

УДК 629.05

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771412021269258>О. В. Заморський¹, к.т.н., доцент**ПРО АВТОНОМНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ШИРОТИ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ
ОБ'ЄКТА ОДНОКОМПОНЕНТНИМ АНАЛІТИЧНИМ
ГІРОСКОПІЧНИМ КОМПАСОМ****Уа**

Розглядається метод автономного визначення широти місцеположення об'єкта однокомпонентним аналітичним гіроскопічним компасом у статичному режимі роботи із застосуванням одного гіроскопічного датчика кутової швидкості. Вибирається схема скануючого однокомпонентного аналітичного гіроскопічного компасу із можливістю забезпечення у процесі сканування вертикального напрямку вхідної осі датчика кутової швидкості. Представлені алгоритми, за яких обчислення широти інваріантно до зміщення нуля та до масштабного коефіцієнту датчика кутової швидкості за умови триразових вимірювань його вихідних характеристик, а також інваріантно до азимутального кута початкового положення вхідної осі датчика кутової швидкості в процесі сканування за умови чотирьохразових вимірювань. Надається загальна оцінка похибок автономного визначення широти однокомпонентним аналітичним гіроскопічним компасом.

En

A method of autonomous determination of object location latitude by one-component analytical gyroscopic compass in static mode using a single gyroscopic angular velocity sensor is reviewed. A scheme of scanning one-component analytical gyroscopic compass is selected that additionally provides the vertical direction of the input axis of the angular velocity sensor during the scanning process. Algorithms are developed to make the calculation invariant to zero offset and scale factor of the angular velocity sensor under the conditions of triple measurements of its output characteristics and also invariant to azimuth angle of the initial position of the input axis of the angular velocity sensor during the scanning under the condition of quadruple measurements. A general estimation of errors of autonomous determination of latitude by the one-component analytical gyroscopic compass is provided.

Вступ

Згідно загальної класифікації гіроскопічні компаси (ГК) за методом визначення істинного (географічного) азимуту заданого напрямку розділяються на фізичні ГК та аналітичні ГК [1]. Фізичні ГК, до яких належать маятникові і коректовані ГК (ГК із прямою і непрямою корекцією), володіють вибірковістю головної осі гіроскопа в азимутальному напрямку відносно площини географічного меридіану і є автономними технічними засобами.

¹ КІІ ім. Ігоря Сікорського

Аналітичні ГК визначають заданий азимутальний напрямок відносно географічного меридіану через розрахунки на основі даних гіроскопічних датчиків кутової швидкості. Вирізняють статичні та динамічні аналітичні ГК. У статичного однокомпонентного аналітичного ГК, розташованого на нерухомій основі, вісь його чутливості (вхідна вісь датчика кутової швидкості) знаходиться в площині географічного горизонту. Якщо зміщення нуля U_0 і масштабний коефіцієнт k датчика кутової швидкості інваріантні до часу, то вихідна характеристика такого квазіідеального ГК має вигляд

$$U_1 = U_0 + kn_1 U \cos\varphi \cos A, \quad (1)$$

де $U \cos\varphi$ – значення проекції вектора кутової швидкості U добового обертання Землі на площину географічного горизонту на широті φ місцеположення ГК, $n_1 = 1$ – значення одиничного вектора \mathbf{n}_1 , направлено по осі чутливості ГК. Тоді значення A істинного азимуту напрямку осі чутливості однокомпонентного аналітичного ГК обчислюється з (1) як

$$A = \arccos \frac{U_1 - U_0}{kU \cos\varphi}. \quad (2)$$

Такий аналітичний ГК не є автономним через необхідність визначення широти φ місцеположення ГК іншими технічними засобами, наприклад, супутниковою навігаційною системою (СНС) [2]. Інерціальні навігаційні системи, які визначають навігаційні параметри рухомого об'єкта, у тому числі його широту через обчислення із дворазовим інтегруванням вихідних характеристик акселерометрів, перед початком руху об'єкта також потребують визначення початкового значення широти φ_0 іншими технічними засобами, наприклад, СНС [3]. Відомі альтернативні методи автономного визначення широти місцеположення об'єкта інерціально-вимірювальним модулем, який складається із трьох гіроскопів і трьох акселерометрів [4] або, як мінімум, з трьох гіроскопів – точних датчиків кутової швидкості [5].

Постановка задачі

Метою дослідження є розробка методики автономного визначення широти місцеположення об'єкта однокомпонентним аналітичним ГК та загальна оцінка похибок такого визначення широти.

Алгоритми визначення широти

Відомі так звані скануючі однокомпонентні аналітичні ГК, у яких вісь чутливості має ступінь свободи відносно вертикальної осі і періодично може змінювати свій азимутальний напрямок на будь-який кут відносно початкового положення [6]. Відомі також узагальнені алгоритми скануючих аналітичних ГК, у разі реалізації яких аналітичне визначення азимута-

льного напрямку відносно площини географічного меридіану може бути інваріантним до зміщення нуля U_0 або до масштабного коефіцієнту k датчика кутової швидкості. Інваріантність до зміщення нуля U_0 досягається завдяки обчисленню вихідних характеристик ГК, вимірюваних при двох довільних положеннях осі чутливості ГК, а інваріантність до масштабного коефіцієнту – за двох не колінеарних положеннях осі чутливості ГК [6, 7].

Нехай скануючий однокомпонентний аналітичний ГК реалізовано так, що його вихідні характеристики U_i вимірюються у разі положеннях осі чутливості ГК (орти \mathbf{n}_i) так, як показано на рис. 1.

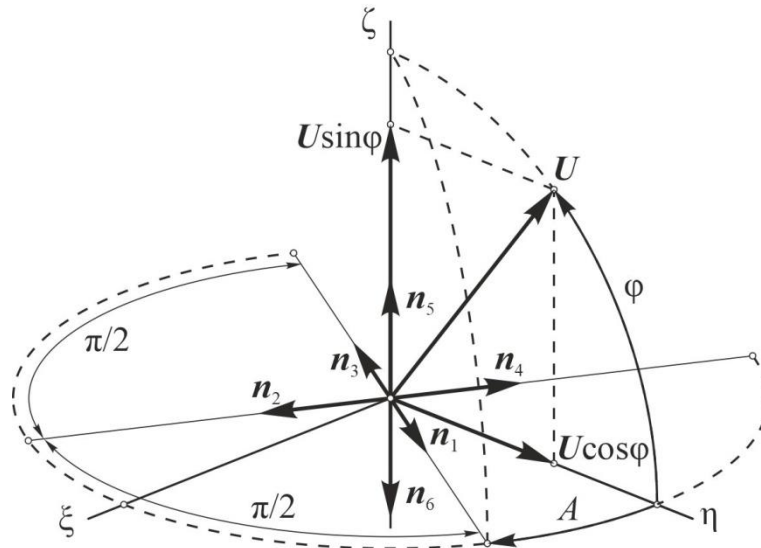


Рис. 1. Положення осі чутливості однокомпонентного ГК, які задаються ортами \mathbf{n}_i , відносно опорної географічної системи координат $\xi\eta\zeta$

Тоді вихідні характеристики квазіідеального ГК:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_0 + kn_1 U \cos \varphi \cos A; \\ U_2 &= U_0 - kn_2 U \cos \varphi \sin A; \\ U_3 &= U_0 - kn_3 U \cos \varphi \cos A; \\ U_4 &= U_0 + kn_4 U \cos \varphi \sin A; \\ U_5 &= U_0 + kn_5 U \sin \varphi; \quad U_6 = U_0 - kn_6 U \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Під час одноразового вимірювання значення істинного азимуту A заданого напрямку (тут – напрямку осі чутливості ГК за початкового її положення, орт \mathbf{n}_1) обчислюється як (2), а значення широти місцеположення ГК можна обчислити при одноразовому вимірюванні із вертикальним положенням осі чутливості ГК (орт \mathbf{n}_5) як

$$\varphi = \arcsin \frac{U_5 - U_0}{kU}. \quad (4)$$

У разі одноразового вимірювання для обчислення широти місцеположення ГК (4) необхідно попередньо визначити значення зміщення нуля

U_0 та масштабного коефіцієнту k датчика кутової швидкості, а для визначення істинного азимуту заданого напрямку (2) ще і значення широти φ .

Із перших чотирьох рівнянь (3) очевидно, що обчислення значення азимутального кута A , яке було б інваріантно до зміщення нуля U_0 та до масштабного коефіцієнту k датчика кутової швидкості, а також до широти φ місцеположення ГК, можна здійснити як

$$A = \operatorname{arctg} \frac{U_4 - U_2}{U_1 - U_3}. \quad (5)$$

Також очевидно, що під час знаходження осі чутливості ГК в одній площині (орти $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_4$, або $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_5, \mathbf{n}_6$, або $\mathbf{n}_2, \mathbf{n}_4, \mathbf{n}_5, \mathbf{n}_6$) із чотирьох вихідних характеристик (3) будь-які три лінійно незалежні:

$$\begin{aligned} U_1 + U_3 &= U_2 + U_4; \\ U_1 + U_3 &= U_5 + U_6; \\ U_2 + U_4 &= U_5 + U_6. \end{aligned} \quad (6)$$

Тому для обчислення значення азимутального кута A , яке було б інваріантно до зміщення нуля U_0 і до масштабного коефіцієнту k датчика кутової швидкості, а також до широти φ місцеположення ГК, достатньо виміряти лише три вихідні характеристики ГК, наприклад, U_1, U_3 і U_4 :

$$A = \operatorname{arctg} \frac{2U_4 - U_1 - U_3}{U_1 - U_3}. \quad (7)$$

Аналогічно можна обчислити значення широти φ місцеположення ГК, яке було б інваріантно до зміщення нуля U_0 та до масштабного коефіцієнту k датчика кутової швидкості, наприклад, як

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_5 - U_6}{U_1 - U_3} \cos A = \operatorname{arctg} \frac{2U_5 - U_1 - U_3}{U_1 - U_3} \cos A. \quad (8)$$

Значення азимутального кута A можна попередньо обчислити згідно (7), тому кількість необхідних вимірювань вихідних характеристик ГК збільшується до чотирьох (U_1, U_3, U_4, U_5). За умови чотирьохразового вимірювання вихідних характеристик обчислення широти φ місцеположення ГК, яке було б інваріантно до зміщення нуля U_0 та до масштабного коефіцієнту k датчика кутової швидкості, а також до азимутального кута A , можна здійснити, наприклад, як

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2U_5 - U_1 - U_3}{\sqrt{(2U_4 - U_1 - U_3)^2 + (U_1 - U_3)^2}}. \quad (9)$$

Загальна оцінка похибок визначення широти

Нехай σ_U – випадкова середньоквадратична похибка вимірювання вихідних характеристик U_i однокомпонентним ГК. Тоді обчислення значення азимутального кута A згідно (7) середньоквадратична похибка σ_A із точністю до величин першого порядку малості визначається [6] як

$$\sigma_A = \frac{\sigma_U}{kU} \sec\varphi \sqrt{1 + 2\cos^2 A}, \quad (10)$$

а відносна похибка $\sigma_A U / \sigma_U$ за $k=1$ (рис. 2, а) як

$$\frac{\sigma_A U}{\sigma_U} = \sec\varphi \sqrt{1 + 2\cos^2 A}. \quad (11)$$

Аналогічно, середньоквадратична похибка σ_φ обчислення значення широти φ згідно (9) визначається як

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_U}{kU} \cdot \frac{\sqrt{1 + 2\cos^2 \varphi}}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi \sin^2 A}}, \quad (12)$$

а відносна похибка $\sigma_\varphi U / \sigma_U$ за $k=1$ як

$$\frac{\sigma_\varphi U}{\sigma_U} = \frac{\sqrt{1 + 2\cos^2 \varphi}}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi \sin^2 A}}. \quad (13)$$

Виразам (11) і (13) відповідають графічні залежності, зображені на рис. 2, а і рис. 2 б.

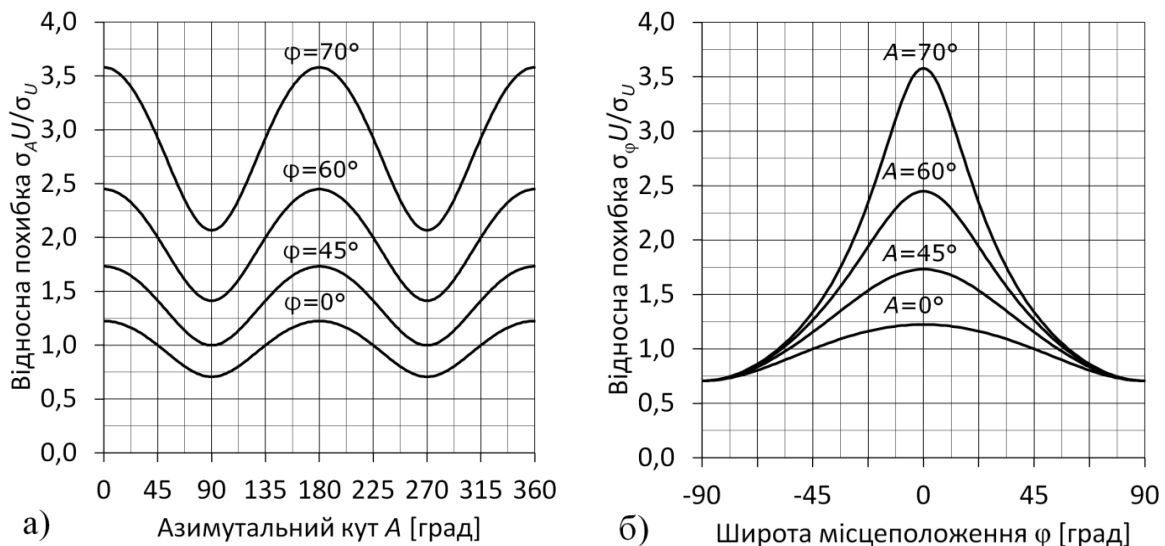


Рис. 2. Відносні похибки скануючого однокомпонентного ГК:

а) у разі обчислення істинного азимуту A заданого напрямку; б) за обчислення широти φ місцеположення об'єкта

Із виразів (11) і (13) та їх графічної інтерпретації (рис. 2) випливає наступне.

Найменші похибки обчислення істинного азимуту A заданого напрямку згідно (7) за умови триразових вимірювань вихідних характеристик забезпечуються тоді, коли початковий азимутальний кут відхилення осі чутливості однокомпонентного ГК від площини меридіану близький до ± 90 град на широтах, наближених до екватора. На певній широті місцезнаходження однокомпонентного ГК похибка найбільша тоді, коли під час першого вимірювання (рис. 1) вісь чутливості ГК знаходиться у площині меридіану. На полярних широтах похибки зростають значно і досягають у разі подальшого наближення до земного полюса критичного значення.

Найменші похибки обчислення широти φ згідно (9) за умови чотирьохразових вимірювань вихідних характеристик забезпечуються тоді, коли під час першого вимірювання вісь чутливості ГК знаходиться у площині меридіану на полярних широтах. У разі такого початкового положення осі чутливості ГК у площині меридіану за переміщення ГК до екватора похибки зростають не критично. Похибки визначення широти зростають значно і досягають критичного значення тоді, коли під час подальшого наближення до екватора початковий азимутальний кут відхилення осі чутливості однокомпонентного ГК від площини меридіану наближається до ± 90 град.

Висновки

Представлені алгоритми визначення широти скануючим однокомпонентним аналітичним ГК. Обчислення широти інваріантно до зміщення нуля та до масштабного коефіцієнту датчика кутової швидкості за умови триразових вимірювань його вихідних характеристик. За умови чотирьохразових вимірювань обчислення широти також інваріантно до азимутального кута початкового положення вхідної осі датчика кутової швидкості при першому вимірюванні вихідної характеристики. Виходячи із наявності флуктуацій вихідного сигналу датчика кутової швидкості, подана загальна оцінка похибок автономного визначення широти однокомпонентним аналітичним ГК.

Можлива розробка узагальненого алгоритму автономного визначення широти для одно-, дво-, трьох-компонентних аналітичних пристроїв на основі гіроскопічних датчиків кутової швидкості за умови одно-, дво-, трьох-разового вимірювання їх вихідних характеристик.

Список використаної літератури

1. *Заморський О. В.* Гірокомпас з непрямим керуванням для наземних рухомих об'єктів. // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Приладобудування. – Київ, 2020. – Вип. 59 (1) . – С. 5–23.

2. *Анучин О. Н., Емельянцев Г. И.* Интегрированные системы ориентации и навигации морских подвижных объектов. – Санкт-Петербург, РФ: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1999. – 357 с.
3. *Матвеев В. В., Распопов В. Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – Санкт-Петербург, РФ: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
4. *Аврутов В. В.* Автономное определение начальной широты с помощью инерциально-измерительного модуля // Прикладна механіка. – Київ, 2018. – 54, № 5. – с. 116–122.
5. *Аврутов В. В., Рижков Л. М.* Про метод автономного визначення довготи та широти рухомого об'єкту // Прикладна механіка. – Київ, 2021. – 57, № 1. – с. 115–120.
6. *Серегин В. В., Кукулиев Р. М.* Лазерные гиromетры и их применение. – Москва, СССР: Машиностроение, 1990. 298 с.
7. *Серегин В. В.* Обобщенный алгоритм аналитического метода гирокомпасирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – Ленинград, СССР: ЛИТМО, 1977. № 1. – С. 77–83.