

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

I. Bezverbnyi

THE FREQUENCY PHASE ANALYSIS ALGORITHMIC BASE IN THE SONAR SYSTEMS

The problems of the algorithmic base development on the basis of the methods which allow calculating exactly the frequency and phasing parameters of a signal consisting harmonic components for the active sonar systems are examined.

Key words: sonar systems, bit net, tonal analysis.

Рассмотрены проблемы создания скоростной алгоритмической базы для систем активной гидролокации на основе методов, позволяющих точно определять частотно-фазовые параметры сигналов, состоящих из гармонических составляющих.

Ключевые слова: системы гидролокации, разрядная сетка, тональный анализ.

Розглянуто проблеми створення швидкісної алгоритмічної бази для систем активної гідролокації на основі методів, що дозволяють точно визначити частотно-фазові параметри сигналів, які складаються з гармонічних складових.

Ключові слова: системи гідролокації, розрядна сітка, тональний аналіз.

© I.A. Bezverbnyi, 2014

УДК 004.383.3

I.A. БЕЗВЕРБНИЙ

АЛГОРИТМІЧНА БАЗА ЧАСТОТНО-ФАЗОВОГО АНАЛІЗУ У СИСТЕМАХ ГІДРОЛОКАЦІЇ

Вступ. Задача пеленгування і захисту від пеленгування підводних об'єктів за допомогою низькочастотних звукових сигналів є важливим напрямком технічної акустики. На сьогодні широко використовуються як системи активної гідролокації, яка дозволяє визначити підводний об'єкт за допомогою відбиття та розсіювання спеціально випроміненого сигналу, так пасивної, так званого шумопеленгування, тобто дослідження структури звукового поля. Попри зрозумілі переваги систем пасивної гідролокації, висока ефективність систем активної гідролокації на сьогодні обумовлює подальше їх використання і вдосконалення. Зокрема, розробка швидкісної алгоритмічної бази для систем активної гідролокації є питанням актуальним з огляду на збільшення вимог до розпізнавання підводних об'єктів. Слід зауважити, що системи активної гідролокації здебільшого використовують зондувальні тональні сигнали.

Ступінь розробки. Прикладом використання тональних сигналів і методів, подібних чисельно-аналітичним методам фазового і частотно-фазового аналізу [1–5] в сучасних системах гідролокації, можуть слугувати алгоритмічні розробки для малої системи гідролокації [6]. Та ж алгоритмічна база використовується для визначення гасіння звукової хвилі, що розглядається в роботах [7, 8]. Загалом, зазначені системи гідролокації розроблялися на основі процесорних систем з фіксованою точкою, тому розрахунок необхідного запасу розрядної сітки Δn для нерекурсивних алгоритмів [9–11], тобто визначення кількості додаткових розрядів, необхідних для збіль-

шення розрядності вхідних даних під час обчислення результату із задалегідь визначеною помилкою, є частиною алгоритмічної бази фазочастотного аналізу.

Метою статті є розробка алгоритмічної бази частотно-фазового аналізу в системах гідролокації, що передбачає визначення точності методів, отриманих на основі аналітичних співвідношень, коли обчислення відбувається з машинною помилкою.

Частотно-фазова демодуляція багатотонального сигналу. Метод розроблено на основі чисельно-аналітичного методу демодуляції цифрового двотонального сигналу [4]. Задача розв'язується шляхом побудови і вирішення аналогічної системи з $2 \cdot m$ рівнянь, яке відбувається за допомогою «процесу» Зейделя. Система рівнянь приводиться до вигляду, в якому кожне з невідомих буде представлено через інші невідомі.

$$\begin{cases} \dots \\ \omega_i^{\text{BX}} = \arccos \frac{B(\omega_i) - K(\omega_i) \cdot R_{1,2}(\omega_i) \cdot C(\omega_i)}{1 - K(\omega_i) \cdot R_{1,2}(\omega_i)}; \\ \dots \\ \theta_i^{\text{BX}} = \arctg \frac{\text{tg}(0,5 \cdot \omega_i^{\text{BX}})}{\text{tg}(0,5 \cdot \omega_i) \cdot P(\omega_i)}; \\ \dots \end{cases} \quad (1)$$

