Tạp chí Tin học và Điều khiển học, T. 19, S. 3 (2003), 227–232

ĐIỀU KHIỂN LƯU LƯỢNG ĐỘNG MẠNG ISDN BĂNG RỘNG

TRẦN HỒNG QUÂN[1], PHAN HỮU PHONG[2]

[1] *Viện khoa học kỹ thuật Bưu điện*
[2] *Bộ Bưu chính - Viễn thông*

Abstract. Stationary or dynamic stream methods were often used to control dynamic traffic in ATM networks in particular, and ISDN networks in general. Such methods are usually related to solving differential equations. However, in conditions of complicated networks with non-station informational traffic, such solutions are no longer optimal.

To deal with this, the article presents the Kalman filter proposal which is more simple and effective. Furthermore, the Kalman filter solution have fast control rate and economizing the capacity of memory.

Tóm tắt. Trước đây điều khiển lưu lượng động trong mạng ATM nói riêng và mạng ISDN nói chung người ta thường dùng phương pháp luồng tĩnh hoặc động. Những phương pháp đó thường liên quan đến việc giải các phương trình vi phân. Trong điều kiện mạng phức tạp, các luồng thông tin coi là không dừng thì các giải pháp trên sẽ gặp rất nhiều khó khăn. Để giải quyết vấn đề đó, bài báo này đưa ra giải pháp bằng cách dùng lọc Kalman làm đơn giản và hiệu quả hơn.

1. GIỚI THIỆU

Trong điều khiển lưu lượng mạng viễn thông người ta thường dùng mô hình luồng tĩnh ([1, 2, 3]). Đối với mạng viễn thông B-ISDN, lưu lượng được sinh ra thường dưới dạng đột biến từ nhiều loại hình dịch vụ thoại, phi thoại tạo nên, vì vậy lưu lượng mạng là một quá trình không dừng. Do đó sử dụng mô hình tĩnh dẫn đến sai lệch kết quả khá lớn, cho nên sau này người ta sử dụng điều khiển lưu lượng động ([4, 5]). Sử dụng mô hình lưu lượng động cho mạng viễn thông là một lĩnh vực mới. Nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng thành công các phương pháp tối ưu hoặc mô hình lưu lượng động cho điều khiển lưu lượng trong các mạng chuyển mạch kênh và chuyển mạch gói như phương pháp Pontryagin min ([6]), sau đó người ta mở rộng cho các hệ có đặc tính không dừng. Tuy vậy, khi mạng phức tạp: đa dịch vụ, đa môi trường, quy mô lớn thì việc tính toán, điều khiển hết sức phức tạp. Ở đây, chúng tôi đưa ra giải pháp điều khiển lưu lượng bằng lọc Kalman sẽ đơn giản tính toán, tốn ít dung lượng bộ nhớ vì không cần nhớ hết các giá trị quan sát quá khứ.

2. MÔ HÌNH LƯU LƯỢNG

Thủ tục điều khiển động trong định tuyến được tiến hành như sau:

Giả thiết lưu lượng đến là hữu hạn trong khoảng thời gian tồn tại, ta có thể khai triển tốc độ đến dưới dạng chuỗi Taylor:

$$\lambda(x) = \lambda(t) + \frac{\lambda'(t)}{1!}(x-t) + \frac{\lambda''(t)}{2!}(x-t)^2 + \cdots \tag{1}$$

Đặt: $x - t = T \implies x = T + t$ và

$$w_1(t) = \sum_{i=2}^{\infty} \frac{\lambda^i(t)}{i!} T^i, \tag{2}$$

từ đó ta có phương trình biểu thị tốc độ đến gần đúng:

$$\lambda(t+T) = \lambda(t) + \lambda^{''}(t)T + w_1(t). \tag{3}$$

Đạo hàm hai vế của (3) theo t cho ta:

$$\lambda'(t+T) = \lambda'(t) + \lambda^{''}(t)T + w_1'(t). \tag{4}$$

Đặt: $w_2(t) = \lambda"(t)T + w_1'(t),$ (5)
suy ra:

$$\lambda^{\bullet}(t+T) = \lambda^{\bullet}(t) + w_2(t). \tag{6}$$

Cả hai biểu thức (2) và (5) đặc trưng cho sai số trong phép gần đúng, đôi khi còn được gọi là nhiễu. Từ (3) và (6) ta có biểu thức dưới dạng ma trận:

$$\begin{bmatrix} \lambda(t+T) \\ \lambda^{\bullet}(t+T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda(t) \\ \lambda^{\bullet}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Từ phương trình (7), ta ký hiệu không gian trạng thái bằng X_k :

$$X_k = \begin{pmatrix} \lambda(t+kT) \\ \lambda^{\bullet}(t+kT) \end{pmatrix}, \tag{8}$$

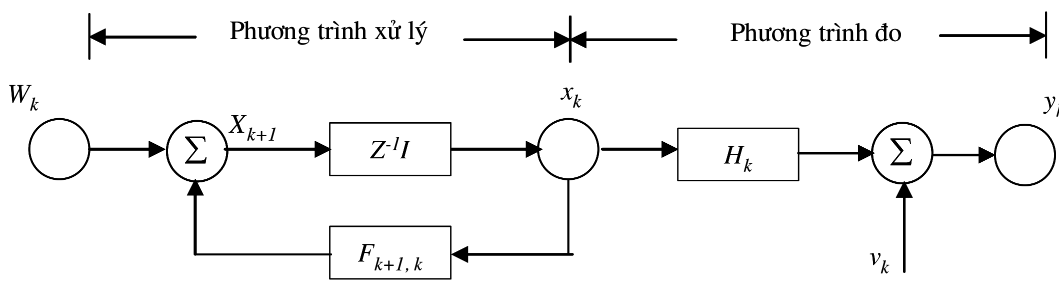
ở đây trạng thái X_k là chưa biết, nhiệm vụ của chúng ta là phải ước lượng được nó trên cơ sở tập số liệu quan sát được Y_k.

3. ĐIỀU KHIỂN LƯU LƯỢNG ĐỘNG BẰNG CÁCH LỌC KALMAN

Lọc Kalman biểu thị một dạng không gian trạng thái của các hệ thống động tuyến tính có nghiệm dưới dạng hồi qui cho bài toán lọc tuyến tính tối ưu, có thể ứng dụng nó cho môi trường dừng và không dừng.

Nghiệm hồi qui trong đó mỗi ước lượng cập nhật của trạng thái được tính dựa vào ước lượng trước đó và số liệu đầu vào mới, như vậy chỉ cần lưu trữ các yêu cầu ước lượng trước đó ngoài ra không cần lưu trữ toàn bộ số liệu giám sát trong quá khứ. Lọc Kalman tính toán hiệu quả hơn so với việc tính toán trực tiếp từ toàn bộ số liệu quan sát được trong quá khứ tại mỗi bước của quá trình lặp.

Sơ đồ khối mô tả lưu đồ tín hiệu của hệ thống động dự đoán lưu lượng tuyến tính:



Hình 1. Lưu đồ tín hiệu hệ thống dự đoán lưu lượng tuyến tính

Thường $W_1(k), W_2(k)$ là nhiễu trắng Gauss có trung bình 0, thỏa mãn phương trình sau:

$$E\lfloor W_n\ W_k^T \rfloor = \begin{cases} Q_k & : \ n = k \\ 0 & : \ n \neq k. \end{cases} \tag{9}$$

Còn F_{k+1} là ma trận chuyển đổi để chuyển trạng thái X_k từ thời điểm k sang thời điểm $k+1$. Trường hợp ta đang xét, ma trận chuyển đổi có dạng:

$$F_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 0 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Phương trình đo có dạng:

$$Y_k = H_k X_k + V_k \tag{11}$$

và từ (7), (10) ta có:

$$X_{k+1} = F_{k+1,k}.X_k + W \tag{12}$$

Ở đây Y_k là véc tơ có thể quan sát được tại thời điểm k, còn H_k là ma trận đo. Giả thiết nhiễu đo V_k là cộng, trắng, Gauss có trung bình 0 và ma trận hiệp phương sai. X_k là đại lượng chưa biết.

$$E\left[V_n, V_k^T\right] = \begin{cases} R_k & : n = k \\ 0 & : n \neq k, \end{cases} \tag{13}$$

nhiễu đo V_k không tương quan với nhiễu W_k.

Mục đích của bài toán lọc Kalman là giải phương trình xử lý và phương trình đo để tìm trạng thái chưa biết, đó là sử dụng toàn bộ số liệu quan sát gồm các véc tơ $y_1, y_2, ..., y_k$ ứng với mẫu $k \geq 1$, tìm ước lượng sai số trung bình bình phương bé nhất của trạng thái X_i.

Ký hiệu $\hat{x}_k$ là ước lượng của x_k theo các quan sát $y_1, y_2, ..., y_k$. Nói chung ước lượng $\hat{x}_k$ khác với đại lượng chưa biết x_k. Để đưa ra ước lượng tối ưu, trước hết chúng ta xây dựng hàm mục tiêu thoả mãn hai điều kiện sau:

- Hàm mục tiêu không âm.
- Hàm mục tiêu đồng biến với sai số ước lượng $\hat{x}_k$:

$$e_k = x_k - \hat{x}_k \tag{14}$$

Hai yêu cầu trên thoả mãn hàm lỗi bình phương trung bình:

$$\begin{cases} J_k = E\lfloor (x_k - \hat{x}_k)^2 \rfloor \\ J_k = E[e_k^2] \end{cases}$$

Để đưa ra được giá trị ước lượng tối ưu $\hat{x}_k$, theo lý thuyết thống kê ([14]), chúng ta chấp nhận hai định lý:

Định lý 1. *Ước lượng trung bình có điều kiện: nếu quá trình thống kê $\{x_k\}$ và $\{y_k\}$ là Gauss có điều kiện, thì ước lượng tối ưu $\hat{x}_k$ sẽ là hàm cực tiểu hàm mục tiêu J_k và được xác định:*

$$\hat{x}_k = E\left[x_k | y_1, y_2, ..., y_k\right] \tag{16}$$

Định lý 2. *Nguyên lý trực giao: giả sử quá trình thống kê $\{x_k\}$ và $\{y_k\}$ có trung bình 0:*

$$E[x_k] = E[y_k] = 0 \ \forall \ k \tag{17}$$

thì:

1) *Quá trình thống kê $\{x_k\}$ và $\{y_k\}$ là Gauss có điều kiện, hoặc:*
2) *Nếu ước lượng tối ưu $\hat{x}_k$ là một hàm tuyến tính của các quan sát và hàm mục tiêu là trung bình bình phương thì ước lượng tối ưu $\hat{x}_k$ theo các quan sát $y_1, y_2, ..., y_k$ là phép chiếu trực giao của x_k lên không gian của quan sát này.*

Hai định lý trên làm cơ sở chọn lọc Kalman để ước lượng lưu lượng của bài toán.

Ở đây ta viết lại độ đo lưu lượng của hệ thống đã được biểu thị bởi (11) và (12) tại thời điểm k. Chúng ta cần sử dụng những thông tin mới chứa trong kết quả đo mức x_1, y_k trước của trạng thái, chúng ta có thể biểu thị ước lượng sau $\hat{x}_k$ là một tổ hợp tuyến tính của ước lượng và độ đo mức như sau:

$$\widehat{X}_k = G_k^{(1)} \hat{x}_{k-1}^{(1)} + G_k Y_k. \tag{18}$$

Ở đây các hệ số của ma trận $G_k^{(1)}$ và G_k phải được xác định. Để xác định hai ma trận này, chúng ta phải dựa vào Định lý 2. Véc tơ sai số trạng thái có thể biểu thị:

$$e_k = X_k - \widehat{X}_k. \tag{19}$$

Theo định lý đó, e_k, y_i trực giao, ta có:

$$E\lfloor e_k y_i^T \rfloor = 0 \quad \text{với} \quad i = 1, 2, ..., k-1. \tag{20}$$

Sử dụng (9), (18), (19) thay vào (20) ta có:

$$E\lfloor (X_k - G_k^1 \widehat{X}_{k-1} - G_k H_k X_k - G_k W_k) Y_i^T \rfloor = 0 \quad \text{với} \quad i = 1, 2, ..., k-1, \tag{21}$$

vì nhiễu quá trình xử lý W_k và nhiễu đo V_k là không tương quan nên:

$$E\lfloor W_k y_i^T \rfloor = 0, \tag{22}$$

sử dụng quan hệ này và sắp xếp lại chúng ta có:

$$E\lfloor (I - G_k H_k - G_k^{(1)}) X_k y_i^T + G_k^{(1)} (X_k - \widehat{X}_{k-1}) y_i^T \rfloor = 0, \tag{23}$$

ở đây I là ma trận đơn vị. Từ định lý trực giao:

$$E\lfloor (X_k - \widehat{X}_{k-1}) y_i^T \rfloor = 0,$$

thì (23) bây giờ có dạng:

$$(I - G_k H_k - G_k^{(1)}) E\left[X_k y_i^T \right] = 0 \quad \text{với} \quad i = 1, 2, .., k-1, \tag{24}$$

thoả mãn với mọi X_k và y_i. Vậy từ (24) rút ra các hệ ma trận số $G_k^{(1)}$ và G_k có quan hệ như sau:

$$(I - G_k H_k - G_k^{(1)}) = 0.$$

Rút ra

$$G_k^{(1)} = I - G_k H_k \tag{25}$$

Thay (24) vào (17) chúng ta ước lượng lưu lượng tại thời điểm k sẽ là:

$$\widehat{X}_k = \widehat{X}_{k-1} + G_k (y_k - H_k \widehat{X}_{k-1}), \tag{26}$$

trong đó ma trận G_k được gọi là độ lợi Kalman.

Để ước lượng lưu lượng tại thời điểm k chúng ta cần biết ma trận G_k. Cần tính G_k xuất phát từ định lý trực giao:

$$E\lfloor (X_k - \widehat{X}_k) y_k^T \rfloor = 0. \tag{27}$$

Ký hiệu sai số giữa lưu ước lượng $\hat{y}_k$ và giá trị thực y_k là: $\widetilde{y}_k = y_k - \hat{y}_k$. (28)

Quá trình đổi mới biểu thi độ đo thông tin chứa trong y_k có thể biểu thị:

$$\widetilde{y}_k = y_k - H_k \widehat{X}_{k-1} = H_k X_k - \nu_k - H_k \widehat{X}_{k-1} = H_k e_{k-1} - \nu_k, \tag{29}$$

sử dụng (27), (28) rút ra:

$$E\lfloor (X_k - \widehat{X}_k)\widetilde{y}_k^T \rfloor = 0. \tag{30}$$

Sử dụng (13), (26) chúng ta có thể biểu thị véctơ sai số trạng thái (19) dưới dạng:

$$X_k - \widetilde{X}_k = e_{k-1} - G_k(H_k e_{k-1} + \nu_k) = (I - G_k H_k)e_{k-1} - G_k \nu_k, \tag{31}$$

thay (28) và (30) vào (29) ta có:

$$E\big[\{(I - G_k H_k)e_k - G_k \nu_k\}(H_k e_{k-1} + \nu_k)\big] = 0. \tag{32}$$

Vì nhiễu đo lường V_k không phụ thuộc vào trạng thái X_k và véc tơ lỗi e_{k-1}, do đó (32) trở thành:

$$(I - G_k H_k)E\lfloor e_k e_k^T \rfloor H_k^T - G_k E\lfloor \nu_k \nu_k^T \rfloor = 0, \tag{33}$$

ma trận hiệp phương sai của sai số ước lượng trước :

$$P_{k-1} = E\lfloor (X_k - \widehat{X}_{k-1})(X_k - \widehat{X}_{k-1})^T \rfloor = E\lfloor e_{k-1} e_{k-1}^T \rfloor \tag{34}$$

thay (34), (14) vào (33) ta có: $(I - G_k H_k)P_{k-1}H_k^T - G_k R_k = 0$, giải phương trình này đối với G_k, ta có công thức để xác định độ lợi Kalman G_k :

$$G_k = P_{k-1}H_k^T\big[H_k P_{k-1} H_k^T + R_k\big]^{-1}. \tag{35}$$

Tính ma trận hiệp phương sai của sai số, gồm hai giai đoạn:
Giai đoạn 1. Ma trận P_{k-1} được tiếp theo (35). Sau đó trên cơ sở P_{k-1} tính P_k tại thời điểm k.
Giai đoạn 2. Tính: $P_k = E\lfloor e_k e_k^T \rfloor = E\lfloor (X_k - \widehat{X}_k)(X_k - \widehat{X}_k)^T \rfloor$ (36) Thay (31) vào (36) và lưu ý rằng quá trình nhiễu V_k không phụ thuộc vào lỗi ước lượng e_{k-1}. Chúng ta thu được:

$$\begin{aligned} P_k &= (I - G_k H_k)E\lfloor e_{k-1} e_{k-1}^T \rfloor (I - G_k H_k)^T + G_k E\lfloor \nu_k \nu_k^T \rfloor G_k^T \\ &= (I - G_k H_k)P_{k-1}(I - G_k H_k)^T + G_k R_k G_k^T. \end{aligned} \tag{37}$$

Khai triển các thành phần trong (37) sau đó sử dụng (35) dẫn đến biểu thức hồi qui để tính P_k :

$$\begin{aligned} P_k &= (I - G_k H_k)P_{k-1} - (I - G_k H_k)P_{k-1}H_k^T G_k^T + G_k R_k G_k^T \\ &= (I - G_k H_k)P_{k-1} - G_k R_k G_k^T + G_k R_k G_k^T = (I - G_k H_k)P_{k-1}. \end{aligned} \tag{38}$$

Trong giai đoạn thứ hai, phải thừa nhận ước lượng trạng thái trước đó đã được xác định theo các thành phần cũ là:

$$\begin{aligned} e_k = X_k - \widehat{X}_{k-1} &= (F_{k,k-1}X_{k-1} + W_{k-1}) - (F_{k,k-1}X_{k-1}) \\ &= F_{k,k-1}(X_{k-1} - \widehat{X}_{k-1}) + W_{k-1} = F_{k,k-1}e_{k-1} + W_{k-1}. \end{aligned} \tag{39}$$

Sử dụng (38) thay vào (33) và lưu ý rằng nhiễu W_k không phụ thuộc vào e_{k-1}, ta nhận được:

$$P_{k-1} = F_{k,k-1}E\big[e_{k-1}e_{k-1}^T\big]F_{k,k-1}^T + E\big[W_{k-1}W_{k-1}^T\big] = F_{k,k-1}P_{k-1}F_{k,k-1}^T + Q_{k-1}, \tag{40}$$

bằng các phương trình (40), (35), (26) và (38), chúng ta có thể tóm tắt lại thuật toán hồi qui ước lượng lưu lượng như sau:

Chọn ước lượng ban đầu: $\widehat{X}_0 = E[x_0]$. (41)

Mô hình không gian trạng thái:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= F_{k+1,k}X_k + W_k, \\ y_k &= H_k X_k + \nu_k, \end{aligned}$$

ở đây W_k và ν_k là nhiễu Gauss độc lập, trung bình 0 có các ma trận hiệp phương sai Q_k và R_k tương ứng.

$$\widehat{X}_k = E[x_0].$$

Trạng thái ban đầu: với $k = 0$ ta có: $P_0 = E\big[(X_0 - E_0[X_0])(X_0 - E[X_0])^T\big]$.

Đối với $k = 1, 2, ...$

+ Đánh giá trạng thái: $\widehat{X}_k = F_{k,k-1}\widehat{X}_{k-1}$

+ Hiệp phương sai lỗi: $P_{k-1} = F_{k,k-1}P_{k-1}F^T_{k,k-1} + Q_{k-1}$

+ Ma trận độ lợi Kalman: $G_k = P_{k-1}H^T_k\big[H_kP_{k-1}H^T_k + R_k\big]^{-1}$

+ Ước lượng lưu lượng: $\widehat{X}_k = \widehat{X}_{k-1} + G_k(Y_k - H_k\widehat{X}_{k-1})$

+ Hiệp phương sai lỗi cập nhật: $P_k = (I - G_kH_k)P_{k-1}$

Giá trị ban đầu của ma trận hiệp phương sai:

$$P_0 = E\lfloor(X_0 - E[X_0])(X_0 - E[X_0])^T\rfloor,$$
$$P_k = (I - G_kH_k)P_{k-1}.$$

4. KẾT LUẬN

Điều khiển lưu lượng trong mạng viễn thông B-ISDN là một bài toán phức tạp, từ trước tới nay chủ yếu dùng các phương pháp luồng tĩnh hoặc động và giải phương trình vi phân thông thường để tìm nghiệm. Các phương pháp này rất hợp lý khi nghiên cứu lưu lượng tại một nút mạng. Nhưng khi ta mở rộng nó trong một mạng đa dịch vụ đa môi trường thì cách giải trên vô cùng khó khăn. Bài toán lúc này đưa ra giải pháp dùng lọc Kalman để giải dưới dạng hồi quy, không cần phải lưu trữ toàn bộ số hiệu giám sát trong quá khứ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] X. Gu, S. Li, Performance analysis for the end to end flow control with window schemes in packet switching networks modeling and algorithms, *J. of China Institude of Comm.* **10** (10) (1989).

[2] X. Chen, I. M. Lesle, Performance Evaluation of Input Traffic Control. *INFOCOM 92.*

[3] K. T. Ko, S. K. Tripathi, Optimal end to end Sliding Window Flow Control in High-Speed Network *INFOCOM 91.*

[4] J. Flipiak. *Modeling and Control of Dynamic Flow in Communication Networks,* Springer-Verlag 1988.

[5] D. R. Vaman, X. Gu, S. Jin and T. Oser., Analysis of Source Rate Adaption for ATM Network using a Dynamic Flow Model, *J. of Network Systems and Management* **1** (4) (1999).

[6] X. Gu, Interaction Between Global Isarithmic Adaptive Flow Control and Routing Algorithmis in Packet Switched Networks, *J. of China Institude of Comm* **8** (5) (1987).

Nhận bài ngày 20 - 8 - 2002