

*І.Г. Макєєв, аспірант,
О.В. Німич, аспірант,
Д.В. Козловська
(Національний авіаційний університет, Україна)*

Огляд деяких методів визначення глибин мілководдя водойм з використанням знімків зроблених безпілотними літальними апаратами

Стаття дає опис методів визначення глибини мілководдя водойм на основі аналізу знімків зроблених БПЛА. Фотограмметричні техніки на основі метода "Structure-from-Motion and Multi-View Stereo" дають можливість отримати високу точність вимірювань.

Вступ. Для отримання геопросторової інформації водойми, необхідні батиметричні роботи, які дозволяють вимірювати глибини мілководь. Інформація про глибину водойми безпосередньо впливає на безпеку та ефективність судноплавства, управління береговою зоною, на процес проєктування та моніторингу гідротехнічних споруд, та ряд інших видів людської діяльності на водоймі. До найпопулярніших приладів для вимірювання глибини водойм відноситься однопроменеві ехолоти (SBES) і багатопроменеві ехолоти (MBES). Навіть попри те, що SBES ехолоти залишаються найпоширенішими батиметричними системами в усьому світі, а ехолоти MBES, які завдяки своїй великій ширині смуги можуть забезпечити суттєве охоплення дна водойми та можливість виконання такої роботи за відносно менший період часу, за останнє десятиліття спостерігається зростання впливу методів вимірювання глибини - альтернатив гідроакустичним методам. Ці методи включають фотограмметричні та методи дистанційного зондування, які дозволяють отримувати дані про глибину для створення тривимірних моделей дна водойм. Інші поточні альтернативні методи отримання значень глибини водойм включають супутникову батиметрію та мультиспектральне зображення на основі методу супутникової батиметрії (SDB). Слід підкреслити, що використання супутникових зображень є менш дорогим, ніж будь-які інші батиметричні вимірювання, особливо порівняно з системами виявлення та визначення відстані (LiDAR). Однак цей метод не забезпечує необхідну точність вимірювань глибин. Іншим методом дистанційного зондування, який дозволяє виконувати батиметричні вимірювання, є повітряна лідарна батиметрія (ALB), також відома як повітряна лазерна гідрографія (ALH), яка стрімко розвивається останніми роками. Його функціонування засновано на застосуванні зелених лазерів, а саме значення глибини визначається через знання двонаправленого ходу лазерного променя між водною поверхнею та відбиттям від морського дна, розташованого під нею. Такі системи, як ALB/ALH встановлюються на борту літаків або гелікоптерів, але завдяки прогресивній мініатюризації обладнання датчики цього типу можуть бути встановлені на безпілотних літальних апаратах (БПЛА), але вартість робіт та обладнання на даний час залишаються високими.

В даний час використання БПЛА в гідрографії дозволило отримувати геопросторові дані високої роздільної здатності та забезпечило значну точність визначення їх координат. БПЛА зазвичай використовуються при розробці геопросторових моделей суші площі, але їх використання в батиметричних вимірюваннях супроводжується похибками внаслідок явище заломлення водяної хвилі. Роботи виконуються на основі належним чином розроблених і вимірних наземних контрольних точок (GCP), також відомих як фототочкам, які забезпечують так звану пряму геореференцію. Використання безпілотних платформ в батиметрії має низку переваг, а саме: менший час вимірювання, мобільність і значно меншу вартість порівняно з традиційними методами з використанням гідроакустичних систем, в нові підходи у визначенні глибини мілководдя водою на основі аналізу знімків демонструють, що фотограмметричні методи на основі SfM (Structure-from-Motion) та MVS (Multi-View Stereo) дозволяють отримати високу точність результатів.

1. Опис методів. Багато методів, описаних нижче, засновані на техніці Structure-from-Motion (SfM). SfM [1] — це техніка, яка активно випробовується в останні роки, і її завдання полягає у створенні тривимірних моделей за допомогою серії тимчасових RGB-зображень і інформації про геоприв'язку. Вона також надає інформацію про внутрішню та зовнішню орієнтацію камери під час отримання кожного зображення за допомогою автоматичних алгоритмів для оцінки його розташування. Це призводить до створення моделі, яка дозволяє визначити, як окремі 3D-координати проєктуються на зображення з камери. При роботі за методикою SfM важливо логічно спланувати мережу опорних точок. Правильно вирівняна мережа покращує вилучення метричних даних і перетворення даних у фактичну систему координат. Multi-View Stereo (MVS) [2] — це загальний термін для групи методів стереозйомки, які передбачають отримання двох зображень об'єкта з різних точок зору. Важливим кроком під час роботи з алгоритмами SfM-MVS є проєктування та вимірювання фототочок, яке може бути здійснено за допомогою тахіметричного методу вимірювання на базі локальної мережі управління або за допомогою приймача глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS). Результатом типового операційного процесу на основі алгоритму SfM-MVS, є ортофотозображення. Однак слід зазначити, що явище заломлення водяної хвилі як загрозу при роботі з алгоритмами SfM-MVS, тобто при обробці фотограмметричних даних необхідно усунути ефект заломлення світла на межі розділу повітря/вода.

1.1. Визначення глибини на основі методу eBathy. Концепція алгоритму [3] базується на спостереженнях рухів поверхневих хвиль протягом довгих часових рядів. Можлива оцінка батиметрії шляхом визначення співвідношення між швидкістю хвилі та глибиною. Роботу алгоритму можна розділити на три основні етапи:

1. Аналізи залежить від частоти кандидата, радіального хвильового числа, еквівалентної глибини та кута хвилі. Аналіз базується на перетворенні Фур'є. На цьому етапі виконуються такі операції, як визначення оптимальних хвильових чисел та їх напрямків, а також використання алгоритму Левенберга-Марквардта. Як тільки цей крок є завершено, отримують набір хвильових чисел та глибин залежно від конкретної частоти;

2. Оцінка єдиного найкращого значення глибини на основі співвідношення дисперсії. Попередній крок надав набір хвильових чисел і глибин, тоді як цей етап дозволяє визначити одну глибину на основі отриманого набору. Для цього використовується фільтр Ханнінга;

3. Оцінка середньої глибини пробігу, спрямована на отримання ковзного середнього значення для усунення проблем, пов'язаних з появою прогалів у даних, наприклад, в результаті тимчасової втрати зображення під час руху. На цьому етапі розраховується значення посилення фільтра Калмана [4].

На основі GNSS/інерціальної навігаційної системи (INS) вимірюються опорні точки. Зображення оброблюються за методикою SfM-MVS у фотограмметричному програмному забезпеченні. Таким чином отримується хмара точок, яку далі піддають лінійній інтерполяції на основі триангуляції в програмному забезпеченні MATLAB (Матік, Массачусетс, США). Таким чином, отримується модель DSM. Ортофотоплан генерується у програмі MATLAB. До застосування алгоритму sBathy зображення конвертувалися в градації сірого. Контраст зображення було покращено на основі алгоритму адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженою контрастністю (CLAHE), а значення порожніх пікселів було замінено усередненими за часом значеннями інтенсивності для окремих пікселів. Дозволено використання параметрів алгоритму sBathy, запропонованого в [3] зменшення кількості точок, похибка вимірювання глибини яких перевищувала 1 м. Однак фільтрація Калмана, тобто елемент оригінального алгоритму sBathy, не використовується. Кінцевим результатом є нова модель, створена на основі щільної хмари точок. Результати фотограмметричних вимірювань, отримані за допомогою метода, порівнюють з результатами зондування, проведеного судном, обладнаним ехолотом і приймачем кінематичного режиму реального часу (RTK) глобальної системи позиціонування (GPS). Діапазон середньоквадратичної помилки (RMSE) для вимірювань глибини становить 0,17–0,34 м.

1.2. Визначення глибини на основі методу інверсії глибини. Метод інверсії глибини (Depth Inversion) [5], який дає змогу визначати глибину водойми на основі поширення хвилі, що є результатом комбінації сили вітру, його тривалості та сили тяжіння, яка визначається з відеозображень. Це можливо за рахунок конвертації оригінальних відеозображень в ортогональні зображення на основі фототочок і крос-кореляційного аналізу сигналів інтенсивності пікселів. Цей аналіз дозволяє визначити векторне поле швидкості хвилі та, таким чином, визначити період хвилі. Розраховані параметри хвилі можна конвертувати в значення, що представляють глибину води, використовуючи співвідношення дисперсії з теорії лінійних хвиль. Для розрахунку значень глибини необхідні наступні параметри: частота хвилі, швидкість хвилі та прискорення сили тяжіння. Вигідніше використовувати довгоперіодичні хвилі, так як довжина хвилі впливає на силу залежності швидкості хвилі від глибини води. В методі використовуються записи зроблені за допомогою БПЛА. Як і в кожному з розглянутих методів, фототочки розробляються та вимірюються на суші, а алгоритм підгонки шаблону зображення (пошук подібного шаблону у вихідному зображенні на основі базового шаблону, що виконується для порівняння) дозволяє виявити

координати зображення в кожен відеокадр, що дозволяє генерувати ортогональні відеозображення. Запис також проводиться за допомогою гідроакустичної системи, яка використовується для визначення середньоквадратичної глибини (RMS). Отримані глибини порівнюються з результатами, отриманими за допомогою алгоритму sBathy. Процес визначення значення глибини в методі sBathy базується на згладжуванні за допомогою фільтра Калмана, метод інверсії глибини застосовує фільтр Гауса (5×5). Порівняння результатів, отриманих за допомогою обох методів, не дало достатньо інформації, щоб визначити, який із методів є більш точним. На основі тестів можна теоретично припустити, що метод інверсії глибини може отримати вимірювання глибини з вищою точністю, ніж отримується за допомогою алгоритму sBathy. Середньоквадратична помилка глибини (RMSE) для методу інверсії глибини коливається від 0,33 до 0,52 м

1.3. Визначення глибини на основі методу батиметрії за допомогою БПЛА. Метод батиметрії за допомогою БПЛА (UDB), розроблений на основі методу SDB [6], який використовує алгоритми, що працюють на основі багатоспектральних зображень, які здатні забезпечити спектральну роздільну здатність вище, ніж зображення RGB, записуючи дані зображення в певному діапазоні електромагнітного спектра. Значення глибини, отримані після застосування нового методу UDB, порівнювали з результатами, отриманими з супутникових знімків та SDB (з використанням алгоритму Штумпфа) і на результатах традиційних батиметричних вимірювань за допомогою ехолотів MBES і SBES. Для отримання даних вимірювань БПЛА HexaCopter, оснащений мультиспектральною камерою MAIA (Італія), що складається з 8 мультиспектральних датчиків і датчика RGB. Попередня обробка зображення виконується за допомогою спеціального програмного забезпечення MAIA (Італія), яке дозволяє коригувати необроблені зображення та генерувати багатоспектральне зображення. Збурення поверхні води через сонячну погоду можуть спричинити подальші збурення, які доводиться зменшувати за допомогою методу Хедлі, тобто модернізованої методики усунення «відблесків» від зображень дистанційного зондування, заснованої на використанні ближньої інфрачервоної області. Проблема геоприв'язки зображень через відсутність можливості використання техніки SfM в методі UDB було вирішено шляхом розрахунку площинної деформації на основі знання таких параметрів, як місцезнаходження (за показаннями приймача GPS), розмір зображення, значення курсу та кути, записані під час польоту. Обидві моделі можна конвертувати в програмному забезпеченні ENVI 5 (Австралія), але при роботі з алгоритмом Лізенги також використовується програма ArcGIS (США). Випробування проводяться для 3 наборів контрольних точок водойми, рівномірно розподілених по території дослідження. Кожен набір містить різну кількість точок (50, 200 і 500). Результати, отримані новим методом UDB, були багатобічними та надійними порівняно з загальновідомий метод на основі супутникових знімків. Значення глибини, отримані за допомогою алгоритму Штумпфа, були подібні до тих, що розраховані за допомогою алгоритму Лізенги. Варто зазначити, що метод Штумпфа є більш простим, оскільки не вимагає такої кількості методів регресії, як у випадку з другим алгоритмом.

1.4. Визначення глибини на основі методу uBathy. Алгоритм uBathy, описаний у [7], відноситься до раніше обговорюваного алгоритму cBathy. Однак він базується на аналізі головних компонентів перетворення Гільберта як функції часу. Процес здійснюється на відеозображеннях з метою визначення частоти та хвильового числа для окремих компонентів хвилі. Для кожного подвідео: виконується аналіз головних компонент перетворення Гільберта інтенсивності кадру відтінків сірого, а також виділяється частота хвилі та хвильове число, що змінюється в просторі для кожного з основних режимів розкладання, і де тільки можливо. Обидва значення повинні бути отримані з послідовності записаних відеозображень. Після завершення процесу для всіх суб-відео координат та наборів пар частот хвилі і хвильових чисел, з яких можна зробити висновок про значення глибини води, враховуючи дисперсійне співвідношення, отримані для кожної точки. Цей метод дозволяє оцінити батиметрію водойми на основі поширення електромагнітних хвиль, які фіксуються системою відеоспостереження. Значення глибини, отримані із зображень, наданих БПЛА, порівнювалися з результатами батиметричних вимірювань, отриманих традиційно, тобто за допомогою SBES разом із позиціонуванням RTK-GPS. У дослідженні використовувався безпілотний літальний апарат DJI Phantom 3 Pro (Китай) із встановленою на ньому цифровою камерою. На основі рівнянь проєктивної геометрії можна було відобразити тривимірні координати реального часу. До застосування алгоритму uBathy всі кадри з уже відкаліброваних відео потрібно спроектувати на площину, а просторова область була перетином у двовимірній площині (x, y) проєкцій у пікселі домен. Виконання цього процесу дозволило отримати градації сірого, необхідні для цього процесу. Оцінка батиметрії в кожній точці ґрунтувалася на згаданому раніше процесі, пов'язаному з отриманням частоти хвилі та хвильового числа, що змінюється в просторі, а також на основі співвідношення дисперсії. Результати оцінки глибини можуть містити прогалини. Тим не менш, результати є багато обіцяючи, оскільки середньоквадратична помилка глибини становила прибіл. 0,4 м по відношенню до значень глибини, отриманих за допомогою SBES.

Висновки. Результати батиметричних вимірювань, отримані за допомогою наведених методів, майже в кожному випадку порівнювалися з результатами, отриманими за допомогою традиційних методів та розглядаються як задовільні. Для алгоритмів cBathy, Depth Inversion, uBathy та UDB надано значення RMSE глибини та підсумовано в Таблиці 1. Було обрано значення RMSE, оскільки це найбільш часто застосовуваний критерій для оцінки точності алгоритмів, що використовуються для визначення глибини. На основі Таблиці 1 можна зробити висновок, що точність глибини, отримана для алгоритмів cBathy, Depth Inversion та uBathy, подібна. Там, де застосовувався метод UDB, була отримана висока точність глибини в діапазоні 0–5 м. Однак слід зазначити, що зі збільшенням глибини ця точність зменшується. Найвищу точність глибини (0,17–0,34 м) було отримано за допомогою алгоритму cBathy.

Таблиця 1.

Підсумок значень середньоквадратичної помилки глибини (RMSE) для методів cBathy, Інверсії глибини (Depth Inversion), батиметрії отриманої з БПЛА (UDB), та uBathy.

Метод	RMSE (м.)
cBathy	0,17–0,34
Depth Inversion	0,33-0,52
UDB	0,24-1,06
uBathy	0,38-0,73

Список літератури

1. Condorelli, F.; Rinaudo, F.; Salvatore, F.; Tagliaventi, S. A Match-moving Method Combining AI and SFM Algorithms in Historical Film Footage. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2020, XLIII-B2-2020, 813–820.
2. Stathopoulou, E.-K.; Remondino, F. Multi-View Stereo with Semantic Priors. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019, XLII-2/W15, 1135–1140.
3. Holman, R.; Plant, N.; Holland, T. cBathy: A Robust Algorithm for Estimating Nearshore Bathymetry. *J. Geophys. Res. Oceans* 2013, 118, 2595–2609.
4. Kalman, R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *J. Basic Eng.* 1960, 82, 35–45.
5. Hashimoto, K.; Shimozono, T.; Matsuba, Y.; Okabe, T. Unmanned Aerial Vehicle Depth Inversion to Monitor River-mouth Bar Dynamics. *Remote Sens.* 2021, 13, 412.
6. Tonion, F.; Pirotti, F.; Faina, G.; Paltrinieri, D. A Machine Learning Approach to Multispectral Satellite Derived Bathymetry. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2020, V-3-2020, 565–570.
7. Simarro, G.; Calvete, D.; Luque, P.; Orfila, A.; Ribas, F. UBathy: A New Approach for Bathymetric Inversion from Video Imagery. *Remote Sens.* 2019, 11, 2722.