

# Xây dựng hệ INS/GPS theo cấu trúc ghép lỏng sử dụng bộ lọc Kalman trên cơ sở hệ INS đã được cải thiện độ chính xác

Implementation of a Loosely Coupled Integration INS/GPS System using kalman filter based on Improved INS System

Triệu Việt Phương<sup>1,2</sup>, Nguyễn Thị Lan Hương<sup>1\*</sup>, Trịnh Quang Thông<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội – Số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

<sup>2</sup>Viện Đo lường Việt Nam – Số 8 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội

Đến Tòa soạn: 27-7-2016; chấp nhận đăng: 24-11-2016

## Tóm tắt

Kết hợp INS/GPS là giải pháp hiệu quả trong bài toán dẫn đường kết hợp đa cảm biến. Bởi vì GPS và INS có thể bổ sung cho nhau để đạt kết quả tối ưu dựa trên những ưu, nhược điểm của chúng. Trong bài toán kết hợp thông tin từ các hệ thống độc lập, hệ kết hợp sẽ đạt độ chính xác và tin cậy tốt hơn trên cơ sở thông tin cung cấp bởi từng hệ là đúng đắn. Bài báo này tập trung trình bày xây dựng hệ kết hợp INS/GPS theo cấu trúc ghép lỏng sử dụng bộ lọc Kalman trên cơ sở hệ INS đã được tác giả cải thiện qua nâng cao độ chính xác IMU và độ chính xác xác định góc định hướng của vật thể. Kết quả thử nghiệm trên đối tượng chuyển động mặt đất cho thấy hệ ghép lỏng INS/GPS đề xuất có chất lượng, độ chính xác và tính ứng dụng cao hơn so với hệ ghép lỏng INS/GPS truyền thống.

Từ khóa: Hệ dẫn đường quán tính, Hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu, cấu trúc ghép lỏng, bộ lọc Kalman, khối đo lường quán tính

## Abstract

The INS/GPS integration is an effective solution in multi-sensors navigation. This is because, GPS receiver and INS sensors can complement each other to achieve optimal results based on the advantages and disadvantages of them. In an information integration system from independent systems, the integration system achieve accuracy and better reliability based on information provided by each system is correct. This paper focuses on presentation of a loosely coupled integration INS/GPS using Kalman filter based on INS system has been improved the accuracy of IMU, object's orientation. Testing results on land vehicle are shown the quality, accuracy and applicability of the proposed loosely coupled integration INS/GPS higher than tradition loosely coupled integration INS / GPS.

Keywords: Inertial Navigation System, Global Positioning System, Loosely Coupled, Kalman Filter, Inertial Measurement Unit

## 1. Giới thiệu

Hệ dẫn đường quán tính (INS) xác định vị trí vật thể dựa trên chính thông tin chuyển động nội tại của vật thể, đó là gia tốc chuyển động. Từ gia tốc chuyển động của vật thể, lấy tích phân hai lần theo thời gian sẽ xác định được vị trí của vật thể. Hệ INS có ưu điểm là cung cấp thông tin vị trí, trạng thái vật thể một cách liên tục và tức thời, có khả năng hoạt động độc lập trong mọi điều kiện khí hậu, thời tiết, địa hình. Tuy nhiên do sử dụng phép tính tích phân nên hệ INS có thể sinh ra sai số tích lũy theo thời gian, dẫn đến thông tin cung cấp bởi hệ chỉ chính xác trong khoảng thời gian ngắn [1, 4, 5, 6]. Để có thể xác định được chính xác vị trí vật thể, cần thiết phải áp dụng những kỹ thuật bù trừ sai số khác nhau. Hiện nay phương pháp bù trừ sai số phổ biến là kết hợp INS với hệ thống định vị toàn cầu (GPS) sử dụng bộ lọc

Kalman [1, 4, 5, 6]. Hệ thống GPS có tốc độ cung cấp thông tin chậm, tuy nhiên thông tin lại ổn định trong thời gian dài. Kết hợp INS với GPS giúp hệ thống có thể cung cấp được thông tin với tốc độ nhanh, độ ổn định dài, độ chính xác cao [1, 4, 5, 6].

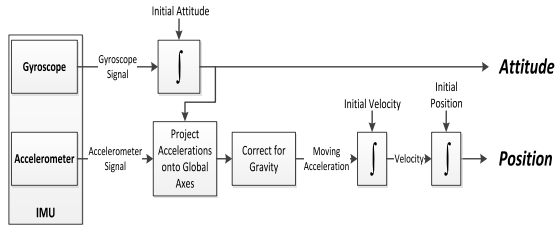
Để một hệ thống dẫn đường kết hợp thông tin từ nhiều hệ thống dẫn đường khác nhau có được độ chính xác cao, ổn định lâu dài, đòi hỏi từng hệ phải chính xác, ổn định, thuật toán sử dụng kết hợp thông tin cũng phải tin cậy. Với hệ dẫn đường kết hợp INS/GPS, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào xây dựng, nâng cao giải pháp, thuật toán kết hợp hệ INS với hệ GPS mà ít chú trọng nâng cao chất lượng của từng hệ riêng rẽ. Trong bài báo này, các tác giả tập trung xây dựng hệ ghép lỏng INS/GPS trên cơ sở hệ INS đã được cải thiện bằng các phương pháp đã được trình bày tại [2, 3]. Kết quả thực nghiệm trên đối tượng chuyển động mặt đất (ô tô) cho thấy hệ ghép lỏng INS/GPS đề xuất hoạt động ổn định, độ

\* Corresponding author: Tel.: (+844) 3869 6233  
Email: huong.nguyenthilan@hust.edu.vn

chính xác được cải thiện rõ rệt so với hệ ghép lỏng INS/GPS sử dụng hệ INS truyền thống.

## 2. Cải thiện độ chính xác hệ INS

Nguyên lý xác định vị trí vật thể của hệ INS kiểu strapdown truyền thống trong hệ e-frame được thực hiện theo sơ đồ Hình 1.



**Hình 1.** Sơ đồ nguyên lý xác định vị trí vật thể của hệ INS kiểu Strapdown [1, 4, 5, 6]

Các phương trình định vị đối với vật thể trong trường hợp này có dạng [1, 4, 5, 6]:

$$\begin{cases} \dot{r}^e = v^e \\ \dot{v}^e = -2\Omega_{ie}^e v^e - \Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e r^e + C_b^e f^b - g^e \\ \dot{C}_b^e = C_b^e \Omega_{eb}^e \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

- $r^e$ : vector vị trí vật thể xét trong hệ e-frame
- $v^e$ : vector vận tốc vật thể xét trong hệ e-frame
- $C_b^e$ : ma trận chuyển hệ tọa độ từ hệ b-frame sang hệ e-frame
- $f^b$ : vector gia tốc đo được bởi cảm biến gia tốc gắn trên vật thể
- $\Omega_{ie}^e$ : ma trận mô tả các thành phần vận tốc góc của hệ e-frame quay quanh hệ i-frame

$$\Omega_{ie}^e = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ie}^e & 0 \\ \omega_{ie}^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \omega_{ie}^e = 7,2921159 \cdot 10^{-5} (rad / s)$$

- $g^e$ : vector gia tốc trọng trường xét trong hệ e-frame
- $\Omega_{eb}^e$ : ma trận mô tả các thành phần vận tốc góc của vật thể xét trong hệ b-frame với e-frame

$$\Omega_{eb}^e = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{zeb}^b & \omega_{yeb}^b \\ \omega_{zeb}^b & 0 & -\omega_{xeb}^b \\ -\omega_{yeb}^b & \omega_{xeb}^b & 0 \end{bmatrix}$$

$$\omega_{eb}^b = \omega_{ib}^b - \omega_{ie}^e = \omega_{ib}^b - C_e^b \omega_{ie}^e$$

- $\omega_{ib}^b$ : vector vận tốc góc đo bởi cảm biến vận tốc góc gắn trên vật thể

Từ nguyên lý hoạt động của hệ INS mô tả trên hình 1, có thể thấy chất lượng của hệ INS phụ thuộc trực tiếp vào độ chính xác của khối đo lường quán tính (IMU). Vì vậy, việc quan trọng cần thực hiện trước khi đưa IMU vào sử dụng đó là hiệu chuẩn (xác định, loại trừ hoặc giảm thiểu ảnh hưởng của các sai số). Công việc này đều đã được các nhà sản xuất IMU thực hiện trước khi xuất xưởng, các giá trị sai số được ghi rõ trong tài liệu kỹ thuật. Tuy nhiên do môi trường làm việc thực tế khác với điều kiện thử nghiệm của các nhà sản xuất, cùng với nhiều nguyên nhân khác, để đảm bảo yêu cầu sử dụng thực tế cần thiết phải thực hiện lại quá trình hiệu chuẩn này. Do IMU phải hoạt động trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau, nên quá trình hiệu chuẩn cần phải được tiến hành thường xuyên để đảm bảo hệ thống INS luôn hoạt động chính xác và ổn định. Tuy nhiên trong hệ INS sử dụng cấu trúc Strapdown, IMU được gắn cố định vào vật thể, cộng với việc các phương tiện chuyển động mặt đất di chuyển thường xuyên nên rõ ràng việc tiến hành hiệu chuẩn các cảm biến trong phòng thí nghiệm là rất khó khăn và phức tạp. Điều này đòi hỏi phải phát triển các phương pháp hiệu chuẩn mới cho IMU sao cho có thể thực hiện một cách nhanh chóng, dễ dàng ngay tại hiện trường mà vẫn đảm bảo độ chính xác.

Do cảm biến gia tốc sử dụng trong hệ INS là cảm biến 3 chiều, thông tin đo được từ cảm biến bao gồm gia tốc trọng trường và gia tốc chuyển động. Trong trường hợp đứng yên, thông tin đo được của cảm biến chính là giá trị gia tốc trọng trường tại vị trí đặt. Mà giá trị gia tốc trọng trường tại một vị trí được coi là không đổi (thay đổi vô cùng nhỏ theo thời gian), vì vậy hoàn toàn có thể dùng giá trị này làm chuẩn để hiệu chuẩn cảm biến gia tốc. Trong [2] tác giả đã trình bày phương pháp mới dùng giá trị gia tốc trọng trường tại vị trí đặt cảm biến làm chuẩn (không cần thêm chuẩn, phương tiện đo tham chiếu bên ngoài mà vẫn đảm bảo độ chính xác, tin cậy) cho phép xác định chính xác sai số hệ thống (sai số tỷ lệ và sai số bias) của cảm biến gia tốc bằng việc ước lượng lần lượt các sai số sử dụng phương pháp bình phương cực tiểu. Tương tự, do từ trường Trái đất tại một vị trí có thay đổi rất nhỏ theo thời gian, nên giá trị từ trường Trái đất tại vị trí đặt cảm biến cũng được sử dụng làm chuẩn để hiệu chuẩn cảm biến từ trường trong hệ INS theo phương pháp trình bày trong [2]. Với cảm biến vận tốc góc, sai số bias được xác định bằng việc tiến hành thu thập kết quả đo ở trạng thái đứng yên, sau đó lấy giá trị trung bình cộng để loại trừ. Bên cạnh đó, từ việc có thể xác định chính xác sự định hướng của cảm biến vận tốc góc trong không gian từ kết quả đo của cảm biến gia tốc và cảm biến từ trường ở trạng thái đứng yên, hoàn toàn xác định được giá trị sai số tỷ lệ của cảm biến vận tốc góc dựa trên so sánh góc quay của cảm biến xác định từ kết quả đo của cảm

biến vận tốc góc với góc quay xác định được từ cảm biến gia tốc và cảm biến từ trường (sau khi các cảm biến gia tốc và từ trường được hiệu chuẩn, sử dụng các giá trị đo được từ các cảm biến này làm chuẩn).

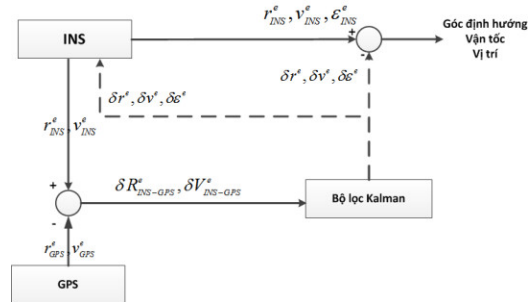
Mặt khác, theo nguyên lý hoạt động của hệ INS mô tả trên hình 1, việc xác định chính xác các góc định hướng của vật thể trong không gian có tính quyết định, ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của hệ INS. AHRS là hệ thống xây dựng trên cơ sở các cảm biến quán tính, cung cấp thông tin về các góc định hướng (góc hướng, góc nghiêng, góc ngả) của vật thể trong không gian. AHRS là một phần của hệ dẫn đường quán tính và được ứng dụng nhiều trong các hệ thống dẫn đường cho ô tô, máy bay, tên lửa, trong các hệ thống điều khiển robot, hoặc các hệ cân bằng [1]. Khi vật thể đứng yên, giá trị góc nghiêng và ngả được xác định từ kết quả đo của cảm biến gia tốc, giá trị góc hướng được xác định từ kết quả đo của cảm biến từ trường. Sau khi xác định được giá trị các góc định hướng ở trạng thái đứng yên, khi vật thể chuyển động, bằng việc lấy tích phân kết quả đo từ cảm biến vận tốc góc sẽ xác định được các góc định hướng mới của vật thể. Tuy nhiên, dù đã được hiệu chuẩn, kết quả đo của các cảm biến vẫn tồn tại sai số, các sai số này tích lũy theo thời gian làm giảm độ chính xác của hệ AHRS. Vì vậy, cần thiết phải áp dụng các kỹ thuật bù trừ sai số khác nhau. Một trong các phương pháp thường được áp dụng là kết hợp tích phân kết quả đo từ cảm biến vận tốc góc với kết quả đo từ cảm biến gia tốc để xác định chính xác giá trị góc nghiêng và góc ngả, kết hợp tích phân kết quả đo từ cảm biến vận tốc góc với kết quả đo từ cảm biến từ trường để xác định chính xác giá trị góc hướng. Thuật toán phổ biến được sử dụng để kết hợp là bộ lọc Kalman. Với bộ lọc Kalman, việc xây dựng mô hình hệ thống càng chính xác thì kết quả thu được càng tốt. Trong khi đó, quá trình hiệu chuẩn chỉ xác định và loại trừ được các sai số hệ thống. Các sai số ngẫu nhiên vẫn tồn tại trong kết quả đo của cảm biến và là nguyên nhân làm giảm chất lượng hệ thống. Vì vậy, trong [3] tác giả đã trình bày phương pháp mới cho phép xác định chính xác góc định hướng của vật thể bằng cách kết hợp kết quả đo của cảm biến vận tốc góc, cảm biến từ trường, cảm biến gia tốc sử dụng bộ lọc Kalman kết hợp mô hình hóa sai số ngẫu nhiên của cảm biến vận tốc góc bằng mô hình tự hồi quy.

Các đề xuất trong [2,3] được tác giả đưa ra nhằm mục đích nâng cao độ chính xác của hệ INS. Hệ INS sau khi cải thiện được sử dụng để xây dựng hệ ghép lồng INS/GPS.

**3. Xây dựng hệ INS/GPS theo cấu trúc ghép lồng**

Trong nghiên cứu này, mô hình áp dụng bộ lọc Kalman kết hợp hệ INS và hệ GPS được mô tả như hình 2. Bộ lọc Kalman là được dùng để ước lượng sai

số góc định hướng ( $\delta\epsilon$ ), vận tốc ( $\delta v^e$ ), vị trí ( $\delta r^e$ ) của hệ INS, với tín hiệu quan sát là sai lệch giữa vị trí, vận tốc thu được từ GPS ( $r_{GPS}^e, v_{GPS}^e$ ) và vị trí, vận tốc xác định được từ INS ( $r_{INS}^e, v_{INS}^e$ ). Lấy kết quả góc định hướng ( $\epsilon_{INS}$ ), vận tốc, vị trí xác định được từ hệ INS trừ đi các giá trị sai số này sẽ thu được góc định hướng, vận tốc, vị trí chính xác của vật thể. Kết quả ước đoán sai số góc định hướng, vận tốc, vị trí, cũng được phân hồi để điều chỉnh lại hệ INS. Ưu điểm của mô hình này là đơn giản, khả năng mở rộng và tính kế thừa cao [1,4,5,6].



**Hình 2.** Mô hình kết hợp INS-GPS theo cấu trúc ghép lồng sử dụng bộ lọc Kalman

Mô hình sai số của hệ thống INS cung cấp thông tin về nguồn gây ra sai số và ảnh hưởng của chúng đến sai số xác định vị trí, vận tốc của vật thể. Mô hình sai số của hệ INS được xây dựng từ hệ phương trình định vị (1) của hệ. Áp dụng phương pháp xây dựng mô hình sai số cho hệ INS được trình bày trong [1,4,6], thu được hệ phương trình sai số của hệ thống INS như sau:

$$\begin{bmatrix} \delta v^e \\ \delta \dot{v}^e \\ \delta \dot{\epsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \dot{r}^e \\ -S^e \delta \epsilon + C_b^e \delta f^b + \delta g^e - 2\Omega_{ie}^e \delta v^e \\ -\omega_{ie}^e \delta \epsilon - C_b^e \delta \omega_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (2)$$

Mô hình sai số của hệ thống INS dưới dạng mô hình trạng thái như sau [1,4,6]:

$$\delta \dot{x}(t) = F(t) \times \delta x(t) + u_c(t) \quad (3)$$

Trong đó:

•  $\delta x(t) = [\delta r^{eT} \quad \delta v^{eT} \quad \delta \epsilon^T \quad \delta f^{bT} \quad \delta \omega_{ib}^{bT}]^T$  vector trạng thái mô tả sai số của hệ

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -2\Omega_{ie}^e & -S^e & C_b^e & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -\Omega_{ie}^e & 0_{3 \times 3} & C_b^e \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

•  $u_c(t) = [u_{acc}^T(t) \quad u_{gyro}^T(t)]^T$ : vector sai số ngẫu nhiên tác động lên cảm biến gia tốc và cảm biến vận tốc góc.

**4. Thử nghiệm và kết quả**

Để thử nghiệm và đánh giá phương pháp đã đề xuất, trong nghiên cứu này, khối IMU được sử dụng là 3DM-GX3-35 của hãng MicroStrain (hình 3). IMU 3DM-GX3-35 bao gồm các cảm biến MEMS ba chiều: cảm biến gia tốc, cảm biến vận tốc góc, cảm biến từ trường. Ngoài ra, khối 3DM-GX3-35 cũng bao gồm một bộ thu GPS. Bộ thu GPS này được sử dụng để xây dựng hệ ghép lồng INS/GPS. Một vài đặc tính kỹ thuật cơ bản của khối IMU 3DM-GX3-35 được thể hiện trong bảng 1.



Hình 3. Khối IMU 3DM-GX3-35

**Bảng 1.** Đặc tính kỹ thuật cơ bản của khối IMU 3DM-GX3-35

Thông số	Cảm biến gia tốc	Cảm biến vận tốc góc	Cảm biến từ trường
Dải đo	±5 g	±300 °/sec	±2,5 Gauss
Bias	±0,002 g	±0,25 °/sec	±0,003 Gauss
Mật độ nhiễu	80 $\mu g / \sqrt{Hz}$	0,03 $^{\circ} / sec / \sqrt{Hz}$	100 $\mu Gauss / \sqrt{Hz}$

Các đặc tính kỹ thuật cơ bản của bộ thu GPS trong khối 3DM-GX3-35 được thể hiện trong bảng 2.

**Bảng 2.** Một vài đặc tính kỹ thuật của bộ thu GPS trong khối 3DM-GX3-35.

Thông số kỹ thuật	
Độ chính xác vận tốc	0,1 m/s
Độ chính xác vị trí	2,5 m CEP

Mục đích của thử nghiệm là nhằm đánh giá độ chính xác của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất (hệ xây dựng trên cơ sở hệ INS đã được cải thiện). Hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất được gắn cố định trên ô tô sau đó cho di chuyển liên tục trên đường trong khoảng thời gian 5 phút. Độ chính xác xác định vị trí của hệ ghép lồng INS/GPS được xác định dựa trên so sánh với quỹ đạo xác định được từ bộ thu GPS thương mại chất lượng cao CW46 của hãng Navsync. Ngoài ra,

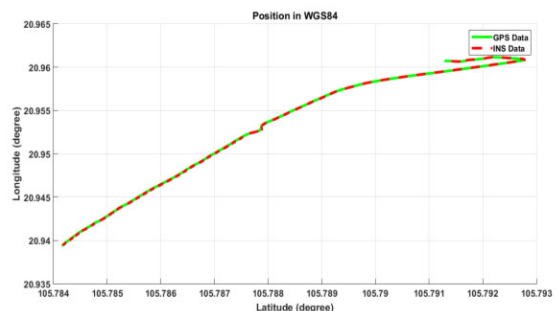
quỹ đạo chuyển động cũng được so sánh với quỹ đạo chuyển động của hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống (hệ xây dựng trên cơ sở INS chỉ sử dụng kết quả đo của cảm biến vận tốc góc để xác định giá trị các góc định hướng). Hệ ghép lồng đề xuất và hệ ghép lồng truyền thống đều tính toán trên cùng một bộ số liệu đã thu thập. Để đảm bảo độ chính xác và tin cậy trong so sánh, quỹ đạo chuyển động được lựa chọn tại khu vực ít bị che chắn để tín hiệu GPS thu được là tốt nhất, tần số cập nhật của bộ thu GPS được chọn là 4 Hz, thông tin vị trí thu được từ bộ thu GPS sau đó được tuyến tính hóa để có tần số cập nhật là 100 Hz, giống với tần số cập nhật của hệ ghép lồng INS/GPS. Thời gian cập nhật GPS của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất và truyền thống cũng được thay đổi nhằm khảo sát tính ứng dụng. Các phần mềm phân tích kết quả đo, xử lý dữ liệu được tác giả xây dựng dựa trên môi trường Matlab.

Một số đặc tính kỹ thuật cơ bản của bộ thu CW46 được thể hiện trong bảng 3.

**Bảng 3.** Đặc tính kỹ thuật của bộ thu GPS CW46

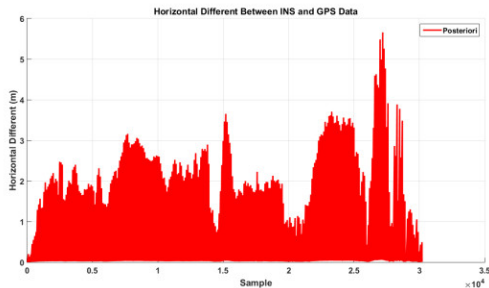
Thông số kỹ thuật	
Độ chính xác vận tốc	0,05 m/s
Độ chính xác vị trí	<5 m rms

Quỹ đạo chuyển động xác định từ hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất với chu kỳ cập nhật GPS 1 s và hệ GPS được thể hiện trên hình 4. Để thử nghiệm khả năng hoạt động cũng như ứng dụng thực tế, chu kỳ cập nhật GPS được thay đổi lần lượt 1 s, 2 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s.



**Hình 4.** Quỹ đạo xác định từ hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất với chu kỳ cập nhật GPS 1s (đường màu đỏ đứt nét) và quỹ đạo chuẩn xác định từ hệ CW46 (đường màu xanh lá)

Sai số xác định vị trí của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất với chu kỳ cập nhật GPS 1s được thể hiện trên hình 5.



**Hình 5.** Sai số xác định vị trí của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất với chu kỳ cập nhật GPS 1s.

Từ các kết quả thể hiện trong hình 4 và hình 5, có thể nhận thấy quỹ đạo xác định được từ hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất với chu kỳ cập nhật GPS 1 s bám sát với quỹ đạo di chuyển thực tế. Sai số vị trí nhỏ hơn 6 m .

Sai số vị trí trung bình của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất và hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống với các chu kỳ cập nhật GPS khác nhau được thể hiện trong bảng 4.

**Bảng 4.** Sai số vị trí trung bình của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất và hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống với các chu kỳ cập nhật GPS khác nhau

Chu kỳ cập nhật GPS (s)	Sai số vị trí của hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống (m)	Sai số vị trí của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất (m)
1	2,0951	2,0823
2	4,6462	4,2050
5	13,8972	7,8987
10	45,9147	14,5297
15	94,0231	21,8577
20	170,2700	30,1010

Từ kết quả thể hiện trong bảng 4 có thể thấy với chu kỳ cập nhật là 1 s và 2 s, sai số của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất nhỏ hơn sai số của hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống, tuy nhiên sai lệch giữa hai hệ là không lớn. Điều này là do với chu kỳ cập nhật nhỏ, thì sai số tích lũy trong hệ INS đề xuất và INS truyền thống là nhỏ, chưa đủ để tạo nên sự khác biệt rõ ràng. Với các chu kỳ cập nhật lớn hơn 5 s, có thể thấy rõ ràng sự khác biệt giữa hai hệ, sai số của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất nhỏ hơn nhiều so với hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống. Trong thực tế, khi các đối tượng chuyển động mật đất đi qua khu vực bị che chắn, đường hầm... thông tin GPS mất trong khoảng thời gian trên 5 giây là khá thường xuyên. Từ kết quả thể hiện trong bảng 4, cũng có thể thấy, ở cùng một mức sai số cho phép thì hệ INS/GPS đề xuất cho phép xác định chính xác vị trí của vật thể với khoảng thời

gian không có GPS lớn hơn so với hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống. Và với độ chính xác này, có thể ứng dụng trong bài toán định vị, giám sát phương tiện với độ tin cậy cao. Qua đó cho thấy, tính ứng dụng của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất là cao hơn hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống.

**5. Kết luận**

Bài báo đã trình bày đề xuất xây dựng hệ ghép lồng INS/GPS trên cơ sở hệ INS đã được cải thiện qua nâng cao độ chính xác IMU và độ chính xác xác định góc định hướng của vật thể. Nghiên cứu cũng đã tiến hành khảo sát độ chính xác của hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất với các chu kỳ cập nhật GPS khác nhau. Các kết quả trong bài báo cho thấy hệ ghép lồng INS/GPS đề xuất có độ chính xác cao hơn so với hệ ghép lồng INS/GPS truyền thống và hoàn toàn có thể ứng dụng được trong bài toán định vị, giám sát phương tiện với độ tin cậy cao. Điều này một lần nữa khẳng định tính đúng đắn của các đề xuất nhằm cải thiện hệ INS đã được tác giả trình bày trong [2,3]. Để nâng cao hơn nữa độ chính xác trong việc xác định vị trí vật thể các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung xây dựng hệ ghép chặt INS/GPS sử dụng bộ lọc Kalman trên cơ sở hệ INS đã cải thiện.

**References**

- [1]. David H.Titterton and John L.Weston, “Strapdown Inertial Navigation Technology”, 2nd Edition, 2004, The Institution of Electrical Engineers, Michael Faraday House, Peter Peregrinus Ltd.
- [2]. Trieu Viet Phuong, Nguyen Thi Lan Huong, Trinh Quang Thong, “Implementation Of Self-Calibration Method For Accelerometer In Inertial Navigation System”, Journal of Science & Technology Technical Universities 113 (2016), pp 56-61.
- [3]. Triệu Việt Phương, Nguyễn Thị Lan Hương, Trịnh Quang Thông, “Xây dựng hệ AHRS trên cơ sở cảm biến MEMS sử dụng bộ lọc Kalman kết hợp mô hình sai số ngẫu nhiên AR”, Hội nghị toàn quốc lần thứ 3 về Điều khiển và Tự động hóa VCCA2015, DOI: 10.15625/vap.2015.0124, pp 844-851, Thái Nguyên 11-2015.
- [4]. Isaac Skog, “A Low-Cost GPS Aided Inertial Navigation System for Vehicular Applications”. Master of Science Thesis, Stockholm, Sweden, 2005.
- [5]. Jay A. Farrell (2008) Aided Navigation GPS with High Rate Sensors. McGraw-Hill Companies, Inc.
- [6]. Adrian Schumacher (2006) Integration of a GPS aided Strapdown Inertial Navigation System for Land Vehicles. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden.