

УДК 681.883.41

О. В. Онищук;

С. Т. Барась, к. т. н., доц.

МОДЕЛЮВАННЯ ДОПЛЕРІВСЬКОГО СИГНАЛУ

Запропоновано математичну модель доплерівського сигналу у вигляді суми сигналів від N розсіювачів, розміщених в межах озвученої ділянки морського дна. Виконано моделювання доплерівського сигналу для підтвердження коректності отриманих співвідношень.

Вступ

В класичній літературі про доплерівські лаги автори велику увагу приділяють детальному аналізу гідроакустичних доплерівських сигналів. І це зрозуміло, тому що точність вимірювання швидкості носія лагом залежить, в першу чергу, від точності вимірювання доплерівської частоти донного луно-сигналу. У наші дні з появою високошвидкісних комп'ютерів відкривається можливість вивчення тонкої структури донних луно-сигналів шляхом їх моделювання з метою підвищення точності вимірювання доплерівських зсувів частоти, а, отже, і швидкості носія.

Постановка задачі

Для глибшого дослідження тонкої структури доплерівських сигналів необхідно провести моделювання цих сигналів з урахуванням змін, які відбуваються з ними під час проходження шляху «передавач—дно—приймач». Змодельований сигнал за своїми просторово-часовими характеристиками та основними параметрами повинен бути схожий з реальними доплерівськими сигналами. Аналіз змодельованого луно-сигналу дозволить зробити відповідні висновки щодо процесів, які впливають на тонку структуру доплерівських сигналів.

Математична модель доплерівського сигналу

Розглянемо процес розсіювання випроміненого сигналу ділянкою дна та формування донного луно-сигналу за таких спрощених умов: носій лага рухається рівномірно та прямолінійно зі швидкістю V , хитавиця відсутня, середовище розповсюдження не створює впливу на спектральний склад луно-сигналу.

Передавальна антена імпульсного гідроакустичного доплерівського лага випромінює радіоімпульси $s_0(t)$ — вузькосмугові сигнали, які традиційно застосовуються в гідроакустиці. Аналітично випромінений радіоімпульс описується виразом

$$s_0(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

де φ_0 — початкова фаза випромінювання імпульсу; A_0 — амплітуда сигналу; f_0 — центральна несуча частота.

Використавши формулу (1) як математичну модель і прийнявши, що $A_0 = 1$, $f_0 = 100000$ Гц і $\tau_0 = 0,05$ с, можна виконати моделювання радіоімпульсу за мить до випромінювання його антеною, рис. 1.

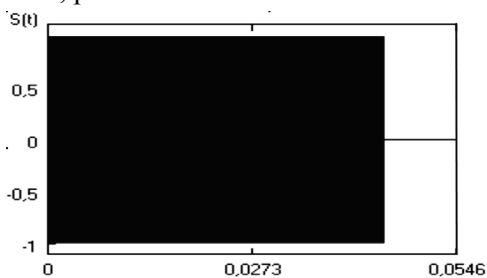


Рис. 1. Початковий радіоімпульс

На рис. 1 чітко видно, що обвідна радіоімпульсу має прямокутну форму, яка визначається амплітудою $A_0 = 1$ та тривалістю $\tau_0 = 0,05$ с, високочастотне заповнення дорівнює несучій частоті $f_0 = 100000$ Гц і не містить доплерівського зсуву. З моменту випромінювання обвідна сигналу та високочастотне заповнення будуть змінюватись.

Відомо, що в процесі випромінювання та прийому рухомим об'єктом сигналу, а також під час розповсюдження

цього сигналу в водному середовищі і розсіювання його дном, фаза цього сигналу змінюється, що приводить до змін його несучої частоти та зміни його обвідної [1]. Оскільки об'єкт випромінювання та прийому сигналів рухається, то зміну фази слід розглядати в часі. Отже, якщо в формулу (1) ввести складову зміни фази, яка залежить від швидкості носія і є функцією часу $\Delta\varphi(t)$, а також зміну амплітуди A , тоді вираз для луно-сигналу буде мати такий вигляд:

$$s(t) = A \sin[2\pi f_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi(t)]. \quad (2)$$

Знайдемо аналітичний вираз для складової зміни фази $\Delta\varphi(t)$. Для цього детально проаналізуємо процес випромінювання радіоімпульсу, процес прийому луно-сигналу, а також процес розповсюдження випроміненого сигналу в морському середовищі та розсіюванні його дном.

Нехай об'єкт, який рухається прямолінійно та рівномірно із швидкістю V , в деякий момент часу починає випромінювати радіоімпульс тривалістю τ_0 під кутом α_i до горизонту. Кут α_i визначає напрямок радіус-вектора на i -й розсіювач дна та початкову відстань R_{1i} від рухомого об'єкту до i -го розсіювача дна (рис. 2)

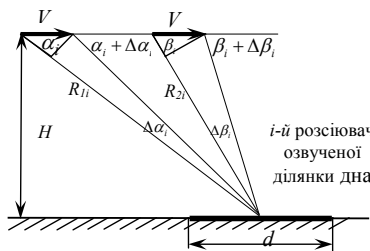


Рис. 2. Озвучення випроміненим сигналом ділянки дна

$$R_{1i} = \frac{H}{\sin \alpha_i}, \quad (3)$$

де H — глибина під кілем об'єкту плавання.

Очевидно, що протягом часу випромінювання імпульсу τ_0 за рахунок руху відстань R_{1i} між рухомим об'єктом випромінювання та i -м розсіювачем дна в кожний момент часу буде зменшуватись на величину $\Delta R_{1i}(t)$, яку можна визначити як проекцію вектора швидкості \vec{V} рухомого об'єкту на напрямок радіус-вектора, проведеного від передавальної антени носія до i -го розсіювача дна в кожний момент часу випромінювання (див. рис. 2)

$$\Delta R_{1i}(t) = Vt \cos[\alpha_i + \Delta\alpha_i(t)]. \quad (4)$$

Оскільки під час випромінювання змінюється фаза сигналу, тоді випромінений сигнал буде мати іншу частоту f_{1i} , відмінну від початкової частоти f_0 . Очевидно ця різниця дорівнює доплерівському зсуву частоти $f_{Дi}$, який виникає за рахунок руху носія під час випромінювання сигналу

$$f_{1i} = f_0 + f_{Дi}. \quad (5)$$

Тоді зміну фази під час випромінювання можна знайти як різницю ходу на відстані «передавач — i -й розсіювач дна» в кожний момент часу випромінювання

$$\Delta\varphi_{1i}(t) = \frac{2\pi f_{1i}}{c} \{R_{1i} - \Delta R_{1i}(t)\} = \frac{2\pi f_{1i}}{c} \left\{ \frac{H}{\sin \alpha_i} - Vt \cos[\alpha_i + \Delta\alpha_i(t)] \right\}. \quad (6)$$

Під час прийому протягом тривалості луно-сигналу, відбувається зміна відстані R_{2i} « i -й розсіювач дна—приймач» на величину $\Delta R_{2i}(t)$ та зміна кута прийому β_i на величину $\Delta\beta_i(t)$. Аналогічно процесу випромінювання для зміни фази $\Delta\varphi_{2i}(t)$, під час прийому запишемо

$$\Delta\varphi_{2i}(t) = \frac{2\pi f_{1i}}{c} \{R_{2i} - \Delta R_{2i}(t)\} = \frac{2\pi f_{1i}}{c} \left\{ \frac{H}{\sin \beta_i} - Vt \cos[\beta_i + \Delta\beta_i(t)] \right\}. \quad (7)$$

Отже, враховуючи вираз (6) та (7), загальна зміна фази $\Delta\varphi_i(t)$ луно-сигналу, розсіяного i -м елементом дна

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i(t) &= \Delta\varphi_{1i}(t) + \Delta\varphi_{2i}(t) = \frac{2\pi f_{1i}}{c} \frac{H}{\sin \alpha_i} - \frac{2\pi f_{1i}}{c} Vt \cos[\alpha_i + \Delta\alpha_i(t)] + \\ &+ \frac{2\pi f_{1i}}{c} \frac{H}{\sin \beta_i} - \frac{2\pi f_{1i}}{c} Vt \cos[\beta_i + \Delta\beta_i(t)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Загальний вираз для луно-сигналу, розсіяного i -м розсіювачем дна матиме вигляд

$$s_i(t) = A_i \sin [2\pi f_0 t + \varphi_{0i} + \Delta\varphi_{1i}(t) + \Delta\varphi_{2i}(t)]. \quad (9)$$

Безперечно, вирішальне значення під час формування донного луно-сигналу має природна границя розподілу двох середовищ: вода—дно. Так, випромінений передавальною антеною лага радіоімпульс з частотою f_0 розсіюється у вигляді n синусоїд в межах певної ділянки дна протяжністю d , яка фактично визначається характеристикою спрямованості антени лага. Виходячи з нескладних геометричних розрахунків (якщо кут нахилу характеристики спрямованості відносно горизонту $\alpha = 60^\circ$, а її ширина $\Delta = 3^\circ$) очевидно, що протяжність розсіювальної ділянки морського дна d має досить суттєві розміри, у порівнянні з глибиною H під кілем носія (при $H = 100$ м, $d = H \left[\frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha - \Delta\alpha/2)} - \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \Delta\alpha/2)} \right] = 7$ м). Оскільки випромінювання від-

бувається під кутом до морського дна, то площа розсіювальної поверхні дна в процесі озвучення ділянки змінюється. Передній та задній фронти луно-сигналу схожі, тому що вони мають незавешену просторово-часову структуру. Це пояснюється неповним озвученням ділянки дна. І навпаки, основна частина луно-сигналу формується одночасно за допомогою сукупності всіх елементів ділянки дна, озвученої випроміненим сигналом.

