

С.В. Іванов, к.т.н.
ПКТБ "Марінекс", м. Київ

П.Б. Олійник, аспір.
Національний технічний університет України "КПІ"

ЦИФРОВА ОБРОБКА ДАНИХ ГЛИБИН ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЗЙОМКИ АКВАТОРІЙ СУДНОПЛАВНИХ ШЛЯХІВ

У статті розглянуто застосування методів цифрової обробки сигналів для обробки даних про глибини акваторій судноплавних шляхів. Проаналізовано причини виникнення шумів, що вносять похибки у результати зйомки. Розроблено метод фільтрації даних глибин, що забезпечує ефективне вилучення цих шумів.

Вступ. Для гарантування безпеки судноплавства в територіальних водах України вкрай важливим є складання морських навігаційних карт акваторій портів, гаваней, судноплавних каналів і прибережних фарватерів. Оскільки через природні процеси (нанесення мулу з річок, осідання пилу тощо) глибини цих районів весь час змінюються, то відповідного оновлення потребують і навігаційні карти. Тому вкрай важливою є задача проведення точних та достовірних вимірювань глибини судноплавних шляхів.

Для вимірювання глибин, як правило, використовують гідроакустичні пристрої і метод ехолокації [1]. У порівнянні з іншими відомими методами [1 та інші] перевагою методу ехолокації є відносна простота випромінювачів сигналів та приймальної апаратури. Однак слід зазначити, що даний метод може давати похибки при проведенні вимірювань. Отже проблема фільтрації даних глибини, отриманих методом ехолокації (виключення недостовірних даних і фільтрація шумів, що накладені на корисний сигнал), є вельми **актуальною**.

Метою даної роботи є аналіз причин виникнення шумів при вимірюванні глибини судноплавних шляхів методом ехолокації, а також розробка ефективних методів фільтрації шумів, виключення аномальних результатів вимірювань та стиснення отриманої вимірювальної інформації.

Аналіз причин шумів при ехолокації. Основними причинами появи шумів при ехолокації є:

- нестала швидкість розповсюдження звуку у воді;
- рефракція звукових променів;
- реверберація;
- шуми об'єкта, на якому встановлено гідроакустичний пристрій;
- власні шуми гідроакустичного пристрою.

Розглянемо ці причини більш детально, звертаючи основну увагу на властивості кожного виду шумів, від яких залежить використання відповідних методів фільтрації.

Нестала швидкість розповсюдження звуку у воді. У класичній гідроакустиці рідину прийнято вважати акустично однорідним суцільним середовищем. Крім того, припускають, що зміни густини та тиску середовища є незначними. За таких припущень швидкість c звуку у воді визначається формулою Лапласа:

$$c^2 = \frac{1}{K\rho_0} \approx \frac{1}{K\rho}, \quad (1)$$

де ρ_0 – густина рідини при відсутності звукового поля; ρ – густина рідини, що знаходиться в звуковому полі; $K = K_a$ – адіабатичний коефіцієнт стискуваності рідини, $K_a = (c_p/c_v)K_i = \gamma K_i$, де K_i – ізотермічний коефіцієнт стискуваності; $\gamma = (c_p/c_v)$ – відношення теплоємностей при постійних тиску та об'ємі рідини (для води $\gamma = 1$).

Однак воду в морі не можна розглядати як однорідне суцільне середовище. Через присутність частинок мулу, планктону та бульбашок газу, існування градієнтів температури і солоності, а також через флуктуації густини воду слід розглядати як акустично неоднорідне середовище. Таким чином, реальна швидкість розповсюдження звукових хвиль у воді не є сталою, обчисленою за формулою (1), а змінюється вздовж всього шляху звукових променів.

