



## Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



# Ứng dụng phép lọc Kalman (EKF) trong giải bài toán định vị tuyệt đối khoảng cách giả

Nguyễn Gia Trọng \*, Phạm Ngọc Quang

Khoa Trắc địa - Bản đồ và Quản lý đất đai, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

#### Quá trình:

Nhận bài 13/12/2018  
Chấp nhận 06/02/2019  
Đăng online 28/02/2019

#### Từ khóa:

Định vị tuyệt đối  
Phép lọc Kalman  
Định vị vệ tinh  
RTCA

### TÓM TẮT

Ứng dụng trong dẫn đường và các thiết bị thông minh của mobile-mapping chiếm hơn 90% các ứng dụng sử dụng tín hiệu GNSS trên cơ sở sử dụng nguyên lý định vị tuyệt đối. Bài toán định vị tuyệt đối là một bài toán rất cơ bản trong định vị vệ tinh. Để giải bài toán này có thể sử dụng nguyên lý số bình phương nhỏ nhất hoặc phép lọc Kalman. Phương pháp số bình phương nhỏ nhất có thể phát huy được ưu điểm khi giải các bài toán của các đối tượng tĩnh (như xử lý số liệu lưới mặt đất hoặc số liệu đo tĩnh trong GNSS). Trong khi đó, bài toán định vị trong dẫn đường là một bài toán động với các yếu tố luôn thay đổi theo thời gian. Bài báo giới thiệu hệ thống công thức của phép lọc Kalman sử dụng để giải bài toán định vị tuyệt đối khoảng cách giả. Trên cơ sở hệ thống công thức đã được lựa chọn, các tác giả đã lập chương trình tính thực nghiệm giải bài toán định vị tuyệt đối với trị đo P1 đạt độ chính xác nhỏ hơn 1.5m về vị trí mặt bằng khi sử dụng lịch vệ tinh chính xác. Bên cạnh đó, tác giả cũng đã đề xuất áp dụng công thức tính trọng số bằng cách ước lượng phương sai do ảnh hưởng của các nguồn sai số đối với giá trị đo theo tiêu chuẩn của Ủy ban kỹ thuật vô tuyến cho hàng không (RTCA).

© 2019 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

## 1. Mở đầu

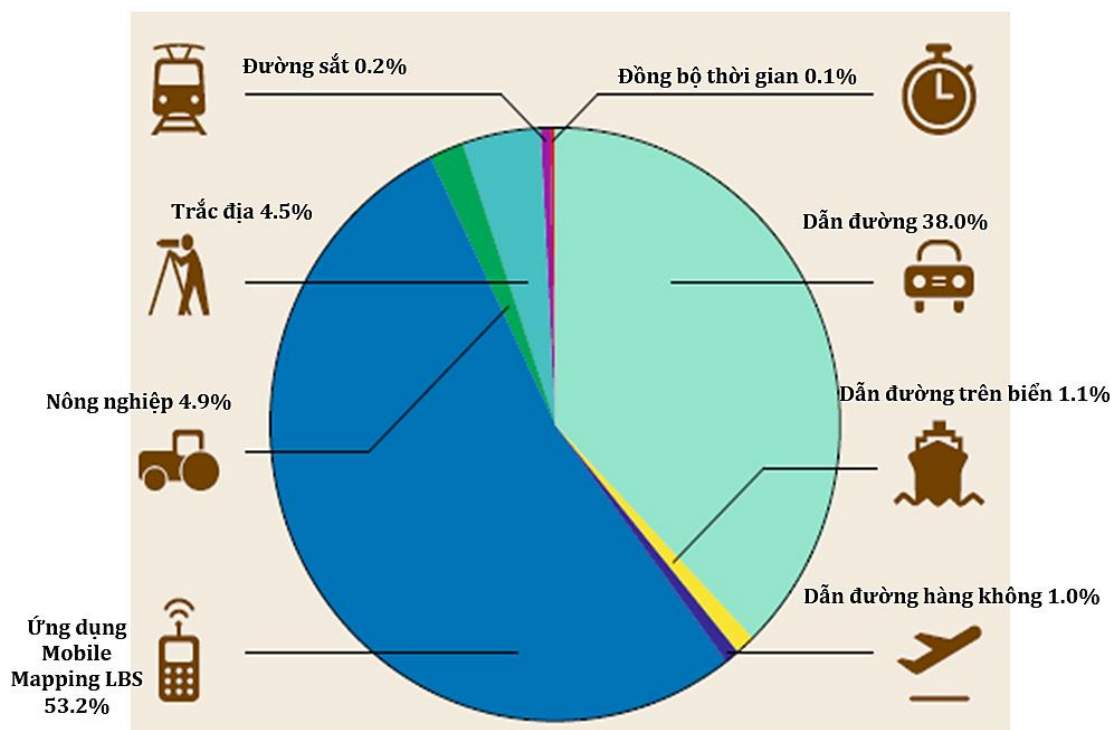
Các hệ thống vệ tinh định vị và dẫn đường toàn cầu (GNSS) đang tạo ra cuộc cách mạng trong triển khai các ứng dụng thông minh dựa trên sự kết hợp với công nghệ thông tin, công nghệ internet và các công nghệ khác. Ngoài chức năng định vị và dẫn đường, tín hiệu phát đi từ các hệ thống GNSS còn được sử dụng cho nhiều mục đích khác nhau. Hình 1 thống kê tỷ lệ sử dụng tín hiệu của GNSS phục vụ các lĩnh vực khác nhau