Кількість ітерацій, необхідна для вирішення таких систем, менша за $4 \cdot 10^2$. Значення $B(\omega_i)$, $C(\omega_i)$, $K(\omega_i)$ – константи закладені в пам'яті процесора, кількість цих констант відповідає роздільній здатності частотного аналізатора. Необхідний запас розрядної сітки алгоритму частотної демодуляції однотонального сигналу для ЕОМ з фіксованою точкою за умови високоточного методу визначення тригонометричних функцій розраховується за формулою:

$$\Delta n \geq \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left(\frac{R}{S} \right), \quad (2)$$

де

$$R = \left(\frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{-\frac{g}{1 - \hat{x}_{\min} \cdot h} + \frac{(d - \hat{x}_{\min} \cdot g) \cdot h}{(1 - \hat{x}_{\min} \cdot h)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d - \hat{x}_{\min} \cdot g}{1 - \hat{x}_{\min} \cdot h} \right)^2}} \right)^2 + 1; \quad (3)$$

$$S = 2 \cdot \delta \cdot \left(\frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{-\frac{g}{1 - \hat{x}_{\min} \cdot h} + \frac{(d - \hat{x}_{\min} \cdot g) \cdot h}{(1 - \hat{x}_{\min} \cdot h)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d - \hat{x}_{\min} \cdot g}{1 - \hat{x}_{\min} \cdot h} \right)^2}} \right)^2. \quad (4)$$

Аналіз необхідного запасу розрядної сітки алгоритму показав, що для роботи з процесорною системою з плаваючою точкою при розрядності 16 біт, алгоритм дозволяє отримати результат з дуже малою помилкою.

Аналогічно обчислюється необхідний запас розрядної сітки алгоритму фазової демодуляції однотонального сигналу для ЕОМ з фіксованою точкою:

$$\Delta n \geq \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left(\frac{R}{S} \right), \quad (5)$$

де

$$R = \left[\frac{u}{v \cdot \operatorname{Re}(\hat{x})_{\max} \cdot \left(1 + \frac{u^2 \cdot \operatorname{Im}(\hat{x})}{v^2 \cdot \operatorname{Re}(\hat{x})_{\max}} \right)} - \frac{u \cdot \operatorname{Im}(\hat{x})}{v \cdot \operatorname{Re}(\hat{x})_{\max}^2 \cdot \left(1 + \frac{u^2 \cdot \operatorname{Im}(\hat{x})}{v^2 \cdot \operatorname{Re}(\hat{x})_{\max}} \right)} \right]^2 + 1; \quad (6)$$

$$S = 2 \cdot \delta \cdot \left[\frac{u}{v \cdot \operatorname{Re}(\hat{x})_{\max} \cdot \left(1 + \frac{u^2 \cdot \operatorname{Im}(\hat{x})}{v^2 \cdot \operatorname{Re}(\hat{x})_{\max}} \right)} - \frac{u \cdot \operatorname{Im}(\hat{x})}{v \cdot \operatorname{Re}(\hat{x})_{\max}^2 \cdot \left(1 + \frac{u^2 \cdot \operatorname{Im}(\hat{x})}{v^2 \cdot \operatorname{Re}(\hat{x})_{\max}} \right)} \right]^2. \quad (7)$$

В даному випадку, для отримання результату з дуже малою помилкою необхідний запас розрядної сітки складає 16 біт. За цією схемою обчислюються параметри наведених далі гідроакустичних приладів.

Низькочастотна акустична вимірювальна система (НЧАВС). Ступінь розробки. Основою методів вимірювання коефіцієнта відбиття звуку в акустичних вимірювальних трубах є теорія поширення і відбиття плоских звукових хвиль, що нормально падають на плоску межу розділу середовищ. Згідно з методом, який використано в системі, коефіцієнт відбиття визначається як відношення показників тиску, отриманих у результаті проходження прямої та відбитої хвиль. Вимірювання здійснюються в полі стоячої хвилі. Це досягається шляхом формування за допомогою двох гідрофонів і спеціального фазообертального пристрою кардіоїдної діаграми направленості. Перша НЧАВС із цифровою обробкою сигналів і реалізацією алгоритмів однонаправленого прийому була описана в [15]. Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України спільно з КДНДІ “Гідроприлад” розробили НЧАВС для проведення досліджень в галузі технічної акустики за методом акустичної інтерферометрії [8, 13, 14].

Призначення системи. Дослідження таких акустичних характеристик як коефіцієнт відбиття R і коефіцієнт проходження матеріалів D виконується за допомогою акустичних труб імпульсним методом [12] і методом стоячих хвиль [8, 15]. В низькочастотній області $f < 4$ кГц через обмеження конструктивного характеру щодо розмірів труби застосовується метод стоячих хвиль з неперервним збудженням акустичного поля в стовпі води. Обробка сигналів здійснюється за допомогою двох приймачів, розташованих між випромінювачем і зразком у заповненій водою трубі. При цьому, відомими є значення частоти ω і швидкості звуку c та відстань між приймачами d_λ , приймачем і зразком r . Результати вимірювань R є чутливими щодо помилок визначення напруг, що ре-

єструються приймачами. За допомогою коефіцієнта відбиття як функції частоти за різноманітних значень температури T і тиску P описуються властивості відбиття матеріалів у воді. Отримання великої кількості інформації про властивості відбиття матеріалів у воді з необхідною точністю і в стислий термін можливе тільки за повної автоматизації процесу вимірювань на базі цифрових методів обробки сигналів. Схема роботи інтерферометра показана на рис. 1.

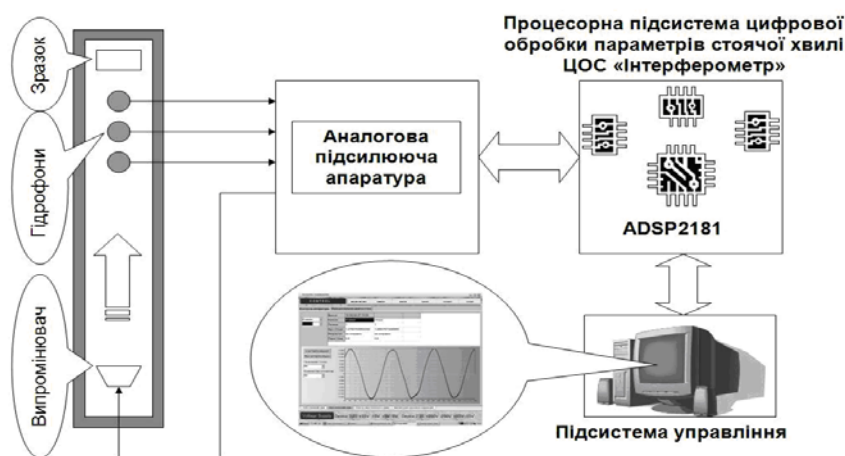


РИС. 1. Схема роботи інтерферометра

Фазовий аналіз у гідроакустичному інтерферометрі. Стояча хвиля, утворена у вимірювальній трубці інтерферометра має такий вигляд:

$$u_{\mu, \omega, n} = a_1 \cos \omega_1 nT + R_1 a_1 \cos(\omega_1 nT + \theta), \quad (8)$$

де

$$\theta = \omega_1 \left[\frac{(2 - \delta_{\mu, \nu}) d_{\mu} + 2r}{C} + \Theta_1 \right], \quad (9)$$

$$\delta_{\mu, 3} = \begin{cases} 1, & \mu = 3; \\ 0, & \mu \neq 3. \end{cases} \quad (10)$$

Швидкість звуку

$$C = 2 \cdot d \cdot \frac{\omega_2 \cdot \omega_1}{\omega_2 - \omega_1}, \quad (11)$$

де d – відстань між двома гідрофонами модуля коефіцієнта відбиття

$$R_t = a_t - 1. \quad (12)$$

Фаза коефіцієнта відбиття знаходиться за формулою

$$\Theta_1 = \frac{1}{\omega_t} \cdot \arccos \frac{\operatorname{Re}(F(j \cdot \omega_i)) - \operatorname{Re}(G(\omega_i))}{R_t \cdot \operatorname{Re}(G(\omega_i))} - \frac{(2 - \delta_{\mu, \nu}) d_{\mu} + 2r}{C}; \quad (13)$$

$$\operatorname{Re}(F(j \cdot \omega_i)) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} u_{\mu, \omega, v} \cdot \cos\left(\frac{\omega_i \cdot n \cdot T}{N}\right); \quad (14)$$

$$\operatorname{Re}(G(\omega_i)) = \frac{\sin(0,5 \cdot \Delta\omega_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{0,5 \cdot \Delta\omega_i \cdot T}{N}\right)} + \frac{\sin(\omega_i \cdot T + 0,5 \cdot \Delta\omega_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\omega_i \cdot T}{N} + \frac{0,5 \cdot \Delta\omega_i \cdot T}{N}\right)}. \quad (15)$$

Характеристики точності та аналіз розрядності алгоритму. За методами, розглянутими в [9–11], необхідний запас розрядної сітки

$$\Delta n \geq \frac{1}{2} \cdot \log_2\left(\frac{Q}{S}\right), \quad (16)$$

де

$$Q = \left[\frac{v}{R \cdot w \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\hat{x}_{\min} \cdot v - v^2}{R} - u\right)^2}} \right]^2 + 1, \quad (17)$$

$$S = 2 \cdot \delta \cdot \left[\frac{v}{R \cdot w \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\hat{x}_{\min} \cdot v - v^2}{R} - u\right)^2}} \right]^2, \quad (18)$$

$u = \frac{(2 - \delta_{\mu, v})d_{\mu} + 2r}{C}$, $v = \operatorname{Re}(G(f_i, \Delta f_i))$, $w = \omega_i$ можливі константи, які закладаються в пам'яті цифрового приладу.

Мала система гідролокації (МСГ) є активною гідроакустичною системою і складається з:

- корпусно-механічної частини (металевого циліндра з термоізоляційною оболонкою, що знаходиться в морі на глибині 10 метрів;
- аналогової акустичної підсистеми з 16 випромінювачів направленої діаграми направленості, 16 гідрофонів, розташованих рівновіддалено на директрисах циліндра, і апаратури аналогової обробки;
- багатопроцесорної підсистеми частотно-фазового аналізу вхідного тонального сигналу в режимі реального часу, що складається з восьми процесорів ADSP2188 і процесорної підсистеми цифрового зв'язку та кодування інформаційних даних і символів управління, яка міститься в середині циліндра;
- цифрової системи зв'язку підсистеми частотнофазового аналізу і підсисте-

ми управління з однопроцесорної системи кодування-декодування команд управління і гермоводу;

- підсистеми управління і візуалізації на базі персональної ЕОМ.

Аналогова обробка вихідних сигналів гідрофонів виконується підсилювачем прямого підсилення, аналогічним до того, що розглядався у гідроакустичному інтерферометрі. Підсилювальні канали також мають точносні параметри, подібні до тих, які зазначалися щодо роботи з гідроакустичним інтерферометром. Пристрої збудження акустичних випромінювачів також мають ідентичні особливості. Схема роботи МСГ показана на рис. 2.

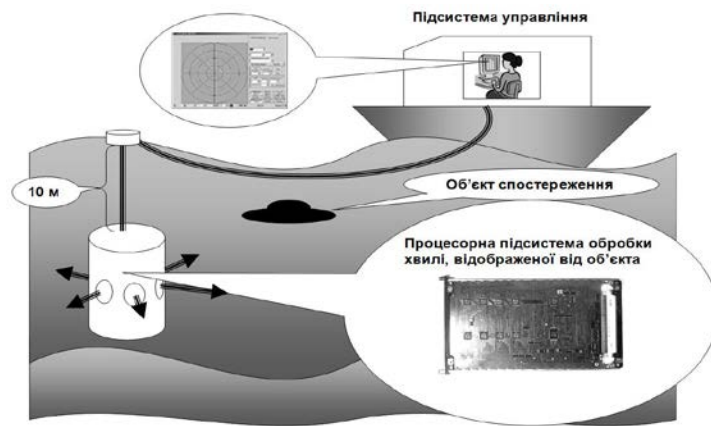


РИС. 2. Схема роботи МСГ

Частотно-фазовий аналіз у малій системі гідролокації. Сигнал, що надходить на відповідний за напрямком гідрофон має вигляд:

$$f(n \cdot T) = A \cdot \cos \left[\left(\omega + \frac{2 \cdot \Delta v_r}{C} \cdot \Omega_\lambda \right) \cdot n \cdot T + \theta \right]. \quad (19)$$

Відстань та швидкість в напрямку руху тонального сигналу:

$$r = \frac{C}{2} \left(\frac{\theta}{\omega} - \Theta \right), \quad (20)$$

$$v = C \cdot \frac{\Omega_\lambda - \omega}{\omega}, \quad (21)$$

де ω – кутова частота отриманого сигналу, Ω_λ – кутова частота сигналу, що виходить з випромінювача, Δv_r – радіальна складова швидкості, T – період дискретизації, C – швидкість звуку.

В результаті аналітичних перетворень, що базуються на системі рівнянь (1), отримані співвідношення, які дозволяють отримати параметри підводного об'єкта:

$$\omega = \arccos \frac{B(\omega_i) - \operatorname{Im}(K(\omega_i)) \cdot D(\omega_i) \cdot C(\omega_i)}{1 - \operatorname{Im}(K(\omega_i)) \cdot D(\omega_i)} - \frac{2 \cdot \Delta v_r}{C} \cdot \Omega_\lambda, \quad (22)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg}(0,5 \cdot \omega) \cdot \operatorname{Im}(A(\omega_i))}{\operatorname{tg}(0,5 \cdot \omega_i) \cdot \operatorname{Re}(A(\omega_i))}. \quad (23)$$

Висновки. Системи розроблені на елементній базі: процесор ADSP2181, сігма-дельта АЦП AD7715 та програмного продукту Delphi 7 фірми Borland Enterprises. Система керування функціонує з використанням ПК з операційною системою Windows XP. Використання розробленої алгоритмічної бази частотно-фазового аналізу в системах гідролокації показало свою придатність і ефективність у роботі.

1. Семотюк М.В. Численно-аналитический метод спектрального анализа тональных сигналов // УСiМ. – 2001. – № 1. – С. 36 – 42.
2. Безвербний І.А. Частотний демодулятор з використанням дискретного перетворення Фур'є // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2004. – С. 72 – 79.
3. Безвербний І.А. Чисельно-аналітичний метод цифрового фазового аналізу однотональних сигналів // Там само. – 2004. – С.41 – 47.
4. Безвербний І.А. Рекурсивний метод частотнофазового аналізу двотонального частотно-маніпульованого сигналу // Математичні машини і системи. – 2006. – № 4. – С. 164 – 173.
5. Безвербний І.А. Чисельно-аналітичний метод демодуляції тональних сигналів // УСiМ. – 2005. – № 4. – С. 19 – 25.
6. Безвербний І.А. Використання методів паралельного частотнофазового аналізу в гідроакустиці // Збірник праць конференції «Укробраз». – 2011. – С. 38 – 43.
7. Безвербний І.А. Чисельно-аналітичні методи частотно-фазового аналізу тональних сигналів у низькочастотній акустичній вимірювальній системі // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2010. – № 9. – С. 39 – 46.
8. Лейко А.Г., Гулега Л.Г., Зацерковский Р.А. и др. Измерительный комплекс низкочастотной акустической трубы с цифровой обработкой сигналов. http://hydromech.com.ua/rus/WWW-CONS/2005/CONS2005_221-224.PDF
9. Точность вычислительных устройств и алгоритмов / [Соренков Э.И., Телига А.И., Шаталов А.С.]; под ред. А.С. Шаталова. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
10. Желнов Ю.А. Точностные характеристики управляющих машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
11. Люстерник Л.А., Червоненкис О.А., Янпольский А.Р. Математический анализ. Вычисление элементарных функций. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 248 с.
12. Агеева Н.С. Измерение акустических параметров материалов на ультразвуковых частотах при помощи импульсной трубы // Акустический журнал. – 1955. – Т.1, № 2. – С. 110 – 120.
13. Шамарин А.Ю., Лановой Ю.И., Мальцев А.М. Особенности конструктивной реализации низкочастотной акустической измерительной системы http://hydromech.com.ua/rus/WWW-CONS/2005/CONS2005_301-304.PDF
14. Шамарин Ю.Е., Гулега Л.Г., Лейко А.Г. и др. Низкочастотный акустический интерферометр. [://hydromech.com.ua/rus/WWW-CONS/2005/CONS2005_305-308.PDF](http://hydromech.com.ua/rus/WWW-CONS/2005/CONS2005_305-308.PDF)
15. Вовк А.Е., Климов С.П., Тютенин В.В. Измерение коэффициента отражения звука в акустических трубах с применением однонаправленной системы приема // Измерительная техника. – 1975. – № 7. – С. 76.

Одержано 15.04.2014