



Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội:
Các Khoa học Trái đất và Môi trường

Website: <https://js.vnu.edu.vn/EES>



Áp dụng bộ lọc Kalman để nâng cao độ chính xác đo GPS động

Đinh Xuân Vinh*

Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội, 41A Phú Diễn, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 05 tháng 4 năm 2018

Chỉnh sửa ngày 30 tháng 5 năm 2018; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 5 năm 2018

Tóm tắt: Bài báo thảo luận về ứng dụng bộ lọc Kalman cho những chuyển động ngẫu nhiên theo thời gian của vị trí điểm thu GPS. Chuyển động của máy thu GPS là một mô hình trạng thái không gian với thời gian biến động. Mô hình trạng thái không gian thường được biểu diễn bởi phương trình vi phân tuyến tính kèm nhiễu trắng. Khi trạng thái không gian biến động theo thời gian, nó được biểu diễn bởi các phương trình Riccati, tức là các phương trình vi phân phi tuyến. Nghiên cứu này đề xuất bộ lọc Kalman mở rộng các tham số phù hợp với điều kiện đo đạc thành lập bản đồ tỷ lệ lớn tại Việt Nam hiện nay. Tọa độ điểm thu GPS di động theo thời gian được so sánh với giá trị tọa độ trong một ca đo tĩnh trước đó với độ chính xác cao, khẳng định bộ lọc Kalman mở rộng các tham số phù hợp có thể ước lượng tối ưu vị trí điểm GPS di động. Từ đó giảm chi phí đầu tư và tăng hiệu quả sử dụng thiết bị thu GPS thông dụng.

Từ khóa: Lọc Kalman, GPS động.

1. Tổng quan các kết quả nghiên cứu về lọc Kalman

Phương pháp đầu tiên định hình ước lượng tối ưu từ dữ liệu có nhiễu là phương pháp bình phương nhỏ nhất. Khảo sát thuộc tính chung của nó là Carl Friedrich Gauss (1777–1855) vào năm 1795, còn tính chất chắc chắn của trị đo có chứa sai số được xác nhận bởi Galileo Galilei (1564–1642). Hầu hết những vấn đề ước lượng tuyến tính thì được sử dụng thường xuyên, nhưng Gauss là người đầu tiên sử dụng bài toán ước lượng phi tuyến trong toán thiên văn

học. Một trang quan trọng trong lý thuyết xác suất và lý thuyết về quy trình ngẫu nhiên ở thế kỷ hai mươi được đánh dấu bởi tên của viện sĩ hàn lâm Nga Andrei Nikolaievich Kolmogorov (1903–1987). Tiếp theo là Norbert Wiener (1894–1964), ông đã sáng tạo ra lý thuyết dự báo, làm mềm và lọc theo quy trình Markov. Đó là lý thuyết đầu tiên về ước lượng tối ưu hệ thống quy trình ngẫu nhiên. Mô hình Wiener–Kolmogorov sử dụng mật độ phổ năng lượng (the power spectral density-PSD) trong phạm vi tần số để mô tả thuộc tính thống kê của tiến trình động (dynamic). Ước lượng tối ưu Wiener–Kolmogorov xuất phát từ PSD để ước lượng trị đo bên ngoài hệ thống. Mô hình tiến trình động thừa nhận thời gian là bất biến.

* ĐT.: 84-904569982.

Email: dxvinh@hnmre.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4241>

Richard S. Bucy là người đã nghiên cứu các phương trình vi phân phi tuyến, cũng trong tư như những nghiên cứu của Jacopo Francesco Riccati (1676–1754), đến nay còn gọi là “phương trình Riccati”. Trong tự nhiên thì mối liên hệ giữa phương trình tích phân và phương trình vi phân bao giờ cũng bắt đầu với thời gian. Một trong những đặc biệt của lý thuyết Kalman và Bucy, đó là thời đoạn (chu kỳ) được chứng minh thông qua phương trình Riccati. Đó là lời giải đáng tin cậy thậm chí nếu hệ thống động là không ổn định. Năm 1960, R.Kalman xuất bản bài báo nổi tiếng nhan đề “A new approach to linear filtering and prediction problems” trong tạp chí Journal of Basic Engineering số 82, trang 34 đến 45. Năm 1961, R.Kalman và R.Bucy xuất bản bài báo “New results in linear filtering and prediction theory” trong tạp chí cùng tên số 85, trang 95 đến 108. Ý tưởng của lọc Kalman được ứng dụng sớm nhất khi ông đến thăm người bạn Stanley F. Schmidt tại Trung tâm nghiên cứu Ames của NASA ở Mountain View, California. Đó là vấn đề ước lượng quỹ đạo và vấn đề điều khiển học của dự án APOLO, đưa tàu vũ trụ lên Mặt trăng và đưa nó quay trở lại Trái đất. Schmidt đã bỏ sung đầy đủ vào lọc Kalman cho các ứng dụng phi tuyến và gọi đó là lọc Kalman mở rộng.

Lọc Kalman [1] đã được nhiều nhà khoa học Việt Nam và thế giới nghiên cứu ứng dụng [2]. Nhiều tài liệu [3, 4] đã giới thiệu các ứng dụng của bộ lọc. Trong thực tế, công thức lọc Kalman được nhiều nhà khoa học diễn giải theo cách hiểu của mình, như Simon Haykin, 2001, Greg Welch và Gary Bishop, 2001, R. L. Eubank, 2006, Howard Musoff, 2005, Mohinder S. Grew và Angus P. Andrews, 2008. Do vậy, ứng dụng lọc Kalman là xây dựng những phương trình cụ thể cho từng đối tượng cụ thể. Việc sử dụng chung các diễn giải khoa học là không phù hợp. Lọc Kalman hiện nay được nghiên cứu rất nhiều trên thế giới, cụ thể hóa cho từng dự án, từng khu vực và thời gian khác nhau. Lĩnh vực trắc địa bản đồ ứng dụng lọc Kalman có thể xử lý dữ liệu đo đạc, bởi vì tất cả các trị đo đều tồn tại nhiều mà chúng ta quen gọi là hàm chứa sai số. Liên quan

tới tăng cường độ chính xác định vị điểm máy thu tín hiệu GPS, nhiều nhà khoa học thế giới đã công bố các nghiên cứu (M. Elizabeth Cannon, 1990, Antti Lange, 2003, Heiner Kuhlmann, 2008, Simon Haykin, 2001, Cankut D. Ince và Muhammed Sahin, 2000).

Phương trình hệ thống lọc Kalman rời rạc là một ước lượng trạng thái $x \in R^n$ theo một quy trình bị chi phối bởi phương trình vi phân tuyến tính ngẫu nhiên sau

$$x_k = Fx_{k-1} + Gu_{k-1} + w_{k-1} \quad (1)$$

Và trị đo $z \in R^m$ tuân theo phương trình sau

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2)$$

trong đó: x_k là vector chỉ trạng thái hệ thống; ma trận F kích thước $(n \times n)$ trong phương trình vi phân là ma trận hệ số của ẩn tại trạng thái trước đó $(k-1)$ so với trạng thái hiện thời k . Ma trận G là ma trận hệ số đầu vào điều chỉnh tùy ý của ẩn $u \in R^l$ liên hệ với trạng thái của ẩn x , trong trắc địa thì nó biểu thị các nguyên nhân gây nên biến đổi hệ thống, ảnh hưởng tới quy trình ngẫu nhiên của hệ thống. Ma trận H kích thước $(m \times n)$ trong phương trình trị đo là ma trận hệ số của trị đo z_k , w_{k-1} là nhiễu trắng hệ thống và nó được biểu diễn như một vector; v_k là nhiễu trắng trị đo được biểu diễn dưới dạng vector. Chỉ số k chỉ thời điểm của hệ thống và $k-1$ là thời điểm trước đó.

Phương trình (1) phù hợp với mô hình vận động (Dynamic) và không thể tìm thấy trong mô hình động (Kinematic) thành phần Gu_{k-1} vì không có nguyên nhân biến đổi vận tốc nào được tính đến trong mô hình. Cũng không thể tìm thấy trong mô hình tĩnh thành phần Fx_{k-1} vì vật thể phản ứng ngay tức thì với những thay đổi đầu vào. Trong mô hình đồng nhất không có nguyên nhân gây biến động, nên ma trận hệ thống được xác định là ma trận đơn vị. Vector trạng thái tự nhiên của x_k lẽ dĩ nhiên là biến không đo được, còn z_k là giá trị đo được. Biến ngẫu nhiên w_{k-1} và v_k biểu diễn nhiễu hệ thống và nhiễu trị đo, chúng được giả thiết là độc lập với nhau, là nhiễu trắng và tuân theo phân phối chuẩn, nghĩa là

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (3)$$

$$p(v) \sim N(0, R) \tag{4}$$

Ta có ma trận nhiễu hệ thống Q liên quan tới vector nhiễu hệ thống theo

$$Q = E[ww^T] \tag{5}$$

Ma trận nhiễu trị đo R có liên hệ với vector nhiễu trị đo v theo

$$R = E[vv^T] \tag{6}$$

Nếu chúng ta mang những trị đo với chu kỳ T_s để đưa vào phép lọc, thì việc đầu tiên là ta phải tìm được ma trận cơ sở ϕ . Ma trận cơ sở của hệ thời gian bất biến có thể tìm được từ ma trận hệ thống động [5, 6] như sau:

$$\Phi(t) = \mathcal{L}^{-1}[(sI - F)^{-1}] \tag{7}$$

ở đây, I là ma trận đơn vị, \mathcal{L}^{-1} là biến đổi Laplace nghịch đảo, F là ma trận hệ thống động.

Có thể chứng minh được các phương trình Riccati biểu diễn Hiệp phương sai tiên nghiệm, Hiệp phương sai hậu nghiệm và giá trị Hiệu ích của các bước lọc Kalman. Phương trình Riccati [3] thể hiện Hiệu ích của bộ lọc như sau:

$$M_k = \Phi_k P_{k-1} \Phi_k^T + Q_k \tag{8}$$

$$K_k = M_k H^T (H M_k H^T + R_k)^{-1} \tag{9}$$

$$P_k = (I - K_k H) M_k \tag{10}$$

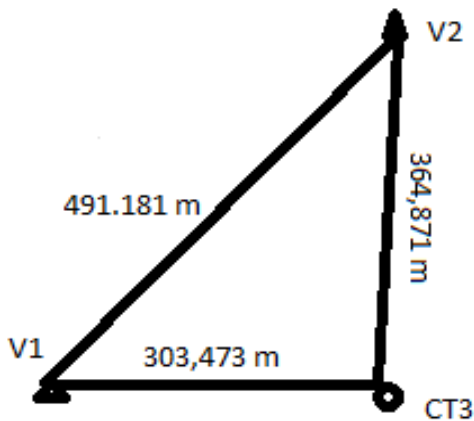
ở đây, P_k là ma trận hiệp phương sai mô tả sai số trong ước lượng trạng thái sau khi cập nhật; M_k là ma trận hiệp phương sai mô tả sai số trong ước lượng trạng thái trước khi cập nhật. Ma trận nhiễu rời rạc Q_k có thể tìm được từ ma trận nhiễu liên tục Q và ma trận cơ sở theo

$$Q_k = \int_0^{T_s} \Phi(\tau) Q \Phi^T(\tau) d\tau \tag{11}$$

Để bắt đầu phương trình Riccati, ta cần ma trận hiệp phương sai ban đầu P_0 .

2. Mô hình và phương pháp áp dụng

Thực nghiệm thứ nhất, nghiên cứu khảo sát trên khu đô thị Văn Quán, Hà Đông, Hà Nội ngày 31 tháng 10 năm 2009 với 3 máy thu GPS loại TRIMBLE 4000 SSI, anten TRM 39105.00 Compact L1/L2 WGP tạo thành một tam giác (Hình 1). Tại điểm CT3, số hiệu máy thu: 21000, số hiệu anten: 104873. Tại điểm V1, số hiệu máy thu: 21001, số hiệu anten: 104874. Tại điểm V2, số hiệu máy thu: 21002, số hiệu anten: 104875. Đặt góc chân trời 10^0 vì máy thu đặt trên mái bằng tòa nhà CT3 cao 21 tầng, tần số lấy mẫu 15 giây.



Hình 1. Sơ đồ điểm thu GPS tại Văn Quán.



Hình 2. Hệ thống dịch chuyển anten tại CT3.

Tọa độ hai điểm V1 và V2 tạo thành cạnh đáy cố định. Điểm CT3 được coi là điểm di động phục vụ kiểm định thuật toán lọc Kalman. Tam giác được khởi tạo luôn có cạnh đáy ổn định với một đỉnh di động theo tần số thu tín hiệu GPS. Thời gian thực nghiệm kéo dài 60 phút. Bắt đầu từ 7 giờ 10 phút kết thúc lúc 8 giờ 30 phút giờ Hà Nội. Trong 20 phút đầu, anten máy thu ở trạng thái ổn định. Trong 40 phút tiếp theo, anten máy thu được dịch chuyển từng bước về phía bắc (trục tọa độ X), mỗi bước dài 4 mm trên tổng quãng đường 80 mm, thời gian mỗi bước dịch chuyển cách nhau 2 phút (hình 2), khoảng thời gian dịch chuyển khoảng 1 giây và không ảnh hưởng tới kết quả ước lượng. Ca

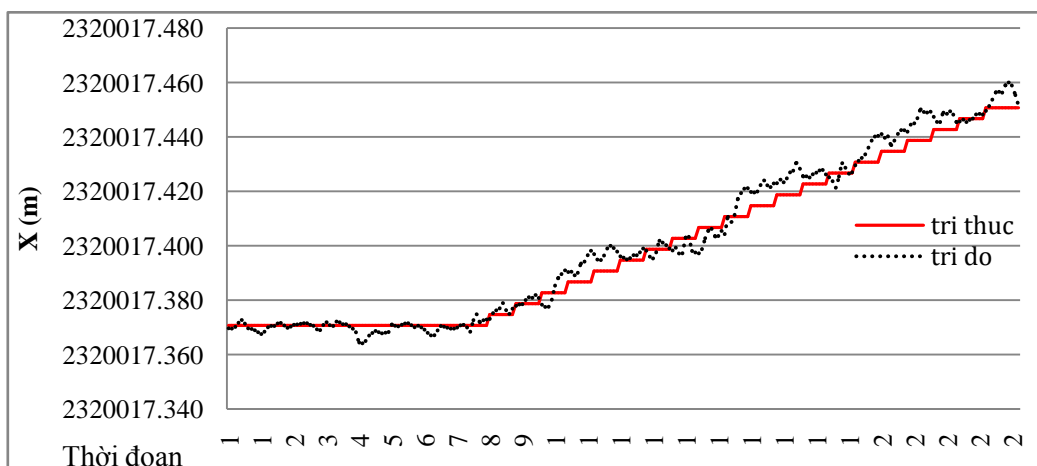
đo có 243 trị đo được thống kê một phần trong bảng 1.

Quá trình vận động của thực nghiệm Văn Quán được biểu diễn trong Hình 3 với mô hình trị đo và trị thực được trích xuất trong phần mềm GPSurvey 2.35 (lưu ý năm 2009 phần mềm này vẫn hiệu dụng).

Cần biết rằng, vị trí máy thu CT3 đặt trên mái nhà bằng phẳng cao 21 tầng, khả năng nhận tín hiệu vệ tinh là rất tốt, máy thu Trimble 4000SSi chuyên dụng đo chuyển dịch địa động thể hiện trên kết quả đo và trị thực chênh lệch rất nhỏ sau khi xử lý bằng GPSurvey 2.35 (khoảng 10 mm).

Bảng 1. Số liệu đo Văn Quán (hệ tọa độ VN2000) trích xuất GPSurvey 2.35

No STT	Thời gian	Điểm thu CT3		Điểm thu V 1	
		X (m) vn2000	Y (m) vn2000	X (m) vn2000	Y (m) vn2000
1	0:20:00	2320017.3697	582070.7406	2320009.4713	581775.7188
2	0:20:15	2320017.3696	582070.7396	2320009.4701	581775.7192
3	0'20"30	2320017.3701	582070.7387	2320009.4697	581775.7182
4	0'20"45	2320017.3717	582070.7376	2320009.4714	581775.7165
5	0'21"00	2320017.3727	582070.7381	2320009.4722	581775.7173
6	0'21"15	2320017.3714	582070.7375	2320009.4711	581775.7181
7	0'21"30	2320017.3697	582070.7372	2320009.4695	581775.7182
8	0'21"45	2320017.3694	582070.7373	2320009.4687	581775.7178
9	0'22"00	2320017.3689	582070.7364	2320009.4696	581775.7163



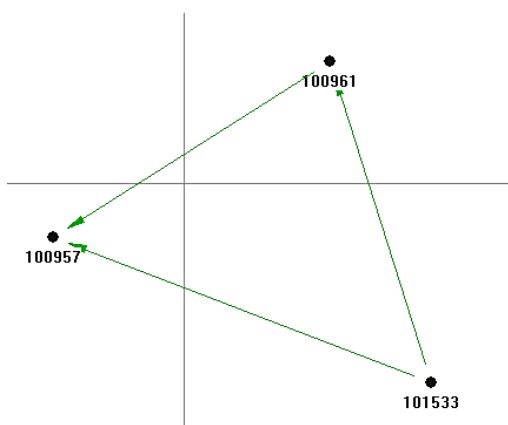
Hình 3. Biểu diễn quá trình thực nghiệm với trị đo và trị thực tại Văn Quán.

Thực nghiệm thứ hai, mục tiêu áp dụng phương pháp xử lý sau trong công tác thu tín hiệu GPS động với loại máy thu GPS thông dụng, nhưng có thể cho ta chất lượng vị trí điểm đạt độ chính xác cỡ xen ti mét, phù hợp yêu cầu xây dựng lưới khống chế đo vẽ tỷ lệ lớn, hoặc đo vẽ chi tiết thành lập bản đồ tỷ lệ 1:500. Nghiên cứu được tiến hành một cách cẩn thận công tác thu tín hiệu GPS tại khu vực trường Đại học Tài Nguyên và Môi trường Hà nội, ngày 07 tháng 9 năm 2017. Thiết bị thu tín hiệu GPS gồm 3 máy thu loại tín hiệu một tần số X20 của hãng Huace – Trung quốc, số hiệu các máy là: 100957, 100961 và 101533. Loại máy X20 tương đối cũ, chỉ thu được duy nhất tín hiệu GPS khoảng cách giả và GPS pha sóng tải, không thu được tín hiệu Glonass và Beidou. Đặt góc chân trời 15° , tần số lấy mẫu 5 giây. Tọa độ hai điểm máy 957 và 533 tạo thành cạnh đáy cố định. Điểm máy 961 được coi là điểm di động phục vụ kiểm định thuật toán lọc Kalman. Tam giác được khởi tạo luôn có cạnh đáy ổn định với một đỉnh di động theo tần số thu tín hiệu GPS.

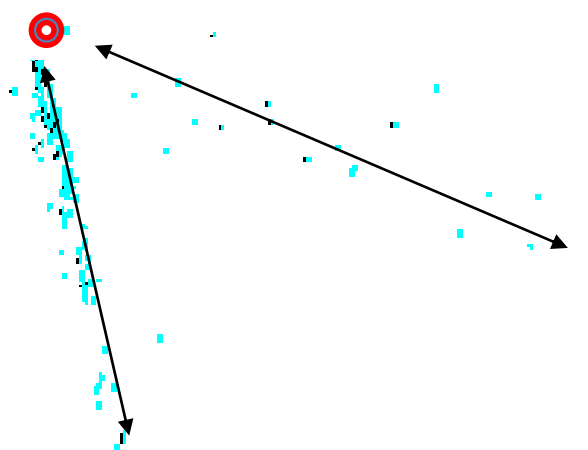
Thực nghiệm kéo dài 75 phút, bắt đầu lúc 10 giờ 20 phút, giờ Hà nội, kết thúc lúc 11 giờ 38 phút. Trong 50 phút đầu tiên, ba máy thu ở chế độ Tương đối – tĩnh, tọa độ nhận được sau xử lý có độ chính xác từ 1 đến 3 mm và có thể

coi là chuẩn để so sánh với phương pháp đo động. Khoảng 25 phút cuối, máy số 100961 di động theo hai hướng gần vuông góc nhau. Đó là do máy 100961 đặt ở ngã ba đường. Quá trình đo động máy di chuyển theo hai con phố khoảng 18 phút, sau đó đặt trở lại máy vào chân ba chạc vẫn giữ nguyên trên mốc khoảng 7 phút, và kết thúc ca đo. Lưu ý khoảng thời gian 7 phút này đang ở chế độ đo động, nhằm kiểm chứng các tham số của bộ lọc Kalman. Đặc thù phố nhỏ, bề ngang phố khoảng 5 mét. Một con phố có nhiều cây to hai vệ đường, dẫn tới tín hiệu GPS bị mất trong vài phút. Điều kiện vệ tinh và chất lượng máy thu rất khiêm tốn. Hầu hết thời gian đo chỉ thu được tín hiệu 5 vệ tinh. Đây gần như là giới hạn cuối của chất lượng ca đo [7]. Đối với ca đo tĩnh thì vừa đủ chất lượng, nhưng với ca đo động thì chất lượng tín hiệu rất tồi. Hình 6 trích xuất từ phần mềm Compass Post Process cho thấy máy thu 100961 trong thực nghiệm HUNRE chỉ nhận được tín hiệu rõ ràng của vệ tinh số 17, 6 và 28 (theo thời gian xuất hiện). Các vệ tinh số 30, 19, 2, 3, 9, 12, 5 (theo thời gian xuất hiện) có tín hiệu yếu và ngắt quãng.

Khoảng cách giữa các điểm trắc địa khá gần nhau, từ 229 mét đến 280 mét và phân bố như hình 4. Hình 5 là tập trị đo và hướng di chuyển của máy 100961.



Hình 4. Sơ đồ điểm thu GPS.



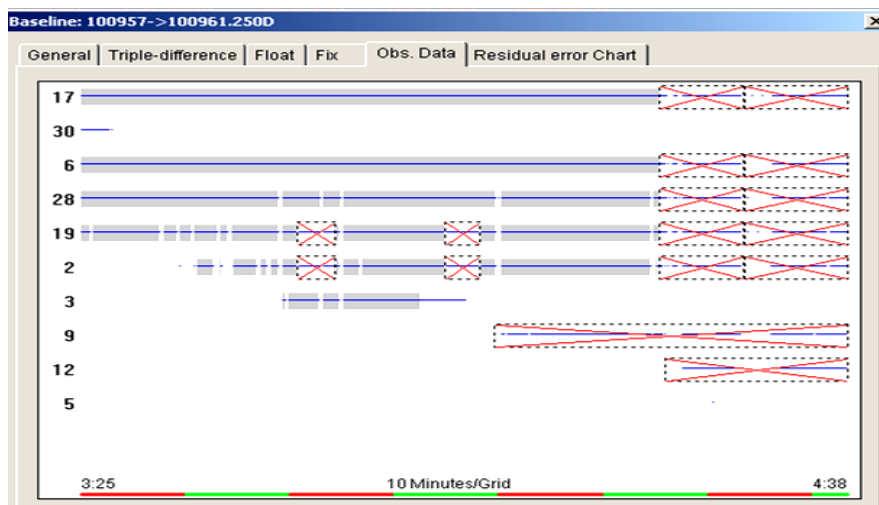
Hình 5. Tập trị đo và hướng di chuyển máy 100961.

Áp dụng phần mềm RTKLIB [8] tính giá trị tọa độ (X, Y, Z) trong hệ tọa độ WGS 84, có thể chuyển sang hệ VN2000 cho từng chu kỳ đo tương ứng. Mỗi chu kỳ đo được cài đặt trong máy thu GPS là 5", tương ứng với một trị tọa độ vị trí điểm máy thu. Tổng số 250 trị đo được thống kê một phần ở Bảng 2.

Xử lý dữ liệu đo bằng phần mềm Compass kèm theo máy. Số liệu đo Tương đối - tĩnh đạt kết quả tốt. Sai số vị trí điểm thu có độ chính xác ± 3 mm. Lý do là khoảng cách giữa các điểm khá gần nhau (chưa đến 300 mét). Có 249 trị đo động thời gian từ 4:15:00 GPST đến 4:38:15 GPST. Khoảng thời gian từ 4:28:20 GPST đến 4:30:55 GPST máy thu mất tín hiệu do di chuyển trên con phố nhỏ, có nhiều cây xanh ven đường.

Bảng 2. Một phần số liệu đo tại HUNRE (hệ tọa độ WGS 84) trích xuất RTKLIB

Thời gian	GPST	x-ecef(m)	y-ecef(m)	z-ecef(m)	Q	ns	sdx(m)	sdy(m)	sdz(m)	sdx(y(m)	sdz(y(m)	sdzx(m)	age(s)	ratio
07/09/2017	04:15:00	-1617958,7940	5731144,3388	2276355,9307	2	5	1,4031	5,9260	1,5439	-2,6521	2,8410	-1,2986	0.00	0.0
07/09/2017	04:15:05	-1617959,8466	5731145,8137	2276356,4557	2	5	0,9989	4,2176	1,0969	-1,8885	2,0204	-0,9240	0.00	0.0
07/09/2017	04:15:10	-1617960,6835	5731149,0690	2276357,2457	2	5	0,8184	3,4564	0,8975	-1,5480	1,6546	-0,7568	0.00	2.1
07/09/2017	04:15:15	-1617960,3875	5731148,4627	2276356,9508	2	5	0,7105	3,0018	0,7783	-1,3446	1,4360	-0,6569	0.00	1.4
07/09/2017	04:15:20	-1617959,7839	5731145,7973	2276356,2282	2	5	0,6367	2,6912	0,6967	-1,2056	1,2866	-0,5886	0.00	1.3
07/09/2017	04:15:25	-1617959,5958	5731146,9023	2276356,2593	2	5	0,5822	2,4616	0,6364	-1,1028	1,1761	-0,5381	0.00	1.8
07/09/2017	04:15:30	-1617959,4623	5731147,0736	2276356,5076	2	5	0,5397	2,2828	0,5894	-1,0227	1,0900	-0,4987	0.00	2.3



Hình 6. Biểu đồ vệ tinh trong thực nghiệm HUNRE.

3. Xử lý số liệu với lọc Kalman mở rộng tham số

Lọc Kalman được triển khai theo phương pháp sử dụng tích phân Euler và phương pháp Bình phương nhỏ nhất. Các phương trình Riccati nhằm giải quyết vấn đề phi tuyến, nâng

cao hiệu suất của bộ lọc và tối ưu hóa sau mỗi bước lọc được triển khai dưới dạng đa thức. Do vậy, lọc Kalman cũng được triển khai ở dạng đa thức. Áp dụng các kết quả từ Các bảng và công thức toán học chuẩn [6], Kỹ thuật làm trơn liên tục và dự báo [9], chúng tôi thực hiện lọc Kalman theo các bậc đa thức.

Đối với bậc 0, ta có phương trình ma trận cơ sở ban đầu như sau:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k(z_k - \hat{x}_{k-1}). \quad (12)$$

Ký hiệu: \hat{x}_k ước lượng Kalman tại thời đoạn k; \hat{x}_{k-1} ước lượng Kalman thời đoạn k-1; K_{1k} hiệu ích của ước lượng Kalman bậc 0

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{\dot{x}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-1} \\ \hat{\dot{x}}_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{1k} \\ K_{2k} \end{bmatrix} \left[z_k - \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-1} \\ \hat{\dot{x}}_{k-1} \end{bmatrix} \right]. \quad (13)$$

Ký hiệu: T_s tần số đo (khoảng cách giữa các thời đoạn); K_{1k} hiệu ích Kalman đối với vị trí điểm; K_{2k} hiệu ích Kalman đối với vận tốc chuyển động của điểm; \hat{x}_k ước lượng vận tốc điểm Kalman tại thời đoạn k; $\hat{\dot{x}}_k$ ước lượng gia tốc điểm Kalman tại thời đoạn k; \hat{x}_{k-1} ước lượng vận tốc của điểm tại thời đoạn k-1.

Độ lệch của lọc bậc 1 được định nghĩa:

$$Res_k = z_k - \hat{x}_{k-1} - T_s \hat{\dot{x}}_{k-1}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{\dot{x}}_k \\ \hat{\ddot{x}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0.5 T_s^2 \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-1} \\ \hat{\dot{x}}_{k-1} \\ \hat{\ddot{x}}_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{1k} \\ K_{2k} \\ K_{3k} \end{bmatrix} \left[z_k - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0.5 T_s^2 \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-1} \\ \hat{\dot{x}}_{k-1} \\ \hat{\ddot{x}}_{k-1} \end{bmatrix} \right] \quad (14)$$

Ký hiệu: $\hat{\ddot{x}}_k$ ước lượng gia tốc điểm Kalman tại thời đoạn k; $\hat{\dot{x}}_{k-1}$ ước lượng gia tốc của điểm tại thời đoạn k-1; K_{3k} hiệu ích Kalman đối với gia tốc chuyển động của điểm.

Độ lệch của lọc bậc 2 được định nghĩa:

$$Res_k = z_k - \hat{x}_{k-1} - T_s \hat{\dot{x}}_{k-1} - 0.5 T_s^2 \hat{\ddot{x}}_{k-1} \quad (15)$$

Hiệu ích của lọc Kalman bậc 2 được tính:

$$K_{1k} = \frac{3(3k^2 - 3k + 2)}{k(k+1)(k+2)}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (16)$$

$$K_{2k} = \frac{18(2k-1)}{k(k+1)(k+2)T_s}, \quad (17)$$

$$K_{3k} = \frac{60}{k(k+1)(k+2)T_s^2}, \quad (18)$$

Ma trận hiệp phương sai ban đầu P_0 được ước lượng tuần tự theo bước lọc. Chỉ cần thông

(trạng thái 1) tại thời đoạn k; z_k trị đo tại thời đoạn k.

Độ lệch của lọc bậc 0 được định nghĩa:

$$Res_k = z_k - \hat{x}_{k-1}$$

Lọc bậc 1 kèm theo vận tốc có dạng như sau:

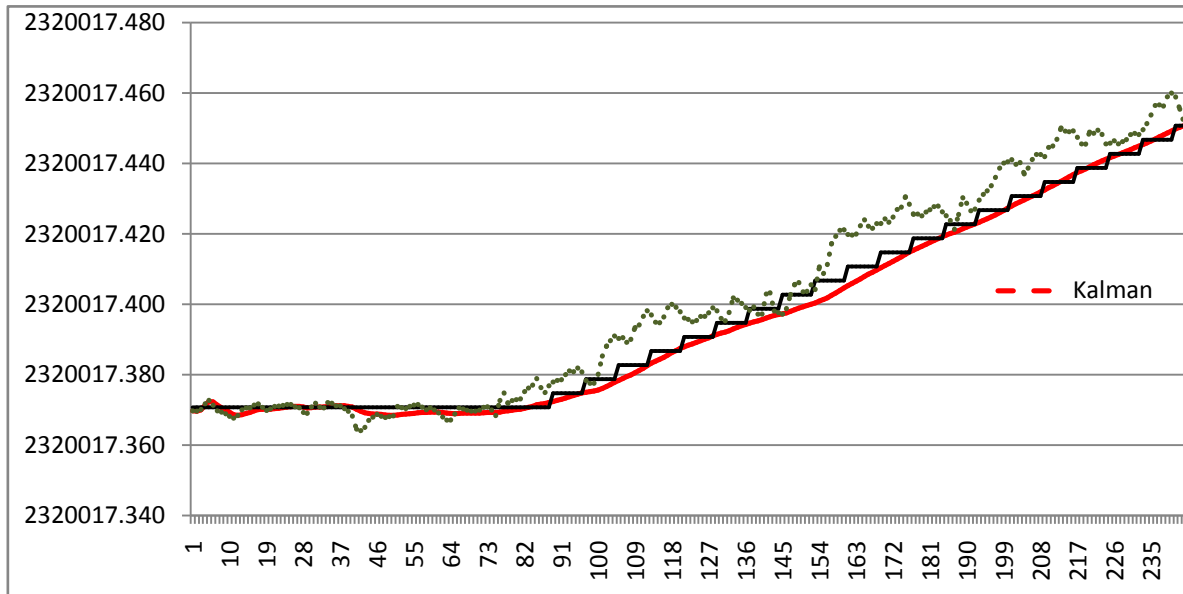
Hiệu ích của lọc Kalman bậc 1 được tính theo phương pháp bình phương nhỏ nhất đệ quy:

$$K_{1k} = \frac{2(2k-1)}{k(k+1)}, \quad K_{2k} = \frac{6}{k(k+1)T_s}, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Lọc bậc 2 kèm theo gia tốc và vận tốc có dạng như sau:

qua ước lượng từ 3 đến 5 trị đo đầu tiên chúng ta sẽ nhận được P_0 chuẩn xác. Thay các trị đo bằng số vào các phương trình từ (12) đến (18), thực hiện trên bảng tính Excel, ta dễ dàng tính được các giá trị $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{243}$ của thực nghiệm Văn Quán, và các giá trị $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{249}$ của thực nghiệm HUNRE.

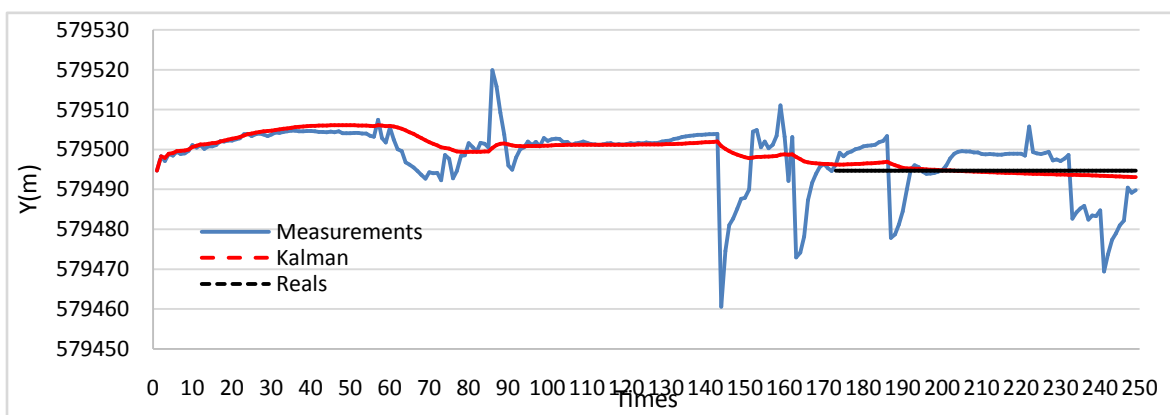
Sau khi thực hiện các bậc lọc 0, 1 và 2 của đa thức biểu diễn lọc Kalman. So sánh kết quả giữa trị đo, trị thực và giá trị lọc. Chúng tôi nhận thấy lọc bậc 1 phù hợp với chuyển động thực tế của máy thu GPS trong đo đạc bản đồ. Kết quả lọc bậc 1 thể hiện trên hình 7 cho thấy độ lệch giữa trị thực và giá trị lọc tối đa là 4,1 mm, tốt hơn nhiều so với trị đo sau xử lý GPSurvey 2.35 (11,4 mm).



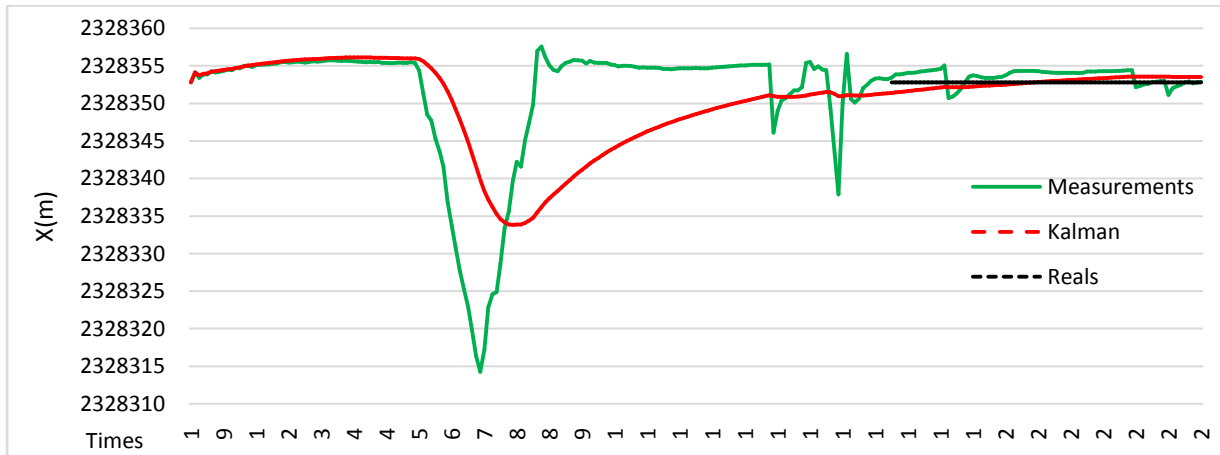
Hình 7. Biểu diễn lọc Kalman tại thực nghiệm Văn Quán (VN2000).

Tiếp tục áp dụng bộ lọc Kalman dạng đa thức bậc 1 vào thực nghiệm thứ hai tại HUNRE. Kết quả ước lượng tối ưu vị trí điểm đo động bằng lọc Kalman được chú ý so sánh tại 80 trị đo cuối, bởi vì khoảng thời gian này máy thu GPS ở vị trí ổn định nhưng được tiến hành đo theo phương pháp “động”. Biểu diễn

kết quả lọc Kalman trên giá trị tọa độ X và giá trị tọa độ Y, giữa trị đo và giá trị lọc Kalman (hình 8 và 9). Chúng tôi sử dụng 50 phút đầu tiên đo theo phương pháp Tương đối Tĩnh để xác định giá trị “thực” của vị trí điểm. So sánh với trị đo “động” không lọc và trị sau lọc Kalman sẽ cho ta bức tranh toàn cảnh.



Hình 8. Biểu diễn lọc Kalman 250 giá trị tọa độ Y tại thực nghiệm HUNRE (VN2000).



Hình 9. Biểu diễn lọc Kalman 250 giá trị tọa độ X tại thực nghiệm HUNRE (VN2000).

Trong khoảng thời gian 80 chu kỳ đo (7 phút cuối) máy 100961 ở trạng thái tĩnh. Theo đồ thị 8 và 9, phương pháp thu GPS động nhận được trị đo X và Y có biến động rất lớn, thậm chí hơn 10 mét. Lý do có sai số lớn là máy thu chất lượng thấp, hiện trường bị che lấp bởi cây xanh và nhà cao tầng. Sử dụng bộ lọc Kalman cho ta một ước lượng tốt hơn rất nhiều thể hiện ở bảng 3. Giá trị tọa độ X và Y của ca đo Tương đối – Tĩnh có thể lấy làm trị thực để so

sánh với giá trị tọa độ ca đo động sau lọc Kalman. Chúng tôi không thể đưa cả 80 trị đo và trị ước lượng Kalman vào bài báo vì sẽ làm cho bài báo quá dài, nên chỉ đưa 12 trị đo cuối. Nếu tính trung bình đồng thời kết quả 80 trị thực và trị lọc Kalman, kết quả độ lệch là ± 3 cm, khá tương đồng với kết quả 12 trị đo cuối. Đây chỉ là trùng hợp ngẫu nhiên. Tất cả số liệu được thống kê đầy đủ trong đề tài mã số 13.01.17.O.03 của HUNRE.

THANH QUA TOA DO PHANG SAU BINH SAI
 HE TOA DO PHANG VN2000, ELLIPSOID WGS84
 KINH TUYEN TRUC 105°00', MUI CHIEU 3 DO (k=0.9999)
 Ca đo 50 phút theo phương pháp Tương đối Tĩnh (HUNRE)

+=====+								
S		TOA DO			SSTP vi tri diem (m)			
T	TEN	-----						
T	DIEM	x (m)	y (m)	h (m)	mx	my	mh	mp
=	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
1	957	2328284.299	579509.994	10.329	0.003	0.003	0.004	0.004
2	961	2328352.783	579494.709	9.927	0.002	0.003	0.003	0.004
3	533	2328379.944	579426.390	10.000	-----	-----	-----	-----
+=====+								

Bảng 3. So sánh tọa độ lọc Kalman trị đo “động” với trị thực và trị đo của máy thu 100961 (thực nghiệm HUNRE, ngày 07/9/2017)

Thời đoạn (GPST)	Trị đo Y (m)	Kalman Y (m)	Độ lệch với trị đo (m)	Độ lệch với trị thực (m)	Trị đo X (m)	Kalman X (m)	Độ lệch với trị đo (m)	Độ lệch với trị thực (m)
4:37:20 AM	579483.038	579494.921	-11.883	0.212	2328352.158	2328352.836	-0.678	0.053
4:37:25 AM	579482.858	579494.883	-12.025	0.174	2328352.241	2328352.841	-0.600	0.058
4:37:30 AM	579484.311	579494.843	-10.533	0.135	2328352.294	2328352.846	-0.551	0.063
4:37:35 AM	579468.946	579494.803	-25.857	0.094	2328350.426	2328352.820	-2.394	0.037
4:37:40 AM	579473.200	579494.760	-21.559	0.051	2328351.287	2328352.809	-1.522	0.026
4:37:45 AM	579476.931	579494.714	-17.783	0.005	2328351.581	2328352.803	-1.222	0.020
4:37:50 AM	579478.486	579494.667	-16.180	-0.042	2328351.726	2328352.799	-1.073	0.016
4:37:55 AM	579480.542	579494.618	-14.076	-0.091	2328352.058	2328352.800	-0.743	0.018
4:38:00 AM	579481.694	579494.568	-12.874	-0.141	2328352.184	2328352.804	-0.620	0.021
4:38:05 AM	579489.981	579494.516	-4.535	-0.193	2328351.951	2328352.804	-0.853	0.021
4:38:10 AM	579488.686	579494.464	-5.779	-0.245	2328352.094	2328352.806	-0.712	0.023
4:38:15 AM	579489.372	579494.412	-5.040	-0.297	2328352.174	2328352.809	-0.635	0.026
Trung bình			-13.177	-0.028			-0.967	0.032

Nghiên cứu đã tham khảo thực nghiệm do Heiner Kuhlmann và các đồng nghiệp tiến hành [10]. Mặc dù thời gian và khoảng cách địa lý rất xa nhau, các phương pháp tiến hành cũng khác nhau, chúng tôi nhận thấy bộ lọc Kalman với các tham số mở rộng chứng tỏ sự phù hợp với thực trạng công tác đo đạc bản đồ tỷ lệ lớn ở Việt Nam.

Nghiên cứu cũng tiến hành so sánh giá trị tọa độ X và Y mà phần mềm RTKLIB xử lý với giá trị tọa độ thực (Bảng 4). Lưu ý rằng RTKLIB cũng ứng dụng lọc Kalman nhưng áp dụng cho các trị đo pha sóng tải, trị đo code và mô hình tầng đối lưu, tầng điện ly ở dữ liệu đầu vào trước khi xử lý. Hoàn toàn khác với phương pháp mà chúng tôi đã sử dụng, ứng dụng bộ lọc Kalman cho giá trị tọa độ theo thời gian của tiến trình động, đúng với nguyên lý ước lượng mà Kalman đặt ra đối với một tiến trình động theo cách hiểu của chúng tôi.

Bảng 4. So sánh giá trị tọa độ RTKLIB với trị thực (thực nghiệm HUNRE, ngày 07/9/2017)

Thời điểm	Lệch tọa độ Y (m)	Lệch tọa độ X (m)
4:37:20	0,4965	0,2672
4:37:25	0,4957	0,4503
4:37:30	0,5055	0,2585
4:37:35	0,4962	0,2632
4:37:40	0,4986	0,2656
4:37:45	0,4987	0,2679
4:37:50	0,4967	0,2618
4:37:55	0,5031	0,4869
4:38:00	0,4966	0,2670
4:38:05	0,4966	0,2657
4:38:10	0,4963	0,2704
4:38:15	0,4989	0,2694
Trung bình	0,4982	0,2995

Độ lệch từ 26 cm đến 50 cm so với trị thực là một ước lượng tối ưu đáng kể của RTKLIB khi mà trị đo thực tế lệch tới 10 m so với trị thực (từ thời đoạn 4:37:20 đến 4:38:00). Giá trị sai số trung phương của những so sánh trên là: $RMS_X^{RTKLIB} = \pm 0.3227 (m)$; $RMS_Y^{RTKLIB} = \pm 0.5204 (m)$; $RMS_X^{Kalman} = \pm 0.0332 (m)$; $RMS_Y^{Kalman} = \pm 0.1716 (m)$.

4. Kết luận

Nghiên cứu ứng đã dựng bộ lọc Kalman và đề xuất lọc Kalman Mở rộng Tham số thông qua phương trình vận tốc của điểm với hai thực nghiệm. Thực nghiệm thứ nhất nhằm đánh giá khả năng hoạt động của bộ lọc phù hợp trong điều kiện thu tín hiệu GPS rất tốt. Thực nghiệm thứ hai ứng dụng thực tiễn trong công tác đo đạc bản đồ trong điều kiện thu tín hiệu GPS rất kém.

Thực nghiệm thứ nhất cho thấy độ lệch lớn nhất giữa trị sau bình sai với trị thực là 11,4 mm. Độ lệch lớn nhất giữa trị sau lọc K với trị thực là 4,1 mm.

Thực nghiệm thứ hai cho thấy độ lệch giữa trị sau bình sai RTKLIB với trị thực từ 262 mm đến 505,5 mm. Độ lệch giữa trị sau lọc K với trị thực từ 16 mm đến 297 mm. Độ lệch thực tế của trị đo so với trị thực tới trên 10 mét khi đo “động” chỉ ra điều kiện đo kém và chất lượng máy thu chưa tốt.

Những nghiên cứu bước đầu đã ứng dụng trong công tác thành lập bản đồ hoặc thu thập dữ liệu thông tin địa lý có thể giảm chi phí và tăng khả năng tận dụng máy cũ của đơn vị sản xuất.

Lời cảm ơn

Tác giả xin chân thành cảm ơn các sinh viên ĐH5QĐ9 đã nhiệt tình tham gia thực nghiệm. Bài viết này là kết quả thực hiện đề tài nghiên

cứu khoa học cấp cơ sở mã số 13.01.17.O.03 của Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội, do tác giả chủ trì năm 2017 - 2018.

Tài liệu tham khảo

- [1] R.E. Kalman, A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Journal of Basic Engineering, 82 (series D):34-45. Copyright @ 1960 by ASME.1960.
- [2] Phan Văn Hiến, Đinh Xuân Vinh, Ứng dụng lọc Kalman trong phân tích biến dạng nhà cao tầng do bức xạ nhiệt mặt trời. Tạp chí Xây dựng, số 5-2010. ISSN 0866-0762.2010.
- [3] Grewal, Mohinder S, Angus P. Andrews. Kalman filtering : theory and practice using MATLAB. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. ISBN 978-0-470-17366-4 (cloth)2008.
- [4] Đinh Xuân Vinh, Phan Văn Hiến, Nguyễn Bá Dũng, Lý thuyết và phương pháp phân tích biến dạng. Nhà xuất bản Tài nguyên Môi trường và Bản đồ Việt Nam. ISBN: 978-604-904-875-3.2016.
- [5] Arthur Gelb, Joseph F. Kasper, Raymond A. Nash, Charles F. Price, Arthur A. Sutherland. Applied Optimal Estimation. Technical Staff of the Analytic Sciences Corporation. THE M.I.T. PRESS. Massachusetts Institute of Technology.
- [6] Daniel Zwillinger. CRC Standard Mathematical Tables and Formulae. CRC Press. 2003.
- [7] Alfred Leick. GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. ISBN 0-471-05930-7 (cloth).2004.
- [8] Tomoji TAKASU. “RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS”. Tokyo University of Marine Science and Technology. 2009.
- [9] Norman Morrison, Intro to Sequential Smoothing and Prediction. McGraw-Hil Book Company, New York. 1969.
- [10] Heiner Kuhlmann, “Kalman – filtering with coloured measurement noise for deformation analysis”, Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.

Apply Kalman Filter to Enhance the Accuracy of Kinematic GPS Measurements

Dinh Xuan Vinh

Hanoi University for Natural Resources and Environment, 41A Phu Dien, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

Abstract: The article discusses the Kalman filter application for temporal random motion of the GPS receiver location. The motion of the GPS receiver is a space state model with time-varying. The spatial state model is usually represented by linear differential equations with white noise. When the state of space fluctuates over time, it is represented by Riccati equations, ie nonlinear differential equations. We proposed extending the Kalman filter with parameters suitable for the measurement conditions established large scale maps in Vietnam today. Coordinate points of GPS mobile over time is compared with coordinate values in a case of static measurements previously with high precision, confirming the Kalman filter extended with parameters suitable to estimate the optimal mobile GPS receiver location. This reduces the investment cost and increases the efficiency of using a common GPS receiver.

Key words: Kalman filter, kinematic GPS.