктів визначається як (5.1):

$$TP = TP_c + TP_m, \tag{5.1}$$

де TP_c – кількість об’єктів, що були правильно локалізовані та правильно класифіковані;

TP_m – кількість об’єктів з помилковою класифікацією.

Для кількісної оцінки ефективності роботи моделі комп’ютерного зору у процесі експериментального дослідження використовується показник середньої впевненості моделі для правильних виявлень (mean confidence of correct detections), який характеризує рівень впевненості моделі у випадках коректного визначення об’єктів. До розрахунку включаються лише істинно-позитивні виявлення, тобто ті, для яких правильно визначено як клас об’єкта, так і його локалізацію. Значення показника обчислюється як середнє арифметичне оцінок впевненості моделі (5.2):

$$\overline{C_{TP}} = \frac{1}{N}\sum_{i-1}^{N} C_i, \tag{5.2}$$

де C_i – значення впевненості моделі для *i*-го правильного виявлення;

N – загальна кількість істинно-позитивних виявлень.

У межах дослідження цей показник аналізується залежно від відстані до об’єкта та часу доби шляхом усереднення значень у відповідних групах спостережень.

Показник середньої впевненості моделі для правильних виявлень характеризує лише рівень впевненості моделі для коректно розпізнаних об’єктів і

не враховує випадки, коли судно було присутнє в кадрі, проте не виявлене моделлю (*FN*), або коли модель хибно зафіксувала об’єкт за його фактичної відсутності (*FP*).

Для комплексної оцінки якості роботи моделі додатково розраховано показники точності (*Precision*) та повноти (*Recall*). Для забезпечення єдиного підходу до оцінювання результатів, прийнятого у розділі 3, правильним результатом вважався випадок, коли модель одночасно правильно локалізувала судно та правильно визначила клас його ракурсу. Таким випадкам відповідає категорія TP_c.

Випадки TP_m, за яких судно було локалізовано, але його ракурс визначено неправильно, не відносилися до істинно-позитивних результатів. Під час розрахунку *Precision* такі випадки враховувалися як помилкові передбачення класу, а під час розрахунку *Recall* – як пропуски об’єктів відповідного класу. Такий підхід відповідає прийнятому в розділі 3 критерію, згідно з яким правильне виявлення передбачає одночасно правильну локалізацію об’єкта та правильне визначення класу ракурсу.

Показник точності (*Precision*) характеризує частку правильно локалізованих і правильно класифікованих суден серед усіх позитивних результатів роботи моделі та визначається за формулою:

$$Precision = \frac{TP_c}{TP_c + TP_m + FP}, \tag{5.3}$$

де TP_c, TP_m, FP – кількість випадків, які визначені відповідно до категорій, наведених вище.

Показник повноти (*Recall*) характеризує частку фактично присутніх у вибірці суден, які були одночасно правильно локалізовані та правильно класифіковані за ракурсом:

$$Recall = \frac{TP_c}{TP_c + TP_m + FN}, \tag{5.4}$$

де FN – кількість пропущених суден.

Оскільки для подальшого визначення пеленга важливим є також сам факт локалізації судна незалежно від результату класифікації його ракурсу, окремо оцінено характеристики локалізації за формулами (5.5) та (5.6). У цьому випадку до правильно локалізованих об'єктів віднесено як TP_c, так і TP_m:

$$Precision_{loc} = \frac{TP_c + TP_m}{TP_c + TP_m + FP}, \tag{5.5}$$

$$Recall_{loc} = \frac{TP_c + TP_m}{TP_c + TP_m + FN}. \tag{5.6}$$

Таким чином, показники *Precision* та *Recall* характеризують комплексний результат роботи моделі – правильну локалізацію судна та правильне визначення його ракурсу, тоді як $Precision_{loc}$ та $Recall_{loc}$ характеризують лише здатність моделі локалізувати судно у відеозображенні незалежно від частки правильних класифікацій ракурсу.

5.1.3 Інтерпретація отриманих результатів

Для зручності опрацювання результатів інформація про значення показника середньої впевненості моделі для правильних виявлень $\overline{C_{TP}}$, залежно від дальності розташування об'єкта спостереження, представлена на рис. 5.3. На відстанях до 1 морської милі він у середньому становить 0,53. Максимальне значення сягає 0,77. На малих та середніх відстанях вплив атмосферних спотворень та обмежень роздільної здатності є мінімальним. На відстанях від 1 до 1,9 морських миль показник середньої впевненості моделі значно знижується. На практиці для зменшення кількості нестабільних виявлень та покращення сприйняття інформації оператором можливе налаштування порогу впевненості. За необхідності виявлення суден на більших відстанях система потребує оптичного чи цифрового зуму для вилучення більшої кількості ознак ракурсу судна.

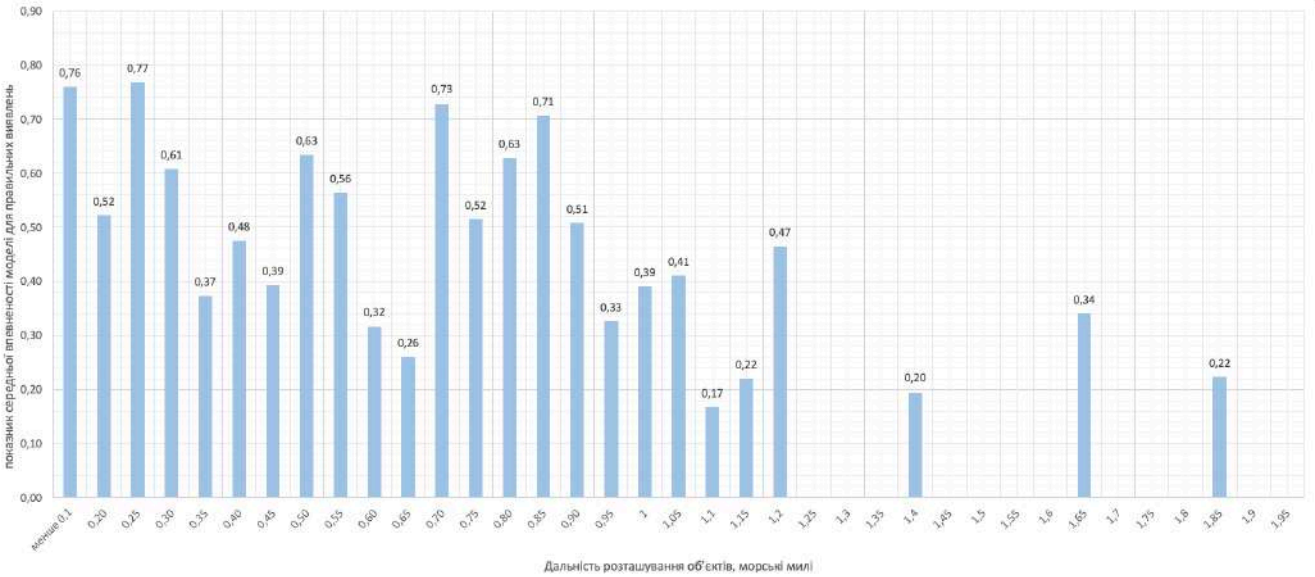


Рисунок 5.3 – Залежність показника середньої впевненості моделі для правильних виявлень від дальності розташування об’єкта спостереження

Аналізуючи роботу моделі комп’ютерного зору залежно від часу доби (рис. 5.4), можна зробити висновок, що під час світлового дня, з 6:00 до 18:00 години за місцевим часом, показник середньої впевненості моделі для правильних виявлень подекуди досягає 0,85 за умов хорошої видимості. Резистентність моделі до умов освітлення зумовлена застосуванням технік колірних аугментацій при тренуванні моделі комп’ютерного зору. При достатньому природному освітленні система забезпечує розпізнавання об’єктів на відстанях до 1,9 морських миль.

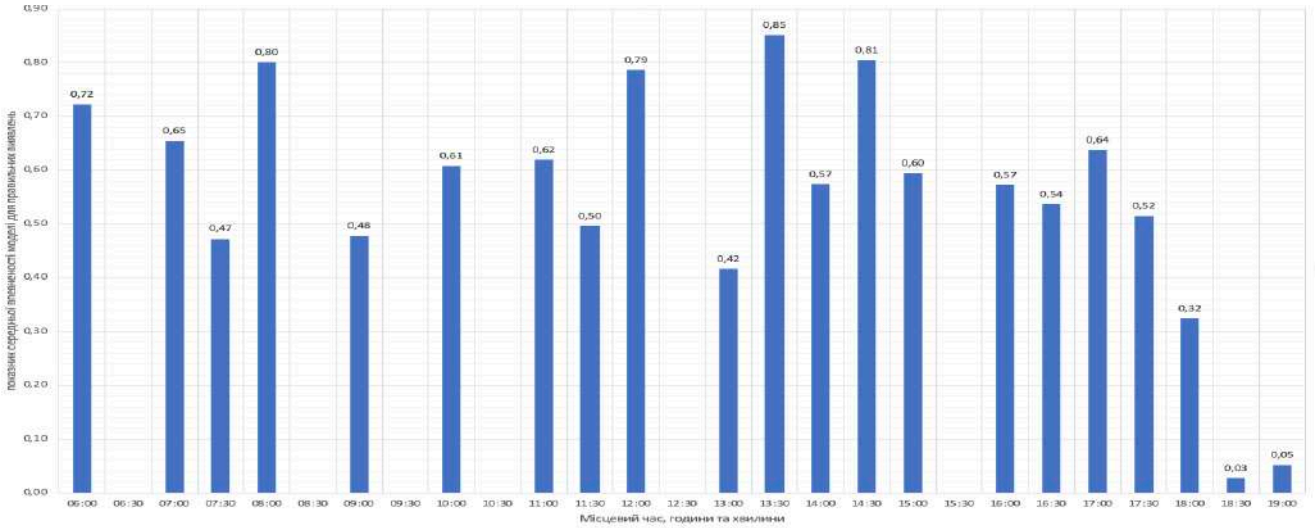


Рисунок 5.4 – Показник середньої впевненості моделі для правильних виявлень залежно від часу доби

За умов достатнього освітлення зниження показника середньої впевненості моделі для правильних виявлень або відсутність таких виявлень зумовлені переважно ускладненими погодними умовами (рис. 5.5, а). У вечірні години, після 18:00, значення показника середньої впевненості моделі для правильних виявлень суттєво зменшуються, а для частини дистанцій наближаються до нульових значень (рис. 5.5, б). За рахунок зниження рівня освітленості спостерігається погіршення контрастності об’єктів та зростання впливу шумів у відеосистемі. У темний час доби формування зображення здійснюється виключно за рахунок наявних джерел світла, таких як місячне освітлення, берегові вогні, навігаційні вогні суден або інші штучні джерела світла. За умов недостатнього освітлення камера автоматично підвищує чутливість сенсора до світла. Збільшення чутливості сенсора дозволяє отримувати зображення навіть за слабкого освітлення, однак це призводить до появи цифрового шуму та зниження деталізації зображення. Підвищений рівень шуму може ускладнювати виділення контурів об’єктів і зменшувати контраст між об’єктом та фоном. Внаслідок зниження чіткості контурів об’єкта можливість виявлення та локалізації суден моделлю зменшується. Найбільш помітне зниження впевненості моделі спостерігається на великих відстанях, де навіть незначне погіршення умов видимості призводить до погіршення виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу.



а) б)

Рисунок 5.5 – Погіршення виявлення об’єктів внаслідок:
а) ускладнених погодних умов – туман; б) вечірні години

На рис. 5.6 наведено результати роботи моделі залежно від відстані до об’єкта спостереження. Отримані результати поділено на чотири взаємовиключні

категорії: правильне виявлення, тобто вірна локалізація та класифікація ракурсу (TP_c), правильна локалізація з помилковою класифікацією ракурсу (TP_m), хибнопозитивне спрацювання (FP) і пропуск об'єкта (FN). Із 236 фактично присутніх суден модель локалізувала 152: для 105 суден ракурс визначено правильно, а для 47 – помилково. Зафіксовано 84 пропуски об'єктів і 9 хибнопозитивних спрацювань. Частка правильно класифікованих ракурсів серед локалізованих суден становить 69,1 %. З урахуванням пропущених суден частка об'єктів із правильно визначеним ракурсом від загальної кількості фактично присутніх суден становить 44,5 %.

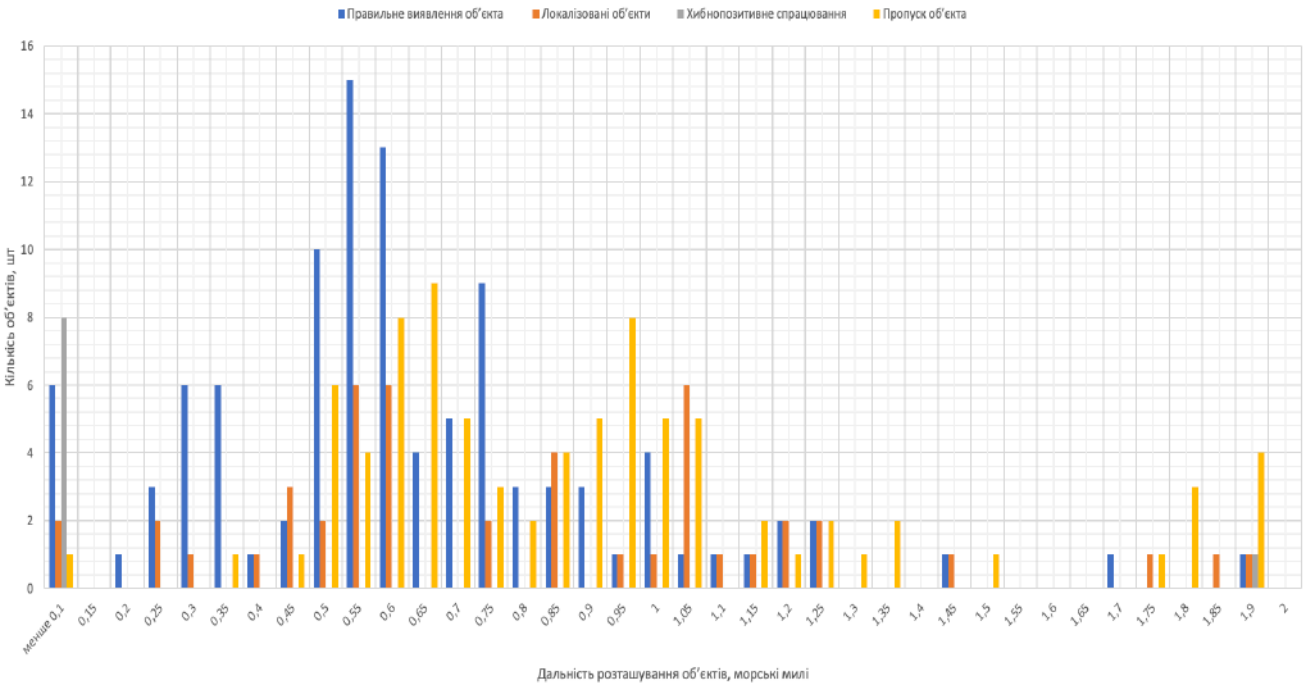


Рисунок 5.6 – Діаграма залежності результатів роботи моделі від дальності розташування об'єктів

На відстанях менше 0,1 морської милі спостерігається велика кількість хибнопозитивних спрацювань. Це зумовлено тим, що при тренуванні моделі не було враховане розташування камер і, як наслідок, можлива присутність в кадрі елементів корпусу власного судна-спостерігача, що не підлягають виявленню.

На відстанях до 0,85 морських миль переважає кількість правильно виявлених та локалізованих цілей. На відстанях від 0,5 морських миль спостерігається в середньому по шість пропусків на кожен відрізок відстані. Переважна більшість

пропусків зумовлена наявністю великої кількості суден на відстанях від 0,5 до 1 морської милі (рис. 5.7), які модель не змогла локалізувати чи класифікувати. Тобто за великої кількості об’єктів розпізнавання модель демонструє тенденцію до пропусків, що є типовим обмеженням одностадійних детекторів типу YOLO при роботі зі сценами високої щільності та значної варіації масштабів.



Рисунок 5.7 – Приклад пропусків суден-цілей, зумовлений наявністю великої кількості суден на відстанях від 0,5 до 1 морської милі

На відстанях від 1,15–1,9 морської милі спостерігається суттєве зниження ефективності виявлень, що проявляється у зростанні кількості пропусків об’єктів та зменшенні частки локалізованих та виявлених об’єктів. Наявність сприятливих умов освітлення не впливає на результат на таких відстанях (рис. 5.8).

Аналіз залежності результатів від часу доби показав, що у світлий період доби (з 06:00 до 18:00) модель забезпечує достатній рівень правильних виявлень (рис. 5.9). Протягом усього світлового дня переважають вірні виявлення та локалізації, окрім випадків великого скупчення суден в кадрі (рис. 5.7–5.8). Починаючи з 18:30, коли контрастність об’єктів падає, можливість виявлення суден моделлю істотно знижується. Таким чином, використання камери без тепловізійного каналу може обмежувати ефективність роботи системи в умовах

низької освітленості, що необхідно враховувати під час практичного застосування відеосистеми для визначення ракурсу суден. Це також свідчить про те, що рівень освітлення є одним із ключових факторів, що визначають ефективність роботи систем відеоспостереження та алгоритмів автоматичного визначення та локалізації об’єктів.



Рисунок 5.8 – Приклад великої кількості пропусків за достатньої освітленості (14:00)

Для повної кількісної характеристики роботи моделі відповідно до формул (5.3) та (5.4) розраховано показники *Precision* та *Recall*, які враховують одночасно результати локалізації судна та класифікації його ракурсу. За весь період спостереження значення *Precision* становило 0,65, а *Recall* – 0,44.

Окремо відповідно до формул (5.5) та (5.6) оцінено характеристики локалізації суден незалежно від результату класифікації ракурсу. Значення $Precision_{loc}$ за весь період спостереження становило 0,94, а $Recall_{loc}$ – 0,64. Вісім із дев’яти хибнопозитивних спрацювань були пов’язані з помилковим розпізнаванням елементів корпусу власного судна-спостерігача.

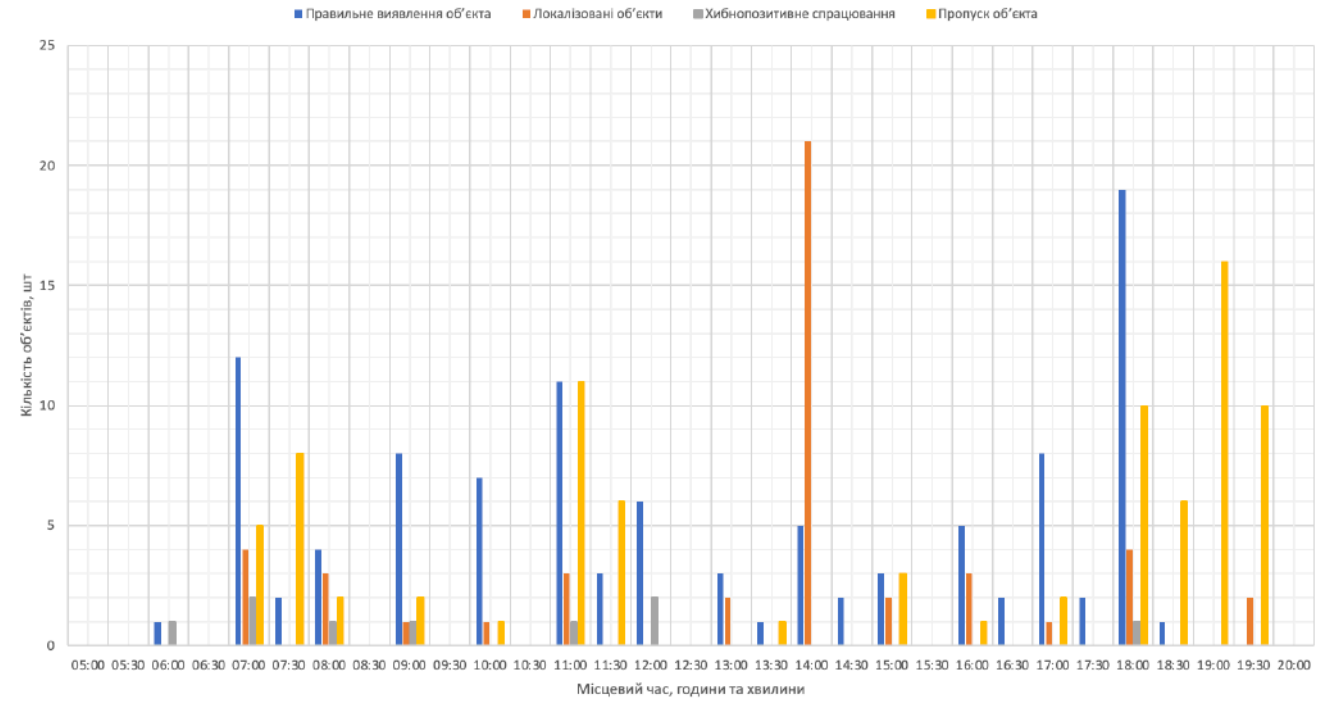


Рисунок 5.9 – Діаграма залежності результатів роботи моделі від часу доби

5.2 Ефективність роботи моделі за використання цифрового масштабування

5.2.1 Умови та організація експериментального дослідження

В експериментальному дослідженні проаналізовано 53 судна-цілі, зафіксовані в період з 24 березня по 12 квітня 2026 року під час переходу між портами Balikpapan і Chittagong. Для кожного судна отримано п’ять відеофрагментів, що відповідають рівням цифрового масштабування від 1x до 5x. Відео тривалістю до 5 с записували камерою з матрицею з роздільною здатністю 12 мегапікселів та об’єктивом із діафрагмою f/1,6. Фактичний розмір зображення судна в пікселях залежав від відстані, поля зору та застосованого рівня масштабування. Таким чином, загальна кількість проаналізованих відеофрагментів становила 265. Одиницею оцінювання був результат локалізації та класифікації одного заздалегідь визначеного судна-цілі в одному відеофрагменті за відповідного рівня масштабування.

Цифрове масштабування застосовувалося камерою безпосередньо під час запису відео. Для рівнів 2x–5x використовувався вбудований цифровий зум камери

без подальшого програмного обрізання або іншої попередньої обробки відеоматеріалів. Метод інтерполяції окремо не задавався та визначався внутрішніми алгоритмами камери.

Встановлено, що 49 із 53 досліджуваних суден перебували на рейдовій стоянці та характеризувалися незмінним ракурсом спостереження протягом усього періоду зйомки. В інших чотирьох випадках судна здійснювали рух, що призводило до зміни їхнього положення в кадрі, проте за рахунок короткого періоду фіксації ракурс судна-цілі відносно судна-спостерігача залишався практично незмінним.

Слід відзначити обмеження репрезентативності вибірки за типом судна: 46 з 53 суден (86,8 %) належать до класу балкер, тоді як інші типи (танкер для перевезення зрідженого природного газу, контейнеровоз, пасажирське судно, бункерувальник) представлені одиничними прикладами.

На початку обчислень відбувався аналіз відеопотоку для визначення початкових параметрів відео, зокрема ширини та висоти кадру. Перед подаванням кадру до моделі виконувалася стандартна підготовка вхідного зображення YOLO: кадр масштабувався зі збереженням співвідношення сторін і доповнювався полями до розміру, визначеного параметром imgsz = 640. Після обробки моделлю координати обмежувальних рамок перетворювалися до системи координат початкового кадру. Це внутрішнє перетворення слід відрізняти від експериментального цифрового масштабування 1x–5x, яке застосовувалося під час експерименту.

В таблиці 5.1 представлений розподіл кількості суден за інтервалом відстані.

Найбільша кількість суден (30 із 53, або 56,6 %) спостерігалася на відстанях від 0,5 до 1 морської милі. В попередньому пункті 5.1.3 на відстанях понад 0,85 морської милі спостерігалося різке збільшення помилкових класифікацій, а на відстанях від 1,15–1,9 морської милі – найбільша кількість пропусків. У дослідженні з масштабуванням майже половина розглянутих випадків (23 із 53; 43,3 %) припадала на судна на відстанях від 0,85 до 3,49 морської милі, а 15 суден (28,3 %) перебували на відстанях понад 1,15 морської милі. Це обумовлено обмеженою кількістю суден, які в період спостереження перебували на значному

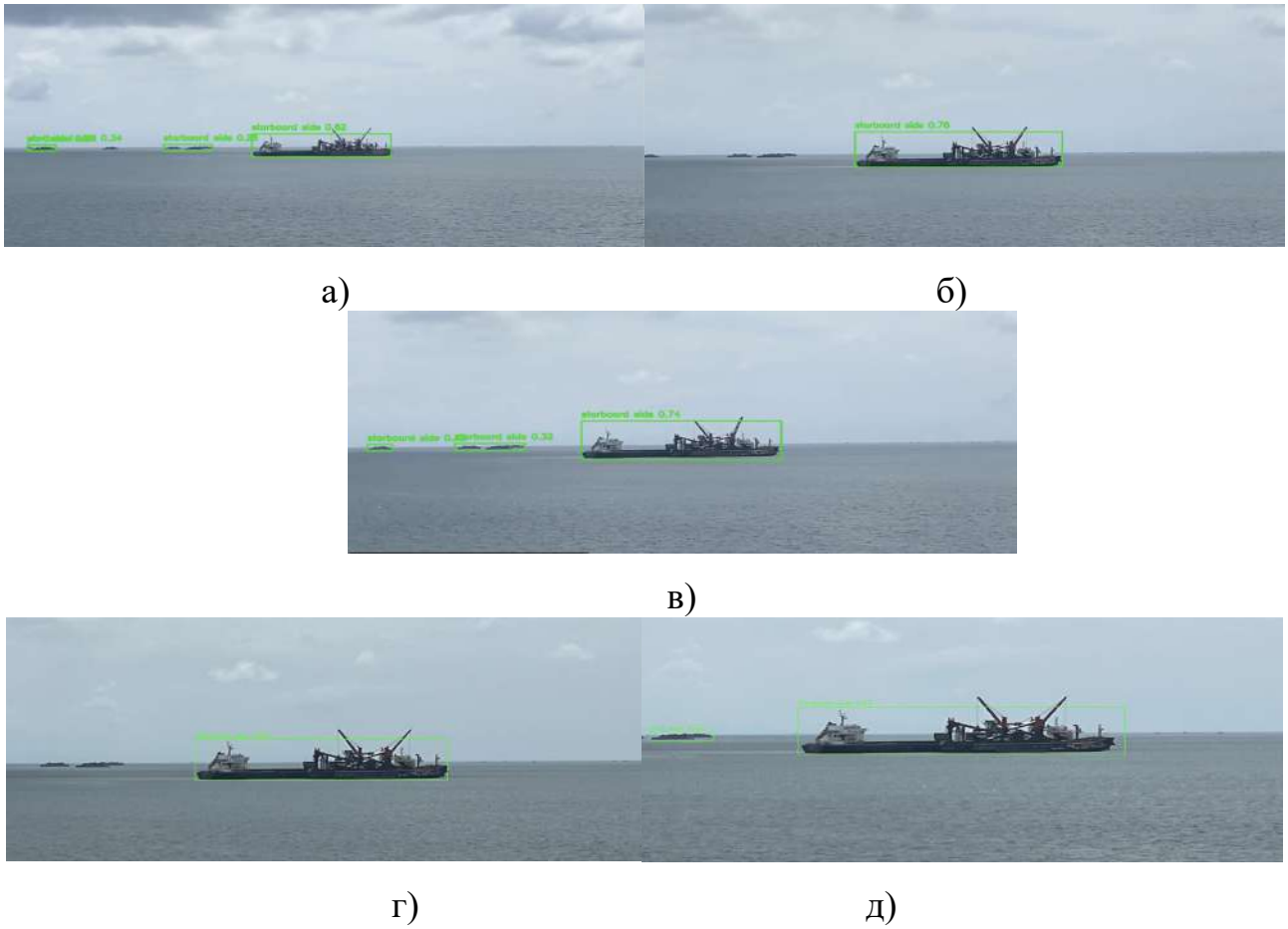
віддаленні від судна-спостерігача. Середня відстань до об’єктів спостереження становить 1,09 морської милі, максимальна – 3,49, мінімальна – 0,36 морської милі. Дослідження з масштабуванням розширює експериментально охоплений діапазон порівняно з підрозділом 5.1, однак також не забезпечує експериментальної перевірки роботи моделі на проєктній дистанції 6 морських миль. Результати цього експерименту слід інтерпретувати виключно в межах фактично представлених дистанцій від 0,36 до 3,49 морської милі.

Таблиця 5.1 – Розподіл кількості суден за інтервалом відстані

Інтервал відстані, морські милі	Кількість суден	Частка, %
0–0,5	7	13,2
0,5–1	30	56,6
1–1,5	8	15,1
1,5–2	1	1,9
2–2,5	0	0
2,5–3	2	3,8
3–3,5	5	9,4
Разом	53	100

5.2.2 Оцінка результатів роботи моделі залежно від рівня цифрового масштабування

Оцінювання ефективності роботи моделі за використання цифрового масштабування здійснювалося за методикою, що викладена у пункті 5.1.2, а саме на основі аналізу результатів локалізації та класифікації ракурсу судна відповідно до категорій TP_c, TP_m та FN. На рис. 5.10 показаний приклад отриманих результатів після обробки відеопотоку моделлю комп’ютерного зору.



а) б)

в)

г) д)

Рисунок 5.10 – Результати обробки відеопотоку моделлю комп’ютерного зору за різного масштабування: а) 1х, б) 2х, в) 3х, г) 4х, д) 5х

У таблиці 5.2 наведено узагальнені результати роботи моделі для кожного рівня цифрового масштабування.

Показники точності та повноти в цьому експерименті не розраховувалися, оскільки в кожному відеофрагменті оцінювання проводилося лише щодо одного заздалегідь визначеного судна-цілі. Інші судна, присутні в кадрі, а також сторонні спрацювання моделі систематично не реєструвалися, тому неможливо достовірно визначити загальну кількість правильно виявлених, пропущених і хибно виявлених об’єктів. У зв’язку із цим результати наведено описово – як кількість і частку визначених суден-цілей, локалізованих та правильно класифікованих за кожного рівня цифрового масштабування. Додатково для кожного рівня масштабування визначено середню впевненість моделі для локалізованих суден (TP_c + TP_m),

середню впевненість для правильних результатів TP_c та середню кількість суден, одночасно присутніх у кадрі.

Таблиця 5.2 – Показники ефективності роботи моделі залежно від рівня цифрового масштабування

Рівень масштабування	Частка правильно локалізованих та класифікованих цільових суден, %	Частка локалізованих цільових суден, %	Середня впевненість для $TP_c + TP_m$	Середня впевненість для TP_c	Середня к-сть суден у кадрі
1x	50,9	98,1	0,350	0,687	5,58
2x	73,6	100,0	0,591	0,803	4,62
3x	73,6	100,0	0,604	0,821	4,10
4x	86,8	100,0	0,699	0,806	3,77
5x	92,5	98,1	0,724	0,764	3,56

Для кожного рівня масштабування аналізувалося 53 заздалегідь визначених судна-цілі. Правильну локалізацію та правильну класифікацію ракурсу отримано для 27 суден (50,9 %) за масштабу 1x; 39 суден (73,6 %) – за 2x; 39 суден (73,6 %) – за 3x; 46 суден (86,8 %) – за 4x та 49 суден (92,5 %) – за 5x. Незалежно від частки правильних класифікацій ракурсу було вірно локалізовано 98,1–100 % суден-цілей (рис. 5.11). Це свідчить про те, що в межах дослідженої вибірки цифрове масштабування значно сильніше впливає на частку правильних класифікацій ракурсу, ніж на здатність моделі локалізувати судно. Задача локалізації об’єкта у кадрі є менш чутливою до деталізації зображення, тоді як коректне визначення ракурсу потребує розпізнавання дрібніших візуальних ознак – обрисів надбудови,

борту, носової чи кормової частини, які стають доступнішими моделі за достатнього масштабу зображення об’єкта.

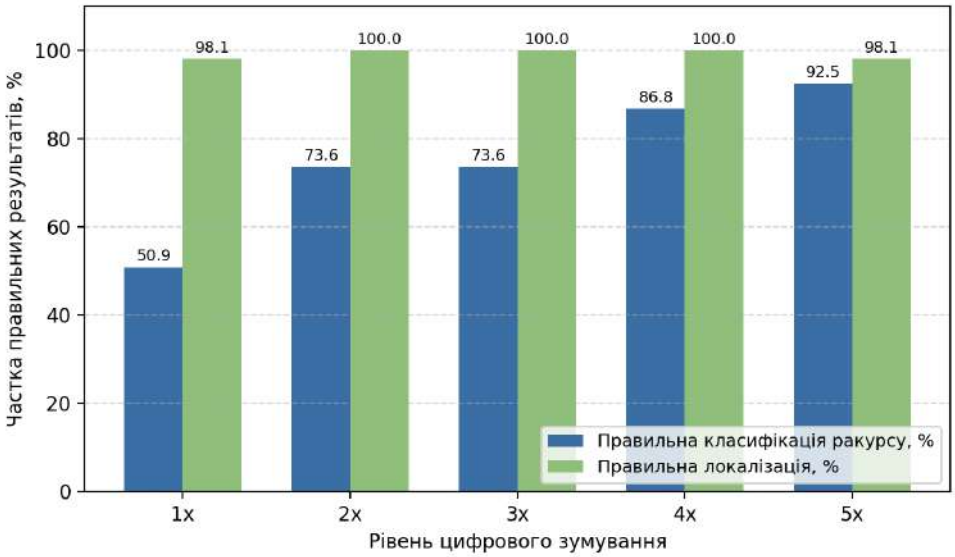


Рисунок 5.11 – Залежність частки правильно класифікованих та правильно локалізованих суден від рівня масштабування

За сукупністю 265 відеофрагментів правильну локалізацію та правильну класифікацію ракурсу отримано у 200 випадках (TP_c), у 63 випадках судно було локалізовано, але ракурс визначено неправильно (TP_m), а у 2 випадках судно не було локалізовано (FN).

Попри помилки на перших етапах масштабування, модель успішно їх виправляє, підвищуючи середню впевненість для TP_c + TP_m в два рази, з 0,35 до 0,724. Середня впевненість для TP_c зростає з 0,687 до 0,764 (рис. 5.12). Це свідчить про те, що зі збільшенням масштабування зростає не лише частка правильних виявлень, а й загальна визначеність моделі: за відсутності наближення модель здебільшого видає невпевнені або багатоваріантні прогнози ракурсу, тоді як за високого рівня наближення переважна більшість прогнозів є одночасно вірними та з високим рівнем впевненості. Варто відзначити, що за 3-кратного (0,821) та 4-кратного (0,806) масштабування, порівняно з 5-кратним (0,764), спостерігається вища впевненість моделі. Це пов’язано з тим, що при збільшенні

цифрового масштабування втрачаються деталі об’єкта через втрату різкості та підвищення шуму зображення.

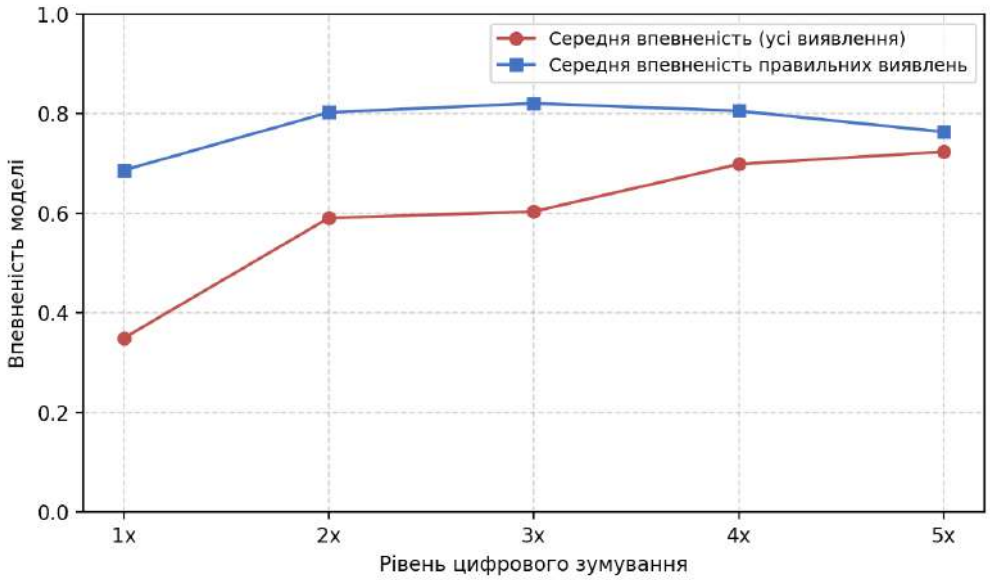


Рисунок 5.12 – Залежність середньої впевненості моделі від рівня масштабування для всіх виявлень та для правильних виявлень

Як зазначалося раніше в розділі 5.1, на відстанях понад 0,85 морської милі спостерігалося різке збільшення помилкових класифікацій. Відповідно в таблиці 5.3 наведені результати порівняння кількості правильних локалізацій та класифікацій для зазначених відстаней залежно від рівня масштабування. До аналізу було включено 23 судна на відрізку від 0,85 до 3,49 морської милі.

В межах дистанцій, представлених у вибірці (від 0,85 до 3,49 морської милі), частка локалізованих суден істотно не змінюється залежно від відстані спостереження та рівня масштабування. Як видно з таблиці 5.3, задача локалізації судна є менш чутливою до деталізації зображення порівняно із задачею класифікації ракурсу.

У підвибірці з 23 суден, розташованих на відстанях від 0,85 до 3,49 морської милі, частка правильно класифікованих ракурсів зросла з 43,5 % за масштабування 1x до 91,3 % за масштабування 5x. Частка локалізованих цільових суден залишалася в межах 95,7–100 %. Отримані результати показують, що в межах дослідженої підвибірки збільшення цифрового масштабу супроводжувалося

суттєвим зростанням частки правильних класифікацій. Отримані результати підтверджують, що частка локалізованих цільових суден залишається стабільно високою за всіх досліджених рівнів масштабування, тоді як класифікація ракурсу істотно залежить від рівня масштабування.

Таблиця 5.3 – Результати локалізації та класифікації ракурсу залежно від рівня масштабування на відрізку від 0,85 до 3,49 морської милі

Рівень масштабування	Правильно локалізовано цільові судна, %	Правильно класифіковано цільові судна, %
1x	100	43,5
2x	100	65,2
3x	100	73,9
4x	100	82,6
5x	95,7	91,3

5.2.3 Аналіз залежності частки правильних класифікацій від типу ракурсу судна

У роботі також проведено детальний аналіз частки правильних класифікацій залежно від конкретного класу ракурсу судна-цілі. До вибірки за фактичним ракурсом спостереження увійшло 53 судна, розподілені за ракурсами так: port side – 21; starboard side – 18; starboard bow – 4; port quarter – 4; port bow – 3; starboard quarter – 2; forward – 1. У вибірці не представлені судна в ракурсі stern.

Для оцінювання результатів за класами ракурсу об’єднано результати п’яти рівнів масштабування для 53 суден, що становить 265 повторних спостережень. Ці спостереження не є незалежними, оскільки кожне судно представлене п’ятьма відеофрагментами. Тому отримані показники характеризують досліджену вибірку, але не забезпечують однакової статистичної надійності для всіх класів. На рис. 5.13 наведено частку правильних класифікацій моделі залежно від фактичного ракурсу судна для п’яти рівнів масштабування.

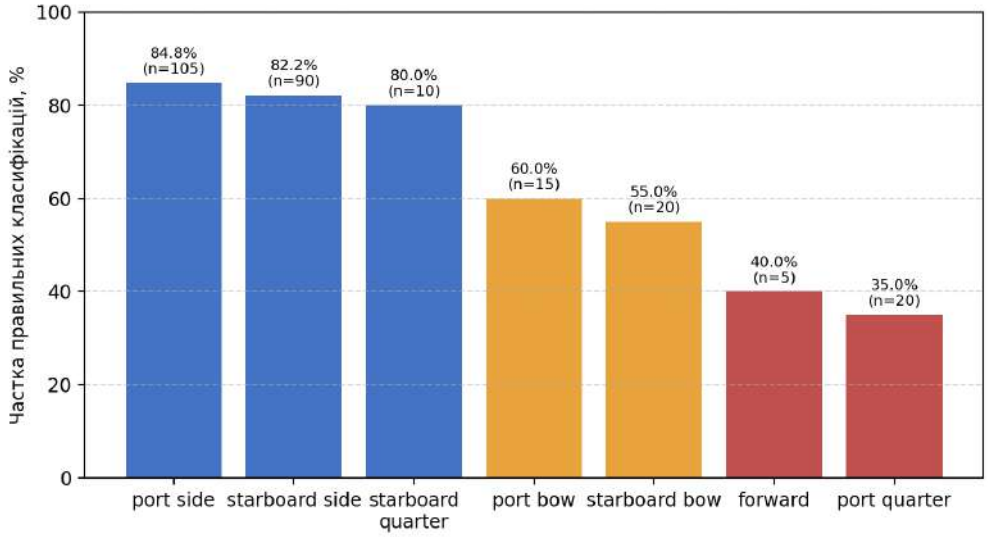


Рисунок 5.13 – Частка правильних класифікацій моделі за типом ракурсу

Для додаткового аналізу характеру помилок класифікації за результатами спостережень побудовано матрицю помилок (табл. 5.4). Рядки матриці відповідають фактичному ракурсу судна-цілі, а стовпці – результату, отриманому моделлю. Якщо протягом відеофрагмента модель стабільно визначала один помилковий клас, спостереження відносилося до відповідного передбаченого класу. У випадках, коли протягом одного відеофрагмента модель послідовно визначала декілька різних класів ракурсу, результат відносився до категорії «нестабільна класифікація», оскільки однозначний підсумковий клас для такого спостереження не визначався. Випадки, коли судно-ціль не було локалізовано, віднесено до категорії *FN*.

Аналіз матриці показав, що у 200 із 265 спостережень (75,5 %) отримано правильну локалізацію та правильну класифікацію ракурсу. У 45 випадках (17,0 %) зафіксовано нестабільну класифікацію, а у 18 випадках (6,8 %) судно було локалізовано, проте стабільно віднесено до неправильного класу ракурсу. Таким чином, загальна кількість випадків TP_m становила 63. У 2 спостереженнях (0,75 %) судно не було локалізовано (*FN*).

Таблиця 5.4 – Матриця помилок класифікації ракурсу

Фактичний клас/ Передбачений клас	forward	port bow	port side	starboard bow	starboard quarter	starboard side	stern	port quarter	Неоднозначна класифікація	*FN* (не виявлено)	Разом
forward	2	0	0	1	0	0	0	0	2	0	5
port bow	0	9	1	0	0	0	0	0	5	0	15
port side	0	0	89	0	0	4	0	0	12	0	105
starboard bow	0	0	0	11	1	5	0	0	2	1	20
starboard quarter	0	0	0	0	8	2	0	0	0	0	10
starboard side	0	0	0	0	0	74	0	0	15	1	90
stern	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
port quarter	0	0	2	2	0	0	0	7	9	0	20
Разом	2	9	92	14	9	85	0	7	45	2	265

Модель найчастіше правильно визначає найпоширеніші в вибірці ракурси – port side (84,8 %) та starboard side (82,2 %). Це узгоджується з розподілом цільового набору даних моделі (таблиця 3.5), у якому класи port side та starboard side також є одними з найбільш чисельних, що підтверджує залежність точності класифікації від обсягу представлення відповідного класу в навчальній вибірці. Проте ракурс starboard quarter, попри середню представленість, показує достатньо високу точність класифікації на рівні 80 %.

Для ракурсів port bow та starboard bow частка правильних результатів становила відповідно 60 % та 55 %. Для цих класів частина помилок характеризувалася нестабільністю прогнозу, коли протягом одного відеофрагмента модель визначала декілька класів ракурсу.

Найнижчі узагальнені показники отримано для класів forward – 40 % (2 правильні результати з 5 повторних спостережень одного судна) та port quarter – 35 % (7 із 20 спостережень чотирьох суден). Для класу port quarter за

масштабування 1x не було отримано правильних класифікацій, а за масштабування 2x і 3x правильно класифіковано по одному із чотирьох суден (25 %). Водночас результат для класу forward через наявність у вибірці лише одного судна не є достатньо репрезентативним для формування загального висновку щодо ефективності класифікації цього ракурсу.



1x 2x 3x



4x 5x

Рисунок 5.14 – Зміна результату класифікації ракурсу судна зі збільшенням цифрового масштабу

Цифрове масштабування (рис. 5.14), на відміну від оптичного, не забезпечує збільшення реальної роздільної здатності зображення та не додає нової інформації про дрібні геометричні ознаки об’єкта, оскільки ґрунтується на алгоритмічній інтерполяції вже наявних пікселів вихідного кадру. Водночас збільшення відносного розміру об’єкта в кадрі підвищує частку пікселів, що припадають на нього, та зменшує вплив фонових елементів сцени, що сприяє покращенню

результатів роботи моделі комп’ютерного зору за рахунок ефективнішого використання наявної інформації в межах обмежувальної рамки об’єкта.

Отримані результати показали, що в дослідженій вибірці збільшення цифрового масштабу супроводжувалося зростанням частки правильно класифікованих ракурсів. Водночас результати за окремими класами необхідно інтерпретувати з урахуванням малого та нерівномірного представлення суден: від одного судна класу forward до 21 судна класу port side. Цифрове масштабування не додає нової інформації до вихідного зображення, але після обрізання та приведення кадру до вхідного розміру моделі збільшує відносне представлення судна і зменшує частку фону. За максимального масштабування це може супроводжуватися зниженням різкості, звуженням поля зору та окремими пропусками об’єктів.

Висновки за розділом 5

Результати експерименту показали, що характеристики виявлення та класифікації суден змінювалися залежно від умов спостереження. Загалом на великих відстанях і у вечірній час спостерігалося зменшення кількості правильних виявлень та збільшення кількості пропусків. Найкращі результати виявлення об’єктів досягаються на відстанях до 0,85 морських миль за умов достатнього освітлення. На дуже малих дистанціях (менше 0,1 морської милі) спостерігається зростання кількості хибнопозитивних спрацювань, що зумовлено помилковою інтерпретацією елементів корпусу власного судна як об’єктів виявлення. Залежність від відстані не була монотонною, оскільки на результати також впливали кількість суден у кадрі, їхні ракурси, погодні умови та освітлення.

Під час аналізу 81 відеофрагмента оцінено 236 суден. Модель правильно локалізувала та класифікувала ракурс 105 суден (TP_c), локалізувала, але помилково класифікувала ракурс 47 суден (TP_m) і пропустила 84 судна (FN). Додатково зафіксовано 9 хибнопозитивних спрацювань (FP). За комплексним критерієм, що враховує одночасно результати локалізації та класифікації ракурсу, отримано $Precision$ = 0,65 та $Recall$ = 0,44. Для оцінювання лише локалізації незалежно від результату класифікації ракурсу отримано $Precision_{loc}$ = 0,94 та $Recall_{loc}$ = 0,64.

Частка правильних класифікацій ракурсу серед локалізованих суден становила 69,1 %, а серед усіх фактично присутніх суден – 44,5 %.

В експерименті з цифровим масштабуванням проаналізовано 53 судна за п’яти рівнів масштабування, що становило 265 повторних спостережень. Із підвищенням цифрового масштабу частка правильно локалізованих та класифікованих цільових суден зросла з 0,509 за масштабу 1x до 0,925 за масштабу 5x, тоді частка локалізованих об’єктів коливається в межах 0,981–1,000. Середня впевненість для локалізованих цільових суден зросла з 0,350 до 0,724. Отримані результати свідчать, що в межах дослідженої вибірки збільшення цифрового масштабу найбільш помітно впливало на частку правильних класифікацій ракурсу, тоді як локалізація залишалася стабільною.

У підвибірці з 23 суден, розташованих на відстанях від 0,85 до 3,49 морської милі, частка правильних класифікацій зросла з 43,5 % за масштабування 1x до 91,3 % за масштабування 5x. Частка локалізованих цільових суден залишалася в межах 95,7–100 %. Отже, у межах дослідженої вибірки збільшення цифрового масштабу супроводжувалося суттєвим підвищенням частки правильних класифікацій на великих відстанях. Водночас отримані результати не встановлюють окремої граничної дальності надійного визначення ракурсу.

Найвищу частку правильних класифікацій у дослідженій вибірці отримано для ракурсів port side – 84,8 %; starboard side – 82,2 % і starboard quarter – 80 %. Нижчі результати отримано для port bow – 60 %; starboard bow – 55 %; forward – 40 % і port quarter – 35 %. Інтерпретувати ці відмінності необхідно з урахуванням нерівномірного представлення класів: від одного судна класу forward до 21 судна класу port side; клас stern у вибірці був відсутній.

Цифрове масштабування не збільшує реальної роздільної здатності вихідного зображення та не додає нової інформації про геометричні ознаки судна. Водночас після обрізання і приведення кадру до вхідного розміру моделі судно займає більшу частину вхідного зображення, а частка фонового простору зменшується. У дослідженій вибірці це супроводжувалося покращенням класифікації ракурсу. За

великих рівнів цифрового масштабу можливі погіршення різкості та звуження поля зору, що необхідно враховувати під час практичного застосування.

Перший натурний експеримент охоплював дистанції до 1,9 морської милі, а експеримент із цифровим масштабуванням – до 3,49 морської милі. Таким чином, у межах дисертаційного дослідження підтверджено працездатність моделі лише в досліджених діапазонах дистанцій, тоді як оцінювання її ефективності на більших дистанціях, зокрема поблизу проєктного орієнтира 6 морських миль, потребує окремого експериментального дослідження.

ВИСНОВКИ

1. За результатами аналізу літературних джерел, нормативних вимог і сучасних технічних засобів спостереження за надводною обстановкою встановлено, що ефективність візуального спостереження значною мірою залежить від людського фактору, а РЛС та АІС мають функціональні обмеження. АІС залежить від наявності і коректної роботи передавального обладнання на судні-цілі та може бути скомпрометована, тоді як робота РЛС залежить від роздільної здатності, умов поширення сигналу та завад від морської поверхні. Встановлено, що у більшості досліджень із застосуванням комп'ютерного зору основну увагу приділено виявленню суден або їх класифікації за типом, тоді як визначення ракурсу судна відносно спостерігача досліджено недостатньо. Ракурс є важливою додатковою ознакою для оцінювання взаємного положення суден і розвитку ситуації зближення. За результатами порівняльного аналізу для подальшого дослідження обрано одноступеневу архітектуру YOLOv8n, яка характеризується відносно невисокою обчислювальною складністю та має потенціал для застосування в системах обробки відео в реальному часі.

2. Обґрунтовано методологію дослідження задачі автоматизованого виявлення суден, класифікації їх ракурсу та алгоритмічного визначення пеленгу. Як методологічну основу обрано системний підхід. У дослідженні застосовано методи системного аналізу, комп'ютерного зору, глибокого навчання, цифрової обробки зображень, імітаційного моделювання, описової статистики та натурного експерименту. Для підготовки даних, донавчання й оцінювання моделі використано Make Sense AI, Python, OpenCV, PyTorch, Ultralytics YOLOv8 і хмарне середовище Google Colaboratory. Обчислювальну частину стенда реалізовано мовою JavaScript.

3. Обґрунтовано систему восьми класів ракурсу судна-цілі та сформовано методичні вимоги до підготовки й анотування цільового набору даних. Донавчено модель YOLOv8n для виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу. Сформовано й анотовано набір даних, який у початковій версії містив 925 зображень, а в процесі

дослідження був розширений до 1742 зображень і доповнений 115 негативними зображеннями без цільових об’єктів. Для підвищення стійкості моделі до зовнішніх умов та урізноманітнення даних застосовано колірні, геометричні та просторово-локальні аугментації, а для зменшення впливу дисбалансу класів – вагові коефіцієнти класів. За критерієм, що надавав пріоритет зменшенню кількості хибнопозитивних спрацювань за збереження близького до найкращого значення mean Average Precision mAP@0,5:0,95, для подальших експериментів обрано модель дев’ятого етапу донавчання. На валідаційній вибірці вона отримала такі показники: precision – 0,7034; recall – 0,6098; mAP@0,5 – 0,6747; mAP@0,5:0,95 – 0,5404. Підсумкове оцінювання на тестовій вибірці дало значення precision – 0,6531; recall – 0,6404; mAP@0,5 – 0,6955; mAP@0,5:0,95 – 0,5580. Отримані результати засвідчили співставний рівень якості моделі на перевірочній та тестовій вибірках.

4. Сформовано розрахункові вимоги до засобів відеоспостереження та параметрів їхнього розміщення в системі кругового огляду. За прийнятих геометричних припущень визначено, що висота встановлення камери 8,4 м над рівнем моря забезпечує геометричну пряму видимість поверхні моря до горизонту на відстані близько 6 морських миль. Це значення використано як проєктний орієнтир для геометричних та оптичних розрахунків і не трактується як експериментально підтверджена дальність роботи моделі комп’ютерного зору. Натурне оцінювання моделі виконано на дистанціях до 1,9 морської милі в основному експерименті та до 3,49 морської милі в експерименті з масштабуванням. Значення 32×32 пікселі прийнято як проєктний орієнтир мінімального розміру об’єкта для його виявлення; його достатність для класифікації ракурсу потребує окремої експериментальної перевірки. Обґрунтовано доцільність використання PTZ-камер, які поєднують ширококутне спостереження з можливістю масштабування, та визначено взаємозв’язок між горизонтальним полем зору камер і їхньою необхідною кількістю.

5. Розроблено розрахункову та архітектурну модель визначення істинного пеленга судна-цілі за даними відеопотоку й поточної навігаційної інформації власного судна. Запропоновано поділ простору навколо судна на сектори відповідальності камер, метод визначення відносного пеленгу за координатами центра обмежувальної рамки виявленого об’єкта та математичні співвідношення для переходу до істинного пеленга з урахуванням істинного курсу судна. Запропоновано архітектуру обробки навігаційних повідомлень стандарту NMEA 0183. Розглянуто вплив часової розсинхронізації відеопотоку й даних про курс на похибку істинного пеленга під час повороту судна та запропоновано принцип оцінювання цієї похибки через кутову швидкість повороту і сумарну затримку обробки даних. Для синхронізації запропоновано використовувати сигнал PPS приймача GNSS або протокол NTP. Кількісне визначення допустимого рівня розсинхронізації потребує подальшої експериментальної перевірки.

6. Для керування засобами відеоспостереження сформовано концептуальний підхід до динамічного позиціонування PTZ-камер. Він передбачає поєднання автоматичного ширококутного сканування простору навколо судна з можливістю ручного керування оператором для детальнішого спостереження за окремими цілями. Практична реалізація та оцінювання ефективності такого режиму керування не входили до натурного експерименту й залишаються напрямом подальших досліджень.

7. Розроблено метод асоціації відеотреків, радіолокаційних трас і повідомлень AIC із використанням просторово-кінематичних характеристик, відеопеленга та ознаки ракурсу судна. Імітаційне моделювання показало, що додавання відеопеленга зменшує похибку моніторингу кутового положення, а використання ракурсу найбільш ефективне серед досліджених сценаріїв у разі просторово й ракурсно суперечливої підміни AIC.

8. Для оцінювання роботи моделі на натурних відеоданих проаналізовано 236 суден у 81 відеофрагменті. Модель локалізувала 152 судна, з яких для 105 правильно визначено ракурс, а для 47 ракурс класифіковано помилково.

Зафіксовано 84 пропуски суден і 9 хибнопозитивних спрацювань. За комплексним критерієм, що враховує результати локалізації та класифікації ракурсу, отримано *Precision* = 0,65 та *Recall* = 0,44. Показники локалізації незалежно від результату класифікації ракурсу становили $Precision_{loc}$ = 0,94 та $Recall_{loc}$ = 0,64. Частка правильно визначених ракурсів становила 69,1 % серед локалізованих суден і 44,5 % серед усіх суден, наявних у вибірці. Групування результатів за дистанцією та часом доби вказало на погіршення роботи моделі за складніших умов спостереження, зокрема на більших дистанціях і у вечірній період. Водночас нерівномірність і спостережний характер вибірки не дають підстав розглядати дистанцію, освітлення або щільність цілей як незалежні кількісно встановлені причини помилок.

9. Досліджено вплив цифрового масштабування на результати визначення ракурсу. На вибірці з 53 суден, кожне з яких оцінювалося за п’ятьма рівнями масштабування від 1x до 5x, виконано 265 повторних спостережень. Частка правильних класифікацій зросла з 50,9 % за масштабу 1x до 92,5 % за масштабу 5x, тоді як незалежно від частки правильних класифікацій ракурсу було вірно локалізовано 98,1–100 % суден-цілей. У підгрупі з 23 суден на відстані понад 0,85 морської милі частка правильних класифікацій зросла з 43,5 % при масштабі 1x до 91,3 % при масштабі 5x. Результати підтверджують позитивний зв’язок між відносним розміром цілі у вхідному зображенні та правильністю класифікації в дослідженій вибірці, однак не встановлюють межу надійної дальності без наперед визначеного критерію надійності та перевірки на незалежній вибірці.

10. За результатами 265 повторних оцінювань найвищі частки правильних класифікацій отримано для ракурсів port side – 84,8 % та starboard side – 82,2 %. Для starboard quarter отримано 80,0 %; port bow – 60,0 %; starboard bow – 55,0 %; forward – 40,0 %; port quarter – 35,0 %; ракурс stern у вибірці був відсутній. Через нерівномірну кількість суден різних ракурсів повторне оцінювання тих самих об’єктів за п’ятьма рівнями масштабування та малу кількість спостережень

окремих ракурсів ці результати мають описовий характер і не дають підстав однозначно пояснювати відмінності представленістю класів у цільовому наборі або рівнем масштабування.

11. Отримані результати підтверджують складові гіпотези в межах виконаного натурного, розрахункового та імітаційного оцінювання. За натурними відеоданими підтверджено можливість автоматизованого виявлення суден і класифікації їхнього ракурсу. Визначення відносного пеленга та перехід до істинного пеленга обґрунтовано розрахунково. Імітаційне моделювання показало, що залучення відеопеленга підвищує точність моніторингу кутового положення фізичних цілей, а використання ознаки ракурсу посилює перевірку узгодженості АІС-призначень, зокрема підвищує ефективність відхилення просторово й ракурсно суперечливого АІС-кандидата у змодельованому сценарії підміни.

12. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованих рішень для побудови бортової системи комп’ютерного зору, призначеної для автоматизованого виявлення суден, класифікації їхнього ракурсу та визначення пеленгу за даними незалежного відеоканалу з подальшою асоціацією відеоспостережень із даними РЛС і АІС. Виявлення суден і класифікація їх ракурсу не залежать від наявності та справності передавального обладнання на судні-цілі, однак визначення істинного пеленга додатково потребує даних про курс власного судна.

13. Результати дослідження враховано у проєктній документації компанії Minerva Marine Inc. для запланованого переобладнання судна «Minerva Alexandra», зокрема щодо використання моделі YOLOv8n для локалізації суден і принципу визначення істинного пеленга на локалізований об’єкт. Окремі результати дослідження використано під час встановлення системи відеоспостереження компанією Peter Döhle Schiffahrts-KG на судні «Edgar». Матеріали дослідження також упроваджено в освітній процес Інституту післядипломної освіти «Центр підготовки та атестації плавскладу» Національного університету «Одеська морська

академія» для ознайомлення слухачів із принципами роботи систем розпізнавання на основі штучного інтелекту.

Перспективними напрямами подальших досліджень є:

– дослідження впливу типу радіолокаційної обробки, зокрема застосування когерентних і некогерентних РЛС, на точність визначення параметрів цілі та ефективність асоціації радіолокаційних, АІС- і відеоспостережень;

–дослідження можливості використання відеопеленга та ракурсу судна для автоматизованого оцінювання ситуацій зближення відповідно до Правил 11–18 МПЗЗС-72;

– кількісне оцінювання похибки визначення істинного пеленга, експериментальне визначення допустимого рівня часової розсинхронізації відеопотоку й навігаційних даних та програмна реалізація запропонованої архітектури в реальному часі;

– підвищення точності класифікації ракурсів суден, зокрема для малопредставлених класів;

– натурна перевірка розробленого методу асоціації даних АІС, РЛС і відеоспостереження та налаштування параметрів використання відеопеленга і ракурсної ознаки;

–дослідження тепловізійного каналу для роботи за недостатнього освітлення і в темний час доби;

– розробка та експериментальне оцінювання алгоритму динамічного позиціонування PTZ-камер, який поєднує автоматичне ширококутне сканування, наведення на вибрані цілі, ручне керування оператором та автоматичне керування оптичним або цифровим масштабуванням залежно від параметрів зображення цілі й дистанції до неї;

– розширення й балансування навчального та незалежного тестового наборів даних, зокрема за рахунок малопредставлених ракурсів, різних типів суден, складних навігаційних сцен і спостережень на більших дистанціях, а також експериментальна перевірка роботи моделі поблизу проєктного орієнтира

6 морських миль і достатності розміру зображення цілі 32×32 пікселі для класифікації її ракурсу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ahmad Z., Seo J. T., Jeon S. Cloud Edge Enabled Stacked Ensemble Learning Framework with Meta Model for Situation Aware Maritime Traffic Monitoring and Control Systems // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-25020-5.

2. Alamoush A. S., Ölçer A. I. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 1. Art. 122. DOI: 10.3390/jmse13010122.

3. Ampatzidis D. AIS spoofing: The fast track to sanctions // *Kpler Blog*. 2025. 10 November. URL: https://www.kpler.com/blog/ais-spoofing-fast-track-to-sanctions (дата звернення: 30.06.2026).

4. Androjna A. Assessing Cyber Challenges of Maritime Navigation / A. Androjna, T. Brcko, I. Pavic, H. Greidanus // Journal of Marine Science and Engineering. – 2020. – Vol. 8, № 10. – Art. 776. – DOI: 10.3390/jmse8100776.

5. Androjna A. Impact of Spoofing of Navigation Systems on Maritime Situational Awareness / A. Androjna, M. Perkovič // Transactions on Maritime Science. – 2021. – Vol. 10, № 2. – P. 361–373. – DOI: 10.7225/toms.v10.n02.w08.

6. Blanchard P., Higham D. J., Higham N. J. Accurately computing the log-sum-exp and softmax functions. *IMA Journal of Numerical Analysis*. 2021. Vol. 41, no. 4. P. 2311–2330. DOI: 10.1093/imanum/draa038.

7. Bogachenko Y., Pipchenko O.D. Monitoring and Identification of DP Operators Behavioural Traits and Common Errors During Simulator Training // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 337–341. DOI: 10.12716/1001.15.02.09.

8. Buda M., Maki A., Mazurowski M. A. A Systematic Study of the Class Imbalance Problem in Convolutional Neural Networks // *Neural Networks*. 2018. Vol. 106. P. 249–259. DOI: 10.1016/j.neunet.2018.07.011.

9. Chauvin C., Lardjane S., Morel G., Clostermann J. P., Langard B. Human and organisational factors in maritime accidents: analysis of collisions at sea using the

HFACS // *Accident Analysis & Prevention*. 2013. Vol. 59. P. 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.

10. Chen M., Sun J., Aida K., Takefusa A. Weather-Aware Object Detection Method for Maritime Surveillance Systems // Future Generation Computer Systems. 2024. Vol. 151. P. 111–123. DOI: 10.1016/j.future.2023.09.030.

11. Chen X., Wei C., Xin Z., Zhao J., Xian J. Ship Detection under Low-Visibility Weather Interference via an Ensemble Generative Adversarial Network // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 11. Art. 2065. DOI: 10.3390/jmse11112065.

12. Chevalier P. A. J. G. On the specification of the DRI requirements for a standard NATO target [Electronic resource]. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/297497162_On_the_specification_of_the_DRI_requirements_for_a_standard_NATO_target (date of access: 30.06.2026). DOI: 10.13140/RG.2.1.4833.9604.

13. Cui Y., Jia M., Lin T.-Y., Song Y., Belongie S. Class-Balanced Loss Based on Effective Number of Samples // *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019. P. 9268–9277. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00949.

14. Daniel A. GPS jamming is now a mainstream maritime threat // Windward Maritime AI. 2025. 23 October. URL: https://windward.ai/blog/gps-jamming-is-now-a-mainstream-maritime-threat/ (дата звернення: 30.06.2026).

15. Del Pizzo S., Gaglione S., Angrisano A., Salvi G., Troisi S. Reliable Vessel Attitude Estimation by Wide Angle Camera // *Measurement*. 2018. Vol. 127. P. 314–324. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.05.104.

16. Deng H., Wang S., Wang X., Zheng W., Xu Y. YOLO-SEA: an enhanced detection framework for multi-scale maritime targets in complex sea states and adverse weather // *Entropy*. 2025. Vol. 27, No. 7. Art. 667. DOI: 10.3390/e27070667.

17. Dhillon A., Verma G. K. Convolutional Neural Network: A Review of Models, Methodologies and Applications to Object Detection // *Progress in Artificial Intelligence*. 2020. Vol. 9. No. 2. P. 85–112. DOI: 10.1007/s13748-019-00203-0.

18. Di J., Xi K., Yang Y. An enhanced YOLOv8 model for accurate detection of solid floating waste // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 25015. DOI: 10.1038/s41598-025-10163-2.

19. Dominguez-Péry C., Vuddaraju L. N. R., Corbett-Etchevers I., Tassabehji R. Reducing maritime accidents in ships by tackling human error: a bibliometric review and research agenda // Journal of Shipping and Trade. 2021. Vol. 6, No. 1. Art. 20. DOI: 10.1186/s41072-021-00098-y.

20. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. *Pattern Classification*. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2001. 654 p.

21. European Maritime Safety Agency. *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024*. Lisbon : European Maritime Safety Agency, 2024.

22. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. I., Winn J., Zisserman A. The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge // *International Journal of Computer Vision*. 2010. Vol. 88. P. 303–338. DOI: 10.1007/s11263-009-0275-4.

23. Fawcett T. An Introduction to ROC Analysis // *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, No. 8. P. 861–874. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.

24. Fefilatyev S., Goldgof D., Shreve M., Lembke C. Detection and Tracking of Ships in Open Sea Using a System of Fast Moving Cameras Installed on Buoys // *Ocean Engineering*. 2012. Vol. 54. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.06.028.

25. Felzenszwalb P. F., Girshick R. B., McAllester D., Ramanan D. Object Detection with Discriminatively Trained Part-Based Models // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2010. Vol. 32, No. 9. P. 1627–1645. DOI: 10.1109/TPAMI.2009.167.

26. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Columbus, OH, USA, 2014. P. 580–587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81.

27. Google. Google Maps [Electronic resource]. URL: https://www.google.com/maps (date of access: 30.06.2026).

28. Gorad A., Hassan S. S., Särkkä S. Vessel bearing estimation using visible and thermal imaging // *Image Analysis: 23rd Scandinavian Conference, SCIA 2023. Proceedings*. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 13886. Cham: Springer, 2023. P. 373–381. DOI: 10.1007/978-3-031-31438-4_25.

29. Guan J., Jiang X., Liu N., Ding H., Dong Y., Guo Z. A small maritime target detection method using nonlinear dimensionality reduction and feature sample distance // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 16. Art. 2901. DOI: 10.3390/rs16162901.

30. Guidelines on Maritime Cyber Risk Management [Electronic resource] : MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.3, 4 April 2025 / International Maritime Organization. – London : IMO, 2025.

31. Han J., Cho Y., Kim J., Kim J., Son N.-S., Kim S. Y. Autonomous collision detection and avoidance for ARAGON USV: Development and field tests // Journal of Field Robotics. 2020. Vol. 37, No. 6. P. 987–1002. DOI: 10.1002/rob.21935.

32. He H., Garcia E. A. Learning from Imbalanced Data // *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2009. Vol. 21, No. 9. P. 1263–1284. DOI: 10.1109/TKDE.2008.239.

33. He Z., Wang K., Fang T., Su L., Chen R., Fei X. Comprehensive performance evaluation of YOLOv11, YOLOv10, YOLOv9, YOLOv8 and YOLOv5 on object detection of power equipment // *arXiv*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2411.18871.

34. Hilkert J. M. Inertially Stabilized Platform Technology: Concepts and Principles // *IEEE Control Systems Magazine*. 2008. Vol. 28, No. 1. P. 26–46. DOI: 10.1109/MCS.2007.910256.

35. Huang R.-J., Jian S.-H., Tseng C.-S. Hybrid Deep Learning–Fuzzy Inference System for Robust Maritime Object Detection and Recognition // *Engineering Proceedings*. 2025. Vol. 120, No. 1. Art. 25. DOI: 10.3390/engproc2025120025.

36. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (SOLAS), as amended. London: International Maritime Organization, 2020.

37. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978 (STCW), as amended. London: International Maritime Organization, 2017.

38. International Electrotechnical Commission. IEC 60945:2002. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – General requirements – Methods of testing and required test results. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2002.

39. International Electrotechnical Commission. IEC 61108-1:2003. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Global navigation satellite systems (GNSS) – Part 1: Global positioning system (GPS) – Receiver equipment – Performance standards, methods of testing and required test results. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2003. 106 p.

40. International Electrotechnical Commission. IEC 61162-1: Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces – Part 1: Single talker and multiple listeners. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016.

41. International Electrotechnical Commission. IEC 62388:2013. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Shipborne radar – Performance requirements, methods of testing and required test results. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013.

42. International Maritime Organization. Resolution A.708(17): Navigation Bridge Visibility and Functions, adopted 6 November 1991 // International Maritime Organization. London, 1991.

43. International Maritime Organization. Resolution MSC.116(73): Revised Performance Standards for Marine Gyro Compasses, adopted 1 December 2000. London: International Maritime Organization, 2000. 6 p.

44. International Maritime Organization. Resolution MSC.192(79): Adoption of the Revised Performance Standards for Radar Equipment, adopted 6 December 2004. London: International Maritime Organization, 2004.

45. International Organization for Standardization. ISO 25862:2009. Ships and marine technology – Marine magnetic compasses, binnacles and azimuth reading devices. Geneva: International Organization for Standardization, 2009. 38 p.

46. International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREGs). Consolidated edition. London: International Maritime Organization, 2020.

47. Jernbäcker A. *Kalman filters as an enhancement to object tracking using YOLOv7* [Electronic resource]: Master's thesis. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences, Department of Mathematics, 2022. 41 p. URL: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1751410/FULLTEXT01.pdf (date of access: 30.06.2026).

48. Johnson J. Analysis of image forming systems [Electronic resource] // *Proceedings of the Image Intensifier Symposium*. Fort Belvoir, VA, USA: U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories, 1958. P. 244–273. URL: https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/johnson1958.pdf (date of access: 30.06.2026).

49. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // *Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552.

50. Kazimierski W., Stateczny A. Radar and automatic identification system track fusion in an electronic chart display and information system // The Journal of Navigation. 2015. Vol. 68, No. 6. P. 1141–1154. DOI: 10.1017/S0373463315000405.

51. Kepesedi A. Maritime Autonomous Surface Ships: A Critical "MASS" for Legislative Review // UNCTAD Transport and Trade Facilitation Newsletter. 2022. No. 97 (Fourth Quarter). URL: https://unctad.org/news/transport-newsletter-article-no-97-fourth-quarter-2022 (дата звернення: 30.06.2026).

52. Kiefer B., Quan Y., Zell A. Approximate supervised object distance estimation on unmanned surface vehicles // *2025 IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. 2025. P. 585–590. DOI: 10.1109/ICAR65334.2025.11338699.

53. Kumar T., Brennan R., Mileo A., Bendechache M. Image Data Augmentation Approaches: A Comprehensive Survey and Future Directions // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 187536–187571. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3470122.

54. Lan J., Zheng M., Chu X., Ding S. Approach angle estimation method for ships based on deep learning // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 312. Art. 119112. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119112.

55. Lazarevich I., Grimaldi M., Kumar R., Mitra S., Khan S., Sah S. YOLOBench: Benchmarking Efficient Object Detectors on Embedded Systems // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*. 2023. P. 1169–1178.

56. Lee W.-J., Roh M.-I., Lee H.-W., Ha J., Cho Y.-M., Lee S.-J., Son N.-S. Detection and tracking for the awareness of surroundings of a ship based on deep learning // *Journal of Computational Design and Engineering*. 2021. Vol. 8, No. 5. P. 1407–1430. DOI: 10.1093/jcde/qwab053.

57. Li Y., Song L., Luo R., Chen C. Deep learning for object detection in maritime surveillance: a survey // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 102199–102220. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998900.

58. Li Y., Wang S. EGM-YOLOv8: a lightweight ship detection model with efficient feature fusion and attention mechanisms // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 4. Art. 757. DOI: 10.3390/jmse13040757.

59. Liu P., Sun M., Han X., Liu S., Chen Y., Zhang H. A High-Accuracy YOLOv8-ResAttNet Framework for Maritime Vessel Detection Using Residual Attention // *IET Image Processing*. 2025. Vol. 19, No. 1. Art. e70085. DOI: 10.1049/ipr2.70085.

60. Lopez M. E., Schönlieb C., Aviles-Rivero A., Mester R., Brekke E., Stahl A. Heading estimation of ships using deep learning and synthetic non-aerial images // *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. Vol. 3123, No. 1. Art. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/3123/1/012027.

61. Lu Y., Ma H., Smart E., Vuksanovic B., Chiverton J., Prabhu S. G. R., Glaister M., Dunston E., Hancock C. Fusion of camera-based vessel detection and AIS for maritime surveillance // *Proceedings of the 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. IEEE, 2021. DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594203.

62. Maretron, LLC. SSC300 Solid State Rate/Gyro Compass User's Manual [Електронний ресурс]. URL: https://www.maretron.com/support/manuals/SSC300UM_1.0.html (дата звернення: 08.08.2026).

63. McGuinness K., O'Gara S. Comparing data augmentation strategies for deep image classification // *IMVIP 2019: Irish Machine Vision and Image Processing Conference Proceedings*. Dublin: Irish Pattern Recognition & Classification Society, 2019. P. 1–6. DOI: 10.21427/148b-ar75.

64. Mrugalla F., Franz C., Alber Y., Mogk G., Villalba M., Mrziglod T., Schewior K. Generating diversity and securing completeness in algorithmic retrosynthesis. Journal of Cheminformatics. 2025. Vol. 17, Art. 72. DOI: 10.1186/s13321-025-00981-x.

65. Mumuni A., Mumuni F. Data augmentation: a comprehensive survey of modern approaches // *Array*. 2022. Vol. 16. Art. 100258. DOI: 10.1016/j.array.2022.100258.

66. Munteanu D., Moina D., Zamfir C. G., Petrea Ș. M., Cristea D. S. Sea mine detection framework using YOLO, SSD and EfficientDet deep learning models // *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 23. Art. 9536. DOI: 10.3390/s22239536.

67. Muraina I. O. Ideal Dataset Splitting Ratios in Machine Learning Algorithms: General Concerns for Data Scientists and Data Analysts // *7th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference*. Mardin, 2022. P. 496–504.

68. Narasimhan S. G. Vision and the Atmosphere / S. G. Narasimhan, S. K. Nayar // International Journal of Computer Vision. – 2002. – Vol. 48, No. 3. – P. 233–254. – DOI: 10.1023/A:1016328200723.

69. National Geospatial-Intelligence Agency. The American Practical Navigator: An Epitome of Navigation. Publication No. 9. 2019 Edition. Springfield, VA: National Geospatial-Intelligence Agency, 2019. 882 p.

70. National Marine Electronics Association. NMEA 0183 Standard for Interfacing Marine Electronic Devices. Version 4.30. Severna Park, MD : National Marine Electronics Association, 2023.

71. Nikouei M., Baroutian B., Nabavi S., Taraghi F., Aghaei A., Sajedi A., Ebrahimi Moghaddam M. Small object detection: A comprehensive survey on challenges, techniques and real-world applications // *Intelligent Systems with Applications*. 2025. Vol. 27. Art. 200561. DOI: 10.1016/j.iswa.2025.200561.

72. Open Network Video Interface Forum. ONVIF Profile S: Streaming. Version 2.0. ONVIF, 2014. URL: https://www.onvif.org/profiles/profile-s/ (accessed: 30.06.2026).

73. Padilla R., Netto S. L., da Silva E. A. B. A Survey on Performance Metrics for Object-Detection Algorithms // 2020 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). 2020. P. 237–242. DOI: 10.1109/IWSSIP48289.2020.9145130.

74. Pashenko O., Pipchenko O. D., Shevchenko V. Designing a YOLOv8n-based Video Surveillance System for Ship Aspect Recognition // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2026. Vol. 20, No. 2. P. 375–385. DOI: 10.12716/1001.20.02.12.

75. Powers D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation // Journal of Machine Learning Technologies. 2011. Vol. 2, No. 1. P. 37–63.

76. Prasad D. K., Rajan D., Rachmawati L., Rajabally E., Quek C. Video Processing from Electro-Optical Sensors for Object Detection and Tracking in a Maritime Environment: A Survey // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 18, No. 8. P. 1993–2016. DOI: 10.1109/TITS.2016.2634580.

77. Raschka S. *Model Evaluation, Model Selection, and Algorithm Selection in Machine Learning*. arXiv. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1811.12808.

78. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016. Piscataway, NJ : IEEE, 2016. P. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.

79. Rosenberg L., Watts S. Challenges in radar sea clutter modelling // *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2022. Vol. 16, No. 9. P. 1403–1414. DOI: 10.1049/rsn2.12272.

80. Safe navigation with COLREGs: Proper lookout is critical [Електронний ресурс] // SAFETY4SEA. – 2020. – Режим доступу: https://safety4sea.com/cm-safe-navigation-with-colregs-proper-lookout-is-critical/ (дата звернення: 30.06.2026).

81. Sapkota R., Flores-Calero M., Qureshi R., Badgujar C., Nepal U., Poulose A., Zeno P., Vaddevolu U. B. P., Khan S., Shoman M., Yan H., Karkee M. YOLO Advances to Its Genesis: A Decadal and Comprehensive Review of the You Only Look Once (YOLO) Series // *Artificial Intelligence Review*. 2025. Vol. 58. Art. 274. DOI: 10.1007/s10462-025-11253-3.

82. Shang Y., Yu W., Zeng G., Li H., Wu Y. StereoYOLO: a stereo vision-based method for maritime object recognition and localization // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 1. Art. 197. DOI: 10.3390/jmse12010197.

83. Shishkin A.V., Konovets V., Koshevyy V.M. AIS R-Mode Trilateration for GPS Positioning and Timing Insurance // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2024. Vol. 18, No. 2. P. 363–369. DOI: 10.12716/1001.18.02.13.

84. Sivakumar M., Parthasarathy S., Padmapriya T. Trade-off between training and testing ratio in machine learning for medical image processing // *PeerJ Computer Science*. 2024. Vol. 10. Art. e2245. DOI: 10.7717/peerj-cs.2245.

85. Sjaardema T. A., Smith C. S., Birch G. C. History and Evolution of the Johnson Criteria [Electronic resource]: technical report SAND2015-6368. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2015. DOI: 10.2172/1222446. URL: https://www.osti.gov/biblio/1222446 (date of access: 30.06.2026).

86. Stereolabs Inc. Performance benchmark of YOLO v5, v7 and v8 // *Stereolabs Blog*. 2023, January 12. URL: https://www.stereolabs.com/blog/performance-of-yolo-v5-v7-and-v8

87. Sung K.-K., Poggio T. Example-Based Learning for View-Based Human Face Detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1998. Vol. 20, No. 1. P. 39–51. DOI: 10.1109/34.655648.

88. Talpur K., Hasan R., Gocer I., Ahmad S., Bhuiyan Z. AI in Maritime Security: Applications, Challenges, Future Directions, and Key Data Sources // Information. 2025. Vol. 16, No. 8. Art. 658. DOI: 10.3390/info16080658.

89. Tan M., Langenkämper D., Nattkemper T. W. The impact of data augmentations on deep learning-based marine object classification in benthic image transects // *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 14. Art. 5383. DOI: 10.3390/s22145383.

90. Teixeira E., Araujo B., Costa V., Mafra S., Figueiredo F. Literature Review on Ship Localization, Classification, and Detection Methods Based on Optical Sensors and Neural Networks // *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 18. Art. 6879. DOI: 10.3390/s22186879.

91. Terven J., Córdova-Esparza D.-M., Romero-González J.-A. A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: from YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS // *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023. Vol. 5, No. 4. P. 1680–1716. DOI: 10.3390/make5040083

92. Ultralytics. Data augmentation using Ultralytics YOLO [Electronic resource]. *Ultralytics Documentation*. URL: https://docs.ultralytics.com/guides/yolo-data-augmentation (date of access: 30.06.2026).

93. Ultralytics. PASCAL VOC Dataset [Electronic resource]. *Ultralytics Documentation*. 2025. URL: https://docs.ultralytics.com/datasets/detect/voc (date of access: 30.06.2026).

94. Ultralytics. (2025). *YOLO Performance Metrics*. Ultralytics Documentation. https://docs.ultralytics.com/guides/yolo-performance-metrics/

95. Ultralytics. YOLOv8 Documentation [Electronic resource]. URL: https://docs.ultralytics.com/ (date of access: 30.06.2026).

96. Ultralytics. Ultralytics YOLOv8 [Electronic resource]. 2023. URL: https://github.com/ultralytics/ultralytics (date of access: 30.06.2026).

97. Vina A. Mean Average Precision (mAP) in Object Detection // *Ultralytics Blog*. 2025. URL: https://www.ultralytics.com/blog/mean-average-precision-map-in-object-detection (дата звернення: 30.06.2026).

98. Vujović I., Miličević M., Bugarin N., Kuzmanić Skelin A. Reducing collision risks in harbours with mixed AIS and non-AIS traffic using augmented reality and ANN // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 9. Art. 1659. DOI: 10.3390/jmse13091659.

99. Wang J., Lu C., Jiang W. Simultaneous Ship Detection and Orientation Estimation in SAR Images Based on Attention Module and Angle Regression // *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 9. Art. 2851. DOI: 10.3390/s18092851.

100. Wang L., Fan S., Liu Y., Li Y., Fei C., Liu J., Liu B., Dong Y., Liu Z., Zhao X. A Review of Methods for Ship Detection with Electro-Optical Images in Marine Environments // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 12. Art. 1408. DOI: 10.3390/jmse9121408.

101. Ward C. M., Harguess J., Hilton C. Ship classification from overhead imagery using synthetic data and domain adaptation // *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*. Charleston, USA, 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604662.

102. Wu Z., Zhen H., Zhang X., Bai X., Li X. SEMA-YOLO: Lightweight Small Object Detection in Remote Sensing Image via Shallow-Layer Enhancement and Multi-Scale Adaptation // *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17, No. 11. Art. 1917. DOI: 10.3390/rs17111917.

103. Xu H., Guedes Soares C. Challenges for the Development of Maritime Autonomous Surface Ships // Autonomous Transportation Research. 2026. Vol. 2, Issue 1. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.atres.2026.01.001.

104. Xu M., Yoon S., Fuentes A., Park D. S. A comprehensive survey of image augmentation techniques for deep learning // *Pattern Recognition*. 2023. Vol. 137. Art. 109347. DOI: 10.1016/j.patcog.2023.109347.

105. Xu X., Zhang X., Wei S., Shi J., Li J., Zhou Z., Zhang W., Tang L., Sun Z., Wang Y., Zhang T., Zeng T. Deep learning for ship detection in SAR images: a

comprehensive review // *Ocean Engineering*. 2026. Vol. 355, Part 1. Art. 125045. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2026.125045.

106. Yasir M., Liu S., Pirasteh S., Xu M., Sheng H., Wan J., de Figueiredo F. A. P., Aguilar F. J., Li J. YOLOShipTracker: tracking ships in SAR images using lightweight YOLOv8 // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 134. Art. 104137. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104137.

107. Yuan P., Xu C., Tan X., Fu S. RT-FogNet: real-time ship detection under low-visibility conditions in inland waterways // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Art. 14094. DOI: 10.1038/s41598-026-44253-6.

108. Zainuddin S., Pasya I., Abd. Rashid N. E., Zaiaami N., Maryam A., Raja Abdullah R. S. A., Megat Ali M. S. A. Maritime Radar: A Review on Techniques for Small Vessels Detection // *International Journal of Electrical and Electronic Systems Research (JEESR)*. 2019. Vol. 14. P. 30–45.

109. Zhang B., Liu J., Liu R. W., Huang Y. Deep-learning-empowered visual ship detection and tracking: literature review and future direction // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 141. Art. 109754. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109754.

110. Zhang C., Li Z., Luo Z., Deng J., Qin T. Low observable radar target detection method within sea clutter based on correlation estimation // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 9. Art. 2233. DOI: 10.3390/rs14092233.

111. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. Vol. 22, No. 11. P. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718.

112. Zhao B., Zhou Y., Song R., Yu L., Zhang X., Liu J. Modular YOLOv8 optimization for real-time UAV maritime rescue object detection // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 24492. DOI: 10.1038/s41598-024-75807-1.

113. Zhu M., Han D., Han B., Huang X. YOLO-HPSD: A high-precision ship target detection model based on YOLOv10 // PLOS ONE. 2025. Vol. 20, No. 5. Art. e0321863. DOI: 10.1371/journal.pone.0321863.

114. Zou Z., Chen K., Shi Z., Guo Y., Ye J. Object Detection in 20 Years: A Survey // *Proceedings of the IEEE*. 2023. Vol. 111, No. 3. P. 257–276. DOI: 10.1109/JPROC.2023.3238524.

115. Бень А. П., Паламарчук І. В. Людський фактор при прийнятті рішень в судноводінні та шляхи зниження його впливу // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2015. Т. 1, № 12. С. 4–9.

116. Булгаков М. П., Бурлаченко Д. А., Корякін К. С., Никитюк П. В., Чеча О. П., Кучеренко В. Ю. Кіберзагрози як сучасний виклик міжнародному морському судноплавству // Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. праць. 2024. № 1 (72). С. 106–116. DOI: 10.47049/2226-1893-2024-1-106-116.

117. Гангало І. М., Лісовий Д. О., Жебка В. В. Розпізнавання об'єктів за допомогою технологій комп'ютерного зору // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2022. № 4 (77). С. 46–52. DOI: 10.31673/2412-4338.2022.044652.

118. Гилка У. Виявлення ролі людського фактора в аварійності морського транспорту // Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. 2020. № 1 (70). С. 31–43. DOI: 10.31375/2226-1915-2020-1-31-43.

119. Гончарук І. П., Головань А. І. Оцінка навігаційної безпеки в обмежених умовах та районах інтенсивного судноплавства // Водний транспорт: збірник наукових праць. 2023. Вип. 1 (37). С. 136–143.

120. Даниленко О. Б. Неперервна професійна підготовка майбутніх фахівців річкового та морського транспорту : монографія. Ізмаїл : Дунайський інститут НУ «ОМА», 2016.

121. Загородня Ю. В., Позднякова В. В., Марухненко О. М. Безпека судноводіння як чинник підвищення ефективності комерційної експлуатації судна // Розвиток транспорту. 2021. № 1(8). С. 62–69. DOI: 10.33082/td.2021.1-8.06.

122. Зінченко О. В., Звенігородський О. С., Кисіль Т. М. Згорткові нейронні мережі для вирішення задач комп'ютерного зору // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2022. № 2 (75). С. 4–12. DOI: 10.31673/2412-4338.2022.020411.

123. Іванюк В. І., Потапова К. Р., Наливайчук М. В., Гуріненко С. О., Вовк Л. Б. Система комп'ютерного зору автономних безпілотних підводних апаратів на базі модифікованого методу Sea-thru та нейромережі YOLO // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2023. № 5. С. 40–54. DOI: 10.32782/tnv-tech.2023.5.5.

124. Лактіонов О. І., Боряк Б. Р., Педченко Н. М., Двірна О. А., Михайліченко О. В. Огляд алгоритмів комп'ютерного зору для виявлення небезпечних об'єктів дронами // Системи управління, навігації та зв'язку. 2023. № 3 (73). С. 120–122. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.3.120.

125. Мельник О. М. Актуальні проблеми безпеки морського транспорту. Тенденції, ризики та стратегії врегулювання // Водний транспорт: збірник наукових праць. 2023. Вип. 1 (37). С. 116–126.

126. Методологія і методи наукових досліджень : конспект лекцій [Електронний ресурс] / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. – Мелітополь, 2021. – Режим доступу: https://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/lekcija-3-metodolohija-i-metody-naukovyh-doslidzhen-z-dyscypliny-nk.pdf (дата звернення: 30.06.2026).

127. Методологія системного підходу та наукових досліджень : навч. посіб. для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти / уклад. кафедра філософії та політології ЗУНУ. – Тернопіль : Західноукраїнський національний університет, 2021. – 116 с. – Режим доступу: https://library.wunu.edu.ua/files/EVD/kl_mspnd.pdf (дата звернення: 30.06.2026).

128. Пашенко О. Л. Використання аугментації для покращення якості навчання моделі штучного зору для визначення ракурсу судна // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2025. № 2 (31). С. 52–63. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.052-063.

129. Пашенко О. Л. Дослідження ефективності використання моделі комп’ютерного зору для визначення ракурсу суден в реальних умовах // *Судноводіння (Shipping & Navigation)*. 2026. Вип. 39. С. 53–64. DOI: 10.31653/2306-5761.39.2026.53-64.

130. Пашенко О. Л., Піпченко О. Д. Розробка моделі штучного зору на базі алгоритму YOLO для визначення ракурсу судна // *Судноводіння (Shipping & Navigation)*. 2025. Вип. 38. С. 10–21. DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.10-21.

131. Пернікоза В., Бурчак О., Конон Н., Конон В. Features of the ships handling during navigation in port waters in the context of the seafarers training // *Судноводіння (Shipping & Navigation).* 2023. Вип. 34.

132. Піпченко О. Д., Конон Н. М., Конон В. В., Богаченко Є. А. Підготовка моряків у контексті глобалізації: аналіз викликів і інноваційних можливостей // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії.* 2025. № 2(31). С. 166–176. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.166-176.

133. Полікаровських О., Малаксіано М., Даус Ю. Протидія кібернетичним атакам на морському транспорті // *Вісник Одеського національного морського університету* : зб. наук. праць. 2024. № 2 (73). С. 234–247. DOI: 10.47049/2226-1893-2024-2-234-247.

134. Шишкін О. В., Коновець В. І., Харченко Р. Ю. Обчислення координат судна за даними АІС інших суден у разі порушення доступу до сигналів супутникової навігації // *Судноводіння / Shipping & Navigation*. Одеса : НУ «ОМА», 2026. Вип. 39. С. 84–98. DOI: 10.31653/2306-5761.39.2026.84-98.

ДОДАТОК А

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

Акт впровадження

Окремих результатів дисертаційної роботи

Пашенко Олена Леонідівни

«Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об'єктів»

Цей акт складений 08.07.2026 році засвідчує те, що окремі технологічні розробки, які запропоновані у дисертаційному дослідженні «Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об'єктів» Пашенко Олени Леонідівни були використані в проектувальній документації компанією Minerva Marine Inc. при майбутньому переоблаштуванні суден Minerva Alexandra системами відеоспостереження для автоматизованого отримання додаткової інформації про навколишню обстановку:

- модель комп'ютерного зору на базі YOLOv8n для визначення локалізації суден.
- принцип визначення істинного пеленгу на локалізований об'єкт.

Суперінтендант компанії

MAKSYM
ROZHDESTVENSKYI
ELECTRICAL
SUPERINTENDENT

M/T MINERVA ALEXANDRA
IMO No.
9892999
PIRAEUS

Peter Döhle Schiffahrts-KG

Акт впровадження

Окремих результатів дисертаційної роботи

Пашенко Олена Леонідівни

«Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об'єктів»

Цей акт складений 12.07.2026 році засвідчує те, що окремі результати дисертаційної роботи Пашенко Олени Леонідівни «Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об'єктів» були використані при встановленні системи відеоспостереження компанією «Peter Döhle Schiffahrts-KG» на судні «Edgar».

Це дозволило підвищити ситуаційну обізнаність судноводія за рахунок отримання додаткової інформації про наявність, ракурс та пеленг суден-цілей у випадках обмеженої достовірності або відсутності сигналу автоматичної ідентифікаційної системи.

Капітан судна «Edgar» Котоянц В.В.

Master of m/v «Edgar» Kotoiants V. V.

MV EDGAR MADEIRA IMO NO: 9589621

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з навчальної роботи
Національного університету
«Одеська морська академія»,
д.т.н., професор
_____Ігор ВОРОХОБІН
«10» 08 2026 р.

АКТ
про використання результатів дисертаційної роботи
Олени Пашенко на тему «Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об'єктів» у навчальному процесі університету

Цим актом засвідчується, що в Інституті післядипломної освіти «Центр підготовки та атестації плавскладу» Національного університету «Одеська морська академія» у навчальний процес для слухачів курсів підготовки судноводіїв було впроваджено результати дисертаційної роботи Олени Пашенко на тему «Підвищення точності ідентифікації та моніторингу надводних об'єктів».

Зазначені матеріали використовуються з метою ознайомлення операторів із роботою систем розпізнавання на базі штучного інтелекту.

Директор ІПО ЦПАП _____ Віталій ПОНОМАРЕНКО

Заступник начальника навчального відділу _____ Ганна Петрова

ДОДАТОК Б

Протокол анотування ракурсу судна-цілі

1. Призначення та сфера застосування

Протокол установлює єдиний порядок визначення та документування еталонного класу ракурсу судна-цілі на зображеннях, що входять до навчальної, перевірочної та тестової вибірок. Протокол застосовується до зображень, для яких відсутні синхронні дані АІС.

2. Вимоги до анотаторів:

– наявність кваліфікації вахтового помічника капітана або досвіду несення навігаційної вахти;

– ознайомлення з визначенням ракурсу за п. 3.1 та 3.2 та з кутовими межами класів за таблицею 3.1;

– проходження контрольної розмітки калібрувального набору з 30 зображень з відомим еталоном перед початком роботи; допустимою вважається частка грубих помилок, не більше 3,33 %.

3. Послідовність визначення класу:

Крок 1. Перевірити придатність екземпляра: корпус повністю в кадрі; видимий розмір не менший за 32 × 32 пікселі; перекриття не більше 30 %; ракурс візуально можна визначити. За невиконання будь-якої умови – застосувати п. 5 цього протоколу.

Крок 2. Визначити напівсферу спостереження: носову (видимі форштевень, розвал борту, бульб) або кормову (видимі транець, кормовий підзір, кормова надбудова у крайньому положенні; кільватерний струмінь, спрямований у бік спостерігача).

Крок 3. Визначити борт, що спостерігається: якщо носова частина розташована в кадрі ліворуч від корми – спостерігається правий борт цілі; якщо праворуч – лівий борт.

Крок 4. Оцінити ступінь проєкційного вкорочення корпусу і віднести екземпляр до одного з секторів (п. 4) та одного з восьми класів ракурсу за таблицею 3.1.

Крок 5. Занести результат до журналу розмітки, зазначивши ознаку ракурсу.

4. Ознаки для розрізнення секторів:

– носовий / кормовий сектор (0; 6): видима довжина борта не перевищує видиму ширину корпусу більш ніж у 2,7 рази; борт майже не проєктується; спостерігається переважно торцева поверхня (форштевень або транець);

– носовий або кормовий сектор борта (1; 3; 4; 7): одночасно чітко видимі борт і торцева частина корпусу; співвідношення видимих проєкцій – від 2,7 до 15,7;

– траверзний сектор (2; 5): торцева частина корпусу практично не проєктується; корпус видимий майже на повну довжину; надбудова не перекриває лінію борта;

– додаткові ознаки: положення комінів і мостика відносно середини видимої довжини корпусу; асиметрія носових вусів; форма кільватерного струменя.

5. Правила виключення екземплярів:

– видимий розмір судна за більшою стороною менший за 32 пікселі;

– перекриття судна іншим об’єктом перевищує 30–50 %;

– ракурс неможливо визначити через засвітлення, туман, дощ, темряву або спостереження у вигляді силуету;

6. Журнал розмітки

Для кожного анотованого екземпляра фіксуються: ідентифікатор зображення, тип судна, номер класу ракурсу, ініціали анотатора, дата розмітки, арбітраж.

7. Контроль якості та арбітраж:

– випадкова підбірка зображень обсягом 30 екземплярів, стратифікована за класами, розмічається незалежно трьома експертами;

– за результатами обчислюється частка помилкових класифікацій;

– розбіжності між експертами розглядає арбітр, рішення якого фіксується в журналі.

ДОДАТОК В

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Пашенко О. Л., Піпченко О. Д. Розробка моделі штучного зору на базі алгоритму YOLO для визначення ракурсу судна. *Судноводіння (Shipping & Navigation)*. 2025. Вип. 38. С. 10–21. DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.10-21.

2. Пашенко О. Л. Використання аугментації для покращення якості навчання моделі штучного зору для визначення ракурсу судна. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії.* 2025. № 2 (31). С. 52–63. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.052-063.

3. Пашенко О. Л. Дослідження ефективності використання моделі комп'ютерного зору для визначення ракурсу суден в реальних умовах. *Судноводіння (Shipping & Navigation)*. 2026. Вип. 39. С. 53–64. DOI: 10.31653/2306-5761.39.2026.53-64.

4. Pashenko O., Pipchenko O. D., Shevchenko V. Designing a YOLOv8n-based Video Surveillance System for Ship Aspect Recognition. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2026. Vol. 20, No. 2. P. 375–385. DOI: 10.12716/1001.20.02.12.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Пашенко О. Л. Аналіз впливу технік аугментації на продуктивність моделі штучного зору при визначенні ракурсу судна. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі» / Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2025) :* зб. матеріалів конф., 03–04 грудня 2025 р., м. Одеса. Одеса : Херсонська державна морська академія, 2025. С. 309–312. URL: https://rp.onmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/5644/1.%20PSDMI-ЗБІРНИК-2025.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення: 19.09.2026).

6. Пашенко О. Л. Використання алгоритму YOLO для покращення навігаційної безпеки мореплавства. *Судноводіння, морські перевезення та технології (NST-2025) :* матеріали наук.-теоретичної конф., 19–20 листопада 2025 р., м. Одеса. Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2025. С. 146–149. URL: https://nst-conference.com.ua/nst/wp-content/uploads/2026/02/NST-2025.pdf (дата звернення: 19.09.2026).

7. Пашенко О. Л. Вплив природного освітлення на точність розпізнавання ракурсу суден тренованою моделлю комп'ютерного зору YOLOv8n. *Інформаційні та операційні технології в судноплавстві (IOTS-2026) :* зб. матеріалів І Міжнар. наук.-практ. конф., 23–24 квітня 2026 р., м. Одеса. Одеса : Одеський національний морський університет, 2026. С. 247–251. DOI: 10.5281/zenodo.19830666.

8. Пашенко О. Л. Вплив дальності розташування суден-цілей на здатність моделі YOLOv8n розрізняти їх ракурси. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2026) :* збірник матеріалів XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., 26–28 травня 2026 р., м. Одеса. Одеса : Херсонська державна морська академія, 2026. С. 57–60. URL: https://ksma.ks.ua/?page_id=2106 (дата звернення: 19.09.2026).