

УДК 62.529.4

В.П. Малько, студент гр. ПК-11мн
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВИМІРЮВАННЯ КУМУЛЯТИВНИХ ФАЗОВИХ ЗСУВІВ В ЗАДАЧАХ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНЕЙ

Анотація. Розглянуто існуючі методи та засоби вимірювання кумулятивних зсувів та вирішення проблем неоднозначності фаз. Визначенні переваги на недоліки використання числової системи залишкових класів (СЗК) в задачах визначення відстаней. Запропоновано використання системи залишкових класів для вирішення проблем неоднозначності фазових методів в далекометрії.

Ключові слова: система залишкових класів, неоднозначність фазових методів, далекометрія.

ВСТУП

На сьогоднішній день широко використовуються різні методи та пристрої для визначення фазових характеристик сигналів. Область застосування дуже широка: їх використовують в енергетичній, електротехнічній, радіотехнічній, оптичних та інших галузях. За допомогою вимірювання кумулятивних фазових зсувів сигналів можна визначити значення фазового зсуву, що значно перевищують величину 2π , на основі чого можна визначити часову затримку, відстань або переміщення об'єкта у просторі з високою точністю.

Для використання фазового методу необхідно виключити вплив на результат виміру основного обмеження – неоднозначності фази. Неоднозначність результату з'являється при вимірюванні фазового зсуву за межею однозначності ($0 \leq \varphi^0 \leq 2\pi$).

Кумулятивний фазовий зсув сигналів визначається за формулою:

$$O_{\text{рад.}} = 2\pi n + \varphi_{\text{рад.}} \quad (1)$$

де n – ціле число фазових циклів.

При визначенні відстані в задачах далекометрії приймають, що випромінений акустичний (чи іншої фізичної природи) сигнал розповсюджується вздовж відстані D в обох напрямках, тому значення кумулятивного зсуву можна визначити як відношення пройденної сигналом відстані до швидкості помноженого на частоту сигналу (2):

$$O(D) = \frac{2D}{v} \cdot \omega \quad (2)$$

де v – швидкість акустичного сигналу, ω – кругова частота сигналу.

Виразивши значення відстані з формули (2) отримаємо рівняння для вимірювання відстані між двома об'єктами:

$$D = \frac{(2\pi n + \varphi_{\text{рад.}}) \cdot v}{2 \cdot \omega} \quad (3)$$

Щоб обчислити відстань необхідно визначити ціле число напівхвиль укладених на відстані і тим самим усунути невизначеність результатів виміру фазового зсуву [1]. Для визначення числа n використовують спеціальні методи розв'язання проблеми неоднозначності фазових вимірювань. Вибір методу розв'язання цієї проблеми є актуальним завданням фазометрії.

ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ РОБІТ

На сьогоднішній день розроблено багато способів вирішення проблеми багатозначності результатів фазових вимірювань. Кожен з них має свій принцип дії, свої переваги та недоліки.

Один з таких методів описаний в роботі [2], авторами був використаний метод кратних масштабних частот для вирішення неоднозначності фази в задачах вимірювання відстані до об'єктів. В цьому випадку використовують кратні значення частот. Кількість таких частот залежить від діапазону вимірювання далекоміра та від значення найвищої масштабної частоти.

Для вирішення проблеми багатозначності використовують декілька фіксованих масштабних частот. Багатозначність усувають поетапно, "крок за кроком". Спочатку починають з найнижчої частоти та закінчують найвищою. На кожному наступному етапі вирішення проблеми багатозначності як наближене значення відстані використовують значення відстані, отримане на попередньому етапі. Кожна наступна частота вибирається в k разів меншою за попередню, де k – коефіцієнт багатозначності. Зазвичай використовують значення $k = 10$. Коли проблема неоднозначності вирішена для кожної частоти, тоді робиться висновок про вирішення проблеми багатозначності загалом.

Перевагою такої системи є простота алгоритму та формул, висока точність вимірювання відстані та часової затримки, але головним недоліком є складна реалізація на практиці, через необхідність використовувати масштабні частоти, що належать до різних частотних діапазонів, отже веде до розширення використовуваного частотного діапазону. Тому популярність методу невисока.

Інший приклад вирішення проблем неоднозначності наведений в роботі [3], авторами розглянуто метод плавної зміни частоти коливань для визначення дальності до об'єкта на основі фазового методу. Цей метод оснований на плавній зміні частоти масштабних коливань, яка дає змогу визначити частоту, за якої $\Delta N = 0$

$$D = \frac{v}{2f} \cdot \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right) = \frac{\lambda}{2} \cdot (N + \Delta N) \quad (4)$$

Це означає, що у вимірюваній відстані вкладається ціла кількість напівхвиль масштабних коливань. У межах частотного діапазону можлива наявність декількох частот, за яких $\Delta N = 0$. Чим більша відстань, тим більше таких частот укладається у частотному діапазоні.

Для вирішення проблеми неоднозначності вибирають дві частоти f_1 та f_{n+1} та відповідну кількість напівхвиль N_1 та N_{n+1} . При плавній зміні частоти від f_1 до f_{n+1} рахують кількість частот n за яких $\Delta N = 0$. Потім комбінуючи результати отриманих з частоти f_1 та f_2 з результатами f_n та f_{n+1} . Розраховують 4 значення N' та округляють до цілого числа; якщо отримані значення N' однакові тоді роблять висновок про вирішення проблеми неоднозначності фазових вимірювань.

Перевагою метода є висока точність вимірювань як відстані так і часової затримки за більш простого розрахунку в порівнянні з попередньою роботою.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проаналізувавши попередні роботи, враховуючи переваги та недоліки, можна визначити більш перспективний метод вирішення неоднозначності в задачах визначення відстаней до об'єктів.

Для цього в якості метода можна обрати систему залишкових класів (СЗК) [4]. Сутність СЗК полягає в тому, що всі цілі числа в цій системі представляються множиною невід'ємних залишків від ділення чисел на заздалегідь визначені модулі системи. Значення модулів вибирають згідно максимального значення вимірювальної відстані та необхідної точності виміру, які представляють собою групу взаємнопростих чисел. При цьому вимірювання здійснюється фазовим багаточастотним методом на n частотах.

Розв'язком проблеми неоднозначності є завдання відновлення в позиційній системі числення цілого числа представленого у СЗК. Для отримання цього числа необхідно, щоб вибрані модулі були взаємно простими числами та максимальна вимірювальна відстань не перевищувала добуток модулів.

Проведемо розрахунок системи залишкових класів в задачі визначення відстаней на прикладі:

Постановка задачі. Необхідно визначити відстань D з максимальним значенням D_{\max} необхідно виміряти з дискретним кроком вимірювання d_0 . Вимірювання здійснюється фазовим багаточастотним методом на n частотах. Необхідно знайти: частоту, ступінь квантування фазових зсувів, величину очікуваних фазових зсувів та розрахувати шукану відстань.

Необхідно провести обчислювальний експеримент з визначення відстані 1050 м з дискретністю 1 мм. Тобто $D = 1050$ м, $d_0 = 1$ м, на якому перевірити алгоритм розрахунків.

Розрахунок:

Спочатку необхідно визначитись з модулями: прийmemo $m_1, m_2, m_3 = 11, 13, 15$. Вибрані числа є взаємно простими.

Визначимо максимально відновлювальне число A_{\max} :

$$A_{\max} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 - 1 \quad (5)$$

$$A_{\max} = 2144.$$

Тепер треба перевірити умову однозначного вимірювання відстані, тобто $D < D_{\max}$:

$$D_{\max} = \frac{d_0}{2} \cdot A_{\max} \quad (6)$$

$$D_{\max} = 1072 \text{ м, } D (1050) < D_{\max} (1072)$$

Розрахуємо частоти ω :

$$\omega_i = 2\pi \cdot \frac{v}{m_i \cdot d_0} \quad (7)$$

де $v = 313$ м/с - швидкість сигналу.

$$\omega_1 = 2\pi \cdot 30.091 \text{ рад.}, \omega_2 = 2\pi \cdot 25.462 \text{ рад.}, \omega_3 = 2\pi \cdot \text{рад.}$$

Розрахуємо ортонормовані базиси для заданих модулів СЗК згідно рекомендацій [5]: $B_1 = 1365, B_2 = 495, B_3 = 286$

Розрахуємо ступінь квантування фазових зсувів $\Delta\phi$, значення очікуваних ϕ_i

фазових зсувів φ та значення лишків a_i . Отримані значення зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Отримані значення основних величин

Параметр	ω_1	ω_2	ω_3
$\Delta\varphi_i, \Delta\varphi_i = 2\pi / m_i$, рад.	0.5712	0.4833	0.4189
$\psi_i, \psi_i = \omega_i * (2D / v)$, рад.	$2\pi * 190.897$	$2\pi * 161.531$	$2\pi * 140$
$\varphi_i, \varphi_i = \psi_i \bmod(2\pi)$, рад.	5.7112	3.3833	0
$a_i, a_i = [\varphi_i / \psi_i]^+$	10	7	0

Розрахуємо відстань D:

$$D = 0.5 \cdot \sum a_i \cdot B_i \quad (8)$$

$$D = 0.5 * (10*1365 + 7 * 495 + 0*286) = 0.5 * 2100 = 1050 \text{ м}$$

Отже, шукана відстань знайдена з високою точністю. Проведений обчислювальний експеримент підтверджує коректність алгоритму усунення багатозначності фазових вимірювань на основі системи залишкових класів.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день існує багато засобів вирішення проблеми багатозначності фазових вимірювань в задачах визначення відстані. Використання системи залишкових класів є перспективним завдяки його простоті, можливості практичного застосування та швидкодії. Використання СЗК в далекометрії є перспективним напрямом розвитку засобів визначення відстаней як від одного, так і від декількох об'єктів. Використання цієї технології дозволить збільшити швидкість та точність визначення відстаней при використанні фазового методу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Ниженский А.Д. Реализация та оцінка похибок двоканальних частотно-фазових далекомірів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2017, С. 145-150.
- [2] Шануров Г.А. Спутниковая геодезия. Учебное пособие для студентов обучающихся по направлениям: «геодезия и дистанционное зондирование», «прикладная геодезия», «землеустройство и кадастр», «картография и геоинформатика» / Г. А. Шануров. М.: МИИГАиК, 2015, 80 с.
- [3] Кострова Т. Г. Методы и устройства устранения неоднозначных измерений дальности в импульсных радиотехнических системах : дис. – Владимирский государственный университет, 2007.
- [4] Куц Ю.В. Вимірювання кумулятивних фазових зсувів // Ю. Куц. – *Технічна електродинаміка* (Kuts Yu. V. Vymiryuvannya kumukyatyvnych fazovych zsuviv. – *Technichna elektrodynamika*). – 2001. – №5. – С/С. С. 67–72.
- [5] Эффективное сравнение чисел в системе остаточных классов на основе позиционной характеристики / М. Бабенко та ін. *Труды Института системного программирования РАН*. 2019, т. 31, № 2. С. 187–201.

Наук. керівник – д.т.н., проф. Куц Ю.В.