

NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC ĐỊNH VỊ, ĐỊNH HƯỚNG CỦA HỆ THỐNG TÍCH HỢP GNSS/IMU VỚI ĐIỀU KIỆN RÀNG BUỘC HƯỚNG TỪ VECTO CHUYỂN ĐỘNG CỦA MÁY THU GNSS

DƯƠNG THÀNH TRUNG
Trường Đại học Mở - Địa chất

Tóm tắt:

Hệ thống dẫn đường vệ tinh toàn cầu (GNSS) ngày nay được sử dụng một cách rộng rãi cho các công tác đo đạc bản đồ, định vị và dẫn đường. Tuy vậy, với các ứng dụng yêu cầu truy xuất dữ liệu cao và liên tục như dẫn đường cho máy bay không người lái, đo đạc thủy hải văn và hệ thống lập bản đồ di động thì thông tin chỉ từ GNSS là chưa đủ. Để khắc phục vấn đề này, một giải pháp tích hợp giữa GNSS và cảm biến quán tính (IMU) đã được áp dụng. Giải pháp tích hợp này cho phép cung cấp đồng thời thông tin về vị trí, vận tốc và phương hướng của phương tiện mang GNSS trong không gian 3 chiều. Tuy nhiên, với hầu hết các ứng dụng dân dụng, IMU giá thấp thường được sử dụng, điều này dẫn đến độ chính xác của hệ thống bị hạn chế. Với mục tiêu nâng cao độ chính xác của giải pháp tích hợp GNSS/IMU, bài báo này đề xuất tích hợp thêm tham số hướng từ véc tơ chuyển động của máy thu GNSS trong hệ thống tích hợp GNSS/IMU giá thấp. Các kết quả thực nghiệm cho thấy rằng giải pháp đề xuất giúp cải thiện độ chính xác định vị, định hướng một cách đáng kể so với giải pháp tích hợp thuần túy.

Từ khóa: Tích hợp, GNSS, IMU, Phép lọc Kalman, Điều kiện ràng buộc.

1. Giới thiệu

Để thu thập dữ liệu thông tin địa lý, hệ thống lập bản đồ di động (MMS) được áp dụng nhằm nâng cao năng suất và giúp tự động hóa công tác thu thập dữ liệu. Nhiều loại MMS khác nhau đã được phát triển cho các ứng dụng khác nhau; MMS trên mặt đất sử dụng các phương tiện mang GNSS trên đất liền [1]. MMS hàng không với các cảm biến lập bản đồ được gắn trên máy bay hoặc phương tiện bay không người lái (UAV) [2]. MMS phục vụ cho đo đạc trên sông, trên biển [3]. Ngày nay, các tham số định hướng bao gồm vị trí và tư thế của các cảm biến trong

MMS có thể được xác định một cách trực tiếp thông qua hệ thống tham chiếu trực tiếp (DG). DG là việc xác định các giá trị vị trí và tư thế hay sự thay đổi phương hướng theo thời gian của hệ thống lập bản đồ di động trong một khung tham chiếu nhất định ([1], [2]). Công nghệ thường được sử dụng cho mục đích này hiện nay là hệ thống dẫn đường vệ tinh toàn cầu (GNSS) và hệ thống dẫn đường quán tính (INS) với các cảm biến quán tính (IMU). Trong đó, GNSS là phương tiện chính để xác định vị trí với độ chính xác ổn định theo thời gian. INS cung cấp thông tin về tư thế của các cảm biến thông qua một cơ chế tính toán

dựa trên dữ liệu đầu ra từ IMU. Mặc dù về nguyên tắc, chỉ cần một trong hai công nghệ này cũng có thể xác định cả vị trí và hướng, nhưng chúng thường được tích hợp theo cách mà INS là cảm biến định hướng chính, trong khi bộ thu GNSS là cảm biến vị trí chính [4].

Với chi phí cao và kích thước lớn, các IMU chất lượng cao thường bị hạn chế đối với MMS thương mại. IMU vi cơ điện tử (MEMS) với kích thước nhỏ, giá thành thấp hiện đang được ứng dụng phổ biến, đặc biệt là đối với UAV và MMS di động có tải trọng hạn chế. Tuy nhiên, đi đôi với đó là vị trí và phương hướng của chúng thường có độ chính xác kém. Đặc biệt, trong các điều kiện đo đạc bị khuất, nhiễu tín hiệu GNSS, giải pháp cung cấp bởi INS sẽ có sai số lớn do tích lũy theo thời gian. Park và Gao [5] đã chứng minh rằng chất lượng của các cảm biến quán tính dựa trên MEMS vẫn chưa hoàn toàn đáp ứng được đối với ứng dụng trên mặt đất trong thời gian dài mà không có tín hiệu GNSS. Trong thời gian mất hoàn toàn tín hiệu GNSS trong khoảng từ 10 giây đến vài phút, với giải pháp tích hợp thuần túy, sai số vị trí tối đa có thể từ vài mét đến vài chục mét.

Li và nnk [6] đã đề xuất giải pháp tích hợp chặt chẽ giữa GNSS RTK và MEMS-IMU để nâng cao độ chính xác định vị. Kết quả nghiên cứu cho thấy giải pháp đề xuất có cải thiện đáng kể về độ chính xác so với các phương pháp tích hợp trước đó. Tuy nhiên, sự can thiệp ở mức tín hiệu GNSS trong tích hợp chặt chẽ là không dễ dàng thực hiện đối với một số thiết bị nhất định.

Nguyen Van Thang và nnk [7] đã đề xuất và đánh giá độ chính xác của hệ thống INS/GPS giá thấp sử dụng thông tin bản đồ đường phố.

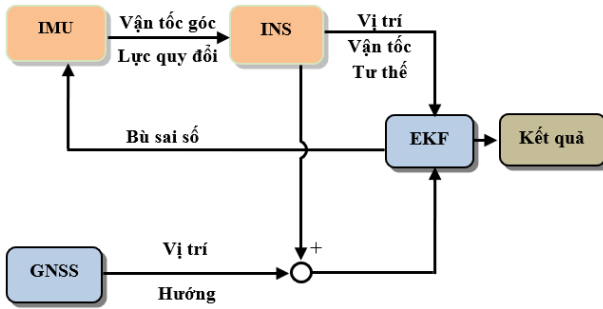
Vana và nnk [8] đã giới thiệu giải pháp tích hợp GNSS tần số kép và MEMS-IMU để dẫn đường liên tục trong điều kiện tín hiệu GNSS kém. Độ chính xác theo mặt bằng của giải pháp này có thể đạt tới mức centimet. Nhược điểm của nghiên cứu này là nó chỉ phù hợp với ứng dụng xử lý sau.

Với mục tiêu nhằm nâng cao độ chính xác của giải pháp tích hợp GNSS/IMU, bài báo này giới thiệu giải pháp tích hợp thêm điều kiện ràng buộc hướng từ véc tơ chuyển động của máy thu GNSS. Bên cạnh đó, cơ sở lý thuyết về các vấn đề liên quan cũng được giới thiệu để làm rõ nguyên lý cũng như các bước tính toán thực nghiệm.

2. Thiết kế hệ thống và cơ sở lý thuyết

2.1. Thiết kế cấu trúc tích hợp GNSS/IMU

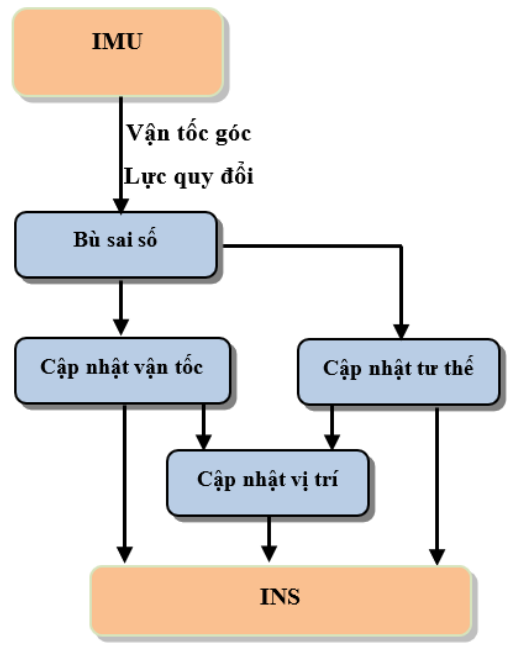
Thiết kế mô hình tích hợp hệ thống GNSS và IMU được trình bày ở Hình 1. Trong cấu trúc này, đầu ra của IMU bao gồm vận tốc góc và lực quy đổi, sau khi được bù sai số hệ thống sẽ được sử dụng trong một cơ chế tính toán định vị quán tính (INS) nhằm cho ra các tham số bao gồm vị trí, vận tốc và tư thế của cảm biến trong một hệ quy chiếu tọa độ nhất định. Các tham số này có đặc điểm là không phụ thuộc nhiều vào môi trường đo đạc nhưng chứa sai số tích lũy và tăng nhanh theo thời gian. Để khắc phục vấn đề này, GNSS được sử dụng. Modul GNSS thông thường sẽ chỉ cung cấp thông tin vị trí của máy thu. Tuy nhiên, dựa vào sự thay đổi của vị trí theo thời gian, chúng ta có thể tính toán được vận tốc và phương hướng di chuyển hay phương vị của máy thu. Các thông tin đầu ra trực tiếp hoặc gián tiếp từ GNSS sẽ được tích hợp với IMU thông qua bộ lọc Kalman mở rộng để cho ra kết quả của hệ thống bao gồm vị trí, vận tốc và tư thế [1, 2, 3].



Hình 1: Cấu trúc tích hợp GNSS/IMU

2.2. Giải pháp INS từ IMU

Giải pháp INS là một loạt các bước tính toán từ trị đo thô của IMU để cung cấp các tham số về vị trí, vận tốc và tư thế hay hướng xoay của IMU trong một hệ quy chiếu tọa độ nhất định. Hình 2 mô tả cơ chế hay các bước tính toán INS. Đầu ra của IMU vì cơ thường là vận tốc góc và lực quy đổi, trước hết phải được tính bù sai số. Các sai số này được xác định thông qua quá trình kiểm nghiệm IMU hoặc ước lượng từ EKF ở bước tính (thời điểm) trước. Dữ liệu sau khi được chuẩn hóa sẽ được sử dụng để cập nhật vận tốc, tư thế và vị trí để cho ra các tham số tương ứng. Về bản chất, các thông tin ở thời điểm hiện tại được tính toán dựa vào các tham số ở thời điểm trước đó nên gọi là cập nhật. Các thông tin dẫn đường được tính toán dựa trên cảm biến quán tính nên được gọi là hệ thống dẫn đường quán tính (INS).



Hình 2: Cơ chế tính toán INS

Cơ chế tính toán INS trong hệ quy chiếu n-frame có thể được mô tả dưới dạng ma trận theo [4].

$$\begin{bmatrix} \dot{r}^n \\ \dot{v}^n \\ \dot{C}_b^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1}v^n \\ C_b^n f^b - (2\Omega_{ie}^i + \Omega_{en}^n)v^n + g^n \\ C_b^n (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) \end{bmatrix} \quad (1)$$

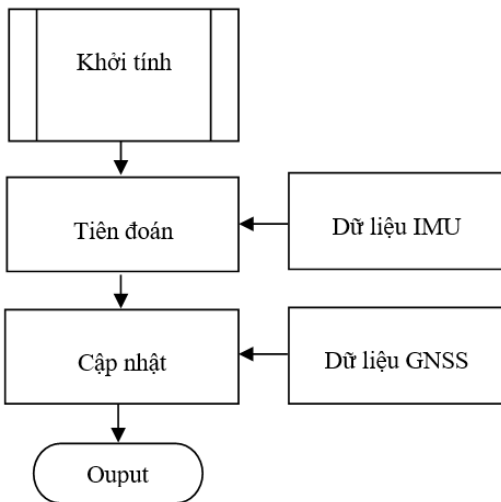
trong đó, \dot{r}^n , \dot{v}^n và \dot{C}_b^n là các vi phân theo thời gian của vị trí, vận tốc và tư thế trong n-frame; f^b là vector lực quy đổi và Ω_{ib}^b là vận tốc góc, là các dữ liệu thô của IMU; Ω_{ie}^i là ma trận chuyển đổi giữa khung tọa độ trái đất so với hệ quy chiếu quán tính i-frame; Ω_{en}^n là ma trận chuyển đổi giữa n-frame so với hệ quy chiếu trái đất (e-frame); g^n là gia tốc lực trọng trường trong n-frame, còn D^{-1} được xác định theo công thức sau:

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{h+R_\lambda} & 0 \\ \frac{1}{(h+R_\varphi)\cos\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

trong đó, R_λ, R_φ là các bán kính cong kinh tuyến và vĩ tuyến của trái đất tại vĩ độ φ , h là cao độ ellipsoid.

2.3. Kalman mở rộng (EKF) trong tích hợp GNSS/IMU

EKF được sử dụng trong phép tích hợp GNSS/IMU để tính toán nhằm lọc nhiễu và cho ra các tham số định vị, định hướng có độ tin cậy cao nhất. Phép lọc Kalman (KF) thường được sử dụng trong các ứng dụng lọc nhiễu tín hiệu hoặc các phép tích hợp hệ thống bởi tính chặt chẽ và đơn giản của nó [9]. Tuy nhiên, nhược điểm của KF là chỉ áp dụng được đối với các hàm tuyến tính. Tuy nhiên, như có thể thấy ở công thức (1), cơ chế tính toán INS là phi tuyến. Do vậy, để áp dụng cơ sở toán học của KF, cần phải thông qua các bước biến đổi mở rộng nên gọi là phép lọc Kalman mở rộng (EKF). Các bước tính toán của EKF có thể được trình bày trong Hình 3. Trước hết cần xác định các thành phần trạng thái và phương sai ban đầu, gọi là khởi tính. Trong các bước tiếp theo, dựa vào dữ liệu IMU để tiên đoán vector trạng thái và ma trận hiệp phương sai. Nếu có trị đo GNSS, véc tơ trạng thái và ma trận hiệp phương sai tương ứng sẽ được cập nhật để cho ra kết quả tích hợp.



Hình 3: Sơ đồ tính toán trong EKF

Về nguyên lý, EKF là phép ước lượng lai giữa tuyến tính hóa và phi tuyến [10].

Trong bước tính toán tiên đoán, hàm tuyến tính được sử dụng trực tiếp để tiên đoán véc tơ trạng thái còn ma trận hiệp phương sai lại được tính toán dựa trên phép tuyến tính hóa:

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}) \tag{3}$$

$$P_k^- = F P_{k-1} F^T + Q \tag{4}$$

trong đó \hat{x}_k^- là vector trạng thái tiên đoán, bao gồm các thành phần vị trí, vận tốc và phương hướng của hệ thống mang; $f(\hat{x}_{k-1})$ là hàm số liên hệ giữa trạng thái tại bước tính trước và bước tính hiện tại. P_k^- là ma trận hiệp phương sai tiên đoán tại thời điểm k ; F là ma trận Jacobean, được xác định thông qua tuyến tính hóa; Q là ma trận nhiễu hệ thống.

Bước cập nhật được mô tả qua các công thức sau:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K[z_k - h(\hat{x}_k^-)] \tag{5}$$

$$P_k = (I - KH)P_k^- \tag{6}$$

với:

$$K = P_{k-1} H^T S^{-1} \tag{7}$$

$$S = H P_{k-1} H^T + R \tag{8}$$

$$z_k = h(\hat{x}_k) \tag{9}$$

trong đó:

z_k là vector trị đo; $h(\hat{x}_k)$ là hàm liên hệ giữa vector trạng thái và vector trị đo GNSS; K gọi là lọc Kalman (Kalman gain); H là ma trận hệ số của hàm liên hệ giữa vector trạng thái và vector trị đo; R là ma trận nhiễu trị đo.

2.4. Tính toán hướng di chuyển từ máy thu GNSS

Phần này giới thiệu các phương pháp tính toán phương hướng hay phương vị của hệ thống dựa vào các trị đo GNSS.

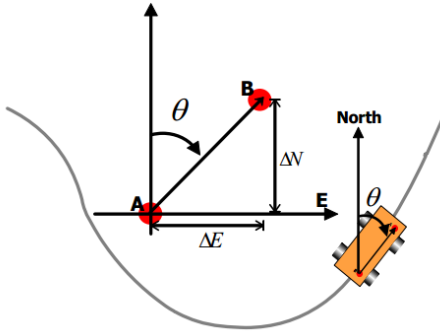
Trong phương pháp thứ nhất, hai anten của hai máy thu GNSS được lắp đặt dọc theo

hướng di chuyển của phương tiện mang GNSS. Từ vị trí của hai anten A và B (Hình 4) có thể tính toán được phương vị dựa trên công thức sau:

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{E_{A,GNSS}(t) - E_{B,GNSS}(t)}{N_{A,GNSS}(t) - N_{B,GNSS}(t)} \right) \quad (10)$$

trong đó:

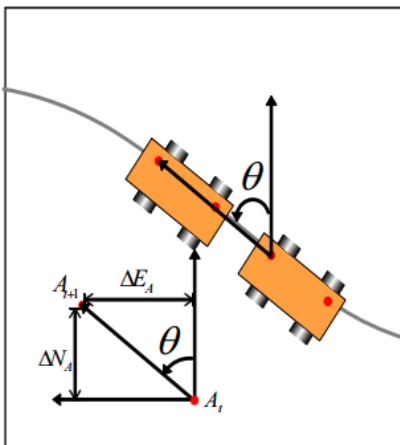
$N_i(t)$, $E_i(t)$ là các tham số tọa độ của anten GNSS tại các điểm A và B ở thời điểm t



Hình 4: Xác định phương vị từ hai máy thu GNSS

Phương án thứ hai được sử dụng để tính phương vị dựa trên sự thay đổi vị trí của máy thu tại hai thời điểm khác nhau theo công thức (11). Minh họa phương pháp được thể hiện ở Hình 5.

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{E_{A,GNSS}(t) - E_{A,GNSS}(t-1)}{N_{A,GNSS}(t) - N_{A,GNSS}(t-1)} \right) \quad (11)$$



Hình 5: Tính toán phương vị dựa vào sự thay đổi vị trí theo thời gian

3. Thử nghiệm

Để đánh giá hiệu quả của phương án đề xuất, một thực nghiệm được tiến hành vào tháng 10 năm 2023 bởi các hệ thống tại phòng thí nghiệm Bản đồ số địa hình của Trường Đại học Mở - Địa chất và các thiết bị từ Viện Cơ giới quân sự, Bộ Quốc phòng. Các thử nghiệm được tiến hành trong ứng dụng dẫn đường mặt đất sử dụng một hệ thống tích hợp GNSS/IMU bao gồm một máy thu GNSS EVK-NEO M8T của hãng U-blox (Thụy sĩ) và IMU ADS-16405 (ADIS, Mỹ). Hệ thống tham chiếu là hệ thống tích hợp INS/GNSS thương mại DS-IMU1 của hãng DEWESoft (Slovenia). Ngoài ra, hai máy thu GNSS Garmin GPS35 được thiết lập với khoảng cách cách nhau 1,2 mét nhằm cung cấp phương hướng để tạo điều kiện ràng buộc phương vị. Hình 6 mô tả hệ thống thử nghiệm và Bảng 1 là các thông số kỹ thuật của hệ thống thử nghiệm và hệ thống tham chiếu.

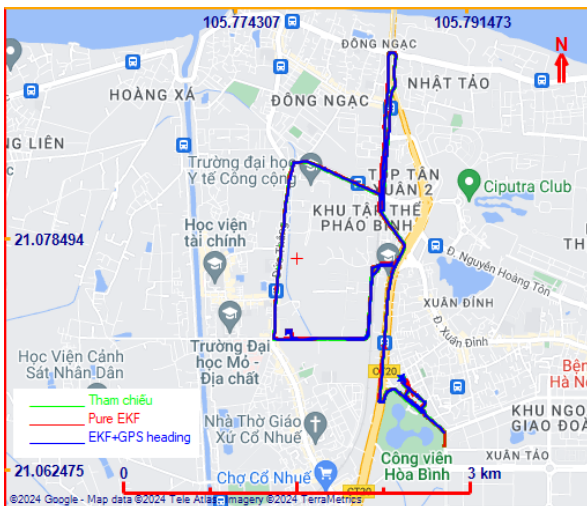
Khu vực thử nghiệm được tiến hành ở quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội. Hành trình thử nghiệm được thể hiện ở Hình 7. Các số liệu thu thập được xử lý bằng modul phần mềm viết bằng ngôn ngữ Matlab. Các kết quả tính toán bao gồm hệ thống tích hợp GNSS/IMU với EKF thuần túy và hệ thống tích hợp INS/GNSS với thông tin phương vị từ hướng di chuyển của phương tiện mang (GNSS/IMU+heading). Các tham số như vị trí và tư thế của hệ thống thử nghiệm được so sánh với hệ thống chuẩn, từ đó ước lượng được sai số trung phương (RMSE) dựa trên 1.500 trị đo tương ứng với 1.500 giây số liệu thực nghiệm. Các phép phân tích được trình bày ở Hình 8, Hình 9 và Bảng 2.



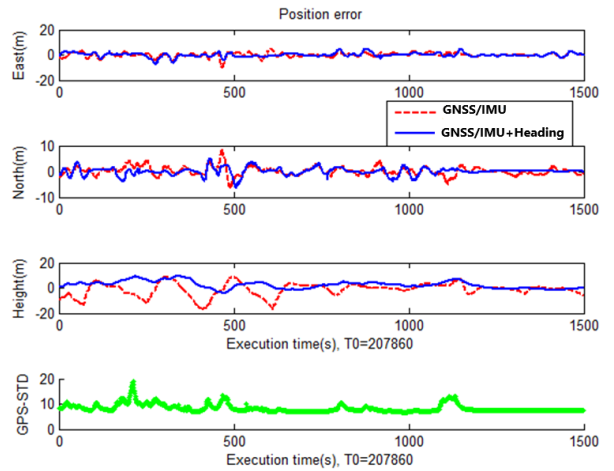
Hình 6: Thiết kế hệ thống thử nghiệm

Bảng 1: Thông số kỹ thuật hệ thống tham chiếu và hệ thống thử nghiệm

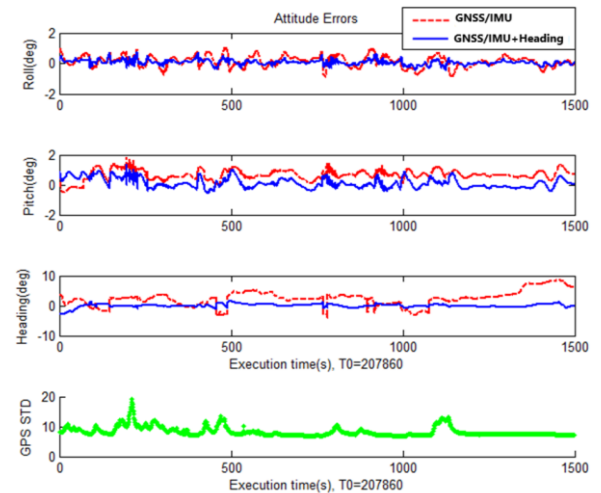
Thông số kỹ thuật	Hệ thống tham chiếu	Hệ thống thử nghiệm
Độ chính xác vị trí mặt bằng	0,02 m	2,5 m
Độ chính xác độ cao	0,03 m	5 m
Độ chính xác vận tốc	0,05 m/s	0,5 m/s
Độ chính xác phương hướng	0,10 độ	0,5 độ
Tần số cập nhật	100 Hz	50 Hz



Hình 7: Hành trình tuyến thử nghiệm



Hình 8: Đồ thị sai số vị trí điểm



Hình 9: Đồ thị sai số tư thế

Bảng 2: Kết quả phân tích trong thử nghiệm

RMSE	GNSS /IMU	GNSS/IMU + Heading	Mức cải thiện (%)
E (m)	1,669	1,616	3
N (m)	1,647	1,435	13
H (m)	5,294	3,791	28
3D (m)	5,790	4,364	25
roll (o)	0,385	0,170	56
pitch (o)	0,744	0,354	52
Heading (o)	3,472	0,596	83

Từ đồ họa và số liệu phân tích ở trên cho thấy, độ chính xác của giải pháp tích hợp GNSS/IMU với thông tin phương vị từ hướng di chuyển xác định từ GNSS được cải thiện đáng kể so với hệ thống cùng loại chỉ sử dụng EKF thuần túy. Mức cải thiện đáng kể ở tham số phương vị (heading) là 83%, và điều này dẫn tới độ chính xác vị trí tăng lên, ở mức 25%.

4. Kết luận

Bài viết đã đề xuất giải pháp cập nhật phương vị của hệ thống từ hướng di chuyển xác định từ GNSS nhằm nâng cao độ chính xác của hệ thống dẫn đường tích hợp GNSS/IMU.

Mô hình toán cùng với các modul phần mềm viết trên ngôn ngữ lập trình Matlab để thực hiện việc xử lý số liệu tích hợp gồm cơ chế tính toán trong INS, phép lọc Kalman mở rộng và cập nhật phương vị từ hướng chuyển động của máy thu GNSS.

Số liệu cho việc tính toán thực nghiệm được thu thập ngoài thực địa với các hệ thống máy móc và tính toán phân tích bằng các modul phần mềm. Các phân tích từ kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng phương pháp tích hợp GNSS/IMU với cập nhật phương vị từ hướng di chuyển xác định từ GNSS giúp cải thiện độ chính xác về phương vị và vị trí đáng kể so với hệ thống cùng loại chỉ sử dụng EKF thuần túy.

Tài liệu tham khảo

[1]. Naser E. S., (2005), "An Overview of Mobile Mapping Systems", From Pharaohs to Geoinformatics, FIG Working Week 2005 and GSDI-8. Cairo, Egypt April 16-21, 2005.

[2]. Bossler J. D., Novak K. (1993), "Mobile Mapping System: New Tools for the Fast Collection of GIS Information", GIS'93, Ottawa, Canada, March 23-25.

[3]. Jasiobedzki. P, Se. S, Bondy. M and Jakola. R (2008), "Underwater 3D mapping and pose estimation for ROV operations," OCEANS 2008, Quebec City, QC, Canada, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/OCEANS.2008.5152076.

[4]. Huang, Y.W. and Chiang, K.W., (2009). Performance Analysis of Low Cost INS/GPS POS Systems for Land Based MMS Utilizing LC and TC Integration, ION GNSS 2009 Meeting, Savannah, Georgia, USA, September 22-25.

[5]. Park, M. and Gao, Y., (2008). Error and Performance Analysis of MEMS-based Inertial Sensors with a Low-cost GPS Receiver. *Sensors*, 8(4), pp. 2240-2261.

[6]. Li, T.; Zhang, H.; Gao, Z.; Chen, Q.; Niu, X.,(2018). High-Accuracy Positioning in Urban Environments Using Single-Frequency Multi-GNSS RTK/MEMS-IMU Integration. *Remote Sens.* 2018, 10, 205. <https://doi.org/10.3390/rs10020205>.

[7]. Nguyen Van Thang, Pham Manh Thang, Tran Duc Tan. (2012). The performance improvement of a low cost INS/GPS integration system using the street return algorithm. *Vietnam Journal of Mechanics*, 34(4), pp.271-280.

[8]. Vana S., Bisnath S., (2020). Enhancing Navigation in Difficult Environments with Low-Cost, Dual-Frequency GNSS PPP and MEMS IMU. *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/1345_2020_118.

[9]. H. Benzerrouk and A. Nebylov, "Robust nonlinear filtering applied to integrated navigation system INS/GNSS

under non Gaussian measurement noise [10]. Shin E. H. (2005), "Estimation effect," 2012 IEEE Aerospace Conference, Techniques for Low-Cost Inertial Navigation", Big Sky, MT, USA, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/AERO.2012.6187141. UCGE Reports Number 20156.

Summary

Improving the performance of the GNSS/IMU integrated system with GNSS heading from motion constraint

Duong Thanh Trung

Hanoi University of Mining and Geology

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are widely used for mapping, positioning and navigation. However, for applications that require high and continuous data access, such as unmanned aerial vehicle navigation, hydrographic surveying and mobile mapping systems, information from GNSS alone is not enough. An integrated solution between GNSS and inertial measurement units (IMUs) has been applied to overcome this issue. This integrated solution allows simultaneously providing information about the position, velocity and direction of the carrier in 3D space. However, low-cost IMUs are often used for most commercial applications, which leads to limited system accuracy. This paper introduces an integrated solution between GNSS and low-cost IMUs with the condition of constraining the direction from the motion vector of the GNSS receiver to improve the accuracy of the integrated GNSS/IMU system. Experimental analysis shows that the proposed solution significantly improves positioning and orientation accuracy compared to the pure integrated solution.

Keywords: Integration, GNSS, IMU, Heading constraint, Kalman Filter.