

ABR 서비스의 체증제어를 위한 H_∞ 제어기 설계

장세권, 이상엽, 김영중, 임묘택
고려대학교 전기공학과

Design of H_∞ controller for ABR congestion control in ATM networks

Sae-Kwon Chang, Sang-Yeop Lee, Young-Joong Kim, Myo-Taeg Lim
Dept. of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - ATM 네트워크 중에서 ABR 서비스만이 피드백(feedback) 메커니즘이 가능하며, 이를 이용한 체증제어(congestion control)연구가 다양한 방법으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 현대 제어기법을 이용한 ABR 서비스의 체증제어 문제에 관심을 가지고, ABR 서비스 트래픽의 체증을 억제하고 체증 발생시 제어함으로써 최대의 QoS(Quality of Service)를 보장하도록 한다. 문제 해결을 위해 제어 이론을 기반으로 한 ABR Explicit Rate 알고리즘을 이용하며, 불확실한 외란에 대해서도 강인하고 안정된 성능을 보이는 시스템 모델을 연구한다. 그리고 이 시스템에 대한 H_∞ 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 설계한 제어기의 타당성을 보인다.

1. 서 론

ATM(Asynchronous Transfer Mode) 네트워크는 네트워크 자원을 효율적으로 이용하면서 셀손실율(Cell Loss Rate), 셀 지연시간(Cell Delay), 셀 지연 변동(Cell Delay Variation)등으로 정의 되는 서비스 품질(QoS, Quality of Service)을 만족시켜야 한다. ATM 포럼에서 표준으로 정한 서비스 방식에는 고정 비트율 서비스(Constant Bit Rate, CBR), 가변 비트율 서비스(Variable Bit Rate, VBR), 가용 비트율 서비스(Available Bit Rate, ABR) 등이 있다. 특히 ABR 서비스에서 RM(Resource Management) cell을 통한 페루프 피드백 정보를 제공하며, 이를 이용하여 전송을 기반의 네트워크 제어를 통해 각각의 소스가 보내는 데이터 셀의 전송율을 제어할 수 있다. 이 RM 셀은 데이터 셀과 같은 경로를 통해서 전달되고, RM 셀을 전송받은 ER(Explicit Rate) 제어기는 다음의 세 가지 역할 중 하나를 수행하며, 이 표시 방법들은 각각의 ATM 스위치 제조사에서 선택하는 사항이다.

(1) EFCI 표시법 : RM 셀 내의 Explicit Forward Congestion Indication(EFCI) 비트를 설정하거나, 목적지로부터 전송지로 되돌아가는 RM 셀에 Congestion Indication(CI) 비트를 설정하여 체증상태를 나타내는 간접적인 방법.

(2) Relative Rate(RR) 표시법 : CI 비트나 NI(No Increase) 비트를 설정함으로써 체증상태를 나타내는 방법.

(3) ER 표시법 : RM 셀의 ER 필드에 허용된 전송율을 명시하는 직접적인 방법.

이러한 방법을 이용한 제어기 설계의 주된 목표는 (1) 네트워크 리소스를 최대한 활용하는 것, (2) 셀손실율을 적정 수준까지 줄이는 것, (3) VC(Virtual Circuits) 간의 공정성 보장 등이다. 그리고 큐(queue) 길이를 제어하여 과도한 셀 손실을 줄이고 VC 간의 공정성을 보장하는 것에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.[1] 실제 큐 길이와 요구되는 큐 길이 사이의 에러 및 실제 ABR 과 요구되는 ABR 사이의 에러를 최소화 하는 문제에 대하여 제어 이론에 기반 한 연구들로서 LQ 최적 제어기 설계 [2], H_∞ 최적 접근법을 이용한 제어기 [3], PD 제어기를

이용한 제어기 [4] 등이 연구되었다. 본 논문에서는 패킷의 큐 길이와 가용 비트율 간의 동특성과 시스템의 잡음 영향을 고려한 시스템을 모델링 하여, 외란에 대해서 강인하고 안정된 성능을 보이는 H_∞ 제어기를 설계 한다. 그리고 설계한 제어기에 대한 시뮬레이션을 통해 제어기의 특성을 확인하고, 더욱 정확한 시스템 모델 설계를 위한 방법을 연구한다.

2. ATM 스위치의 페루프 동특성

2.1 이상적인 스위치의 페루프 동특성

먼저 큐 길이를 통한 explicit rate(ER) 계산방법에 대해 설명하고, 잡음을 고려하지 않은 이상적인 선형 시스템의 페루프 동특성에 대해 알아본다.[1][2]

주어진 VC에서의 ER을 R 이라 하고 스위치에서 그 VC가 점유하는 버퍼량을 Q 라고 하면 explicit rate R 은 다음과 같다.

$$R(n+1) = Sat_C \left\{ R(n) - \sum_{j=0}^1 \alpha_j (Q(n-j) - Q^0) - \sum_{k=0}^4 \beta_k R(n-k) \right\} \quad (1)$$

그리고

$$Sat_a(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ a & \text{if } x > a \\ x & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

○ 업데이트 주기 T : ER은 매주기마다 계산되며 그 주기는 $[n, n+1)$ 이다.

○ 딜레이 d : $d = \tau / T$ 이고 τ 는 왕복딜레이 시간이다.

○ 버퍼 문턱값(buffer threshold) Q^0 : 과부하 상태에서 요구되는 정적 상태의 버퍼 점유량

○ 최대 ER C : Sat 함수는 ER 값의 제한범위를 정해 주며, C 값은 ABR 서비스가 허용하는 최대 트래픽 용량 값까지 가능하다.

다음의 수식으로 페루프 동특성을 표현할 수 있다.

$$Q(n+1) = Sat_B \{ Q(n) + \lambda(n-d) - \mu(n) \} \quad (3)$$

$$R(n+1) = Sat_C \left\{ R(n) - \sum_{j=0}^1 \alpha_j (Q(n-j) - Q^0) - \sum_{k=0}^4 \beta_k R(n-k) \right\} \quad (4)$$

$\lambda(n)$ 는 ABR source 에서의 전송율, $\mu(n)$ 는 스위치에서의 서비스율이다. d' 는 source로부터 switch까지의 전방 지연율이고, B 는 버퍼 사이즈이다. ABR source의 전송율이 네트워크가 허용하는 ER을 유지할 수 있다면, source 전송율 $\lambda(n-d)$ 는 $R(n+1-d)$ 와 같다고 볼 수 있다. $\mu(n)$ 은 시간의 함수이며 높은 우선순위의 트래픽이나 같은 링크를 쓰는 다른 VC에 따라서 달라질 수 있으나, 이상적인 모델링에서는 $\mu(n)$ 을 상수라 가정한다. 그리고 α_j 와 β_i 는 요구되는 조건 (안정도, 요

구되는 큐의 크기)을 제공하기 위해 선정되는 계수이며, $\sum_{j=0}^d \alpha_j > 0$ 과 $\sum_{i=0}^d \beta_i = 0$ 을 만족한다. (3)과 (4)의 수식에서 비선형요소인 *Sat* 함수를 제거하고 선형시스템으로 단순화 시키면 다음과 같다.

$$Q(n+1) = Q(n) + R(n+1-d) - \mu \quad (5)$$

$$R(n+1) = R(n) - \sum_{j=0}^1 \alpha_j (Q(n-j) - Q^0) - \sum_{k=0}^d \beta_k R(n-k) \quad (6)$$

상태 벡터를 다음과 같이 정의 하면,

$$Y(n) = (Q(n) - Q^0, Q(n-1) - Q^0, R(n), R(n-1), \dots, R(n-d))' \quad (7)$$

다음의 상태 공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$Y(n+1) = A_1 Y(n) + B_1 \mu \quad (8)$$

이 페루프 시스템에 대한 특성 다항식은 행렬 $zI - A_1$ 의 행렬식이며 다음과 같다.

$$\det(zI - A_1) = (-1)^{d+1} z P_r(z)$$

이 때

$$P_r(z) = z^{d+2} + \theta_1 z^{d+1} + \theta_2 z^d + \dots + \theta_{d+2}$$
 이 되고,

계수벡터 $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{d+2})$ 는 제어 이득

$G = (\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_d)$ 에 의해 정의 되며 Θ 에 대한 G 의 1 대 1 대응은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_0 = \sum_{j=1}^{d+1} (d+2-j)\theta_j + d+2$$

$$\alpha_1 = \theta_{d+2} - \sum_{j=1}^{d+1} (d+1-j)\theta_j - d-1$$

$$\beta_0 = \theta_1 + 2$$

$$\beta_k = 1 + \sum_{i=1}^{k+1} \theta_i, \quad k=1, 2, \dots, d-1$$

$$\beta_d = - \sum_{k=0}^{d-1} \beta_k = - \sum_{j=1}^d (d+1-j)\theta_j - d-1$$

(5)(6)의 선형 시스템에 대한 연구는 LQ 최적 제어기 설계[2], PD 제어기를 이용한 제어[4]등이 있으며, 본 논문에서는 새로운 H_∞ 제어기를 제안한다.

2.2 잡음의 영향을 고려한 스위치의 동특성

식 (5)(6) 은 식 (3)(4)의 선형화된 표현이다. 또한, 식 (3)(4) 는 중요 잡음을 고려하지 않은 이상적인 ATM스위치 동특성만을 나타내고 있다. 본 논문에서는 (3)(4) 식에 표준 통신 잡음 뿐 만이 아니라 모델링 오차, 스위치 요소들의 불확실성, 그리고 외부 외란에 따른 잡음을 고려한 시스템을 모델링 한다. 이러한 잡음 영향은 잡음을 가우시안 (Gaussian) 확률 잡음으로 가정함으로써 쉽게 해결할 수 있고, 잡음을 고려한 ATM 스위치에 대한 단순 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q(n+1) = q(n) + r(n+1-d) - \mu + \omega(n) \quad (9)$$

$$r(n+1) = r(n) - \sum_{j=0}^1 \alpha_j (q(n-j) - q^0) - \sum_{i=0}^d \beta_i r(n-i) + \omega(n) \quad (10)$$

$$y_1(n) = q(n) + v_1(n)$$

$$y_2(n) = r(n) + v_2(n)$$

여기서 $\omega(n), v_1(n), v_2(n)$ 는 밀도 $\mathcal{W}(n), V_1(n), V_2(n)$ 와 0 평균값을 갖는 가우시안 잡음 확률 프로세스이며, $y_1(n)$ 과 $y_2(n)$ 는 상태 측정값이다.

동특성에서 고려된 확률 프로세스에 가정된 가우시안

확률 잡음을 물리적 특성이나 수학적 모델에 관계없이 모든 바운드된 외란에 적용할 수 있는 H_∞ 필터를 사용하여 제거 할 수 있으며, 안정화 이득 제어기 파라미터 α_j 와 β_i , H_∞ 관점에서의 최적화 등은 H_∞ 필터로 유도 되는 H_∞ 제어기를 사용하여 선정될 수 있다.

3. H_∞ 제어기의 설계

3.1 Full-Information H_∞ 제어기

다음의 상태 공간 방정식으로 표현되는 시스템에 대해 생각해보자.(그림 1)

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u, \quad x(0) = 0 \quad (11)$$

$$z = C_1 x + D_{12} u \quad (12)$$

$$y = C_2 x + D_{21} w \quad (13)$$

여기서 w 는 외란의 입력값, u 는 제어 입력값, y 는 측정된 값이며 z 는 목표하는 제어된 출력값이다.

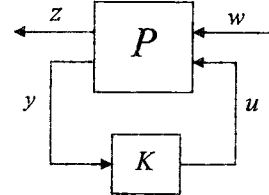


그림 1 H_∞ 제어기의 블록선도

페루프 시스템 $R_{zw} = F(P, K)$ 에 대하여

$$\|R_{zw}\|_{[0, T]} < \gamma \quad (14)$$

를 만족하는 제어기 $u = Ky$ 를 설계할 수 있다.

측정 피드백 문제는 (13)식 대신에 $y = C_2 x + w$ 을 사용하며, 이 경우 observer

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + B_2 u + B_1 (y - C_2 \hat{x}),$$

$$\hat{w} = y - C_2 \hat{x}$$

는 측정값 y 로부터 외란 w 와 상태 x 를 완벽하게 인출할 수 있다. 이 측정된 상태 방정식에 대하여 (14)식을 만족하는 제어기가 존재하면 역시 (11)의 시스템에 대해서도 (14) 식을 만족하는 full-information 제어기가 가능하다.

그리고 제어기가 존재하면 시스템 (11),(12)는 H_∞ norm 임계값 ($\gamma > 0$)에 의하여 안정화 가능이라고 할 수 있고 H_∞ norm 임계값 ($\gamma > 0$)에 연관된 강인 H_∞ 제어 문제는 다음의 정방 Riccati 방정식의 해를 구하여 해결할 수 있다.[5][6]

$$X = A'XA - A'XB(B'XB + W_2)^{-1}B'XA + W_1 = 0 \quad (15)$$

그리고 $W_1 = \overline{C_1 C_1'}$, $W_2 = B_1' B_1 / \gamma^2$ 이다.

스위치의 동특성 방정식 (9),(10) 식을 (11)식으로 표현해 주기 위해 (7),(8) 식과 같은 상태 공간 방정식으로 써주면 다음과 같다.

$$X(n) = (q(n) - q^0, q(n-1) - q^0, r(n), r(n-1), \dots, r(n-d))' \quad (16)$$

$$X(n+1) = A_1 X(n) + B_3 \mu + B_1 w(n) + B_2 U(n) \quad (17)$$

$$Z(n) = C_1 X(n) + D_{12} U(n) \quad (18)$$

$$Y(n) = C_2 X(n) + D_{21} V(n) \quad (19)$$

3.2 모의 실험

본 실험에서는 하나의 병목노드(bottleneck node) Sw_1 에 세 개의 ABR source, S_1, S_2, S_3 가 접속된 시스템을 가정하였다.(그림 2) 시스템의 가능한 최대 전송 비트율은 $Sw_1=100Mbps$ 이고, 각각의 ABR source의 전송 비트율 $S_1=20Mbps, S_2=30Mbps, S_3=50Mbps$ 로 설정 하였으며, 외란모델은 0 평균값을 갖는 가우시안 확률 값을 발생시켜 사용하였다. 시뮬레이션 tool은 MATLAB™을 사용하였다.

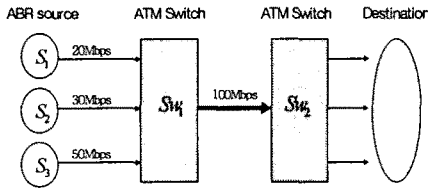


그림 2 실험 모델

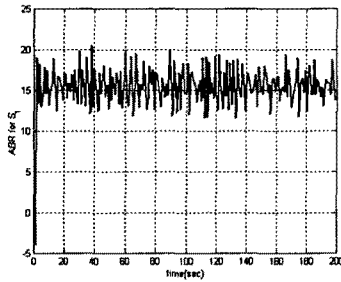


그림 3 source 1(20Mbps)의 전송 비트율 변화

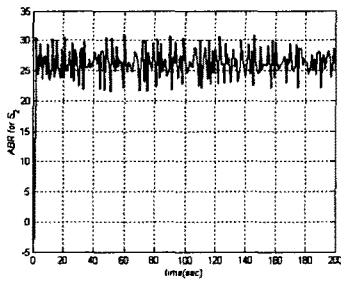


그림 4 source 2(30Mbps)의 전송 비트율 변화

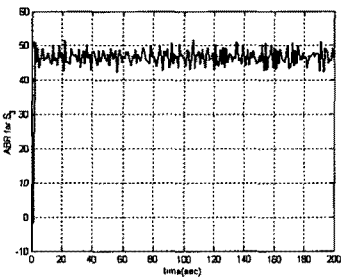


그림 5 source 3(50Mbps)의 전송 비트율 변화

실험 결과를 보면, 병목노드(Sw_1)의 최대 전송 비트율이 100Mbps 내에서 유지되도록 각 ABR source의 전송 비트율이 변화한다. 이것은 제어기를 통해서 가용한 100Mbps의 대역폭을 최대한 활용할 수 있도록 각

source의 전송비트율을 제한된 서비스율($S_1=20Mbps, S_2=30Mbps, S_3=50Mbps$) 내에서 최대가 되도록 제어할 수 있음을 보여 준다. 또한 외란의 입력에도 각각의 전송 비트율을 유지하는 강인한 성능을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 H_∞ 제어기가 체중 발생 시 전송비트율을 가변시켜 체중 상태를 줄일 수 있는 ER 제어를 할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 패킷의 큐 길이와 가용 비트율 간의 동특성과 시스템의 잡음 영향을 고려한 시스템을 모델링하고, 외란에 대해서 강인하고 안정된 성능을 보이는 H_∞ 제어기를 설계하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해서 제어기가 ABR source의 전송 비트율 제어에 사용될 수 있음을 보였다. 본 논문에서는 스위치에서의 서비스율 μ 를 상수로 가정하고 모델 및 제어기를 설계하였다. 향후 연구에서는 μ 를 큐 값에 따른 시간의 함수로 가정하여, 새롭게 표현되는 점프 파라미터 선형 시스템[8][9]에 대한 모델을 연구한다. 이 모델은 ATM 네트워크에서 연구된 적이 없기에 중요한 의미를 갖으며, 더욱 실질적인 ATM 스위치 모델을 설계할 수 있다.

본 연구는 한국학술진흥재단의 2002년도 선도연구자지원(KRF-2002-041D00209)의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] L. Benmohamed and S. Mirkov, "Feedback control of congestion in packet switching networks: the case of a single congested node", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 1, 693-707, 1993.
- [2] L. Benmohamed and Y. Wang, "A control-theoretic ABR explicit rate algorithm for ATM switches with per-VC queuing", Proceedings of IEEE INFOCOM, 183-190, 1998.
- [3] X. Shen and J. Mark, "A feedback flow control model for ABR services: An H_∞ optimization approach", Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, vol 6, 489-502, 1999.
- [4] A. Kolarov and G. Ramamurthy, "A control-theoretic approach to the design of an explicit rate controller for ABR service", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 7, 741-753, 1999.
- [5] Kemin Zhou and J. C. Doyle, *Essentials of Robust Control*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
- [6] J. Doyle, K. Glover, P. Khargonekar and B. Francis, "State space solution to standard H_2 and H_∞ control problems", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 34, 831-846, 1989.
- [7] Michael Green and David J.N. Limebeer, *Linear Robust Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- [8] Z. Gajic and I. Borno, "Lyapunov iterations for optimal control of jump linear systems at steady state", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 40, 1971-1975, 1995.
- [9] Z. Pan and T. Basar, " H_∞ control of large-scale jump linear systems via averaging and aggregation", International Journal of Control, vol. 72, 866-881, 1999.