

О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ю.О. Подчашинський, д.т.н., проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Гравіметр з двовимірною цифровою фільтрацією та компенсацією похибок вимірювальної інформації про механічні величини

Розглянуто методи двовимірної цифрової фільтрації вихідного сигналу гравіметра, що входить до складу авіаційної гравіметричної системи. Результатом фільтрації є підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння внаслідок усунення впливу вертикального прискорення, поступальних і кутових віброприскорень літака. Проблема фільтрації та компенсації похибок вимірювальної інформації про механічні величини вирішено шляхом алгоритмічної обробки вихідного сигналу гравіметра. Двовимірна цифрова фільтрація вимірювальної інформації виконується на основі формування двовимірного масиву цифрових відліків гравіметричної вимірювальної інформації про аномалії прискорення сили тяжіння з урахуванням прив'язки до координат точок поверхні Землі, в яких ці відліки були отримані. Цей масив відповідає ряду сусідніх ліній польоту авіаційної гравіметричної системи. Після цього виконують фільтрацію сформованого масиву за допомогою двовимірного цифрового фільтра нижніх частот. У процесі фільтрації додатково враховують двовимірні кореляційні зв'язки, наявні у корисному сигналі про аномалії прискорення сили тяжіння. Така фільтрація може бути виконана в ході післяпольотної обробки результатів гравіметричних вимірювань. Використання двовимірної цифрової фільтрації вимірювальної інформації про механічні величини дозволяє підвищити точність визначення аномалій прискорення сили тяжіння до 2-х разів (порівняно з одновимірною фільтрацією) та у 3...5 разів (порівняно з вихідним сигналом інтегруючого гравіметра).

Ключові слова: гравіметр; прискорення сили тяжіння; вимірювання механічних величин; кореляційна функція; двовимірна фільтрація; алгоритмічна обробка вимірювальної інформації.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними задачами. Гравіметричні вимірювання на рухомій основі використовуються для розв'язання різноманітних задач у геодезії, геології, інерціальних системах навігації. Гравіметричну вимірювальну інформацію про аномалії прискорення сили тяжіння зазвичай отримують за допомогою гравіметра та бортової ЕОМ, які встановлені на рухомій основі [1, с. 36–41]. Результати вимірювань прискорення сили тяжіння, отримані за допомогою гравіметра, містять великі похибки вимірювань. Ці похибки викликані тим, що гравіметр вимірює сукупність прискорення сили тяжіння (корисної складової результатів вимірювань) та інерціального абсолютного прискорення (завада, що діє на гравіметр і призводить до похибок результатів вимірювань) [1, с. 156]. Інерціальне абсолютне прискорення зумовлене переважно вертикальним прискоренням рухомої основи (літака), на якій встановлено гравіметр, а також поступальними і кутовими вібраціями цієї основи.

Тому актуальною проблемою є розробка методів компенсації цих похибок на основі застосування цифрової ЕОМ. Ця ЕОМ виконує алгоритмічну обробку результатів вимірів. Алгоритмічна обробка включає фільтрацію вимірювальної інформації, яка надходить від чуттєвого елемента гравіметра, що дозволяє позбутися значної частини завод та підвищити точність цієї інформації.

Аналіз досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення вказаної проблеми і на які спирається автор. Рішення окремих гравіметричних задач з використанням ЕОМ вперше були виконані наприкінці 50-х років у Москві в МГУ та у Новосибірську в Інститут геології і геофізики Сибірського відділення АН СРСР. Заслужують на увагу різні автоматизовані системи обробки гравіметричних даних. Більшість з них передбачає всі основні етапи обробки гравіметричних даних: одержання вимірних значень, вирівнювання опорної мережі, обчислення виправлень за вплив рельєфу, визначення аномалій Фая і Буге, складання каталогів, трансформація аномалій і побудова карт. Застосування кореляційно-статистичних методів неможливе без розрахунків на ЕОМ, що виконуються при використанні математичного апарату перетворення Фур'є, обчисленні повного градієнта тощо [2, с. 233–236].

У відомій літературі описані методи попередньої обробки гравіметричної вимірювальної інформації. Але немає детальних відомостей щодо застосування методів фільтрації вихідного сигналу гравіметра з метою підвищення точності результатів гравіметричних вимірювань. Також відсутні відомості щодо застосування двовимірної фільтрації масиву гравіметричної вимірювальної інформації з урахуванням

прив'язки до координат точок поверхні Землі, в яких були отримані відліки цієї інформації. Такий масив відповідає ряду сусідніх ліній польоту авіаційної гравіметричної системи (АГС).

Метою даної роботи є дослідження властивостей масивів гравіметричної вимірювальної інформації та розробка на цій основі ефективних методів фільтрації цієї інформації, що забезпечать підвищення точності гравіметричних вимірювань в АГС.

Визначення аномалій прискорення сили тяжіння в АГС

Аномалії прискорення сили тяжіння в АГС можуть бути обчислені за виразом [1, с. 157]:

$$\Delta g = f_z + E + A - \ddot{h} - \gamma_0,$$

де f_z – вихідний сигнал гравіметра АГС;

E – поправка Етвеша;

A – поправка на висоту;

γ_0 – довідкове прискорення сили тяжіння;

\ddot{h} – вертикальне прискорення літака.

Вихідний сигнал гравіметра АГС після обчислення і введення поправок E, A, γ_0 можна записати у вигляді

$$T = f_z = \Delta g + \ddot{h}.$$

Фільтрація вихідного сигналу гравіметра АГС базується на двох підходах.

Згідно з першим підходом, висота літака h визначається висотоміром будь-якого типу, двічі диференціюється для отримання сигналу вертикального прискорення \ddot{h} , незалежного від аномалій прискорення сили тяжіння. Цей сигнал \ddot{h} можна використовувати для компенсації у вихідному сигналі гравіметра впливу завади – вертикального прискорення.

Згідно другим підходом, вертикальне прискорення не вимірюється і не віднімається від вихідного сигналу гравіметра. Вхідний сигнал фільтра складається з сигналів аномалії прискорення сили тяжіння і вертикального прискорення. При побудованні фільтра враховують той факт, що аномалія прискорення сили тяжіння низької частоти, тоді як вертикальне прискорення – високої частоти.

Фільтрація гравіметричної вимірювальної інформації може бути виконана одновимірним фільтром нижніх частот для масиву відліків, що отримані вздовж однієї лінії польоту АГС. Така фільтрація виконується в процесі польоту АГС в темпі надходження відліків або при післяпольотній обробці гравіметричних вимірювань.

Інший варіант, що пропонується у цьому дослідженні, полягає в формуванні двовимірного масиву цифрових відліків гравіметричної вимірювальної інформації про аномалії прискорення сили тяжіння з урахуванням прив'язки до координат точок поверхні Землі, в яких ці відліки були отримані. Цей масив відповідає ряду сусідніх ліній польоту АГС. Після цього виконують фільтрацію сформованого масиву за допомогою двовимірного цифрового фільтра нижніх частот. У процесі фільтрації додатково враховують двовимірні кореляційні зв'язки, наявні у корисному сигналі про аномалії прискорення сили тяжіння. Така фільтрація може бути виконана в ході післяпольотної обробки результатів гравіметричних вимірювань.

Основні характеристики масивів гравіметричної вимірювальної інформації

Гравіметрична вимірювальна інформація складається з ряду результатів вимірювань, отриманих у процесі польоту за допомогою АГС. Гравіметри АГС мають недопустимо великі похибки, які зумовлені дією завод. Ефективним засобом зменшення цих похибок є фільтрація масивів гравіметричної вимірювальної інформації. Одновимірна фільтрація може бути виконана для послідовності відліків, отриманої вздовж траєкторії польоту. Також пропонується виконувати двовимірну фільтрацію накопичених масивів гравіметричної вимірювальної інформації, сформованих з урахуванням прив'язки до координат точок поверхні Землі, в яких ці відліки були отримані. Тому розглянемо взаємозв'язок такого підходу з основними вимогами до гравіметричної зйомки на деякій місцевості.

Відомі регіональна і детальна гравіметричні зйомки [2, с. 202–203, 236–239]. Регіональна зйомка відображається на картах масштабу 1:200 000 з перетином ізоаномал через 2 мГал. Зйомка є суцільною. Складені за результатами зйомки карти дають уявлення про загальну структуру аномального поля, його основні особливості та закономірності. Карти складаються для аномалій Фая і аномалій Буге. Карти аномалій Фая використовуються при вирішенні астрономічних і геодезичних задач. Аномалії Буге при регіональній зйомці забезпечують вирішення тектонічних задач.

Детальна зйомка проводиться в умовах, коли регіональна зйомка вже проведена і основні закономірності та властивості аномального поля відомі. Детальна зйомка відрізняється від регіональної структурою мережі і рейсів, масштабами карт і точністю визначення аномалій, способами їх обробки та інтерпретації. В таблиці 1 [2, с. 237] наведено основні характеристики детальних зйомок для рівнинних умов.

Основні характеристики детальної гравіметричної зйомки для умов рівнини

Масштаб гравіметричних карт і графіків	Перетин ізоаномал, мГал	Середньоквадратичні похибки визначення		Крок h вимірювань вздовж профілю, м	Відстань між профілями, м
		висот, м	координат, м		
1:50000	0,50	0,70	40	100...500	$(3...5)h$
1:50000	0,25	0,35	40	50...250	$(3...5)h$
1:25000	0,26	0,35	20	50...250	$(3...5)h$
1:25000	0,20	0,25	20	20...100	$(3...5)h$
1:10000	0,20	0,20	4	20...100	$(3...5)h$
1:10000	0,10	0,10	4	10...50	$(3...5)h$

При детальній зйомці мережа складається з рівнобіжних профілів, відстань між якими в 3–5 разів більше кроку по профілі. У зв'язку з цим точність вивчення аномального поля по профілях дещо вище, ніж ними.

Таким чином, за результатами гравіметричної зйомки може бути сформований двовимірний масив цифрових відліків гравіметричної вимірювальної інформації про аномалії прискорення сили тяжіння з урахуванням прив'язки до координат точок поверхні Землі, в яких ці відліки були отримані. Далі виконують фільтрацію сформованого масиву за допомогою двовимірного цифрового фільтра з метою виключення впливу збурень, що діють на гравіметр АГС.

Як відомо, фільтрація збурень можлива за умов наявності інформації про спектральні характеристики збурень, спектральні та кореляційні властивості гравіметричної вимірювальної інформації.

Кореляційно-статистичні методи широко застосовуються при якісній інтерпретації аномалій, заснованій на зіставленні гравіметричних і геологічних карт, їх бурхливий розвиток стимулювало широке використання цифрових ЕОМ. У зв'язку з цим значно розширилося коло гравірозвідочних задач, що розв'язуються цими методами [2, с. 200–201].

На рисунку 1 (крива 1) зображено графік кореляційної функції аномалії прискорення сили тяжіння, обчисленої за даними вимірювань, для польотів літака з АГС в напрямку захід-схід.

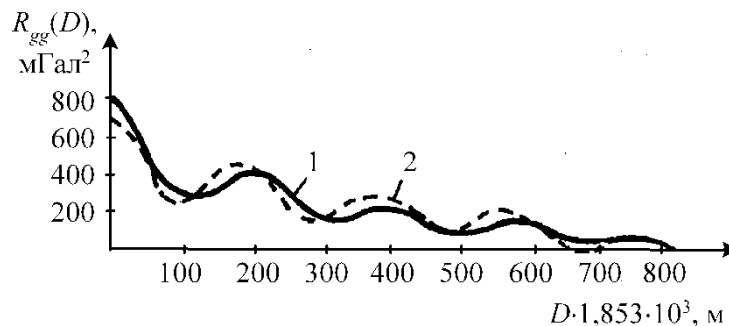


Рис. 1. Кореляційна функції аномалії прискорення сили тяжіння: 1 – вимірювана; 2 – аналітична

Кореляційна функція $R_{gg}(D)$ аномалії прискорення сили тяжіння дорівнює:

$$R_{gg}(D) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L [\Delta g(S)] [\Delta g(S+D)] dS,$$

де S – поточна відстань вздовж траєкторії польоту, м;

L – довжина однієї лінійної ділянки траєкторії польоту, м;

Δg – аномалія прискорення сили тяжіння, мГал;

D – незалежна змінна, додатковий приріст поточної відстані S , м.

За допомогою ЕОМ обчислювали кореляційну функцію, яка була зведена до вигляду

$$R_{AA}(D) = A e^{-\alpha|D|} \cos(\Omega_{0g} D) + B e^{-\beta|D|}, \quad (1)$$

де Ω_{0g} – частота зміни кореляційної функції, що визначає переважаючу частоту зміни прискорення сили тяжіння, с^{-1} ; A, B, α, β – коефіцієнти, числові значення яких встановлюють обробкою натурних записів.

Для ряду вимірювань визначено, що $A = 240$ мГал², $B = 506$ мГал², $\Omega_{0g} = 1,74 \cdot 10^{-5}$ рад/м, $\alpha = 2,2 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹, $\beta = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹.

Графік зміни кореляційної функції вигляду (3), обчисленої за допомогою ЕОМ, зображено на рисунку 1 (крива 2).

Залежність аномалій на двох сусідніх траєкторіях польоту i та $i+1$ визначається за допомогою взаємної кореляції, що обчислюється:

$$R_{g_i g_{i+1}}(D) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L [\Delta g_i(S)] [\Delta g_{i+1}(S+D)] dS.$$

Спектральну густину аномалій прискорення сили тяжіння $S_{g1}(\Omega)$ можна зобразити у вигляді:

$$S_{g1}(\Omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{gg}(D) e^{-j\Omega D} dD. \quad (2)$$

Вираз (2) можна записати в іншій формі:

$$S_{g1}(\Omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_{gg}(D) \cos \Omega D dD. \quad (3)$$

Підставивши (1) у (3), отримуємо

$$\begin{aligned} S_{g1}(\Omega) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} A e^{-\alpha|D|} \cos(\Omega_{0g} D) \cos \Omega D dD + \int_0^{\infty} B e^{-\beta|D|} \cos \Omega D dD = \\ &= \frac{2A\alpha}{\pi} \cdot \frac{\Omega^2 + \Omega_{0g}^2 + \alpha^2}{\Omega^4 + 2(\alpha^2 - \Omega_{0g}^2)\Omega^2 + (\alpha^2 + \Omega_{0g}^2)^2} + \frac{2B\beta}{\pi} \cdot \frac{1}{\Omega^2 + \beta^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Визначимо переважаючу частоту зміни аномалії прискорення сили тяжіння в рад/с для літака, горизонтальна складова шляхової швидкості якого $V_0 = 103$ м/с:

$$\omega_{0g} = V_0 \Omega_{0g} = 0,00179 \text{ рад/с}.$$

Спектральна густина аномалій прискорення сили тяжіння в цьому разі

$$S_g(\omega) = \frac{1}{V_0} S_{g1}\left(\frac{\omega}{V_0}\right).$$

На основі (4) отримуємо

$$S_g(\omega) = \frac{2A\alpha V_0}{\pi} \times \frac{\omega^2 + (\Omega_{0g}^2 + \alpha^2)V_0^2}{\omega^4 + 2(\alpha^2 - \Omega_{0g}^2)V_0^2 \omega^2 + (\alpha^2 + \Omega_{0g}^2)V_0^4} + \frac{2B\beta V_0}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega^2 + V_0^2 \beta^2}.$$

У результаті отримуємо апроксимаційну формулу для розрахунку спектральної густини аномалії прискорення сили тяжіння як функції частоти ω (при $A = 240$ мГал², $B = 506$ мГал², $\Omega_{0g}^2 = 1,74 \cdot 10^{-5}$ рад/м, $\alpha = 2,2 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹, $\beta = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹, $V_0 = 103$ м/с):

$$S_g(\omega) = \frac{0,035(\omega^2 + 3,27 \cdot 10^{-6})}{\omega^4 - 6,32 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 + 3,47 \cdot 10^{-2}} + \frac{0,050}{\omega^2 + 2,39 \cdot 10^{-8}}, \frac{\text{мГал}^2}{\text{рад/с}}.$$

$$S_g(\omega_{0g}) = 6,58 \cdot 10^{-6} \frac{\text{мГал}^2}{\text{рад/с}}.$$

Спектральна густина вертикального прискорення на основі обробки натурних записів можна зобразити у вигляді апроксимаційної формули, що є функцією від частоти Ω :

$$S_{h1}(\Omega) = \frac{1,6 \cdot 10^3}{\left(\frac{\Omega}{8,5 \cdot 10^{-4}}\right)^2 + 1}, \frac{(\text{м/с}^2)^2}{\text{рад/м}}.$$

Вертикальну прискорення змінюється залежно від положення літака у просторі, тому незалежною змінною є відстань. Переважаюча частота вертикальних прискорень літака $\Omega_{0h} = 2,67 \cdot 10^{-3}$ рад/м. Для літака, що рухається з швидкістю 103 м/с: $\omega_{0h} = V_0 \Omega_{0h} = 0,275$ рад/с. У цьому випадку

$$S_{h2}(\omega_{0h}) = \frac{1}{V_0} S_{h1}\left(\frac{\omega_{0h}}{V_0}\right) = 1,43 \frac{(\text{м/с}^2)^2}{\text{рад/с}}. \quad (5)$$

Під час сильних вертикальних поривів вітру виникає кільова качка і, оскільки вертикальний порив діє також на крило літака, то змінюється кут атаки, спричиняючи зміну підйомних сил та, як наслідок цього, вертикальне прискорення центра мас літака. Тому при розміщенні гравіметра треба враховувати ці ефекти.

Передаточна функція системи літак-автопілот

$$K(\omega) = 113 \cdot 0,3^{-1} j\omega^3 \times \left\{ \frac{(1 + 5950\omega^2) + j\omega(20100\omega^2 + 90,5)}{(1 - 79\omega^2) + j\omega(11,2 - 160\omega^2)} \right\}. \quad (6)$$

Визначимо спектральну густину $S_h(\omega)$ вертикального прискорення \ddot{h} з урахуванням передаточної функції системи літак-автопілот (6) і спектральної густини вертикальних прискорень $S_{2h}(\omega)$ літака (5):

$$S_h(\omega) = |K(\omega)|^2 \cdot S_{2h}(\omega). \quad (7)$$

Підставляючи вирази (5) і (6) у (7), отримуємо апроксимаційну формулу для розрахунку спектральної густини вертикального прискорення як функції частоти ω :

$$S_h(\omega) = 0,635 \cdot \omega^6 \cdot 10^6 \times \left\{ \frac{405\omega^6 \cdot 10^6 + 19\omega^4 \cdot 10^6 + 211\omega^2 \cdot 10^2 + 1}{0,028^6 \cdot 10^6 + 0,25^4 \cdot 10^4 + 0,33^2 \cdot 10^2 + 1} \right\}, \frac{\text{мГал}^2}{\text{рад/с}}.$$

На рисунку 2 показано зміни спектральних густин вертикального прискорення $S_h(\omega)$ і аномалії прискорення сили тяжіння $S_g(\omega)$.

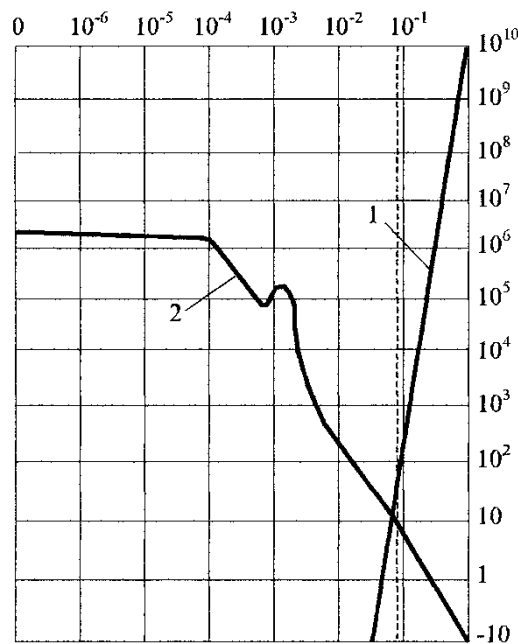


Рис. 2. Спектральні густини вертикального прискорення $S_h(\omega)$ (крива 1) та аномалій прискорення сили тяжіння $S_g(\omega)$ (крива 2): по горизонталі – частота ω , рад/с; по вертикалі – спектральна густина, мГал²/(рад/с)

З рисунку 2 видно, що при частотах менших за 0,1 рад/с система літак-автопілот суттєво зменшує ефекти впливу вертикального прискорення; при частотах понад 0,1 рад/с спектральна густина $S_h(\omega)$ вертикального прискорення прямує до нескінченності. А це і є передумовою успішної фільтрації вертикальних прискорень.

Фільтрація двовимірного масиву гравіметричної вимірювальної інформації.

У літературі [1, 4, 8, 9] описані методи попередньої обробки гравіметричної вимірювальної інформації. Фільтрація цієї інформації виконується одновимірним фільтром нижніх частот для послідовності відліків, що отримані вздовж однієї лінії польоту АГС. Така фільтрація виконується в процесі польоту АГС або при післяпольотній обробці гравіметричних вимірювань [1, 8]. Але у цій літературі немає відомостей щодо застосування двовимірних методів алгоритмічної обробки вихідного сигналу з метою підвищення точності вимірювань. Тому для підвищення точності гравіметричної вимірювальної інформації пропонується застосування двовимірного цифрового фільтра нижніх частот.

У даному випадку з вихідного сигналу гравіметра формують двовимірний масив цифрових відліків гравіметричної вимірювальної інформації про аномалії прискорення сили тяжіння з урахуванням прив'язки до координат точок поверхні Землі, в яких ці відліки були отримані. Це дозволяє врахувати двовимірні кореляційні зв'язки, що властиві корисному сигналу про розподіл значень аномалій прискорення сили тяжіння по поверхні Землі. На відміну від корисного сигналу, завади мають або випадковий некорельований характер (різного роду шуми та випадкові збурення), або характер

періодичних вібрацій та коливань, що мають одновимірну кореляцію вздовж лінії переміщення рухомої основи. Внаслідок цього шляхом двовимірної фільтрації можна ефективно відокремити корисний сигнал від завад у сформованому двовимірному масиві цифрових відліків гравіметричної вимірювальної інформації і вилучити ці завади.

Для формування двовимірної амплітудно-частотної характеристики фільтра можуть бути застосовані методи, відомі з цифрової фільтрації двовимірних зображень [10, с. 257–272, 331–376; 11, с. 147–192; 12 с.]. При цьому можна побудувати амплітудно-частотну характеристику таким чином, щоб максимально зберегти корисну інформацію про дрібні деталі розташування аномалій прискорення сили тяжіння на поверхні Землі. Одночасно можна ефективно вилучити періодичні завади, частоти яких відповідають певним локальним ділянкам амплітудно-частотної характеристики двовимірного цифрового фільтра. Як наслідок, підвищується точність гравіметричної вимірювальної інформації.

У цьому способі фільтрація виконується після накопичення всього двовимірного масиву цифрових відліків гравіметричної вимірювальної інформації. Це означає, що для фільтрації повинна бути використана не бортова ЕОМ, а стаціонарна цифрова ЕОМ, що має велику розрядність та високу точність обчислень. При цьому параметри двовимірного цифрового фільтра можуть бути обрані такими, щоб викривлення гравіметричної вимірювальної інформації про аномалії прискорення сили тяжіння після фільтрації не перевищували допустимих значень. Завдяки цьому, значно зменшуються похибки виконання обчислень в процесі фільтрації.

Для досліджень використовувалися результати гравіметричних вимірювань на полігоні розміром 650x650 км з кроком 2,5...5,0 кутових хвилин по довготі та широті [1, с. 241]. Було виконано дослідження двовимірної цифрової фільтрації для масиву гравіметричної вимірювальної інформації розміром 1000x1000 відліків.

Кореляційну функцію для цього масиву апроксимовано аналітичним виразом [1, 8]:

$$R_{гpa}(d) = A_{гp} \exp(-\alpha_{гp}|d|) \cos(\omega_{гp}d) + B_{гp} \exp(-\beta_{гp}|d|),$$

$$\text{або } R_{гpa}(d) = C_{гp} \exp(-\beta_{гp}|d|),$$

де d – відстань між відліками, $\omega_{гp}$ – частота зміни кореляційної функції, що визначає переважаючу частоту зміни прискорення сили тяжіння, рад/с; $A_{гp} = 240$ мГл², $B_{гp} = 506$ мГл², $C_{гp} = 746$ мГл², $\omega_{гp} = 1,74 \cdot 10^{-5}$ рад/м, $\alpha_{гp} = 2,2 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹, $\beta_{гp} = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹ – параметри кореляційної функції.

Вказані значення параметрів встановлено обробкою натурних записів, що отримані в результаті гравіметричних вимірювань на полігоні розміром 650x650 км з кроком (2,5...5,0)' по довготі та широті [9].

При дослідженнях безпосередньо виконувалася двовимірна цифрова фільтрація фрагмента вказаного масиву розміром 256x256 відліків. При цьому фрагмент доповнювався відліками шляхом апроксимації таким чином, щоб отримати крок 1000, 300 та 100 м між відліками вздовж лінії польоту та крок 1000 і 500 м між лініями польоту. Для отримання гравіметричної інформації в АГС використано вихідний сигнал гравіметричної системи після обчислення і введення поправок та компенсації вертикального прискорення основи за сигналом від вимірювача висоти. Похибки вимірювання висоти мають некорельований характер та нормальний закон розподілу в межах ± 1 мГл з довірчою ймовірністю 0,997.

Розглядалися такі варіанти фільтрації гравіметричної інформації:

- одновимірний фільтр з прямокутною АЧХ та частотою зрізу 0,1 рад/с при швидкості АГС 100 м/с, фільтрацію реалізовано в реальному часі;
- одновимірний оптимальний фільтр, фільтрацію реалізовано в реальному часі;
- одновимірний фільтр з прямокутною АЧХ та частотою зрізу 0,1 рад/с, який реалізовано при післяпольотній обробці гравіметричної інформації;
- одновимірний оптимальний фільтр, фільтрацію реалізовано при післяпольотній обробці гравіметричної інформації;
- двовимірний фільтр з прямокутною АЧХ та частотою зрізу 0,1 рад/с, який реалізовано при післяпольотній обробці гравіметричної інформації;
- двовимірний оптимальний фільтр, фільтрацію реалізовано при післяпольотній обробці гравіметричної інформації;

Теоретична межа точності двовимірної оптимальної фільтрації обчислювалася згідно з положеннями оптимальної фільтрації сигналів.

Результати фільтрації наведено на рис. 3 (ФВ – фільтрація відсутня; ОВ – одновимірна фільтрація за відомими методами; ДВ – двовимірна фільтрація за розробленим методом; ПФ – фільтр з прямокутною АЧХ; ОФ – оптимальний фільтр; РЧ – фільтрація в реальному часі; Т – теоретична межа точності двовимірної оптимальної фільтрації).

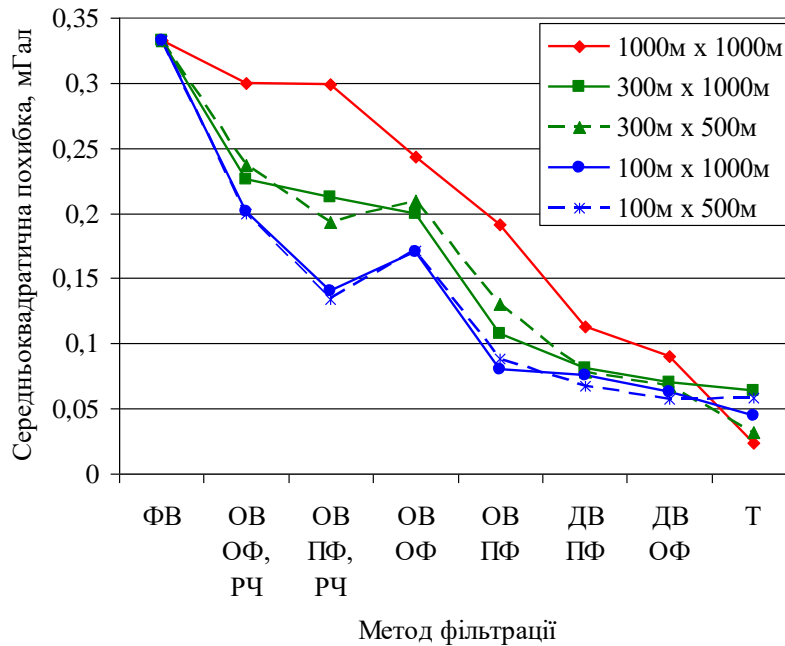


Рис. 3. Результати досліджень розробленого методу двовимірної цифрової фільтрації гравіметричної вимірювальної інформації (в легенді графіків вказано крок відліків масиву гравіметричної інформації)

У результаті проведених досліджень доведено можливість практичної реалізації методу двовимірної цифрової фільтрації. Визначено, що точність гравіметричної вимірювальної інформації про аномалії прискорення сили тяжіння підвищилася до 2-х разів (порівняно з одновимірною фільтрацією) та у 3...5 разів (порівняно з вихідним сигналом інтегруючого гравіметра). Двовимірний оптимальний фільтр забезпечує вищу точність, ніж прямокутний, але потребує наявності апріорної інформації про спектральні щільності корисного сигналу та похибок. Середньоквадратичне значення похибки гравіметричної вимірювальної інформації після двовимірної фільтрації дорівнює (0,057...0,074) мГл, максимальна похибка гравіметричної вимірювальної інформації становить (0,17...0,22) мГл (з $P_{дог} = 0,997$).

Висновки.

1. Розглянуто методи цифрової фільтрації вихідного сигналу гравіметра, що входить до складу авіаційної гравіметричної системи. Результатом фільтрації є підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння внаслідок усунення впливу вертикального прискорення, поступальних і кутових віброприскорень літака.

2. Проблему фільтрації вирішено для двох можливих варіантів обробки вихідного сигналу гравіметра. Фільтрація гравіметричної вимірювальної інформації може бути виконана одновимірним фільтром нижніх частот для масиву відліків, що отримані вздовж однієї лінії польоту АГС. Така фільтрація виконується в процесі польоту АГС в темпі надходження відліків або при післяпольотній обробці гравіметричних вимірювань. Інший варіант, що пропонується у цьому дослідженні, полягає в формуванні двовимірного масиву цифрових відліків гравіметричної вимірювальної інформації про аномалії прискорення сили тяжіння з урахуванням прив'язки до координат точок поверхні Землі, в яких ці відліки були отримані. Цей масив відповідає ряду сусідніх ліній польоту АГС. Після цього виконують фільтрацію сформованого масиву за допомогою двовимірного цифрового фільтра нижніх частот.

У процесі фільтрації додатково враховують двовимірні кореляційні зв'язки, наявні у корисному сигналі про аномалії прискорення сили тяжіння. Така фільтрація може бути виконана в ході післяпольотної обробки результатів гравіметричних вимірювань.

3. Використання двовимірної фільтрації гравіметричної вимірювальної інформації дозволяє підвищити точність визначення аномалій прискорення сили тяжіння до 2-х разів (порівняно з одновимірною фільтрацією) та у 3...5 разів (порівняно з вихідним сигналом інтегруючого гравіметра). Двовимірний оптимальний фільтр забезпечує вищу точність, ніж прямокутний, але потребує наявності апріорної інформації про спектральні щільності корисного сигналу та похибок. Середньоквадратичне значення похибки гравіметричної вимірювальної інформації після двовимірної фільтрації дорівнює (0,057...0,074) мГл, максимальна похибка гравіметричної вимірювальної інформації становить (0,17...0,22) мГл (з $P_{дог} = 0,997$).

Список використаної літератури:

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень : підручник / *О.М. Безвесільна*. – К. : Либідь, 2001. – 264 с.
2. *Маловичко А.К.* Гравіразведка / *А.К. Маловичко, В.И. Костицын*. – М. : Недра, 1992. – 357 с.
3. Гравіразведка. Справочник геофизика / под ред. *Е.А. Мудрецової*. – М. : Недра, 1981. – 397 с.
4. *Пантелеев В.Л.* Основы морской гравиметрии / *В.Л. Пантелеев*. – М. : Недра, 1983. – 268 с.
5. *Костицын В.И.* Методы и задачи детальной гравіразведки / *В.И. Костицын*. – Иркутск : Иркутский ун-т, 1989. – 128 с.
6. *Маловичко А.К.* Детальная гравіразведка на нефть и газ / *А.К. Маловичко, В.И. Костицын, О.Л. Тарунина*. – М. : Недра, 1989. – 224 с.
7. Инструкция по гравіметрической разведке. – М. : Недра, 1980. – 80 с.
8. *Безвесільна О.М.* Двогіроскопний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи : монографія / *О.М. Безвесільна, А.В. Коваль*. – Житомир : ЖДТУ, 2013. – 252 с.
9. *Безвесільна О.М.* Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри : монографія / *О.М. Безвесільна*. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
10. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений / *Р.Гонсалес, Р.Вудс*. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
11. Адаптивные фильтры / под ред. *К.Ф. Коуэна, П.М. Гранта* ; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 392 с.
12. *Василенко Г.И.* Восстановление изображений / *Г.И. Василенко, А.М. Тараторин*. – М. : Радио и связь, 1986. – 304 с.

References:

1. Bezvesil'na, O.M. (2001), *Vymirjuvannja pryskoren'*, pidruchnyk, Lybid', K., 264 p.
2. Malovychko, A.K., and Kostycyn, V.Y. (1992), *Gravirazvedka*, Nedra, M., 357 p.
3. Mudrecovoj, E.A. (ed.) (1981), *Gravirazvedka. Spravochnik geofizika*, Nedra, M., 397 p.
4. Panteleev, V.L. (1983), *Osnovy morskoy gravimetrii*, Nedra, M., 268 p.
5. Kostycyn, V.I. (1989), *Metody i zadachi detal'noj gravirazvedki*, Irkutskij un-t, Irkutsk, 128 p.
6. Malovichko, A.K., Kostycyn, V.I. and Tarunina, O.L. (1989), *Detal'naja gravirazvedka na neft' i gaz*, Nedra, M., 224 p.
7. Главное управление геодезии, картографии и кадастра (1980), «Инструкция по гравіметрической разведке», Nedra, M., 80 p.
8. Bezvesil'na, O.M. and Koval', A.V. (2013), *Dvogiroskopnij gravimetr avtomatizovanoj aviacijnoj gravimetrichnoj sistemi*, monografija, ZhDTU, Zhitomir, 252 p.
9. Bezvesil'na, O.M. (2007), *Aviacijni gravimetrichni sistemi ta gravimetri*, monografija, ZhDTU, Zhitomir, 604 p.
10. Gonsales, R. and Vuds, R. (2005), *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij*, Tehnosfera, M., 1072 p.
11. Koujena, K.F. and Granta, P.M. (ed.) (1988), *Adaptivnye fil'try*, Translated by English, Mir, M., 392 p.
12. Vasilenko, G.I. and Taratorin, A.M. (1986), *Vosstanovlenie izobrazhenij*, Radio i svjaz', M., 304 p.

Безвесільна Олена Миколаївна – Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- гравіметричні системи;
- навігаційні системи та прилади.

E-mail: o.bezvesilna@gmail.com.

Подчашинський Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання механічних величин;
- цифрова обробка відеозображень;
- комп'ютеризовані системи управління.

E-mail: ju.podchashinskiy@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2019.