Експериментально встановлено, що величини, які входять до формули (1), залежать від температури T , солоності S та статичного тиску P_0 :

$$K = K(T, S, P_0), \quad \rho = \rho(T, S, P_0). \quad (2)$$

Густина води ρ росте з ростом тиску P_0 та солоності S , а зі збільшенням температури T зменшується, причому зміни густини у порівнянні зі змінами коефіцієнта K є набагато меншими. Зі збільшенням P_0 , S , і T коефіцієнт K зменшується, причому найменше він залежить від P_0 . Оскільки

розподіл тиску, солоності та температури за об'ємом води є досить складним, то і зміни швидкості звуку вздовж шляху його розповсюдження можуть бути найрізноманітнішими. Але на практиці для обчислень приймають усереднене значення швидкості звуку. Для компенсації методичної похибки від несталої швидкості розповсюдження звуку у воді використовують значення швидкості звуку та поправок з морехідних таблиць

МП-73, що розраховані для різних значень P_0 , S , і T .

Внаслідок флуктуацій температури, солоності та густини виникають адитивні випадкові похибки при вимірюваннях, які в загальному випадку можна представити білим шумом. Величина цих похибок є незначною, при вимірюванні глибини 30 м вона складає 0,15 м. За допомогою смугової фільтрації сигналу, що застосована в комплексі "Промінь" [1], дані похибки можна виключити майже повністю.

Рефракція звукових променів. Акустично неоднорідне море зазвичай представляють у вигляді багатошарової моделі. Вважають, що море складається з окремих горизонтальних шарів, в кожному з яких густина води та швидкість звуку сталі. Звуковий промінь, розповсюджуючись у такому середовищі, відбивається та переломлюється, що призводить до викривлення траєкторії променя та розсіювання звукової енергії, тобто відбувається рефракція звуку. Море поділяють, як правило, на три основних шари: ізотермічний (вертикальні градієнти температури та густини дорівнюють нулю); шар стрибка (характеризується різким від'ємним градієнтом температури); придонний шар (практично ізотермічний, вертикальні градієнти температури та густини дорівнюють нулю).

В ізотермічному шарі внаслідок рефракції траєкторія розповсюдження звукового променя має форму дуги кола з радіусом c^*/g_c , де c^* – стала Снелліуса, $g_c = 0,0182c^{-1}$ – градієнт швидкості звуку в ізотермічному шарі.

В шарі стрибка відбувається сильна рефракція променів та значне зниження інтенсивності звуку внаслідок різкого розширення фронту хвилі при рефракції на межі ізотермічного шару та шару стрибка. Крім того, частина променів відбивається від межі шарів у бік поверхні моря. Крайні промені розщепленого пучка утворюють зону звукової тіні (рис. 1).

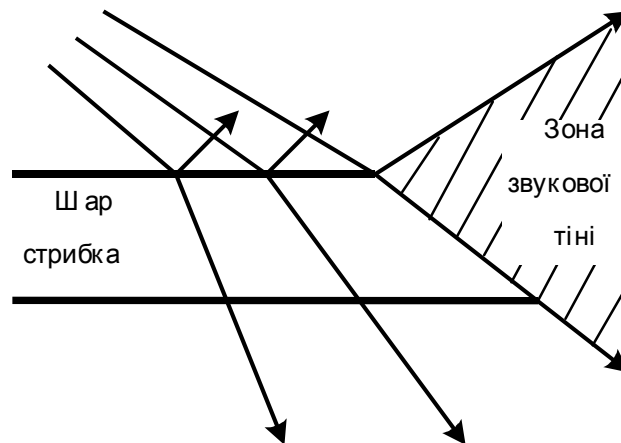


Рис. 1. Рефракція звукових променів у шарі стрибка

Таким чином, внаслідок рефракції, по-перше, викривлюється траєкторія звукового променя. Це призводить до певної некоректності оцінок глибин за результатами вимірювань. По-друге, послаблюється сигнал, що приходить на приймальну антену гідроакустичного пристрою, і знижується співвідношення сигнал/шум для цього сигналу, що робить задачу фільтрації значно складнішою. Викривлення траєкторії не є досить значним. Другу проблему найпростіше побороти, використавши потужне імпульсне джерело звуку з достатньо вузьким променем і чутливу широкосмугову антену. Наприклад, у комплексі "Промінь" [1] використовуються гостро направлені випромінюючі та широкосмугові приймальні антени.

Реверберація. Корисний сигнал, який приймає антена гідроакустичного пристрою, супроводжується перешкодою – затухаючим звучанням, що обумовлено процесом випромінювання звукової енергії в воду, і називається реверберацією. Реверберація є результатом численних та дуже слабких відбиттів від малих тіл та неоднорідностей, що зустрічаються на шляху звукової хвилі. Найбільш ефективними розсіювачами є повітряні бульбашки, зважені тверді частинки, мікроорганізми, флуктуації густини води тощо.

Для боротьби з реверберацією використовують короткочасове імпульсне випромінювання. Це дозволяє добитися швидкого затухання реверберації при збереженні енергії імпульсу. Однак, враховуючи присутність інтерференції звукових хвиль, відбитих від різних тіл, а також те, що антени весь час знаходяться в русі, слід сказати, що ревербераційні шуми є достатньо серйозною проблемою при вимірюванні малих глибин.

Шуми об'єкта, на якому встановлено гідроакустичний пристрій. При вимірюваннях за допомогою гідроакустичного пристрою слід пам'ятати, що на роботу цього пристрою впливають акустичні перешкоди механічного походження. Шуми суднових машин та механізмів (передаються через корпус судна) та гвинтів (викликані кавітацією при роботі гвинта), а також гідродинамічний шум, що виникає при обтіканні корпусу судна водою, сильно ускладнюють, а іноді і унеможливають роботу гідроакустичного пристрою. Так, на практиці спостерігались випадки, коли на судні в дрейфі вимірювання проходили нормально, а на ходу судна в показах приладу виникали пропуски.

Найбільший вклад в перешкоди дає гідродинамічний шум, причиною якого є нерегулярний потік рідини, що омиває підводну частину судна. Цей шум зростає при збільшенні швидкості ходу. При досягненні певної швидкості робота гідроакустичного пристрою взагалі стає неможливою.

Найімовірнішою причиною погіршення роботи гідроакустичного пристрою при русі судна є збільшення кількості бульбашок повітря у шарі води, що безпосередньо прилягає до корпусу судна. Вплив бульбашок повітря на роботу гідроакустичного пристрою пояснюється тим, що збільшується поглинання та розсіювання енергії на бульбашках, а також змінюється швидкість звуку у воді. Крім того, при певних умовах можливе виникнення резонансних коливань, при яких поглинання та розсіювання енергії буде максимальним. Для зниження впливу цих шумів слід ретельно обирати місця для встановлення антен гідроакустичного пристрою. Антени слід встановлювати якнайдалі від суднових машин та механізмів, у місцях, де обтікання є ламінарним (подалі від носа та кіля судна).

Власні шуми гідроакустичного пристрою. Методичні похибки гідроакустичного пристрою (похибки, обумовлені нахилом дна, базою антен тощо) мають детермінований характер і можуть бути алгоритмічно компенсовані. Однак сам гідроакустичний пристрій, насамперед його електроніка, також є джерелом різноманітних шумів (температурний, дробовий шуми тощо). Зрозуміло, що такі шуми ускладнюють процес розпізнавання корисного сигналу та є причиною додаткових похибок при вимірюваннях. Заходи боротьби з власними шумами гідроакустичного пристрою є специфічними для кожної моделі пристрою і можуть включати зміни конструктивного характеру (наприклад, застосування мікросхем з низьким рівнем шумів), термостабілізацію та інші заходи. Більшу частину таких шумів можна відфільтрувати за допомогою аналогових та цифрових фільтрів ехосигналу.

Виключення аномальних результатів вимірювань. Як відзначалося раніше, шуми гідродинамічного походження можуть призводити до порушення роботи гідроакустичного пристрою (втрата сигналу і пропуски в результатах вимірювань). Подальша обробка таких пошкоджених сигналів може призвести до того, що аномальні результати будуть сприйняті інформаційною системою як реально виміряні, тобто до недопустимо великих похибок. Тому, перш ніж проводити фільтрацію даних, слід виключити аномальні результати вимірювань та, по можливості, відновити вимірювальну інформацію.

Аномальні результати вимірювань можуть мати форму:

- одиночних аномальних відліків;
- пакетів аномальних відліків;
- розривів у послідовності відліків вимірювальної інформації.

Для виявлення та виключення аномальних відліків можливе застосування різноманітних алгоритмів. Наприклад, в роботі [2] пропонується алгоритм, заснований на визнанні аномальними відліків, що відрізняються від поточних значень сигналу більше, ніж на певну величину. Перевагами даного алгоритму є його простота реалізації та швидкість роботи. Однак суттєвим недоліком є те, що алгоритм орієнтований на обробку гладких неперервних сигналів.

Результат вимірювань профілю дна в більшості випадків не є таким сигналом; можливі обриви дна, різкі краї різноманітних об'єктів, що затонули, тощо. Тому пряме застосування такого алгоритму неможливе. На основі алгоритму [2] було розроблено новий удосконалений алгоритм виключення аномальних результатів вимірювань, який враховує вказані особливості. В удосконаленому алгоритмі не проводиться збільшення інтервалу допуску для кожного нового аномального відліку. Замість цього приймається, що виміряні відліки не є аномальними, якщо кількість аномальних відліків перевищує певну величину. Ця величина вибирається, виходячи з мінімальних розмірів об'єктів, що можуть знаходитися на дні і підлягають реєстрації, а також з швидкості руху судна. У випадку, коли пакет відліків визнано аномальним, він замінюється лінійно інтерпольованими даними, в протилежному випадку послідовність відліків залишається незмінною.

Крім того, враховуючи особливості вимірювальної інформації, прийнятої з гідроакустичного пристрою, проводиться виключення відліків з аномально малим та аномально великим значеннями

глибини. Значення цих відліків замінюються на гранично допустимі мінімальні та максимальні значення глибини відповідно.

Практичне застосування розглянутих методів і алгоритмів для обробки вимірювань, зроблених у гирлі р. Дунай, довели їх ефективність при роботі з реально виміряними даними глибини.

Фільтрація шумів у вимірювальній інформації про глибину судноплавних шляхів. Фільтрації шумів у вимірювальній інформації проводиться після відкидання аномальних відліків. Для такої фільтрації можливе застосування різноманітних фільтрів. Однак класична цифрова фільтрація спрямована на поліпшення співвідношення сигнал/шум для сигналів, які є періодичними, і виконується шляхом підсилення або послаблення певних частот [3, 4]. Зрозуміло, що вимірювальна інформація про глибину (профіль дна) не є періодичним сигналом. Тому застосування класичної частотної фільтрації у даному випадку слід обмежити фільтрацією вихідного сигналу попереднього підсилювача гідроакустичного пристрою. Це дозволяє зменшити вплив більшості видів шумів на сигнал, який далі обробляється з метою визначення відстані до дна водойми.

Застосування фільтрації вихідного сигналу попереднього підсилювача дозволяє позбавитись шумів, причиною яких є суднові машини та механізми, і частоти яких лежать поза частотним діапазоном випромінювання антени гідроакустичного пристрою. Однак шуми ревербераційного та рефракційного походження, частоти яких співпадають або близькі до частоти випромінювання гідроакустичного пристрою, а також широкосмугові шуми різноманітного походження, спектр яких близький до білого шуму, не видаляються такою фільтрацією.

Для того, щоб зменшити вплив вказаних видів шумів, що залишилися у вимірювальній інформації про глибину, запропоновано проводити згладжування відліків за формулою:

$$\bar{d}_i = \begin{cases} d_i, & i = 1 \text{ або } N, \\ \frac{d_{i-1} + 2d_i + d_{i+1}}{4}, & i = 2 \dots N - 1, \end{cases} \quad (3)$$

де \bar{d}_i – згладжені відліки вимірювальної інформації про глибину; d_i – початкові відліки вимірювальної інформації про глибину; N – загальна кількість відліків.

Застосування наведених методів фільтрації дозволяє зменшити вплив випадкових шумів на вимірювальну інформацію, не витрачаючи при цьому значних об'ємів пам'яті обчислювального пристрою та забезпечивши обробку вимірювальної інформації в реальному масштабі часу. Слід зазначити, що негативним наслідком такої операції може стати згладжування різких контурів об'єктів, що лежать на дні. Це слід враховувати при складанні планів дна водойми.

Висновки. В результаті проведених досліджень проаналізовано причини виникнення шумів, що вносять похибки у результати зйомки глибин судноплавних шляхів, визначено властивості цих шумів, що суттєво впливають на точність зйомки. Розроблено удосконалений алгоритм виключення аномальних відліків результатів вимірювання глибин. Визначено послідовність дій по фільтрації шумів, яка використовує згладжування сигналу та забезпечує ефективне вилучення цих шумів.

Запропоновані методи дозволили вирішити задачу фільтрації вимірювальної інформації про глибину судноплавних шляхів, отриманої за допомогою гідроакустичних пристроїв. Предметом подальших досліджень може бути автоматизація процесу налаштування параметрів алгоритмів фільтрації в процесі проведення зйомки глибин судноплавних шляхів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Корякін А., Іванов С.* Деякі питання створення навігаційного комплексу для промірних робіт і площинних зйомок // Вісник Держгідрографії. – 2003. – № 3. – С. 2–3.
2. *Григоренко А.М.* Некоторые вопросы теории технической информации. – М.: Издательство “ЮБЕКС”, 1998. – 112 с.
3. *Даджион Д., Мерсеро Р.* Цифровая обработка многомерных сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 488 с.
4. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

ІВАНОВ Сергій Вікторович— кандидат технічних наук, директор ПКТБ “Марінекс”.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання механічних величин;
- цифрова обробка сигналів.

ОЛІЙНИК Павло Борисович — аспірант Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Наукові інтереси:

- гідролокація;
- цифрова обробка сигналів.

Подано 10.03.2006

Иванов С.В., Олійник П.Б. Цифрова обробка даних глибин при проведенні зйомки акваторій судноплавних шляхів

Иванов С.В., Олійник П.Б. Цифровая обработка данных глубин при проведении съемки акваторий судоходных путей

Ivanov S.V., Oliynyk P.B. Digital data processing of depths for survey of water areas of shipping routes

УДК 531.383

Цифрова обробка даних глибин при проведенні зйомки акваторій судноплавних шляхів / С.В. Иванов, П.Б. Олійник // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 2(37) / Технічні науки. – С. ??-??. – Бібліогр.: 4 назв.

В статті розглянуто застосування методів цифрової обробки сигналів для обробки даних про глибини акваторій судноплавних шляхів. Проаналізовано причини виникнення шумів, що вносять похибки у результати зйомки. Розроблено метод фільтрації даних глибин, що забезпечує ефективне вилучення цих шумів.

УДК 531.383

Цифровая обработка данных глубин при проведении съемки акваторий судоходных путей / С.В. Иванов, П.Б. Олійник // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 2(37) / Технічні науки. – С. ??-??. – Бібліогр.: 4 назв.

В статье рассмотрено применение методов цифровой обработки сигналов для обработки данных о глубинах акваторий судоходных путей. Проанализированы причины возникновения шумов, которые вносят погрешности в результаты съемки. Разработан метод фильтрации данных глубины, обеспечивающий эффективное удаление этих шумов.

УДК 531.383

Digital data processing of depths for survey of water areas of shipping routes / S.V. Ivanov, P.B. Oliynyk // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 2(37) / Технічні науки. – Р. ??-??. – Refs.: 4 titles.

In a paper the application of methods digital signals processing about depths of water areas of shipping routers is considered. The reasons of origin of noise are analysed which bring in errors to outcomes of survey. The method of a filtration of data's of depths ensuring effective deleting of these noises is developed.