

ĐIỀU KHIỂN LƯỒNG TỐI ƯU SỬ DỤNG MÔ HÌNH ĐỘNG CHO MẠNG ATM

ĐẶNG CÔNG TRẠM, CHU VĂN HỸ

Abstract. A dynamic flow model based optimal controller is developed for ATM (Asynchronous Transfer Mode) networks. Owing characteristics of a cell scheduling controller in several cases, a multi-input multi-output (MIMO) flow control system can be decomposed into single-input single-output (SISO) system. A general method for designing MIMO controllers is also proposed.

Tóm tắt. Bài này đưa ra một phương pháp tính toán bộ điều khiển luồng tối ưu sử dụng mô hình luồng động cho mạng ATM. Tùy theo tính chất của bộ điều khiển lập lịch tế bào, trong nhiều trường hợp, hệ thống điều khiển luồng nhiều cửa vào - nhiều cửa ra (MIMO) có thể phân rã thành các hệ thống một cửa vào - một cửa ra (SISO). Chúng tôi cũng giới thiệu phương pháp tổng quát để tính toán bộ điều khiển nhiều cửa vào - nhiều cửa ra (MIMO).

1. MỞ ĐẦU

Hầu hết các bộ điều khiển đang sử dụng, như cái thùng rò, cửa sổ trượt... đều dựa trên mô hình luồng tĩnh - với giả thiết lưu lượng đầu vào không thay đổi theo thời gian [1, 3, 5, 7]. Vì thế hệ thống không thể đạt độ chính xác và tin cậy cao. Ví dụ: có thể mất một số lượng đáng kể các tế bào khi xảy ra nghẽn, nhưng tỉ lệ tổn thất tính trên khoảng thời gian dài vẫn nhỏ. Để nâng cao chất lượng điều khiển, cần thiết phải xây dựng mô hình luồng động làm cơ sở cho phân tích và thiết kế hệ thống. Bởi vì các phương trình động học không những đúng cho giai đoạn dừng - như mô hình tĩnh, mà còn biểu diễn được những thăng giáng liên tiếp trong quá trình quá độ - mà ở mạng ATM luôn xảy ra, có tính ngẫu nhiên và bùng nổ. Mặt khác, ta sẽ áp dụng được những phương pháp tối ưu hóa hiệu quả như nguyên lý cực tiểu Pontryagin, qui hoạch động Bellman... Mô hình động học từ lâu đã được sử dụng cho điều khiển các quá trình công nghệ (QTCN) trong năng lượng, cơ khí, hóa chất..., nhưng còn mới đối với các mạng viễn thông [5]. Về sự chậm trễ này có thể nêu hai nguyên nhân chính:

1. Tốc độ thông tin cần xử lý ở đây rất lớn: trong mạng ATM có thể lên tới nhiều Gbit/giây; còn trong hệ thống điều khiển các QTCN chậm chỉ khoảng chục lần cắt mẫu / giây.

2. Các quá trình trong viễn thông có tính phi tuyến mạnh: phương pháp tuyến tính hóa (đã được chấp nhận cho rất nhiều QTCN) có thể gây ra sai số lớn.

Xây dựng bộ điều khiển phi tuyến phức tạp với tốc độ rất lớn bằng những vi mạch số hiện có sẽ gặp nhiều khó khăn.

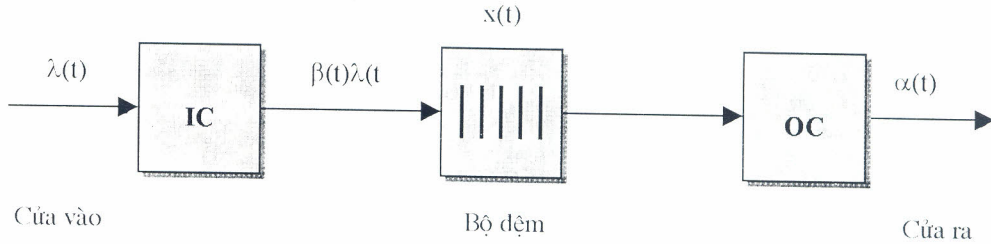
Theo chiến lược điều khiển luồng phân cấp, điều khiển mức tế bào có 2 nhiệm vụ: lập lịch trình tế bào cho bộ chuyển mạch và điều khiển luồng vào. Như phân tích trong [4], việc lập lịch tối ưu cũng rất phức tạp. Do đó, chúng tôi đề nghị thiết kế bộ điều khiển lập lịch riêng để dễ thực hiện, đồng thời trong nhiều trường hợp có thể phân rã hệ thống điều khiển luồng MIMO thành nhiều vòng điều khiển SISO. Trong bài, chúng tôi trình bày cách tính bộ điều khiển luồng SISO phi tuyến tối ưu theo nguyên lý cực tiểu Pontryagin. Phương pháp tổng quát thiết kế bộ điều khiển MIMO cho các hệ thống phức tạp cũng được đưa ra và phân tích khả năng thực hiện.

2. MÔ HÌNH LƯỒNG ĐỘNG

2.1. Phương trình động học

Hình 1 là sơ đồ một cửa vào một cửa ra của bộ chuyển mạch ATM. Bộ điều khiển đầu ra OC

có nhiệm vụ chuyển các tế bào đã được lập lịch đến cửa ra cho trước [4]. Bộ điều khiển đầu vào IC thay đổi biến điều khiển lưu lượng $\beta(t) \in (0, 1)$ sao cho bộ đệm không bị tràn và tối ưu hóa hàm mục tiêu J . Ký hiệu: $x(t)$ là số tế bào có trong bộ đệm, $\lambda(t)$ là tốc độ đến, $\alpha(t)$ là tốc độ đi ở thời điểm t .



Hình 1

Ta có phương trình cân bằng số lượng tế bào sau khoảng thời gian Δt :

$$\Delta x(t) = \beta(t)\lambda(t) \Delta t - \alpha(t) \Delta t.$$

Hay

$$\frac{\Delta x(t)}{\Delta t} = \beta(t)\lambda(t) - a(t).$$

Cho $\Delta t \rightarrow 0$, ta nhận được

$$\frac{dx(t)}{dt} = \beta(t)\lambda(t) - a(t). \tag{1}$$

Mặt khác, giữa $\lambda(t)$, $x(t)$, $\alpha(t)$ tồn tại các quan hệ của hệ thống xếp hàng. Có thể biểu diễn $\alpha(t)$ như hàm số của $x(t)$ như sau [5]

$$\alpha(t) = \mu G(x), \tag{2}$$

trong đó μ là tốc độ phục vụ. Thay vào (1) ta được phương trình động học của luồng

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\mu G(x) + \beta(t)\lambda(t). \tag{3}$$

Để hiểu ý nghĩa vật lý của $G(x)$, ta xét trường hợp luồng tĩnh: $x(t)$ là hằng số, $\frac{dx(t)}{dt} = 0$. Ta có $G(x) = \beta\lambda/\mu$. Đây chính là hệ số sử dụng của hệ thống.

2.2. Hệ thống xếp hàng M/M/1

Ở đây các tế bào đến theo quá trình Poisson, thời gian phục vụ có phân bố hàm mũ, hệ thống có 1 cửa vào 1 cửa ra. Gọi k là trạng thái (số tế bào) của hệ thống, λ_k và μ_k là tốc độ đến và tốc độ phục vụ của các tế bào, P_k là xác suất hệ thống ở trạng thái k (có k tế bào). Từ cân bằng luồng ta có

$$\lambda_{k-1}P_{k-1} = \mu_k P_k, \tag{4a}$$

$$\lambda_k P_k = \mu_{k+1} P_{k+1}. \tag{4b}$$

Nếu tốc độ đến và tốc độ phục vụ không phụ thuộc trạng thái của hệ thống: $\lambda_k = \lambda$, $\mu_k = \mu$, theo điều kiện $\sum P_k = 1$, ta tính được [5]

$$P_k = (1 - \rho)\rho^k, \tag{5a}$$

trong đó:

$$\rho = \lambda/\mu < 1. \tag{5b}$$

Giá trị trung bình của số tế bào có trong hệ thống là

$$E(k) = \sum_{k=0}^{\infty} kP_k = \sum_{k=0}^{\infty} k(1-\rho)\rho^k = \frac{\rho}{1-\rho}. \quad (6)$$

Đối chiếu với phần trên, ta thấy $E(k)$ và ρ tương ứng với $x(t)$ và $G(x)$. Do đó tìm được

$$G(x) = \frac{x(t)}{1+x(t)}. \quad (7)$$

3. ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU

3.1. Nguyên lý cực tiểu Pontryagin

Trong tài liệu, ta thấy nguyên lý được trình bày dưới nhiều hình thức với mức độ phức tạp khác nhau. Dưới đây ta chỉ nêu những nội dung cần thiết cho bài này [5, 6].

Xét hệ thống được mô tả bằng phương trình vi phân

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t), u(t), t]; \quad x(t_0) = x_0, \quad x(t_f) = x_f. \quad (8)$$

Trong đó $x(t) \in R^n$ là vectơ trạng thái, $u(t) \in R^m$ là vectơ điều khiển. Cần tìm điều khiển tối ưu trong miền chấp nhận được $u^*(t) \in U$ để đưa hệ thống từ trạng thái x_0 đến x_f sao cho cực tiểu hóa hàm mục tiêu

$$J = \int_{t_0}^{t_f} g[x(t), u(t), t] dt. \quad (9)$$

Ta định nghĩa hàm Haminton

$$H[x(t), u(t), p(t), t] = g[x(t), u(t), t] + p^T(t) f[x(t), u(t), t]. \quad (10)$$

Trong đó $p(t)$, được gọi là vectơ đồng trạng thái (Costate Vector), thỏa mãn phương trình vi phân

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\frac{dH}{dx}. \quad (11)$$

Nguyên lý cực tiểu Pontryagin phát biểu: nếu $u^*(t)$ là điều khiển tối ưu thì tồn tại $p^*(t)$ như sau

$$H[x^*(t), u^*(t), p^*(t), t] = \min_{u \in U} H[x(t), u(t), p(t), t], \quad t_0 \leq t \leq t_f. \quad (12)$$

$x^*(t)$ được gọi là trạng thái tối ưu.

Nói khác đi: hàm mục tiêu (9) sẽ đạt cực tiểu nếu ta tìm được $p^*(t)$ thỏa mãn (11) và $u^*(t) \in U$ cực tiểu hóa hàm Haminton (10). Từ điều kiện cần cho tồn tại cực trị của $H[x(t), u(t), t]$ theo $u(t)$, ta có

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0. \quad (13)$$

Phương trình (13) được gọi là điều kiện dừng, (11) là phương trình đồng trạng thái. Nguyên lý cực tiểu chỉ đưa ra điều kiện cần, nhưng trong phần lớn các trường hợp thực tế cho phép ta xác định được điều khiển tối ưu.

3.2. Hàm mục tiêu

Chất lượng của mạng viễn thông được đánh giá theo các tham số sau: thông lượng, thời gian trễ, biến đổi của trễ, hệ số sử dụng, tỉ lệ tổn thất, số tế bào trong bộ đệm... Thời gian trễ có thể biểu diễn gián tiếp qua tỉ số $x(t)/\lambda(t)$. Sau đây là một số hàm mục tiêu thường dùng.

1. Cực tiểu hóa số tế bào trong bộ đệm hoặc thời gian trễ, và cực đại hóa thông lượng

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} [w x(t) - \mu G(x(t))] dt, \quad (14)$$

trong đó w là trọng số cần chọn thích hợp.

2. Cực tiểu hóa số tế bào trong bộ đệm hoặc thời gian trễ, và cực đại hóa lưu lượng đầu vào

$$J_2 = \int_{t_0}^{t_f} [w x(t) - \beta \lambda(t)] dt. \quad (15)$$

3. Cực tiểu hóa công suất - được biểu diễn nhờ tỉ số giữa thông lượng và thời gian trễ

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_f} \frac{(\beta \lambda)^2(t)}{x(t)} dt. \quad (16)$$

4. BỘ ĐIỀU KHIỂN LƯỒNG SISO PHI TUYẾN TỐI ƯU

Ta xét bộ chuyển mạch có n cửa vào, n cửa ra, n bộ đệm đầu vào kiểu hàng vòng phân chia hoàn toàn (Complete Partition). Giả sử bộ lập lịch tối ưu xác định tế bào ở cửa vào thứ i được chuyển sang cửa ra thứ i [4], ta có hệ phương trình mô tả động học của hệ thống

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = -\mu_i \frac{x_i(t)}{1 + x_i(t)} + \beta_i(t) \lambda_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (17)$$

Cần tìm luật điều khiển tối ưu $\beta_i^*(t)$ để cực tiểu hóa tổng thời gian trễ và cực đại hóa tổng lưu lượng đầu vào theo hàm mục tiêu sau

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^n [w_i x_i(t) - \beta_i(t) \lambda_i(t)] dt. \quad (18)$$

Từ (17) ta thấy: với cấu trúc các bộ đệm hoàn toàn riêng biệt, bộ chuyển mạch được xem như n hệ thống SISO. Bài toán điều khiển luồng tối ưu (17)–(18) có thể phân rã thành n bài toán nhỏ (17)–(19)

$$J' = \int_{t_0}^{t_f} [w_i x_i(t) - \beta_i(t) \lambda_i(t)] dt. \quad (19)$$

Ta áp dụng nguyên lý cực tiểu Pontryagin. Thành lập hàm Haminton

$$H(x_i, \beta_i, p_i, t) = w_i x_i(t) - \beta_i(t) \lambda_i(t) + p_i(t) \left(-\mu_i \frac{x_i(t)}{1 + x_i(t)} + \beta_i(t) \lambda_i(t) \right). \quad (20)$$

Từ điều kiện (11), ta có

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i} = -w_i + p_i(t) \mu_i \left(\frac{1}{1 + x_i(t)} \right)^2. \quad (21)$$

Theo điều kiện dừng (13)

$$\frac{\partial H}{\partial \beta_i} = -\lambda_i(t) + p_i(t) \lambda_i(t) = 0. \quad (22)$$

Ta nhận được $p_i^*(t) = 1 =$ hằng số. Nên $\frac{dp_i^*(t)}{dt} = 0$, và thế vào (12) ta tính được trạng thái tối ưu

$$x_i^*(t) = \sqrt{\frac{\mu_i}{w_i}} - 1. \quad (23)$$

Bởi vì $x_i^*(t) =$ hằng số, ta thay $\frac{dp_i^*(t)}{dt} = 0$ vào phương trình trạng thái (17) sẽ nhận được kết quả

$$\begin{aligned} \beta_i^*(t) &= \frac{1}{\lambda_i(t)} \left(\mu_i - \sqrt{\mu_i w_i} \right), \text{ hoặc} \\ \lambda_i^*(t) &= \beta_i^*(t) \lambda_i(t) = \mu_i - \sqrt{\mu_i w_i}. \end{aligned} \quad (24)$$

Ta thấy $\lambda_i^*(t) < \mu_i$. Do đó $\rho^* < 1$, điều kiện (5b) thỏa mãn, hệ thống xếp hàng ổn định. Nếu $w_i > \mu_i$, thì $\lambda_i^*(t) < 0$. Nên cần chọn trọng số $w_i < \mu_i$.

Nếu viết (17), (18) dưới dạng vector và giải bài toán điều khiển tối ưu cho hệ thống MIMO, ta cũng nhận được kết quả như trên nhưng tính toán phức tạp hơn. Từ quan điểm điều khiển theo thời gian thực, cấu trúc các bộ đệm độc lập với nhau như trên là thích hợp. Trong trường hợp các bộ đệm kiểu chia sẻ hoàn toàn, chia sẻ với các hàng cực đại, chia sẻ với cấp phát tối thiểu... (Complete Sharing, Sharing with Maximum Queues, Sharing with Minimum Allocation...) [5], ta phải xét bộ chuyển mạch như hệ thống MIMO phi tuyến

5. BỘ ĐIỀU KHIỂN LƯỜNG MIMO PHI TUYẾN TỐI ƯU

Ta khảo sát bộ chuyển mạch gồm n cặp cửa vào cửa ra cho n lớp (dịch vụ). Áp dụng phương trình (1), ta có hệ phương trình động học hệ thống

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \beta_i(t) \lambda_i(t) - \alpha_i(t), \quad i = 1, \dots, n. \quad (25)$$

Với cấu trúc chia sẻ bộ đệm, tốc độ tế bào đi tại cửa ra thứ i phụ thuộc vào số lượng tế bào không những của lớp i mà còn của tất cả các lớp khác

$$\alpha_i(t) = \mu_i G_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n). \quad (26)$$

Ta viết lại (25) dưới dạng cô đọng

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), \mu) + B(t)\beta(t). \quad (27)$$

Trong đó $x(t)$, $f(\cdot)$, μ là các vector n chiều, $B(t)$ là ma trận đường chéo

$$f_i(x(t), \mu) = -\mu_i G_i(x(t)), \quad (28)$$

$$B(t) = \text{diag}(\lambda_1(t), \dots, \lambda_n(t)). \quad (29)$$

Dạng vector của hàm mục tiêu (18) là

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [w^T x(t) - \lambda^T(t) \beta(t)] dt. \quad (30)$$

Áp dụng nguyên lý cực tiểu Pontryagin, ta thành lập mạng Haminton

$$H = w^T x(t) - \lambda^T(t) \beta(t) + p^T(t) [f(x(t), \mu) + B(t)\beta(t)]. \quad (31)$$

Sau đó, ta có điều kiện dừng

$$\frac{\partial H}{\partial \beta} = -\lambda(t) + B^T(t) p(t) = 0. \quad (32)$$

Phương trình đồng trạng thái

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -w - \frac{\partial f}{\partial x} p(t). \quad (33)$$

Giải hệ các phương trình (27), (32), (33) ta tìm được giá trị tối ưu $p^*(t)$, $x^*(t)$, $\beta^*(t)$. Từ (32), (29) ta có

$$p^*(t) = (B^T(t))^{-1} \lambda(t) = I. \quad (34)$$

Bởi vì $p^*(t)$ là hằng số (bằng vector đơn vị I), nên thay $\frac{dp_i^*(t)}{dt} = 0$ vào (33) và theo (28) ta có hệ phương trình đại số

$$\frac{\partial G_1(x(t))}{\partial x_i(t)} + \frac{\partial G_2(x(t))}{\partial x_i(t)} + \dots + \frac{\partial G_N(x(t))}{\partial x_i(t)} - \frac{w_i}{\mu_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (35)$$

Từ đó tính được $x^*(t)$. Có thể thấy $x^*(t) =$ hằng số, do μ_i , w_i không đổi trong khoảng thời gian tối ưu hóa. Cuối cùng, thế $\frac{dp_i^*(t)}{dt} = 0$ vào (27) ta nhận được điều khiển tối ưu (sau khi biến đổi)

$$\beta_i^*(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i(t)} G_i(x^*(t)). \quad (36)$$

Ta thấy kết quả (24) cho hệ thống SISO là trường hợp đặc biệt của (36).

Tiếp theo, ta xác định các hàm số $G_i(x, (t))$. Như phân tích ở Phần 2, $G_i(x(t))$ được tính như hệ số sử dụng của hệ thống xếp hàng tương ứng với cặp cửa vào cửa ra thứ i . Giả thiết các quá trình đến theo luật Poisson và độc lập với nhau. Cho trường hợp phức tạp nhất: bộ chuyển mạch với bộ đệm chia sẻ hoàn toàn, ta có số tế bào trung bình của lớp i [5]

$$x_i(t) = \frac{G_i(x(t))}{1 - G_i(x(t))} \frac{\sum_{k=0}^{B-1} [1 - G_i^{B-k}(x(t))] Q(k)}{\sum_{k=0}^B Q(k)}. \quad (37)$$

Trong đó:

$$Q(k) = \sum_{i=1}^N A_i G_i^k(x(t)), \quad k = 0, 1, \dots, B. \quad (38)$$

$$A_i = \frac{1}{1 - \frac{1}{G_i(x(t))}} \prod_{m \neq 1}^N \frac{1}{1 - \frac{1}{G_m(x(t))}}. \quad (39)$$

B là cỡ của bộ đệm.

So với hệ thống xếp hàng $M/M/1$, tìm các hàm ngược $G_i(x(t))$ cho hệ thống đa dịch vụ ở đây phức tạp hơn nhiều. Một phương pháp hiện đại, rất hiệu quả là sử dụng mạng nơ ron nhân tạo, dựa vào tính chất: các mạng nơ ron truyền thẳng và RBF (Radial Basis Function) có khả năng xấp xỉ các hàm phi tuyến bất kỳ với độ chính xác tùy ý. Để luyện mạng [2], cho tập các giá trị G_i^p , $i = 1, 2, \dots, n$, $p = 1, 2, \dots, m$ (chọn trong miền làm việc), theo (37) - (39) ta tính được tập các giá trị x_i^p tương ứng. Với cấu trúc được chọn thích hợp và tập mẫu $\{x_i^p, G_i^p\}$ đủ lớn, sau quá trình luyện ta nhận được mạng nơ ron với n đầu vào x_1, x_2, \dots, x_n và n đầu ra - là xấp xỉ của các hàm $G_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $G_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$, ..., $G_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Sau đó, cho vào các giá trị $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$, ở đầu ra của mạng ta có $G_1(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, $G_2(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, ..., $G_n(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ - cần thiết để tính (36).

6. KẾT LUẬN

Trên đây chúng tôi đã đưa ra phương pháp tính toán bộ điều khiển luồng phi tuyến tối ưu sử dụng mô hình động cho mạng ATM. Động học của bộ chuyển mạch được thành lập từ phương trình cân bằng tế bào, và dựa vào lý thuyết xếp hàng hoặc mô hình tổn thất đa dịch vụ. Độ phức tạp của hệ thống phụ thuộc vào cấu trúc bộ đệm. Trong trường hợp các bộ đệm hoàn toàn riêng biệt, ta có thể tính các bộ điều khiển SISO độc lập với nhau. Nếu bộ đệm dùng chung (từng phần hoặc toàn phần), thiết kế bộ điều khiển MIMO khá phức tạp. Cuối cùng lưu ý rằng: sử dụng mạng nơ ron ở đây sẽ rất hiệu quả:

- Nhờ khả năng xử lý song song của mạng nơ ron, bộ điều khiển đạt được tốc độ tính toán rất cao, đáp ứng yêu cầu của mạng ATM.

- Dung mạng nơ ron thay đổi tham số và cấu trúc ta có thể nhận dạng trực tuyến hệ thống (tính các hàm số $G_i(X(t))$). Bộ điều khiển có tính thích nghi, đảm bảo hệ thống luôn giữ được chế độ làm việc tối ưu trong điều kiện các tham số của mạng lưới thay giáng liên tục.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Altman E., Basar T., Multiuser rate - based flow control, *IEEE Trans. Commun.* **46** (7) (1998) 940-949.
- [2] Chu Văn Hỷ, Mạng nơ ron truyền thẳng cho điều khiển thích nghi các hệ thống phi tuyến, *Tin học và Điều khiển học* **14** (3) (1998) 1-7.
- [3] Dziong Z., *ATM Resource Management*, McGraw-Hill, 1997.
- [4] Đặng Công Trám, Chu Văn Hỷ, Lập lịch tối ưu cho chuyển mạch ATM sử dụng mạng nơ ron, *Tin học và Điều khiển học* **16** (2) (2000) 15-18.
- [5] Gu X., Sohraby K., Vaman D. R., *Control and Performance in Packet, Circuit and ATM Networks*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [6] Pontryagin L.S., Boltyanskij V.G., Gamkrelidze R.V., Miscenko J.F., *Matematicka Teorie Optimalnich Procesu*, SNTL, Praha, 1964.
- [7] Ross K.W., *Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunication Networks*, Springer, 1995.

Nhận bài ngày 20-6-2000

Nhận lại sau khi sửa ngày 15-11-2000

Đặng Công Trám - Văn phòng Chính phủ.

Chu Văn Hỷ - Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông.