

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ

УДК 681.884

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.118281

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСОВИХ ЗАТРИМОК ХВИЛЬ В ЗАДАЧАХ АКУСТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ

© С. О. Козерук, О. В. Сергієнко

В статті розглянута одна з проблем акустичної локації – визначення відносної часової затримки між прийнятими акустичними хвилями. У разі відсутності акустичних завад пропонується використати підхід на основі побудови гіпотетичної імпульсної перехідної функції між приймачами. За наявності завад пропонується спосіб побудови взаємної кореляційної функції з застосуванням перетворення Гільберта. Приведено теоретичне обґрунтування запропонованих способів та модельна перевірка для імпульсних сигналів

Ключові слова: акустична локація, пеленгування, часова затримка, кореляційна функція, імпульсна перехідна функція

1. Вступ

Локалізація акустичних імпульсних джерел первинного випромінювання – гідролокаторів, стрілецької зброї, промислових механізмів, або об'єктів відбивачів акустичних хвиль, вторинних джерел випромінювання, представляє собою актуальну проблему. Прийнявши і відповідним чином обробивши акустичні сигнали можна виявити об'єкт випромінювання, виміряти його лінійні та кутові координати, розрахувати швидкість та траєкторію руху. Застосування направлених акустичних антен дає значну похибку оцінки кутових координат – пеленгу на об'єкт, навіть для великих значень відношення сигналу до завади. Тому разом з просторовою обробкою застосовують фазові або кореляційні методи пеленгування. Для імпульсних сигналів найбільш поширеним є кореляційний метод пеленгування, який ґрунтується на розрахунку взаємної кореляційної функції між прийнятими сигналами та визначенні по її максимуму відносної часової затримки. Визначення пеленгу суттєво залежить від точності визначення часової затримки та потребує розробки нових способів її оцінки.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

В гідролокації [1, 2] та атмосферній локації [3] отримання інформації про присутність об'єкту – джерела випромінювання, вимірювання його лінійних та кутових координат ведеться по прийнятим звуковим хвилям з використанням просторової, часової та спектральної обробки. Визначення кутових координат – пеленгу на об'єкт, можна вести по пеленгаційній характеристиці спрямованої антени. Оціночна похибка визначення кутових координат складає половину ширини характеристики спрямованості взятої по величині 0.707 від максимуму. На практиці більшість акустичних антен має широку характеристику спрямованості, а значить і велику похибку визна-

чення пеленгу. Для зменшення похибок оцінки кутових координат разом з просторовою обробкою застосовують фазові або кореляційні методи пеленгування [1]. Фазовий метод пеленгування ґрунтується на вимірюванні різниці фаз акустичних сигналів прийнятих двома антенами рознесеними на відстань половини довжини хвилі. Тобто його можна успішно застосовувати для тональних сигналів постійної частоти. Інакше виникають проблеми однозначності і точності отриманих результатів. Кореляційний метод пеленгування зводиться до визначення взаємної кореляційної функції між вихідними сигналами двох антен. Якщо завади на входах антен статистично незалежні то максимум взаємної кореляційної функції буде визначати величину часової затримки між акустичними сигналами. Цей підхід використовується для обробки імпульсних або шумоподібних сигналів, які мають достатньо широку смугу частот. В роботі [4] дано реалізацію кореляційного методу на структурному рівні. Приведена оцінка можливих похибок в залежності від відношення сигнал-завада та часу кореляції. В роботі [5] розглядаються проблеми локалізації джерел пострілу по акустичним дульній хвилі та ударній хвилі снаряду. В залежності від виду стрілецької зброї використовують різні схеми локалізації. Одним з вхідних параметрів алгоритмів локалізації є пеленг на джерело, який розраховується по часовій затримці прийнятих хвиль. Ідея акустичного пеленгування снаряду, який рухається з надзвуковою швидкістю, приведена в роботі [6]. Пеленг на снаряд визначався по відносній різниці часу приходу звукових ударних хвиль на три мікрофони. В роботах [7, 8] описуються системи визначення координати стрілка по дульній та ударній хвилям. Пеленг та відстань до стрілка визначається по алгоритму який включає в себе часові затримки дульної та ударної хвиль, що приходять на мікрофони. Проблеми обробки та оцінки параметрів акустичних хвиль пострілу розглянуті

в роботі [9]. Підкреслено що точність визначення амплітуди та часової затримки ударних хвиль є визначальною для локалізації джерела пострілу.

З розглянутого вище можна зробити висновок, що в задачах пеленгування імпульсних джерел найбільш поширений спосіб визначення відносної часової затримки по зміщенню максимуму взаємної кореляційної функції (ВКФ). На практиці акустичні сигнали мають відносно вузький спектр частот. ВКФ таких сигналів має пологий максимумом з не точно визначеним часовим положенням. Разом з корисним сигналом на вхід приймачів діє завада, яка спотворює кореляційну функцію та збільшує похибку визначення часової затримки. Пошук математичних алгоритмів підвищення точності визначення часового параметру є нагальною проблемою.

3. Мета і задачі дослідження

Метою роботи є пошук математичних прийомів та алгоритмів обробки сигналів для визначення відносної часової затримки прийнятих акустичних хвиль.

Задача дослідження – розробка алгоритмів визначення відносної часової затримки сигналів на основі:

- побудови гіпотетичної імпульсної перехідної функції між приймачами;
- розрахунку взаємної кореляційної функції з застосуванням перетворення Гільберта.

4. Розробка алгоритмів визначення часових затримок акустичних хвиль

Розглянемо модель пеленгування джерела акустичного випромінювання двома приймачами. Акустична хвиля $x(t)$ розповсюджується від джерела збудження по двом акустичним каналам. На виході каналів установлені приймачі, які приймають адитивну суміш $y(t)$ та $z(t)$ акустичного сигналу $x(t)$ та акустичних завад $n(t), m(t)$. Завади статистично незалежні та мають нормальний закон розподілу щільності ймовірності. Прийняті приймачами сигнали є випадковими процесами записаними у вигляді:

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) + n(t), \\ z(t) &= \alpha x(t - \tau_1) + m(t). \end{aligned} \tag{1}$$

Параметри α, τ_1 визначають відносно ослаблення та часову затримку хвиль між акустичними приймачами.

Для визначення часової затримки τ_1 використовують ВКФ $R_{yz}(\tau)$ між прийнятими сигналами на деякому часовому проміжку спостереження T :

$$\begin{aligned} R_{yz}(\tau) &= \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) + n(t)] \times [\alpha x(t - \tau_1 + \tau) + m(t + \tau)] dt = \\ &= \alpha R_{xx}(\tau - \tau_1) + R_{xn}(\tau) + R_{nx}(\tau - \tau_1) + R_{nm}(\tau); \\ R_{xx}(\tau - \tau_1) &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t - \tau_1 + \tau) dt; \end{aligned}$$

$$R_{xm}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)m(t + \tau) dt;$$

$$R_{nx}(\tau - \tau_1) = \frac{1}{T} \int_0^T n(t)x(t - \tau_1 + \tau) dt;$$

$$R_{nm}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T n(t)m(t + \tau) dt, \tag{2}$$

де $R_{xx}(\tau - \tau_1)$ – кореляційна функція вхідного сигналу с затримкою у часі на τ_1 ; $R_{xm}(\tau), R_{nx}(\tau - \tau_1), R_{nm}(\tau)$ – ВКФ процесів, які діють на входи приймачів. За умови відсутності кореляції між ними величини ВКФ дорівнюють нулю.

В практичних задачах локації використовують акустичні сигнали з вузьким спектром частот. ВКФ таких сигналів має вигляд пологих кривих з погано визначеним максимумом. Крім того відносно поглинання та вплив завад спотворює ВКФ та вносить похибку визначення відносної часової затримки. Для більш точного визначення параметру τ_1 використовуємо підхід [10] для розрахунку імпульсної перехідної функції (ІПФ) системи по частотній характеристиці. Визначимо гіпотетичну ІПФ $h(\tau)$ між приймачами, поклавши $y(t)$ вхідним сигналом, а $z(t)$ – вихідним. Спочатку знайдемо гіпотетичну частотну характеристику(ЧХ):

$$H_{yz}(f) = G_{yz}(f) / G_{yy}(f), \tag{3}$$

де $H_{yz}(f)$ – гіпотетична ЧХ між приймачами; $G_{yz}(f)$ – взаємний спектр сигналів $y(t)$ та $z(t)$; $G_{yy}(f)$ – спектр вхідного сигналу $y(t)$. Взаємний спектр для частот $f \geq 0$ розраховано через ВКФ визначені співвідношеннями(2):

$$\begin{aligned} G_{yz}(f) &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{yz}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau = \\ &= \alpha G_{xx}(f) e^{-j2\pi f \tau_1}, \end{aligned} \tag{4}$$

$$G_{xx}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau.$$

Спектр $G_{yy}(f)$ знаходимо по теоремі Вінера-Хінчина знайшовши спочатку кореляційну функцію $R_{yy}(\tau)$ вхідного сигналу:

$$\begin{aligned} R_{yy}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) + n(t)][x(t + \tau) + n(t + \tau)] dt = \\ &= R_{xx}(\tau) + R_{nn}(\tau), \\ G_{yy}(f) &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{yy}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau = \\ &= G_{xx}(f) + G_{nn}(f), G_{nn}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{nn}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau. \end{aligned} \tag{5}$$

Підставимо знайдені спектри(4) та (5) у вираз (3) отримаємо ЧХ:

$$H_{yz}(f) = \frac{\alpha e^{-i2\pi f \tau_1}}{1 + [G_m(f) / G_{xx}(f)]}. \quad (6)$$

Якщо відношення спектру завади до спектру сигналу $G_m(f) / G_{xx}(f)$ суттєво менше 1 то вираз (6) прийме вигляд:

$$H_{yz}(f) = \alpha e^{-i2\pi f \tau_1}. \quad (7)$$

Отриманий результат не залежить від спектрів $G_{xx}(f), G_m(f)$. Застосувавши до (7) зворотне перетворення Фур'є отримаємо імпульсну перехідну функцію:

$$\begin{aligned} h(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} H_{yz}(f) e^{j2\pi f \tau} df = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \alpha e^{j2\pi f(\tau - \tau_1)} df = \alpha \delta(\tau - \tau_1). \end{aligned} \quad (8)$$

Якщо прийом сигналів ведеться за наявності акустичних завод то цікавим може бути підхід із використанням перетворення Гільберта [11] до одного з прийнятих сигналів (наприклад $y(t)$) з подальшим розрахунком ВКФ $R_{yz}^*(\tau)$ між його квадратурним доповненням $y(t)^*$ та $z(t)$:

$$R_{yz}^*(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y^*(t) z(t + \tau) dt, y^*(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (9)$$

ВКФ стає несиметричною, та пересікає вісь часу у точці яка дорівнює часу затримки τ_1 . Визначити $R_{yz}^*(\tau)$ можна також застосувавши перетворення Гільберта до ВКФ (2), взявши її квадратурне доповнення.

5. Модельне дослідження

Для перевірки отриманих результатів було проведено моделювання процесу обробки пари імпульсів прямокутної форми тривалістю 10 мс з двома періодами гармонійних коливань. Відношення сигнал/завада(C/Z) змінювалась в процесі моделювання. Зсув між імпульсами у часі був постійний і становив 6.8 мс. Відносно ослаблення між каналами $\alpha = 1$. Для моделювання використовувалось програмне середовище Matlab. На рис. 1. приведені графіки ВКФ та ПФ. Завада відсутня. Результати моделювання демонструють зручність визначення часової затримки по ПФ (суцільна лінія) в порівнянні з ВКФ (штрихова лінія). Збільшення точності визначення часового параметру можна прогнозувати для сигналів нижніх частот з великою тривалістю імпульсу.

Присутність завади (рис. 2) робить перехідну імпульсну функцію не придатною для оцінки часової затримки і перевагу має ВКФ.

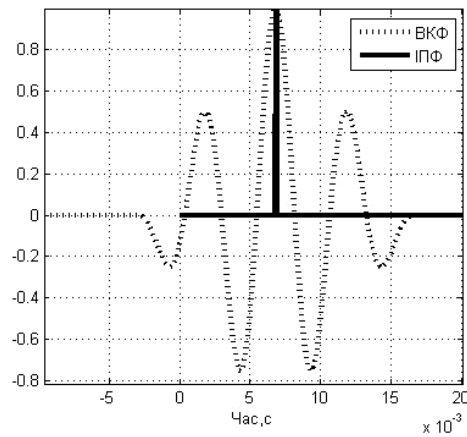


Рис. 1. Завада відсутня

Результат використання перетворення Гільберта (ПГ) представлено на рис. 3. Графік несиметричної ВКФ (суцільна крива) пересікає часову вісь у точці яка дорівнює часовій затримці між процесами. При цьому змінюється знак функції на протилежний, що дає можливість більш точно оцінити часову затримку в умовах дії завод.

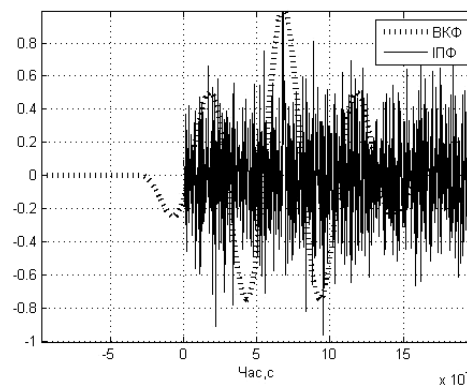


Рис. 2. Відношення C/Z=20

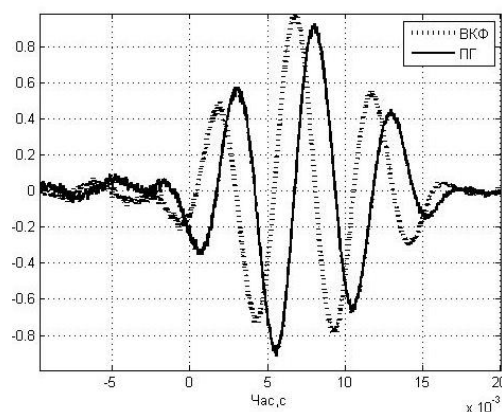


Рис. 3. Відношення C/Z=2

6. Висновки

1. Спосіб, на основі визначення гіпотетичної імпульсної перехідної функції між приймачами, дає можливість зробити визначення часової затримки між акустичними хвилями більш зручним і точним тільки за відсутності шумової завади. У випадку наявності завод, перехідна функція має багато піків різ-

ної величини, що ускладнює визначення часової затримки, внаслідок чого перевагу має ВКФ.

2. Взаємна кореляційна обробка, з застосуванням перетворення Гільберта до однієї з прийнятих акустичних хвиль, дозволяє досить точно визначати часову затримку за наявності завад. Зміна знаку функції на про-

тилежний, в момент який дорівнює величині часової затримки, дає можливість використання алгоритму в диференційних схемах пеленгування.

3. Алгоритм визначення часової затримки бажано мати адаптивним до діючої величини акустичної завади.

Література

1. Митько, В. Б. Гидроакустические средства связи и наблюдения [Текст] / В. Б. Митько, А. П. Евтютов, С. Е. Гуштин. – Л.: Судостроение, 1982. – 200 с.
2. Евтютов, А. П. Справочник по гидроакустике [Текст] / А. П. Евтютов, А. Е. Колесников и др. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.
3. Горбатов, А. А. Акустические методы измерения расстояний и управления [Текст] / А. А. Горбатов, Г. Е. Рудашевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
4. Новиков, А. К. Статистические измерения в судовой акустике [Текст] / А. К. Новиков. – Л.: Судостроение, 1985. – 272 с.
5. Damarla, T. Battlefield Acoustics [Text] / T. Damarla. – Cham: Springer International Publishing, 2015. – 262 p. doi: 10.1007/978-3-319-16036-8
6. Reid, W. P. Microphone array location from sounding made by a passing projectile [Text] / W. P. Reid // Technical Report, NASA Langley Research Center. – Langley, 1975.
7. Gervaslo, P. An acoustic sniper localization system [Text] / P. Gervaslo, D. Dhaliwal, O. M. Philip // Proceedings of the SPIE, Command, Control, Communications, and Intelligence Systems for Law Enforcement. – Boston, 1997. – P. 318–325.
8. Козерук, С. О. Визначення координат джерела пострілу по акустичним хвилям [Текст] / С. О. Козерук, Д. В. Мазніченко // Electronics and Communications. – 2017. – С. 45–49.
9. Maher, R. C. Modeling and Signal Processing of Acoustic Gunshot Recordings [Text] / R. C. Maher // Proceedings of IEEE Signal Processing Society 12th DSP Workshop. – Wyoming, 2006. – P. 257–261. doi: 10.1109/dspws.2006.265386
10. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
11. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер Принт, 2003. – 606 с.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Продеус А. М.
Дата надходження рукопису 27.10.2017*

Козерук Сергій Олександрович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра акустики та акустоелектроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: so.kozeruk@aae.kpi.ua

Сергієнко Олексій Володимирович, кафедра акустики та акустоелектроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: sfeara86@gmail.com

УДК 539.3

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.117676

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХОМОЇ ТРІЩИНИ В АНІЗОТРОПНОМУ МАТЕРІАЛІ

©Д. В. Білий, О. В. Комаров

Розв'язано задачу про визначення напруженого стану в околі тріщини Іоффе, що рухається з усталеною швидкістю в пружному однорідному анізотропному просторі під дією зосередженого навантаження, прикладеного до її берегів, яке рухається разом із тріщиною. За допомогою методу узагальнених комплексних потенціалів отримано систему задач лінійного спряження, які розв'язано аналітично за відповідним алгоритмом

Ключові слова: рухома тріщина, анізотропний простір, напруження, задача лінійного спряження, комплексний потенціал

1. Вступ

В сучасному будівництві, машинобудуванні літако- та ракетобудуванні анізотропні матеріали набувають дедалі ширшого застосування завдяки відповідним фізичним характеристикам. Як наслідок, виникає загроза появи і розповсюдження дефектів, які найчастіше являють собою тріщини. Досліджен-

ню особливостей пружно-деформівного стану в околі рухомої тріщини в анізотропному матеріалі останнім часом приділяється багато уваги як актуальній і складній проблемі.

Таким чином можна зробити висновок, що проблема дефектів проникла у всі галузі, які зв'язані з роботою над відомими матеріалами.