



(12) BẢN MÔ TẢ SÁNG CHẾ THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN SÁNG CHẾ

(19) Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)
CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ

(11)



1-0048672

(51)^{2021.01} G01C 25/00

(13) B

(21) 1-2022-06009

(22) 19/09/2022

(45) 25/07/2025 448

(43) 25/11/2022 416A

(73) TẬP ĐOÀN CÔNG NGHIỆP - VIỄN THÔNG QUÂN ĐỘI (VN)

Lô D26 Khu đô thị mới Cầu Giấy, phường Yên Hoà, quận Cầu Giấy, thành phố Hà Nội

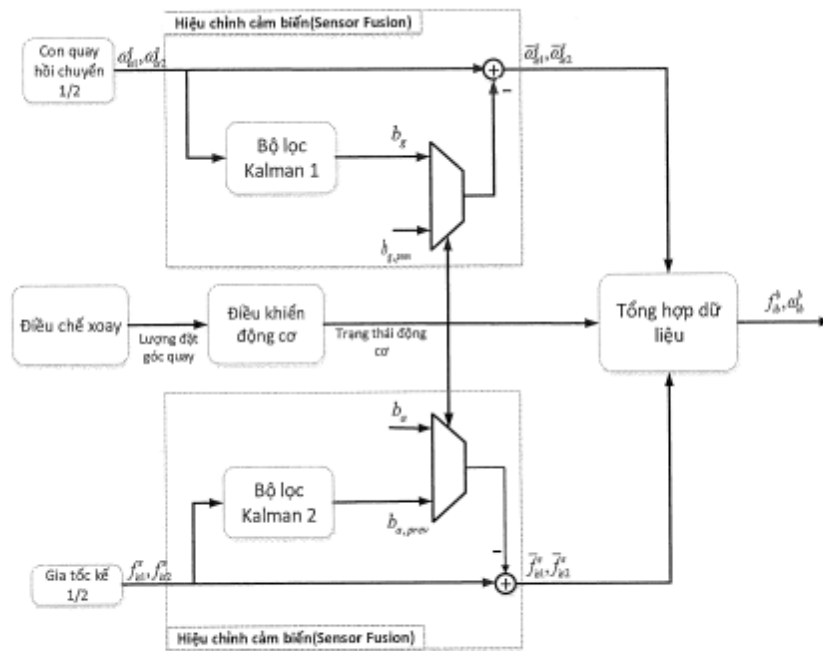
(72) Nguyễn Đức Anh (VN); Đỗ Tùng Dương (VN); Vương Xuân Chiến (VN); Hoàng Văn Hiệp (VN); Trịnh Hải Nam (VN); Lương Văn Mạnh (VN).

(74) Công ty TNHH NACILAW (NACILAW)

(54) PHƯƠNG PHÁP BÙ SAI SỐ ỨNG DỤNG TRONG CẢM BIẾN QUÁN TÍNH
DỰA TRÊN NỀN TẢNG KHUNG XOAY KÉP

(21) 1-2022-06009

(57) Sáng chế đề xuất phương pháp bù sai số ứng dụng trong cảm biến quán tính dựa trên nền tảng khung xoay kép. Phương pháp bao gồm các bước: bước 1: thực hiện điều khiển động cơ; bước 2: thực hiện ước lượng sai số của cảm biến; bước 3: thực hiện chạy thuật toán định vị. Đây là phương pháp áp dụng các thuật toán để ước lượng và bù sai số tồn tại trong phép đo của cảm biến. Kết quả sẽ làm tăng chất lượng đầu ra cho hệ thống cảm biến quán tính (IMU). Dẫn tới, cảm biến quán tính cấp thấp có sai số tương đương với loại cảm biến cấp cao hơn và điều này sẽ làm giảm giá thành của hệ thống so với các hệ thống cảm biến cùng cấp độ.



Hình 3

Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Sáng chế đề xuất một phương pháp bù sai số. Cụ thể, phương pháp bù sai số được đề cập trong sáng chế được áp dụng trong cảm biến quán tính dựa trên nền tảng khung xoay kép.

Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Quá trình hiệu chỉnh sai số của cảm biến quán tính cũng như quá trình khởi tạo là vô cùng quan trọng. Sai số tĩnh (bias), sai số hệ số (scale factor) và sự lệch trục (misalignment) và nhiễu đo ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả của hệ thống định vị quán tính. Do đó, việc ước lượng được một hoặc một vài loại sai số và loại bỏ chúng sẽ cải thiện được hiệu suất định vị của hệ thống định vị quán tính.

Trong những năm qua, các phương pháp để bù sai số đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực định vị quán tính (INS). Trong đó, một số phương pháp đã được nghiên cứu và phát triển nhằm mục đích giảm bớt các sai số cảm biến, cụ thể:

Bằng sáng chế US2017234988A1, Hoa Kỳ ngày 17/08/2017 đưa ra một phương pháp bù sai số tĩnh và sự lệch trục cho hệ thống cảm biến quán tính bằng dữ liệu lấy từ hệ thống định vị vệ tinh (GNSS) và/hoặc INS. Cụ thể, phương pháp này xác định sai số tĩnh và sự lệch trục bằng cách sử dụng dữ liệu vận tốc và góc trạng thái từ hệ thống GNSS, từ đó tính ra được gia tốc riêng và vận tốc góc chính xác của hệ thống IMU. Lấy giá trị chính xác đó (từ GNSS) trừ giá trị trả ra thực tế từ IMU sẽ xác định được các sai số cần tìm. Điểm hạn chế của phương pháp này là cần phải sử dụng hai hệ thống định vị để ước lượng tính toán sai số tĩnh, cấu trúc của hệ thống phức tạp và kết quả ước lượng sai số phụ thuộc vào độ chính xác của hệ thống định vị làm tham chiếu.

Bằng sáng chế JP2006177909A, Nhật Bản ngày 06/07/2006 của Futoshi Magosaki đưa ra phương pháp xác định sai số tĩnh của con quay hồi chuyển ngay cả trong quá trình chuyển động. Cụ thể, phương pháp này sử dụng hai con quay hồi chuyển, một con quay cố định và con quay còn lại có trục nhạy trùng phương với trục nhạy của con quay thứ nhất và có thể lật ngược 180 độ (ngược hướng với con thứ nhất). Với việc đo giá trị vận tốc góc tại hai thời điểm hai con quay cùng hướng và ngược hướng nhau, từ đó có thể suy ra được giá trị sai số tĩnh của cả hai con quay hồi chuyển. Nhược điểm của phương pháp này là chỉ đề cập tới việc ước lượng tính toán sai số tĩnh của con quay hồi chuyển mà chưa thấy đề cập tới việc ước lượng tính toán sai số tĩnh cho gia tốc kế.

Để giảm thiểu sai số của cảm biến quán tính, bao gồm cả gia tốc kế và con quay hồi chuyển, nhóm tác giả đề xuất phương pháp bù sai số mới, áp dụng các thuật toán cho cảm biến quán tính dựa trên nền tảng khung xoay kép (gồm hai cảm biến thành phần, mỗi cảm biến đã tích hợp sẵn gia tốc kế ba trục và con quay hồi chuyển ba trục) để ước lượng các giá trị sai số ảnh hưởng lên hệ thống cảm biến quán tính. Đây là phương pháp có khả năng thực hiện đồng thời quá trình tự hiệu chỉnh liên tục và chạy

thuật toán định vị. Do đó, đây là phương án không giống bất kì sáng chế nào đã được công bố.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Mục đích của sáng chế là đề xuất một phương pháp mới, sử dụng đầu vào là các giá trị đo được từ hai cảm biến thành phần kết hợp với một kịch bản xoay cụ thể để ước lượng ra các giá trị sai số của cảm biến. Cụ thể, phương pháp bù sai số xây dựng mô hình sai số để ước lượng các giá trị sai số tồn tại trong phép đo của cảm biến, dẫn đến tăng chất lượng đầu ra cho hệ thống cảm biến quán tính (IMU). Từ đó, các cảm biến cấp thấp có thể được sử dụng cho những ứng dụng cấp cao hơn.

Để đạt được mục đích trên, phương pháp bù sai số bao gồm ba bước cụ thể như sau:

Bước 1: thực hiện điều khiển động cơ; điều khiển động cơ để đưa cảm biến đến một vị trí cụ thể đã xác định trước (lần lượt là các góc 0° , 90° , 180° , 270° , 360° , 270° , 180° , 90°), chiến lược quay sẽ được thiết kế theo phương pháp điều chế xoay để triệt tiêu giá trị sai số cảm biến sau mỗi chu kì quay. Để thực hiện được điều này, động cơ được điều khiển theo phương pháp phản hồi vòng kín, với lượng đặt là góc mà động cơ cần phải xoay để đến vị trí mong muốn, sử dụng bộ điều khiển vi tích phân tỉ lệ (PID) để điều khiển động cơ.

Bước 2: thực hiện ước lượng sai số của cảm biến; khi cả hai động cơ đã quay đến vị trí yêu cầu và đã giữ nguyên vị trí, bộ lọc Kalman sẽ được sử dụng để ước lượng các giá trị sai số của từng cảm biến thành phần, từ sự thay đổi trạng thái của cảm biến, sai số tĩnh sẽ được xác định. Các phép đo là các giá trị cảm biến đầu vào. Các ma trận hiệp phương sai được khởi tạo dựa trên các điều kiện cho trước.

Bước 3: thực hiện chạy thuật toán định vị; hệ thống sẽ thực hiện thuật toán định vị từ các giá trị trả ra từ cảm biến quán tính đã được bù sai số và các giá trị khởi tạo. Sử dụng các giá trị vị trí, vận tốc, góc trạng thái tính được từ chu kì trước để làm đầu vào cho chu kì tính toán sau. Từ đó vật thể được định vị.

Sau khi thực hiện phương pháp đề xuất, sai số của cảm biến quán tính được triệt tiêu bớt, từ đó tăng chất lượng đầu ra của cảm biến, dẫn đến cảm biến quán tính cấp thấp có sai số tương đương với loại cảm biến cấp cao hơn. Điều này sẽ làm giảm giá thành của hệ thống so với các hệ thống cảm biến cùng cấp độ.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Hình 1 là hình vẽ minh họa kịch bản quay của động cơ;

Hình 2 là hình vẽ minh họa cấu trúc điều khiển động cơ;

Hình 3 là hình vẽ minh họa lưu đồ thuật toán ước lượng sai số cảm biến;

Hình 4 là hình vẽ minh họa quá trình ước lượng của bộ lọc Kalman;

Hình 5 là hình vẽ minh họa cho quá trình tính định vị.

Mô tả chi tiết sáng chế

Nội dung được đề cập trong sáng chế là phương pháp bù sai số cho cảm biến quán tính dựa trên nền tảng khung xoay kép. Để thực hiện phương pháp đề xuất trong sáng chế, đầu tiên phương pháp điều chế xoay sẽ được áp dụng để thiết kế chiến lược quay cho động cơ. Kích bản quay của hai động cơ thành phần là giống nhau tuy nhiên chúng sẽ không được quay đồng thời mà sẽ quay lần lượt, nghĩa là sẽ luôn có ít nhất một động cơ không quay để có thể lấy giá trị từ cảm biến để tính toán định vị. Để thuận tiện trong việc trình bày, các hệ tọa độ thường dùng trong định vị dẫn đường sẽ được định nghĩa lại cụ thể như sau:

Hệ i : hệ tọa độ quán tính, trục z trùng với trục quay của trái đất, trục x và y nằm cố định trong mặt phẳng xích đạo, không quay theo trái đất.

Hệ e : hệ tọa độ trái đất, trục x và y nằm trong mặt phẳng xích đạo, quay theo trái đất, trục z trùng với trục quay của trái đất.

Hệ n : hệ tọa độ định vị, trong sáng chế này, các trục x , y , z lần lượt được đặt về hướng bắc (north), hướng đông (east) và phía dưới (downward) ở vị trí vật thể được đặt.

Hệ b : hệ tọa độ của IMU, hệ này có điểm gốc đặt tại tâm của IMU, các trục x , y , z hướng lần lượt về phía trước, phía trái và phía trên tương ứng của IMU.

Hệ s : hệ tọa độ cảm biến, hệ có các trục trùng với các trục nhạy của cảm biến quán tính, tâm của hệ tọa độ được xác định là tâm của cảm biến. Ngoài ra, hệ s thay đổi cùng với sự quay của IMU.

Bước 1: thực hiện điều khiển động cơ;

Tham chiếu Hình 1, mỗi khi cần thay đổi vị trí, động cơ sẽ được điều khiển để quay thêm một góc 90 độ. Khi thực hiện hết bốn chu trình 1, 2, 3 và 4, động cơ đã hoàn thành một vòng quay. Tại chu trình 5, 6, 7 và 8 động cơ được điều khiển quay ngược chiều với bốn chu kỳ ban đầu. Theo nguyên lý điều chế xoay, khi thực hiện hết một vòng quay, sai số tĩnh của cảm biến quán tính sẽ được triệt tiêu bớt trong quá trình tính định vị. Cụ thể, giả sử cảm biến được quay quanh trục z của hệ tọa độ vật thể (hệ b) với tốc độ ω , sai số tĩnh trên từng trục tọa độ cũng luôn quay theo sự quay của hệ tọa độ cảm biến (s). Do đó, đối với hệ tọa độ b của hệ thống cảm biến quán tính hình chiếu của véc-tơ sai số tĩnh trên trục x và y dao động tuần hoàn và trên trục z là không đổi.

Gọi ω_g^s và ω_a^s lần lượt là sai số tĩnh của con quay hồi chuyển và sai số tĩnh của gia tốc kế. Tốc độ góc và gia tốc riêng trên cảm biến là:

$$\begin{cases} \omega_{is}^s = C_b^s \omega_{ib}^b + \omega_{bs}^s + \tilde{b}_g \\ f_{is}^s = C_b^s f_{ib}^b + \tilde{b}_a \end{cases} \quad (1)$$

Với ω_{ib}^b và f_{ib}^b là tốc độ góc và gia tốc riêng trong hệ tọa độ vật thể, ω_{bs}^s là tốc độ quay của hệ tọa độ cảm biến với tham chiếu là hệ tọa độ vật thể tính theo trục của hệ tọa độ cảm biến, C_b^s là ma trận chuyển hệ tọa độ từ hệ tọa độ b sang hệ tọa độ s , ω_{is}^s và f_{is}^s là tốc độ góc và gia tốc riêng trên cảm biến.

Mặt khác, giá trị thực của tốc độ góc và gia tốc riêng trên hệ tọa độ b được tính như sau:

$$\begin{cases} \omega_{ib}^b = C_s^b (\hat{\omega}_{is}^s - \omega_{bs}^s) \\ f_{ib}^b = C_s^b \hat{f}_{is}^s \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó, $\hat{\omega}_{is}^s$ và $\hat{f}_{is}^s$ là tốc độ góc và gia tốc riêng đo được từ cảm biến trong hệ tọa độ cảm biến (hệ s).

Thay các giá trị gia tốc riêng và vận tốc góc từ phương trình (1) vào phương trình (2) sẽ thấy được ảnh hưởng của sai số tĩnh lên giá trị cảm biến trên hệ b như sau:

$$\begin{cases} \omega_{ib}^b = \omega_{ib}^b + C_s^b \tilde{b}_z + C_s^b \eta_z \\ f_{ib}^b = f_{ib}^b + C_s^b \tilde{b}_x + C_s^b \eta_x \end{cases} \quad (3)$$

Vì cảm biến quay đều, ma trận C_s^b phụ thuộc vào góc trạng thái giữa hệ tọa độ cảm biến và hệ tọa độ vật thể nên sẽ là một ma trận có các phần tử mà giá trị của chúng dao động điều hòa theo thời gian, hệ quả là khi nhân với sai số tĩnh giá trị trung bình của chúng sẽ bằng 0 sau một chu kỳ quay.

$$I_z = \int_t^{t+2\pi/\omega} C_s^b \tilde{b}_z = \int_t^{t+2\pi/\omega} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{b}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{b}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{b}_{z,z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Như vậy, khi quay quanh trục z, sai số tĩnh trên trục x và trục y đã bị triệt tiêu, chỉ còn lại sai số tĩnh trên trục z. Làm tương tự với gia tốc kế, sai số tĩnh của gia tốc riêng cũng sẽ được triệt tiêu.

Chiến lược điều khiển phản hồi sẽ được sử dụng để điều khiển động cơ. Sơ đồ miêu tả phương pháp điều khiển động cơ được miêu tả trên Hình 2. Trình tự thực hiện bao gồm xây dựng mô hình của động cơ, tính toán các tham số của bộ điều khiển PID. Thiết lập kích bản cho lượng đặt để động cơ hoạt động theo kích bản đã đề ra. Từ đó, cảm biến được gắn chặt lên động cơ sẽ được quay để thực hiện các bước tiếp theo. Vai trò của bộ điều khiển PID là cấp tín hiệu điện áp U_{dc} vào động cơ theo ba khâu tỉ lệ, tích phân, đạo hàm theo công thức:

$$U_{\alpha} = P + I_n + D \quad (5)$$

Trong đó, khâu tỉ lệ: $P = K_p \cdot \varepsilon \cdot dt$

khâu tích phân: $I_n = I_{n-1} + K_I \cdot \varepsilon \cdot dt$

khâu đạo hàm: $D = K_d \cdot \varepsilon / dt$

Với các hệ số K_p , K_i và K_d là tham số của bộ điều khiển vi tích phân tỉ lệ PID tương đương điều khiển các khâu, dt là thời gian lấy mẫu của hệ thống, ε là sai số giữa giá trị đặt và giá trị phản hồi.

Sử dụng môi trường MATLAB/Simulink để mô hình hoá và lựa chọn các tham số cho bộ điều khiển. Sau đó đưa các giá trị lượng đặt vào trong mô phỏng rồi chạy thử nghiệm. Sau quá trình chạy thử nghiệm và chỉnh định bộ điều khiển sẽ có được tham số tối ưu của bộ điều khiển PID.

Bước 2: thực hiện ước lượng sai số của cảm biến;

Hình 3 thể hiện lưu đồ thuật toán sẽ được sử dụng để ước lượng các giá trị sai số của cảm biến. Đầu vào của thuật toán là các giá trị gia tốc riêng và vận tốc góc từ cảm biến. Ban đầu, giá trị sai số tính của cả hai giá trị gia tốc riêng và vận tốc góc đều được khởi tạo là véc-tơ không. Sau đó là bộ lọc Kalman, có lưu đồ thuật toán được miêu tả trên Hình 4 sẽ được áp dụng để ước lượng với véc-tơ trạng thái là độ lệch của giá trị sai số tính thực tế và sai số tính khởi tạo ban đầu (gọi là véc-tơ trạng thái sai số). Mô hình sử dụng véc-tơ trạng thái loại này được gọi là mô hình ước lượng sai số trạng thái. Mô hình trạng thái của hệ thống được mô tả như sau:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t) \quad (6)$$

Với: $\mathbf{w}$ là véc-tơ nhiễu hệ thống;

$\mathbf{F}$ là ma trận hệ thống;

$\mathbf{G}$ là ma trận phân phối nhiễu.

$\mathbf{F}$ và $\mathbf{G}$ là các ma trận đã biết từ trước, được xác định từ các tính chất của hệ thống đang xét. Trong bộ lọc Kalman gián đoạn, véc-tơ trạng thái được mô hình thành phương trình tuyến tính theo giá trị ước lượng trước như sau:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \Phi_{k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^- \quad (7)$$

với $\Phi_{k-1} = \exp(\mathbf{F}_{k-1} t_s)$ là ma trận hệ thống.

Ma trận hiệp phương sai sai số ước lượng được dự đoán theo công thức:

$$\mathbf{P}_k^- = E[(\hat{\mathbf{x}}_k^- - \mathbf{x}_k)(\hat{\mathbf{x}}_k^- - \mathbf{x}_k)^T] = \Phi_{k-1} \mathbf{P}_{k-1}^- \Phi_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (8)$$

Với $\mathbf{Q}$ là ma trận hiệp phương sai nhiễu của hệ thống.

Đối với mô hình ước lượng sai số trạng thái loại này, giá trị véc-tơ trạng thái dự đoán luôn có giá trị là véc-tơ không và ma trận hệ thống luôn là ma trận đơn vị.

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{0}$$

$$\Phi = \mathbf{I}$$

Để cập nhật việc ước lượng các véc-tơ bằng các phép đo, cần phải xác định được các phép đo lường này có mối quan hệ như thế nào với véc-tơ trạng thái. Trong bộ lọc Kalman thông thường, véc-tơ đo $\mathbf{z}(t)$, có mối quan hệ với véc-tơ trạng thái $\mathbf{x}(t)$ theo công thức:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{w}_m(t) \quad (9)$$

Với $\mathbf{H}(t)$ là ma trận đo, được xác định từ các tính chất đã biết của hệ thống và $\mathbf{z}_k$ là véc-tơ đo được xác định từ các giá trị trả ra từ cảm biến quán tính.

$\mathbf{z} = [\mathbf{f}_{ib,1}^b - \mathbf{f}_{ib,2}^b]$ với mô hình xác định sai số tĩnh của gia tốc kế và $\mathbf{z} = [\mathbf{\omega}_{ib,1}^b - \mathbf{\omega}_{ib,2}^b]$ đối với mô hình xác định sai số tĩnh của con quay hồi chuyển

Nếu phương trình trên được gián đoạn hóa:

Với véc-tơ đo $\mathbf{z}_k$, véc-tơ trạng thái được ước lượng lại theo công thức:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k + (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \hat{\mathbf{x}}_k^- \quad (10)$$

Với $\mathbf{K}_k$ là ma trận hệ số Kalman. Thay phương trình 8 và 9 vào phương trình 10:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{K}_k \mathbf{w}_{mk} + (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \hat{\mathbf{x}}_k^- \quad (11)$$

Giá trị kì vọng của nhiễu đo $\mathbf{w}_{mk}$ bằng 0. Nên phương trình 11 có thể được viết lại thành:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (12)$$

Ở đây nếu muốn tìm được giá trị ước lượng $\hat{\mathbf{x}}_k^+$ thì phải xác định được giá trị của ma trận hệ số Kalman $\mathbf{K}_k$. Phương trình cập nhật ma trận hệ số Kalman $\mathbf{K}$ như sau:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (13)$$

Ma trận hiệp phương sai sai số ước lượng được tính theo công thức:

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{P}_k^- (\mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \quad (14)$$

Sau quá trình xử lý qua bộ lọc Kalman, giá trị của véc-tơ sai số được ước lượng ra sẽ được cộng vào giá trị sai số tĩnh dự đoán ở chu kì trước để tạo thành giá trị sai số tĩnh mới.

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{b}_{k-1} + \hat{\mathbf{x}}_k^+ \quad (15)$$

Với $\mathbf{b}$ là véc-tơ sai số tĩnh dự đoán tại thời điểm k , và $\mathbf{b}_0 = \mathbf{0}^r$

Khi bộ lọc hội tụ, giá trị ước lượng của véc-tơ trạng thái sẽ xấp xỉ véc-tơ $\mathbf{0}^r$ và $\mathbf{b}_k \gg \mathbf{b}_{k-1}$, lúc này giá trị sai số tĩnh của cảm biến được xác định.

Giá trị sai số tĩnh vừa ước lượng được sẽ được sử dụng để bù vào giá trị cảm biến theo công thức:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{f}}_{ib}^b &= \mathbf{f}_{ib}^b - \mathbf{b}_{a,k} \\ \hat{\mathbf{\omega}}_{ib}^b &= \mathbf{\omega}_{ib}^b - \mathbf{b}_{g,k} \end{aligned} \quad (16)$$

Với $\hat{\mathbf{f}}_{ib}^b$ và $\hat{\mathbf{\omega}}_{ib}^b$ là các giá trị cảm biến được hiệu chỉnh, $\mathbf{f}_{ib}^b$ và $\mathbf{\omega}_{ib}^b$ là các giá trị cảm biến chưa qua xử lý, và là giá trị sai số tĩnh tại thời điểm k .

Bước 3: thực hiện chạy thuật toán định vị;

Tham chiếu Hình 5, các giá trị gia tốc riêng, vận tốc góc đã được hiệu chỉnh và các giá trị khởi tạo ban đầu sẽ được sử dụng để tính định vị. Trong thuật toán định vị sử dụng một số hằng số được trình bày cụ thể dưới đây:

Bán kính xích đạo: $R_0 = 6378137$ (m);

Bán kính cực: $R_p = 6356752,3142$;

Độ lệch tâm: $e = 0,0818191908425$;

Vận tốc quay trái đất: $\omega_{ie} = 7,292115 \cdot 10^{-5}$ (m/s²);

Độ lớn của véc-tơ trọng trường: $g = 9,7803253359$ (m/s²).

Ngoài ra, một số véc-tơ liên quan đến vận tốc quay trái đất cũng được tính theo công thức:

$$\text{Bán kính cong theo hướng bắc - nam tại vĩ độ } L: R_N(L) = \frac{R_0(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2(L))^{3/2}};$$

$$\text{Bán kính cong theo hướng đông - tây tại vĩ độ } L: R_E(L) = \frac{R_0}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(L)}};$$

$$\text{Véc-tơ } \omega_{ie}^n = \omega_{ie} \cdot [\cos(L) \quad 0 \quad -\sin(L)]$$

$$\text{Véc-tơ } \omega_{en}^n = \begin{bmatrix} v_{eb,y}^n / (R_E(L) + h) \\ -v_{eb,x}^n / (R_N(L) + h) \\ -v_{eb,y}^n \cdot \tan(L) / (R_E(L) + h) \end{bmatrix}$$

Với v_{eb}^n là vận tốc của vật thể trên hệ tọa độ định vị, L và h lần lượt là vĩ độ và cao độ của vật thể.

Góc trạng thái của vật thể được biểu diễn bằng ma trận chuyển hệ tọa độ C_b^n . Cụ thể, giá trị góc trạng thái mới sẽ được tính toán dựa trên góc trạng thái tại thời điểm trước đó và giá trị vận tốc góc theo công thức:

$$C_b^n(+) = C_b^n(-) \cdot C_{b+}^{b-} - (\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n) \cdot C_b^n(-) \cdot dt \quad (16)$$

Với $C_b^n(+)$ là ma trận chuyển hệ tọa độ từ khung b sang khung n tại thời điểm k , $C_b^n(-)$ là ma trận chuyển hệ tọa độ từ khung b sang khung n tại thời điểm $k-1$, C_{b+}^{b-} là ma trận chuyển hệ tọa độ từ khung tọa độ b tại thời điểm k sang khung tọa độ b tại thời điểm $k-1$. Ω_{ie}^n là ma trận phản xứng tạo bởi véc-tơ ω_{ie}^n và Ω_{en}^n là ma trận phản xứng tạo bởi véc-tơ ω_{en}^n , dt là thời gian lấy mẫu.

Ma trận C_{b+}^{b-} được tính theo công thức:

$$\mathbf{C}_{b \rightarrow}^b = \mathbf{I} + \frac{\sin(|\mathbf{a}_{ib}^b|)}{|\mathbf{a}_{ib}^b|} [\mathbf{a}_{ib}^b]^\wedge + \frac{1 - \cos(|\mathbf{a}_{ib}^b|)}{|\mathbf{a}_{ib}^b|^2} [\mathbf{a}_{ib}^b]^\wedge^2 \quad (17)$$

Với $\mathbf{a}_{ib}^b = \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \cdot dt$ và $[\mathbf{a}_{ib}^b]^\wedge = \begin{bmatrix} 0 & -a_{ib,z}^b & a_{ib,y}^b \\ a_{ib,z}^b & 0 & -a_{ib,x}^b \\ -a_{ib,y}^b & a_{ib,x}^b & 0 \end{bmatrix}$. Các ma trận phản xứng khác cũng có biến đổi tương tự.

Tiếp theo là quá trình cập nhật lại vận tốc của vật thể. Phương trình cập nhật vận tốc như sau:

$$\mathbf{v}_{sb}^n = \mathbf{v}_{sb}^n(-) + [\mathbf{f}_{sb}^n + \mathbf{g}_{bn} - (\boldsymbol{\Omega}_{bn}^n + 2\boldsymbol{\Omega}_{sb}^n) \cdot \mathbf{v}_{sb}^n(-)] \cdot dt \quad (18)$$

Với $\mathbf{f}_{ib}^n$ là véc-tơ gia tốc riêng được thay đổi trực tính toán thành trực định vị n theo công thức: $\mathbf{f}_{ib}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}_{ib}^b$.

$\mathbf{g}_{bn}$ là véc-tơ trọng trường có được từ mô hình trọng trường.

Cuối cùng là quá trình cập nhật lại vị trí bao gồm các tham số vĩ độ (L), kinh độ (λ) và cao độ (h). Công thức cập nhật lại vị trí dựa trên giá trị vị trí tại thời điểm lấy mẫu trước và vận tốc của vật thể, cụ thể như sau:

$$\begin{aligned} h(+) &= h(-) + (\mathbf{v}_{sb,D}^n(-) + \mathbf{v}_{sb,D}^n(+)) \frac{dt}{2} \\ L(+) &= L(-) + \left(\frac{\mathbf{v}_{sb,N}^n(-)}{R_N(L(-)) + h(-)} + \frac{\mathbf{v}_{sb,N}^n(+)}{R_N(L(+)) + h(+)} \right) \frac{dt}{2} \\ \lambda(+) &= \lambda(-) + \left(\frac{\mathbf{v}_{sb,E}^n(-) / \cos(L(-))}{R_E(L(-)) + h(-)} + \frac{\mathbf{v}_{sb,E}^n(+)/\cos(L(+))}{R_E(L(+)) + h(+)} \right) \frac{dt}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

Như vậy, tại mỗi thời điểm cập nhật, các giá trị góc trạng thái, vận tốc và vị trí mới của vật thể được xác định dựa trên các giá trị trả ra từ cảm biến quán tính và giá trị định vị tại lần cập nhật trước.

Yêu cầu bảo hộ

1. Phương pháp bù sai số ứng dụng trong cảm biến quán tính dựa trên nền tảng khung xoay kép bao gồm ba bước cụ thể như sau:

bước 1: thực hiện điều khiển động cơ; điều khiển động cơ theo một kịch bản cho trước (lần lượt là các góc $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ, 270^\circ, 180^\circ, 90^\circ$) theo thuật toán điều chế xoay, lúc này sai số tĩnh cộng dồn sau một chu kì xoay sẽ bị triệt tiêu theo công thức:

$$\mathbf{I}_z = \int_t^{t+2\pi/\omega} \mathbf{C}_z^b \tilde{\mathbf{b}}_z = \int_t^{t+2\pi/\omega} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{b}_{z,z} \end{bmatrix}$$

như vậy, nếu quay quanh trục z, sai số tĩnh trên trục x và trục y đã bị triệt tiêu, chỉ còn lại sai số tĩnh trên trục z; làm tương tự với thành phần sai số tĩnh của gia tốc kế, sai số tĩnh của gia tốc riêng cũng sẽ được triệt tiêu;

với chiến lược quay động cơ như trên, sử dụng cấu trúc điều khiển vòng kín để điều khiển động cơ sử dụng bộ điều khiển PID;

bộ điều khiển cấp điện áp U_{dc} cấp điện vào động cơ theo ba khâu tỉ lệ, tích phân, đạo hàm theo công thức: $U_{dc} = P + I_n + D$

trong đó: khâu tỉ lệ: $P = K_p \cdot \varepsilon$

khâu tích phân: $I_n = I_{n-1} + K_I \cdot \varepsilon \cdot dt$

khâu đạo hàm: $D = K_d \cdot \varepsilon / dt$

với các hệ số K_p , K_i và K_d là tham số của bộ điều khiển vi tích phân tỉ lệ PID tương đương điều khiển các khâu, dt là thời gian lấy mẫu của hệ thống;

bước 2: thực hiện ước lượng sai số của cảm biến; khi cả hai động cơ đã quay đến vị trí yêu cầu và đã giữ nguyên vị trí, bộ lọc kalman sẽ được sử dụng để ước lượng các giá trị sai số của từng cảm biến thành phần;

đối với mô hình ước lượng sai số trạng thái loại này, giá trị véc-tơ trạng thái dự đoán luôn có giá trị là véc-tơ không và ma trận hệ thống luôn là ma trận đơn vị;

$$\mathbf{x}_k^- = \mathbf{0}$$

$$\Phi = \mathbf{I}$$

dự đoán ma trận hiệp phương sai sai số theo công thức:

$$\mathbf{P}_k^- = \Phi_{k-1} \mathbf{P}_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1}$$

tiếp theo, ma trận hệ số Kalman $\mathbf{K}$ được cập nhật theo công thức sau:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$$

ước lượng các véc-tơ trạng thái bằng các phép đo:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k$$

$$\text{với } \mathbf{z}_k = [\mathbf{f}_{ib,1}^b - \mathbf{f}_{ib,2}^b] \text{ hoặc } \mathbf{z}_k = [\boldsymbol{\omega}_{ib,1}^b - \boldsymbol{\omega}_{ib,2}^b]$$

ma trận hiệp phương sai sai số ước lượng được tính theo công thức:

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{P}_k^- (\mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)$$

sau quá trình xử lý qua bộ lọc kalman, giá trị sai số tĩnh mới sẽ được tính lại theo công thức:

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{b}_{k-1} + \hat{\mathbf{x}}_k^+$$

với $\mathbf{b}$ là véc-tơ sai số tĩnh dự đoán tại thời điểm k , và $\mathbf{b}_0 = \mathbf{0}^r$

khi bộ lọc hội tụ, giá trị ước lượng của véc-tơ trạng thái sẽ xấp xỉ véc-tơ $\mathbf{0}^r$ và $\mathbf{b}_k \gg \mathbf{b}_{k-1}$, lúc này giá trị sai số tĩnh của cảm biến được xác định;

bù sai số cảm biến theo công thức:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{f}}_{ib}^b &= \mathbf{f}_{ib}^b - \mathbf{b}_{a,k} \\ \hat{\boldsymbol{\omega}}_{ib}^b &= \boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \mathbf{b}_{g,k}\end{aligned}$$

bước 3: thực hiện chạy thuật toán định vị;

cuối cùng sẽ thực hiện thuật toán định vị từ các giá trị trả ra từ cảm biến quán tính đã được bù sai số và các giá trị khởi tạo, cụ thể các bước thực hiện như sau:

góc trạng thái của vật thể được biểu diễn bằng ma trận chuyển hệ tọa độ $\mathbf{C}_b^n$ sẽ được tính toán theo công thức:

$$\mathbf{C}_b^n(+) = \mathbf{C}_b^n(-) \cdot \mathbf{C}_{b-}^{b-} - (\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) \cdot \mathbf{C}_b^n(-) \cdot dt$$

với $\mathbf{C}_b^n(+)$ là ma trận chuyển hệ tọa độ từ khung b sang khung n tại thời điểm k , $\mathbf{C}_b^n(-)$ là ma trận chuyển hệ tọa độ từ khung b sang khung n tại thời điểm $k-1$, $\mathbf{C}_{b-}^{b-}$ là ma trận chuyển hệ tọa độ từ khung tọa độ b tại thời điểm k sang khung tọa độ b tại thời điểm $k-1$; $\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n$ là ma trận phản xứng tạo bởi véc-tơ $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$ và $\boldsymbol{\Omega}_{en}^n$ là ma trận phản xứng tạo bởi véc-tơ $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$, dt là thời gian lấy mẫu;

ma trận $\mathbf{C}_{b-}^{b-}$ được tính theo công thức:

$$\mathbf{C}_{b-}^{b-} = \mathbf{I} + \frac{\sin(|\mathbf{a}_{ib}^b|)}{|\mathbf{a}_{ib}^b|} [\mathbf{a}_{ib}^b]^\wedge + \frac{1 - \cos(|\mathbf{a}_{ib}^b|)}{|\mathbf{a}_{ib}^b|^2} [\mathbf{a}_{ib}^b]^\wedge^2$$

tiếp theo là quá trình cập nhật lại vận tốc của vật thể; phương trình cập nhật vận tốc như sau:

$$\mathbf{v}_{\text{ab}}^n = \mathbf{v}_{\text{ab}}^n(-) + \left[\mathbf{f}_{\text{b}}^n + \mathbf{g}_{\text{bn}} - (\boldsymbol{\Omega}_{\text{en}}^n + 2\boldsymbol{\Omega}_{\text{e}}^n) \cdot \mathbf{v}_{\text{ab}}^n(-) \right] \cdot dt$$

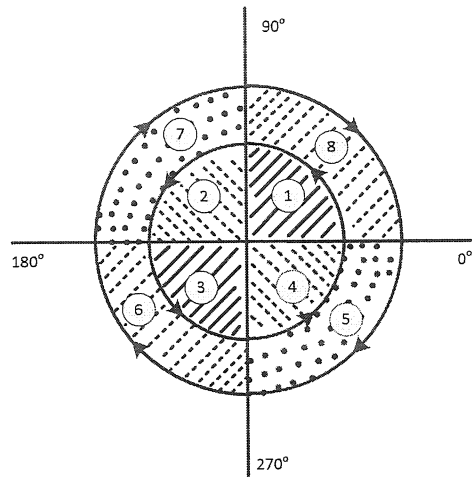
với $\mathbf{f}_{\text{ib}}^n$ là véc-tơ gia tốc riêng được thay đổi trực tính toán thành trực định vị n theo công thức: $\mathbf{f}_{\text{ib}}^n = \mathbf{C}_{\text{b}}^n \mathbf{f}_{\text{ib}}^b$;

$\mathbf{g}_{\text{bn}}$ là véc-tơ trọng trường có được từ mô hình trọng trường;

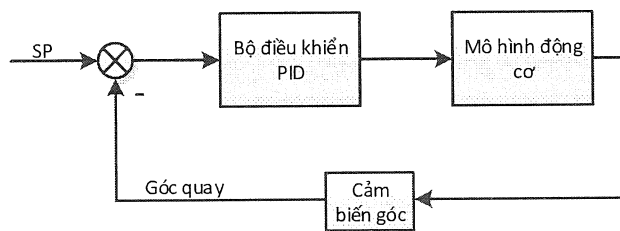
cuối cùng là quá trình cập nhật lại vị trí được tính toán theo công thức như sau:

$$\begin{aligned} h(+) &= h(-) + \left(\mathbf{v}_{\text{ab,D}}^n(-) + \mathbf{v}_{\text{ab,D}}^n(+) \right) \frac{dt}{2} \\ L(+) &= L(-) + \left(\frac{\mathbf{v}_{\text{ab,N}}^n(-)}{R_N(L(-)) + h(-)} + \frac{\mathbf{v}_{\text{ab,N}}^n(+)}{R_N(L(+)) + h(+)} \right) \frac{dt}{2} \\ \lambda(+) &= \lambda(-) + \left(\frac{\mathbf{v}_{\text{ab,E}}^n(-) / \cos(L(-))}{R_E(L(-)) + h(-)} + \frac{\mathbf{v}_{\text{ab,E}}^n(+) / \cos(L(+))}{R_E(L(+)) + h(+)} \right) \frac{dt}{2} \end{aligned}$$

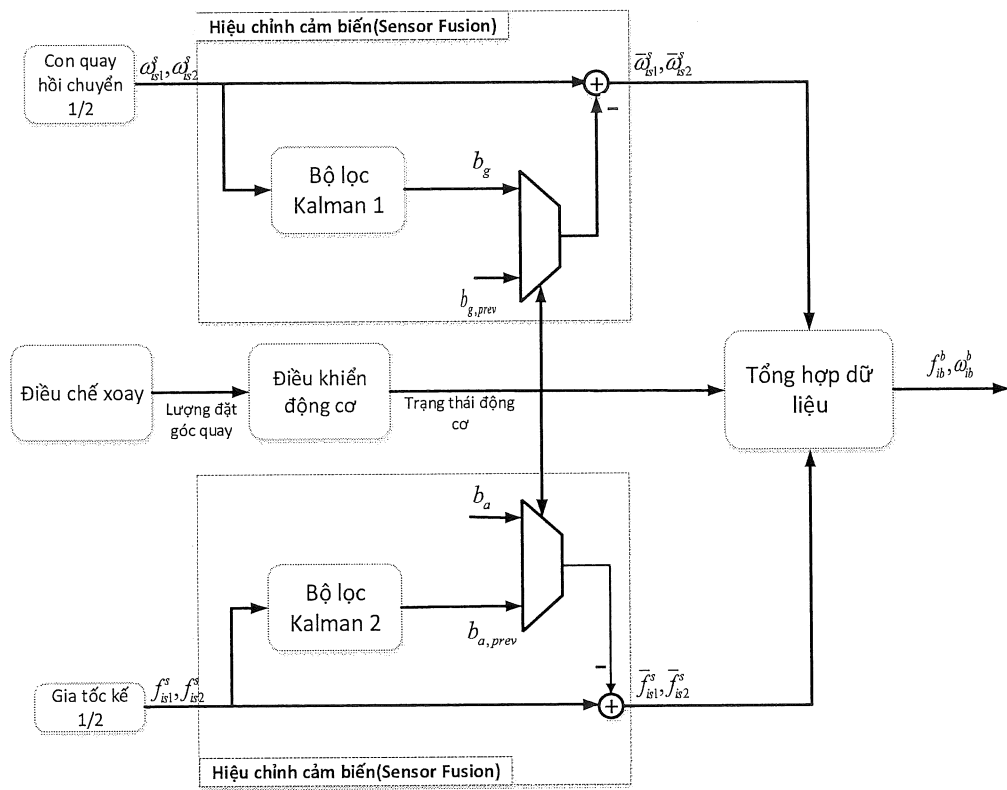
như vậy, tại mỗi thời điểm cập nhật, các giá trị góc trạng thái, vận tốc và vị trí mới của vật thể được xác định dựa trên các giá trị trả ra từ cảm biến quán tính và giá trị định vị tại lần cập nhật trước.



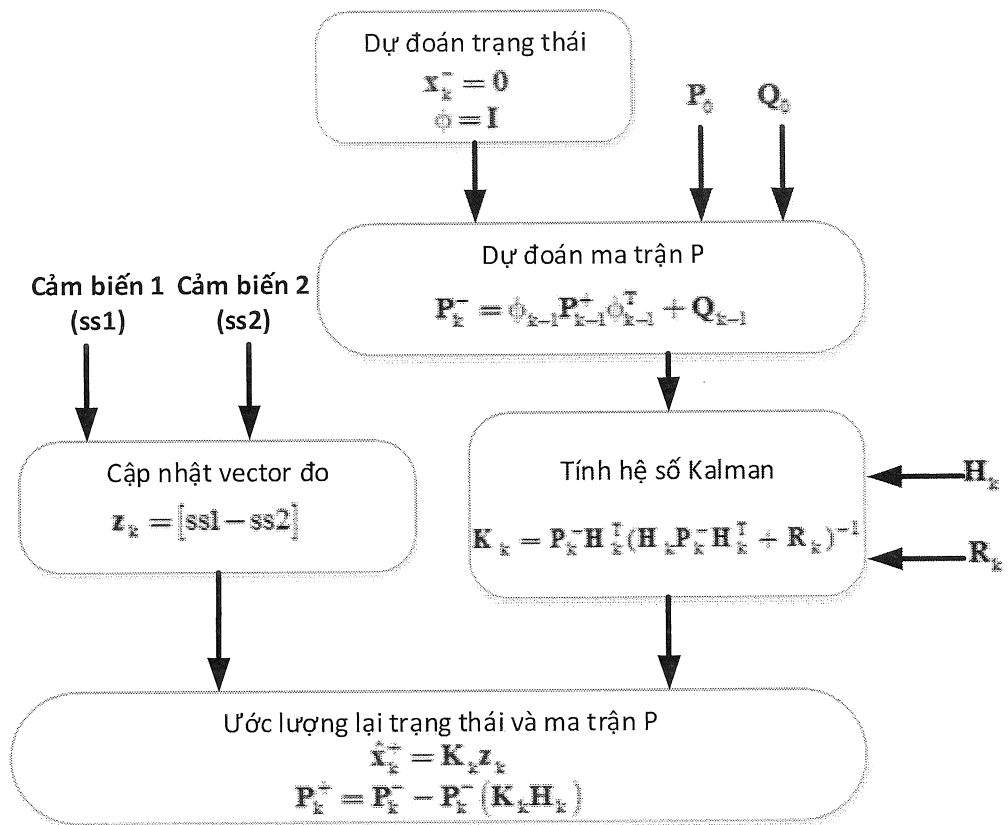
Hình 1



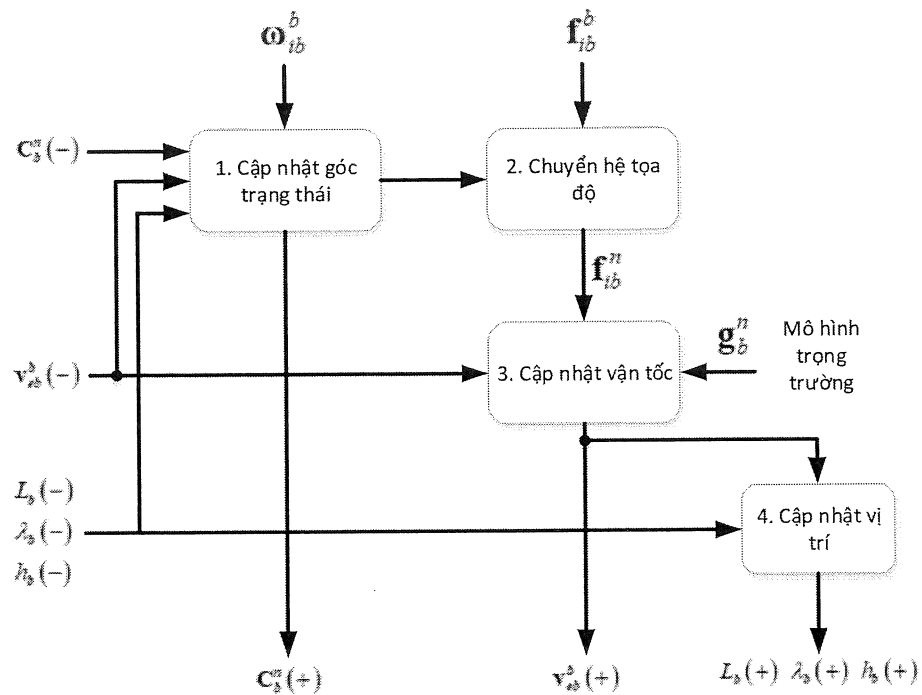
Hình 2



Hình 3



Hình 4



Hình 5