Озвучена ділянка дна під час розсіювання випроміненого радіоімпульсу формує n сигналів, які описуються синусоїдальною функцією, кожному з яких відповідає i -й розсіювальний елемент ділянки дна. Кожний такий елементарний сигнал від передавача до приймача в межах характеристики спрямованості проходить індивідуальний маршрут R_i (рис. 2), довжина якого визначає амплітуду A_i , фазу $\varphi_0 + \Delta\varphi_i(t)$ та частоту $(f_0 + \Delta f_n)$ кожного сигналу. На приймальній антені відбувається додавання n елементарних сигналів в часі. Отже, модель луно-сигналу можна представити у вигляді суми розсіяних дном змішених у часі n сигналів, що описуються синусоїдальною функцією з різними амплітудами, частотами, фазами

$$s(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin [2\pi f_0 t + \varphi_{0i} + \Delta\varphi_{1i}(t) + \Delta\varphi_i + \Delta\varphi_{2i}(t)]. \quad (10)$$

Слід зазначити, що сигнали, які описуються синусоїдною функцією надходять на приймальну антену не одночасно, а у визначені для кожного з них проміжки часу, які залежать від довжини пройденого сигналом шляху «передавач—дно—приймач», та тривалості імпульсу випромінювання.

Моделювання доплерівського сигналу

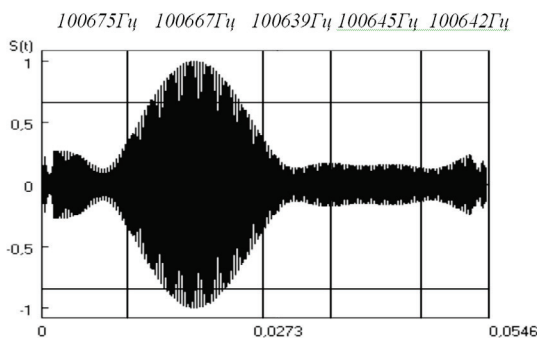


Рис. 3. Змодельований доплерівський луно-сигнал

Враховуючи наведені вище міркування та використавши вираз (10) як математичну модель, здійснено моделювання в середовищі Delphy7 і отримано модель луно-сигналу, яка за своїми просторово-часовими характеристиками схожа з реальними доплерівськими луно-сигналами, рис. 3.

На рис. 3. показано результат моделювання доплерівського луно-сигналу. Вхідні параметри: тривалість випроміненого радіоімпульсу $\tau_0 = 0,05$ с, амплітуда $A_0 = 1$, високочастотне заповнення $f_0 = 100000$ Гц, кут випромінювання відносно горизонту $\alpha = 60^\circ$, ширина характеристики спрямо-

ваності $\Delta = 3^\circ$, швидкість руху носія $V = 10$ м/с, глибина $H = 100$ м. Порівнюючи вихідний радіоімпульс, (див. рис. 1), та змодельований луно-сигнал (рис. 3), видно, що обвідна змодельованого луно-сигналу має непостійну амплітуду. Тривалість луно-сигналу більша тривалості вихідного радіоімпульсу. Вимірювання несучої частоти луно-сигналу виконувалось в межах певних стробів вимірювання, які вибирались відповідно характеру поведінки обвідної змодельованого сигналу, і на рис. 3 показані вертикальними лініями. В межах кожного стробу виконано вимірювання несучої частоти методом підрахунку кількості «нулів». Результати вимірювання частоти показані на рис. 3

безпосередньо над відповідним стробом вимірювання. В межах тривалості луно-сигналу виконано вимірювання частоти обвідної цього сигналу, яка склала 35 Гц.

Висновки

1. Тривалість змодельованого сигналу більша тривалості вихідного радіоімпульсу, що, очевидно, пов'язано з випромінюванням та прийомом сигналу під кутом до горизонту.

2. Частоти несучої переднього та заднього фронтів змодельованого луно-сигналу суттєво відрізняються від несучої частоти середньої частини сигналу. Це пов'язано з тим, що під час формування переднього та заднього фронтів луно-сигналу беруть участь не всі розсіювальні елементи озвученої ділянки дна.

3. Частота несучої луно-сигналу містить доплерівський зсув та має фазо-модульований характер. Модуляція виникає за рахунок руху носія та зміни фази сигналу в процесі випромінювання та прийому луно-сигналу.

4. Зміна амплітуди і (або) фази на етапі проходження сигналом відстані «передавач—дно—приймач», а також кількість розсіювальних елементів озвученої ділянки дна впливають на характер обвідної луно-сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барась С. Т. Формування височастотного заповнення луно-сигналу гідроакустичного доплерівського лага // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2000. — № 4. — С. 89—93.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007)» (31.05—2.06.2007 р.)

Надійшла до редакції 30.09.07
Рекомендована до друку 04.10.07

Онищук Олег Володимирович — аспірант, **Барась Святослав Тадіонович** — доцент.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет