

УДК 531.383 (045)

О.А. Сущенко, канд. техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ВИЗНАЧЕННЯ КУРСУ В РЕЖИМІ ПОПЕРЕДНЬОГО ПРИВЕДЕННЯ ДО ГОРИЗОНТУ

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua

Розглянуто особливості управління системою визначення курсу, до складу якої належать платформа в кардановому підвісі, гіроскопи з динамічним настроюванням і маятникові акселерометри, у режимі попереднього приведення до горизонту. Подано математичний опис режиму попереднього приведення до горизонту і визначено відповідні моменти управління.

Вступ

Засоби визначення курсу завжди мали значення для навігації рухомих об'єктів. Спочатку в основу створення засобів визначення курсу було покладено схему "просторового гірокомпаса" з плаваючою маятиковою гіросферою, теорія якого була розроблена О.Ю. Ішлінським [1].

Подальший розвиток засобів визначення курсу відбувався шляхом створення малогабаритних гірогоризонтів на поплавкових гіроскопах.

У наш час відбувається стійка тенденція до зниження масогабаритних характеристик засобів визначення курсу з одночасним підвищенням надаваних до них вимог, а також розширенням їх функціональних можливостей. У зв'язку з цим останнім часом набули широкого розповсюдження засоби визначення курсу, які будуються на гіроскопах із динамічним настроюванням, оскільки до переваг останніх відносяться низькі масогабаритні характеристики та енергоспоживання, висока технологічність та відносно низька вартість.

Засоби визначення курсу, що будуються на гіроскопічних приладах, мають велике значення для навігації рухомих об'єктів, незважаючи на розвиток альтернативних засобів, наприклад, глобальних супутникових навігаційних систем.

Використання гіроскопічних датчиків в навігаційних системах дозволяє визначати курс рухомого об'єкта щодо географічного меридіана (в режимі гірокомпаса) та куту відхилення від заданого напрямку (в режимі гіроазимута). Існують два основних способи побудування навігаційних систем на основі гіроскопічних датчиків: з використанням платформи, на якій устанавлюються датчики та безплатформний варіант, коли датчики встановлюються безпосередньо на корпусі об'єкта. У найбільш відповідальних випадках із високими вимогами за точністю перевага віддається платформному варіанту. Застосування першого способу передбачає стабілізацію платформи відносно площин горизонту та меридіана, положення яких безперервно змінюються в просторі внаслідок обертання Землі та руху об'єкта.

Сучасні засоби визначення курсу з використанням стабілізованої платформи характеризуються складними багаторежимними алгоритмами роботи. До основних режимів роботи засобів визначення курсу належать режим попереднього приведення до горизонту, режим калібрування, режим точного приведення до горизонту, режим визначення курсу, режим визначення азимута.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Особливості алгоритмів роботи засобів визначення курсу достатньо широко висвітлені в літературі, наприклад, у праці [2], але при цьому не робиться акцент на особливостях окремих режимів їхньої роботи, у той час як ускладнення алгоритмів роботи є характерною рисою сучасних навігаційних систем.

Математична модель малогабаритного коректованого гірокомпаса на основі гіроскопа з динамічним настроюванням подана в праці [3]. Але в праці [3] розглянуто систему визначення курсу з іншою орієнтацією тривісного підвісу та випадок, коли за навігаційну систему координат береться географічна, а не траєкторна система координат.

Найбільш детально особливості гіроскопічних засобів визначення курсу платформного типу з розділенням на режими роботи точного приведення до горизонту та роботи в режимі курсового приладу проаналізовано в працях [4; 5]. Але, по-перше, там розглянуто платформу із двовісним підвісом, а, по-друге, там немає детального дослідження особливостей формування управляючих та коректувальних моментів у різних режимах. Власне ж режиму попереднього приведення до горизонту у зазначених працях увага взагалі не приділяється.

Постановка завдання

Метою даної роботи є дослідження особливостей управління системою визначення курсу з використанням тривісної платформи, гіроскопів із динамічним настроюванням і маятникових акселерометрів у режимі попереднього приведення до горизонту.

Математичний опис системи визначення курсу в режимі попереднього приведення до горизонту

Розглянемо систему визначення кутів курсу та кутів відхилення від заданого напрямку, до складу якої належать:

- два гіроскопа з динамічним настроюванням із вертикальним і горизонтальним положенням вектора кінетичного моменту, які відповідно можуть використовуватись як гіровертикаль і курсовий гіроскоп;

- три акселерометри, осі чутливості яких спрямовані за горизонтальною та вертикальною осями.

Ці датчики встановлені на платформі у тривісному кардановому підвісі, яка стабілізується за допомогою датчиків моменту, встановлених на відповідних осях карданового підвісу.

Формування моментів управління багато в чому визначається особливостями конкретного режиму роботи системи визначення просторового положення рухомого об'єкта.

У режимі попереднього приведення до горизонту стабілізація платформи в площині горизонту здійснюється до проведення калібрування, тобто за умови неможливості використання для управління платформою сигналів від горизонтального гіроскопа з динамічним настроюванням з огляду на відсутність інформації про їхні дрейфи.

Математичний опис режиму попереднього приведення до горизонту системи визначення кутів курсу та азимута на основі платформи в тривісному підвісі з управлінням от акселерометрів отримаємо, використовуючи теорему про змінювання моменту кількості руху твердого тіла [6].

Для визначення основних кінематичних співвідношень режиму попереднього приведення до горизонту будемо використовувати такі системи координат:

- траєкторну систему координат $O\xi\eta\zeta$ з початком у центрі мас об'єкта, спрямованою за вертикальною віссю $O\xi$ і за вектором подовжньої швидкості об'єкта віссю $O\eta$;

- зв'язану з рухомим об'єктом систему координат $Ox_0y_0z_0$ зі спрямованою за вертикальною віссю об'єкта віссю Oz_0 та з віссю Oy_0 , спрямованою за подовжньою віссю об'єкта;

- зв'язану з зовнішнім кільцем карданового підвісу систему координат $Ox_3y_3z_3$;

- зв'язану з внутрішнім кільцем карданового підвісу систему координат $Ox_By_Bz_B$;

- зв'язану з платформою систему координат $Ox_\Pi y_\Pi z_\Pi$.

Положення об'єкта в траєкторній системі координат визначається кутом відхилення від курсу ψ , кутом диференту ϑ , кутом крену ϕ .

Перехід до системи координат, зв'язаної з платформою, здійснюється за допомогою трьох послідовних поворотів:

- зовнішнього кільця карданового підвісу на кут α ;

- внутрішнього кільця карданового підвісу на кут β ;

- самої платформи на кут γ .

Взаємне розташування об'єкта і траєкторної системи координат, а також об'єкта і платформи зображені на рис. 1, 2.

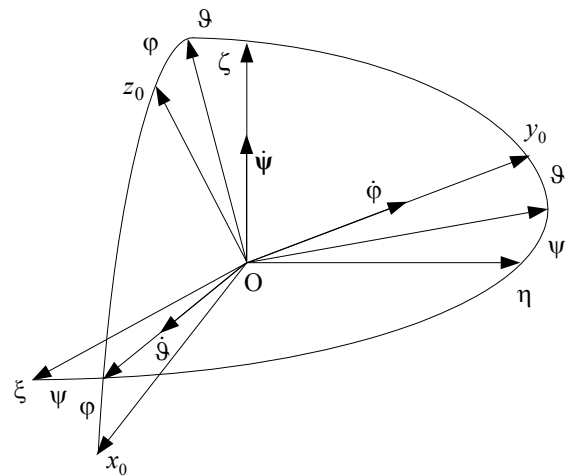


Рис. 1. Взаємне розташування об'єкта і траєкторної системи координат

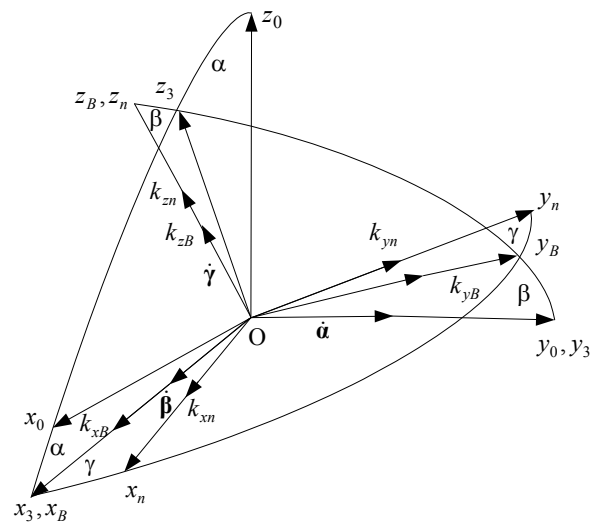


Рис. 2. Взаємне розташування об'єкта і платформи

Рівняння руху платформи в тривісному кардановому підвісі в проекціях на осі платформи Oz_Π , внутрішнього кільця карданового підвісу Ox_B і зовнішнього кільця карданового підвісу Ox_3 набувають вигляду:

$$\frac{dK_{z\Pi}}{dt} + \omega_{x\Pi} K_{y\Pi} - \omega_{y\Pi} K_{x\Pi} = M_{z\Pi};$$

$$\frac{dK_{xB}}{dt} + \omega_{yB} K_{zB} - \omega_{zB} K_{yB} = M_{xB};$$

$$\frac{dK_{y3}}{dt} + \omega_{z3} K_{x3} - \omega_{x3} K_{z3} = M_{y3},$$

де $K_{z\Pi}$, K_{xB} , K_{y3} – проекції кінетичного моменту; $\omega_{z\Pi}$, ω_{xB} , ω_{y3} – проекції абсолютної швидкості; $M_{z\Pi}$, M_{xB} , M_{y3} – проекції головного моменту зовнішніх сил.

З урахуванням обраної орієнтації осей тривісного карданового підвісу і праці [3] отримаємо такі вирази для визначення проекцій кінетичного моменту на осі платформи, внутрішнього і зовнішнього кілець карданового підвісу:

$$K_{x\Pi} = J_{x\Pi} \omega_{x\Pi};$$

$$K_{y\Pi} = J_{y\Pi} \omega_{y\Pi};$$

$$K_{z\Pi} = J_{z\Pi} \omega_{z\Pi};$$

$$K_{xB} = J_{xB} \omega_{xB} + K_{x\Pi} \cos \gamma - K_{y\Pi} \sin \gamma;$$

$$K_{yB} = J_{yB} \omega_{yB} + K_{y\Pi} \cos \gamma + K_{x\Pi} \sin \gamma;$$

$$K_{zB} = J_{zB} \omega_{zB} + K_{z\Pi};$$

$$K_{x3} = J_{x3} \omega_{x3} + K_{xB};$$

$$K_{y3} = J_{y3} \omega_{y3} + K_{yB} \cos \beta - K_{zB} \sin \beta;$$

$$K_{z3} = J_{z3} \omega_{z3} + K_{zB} \cos \beta + K_{yB} \sin \beta,$$

де $J_{x\Pi}$, $J_{y\Pi}$, $J_{z\Pi}$ – проекції моменту інерції платформи на осі системи координат $Ox_{\Pi}y_{\Pi}z_{\Pi}$; J_{xB} , J_{yB} , J_{zB} – проекції моменту інерції внутрішнього кільця карданового підвісу на осі системи координат $Ox_By_Bz_B$; J_{x3} , J_{y3} , J_{z3} – проекції моментів інерції зовнішнього кільця карданового підвісу на осі $Ox_3y_3z_3$.

Відповідно рис. 2 проекції абсолютної швидкості на осі систем координат, зв'язаних із зовнішнім, внутрішнім кільцями карданового підвісу, а також платформою, мають такий вигляд:

$$\omega_{x3} = \omega_{x0} \cos \alpha - \omega_{z0} \sin \alpha;$$

$$\omega_{y3} = \omega_{y0} + \dot{\alpha};$$

$$\omega_{z3} = \omega_{z0} \cos \alpha + \omega_{x0} \sin \alpha;$$

$$\omega_{xB} = \omega_{x3} + \dot{\beta};$$

$$\omega_{yB} = \omega_{y3} \cos \beta + \omega_{z3} \sin \beta;$$

$$\omega_{zB} = \omega_{z3} \cos \beta - \omega_{y3} \sin \beta;$$

$$\omega_{x\Pi} = \omega_{xB} \cos \gamma + \omega_{yB} \sin \gamma;$$

$$\omega_{y\Pi} = \omega_{yB} \cos \gamma - \omega_{xB} \sin \gamma;$$

$$\omega_{z\Pi} = \omega_{zB} + \dot{\gamma},$$

де ω_{x0} , ω_{y0} , ω_{z0} – проекції абсолютної кутової швидкості об'єкта.

Абсолютна кутова швидкість об'єкта являє собою суму швидкості траєкторної системи координат, вирази для визначення якої наведено в праці [4], та швидкості об'єкта щодо траєкторної системи координат, яка може бути визначена з рис. 1.

Особливості управління системою визначення курсу в режимі попереднього приведення до горизонту

Моменти зовнішніх сил, що діють за осями карданового підвісу, являють собою моменти управління, що прикладаються до датчиків моменту, а також моменти опору та моменти збурення:

$$M_{z\Pi} = -f_{\Pi} \dot{\gamma} + M_{\Pi}^B;$$

$$M_{xB} = M_{xB}^y - f_B \dot{\beta} + M_B^B;$$

$$M_{y3} = M_{y3}^y - f_3 \dot{\alpha} + M_3^B,$$

де f_{Π} , f_B , f_3 – коефіцієнти тертя за осями підвісу; M_{xB}^y , M_{y3}^y – моменти управління, що прикладаються до датчиків моменту внутрішнього і зовнішнього кілець карданового підвісу; M_{Π}^B , M_B^B , M_3^B – моменти збурення, що діють в осях карданового підвісу.

У режимі попереднього приведення до горизонту моменти управління пропонується формувати в такий спосіб:

$$M_x = k_x (\delta_y \cos k + \delta_x \sin k) + k_{\beta} \dot{\beta};$$

$$M_y = k_y (\delta_x \cos k - \delta_y \sin k) + k_{\alpha} \dot{\alpha},$$

де δ_x , δ_y являють собою сигнали з виходів підсилювачів, на вхід яких поступають сигнали акселерометрів; $\dot{\beta} = \beta/t$, $\dot{\alpha} = \alpha/t$ визначаються в обчислювальному пристрої з урахуванням часу робочого циклу системи за сигналами датчиків кутів, які розташовуються на відповідних осях карданового підвісу.

Для системи вимірювання курсу, що розглядається, існує необхідність урахування кутів курсу в процесі формування моментів M_x , M_y . Цей кут визначається за результатами останнього включення системи, тобто по завершенні роботи системи вимірювальні осі акселерометрів, що знаходяться на платформі, є розгорнутими щодо траєкторної системи координат на деякий кут курсу.

Робота підсилювачів описується такими диференціальними рівняннями:

$$T_y \dot{\delta}_x + \delta_x = a_x / g;$$

$$T_y \dot{\delta}_y + \delta_y = a_y / g,$$

де T_y – стала часу підсилювачів; δ_x, δ_y – вихідні сигнали акселерометрів; g – прискорення вільного падіння.

Рівняння руху маятникових акселерометрів, які використовуються в системі, що розглядається, можна подати у вигляді рівнянь руху фізичного маятника [7];

$$J_A \ddot{\kappa} + f_A \dot{\kappa} + m_A g l_A \kappa = -J_A \ddot{\beta} - m_A (g\beta + w_{y\Pi});$$

$$J_A \ddot{\chi} + f_A \dot{\chi} + m_A g l_A \chi = -J_A \ddot{\alpha} - m_A (g\alpha + w_{x\Pi}),$$

де J_A, m_A – момент інерції та маса чутливого елемента акселерометрів; f_A – коефіцієнт демпфірування маятникових акселерометрів; $w_{y\Pi}, w_{x\Pi}$ – прискорення платформи по осям Ox_{Π}, Oy_{Π} .

Власне вихідні сигнали акселерометрів визначаються співвідношеннями:

$$a_x = k_A \chi - |a_{x0}| \text{sign } a_{x0};$$

$$a_y = k_A \kappa - |a_{y0}| \text{sign } a_{y0},$$

де k_A – коефіцієнт передачі акселерометрів; a_{x0}, a_{y0} – дрейфи акселерометрів.

Вирази для визначення прискорень платформи можуть бути отримані на підставі кінематичних співвідношень, які відповідають рис. 1, 2. Так, з рис. 2 прискорення платформи можуть бути подані через прискорення об'єкта і тригонометричні функції кутів поворотів триступеневого карданового підвісу:

$$w_{x\Pi} = w_{x0} (\cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma) + w_{y0} \cos \beta \sin \gamma - w_{z0} (\sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma);$$

$$w_{y\Pi} = w_{x0} (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma) +$$

$$+ w_{y0} \cos \beta \cos \gamma + w_{z0} (\sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma).$$

Вирази для прискорень платформ щодо траєкторної системи координат, тобто щодо подовжнього і поперечного прискорень можна отримати за допомогою рис. 1.

Висновки

1. Отримано математичний опис системи визначення курсу в режимі попереднього приведення до горизонту.

2. Розглянуто особливості формування моментів управління системою визначення курсу в режимі попереднього приведення до горизонту.

Список літератури

1. *Ишлинский А.Ю.* Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
2. *Кошляков В.Н.* Теория гироскопических компасов. – М.: Наука, 1972. – 344 с.
3. *Нестеренко О.И., Аврутов В.В.* Математическая модель малогабаритного корректируемого гирокомаса с динамически настраиваемым гироскопом // Вестн. приборостроения. – К.: 1995. – С. 24–33.
4. *Збруцький О.В., Нестеренко О.І., Шевчук А.В.* Математична модель однієї схеми курсокренопоказчика // Механіка гіроскопічних систем. – 2001–2002. – Вип. 17–18. – С. 154–167.
5. *Збруцький О.В., Янкевич Г.Э.* Гирокомпас с горизонтальной платформой // Наук. вісті НТТУ. Приладобудування та інформаційно-вимірвальна техніка. – 2004. – №1. – С. 59–64.
6. *Павловский М.А.* Теория гироскопов. – К.: Вища шк., 1986. – 304 с.
7. *Инерциальные навигационные системы морских объектов / Под ред. Д.П. Лукьянова.* – Л.: Судостроение, 1989. – 184 с.

Стаття надійшла до редакції 01.07.04.

О.А. Сущенко

Особенности управления системой определения курса в режиме предварительного приведения к горизонту

Рассмотрены особенности управления системой определения курса, в состав которой входят платформа в кардановом подвесе, динамически настраиваемые гироскопы, маятниковые акселерометры, в режиме предварительного приведения к горизонту. Представлено математическое описание режима предварительного приведения к горизонту и определены соответствующие моменты управления.

O.A. Sushchenko

Features of course definition system control for a mode of preliminary bringing to horizon

The features of course definition system consisting of platform in gimbal suspension, tuned rotor gyroscopes and pendulous accelerometers for a mode of preliminary bringing to horizon are reviewed. The mathematical description of the mode of preliminary bringing to horizon is derived and the appropriate control moments are determined.