

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

I. Bezverbnyy

NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS OF A SIGNALING TONE FREQUENCY-PHASE ANALYSIS OF THE LOW- FREQUENCY ACOUSTIC MEASURING SYSTEM

The low-frequency acoustic measuring system is a signaling tone used embodiment. System description and algorithmic foundation are considered in the article.

Key words: standing wave, acoustic reflection coefficient, acoustic measuring system.

Примером использования тональных сигналов может служить низкочастотная акустическая измерительная система. В работе представлено описание системы и ее алгоритмическая база.

Ключевые слова: стоячая волна, коэффициент отражения звука, низкочастотная акустическая измерительная система.

Прикладом використання тональних сигналів може слугувати низкочастотна акустична вимірювальна система. В роботі подається опис системи та її алгоритмічна база.

Ключові слова: стояча хвиля, коефіцієнт відбиття звуку, низкочастотна акустична вимірювальна система.

© I.A. Безвербний, 2010

УДК 004.383.3

I.A. БЕЗВЕРБНИЙ

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ЧАСТОТНО-ФАЗОВОГО АНАЛІЗУ ТОНАЛЬНИХ СИГНАЛІВ У НИЗЬКОЧАСТОТНІЙ АКУСТИЧНІЙ ВИМІРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

Вступ. Проблема низькочастотного гасіння звуку, в тому числі пасивними методами, є важливим завданням технічної акустики. Створення структур матеріалів, що ефективно загашують звук поглинанням, передбачає їх експериментальну обробку. Одним з інструментів для вимірювання акустичних параметрів зразків конструкцій і матеріалів є акустичний інтерферометр. Цей прилад забезпечує вимірювання амплітуди і фази коефіцієнта відбиття звуку від зразків з точністю, відповідно, $\pm(1\div 2)$ дБ і $1\div 3^\circ$. Частота звукової хвилі має знаходитися в діапазоні від 200 до 4000 Гц. Дослідження здійснюється за температурних умов у межах від 3 до 50°C та за гідростатичного тиску від 0,1 до 10,0 МПа.

Основою методів вимірювання коефіцієнта відбиття звуку в акустичних вимірювальних трубах є теорія поширення і відбиття плоских звукових хвиль, що нормально падають на пласку 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.

Якщо максимальне значення діаграми чітко зорієнтоване на джерело звуку та є тильним щодо вимірювального зразка, то від-

бувається визначення рівня і фази тиску в прямій хвилі. Тобто відбувається амплітудно-фазовий аналіз двотонального сигналу із заздалегідь визначеною низькою частотою. У сучасних системах пропонується проводити фазовий аналіз методами [1, 2 – 5]. Спрощена система визначення фази, запропонована автоматом, дозволила звільнити ресурси та спростити програму обчислення.

Ступінь розробки. Перша низькочастотна автоматизована вимірювальна система (НЧАВС) із цифровою обробкою сигналів і реалізацією алгоритмів однопісного прийому була описана в [6]. Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України спільно з КДНДІ «Гідроприлад» розробили низькочастотну акустичну вимірювальну систему (НЧАВС) для проведення досліджень у галузі технічної акустики за методом акустичної інтерферометрії. Докладно система описана [7 – 9]. На основі сучасних методів тонального аналізу [10, 11] в роботі запропонована нова алгоритмічна база низькочастотного вимірювання акустичних параметрів матеріалів, що використовуються у гідроакустиці.

Призначення системи. Для розробки акустичних покриттів різноманітного призначення потрібне знання акустичних характеристик матеріалів. 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 [6, 7]. У 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 напружень, що реєструються 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.

Фізична інтерпретація. Вимірювальний комплекс під керуванням цифрової обчислювальної системи працює у режимах «Контроль» і «Вимірювання». Контролер аналогової апаратури за командами ЕОМ керування формує неперервні синфазні гармонічні сигнали однакового рівня для перевірки підсилювальних каналів з кроком $\Delta f = 0,5$ Гц у режимі «Контроль». Також контролер синтезує неперервні задавальні гармонічні сигнали для генераторного пристрою з частотнорегульованим рівнем і кроком $\Delta f = 0,5$ Гц у режимах «Вимірювання» та «Контроль»:

$$u_{\text{випромін}} = \gamma_{\text{випромін}}^{-1}(f) = u(f), \quad (1)$$

де $\gamma_{\text{випромін}}^{-1}(f)$ – амплітудно-частотна характеристика випромінювача, яка формує два неперервні гармонічні сигнали, що інвертують на виході електричні коливання гідрофонів у полі стоячої хвилі, утвореної інтерференцією прямої та відбитої хвиль [7]:

$$u_{\mu, \omega, \nu} = a_1 \cos \omega_1 \nu \Delta t + R_1 a_1 \cos(\omega_1 \nu \Delta t + \theta), \quad (2)$$

де

$$\theta = \omega_1 \left[\frac{(2 - \delta_{\mu, \nu}) d_\mu + 2r}{C} + \Theta_1 \right]; \quad (3)$$

$u_{\mu, \omega, \nu}$ – ν -й часовий відлік сигналу з виходу μ -го приймача в полі стоячої хвилі на частоті ω_1 ; $\Delta t = F_g^{-1}$, $F_g = 1,6 \cdot 10^4$ Гц – частота дискретизації; a_1 – амплітуда хвилі з частотою ω_1 ; d_μ – відстань між μ -м і третім приймачем; r – відстань між третім приймачем і зразком; Θ_1 – коефіцієнт відбиття на частоті ω_1 ; R_1 – модуль коефіцієнта відбиття на частоті ω_1 ;

$$\delta_{\mu, 3} = \begin{cases} 1, & \mu = 3; \\ 0, & \mu \neq 3. \end{cases} \quad (4)$$

Для визначення швидкості звуку та модуля коефіцієнта відбиття потрібно здійснити попереднє тестове дослідження для необхідних тиску та температури води у відповідному діапазоні частот (1,6 – 1,7 кГц) з кроком 0,5 Гц. Верхнім і нижнім гідрофонами вимірюються відповідні амплітуди стоячої хвилі, які дозволяють отримати відповідні значення швидкості звуку і модуля коефіцієнта відбиття в кожній точці частота-температура-тиск. Обчислені результати заносяться у відповідну базу даних, що зберігається в пам'яті ЕОМ керування.

Для визначення швидкості звуку в трубі необхідне знаходження частот першого вузла поблизу верхнього гідрофона f_1 і другого вузла поблизу нижнього гідрофона f_2 з набору можливих. f_1 і f_2 визначаються як частоти з мінімальними амплітудами стоячої хвилі в місцях розміщення гідрофонів. Тоді швидкість звуку C визначається зі співвідношення [13 – 15]

$$C = 2 \cdot d \cdot \frac{f_2 \cdot f_1}{f_2 - f_1}, \quad (5)$$

де d – відстань між двома гідрофонами.

Так само, для визначення модуля визначаються частоти пучності в точці знаходження нижнього гідрофона f_3 з набору можливих. Модуль коефіцієнта відбиття у відповідній точці частота-температура-тиск визначається зі співвідношення:

$$R = A - 1, \quad (6)$$

де A – амплітуда стоячої хвилі з частотою f_3 .

Визначення фазового параметра стоячої хвилі. Амплітудно-частотна ха-

рактика випромінювача формує два неперервні гармонічні сигнали:

$$u(t) = \cos(\omega_i^{\text{BX}} \cdot t) + R \cdot \cos(\omega_i^{\text{BX}} \cdot t + \theta), \quad (7)$$

де $\omega_i^{\text{BX}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_i^{\text{BX}}}{N}$ – вхідна частота; $\theta = \pi \cdot \vartheta$ – початкова фаза кожного з тонів,

що є константами впродовж періоду аналізу сигналу, $0 \leq \vartheta < 0,5$; $t = n \cdot T$ – параметр часу; n – ціле число, $0 \leq n < +\infty$; T – частота дискретизації сигналу на приймальному пристрої; N – кількість вибірок на період дискретизації.

На N вибірок сигналу накладається прямокутне вікно одиничної функції від $-\frac{N-1}{2}$ до $\frac{N-1}{2}$. Тоді дискретне cos-перетворення $u(t)$ має вигляд

$$\begin{aligned} \text{Re}(F(j \cdot \tilde{\omega})) &= \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} u(n \cdot T) \cdot \cos(\tilde{\omega} \cdot n \cdot T) = \\ &= \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_i^{\text{BX}} \cdot n \cdot T}{N}\right) + R \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_i^{\text{BX}} \cdot n \cdot T}{N} + \theta\right) \right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tilde{f} \cdot n \cdot T}{N}\right), \quad (8) \end{aligned}$$

де $0 < \tilde{f} < N$ – ціле число; а $\tilde{\omega} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \tilde{f}}{N}$.

Дійсна частота сигналу дорівнює $f_i^{\text{BX}} = f_i + \Delta f_i$, де f_i – грубо визначені частоти; $0 \leq \Delta f_i \leq 1$ – дійсна поправка.

Тоді функція вхідного сигналу розглядається як:

$$u(n \cdot T) = \cos(2 \cdot \pi \cdot (f_i + \Delta f_i) \cdot n \cdot T) + R \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (f_i + \Delta f_i) \cdot n \cdot T + \theta), \quad (9)$$

а максимальну спектральну характеристику можна аналітично визначити формулою

$$\begin{aligned} \text{Re}(F(j \cdot \omega_i)) &= \text{Re}(Y(f_i, f_k, \Delta f_i, \Delta f_k, f_i)) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (f_i + \Delta f_i) \cdot n \cdot T}{N}\right) + \right. \\ &\quad \left. + R \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (f_i + \Delta f_i) \cdot n \cdot T}{N} + \theta_k\right) \right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot n \cdot T}{N}\right), \quad (10) \end{aligned}$$

де $\omega_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_i}{N}$; i – номер гармоніки, найближчої до першого тону; k – номер гармоніки, найближчої до другого тону.

$$\text{Re}(Y(f_i, f_k, \Delta f_i, \Delta f_k, f_i)) =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sin(\pi \cdot \Delta f_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta f_i \cdot T}{N}\right)} + \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot T + \pi \cdot \Delta f_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot T + \pi \cdot \Delta f_i \cdot T}{N}\right)} + \\
 &+ R \cdot \frac{\sin(\pi \cdot \Delta f_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta f_i \cdot T}{N}\right)} \cdot \cos(\theta) + R \cdot \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot T + \pi \cdot \Delta f_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot T + \pi \cdot \Delta f_i \cdot T}{N}\right)} \cdot \cos(\theta). \quad (11)
 \end{aligned}$$

Вводяться позначення:

$$\begin{aligned}
 &\operatorname{Re}(G(j \cdot \omega_i, \omega_i^{\text{bx}})) = \operatorname{Re}(G(f_i, \Delta f_i)) = \\
 &= \frac{\sin(\pi \cdot \Delta f_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta f_i \cdot T}{N}\right)} + \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot T + \pi \cdot \Delta f_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot T + \pi \cdot \Delta f_i \cdot T}{N}\right)}, \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\operatorname{Re}(H(j \cdot \omega_i, \omega_k^{\text{bx}}, \theta_k)) = \operatorname{Re}(H(f_k, \Delta f_k, \theta_k)) = \\
 &= \frac{R \cdot \sin(\pi \cdot \Delta f_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta f_i \cdot T}{N}\right)} \cdot \cos(\theta) + \frac{R \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot T + \pi \cdot \Delta f_i \cdot T)}{2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot T + \pi \cdot \Delta f_i \cdot T}{N}\right)} \cdot \cos(\theta) = \\
 &= R \cdot \operatorname{Re}(G(f_i, \Delta f_i)) \cdot \cos(\theta). \quad (13)
 \end{aligned}$$

Отже, маємо рівняння

$$\operatorname{Re}(Y(f_i, f_k, \Delta f_i, \Delta f_k, f_i)) = \operatorname{Re}(G(f_i, \Delta f_i)) + R \cdot \operatorname{Re}(G(f_i, \Delta f_i)) \cdot \cos(\theta) \quad (14)$$

з якого

$$\theta = \arccos \frac{\operatorname{Re}(Y(f_i, f_k, \Delta f_i, \Delta f_k, f_i)) - \operatorname{Re}(G(f_i, \Delta f_i))}{R \cdot \operatorname{Re}(G(f_i, \Delta f_i))}. \quad (15)$$

З отриманого рішення знаходиться фаза коефіцієнта відбиття:

$$\Theta_i = \frac{\theta}{\omega_i} - \frac{(2 - \delta_{\mu, \nu}) d_{\mu} + 2r}{C}. \quad (16)$$

На отриманих таким чином положеннях розроблено алгоритм, під час аналізу якого виявлено, що наведені положення дозволяють розробляти цифрові системи для точного визначення акустичних параметрів морської води в режимі реального часу з використанням нескладного обладнання з обмеженою розрядністю. Тобто характеристики точності та необхідної для роботи розрядності (≥ 16 біт) цього алгоритму дозволяють вибрати елементну базу відповідних параметрів на основі якої побудовано підсистеми цифрового тонального аналізу.

Висновки. Під час налаштування апаратури і налагодження програмного забезпечення вимірювалися акустичні та електричні параметри, а також перевірялося функціонування комплексу під керуванням цифрової обчислювальної системи. Налагодження програм вимірювання модуля і фази коефіцієнта відбиття, а також оцінка потенційної точності методу здійснювалися за допомогою

програмного імітатора сигналів акустичної труби. Фізичні вимірювання виконувалися на еталонних зразках (межа: вода-повітря, металевий диск). Максимальне відхилення модуля коефіцієнта відбиття для $|H| = 1$ і $\Theta = \pi$ в аномальних точках за параметрів $T = 17^\circ$, $C = 1454$ м/с, $P = 0$ становить $\Delta|H|/|H| \approx 0,04$, $\Delta\Theta = 4^\circ$. Результати вимірювань на металевому зразку порівнювалися з розрахунковими значеннями $|H(f)|$, $\Theta(f)$. В області низьких частот $f < 1000$ Гц отримана висока відповідність експериментальних і розрахункових даних. На частотах вище $f > 1000$ Гц результати вимірювань на сталевому зразку чутливі до концентрації повітряних бульбашок у воді. За дискретності змін за частотою $\Delta f = 20 \div 40$ Гц в одній точці частота-температура-тиск у реальному часі $\Delta t \approx 5$ с перегляд смуги $\Delta F \approx 4000$ Гц займає 30 – 15 хвилин відповідно, що є сумірним з часовою інерційністю процесу переведення середовища в нову точку частота-температура-тиск.

Робота оператора з системою здійснюється за допомогою графічного інтерфейсу в діалоговому режимі (рисунок). Після призначення початкових параметрів режиму T_0 , P_0 , f_0 , а також дискретності їх змін ΔT , ΔP , Δf по команді «Пуск» ЕОМ управління надсилає в технологічний комплекс «Середовище» значення параметрів послідовним двонаправленим каналом обміну з інтерфейсом RS-422. Отримавши підтвердження готовності, ЕОМ управління організовує автоматичний цикл вимірювання коефіцієнта відбиття або швидкості звуку

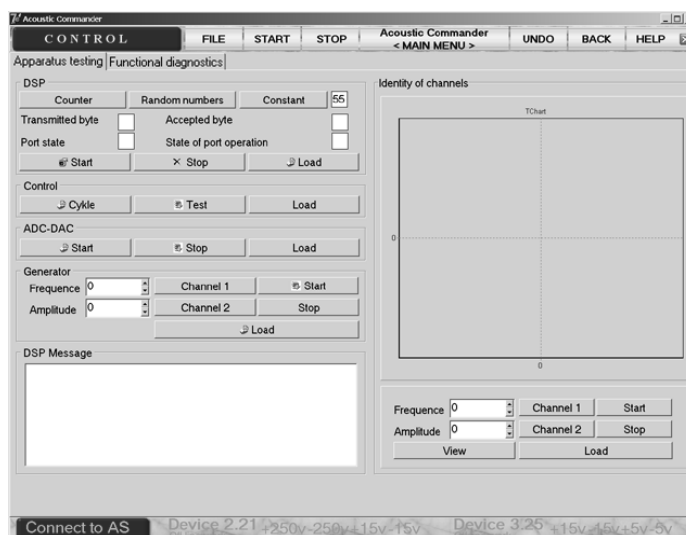


РИСУНОК. Вікно режиму контролю апаратури

в режимі реального часу з кроком Δf . Поточна інформація про хід змін надається оператору на дисплеї у графічній (сигнали з виходів гідрофонів, графіки частотної залежності інтенсивності сигналу) та символічно-числовій формі.

1. Желнов Ю.А. Точностные характеристики управляющих машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
2. Голуб В.С. Цифровая обработка сигналов: сигма-дельта АЦП // Электроника. – 2001. – № 4. – С. 22–27.
3. Голуб В.С. Относительная фазовая демодуляция с задержкой модулирующей функции // Радиотехника. – 1992. – № 9. – С. 40–43.
4. Голуб В.С. Демодуляция ЧМ колебаний с преобразованием в ФЧМ и ЧИМ // Радиотехника. – 1990. – № 3. – С. 47–48.
5. Голуб В.С. Частотная демодуляция с фазово-частотным преобразованием при многопериодной задержке сигнала // Радиоэлектроника. – 1997. – № 1. – С. 47–53.
6. Вовк А.Е., Климов С.П., Тюменин В.В. Измерение коэффициента отражения звука в акустических трубах с применением однонаправленной системы приема // Измерительная техника. – 1975. – № 7. – С. 76–78.
7. Лейко А.Г., Гулега Л.Г., Зацерковский Р.А. и др. Измерительный комплекс низкочастотной акустической трубы с цифровой обработкой сигналов // Акустичний симпозиум «Консонанс 2005». – 2005. – С. 67 – 69. – Режим доступу до журн.: <http://www.hydromech.kiev.ua/rus/WWW-CONS/cons2005r.htm>
8. Шамарин А.Ю., Лановой Ю.И., Мальцев А.М. Особенности конструктивной реализации низкочастотной акустической измерительной системы // Акустичний симпозиум «Консонанс 2005». – К.: КІГМ, 2005. – С. 301–304.
9. Шамарин Ю.Е., Гулега Л.Г., Лейко А.Г. и др. Низкочастотный акустический интерферометр // Акустичний симпозиум «Консонанс 2005» – К.: КІГМ, 2005. – С. 305–308.
10. Безвербний І.А. Чисельно-аналітичний метод цифрового фазового аналізу однотональних сигналів // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2004. – № 4. – С. 41 – 47.
11. Безвербний І.А. Рекурсивний метод частотно-фазового аналізу двотонального частотно-маніпульованого сигналу // Математичні машини і системи. – 2006. – № 4. – С. 164–173.
12. Агеева Н.С. Измерение акустических параметров материалов на ультразвуковых частотах при помощи импульсной трубы // Акустический журнал. – 1955. – № 2. – 1. – С. 110–120.
13. Горин Б.Ш. Индикаторы дальности. – М.: ВИМО, 1957. – 88 с.
14. Воробьев Е.А. Теория ультразвуковых колебаний как основа построения и применения технических средств получения информации [учебное пособие]. – СПб.: СПбГУАП, 2002. – 54 с.
15. Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. и др. Современная телеметрия в теории и на практике. – СПб.: Наука и техника, 2007. – 670 с.

Получено 15.08.2010