

УДК 550.34

Модель похибок волоконно-оптичного гіроскопа

Странський Ю.А., к.т.н., доц., Шмирьова Л.М.

Одним з найважливіших аспектів проектування інерціальних навігаційних систем без платформи (БІНС) є вироблення вимог до чутливих елементів, зокрема до датчиків кутової швидкості. При проектуванні БІНС, виходячи з вимог забезпечення заданого рівня точності у виробленні параметрів орієнтації та навігації об'єкта, у багатьох випадках обмежуються спрощеними моделями похибок чутливих елементів, приймаючи їх за квазіпостійні величини, не розглядаючи динаміку їх зміни. В даний час одним із шляхів підвищення рівня точності є детальний опис моделі похибок чутливих елементів і ретельний аналіз їх впливу на точності характеристики БІНС. Докладний аналіз можна здійснити за допомогою імітаційного моделювання алгоритмів роботи БІНС. Мета цієї роботи: побудова математичної моделі похибок волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ), яка буде враховувати не тільки структуру шумів, але і залежність вихідного сигналу від впливу зовнішніх факторів, таких як температура і швидкість її зміни. В роботі наведено порівняння реальних сигналів ВОГ, виробництва АТ «Електроприлад», і вихідних характеристик з використанням

математичної моделі, побудованої для цих же гіроскопів. Показано відповідність моделі.

Технічні характеристики гіроскопа

В основі роботи інтерференційного волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ) лежить ефект Саньяка, сутність якого полягає у виникненні різниці часів обходу оптичного контуру електромагнітними хвилями (світлом), що поширюються по контуру в протилежних напрямках, якщо він обертається в інерціальному просторі. В результаті різниця часів трансформується в різницю фаз цих хвиль. Завдяки цьому ВОГ відрізняється від класичних типів гіроскопів тим, що не має обертових частин. Тому даний тип датчиків відноситься до числа найбільш надійних приладів при їх експлуатації в системі. До інших переваг ВОГ слід віднести невеликі габарити і відносно невисоку вартість. При проектуванні підсистеми гіростабілізації була обрана модель ВОГ ВГ910Q, виробництва АТ «Електроприлад», параметри якого відповідали вимогам, що пред'являються до проектованої системи.

Технічні характеристики гіроскопа:

- діапазон вимірюваних швидкостей - 150 град / с,
- масштабний коефіцієнт (МК) $k(T)$ - 7 мВ / град / с,
- робоча смуга частот - 0 ... 0,45 кГц,
- кутовий випадковий дрейф - 0,04 град / $\sqrt{ч}$,
- дрейф нуля (1σ) - 10 град / ч,
- стабільність МК (1σ) - 0,1%.

Математична модель

Вихідний сигнал ВОГ, як і будь-якого іншого датчика кутової швидкості, можна описати наступною моделлю:

$$u(\omega, T) = S(\omega, T) \cdot \omega + u_0(T) + \eta_u, (1)$$

де u -вихідний сигнал ВОГ, ω -діюча кутова швидкість, u_0 - зміщення нульового сигналу ВОГ, S -масштабний коефіцієнт (МК) ВОГ, η_u -складова білого шуму.

Із формули (1) можна виразити кутову швидкість $\omega = M(u - u_0 - \eta_u)$, де $M = S^{-1}$

Коефіцієнти моделі похибок M і u_0 (2) визначаються в ході калібрування; при цьому експеримент необхідно організувати таким чином, щоб виключити вплив інших зовнішніх факторів на вихідний сигнал. За знайденими величинам відновлюється діюча кутова швидкість ω :

$$\omega' = M'(u - u'_0), (3),$$

знак ' означає що величини отримані в ході калібрування. Похибка

визначення кутової швидкості $\delta \omega$ може бути отримана як різницю діючої ω і обчисленої ω' кутових швидкостей:

$$\delta \omega = \omega - \omega' = M(u - u_0 - \eta_u) - M'(u - u'_0) (4)$$

Враховуючи, що $\Delta M = (M - M')/M$, $\Delta u_0 = u_0 - u'_0$ і не беручи величини 2 порядку, можна отримати:

$$\delta \omega = -M' \Delta u_0 + \Delta M \cdot M'(u - u'_0) - M' \eta_u (5)$$

Вводячи позначення $\Delta \omega_0 = -M' \cdot \Delta u_0$, $\eta_\omega = -M' \eta_u$, приходимо до моделі похибки що аналогічна (2)

$$\delta \omega = \Delta \omega_0 + \Delta M \cdot \omega' + \eta_\omega, (6)$$

де $\Delta \omega_0$ - помилка визначення зміщення нуля і його нестабільність при пуску;

ΔM - похибка визначення і нестабільності пуску МК, яка вносить вклад пропорційний вимірюваній кутової швидкості;

η_ω - шумова складова, що характеризує флуктуаційні похибки гіроскопа.

У цій роботі покладається, що нестабільність зміщення нуля і МК в пуску викликана зміною температури, вплив інших зовнішніх факторів не розглядалася.

Ідентифікація структури шумів за допомогою варіацій Аллана

Структура і характер шумових складових в каналі вимірювання істотно впливають на достовірність оцінки самої вимірюваної величини. Класичні методи дослідження випадкових процесів (вибіркова

дисперсія, спектральна щільність) не завжди дозволяють ідентифікувати джерело похибок і їх кількісний вклад в загальну статистику шуму [3]. Для вирішення подібних завдань широко використовується варіація Аллана [3 - 7]. За характерними нахилами на графіку варіації Аллана судять про наявність різних шумових складових в сигналі. Інтенсивність цих складових визначають шляхом апроксимації кривої Аллана поліномом [4, 5, 7]. Шумову складову похибки ВОГ розглянемо як сукупність випадкових процесів, склад яких будемо визначати, розраховуючи варіації Аллана за результатами вимірювань. Випадковий розкид по кутовий швидкості, мерехтіння шуму і шум відходу можуть, як одночасно бути присутнім в датчику, так і бути відсутнім зовсім. ВОГ встановлювався на нерухому підставу для визначення структури шумів η_ω вихідного сигналу. Вихідні дані при цьому фіксувалися протягом доби, після чого з використанням розробленої власними засобами програми будувалася варіація Аллана. На рис. 1 наведені варіації Аллана для вихідного сигналу ВОГ, побудовані для чотирьох добових реалізацій. За графіком видно, що в отриманих реалізаціях присутні три нахили -1, -1/2 і 1/2. Коефіцієнти полінома, що характеризують білий шум і шум квантування, завжди постійні, а ось коефіцієнт, що характеризує випадкове блукання, відрізняється. Це викликано тим, що під час випробувань температура навколишнього середовища

змінювалася по-різному, і можна зробити висновок, що цю складову варто віднести до нестабільності зсуву нуля, викликаною зміною температури.

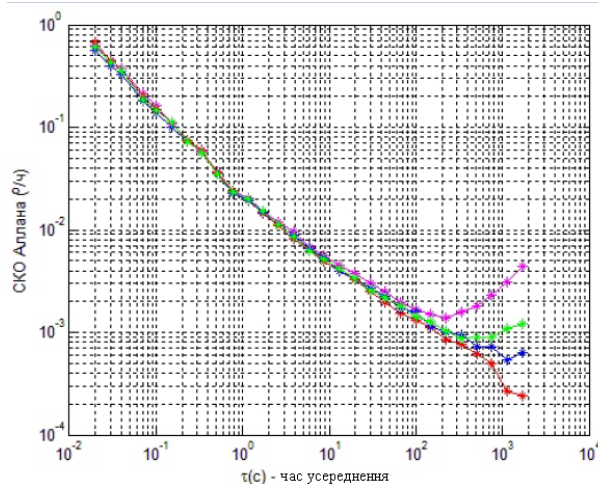


Рис. 1. Варіація Аллана для вихідного сигналу ВОГ

Залежність коефіцієнтів моделі похибок від температури

Незважаючи на те, що фірми-виробники постійно покращують технології створення ВОГ, удосконалюючи елементну базу, одним з головних чинників, що обмежують точність ВОГ, є температурна нестабільність. Температурну помилку в вихідному сигналі викликають три фактори: величина температури, швидкість зміни температури і температурний просторовий градієнт. Температурний просторовий градієнт і швидкість зміни температури надають значно більший ефект на вихідний сигнал ВОГ, побудованого за схемою зі зворотним зв'язком, ніж просто абсолютне значення температури [8]. Похибку вихідного сигналу ВОГ, викликану температурою, можна

розділити на дві частини: мультиплікативну (похибка МК) і аддитивну (похибка зміщення нуля) [9, 10]. По кореляції МК і дрейфу нуля ВОГ з даними про величину температури і швидкість її зміни, будувалися моделі залежності МК і зміщення нуля такого вигляду:

$$\Delta M = (1 + K_T(T))(1 + K_{dT}(dT)) \quad (7)$$

$$\Delta w_0 = k_T(T) + k_{dT}(dT) \quad (8)$$

де $K_T(T)$ - залежність похибки МК від температури, описана поліномом третього порядку; $K_{dT}(dT)$ - залежність похибки МК від швидкості зміни температури, описувана поліномом першого порядку; $k_T(T)$ - залежність похибки зміщення нуля від температури, описувана поліномом третього порядку; $k_{dT}(dT)$ - залежність похибки зміщення нуля від швидкості зміни температури, описувана поліномом першого порядку.

Імітаційна модель похибок ВОГ

Для створення імітаційної моделі похибок ВОГ було використана графічне середовище моделювання Simulink. На базі моделі похибок (6) з урахуванням (7), (8) і структури шумів засобами Simulink була розроблена імітаційна модель похибок ВОГ, наведена на рис.2. Розроблена модель

похибок ВОГ включає в себе блок формування діючої кутової швидкості, блок формування зміни температури, передавальну функцію, яка характеризується постійною часу прогріву приладу. У блоці Scale Factor формуються значення МК, в блоці Bias - зміщення нуля вихідного сигналу ВОГ. Вхідною інформацією для обох блоків служать значення температури, похідною за часом від температури, а також коефіцієнтів, що характеризують залежність МК і зміщення нуля від температури, знайдені в попередньому пункті. Шумова складова ВОГ формувалася з трьох складових: шум квантування, білий шум і випадковий розкид вихідного сигналу, інтенсивності яких розраховувалися шляхом апроксимації варіації Аллана, отриманої за реальними даними. Випадковий процес формується шляхом проходження одиничного білого шуму через формуючий фільтр [11, 12]. Для перевірки точності розробленої моделі результати імітаційного моделювання порівнювалися з сигналом реального гіроскопа. За графіками, наведеними на рис.3. видно, що вони збігаються з високою точністю, із чого можна зробити висновок про адекватність розробленої моделі похибок вихідного сигналу ВОГ.

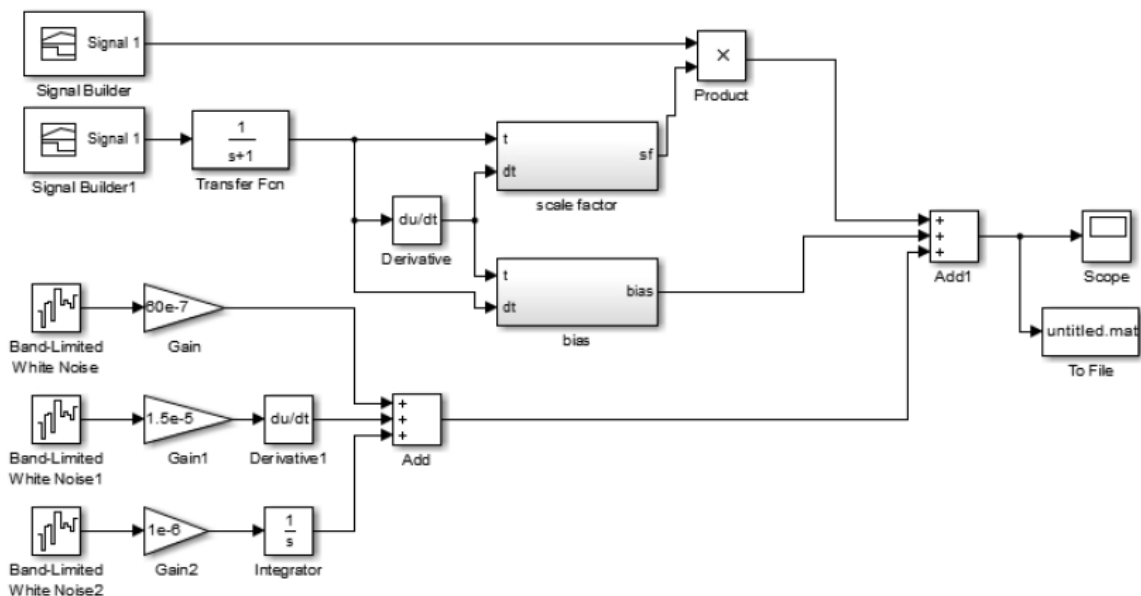


Рис.2. Імітаційна модель похибок ВОГ

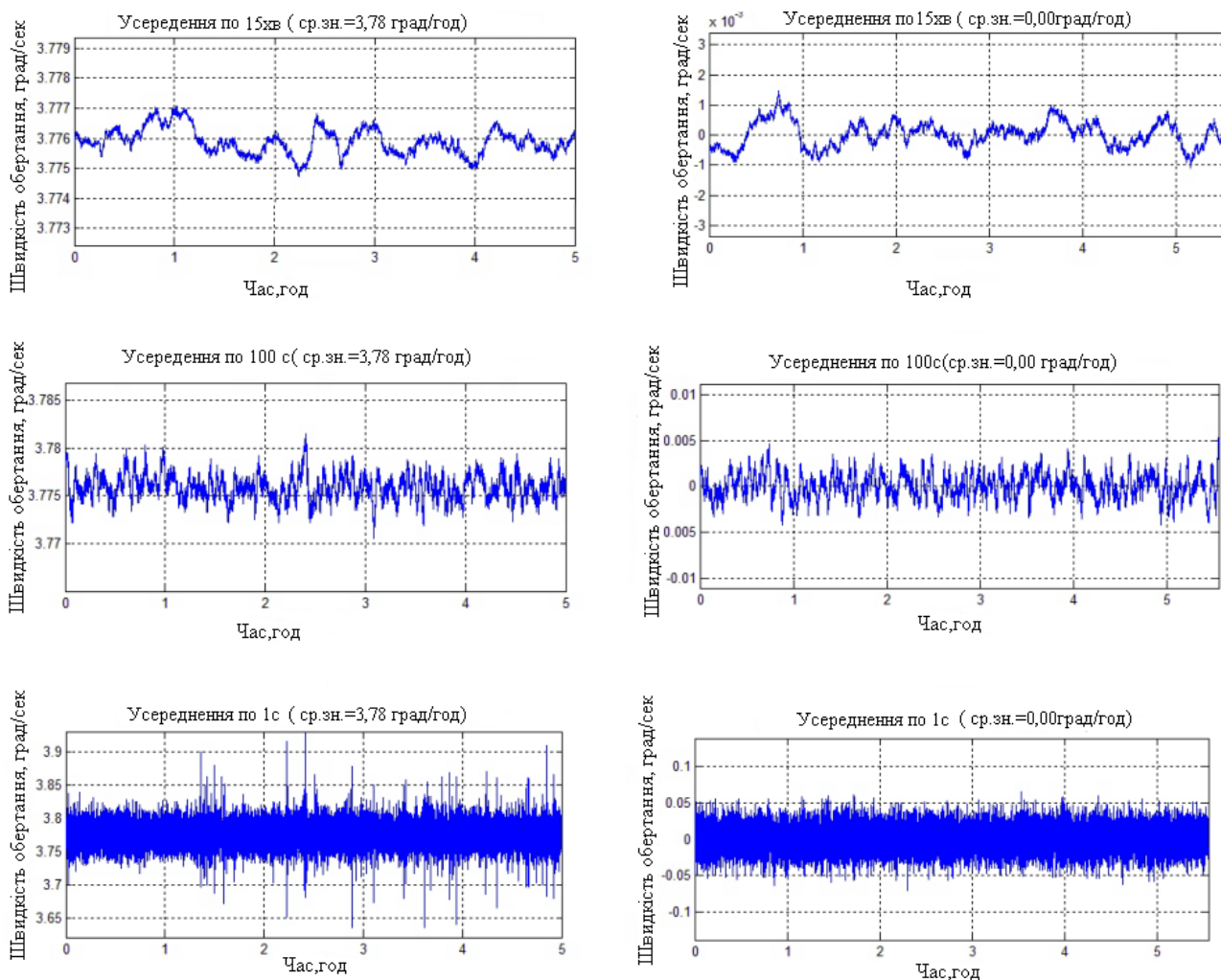


Рис. 3. Зовнішній вигляд вихідного сигналу з різними інтервалами усереднення:

1 с, 100 с, 15 хв. Зліва - реальний, праворуч - отриманий шляхом моделювання

Висновок

На підставі результатів експериментальних досліджень ВОГ представлена модель похибок, що враховує структуру шумової складової вихідного сигналу і його залежність від температури і швидкості її зміни. Дослідження шумової складової вихідного сигналу ВОГ проводилися за допомогою варіацій Аллана. Порівняльний аналіз вихідних характеристик ВОГ, отриманої на основі цієї моделі, з реальними даними, підтвердив точність запропонованої моделі.

Література

1. Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа / Гироскопия и навигация. – 2012. – № 4 (79). – С. 10-20.
2. Кутовой Д.А., Ситников П.В. Некоторые практические

вопросы использования вариации Аллана при исследовании бесплатформенного инерциального блока. Ракетно-космическая техника. Сер.11. Системы управления ракетных комплексов. - ФГУП НПОА, 2013.- Вып.1.-С.55-64.

3. Graizer V.M. Effect of tilt on strong motion data processing, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 197–204, 2005.
4. Степанов О.А., Челпанов И.Б., Моторин А.В. О точности оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связи с вариацией Аллана / Сборник материалов XXII. Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2015. С. 485-491.