

О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.
 Національний технічний університет України «КПІ»
К. С. Козько, аспірант
 Національний технічний університет України «КПІ»

ВПЛИВ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ НА СТОХАСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОХИБКИ ЄМНІСНОГО ГРАВИМЕТРА

Використання ємнісних гравіметрів (ЄГ) у авіаційних гравіметричних системах дає значні переваги порівняно з існуючими типами гравіметрів унаслідок підвищеної точності ЄГ, а також малих масогабаритних характеристик. Однак через невеликий розмір і вагу ємнісних гравіметрів, їх характеристики сильно залежать від коливань температури. Так як ці похибки накопичуються з часом, точність вимірювань погіршується, якщо ці зміни температури не моделюються і не компенсуються. Отже, існує необхідність розробки точних, надійних і ефективних теплових моделей для зменшення впливу змін температури на похибки омичних гравіметрів.

Традиційно, похибки поділяють на дві частини – систематичні і випадкові. Систематичні джерела похибок включають відхилення і масштабний коефіцієнт похибок, які можна видалити за допомогою спеціальних процедур калібрування в лабораторних умовах. З іншого боку, до випадкових похибок в першу чергу відноситься шум датчика, який складається з двох частин, високочастотної складової та низькочастотної складової. Високочастотна складова має характеристики білого шуму, а низькочастотна складова характеризується корельованими шумами. Методологія знешумлення потрібна для фільтрації високочастотних шумів у вимірюваннях до обробки з використанням низькочастотного фільтра або техніки вейвлет знешумлення. Низькочастотна складова шуму (корельований шум) може бути змодельованою з достатньою точністю за допомогою випадкових процесів, таких як, випадкова постійна (випадкове відхилення), випадковий дрейф, випадкові процеси Гаусса-Маркова та ін. Найбільш часто використовуваним процесом є процес першого порядку Гаусса-Маркова. Дослідження випадкової похибки показують, що найбільш домінуючою похибкою є випадковий дрейф. Проте, одним специфічним обмеженням більшості досліджень є те, що стохастичні зміни цих похибок не були досліджені при різних температурах. Таким чином, існує необхідність розробки точних, надійних і ефективних стохастичних моделей, які можуть бути використані в ємнісному гравіметрі.

Для оцінки впливу температури на стохастичну модель, дані проаналізовано за допомогою дисперсії Аллана і спектру найменших квадратів. Крім того, реалізований вплив знешумлення на різних граничних частотах стохастичної моделі.

Дисперсія Аллана є методом подання середньоквадратичної випадкової похибки дрейфу як функції періодів усереднення. Найбільш корисним застосуванням методу є визначення та оцінка випадкового коефіцієнта дрейфу в раніше сформульованому рівнянні моделі. Якщо N – число точок даних з інтервалом зразків рівним Δt_0 , то може бути створена група з n точок даних ($n < N/2$). Кожен член групи називається кластером T розміром $n\Delta t_0$. Дисперсія Аллана може бути визначена в перерахунку на вихідну змінну, розраховану в дискретні моменти часу $x_k = x(k t_0)$. Дисперсія Аллана оцінюється наступним чином:

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2T^2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} (x_{k+2n} - 2x_{k+n} + x_k)^2. \quad (1)$$

Існує дуже важливе відношення між дисперсією Аллана та спектральною щільністю потужності (СЩП) випадкових процесів:

$$\sigma^2(T) = 4 \int_0^{\infty} df \cdot S_R(f) \frac{\sin^4(\pi f T)}{(\pi f T)^2}, \quad (2)$$

де $S_R(f)$ – спектральна щільність потужності випадкового процесу $R(T)$, а саме миттєва продуктивність ЄГ. При виведенні рівняння (2), передбачається, що випадковий процес $R(T)$ є стаціонарним. Рівняння (2) є ключовим результатом, який використовується для розрахунку дисперсії Аллана від СЩП величини шуму. Можуть бути розглянуті різні типи випадкових процесів при дослідженні графіка дисперсії Аллана. Дисперсія Аллана забезпечує засоби ідентифікації різних складових шуму, які існують в даних.

Слід зазначити, що різні складові шуму з'являються на різних ділянках T . Ця властивість дозволяє легко ідентифікувати різні випадкові процеси, які існують в даних. Швидкість СЩП шуму представлена:

$$S_{\Omega}(f) = Q^2, \quad (3)$$

де Q – кутовий коефіцієнт випадкового дрейфу. Підставляючи рівняння (3) у рівняння (2) і виконуючи інтегрування, ми отримуємо

$$\sigma^2(T) = \frac{Q^2}{T}. \quad (4)$$

Спектральний аналіз методом найменших квадратів (САНК) був вперше розроблений Ванічком в 1969 році. САНК є альтернативою класичним методам Фур'є, яка здатна подолати всі обмеження, властиві методам Фур'є. САНК забезпечує наступні переваги: небажані періодичні сигнали (наприклад, низькочастотні сигнали) і систематичні шуми (наприклад, кольорові або інші) можуть бути придушені, без створення будь-яких змін існуючих спектральних піків; може бути виконане статистичне тестування значення спектральних піків. Він використовує наближені прийоми методу найменших квадратів, які тісно пов'язані з параметричним регулюванням методом найменших квадратів.

Спектральна щільність потужності методом найменших квадратів у рівняннях та є еквівалентною до того, що визначений за допомогою швидкого перетворення Фур'є, коли ряд рівномірно розподілений та рівнозважений. Перевагою САНК є те, що він може бути використаний для обчислення спектру потужності будь-якого ряду, без врахування обмежених умов у алгоритмі ШПФ. Загалом, часові ряди можуть включати тригонометричні базові функції для опису періодичних компонент ряду або інших, таких як випадкове блукання і авто-регресія.

У даній роботі досліджено вплив зміни температури на стохастичні характеристики ємнісного гравіметра з використанням дисперсії Аллана та САНК. Дисперсія Аллана може бути використаною для визначення шумових характеристик ємнісного гравіметра, однак, не перевіряє результати для, наприклад, статистичного тестування. САНК, з іншої сторони, може бути використаним для вивчення шумових характеристик і для визначення параметрів стохастичної моделі ємнісного гравіметра. Оцінювані за допомогою САНК результати статичних даних показали наступне:

- Відхилення не може бути змодельоване як випадкове блукання (не статистично значиме). На противагу цьому, авто-регресивна (АР) модель першого порядку є статистично значимою.
- Оцінюваний АР коефіцієнт першого порядку є залежним від температури.

Також досліджений ефект знешумлення інерційних даних на параметри стохастичної моделі, коли був використаний низькочастотний фільтр КІХ Кайзера. Оцінювані за допомогою САНК результати однакових наборів даних на різних частотах зрізу показали, що два верхні припущення є досі діючими (але з різними коефіцієнтами). На додачу, оцінюваний АР коефіцієнти першого порядку залежить від обраної частоти зрізу.