상호작용 예측 방법에 의한 대형 분산 패킷 교환망의 최적제어

°장 영 민 . 전 기 준
경북대학교 공과대학 전자공학과

Optimal Control of Large Scale Distributed Packet Switching System via Interaction Prediction Method

Yeong Min Jang and Gi Joon Jeon
Department of Electronics, Kyungpook National University

Abstract

This paper deals with large scale distributed packet switching system which is modeled by state space form and optimizing routing algorithms and buffer size via a hierachical system optimization method, the interaction prediction method.

1. 서 론

앞으로 통신망이 종합정보통신망(ISDN)으로 발전해 감에 따라 서비스 요구가 증가하게 되어 기존통신망을 확장하여 선로당 통화량밀도(Traffic intensity)가 0.2보다 작을 경우[1]에는 회선교환방식과 패킷교환방식을 겸한 단계적 회선교환방식[2]을 사용했으나, 분산 컴퓨터 및 그에 내장된 자료들을 효율적으로 사용하기 위해 컴퓨터통신인 패킷교환방식[3]을 채택하도록 권고하고 있다. 그런데 패킷교환방식의 서비스품질[4]은 라우팅(Roution)앨고리즘 및 버퍼운영, 망의 기하학적인 구조(Topology) 및 견고성(Fault tolernce)등에 좌우된다. 이에따라 망(Network)측면에서는 대기이론[5](Queueing theory)을 이용하여 라우팅 앨고리즘 및 버퍼운영 등을 최적화하는 연구가 활발히 진행되고 있고 동시에 제어 측면에서도단일 목적지망[6]에 최적제어 이론[7]을 적용시킨 연구도 있다. 그러나 전자교환기(Digital ESS)의 여러 특수 서비스 보급이 활발해지면 통화량밀도가 상승[1]하게 되고 동시에 전체 교환점(SN: switching node) 및 DTE(Data terminal equipment)수가 증가되어 패킷교환망이 밀집화, 대형화[8,9,10]되어 기존의 라우팅 및 버퍼운영등에 의해서 교환망을 제어하기가 어렵게 된다.

따라서 본논문에서는 이러한 난점을 해결하기 위하여 점차 보편화된 대규모 분산 패킷교환망을 현대제어이론의 상태공간형으로 모델링하여 계층적 시스템 최적화 방법인 상호작용 예측방법[11,12](Interaction prediction method)으로 버퍼에서의 패킷량과 패킷전송률을 최적화 함으로써 각 교환점의 버퍼크기 및 라우팅 앨고리즘을 결정하려고 시도하였다.

2. 문제의 설정

대규모 패킷교환망에서 교환점(SN)집합을 〔1, 2, … N_s〕, (i, j) i, j $\in N_s$를 SN i에서 SN j로 직접 연결된 링크(Link), L을 망에 존재하는 모든 링크들의 집합, S(i)를 SN i로부터 물리적으로 도착할수 있는 SN의 집합, 그리고 $\theta(i)$를 SN i로 물리적으로 도착할 수 있는 SN의 집합으로 정의한다. 대규모 망의 i번째 SN의 컴퓨터 버퍼에서 전송을 기다리는 목적지가 d인 패킷수를 상태변수, 이 SN에서 다른 SN으로 전송되는 패킷률을 제어입력으로 정의하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$x_i^d(k+1)=x_i^d(k)-T\sum_{\substack{j\in S(i)\\ i\neq j}} u_{ij}^d(k)+T\sum_{\substack{l\in\theta(i)\\ l\neq i}} u_{li}^d(k)+w_i^d(k) \qquad (1)$$

여기서, $x_i^d(k)\varepsilon R$는 시간k에서 SN i의 컴퓨터 버퍼에서 전송을 기다리는 목적지가 d인 패킷수, $u_{ij}^d \varepsilon R$는 시간간격 T동안 목적지는 d이고 SN i에서 j로 전송되는 패킷률〔packets/sec〕, T는 시간 간격(k, k+1) 그리고 $w_i^d(k)\varepsilon R$는 시간 간격T동안 DTE로부터 SN i에 도착하는 목적지가 d인 패킷수이며 $d\neq i$ 그리고 $i, d \varepsilon N_s$.

이때 각 SN의 버퍼에서의 패킷량과 패킷전송률을 최적화하기 위한 성능지수를 다음과 같이 정의하자

$$J_i=\sum_{k=0}^{N-1}\left(\tfrac{1}{2}x_i^T(k)Q_i x_i(k)+\tfrac{1}{2}u_i^T(k)R_i u_i(k)\right) \qquad (2)$$

여기서, $x_i = [x_i^1 \ x_i^2 \cdots x^{i-1} x_i^{i+1} \cdots \ x_i^{N_s}]^T$

$$u_i = [u_{i1}^1 \cdots u_{i1}^{i-1} \ u_{i1}^{i+1} \cdots u_{i1}^{N_s} | \cdots | u_{ii}^1 \cdots u_{ii}^{i-1} \ u_{ii}^{i+1} \cdots$$

$$u_{ii}^{N_s} | \cdots | u_{iN_s}^1 \cdots u_{iN_s}^{i-1} u_{iN_s}^{i+1} \cdots u_{iN_s}^{N_s}]^T$$

$$w_i = [w_i^1 \ w_i^2 \cdots w_i^{i-1} \ \ w_i^{i+1} \cdots w_i^{N_s}]^T$$

이며 $Q_i \varepsilon R^{n \times n}$, $n = N_s - 1$ 는 positive semidefinite 행렬이고 $R_i \varepsilon R^{n(n+1) \times n(n+1)}$ 는 positive definite 행렬이다. 이러한 모델에 집중제어이론 대신에 분산제어이론을 적용하기 위해 각 SN을 부시스템으로 정의하여 상태정보를 교환하는 형태로 식(1)을 다시 표시하면 다음과 같다.

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + w_i(k) + C_i z_i(k) \qquad (3a)$$

$$z_i(k) = \sum_{j \neq i}^{N_s} L_{ij} \, x_j(k) \qquad (3b)$$

$$x_i(o) = x_{io}$$

여기서, $i = 1, 2, \cdots N_s$, $x_i(k)$ 는 n 차원 상태벡타, $u_i(k)$ 는 $n(n+1)$ 차원 제어벡타, $z_i(k)$ 는 다른 부시스템의 상태에 의해 발생된 n 차원벡타, $w_i(k)$ 는 n 차원 T 동안 SN으로 DTE에서 들어 오는 패킷수, A_i 는 $n \times n$ 차원 시스템행렬, B_i 는 $n \times n(n+1)$ 차원 연결성 라우팅테이블, L_{ij} 는 $n \times n$ 차원 SNi 와 j 를 위한 연결성 라우팅 테이블 및 C_i 는 $n \times n$ 차원 단위행렬이다. 대규모 교환망의 최적화 문제는 식(3)을 만족하면서

$$J = \sum_{i=1}^{N_s} J_i \qquad (4)$$

를 최소로 하는 제어법칙 u_i, $i = 1, 2, \cdots N_s$ 를 구하는 것이다.

3. 상호작용 예측 방법에 의한 해

앞절의 대규모 시스템을 최적화 하기 위해 하위계층에서 SN i를 포함한 i 번째 부시스템 즉 식(2) 및 (3)을 최적화하고 상위계층에서는 하위계층에서 구한 변수들을 대규모 시스템 즉 식(3)과 (4)을 최적화하는 방향으로 수정하여 다시 하위 계층으로 보내는 상호작용 예측 방법을 이용한다. 우선 하위계층에서는, 식 (3b)의 등식제약조건이 있으므로 Lagrange multiplier 이용하여 Hamiltonian을 구하면 다음과 같다.

$$H_i = \tfrac{1}{2} x_i^T(k) Q_i x_i(k) + \tfrac{1}{2} u_i^T(k) R_i u_i(k) + \lambda_i^{T*}(k) \, z_i(k) - \sum_{j \neq i}^{N_s} \lambda_j^*(k) \, L_{ji} \, x_i(k)$$
$$+ p_i^T(k+1) [A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + w_i(k) + C_i z_i^*(k)] \qquad (5)$$

여기서, λ_i 는 n 차원 Lagrange multiplier 벡타이고 p_i 는 n 차원 adjoint 벡타이다. 식(5)에서 식(2)를 최소화하는 제어법칙은 i 번째 부시스템이 제어가능하다고 가정하면

$$u_i(k) = -R_i^{-1} B_i^T p_i(k+1) \qquad (6.a)$$

로 주어지며 p_i 는 다음 adjoint 방정식을 만족한다.

$$p_i(k) = Q_i \, x_i(k) + A_i^T p_i(k+1) - \sum_{j \neq i}^{N_s} L_{ji}^T \lambda_i^*(k) \qquad (6.b)$$

$$p_i(N) = o \qquad (6.c)$$

다음으로 상위계층에서는 상호작용 예측 방법 즉 조정벡터 $\begin{bmatrix} \lambda^* \\ z^* \end{bmatrix}$ 를 반복적으로 아래와 같이 개선한다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_i^*(k) \\ z_i^*(k) \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} -C_i^T p_i(k+1) \\ \sum_{j \neq i}^{N_s} L_{ij} \, x_j(k) \end{bmatrix}^k \qquad (7)$$

각 하위계층에서는 상태변수궤환과는 다르게 현재의 상태변수 뿐만아니라 전체 시스템의 초기상태 및 입력외란 $w_i(k)$ 에 관여되게

$$p_i(k) = K_i(k) \, x_i(k) + s_i(k) \qquad (8)$$

로 변환한다. 식(8)을 식 (6.a)에 대입한것을 다시 식 (3.a)에 대입해서 구한것을 식 (6.b)에 대입하면

$$[K_i(k) - Q_i - A_i^T K_i(k+1) [\mathbb{I} + B_i R_i^{-1} B_i^T K_i(k+1)]^{-1} A_i] \, x_i(k)$$
$$+ s_i(k) + A_i^T K_i(k+1) [\mathbb{I} + B_i R_i^{-1} B_i^T K_i(k+1)]^{-1} B_i R_i^{-1} B_i^T s_i(k+1)$$
$$- A_i^T s_i(k+1) - A_i^T K_i(k+1) [\mathbb{I} + B_i R_i^{-1} B_i^T K_i(k+1)]^{-1} w_i(k)$$
$$- A_i^T K_i(k+1) [\mathbb{I} + B_i R_i^{-1} B_i^T K_i(k+1)]^{-1} C_i \, z_i^*(k)$$
$$+ \sum_{j \neq i}^{N_s} L_{ji}^T \, \lambda_j^*(k) = 0 \qquad (9)$$

이 되며 식(9)가 임의의 $x_i(k)$ 에 대해 성립하려면

$$K_i(k) = Q_i + A_i^T K_i(k+1) [\mathbb{I}_i + B_i R_i^{-1} B_i^T K_i(k+1)]^{-1} A_i \qquad (10.a)$$

이 되며 식 (6.c)와 (8)에서

$$K_i(N) = 0 \qquad (10.b)$$

그리고,

$$s_i(k+1) = G_i s_i(k) - G_i A_i^T K_i(k+1) [\mathbb{I} + B_i R_i^{-1} B_i^T K_i(k+1)]^{-1}$$
$$C_i z_i^*(k) - G_i \sum_{j \neq i}^{N_s} L_{ji}^T \lambda_j^*(k)$$
$$- G_i A_i^T K_i(k+1) [\mathbb{I} + B_i R_i^{-1} B_i^T K_i(k+1)]^{-1} w_i(k) \qquad (11.a)$$

여기서 $G_i \triangleq \{A_i^T [\mathbb{I} - K_i(k+1) [\mathbb{I} + B_i R_i^{-1} B_i^T K_i(k+1)]^{-1} B_i R_i^{-1} B_i^T]\}^{-1}$

$$s_i(N) = 0 \qquad (11.b)$$

가 된다. 식 (11)의 해 $s_i(k)$ 는

$$s_i(k)=\sum_{\tau=0}^{N-1}\Phi_i(k,\tau+1)M_i z_i^*(\tau)-\sum_{\tau=0}^{k-1}\Phi_i(k,\tau+1)M_i z_i^*(\tau)$$
$$+\sum_{\tau=0}^{N-1}\Phi_i(k,\tau+1)N_i\lambda_j^*(\tau)-\sum_{\tau=0}^{k-1}\Phi_i(k,\tau+1)N_i\lambda_j^*(\tau)$$
$$+\sum_{\tau=0}^{N-1}\Phi_i(k,\tau+1)T_i w_i(\tau)-\sum_{\tau=0}^{k-1}\Phi_i(k,\tau+1)T_i w_i(\tau)$$

여기서, $\Phi_i(k,\tau+1)\triangleq G_i^{k-\tau-1}$

$$M_i\triangleq G_iA_i^TK_i(k+1)[\mathrm{I}+B_iR_i^{-1}B_i^TK_i(k+1)]^{-1}C_i$$
$$N_i\triangleq G_i\sum_{j\neq i}^{N_s}L_{ji}^T$$
$$T_i\triangleq G_iA_i^TK_i(k+1)[\mathrm{I}+B_iR_i^{-1}B_i^TK_i(k+1)]^{-1}$$

식 (3.a) 와 식 (6.a) 이용하면 $x_i(k)$ 는

$$x_i(k)=\{[\mathrm{I}+B_iR_i^{-1}B_i^TK_i(k+1)]^{-1}A_i\}^k x_{io}$$
$$+\sum_{\tau=0}^{k-1}\{[\mathrm{I}+B_iR_i^{-1}B_i^TK_i(k+1)]^{-1}A_i\}^{k-\tau-1}z_i(\tau)$$
$$+\sum_{\tau=0}^{k-1}\{[\mathrm{I}+B_iR_i^{-1}B_i^TK_i(k+1)]^{-1}A_i\}^{k-\tau-1}w_i(\tau)$$
$$+\sum_{\tau=0}^{k-1}\{[\mathrm{I}+B_iR_i^{-1}B_i^TK_i(k+1)]^{-1}A_i\}^{k-\tau-1}s_i(\tau+1)$$

로 된다. 이제 위에서 구한 $s_i(k)$ 와 $x_i(k)$ 및 식 (10) 에서 $K_i(k)$ 를 구하여 식(8)에 넣으면 된다.

4. 앨 고 리 즘

계층적 구조의 시스템을 최적화 하기 위하여 최종 시간을 N-1로 하여 성능지수 J를 최소로 하는제어법칙 $u_i, i=1,2,\cdots N_s$ 를 구하기 위한 앨고리즘은 다음과 같다.

1) 처음 조정순간 k=0 에서 초기기준제어를 결정 위해 상호작용이 없다고 가정한다. 즉 $[\lambda_i^*(o)\ \lambda_i^*(1)\cdots\lambda_i^*(N-1)]^T=0$, $[z_i^*(0)\ z_i^*(1)\cdots z_i^*(N-1)]^T=0$
2) $\lambda_i^*(k)$ 와 $z_i^*(k)$ 를 하위계층으로 보낸다.
3) 정상상태 K_i 와 $s_i(k)$, $x_i(k)$ 구해서 $p_i(k+1)$ 구한 다음 상층계층으로 $p_i(k+1)$ 과 $x_i(k)$ 를 보낸다.
4) 다른 부시스템에 대해서도 1) ~ 3) 과정을 반복한다.
5) 상층에서 두 변수의 변화가 충분히 작을 때까지 2) ~ 5) 를 반복한다.
6) 최종적으로 제어법칙 $u_i(k)$ 를 구한다.

5. 결　　론

이 논문에서는 대규모 패킷 교환망을 현대제어이론의 상태공간형으로 모델링하여 계층적 시스템 최적화 방법인 상호작용 예측방법으로 성능지수의 하중행렬 Q 및 R의 가변을 통해 버퍼에서의 패킷량과 패킷 전송률을 최적화함으로써 각 교환점의 버퍼크기 및 라우팅 앨고리즘을 결정하려고 시도하였다. 또한 대기 패킷량과 SN의 결합정도에 따라 시스템행렬 A_i 와 B_i 및 L_{ij} 를 결정한 다음 같은 방법으로 해석함으로써 통신망의 접속형태 및 망구조 연구등에 사용될것이며 한 부시스템이 고장이 생기더라도 전체 시스템엔 큰 변화없이 운영되어 유지보수등에도 유용하게 이용될것으로 생각되어 종합정보통신망으로 향한추세에 본 논문이 유용하게 이용될것으로 생각한다.

그러나 앞으로 해결하여야 할 과제는 상수로 취급한 $w_i(k)$ 를 poisson 분포로 취급하여야 하는 점과 버퍼크기 및 전송로용량의 제약조건을 고려해서 비선형적으로 해석하여야 하는 점등이다.

참 고 문 헌

1. 이관하, 최상일 : "Teletraffic Network의 Pattern과 Design", 전자교환기술, 대한전자공학회 교환연구회, 제1권 제2호 : 2~9, Dec., 1985.
2. M. Arange, D. Gelernter, H. Bader and A. Bernstein, "Staged Circuit Switching for Network Computers," ACM. SIGCOMM: '83 Simposium on Com. Architecture & Protocol, Mar., 1983.
3. Special Issue on Packet Communication Network. IEEE Proc. Vol.66, No.11, Nov.1978.
4. Roy D. Rosner: Packet Switching: Tomorrow's Com. Today, a Division of Wadsworth, Inc. Belmont, California, 1982.
5. L. Kleinrock: Queueing System, Vol I: Theory, Wiley-Interscience, Newyork, 1975.
6. G.I. Stassinopoulos and Panagiotis Konstantopoulos: "Optimal Congestion Control in Single Destination Networks," IEEE Transactions on C Communications, Vol. COM-33, No.8, August, 1985.
7. E. Kirk: Optimal Control Theory Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs New Jersey, 1970.
8. Andrews Tanenbaum: Computer Networks, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1981.
9. 유완영, 정상유, 주성순: "전전자 교환기 제어 아키텍처", 전자교환기술, 대한전자공학회 교환연구회, 제2권 제1호: 59~65, June, 1986.
10. M.J. Balas: "Trends in Large Space Structure Control Theory, Fondest Hopes, Wildest Dreams," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-273: 522-535, June, 1982.
11. M.G. Singh and A. Titli: Systems; Decomposition, Optimization and Control, Pergamon Press, Oxford, 1978.
12. M.S. Mahmoud and M.G. Singh: Discrete Systems Analysis , Control and Optimization, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984.