(Teunissen, Montenbruck, 2017).

Từ Hình 1 có thể thấy, có đến 40,3% người sử dụng GNSS phục vụ dẫn đường (đường bộ, đường sắt, đường biển và đường hàng không) và 53,2% người dùng GNSS trong ứng dụng Mobile - mapping. Với thống kê ở trên có thể thấy rằng, số lượng người dùng sử dụng phương pháp định vị tuyệt đối lớn hơn rất nhiều so với số lượng người dùng sử dụng phương pháp định vị tương đối (chủ yếu dùng trong trắc địa). Xuất phát từ yêu cầu thực tế nêu trên, nhu cầu về nâng cao độ chính xác của giải bài toán định vị tuyệt đối là rất cần thiết. Đã có rất nhiều nghiên cứu trên thế giới nhằm nâng cao độ chính xác giải bài toán định vị tuyệt đối.

\*Tác giả liên hệ

E - mail: [nguyengiatrong@humg.edu.vn](mailto:nguyengiatrong@humg.edu.vn)



Hình 1. Thống kê tỷ lệ sử dụng tín hiệu GNSS trong các lĩnh vực.

Kết quả của các nghiên cứu đó đã được triển khai áp dụng vào thực tế cho độ chính xác 1 ÷ 2 cm đối với định vị tuyệt đối chính xác xử lý sau (với số liệu đo từ 1 ÷ 2 giờ), độ chính xác cỡ 1 ÷ 2 dm đối với định vị tuyệt đối chính xác tức thời đối với máy thu hai tần số, nhỏ hơn 1 m đối với định vị tuyệt đối chính xác cho máy thu 1 tần số và đã được ứng dụng trong rất nhiều lĩnh vực khác nhau (Joan, 2012; Teunissen, Montenbruck, 2017).

Được du nhập vào Việt Nam từ những năm 1990 nhưng cho đến thời điểm hiện tại có rất ít các công bố về các giải pháp nhằm nâng cao độ chính xác giải bài toán định vị tuyệt đối nói riêng và xử lý số liệu GNSS nói chung. Mới chỉ có một số ít các công bố nhằm nâng cao độ chính xác giải bài toán định vị tuyệt đối như hiệu chỉnh đồng bộ thời gian, hiệu ứng sagnac (Đặng Nam Chinh và nnk., 2013), hiệu chỉnh ảnh hưởng của tầng điện ly, tầng đối lưu (Đặng Nam Chinh, Nguyễn Gia Trọng, 2010) và sử dụng chỉ số tình trạng vệ tinh (Nguyễn Gia Trọng, 2017)... Rất ít các công trình đã công bố về ứng dụng phép lọc Kalman khi giải bài toán định vị sử dụng trị đo GNSS và chưa có công trình nào công bố về ứng dụng phương pháp ước lượng phương sai theo tiêu chuẩn của RTCA để tính trọng số cho các trị đo khi giải các bài toán định vị GNSS động. Bài báo này giới thiệu việc ứng dụng

phép lọc Kalman cũng như phương pháp tính trọng số bằng cách ước lượng phương sai của các trị đo theo tiêu chuẩn của RTCA.

