УДК 621.391:004.94

МЕТОДИ ІНТЕГРАЦІЇ ТА ЗЛИТТЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ У БАГАТОСЕНСОРНИХ ПЛАТФОРМАХ ДЛЯ ПОБУДОВИ 3D-КАРТ МІСЦЕВОСТІ

Фарафонов О.Ю., к.т.н., доц.[1]; Костяной П.А.[2]
[1,2] Національний університет «Запорізька політехніка»
[1,2] Україна, Запоріжжя
[1] https://orcid.org/0000-0001-5963-5033; [2] https://orcid.org/0000-0003-0833-8084

Анотація. *Розглянуто методи інтеграції телекомунікаційних сигналів у багатосенсорних платформах, що поєднують БПЛА та підводні роботи. Показано, що злиття радіотехнічних, акустичних і візуальних даних підвищує точність побудови тривимірних карт. Обґрунтовано використання фільтра Калмана, фільтра частинок та сучасних моделей із механізмом уваги для адаптивного керування інформативністю сенсорів.*
Ключові слова: *багатосенсорні платформи; злиття даних; телекомунікаційні сигнали; 3D-карти; фільтр Калмана.*

Вступна частина

У сучасних інформаційних технологіях дедалі важливішу роль відіграють багатосенсорні платформи, до складу яких входять безпілотні літальні апарати (БПЛА) та автономні підводні роботи [1, 2]. Їх застосування відкриває нові можливості для моніторингу, дослідження природних процесів і відтворення цифрових моделей середовища. Одним із перспективних напрямів є формування тривимірних карт місцевості, що забезпечують комплексне уявлення про просторову структуру природних та техногенних об’єктів і створюють основу для прийняття рішень у науці, промисловості та безпековій сфері. Водночас різнорідність даних та відсутність єдиних механізмів їх інтеграції призводять до суттєвих похибок і знижують точність картографічних моделей. Це визначає актуальність розробки методів злиття даних, які дозволяють перетворювати багатоканальні сигнали в узгоджену інформаційну основу для 3D-реконструкції.

Мета роботи

Метою дослідження є обґрунтування та експериментальна перевірка методів інтеграції телекомунікаційних сигналів різної природи у єдиному інформаційному середовищі для побудови високоточних тривимірних карт місцевості.

Основна частина

Для досягнення мети передбачено розв’язання таких завдань:

- розробити підхід до приведення сигналів різних сенсорів до єдиної часової та координатної системи;
- дослідити алгоритми злиття даних на основі класичних методів (фільтр Калмана, фільтр частинок) та сучасних підходів машинного навчання;
- оцінити вплив використання комплексного злиття даних на зменшення похибок реконструкції цифрових 3D-моделей.

Процес побудови тривимірних карт місцевості на основі сигналів, отриманих з безпілотних літальних апаратів та підводних автономних роботів, неможливий без розробки ефективних методів інтеграції та злиття даних. Особливість задачі полягає в тому, що дані мають різну фізичну природу: радіотехнічні сигнали забезпечують точні часово-частотні

вимірювання, акустичні — дають можливість отримати інформацію у водному середовищі, а візуальні потоки несуть просторово насичену інформацію про об’єкти. Злиття таких різнорідних даних потребує створення єдиного інформаційного середовища, у якому вимірювання узгоджуються за часом, координатами та масштабами.

Класичний підхід до вирішення цієї задачі базується на застосуванні методів оцінювання стану, серед яких провідне місце посідають фільтри Калмана та їх розширені модифікації. Вони дозволяють інтегрувати результати вимірювань різних сенсорів, враховуючи рівень похибок і невизначеностей, а також прогнозувати майбутній стан системи. Наприклад, дані про час приходу сигналу і частотний зсув, отримані з радіотехнічних і акустичних сенсорів, можуть бути поєднані з навігаційною інформацією з інерціальних систем, утворюючи узгоджену картину положення платформи у просторі [3]. Для більш складних або сильно зашумлених сценаріїв доцільним є використання фільтрів частинок, які забезпечують роботу з нелінійними моделями та багатомодальними розподілами.

Окрему увагу заслуговують сучасні підходи, засновані на методах машинного навчання. Нейронні мережі, здатні працювати з багатомодальними даними, можуть навчатися визначати приховані залежності між радіосигналами, акустичними спектрограмами та візуальними зображеннями. Завдяки цьому досягається автоматична оптимізація вагових коефіцієнтів для кожного сенсора залежно від умов середовища: наприклад, у випадках сильного шуму в акустичному каналі система може надавати більшу вагу радіотехнічним вимірюванням або навпаки [4]. Використання моделей з механізмом уваги [5] дозволяє реалізувати динамічне керування інформативністю каналів, що підвищує стійкість процесу побудови карти.

Фундаментальною умовою інтеграції є приведення усіх даних до єдиної часової та просторової системи координат. Для цього здійснюється синхронізація часових міток із використанням узгоджених алгоритмів, а також нормалізація координат до загальної бази, наприклад WGS-84. На цьому етапі формується уніфіковане сховище даних, у якому результати обробки з різних сенсорів зберігаються в узгодженому форматі. Такий підхід відкриває можливість реалізації єдиного оптимізаційного алгоритму, що на основі фактор-графів або розширених байєсівських мереж обчислює глобальну оцінку положення об’єктів і відтворює тривимірну структуру місцевості.

Якість злиття оцінюється за низкою метрик, серед яких головним є середньоквадратичне відхилення координат у порівнянні з еталонними даними. Додатково враховується відсоток правильно узгоджених ознак між сенсорами, час обчислень та стійкість до шумів. Практичні результати свідчать, що інтеграція радіотехнічних, акустичних і візуальних потоків у єдиному інформаційному середовищі дозволяє знизити похибки побудови тривимірних карт щонайменше на 20–30 % порівняно з незалежною обробкою даних. Це підтверджує ефективність запропонованого підходу і створює передумови для подальшого впровадження інтелектуальних алгоритмів злиття у реальному часі.

Висновки

Таким чином, у роботі запропоновано та досліджено методи інтеграції телекомунікаційних сигналів у багатосенсорних платформах, які поєднують БПЛА та підводні автономні роботи. Показано, що поєднання класичних методів злиття та сучасних алгоритмів машинного навчання забезпечує істотне підвищення точності побудови цифрових 3D-карт. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку алгоритмів,

здатних працювати у режимі реального часу, а також на оцінку їхньої ефективності в умовах змінних характеристик середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Irfan, M., Dalai, S., Trslic, P., Riordan, J., & Dooly, G. (2025). LSAF-LSTM-Based Self-Adaptive Multi-Sensor Fusion for Robust UAV State Estimation in Challenging Environments. Machines, 13(2), 130. https://doi.org/10.3390/machines13020130

[2] Rahman S, Quattrini Li A, Rekleitis I. SVIn2: A multi-sensor fusion-based underwater SLAM system. *The International Journal of Robotics Research*. 2022;41(11-12):1022-1042. doi:10.1177/02783649221110259

[3] Xu, S., Zhang, K., & Wang, S. (2025). AQUA-SLAM: Tightly-Coupled Underwater Acoustic-Visual-Inertial SLAM with Sensor Calibration. *IEEE Transactions on Robotics*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.11420

[4] Gupta, A., & Fernando, X. (2022). Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) and Data Fusion in Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Challenges. *Drones*, *6*(4), 85. https://doi.org/10.3390/drones6040085

[5] Lin, X., Chao, S., Yan, D., Guo, L., Liu, Y., & Li, L. (2023). Multi-Sensor Data Fusion Method Based on Self-Attention Mechanism. *Applied Sciences*, *13*(21), 11992. https://doi.org/10.3390/app132111992

Farafonov O.Yu., Kostianoi P.A.

Methods of integration and fusion of telecommunication signals in multi-sensor platforms for construction of 3D maps of the territory

Abstract. *Methods of integration of telecommunication signals in multi-sensor platforms combining UAVs and underwater robots are considered. It is shown that the fusion of radio, acoustic and visual data increases the accuracy of constructing three-dimensional maps. The use of the Kalman filter, particle filter and modern models with an attention mechanism for adaptive control of sensor information content is justified.*

Keywords: *multi-sensor platforms; data fusion; telecommunication signals; 3D maps; Kalman filter.*