## 2. Ứng dụng phép lọc Kalman trong giải bài toán định vị tuyệt đối khoảng cách giả

Phương trình trị đo khoảng cách giả theo mã từ vệ tinh  $i$  đến máy thu được biểu diễn bởi công thức (1).

$$P^i = \rho^j + c\delta t^i - c\delta t_R + d_{ION} + d_{TROP} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Trong đó:  $\rho^j$  là khoảng cách hình học giữa vệ tinh tới máy thu;  $\delta t^i$  là sai số đồng hồ vệ tinh thứ  $i$ ;  $\delta t_R$  là sai số của đồng hồ máy thu;  $d_{ION}$  là số hiệu chỉnh vào trị đo do sai số của tầng điện ly;  $d_{TROP}$  là số hiệu chỉnh vào trị đo do sai số của tầng đối lưu;  $\varepsilon$  là ảnh hưởng của các nguồn sai số khác như độ lệch ăng ten máy thu, ăng ten vệ tinh, độ lệch do phần cứng của máy thu.

Để có thể sử dụng trị đo trong (1) vào giải bài toán định vị cần phải tính hiệu chỉnh ảnh hưởng của các nguồn sai số nêu trên.

Tại thời điểm bất kỳ, nếu máy thu quan sát được  $n$  vệ tinh sẽ lập được hệ phương trình số hiệu chỉnh theo phương pháp số bình phương nhỏ nhất như (2).

$$V = AX + L \quad ; P \quad (2)$$

$$\text{Trong đó: } V = \begin{pmatrix} v^1 \\ v^2 \\ \dots \\ v^n \end{pmatrix};$$

$$V = \begin{pmatrix} v^1 \\ v^2 \\ \dots \\ v^n \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} a_x^1 & a_y^1 & a_z^1 & -1 \\ a_x^2 & a_y^2 & a_z^2 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_x^n & a_y^n & a_z^n & -1 \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$L = \begin{pmatrix} l^1 \\ l^2 \\ \dots \\ l^n \end{pmatrix}; P = \begin{pmatrix} p^1 & & & \\ & p^2 & & \\ & & \dots & \\ & & & p^n \end{pmatrix}$$

Và giải nghiệm tương ứng công thức (4).

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (4)$$

Để có thể áp dụng phép lọc Kalman giải bài toán ở đây, phải xuất phát từ các công thức xây dựng mô hình đã biết theo công thức (5), (6).

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (5)$$

$$z_k = Hx + v \quad (6)$$

Với:  $x_k$  là véc tơ trạng thái ở thời điểm  $k$ ;  $x_{k-1}$  là véc tơ trạng thái ở thời điểm  $k - 1$ ;  $A$  là ma trận chuyển đổi trạng thái;  $u_k$  là véc tơ điều khiển hệ thống;  $B$  là ma trận điều khiển tối ưu;  $w_{k-1}$  là nhiễu của hệ thống;  $z_k$  là véc tơ trị đo;  $H$  là ma trận chuyển đổi của trị đo;  $v$  là nhiễu quan trắc (sai số của trị đo);  $P_k$  là ma trận trọng số tại thời điểm  $k$ ;  $Q$  là ma trận nhiễu của hệ thống;  $I$  là ma trận đơn vị;  $Z$  là véc tơ trị đo và  $K_k$  là ma trận tăng ích tại thời điểm  $k$ .

Tiếp đó, việc giải nghiệm sẽ được thực hiện bởi chu trình Kalman như sau:

Bước 1: Xác định các giá trị tiên nghiệm hay còn gọi là cập nhật theo thời gian như công thức (7), (8).

$$x_{\bar{k}} = Ax_{k-1} + Bu_k \quad (7)$$

$$P_{\bar{k}} = AP_{k-1}A^T + Q \quad (8)$$

Bước 2: Cập nhật (xác định nghiệm) cho thời điểm hiện tại như công thức (9), (10).

$$K_{\bar{k}} = P_{\bar{k}}H^T(HP_{\bar{k}}H^T + R)^{-1} \quad (9)$$

$$x_k = x_{\bar{k}} + K_{\bar{k}}(Z - Hx_{\bar{k}}) \quad (10)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_{\bar{k}} \quad (11)$$

Trong đó:  $R$  là ma trận sai số của trị đo được xác định như công thức (12), (13), (14).

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \sigma_n^2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$H = \begin{pmatrix} a_x^1 & a_y^1 & a_z^1 & -1 \\ a_x^2 & a_y^2 & a_z^2 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_x^n & a_y^n & a_z^n & -1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$a_x^i = -\frac{x^i - X}{\rho^i}; a_y^i = -\frac{y^i - Y}{\rho^i}; a_z^i = -\frac{z^i - Z}{\rho^i} \quad (14)$$

Trong công thức (12),  $\sigma_i^2$  là phương sai của trị đo thứ  $i$  tính được theo tiêu chuẩn của RTCA. Để tính trọng số cho các trị đo khi giải bài toán định vị GNSS, các công trình đã được công bố bởi các tác giả chỉ sử dụng phương pháp tính trọng số bằng cách sử dụng hàm đối với góc cao của vệ tinh và tham số độ chính xác của máy thu. Công thức ước lượng phương sai theo tiêu chuẩn của RTCA (dùng để tính trọng số) mà tác giả đề xuất áp dụng trong trường hợp này như sau:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{recv}^2 + \sigma_{URA}^2 + \sigma_{cor}^2 + \sigma_{trop}^2 + \sigma_{ion}^2 \quad (15)$$

Trong đó:  $\sigma_{recv}^2$  là nhiễu của máy thu ảnh hưởng đến trị đo;  $\sigma_{URA}^2$  là giá trị phương sai tính được dựa vào giá trị sai số khoảng cách đối với người sử dụng được cung cấp trong tệp lịch quảng bá;  $\sigma_{cor}^2$  là phương sai của tọa độ vệ tinh xác định được ảnh hưởng đến trị đo;  $\sigma_{trop}^2$  là phương sai được xác định theo số hiệu chỉnh do ảnh hưởng của tầng đối lưu đối với trị đo;  $\sigma_{ion}^2$  là phương sai được xác định theo số hiệu chỉnh do ảnh hưởng của tầng điện ly đối với trị đo.

### 3. Tính toán thực nghiệm

#### 3.1. Giới thiệu về số liệu thực nghiệm

Số liệu thực nghiệm được đo bằng máy thu GB-1000 của hãng Topcon (Nhật Bản), GB-1000 là loại máy thu 2 tần số, thu được tín hiệu của hai hệ thống vệ tinh là GPS và Glonass. Số liệu đo được chuyển về định dạng RINEX để chương trình có thể đọc được. Ở định dạng RINEX, trị đo thu được bởi máy thu GB-1000 là các trị đo C1, P1, P2, L1,

L2, D1 và D2.

Dữ liệu trên sau đó được xử lý bằng phần mềm Bernese phiên bản 5.0 với tọa độ của điểm sau bình sai như Bảng 1 (Nguyễn Gia Trọng, và nnk., 2009).

### 3.2. Kết quả tính thực nghiệm

Trong phần này, tiến hành giải bài toán định vị tuyệt đối khoảng cách giả theo 3 phương án:

#### - Phương án 1

Giải bài toán theo phương pháp số bình phương nhỏ nhất sử dụng trị đo P1, lịch vệ tinh quảng bá.

#### - Phương án 2

Giải bài toán theo phương pháp số bình phương nhỏ nhất sử dụng trị đo P1, lịch vệ tinh chính xác.

#### - Phương án 3

Giải bài toán áp dụng phép lọc Kalman sử dụng trị đo P1, lịch vệ tinh chính xác.

Trong các phương án trên, đã tính hiệu chỉnh ảnh hưởng của tầng đối lưu theo mô hình Saastamoinen; hiệu chỉnh ảnh hưởng của tầng điện ly theo mô hình Klobuchar; đã tính hiệu chỉnh độ lệch tâm phát tín hiệu và biến thiên tâm phát

tín hiệu vệ tinh; hiệu chỉnh độ lệch tâm pha và biến thiên tâm pha ăng ten máy thu; tính hiệu chỉnh thay đổi khoảng cách theo thời gian sử dụng các tham số quỹ đạo vệ tinh. Tính trọng số cho các trị đo bằng cách ước lượng phương sai do ảnh hưởng của các nguồn sai số đối với trị đo theo tiêu chuẩn của RTCA.

Kết quả của các phương án tính toán lần lượt được cho trong các phần sau.

#### 3.3.1. Kết quả của phương án 1

Từ các thành phần tọa độ trong Bảng 2, tính độ lệch các thành phần tọa độ của các thời điểm như trong Bảng 3.

$$dp = \sqrt{dn^2 + de^2}$$

Từ các kết quả như trong Bảng 3, tiến hành thống kê độ lệch tọa độ với kết quả trong Bảng 4.

Tiến hành các bước làm tương tự đối với phương án 2 và phương án 3.

#### 3.3.2. Kết quả của phương án 2

Từ dữ liệu và kết quả ở Bảng 5, Bảng 6, Bảng 7 trên có thể thấy, khi sử dụng lịch vệ tinh chính xác, độ chính xác giải bài toán định vị tuyệt đối cao hơn rất nhiều thể hiện qua số phần trăm độ lệch tọa độ điểm ở mức 1 và 1,5 m gấp khoảng 1,5 lần so với phương án dùng lịch vệ tinh quảng bá.

Bảng 1. Các thành phần tọa độ điểm được xác định bằng phần mềm BERNESE.

Tên điểm	Thành phần tọa độ		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Hà Nội	-1611206,0777	5731022,2975	2281407,9258
	B (0'')	L (0'')	H (m)
	21°5'48,974975''	105°42'9,618317''	-10,1855

Bảng 2. Tọa độ của điểm quan sát tại các thời điểm theo phương án 1.

TT	Thời điểm	Các thành phần tọa độ điểm (m)		
		X	Y	Z
1	0h00m00s	-1611205.617	5731023.983	2281408.120
2	0h00m30s	-1611206.033	5731025.154	2281408.740
3	0h01m00s	-1611206.691	5731026.030	2281408.973

Bảng 3. Độ lệch các thành phần tọa độ của điểm theo phương án 1.

TT	Thời điểm	Độ lệch các thành phần tọa độ (m)			
		dn	de	dp	dH
1	0h00m00s	-0.358	-0.899	0.968	1.467
2	0h00m30s	-0.226	-0.816	0.847	2.848
3	0h01m00s	-0.376	-0.420	0.563	3.884

Bảng 4. Thống kê độ lệch tọa độ điểm tính theo phương án 1.

TT	Độ lệch về mặt bằng nhỏ hơn (m)	Phần trăm độ lệch (%)
1	1	30
2	1,5	56
3	2	78
4	2,5	86
5	3	88
6	3,5	89
7	4	90
8	5	91

Bảng 5. Tọa độ của điểm quan sát tại các thời điểm theo phương án 2.

TT	Thời điểm	Các thành phần tọa độ điểm (m)		
		X	Y	Z
1	0h00m00s	-1611205.470	5731023.137	2281407.930
2	0h00m30s	-1611206.277	5731025.154	2281408.928
3	0h01m00s	-1611206.386	5731025.281	2281408.674

Bảng 6. Độ lệch các thành phần tọa độ của điểm theo phương án 2.

TT	Thời điểm	Độ lệch các thành phần tọa độ (m)			
		Dn	de	dp	dH
1	0h00m00s	-0.228	-0.812	0.843	0.602
2	0h00m30s	-0.074	-0.582	0.586	2.976
3	0h01m00s	-0.366	-0.511	0.628	3.027

Bảng 7. Thống kê độ lệch tọa độ điểm tính theo phương án 2.

TT	Độ lệch về mặt bằng nhỏ hơn (m)	Phần trăm độ lệch (%)
1	1	53
2	1,5	84
3	2	95
4	2,5	98
5	3	99
6	3,5	100

### 3.3.3. Kết quả của phương án 3

Từ dữ liệu và kết quả trong Bảng 8, 9, 10 có nhận xét như sau:

- Độ chính xác vị trí mặt bằng tăng lên rất nhiều khi sử dụng phép lọc Kalman thể hiện qua số phần trăm độ lệch tọa độ. Đặc biệt, độ lệch mặt bằng trong trường hợp này nhỏ hơn 1,5 m.

- Độ lệch độ cao trắc địa được giảm đi rất nhiều từ phương án 1 đến phương án 3 trong 3 thời điểm minh họa trong các Bảng 3, 6, 9.

## 4. Thảo luận

Bài báo đã đề xuất ứng dụng phép lọc Kalman và phương pháp tính trọng số bằng cách ước

lượng phương sai do ảnh hưởng của các nguồn sai số theo tiêu chuẩn của RTCA.

Trên cơ sở các thuật toán đã đề xuất, sử dụng ngôn ngữ lập trình Visual Studio.NET, các tác giả đã xây dựng chương trình tính thực nghiệm đã tính thực nghiệm cho số liệu đo tại một điểm tại Hà Nội. Qua kết quả tính thực nghiệm cho thấy hiệu quả của thuật toán mà các tác giả đã đề xuất áp dụng.

Để nâng cao hơn nữa độ chính xác giải bài toán định vị tuyệt đối, trong thời gian tới cần tiếp tục nghiên cứu sử dụng trị đo pha sóng tải vào định vị tuyệt đối, giải bài toán PPP và giải bài toán định vị tuyệt đối có sử dụng kết hợp tín hiệu của các hệ thống vệ tinh khác nhau.

Bảng 8. Tọa độ của điểm quan sát tại các thời điểm theo phương án 3.

TT	Thời điểm	Các thành phần tọa độ điểm (m)		
		X	Y	Z
1	0h00m00s	-1611205.480	5731023.268	2281407.917
2	0h00m30s	-1611205.239	5731023.509	2281408.158
3	0h01m00s	-1611205.411	5731023.337	2281407.986

Bảng 9. Độ lệch các thành phần tọa độ của điểm theo phương án 3.

TT	Thời điểm	Độ lệch các thành phần tọa độ (m)			
		dn	de	dp	dH
1	0h00m00s	-0.287	-0.838	0.886	0.718
2	0h00m30s	-0.122	-1.135	1.142	0.960
3	0h01m00s	-0.239	-0.923	0.954	0.787

Bảng 10. Thống kê độ lệch tọa độ điểm tính theo phương án 3.

TT	Độ lệch về mặt bằng nhỏ hơn	Phần trăm độ lệch
1	1 m	86
2	1,5 m	100

**Tài liệu tham khảo**

Đặng Nam Chinh, Đỗ Ngọc Đường, 2012. Định vị vệ tinh. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật. Hà Nội.

Đặng Nam Chinh, Konexana, Y., Khương Văn Long, 2013. Xác định số hiệu chỉnh đồng bộ thời gian vào khoảng cách giả dựa trên các tham số quỹ đạo và vị trí gần đúng của anten máy thu. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất* 41 (01/2013). 7-10.

Đặng Nam Chinh, Nguyễn Gia Trọng, 2010. Ảnh hưởng khúc xạ tầng đối lưu đến kết quả định vị tuyệt đối bằng khoảng cách giả. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất*. 53 - 57.

Eugenio, R., Stefano, C., Lisa, P., Daniele, S., 2017. Precise GNSS Positioning Using Smart Devices. *Sensors Journal*.

Joan, P., Ramalho, M., 2012. Kinematic GNSS Precise Point Positioning: Application to marine platforms. PhD thesis in Surveying Engineering. Faculty of Sciences, University of Porto.

Nguyễn Gia Trọng, 2017. Một số giải pháp nâng cao độ chính xác giải bài toán định vị tuyệt đối thông thường (SPP). *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất* 58(1). 92 - 98.

Nguyễn Gia Trọng, Nguyễn Việt Nghĩa, Võ Ngọc Dũng, 2009. Đánh giá độ chính xác xác định cạnh dài sử dụng phần mềm GPSurvey 2.35 và Bernese 5.0 dựa vào số liệu của IGS. *Tuyển tập Báo cáo tổng kết khoa học kỷ niệm 50 năm ngày thành lập ngành đo đạc bản đồ Việt Nam*. 119 - 125.

Teunissen, M., (ed), 2017. Handbook of Global navigation satellite systems. *Springer*.

## ABSTRACT

### Utilizing Kalman(EKF) filter to resolve the single point positioning problem using code pseudo-range

Trong Gia Nguyen, Quang Ngoc Pham

*Faculty of Geomatics and Land Administration, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam*

Currently, more than 90% of navigation and mobile mapping applications uses GNSS signal based on the single point positioning principle. It is also a basic problem of satellite positioning. To solve it, we can use the least square principle or Kalman filter method. Least square is a method which has advantages in solving the static objectives problem (such as adjusting the traditional ground network or GNSS geodetic network). Nevertheless, navigation is a kinematic problem with many components which always change over time. This paper introduces the algorithm of Kalman filter which is used to solve the absolute positioning problem using code pseudo-range. Based on the selected formulation system, the authors programmed a computer module to solve the single point positioning problem. The experimental results depict that this computer module can obtain the horizontal accuracy less than 1.5m in case of combining P1 observations and satellite precise ephemeris. In addition, the authors proposed the use of formula to compute weighting of observations by estimating variance due to the influence of error sources on observations, according to the criterias of the Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA).