

지연-대역폭 정규화 관점에서의 출력링크 서비스 알고리즘

이주현⁰ 황호영 민상렬
서울대학교 컴퓨터 공학부

yjhan⁰@archi.snu.ac.kr hyhwang@aycc.anyang.ac.kr symin@dandelion.snu.ac.kr

A Output Link Service Algorithm from the Aspects of Delay and Bandwidth Normalization

Ju Hyun Lee⁰, Ho Young Hwang, Sang Lyul Min
School of Computer Science and Engineering
Seoul National University

요 약

라우터에서 세션간 출력링크 용량을 공정하게 분배하기 위해, Generalized Processor Sharing(GPS) 기반 공정규잉 알고리즘들이 제안되었다. 이 알고리즘들은 대역폭 관점에서는 서버에 대기중인 각 세션들에게 공정한 서비스를 제공해 주지만, 지연 관점에서는 경계치 이하로 보장해 주는 서비스만 제공한다. 이로 인해 적은 양의 패킷을 생성하는 세션이라도 작은 지연으로 서비스 받고자 한다면, 큰 대역폭을 할당받아야 하는 문제가 발생한다. 이와 같이 지연과 대역폭이 결합됨으로 써 생기는 문제를 해결하고자 서비스커브 기반의 알고리즘이 제안되었지만, 이 알고리즘들은 서비스 지연과 대역폭간 제한된 분리밖에 지원하지 못한다. 본 논문에서는 서비스 지연과 대역폭을 분리하여 독립적으로 처리함으로써, 각 세션에게 세션의 트래픽 특성에 맞게 서비스를 제공해 주는 지연-대역폭 정규화 모델을 제안한다. 이 모델은 서비스를 서비스 지연과 대역폭 측면에서 정의하고, 정의된 서비스를 서비스 가치(Value of Service: VoS)라는 개념을 통해 표현한다. 이 모델과 VoS개념을 이용하여 각 세션에게 지연-대역폭 관점에서 공정한 서비스를 제공하는 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘을 통해, 각 세션에게 지연-대역폭 관점에서 공정서비스, 전송률을 보장하는 서비스를 제공하려고 한다.

1. 서론

네트워크 트래픽은 과거에는 이메일, 파일전송 등의 단순한 데이터들이 대부분이었으나, 현재는 이 트래픽들 뿐만 아니라, VoIP 같은 패킷 음성트래픽 및 VoD(Video on Demand), 화상회의, DMB(Digital Media Broadcasting) 등의 다양한 멀티미디어 트래픽으로 구성되어 있다. 이러한 다양한 트래픽에 대해 공정 서비스, 전송속도, 지연 등에 대한 보장 서비스를 제공해 주기 위해 Generalized Processor Sharing(GPS)[1]를 기반으로 하는 많은 공정규잉(Fair Queueing) 알고리즘이 유무선 환경에서 제안되었다[2-9]. 그러나 GPS 기반의 알고리즘은 두 가지 제약 점을 지닌다[10]. 첫 번째로 이 알고리즘들은 가중치만을 매개변수로 하여 전송대역폭과 전송지연을 제어함으로써 대역폭과 지연이 결합되는 문제가 발생한다. 이러한 문제는 VoIP(Voice over IP) 같이 간헐적으로 패킷을 생성하면서 빠른 처리를 요하는 세션에 대해서 많은 대역폭 할당을 요구하여 네트워크 대역폭이 비 효율적으로 이용되는 문제를 야기한다. 두 번째 문제는 간헐적으로 패킷을 생성하는 대화형 세션과 끊임없이 패킷을 생성하는 처리지향형 세션을 서비스 시 GPS 기반

알고리즘들은 처리지향형 세션에게 더 많은 대역폭을 제공하는데, 이는 이 알고리즘들의 비기억특성(memoryless property) 때문이다.

이러한 문제를 해결하고자 서비스커브(Service Curve: SC)[11-13]를 비롯한 다양한 지연-대역폭 분리 기법들이 제안되었다. 서비스 커브는 두 개의 선형 세그먼트를 통해 서비스커브를 정의하고, 이 커브에 의해 실시간 보장형 서비스 및 지연-대역폭 분리 서비스를 제공한다. 그러나 서비스 커브는 한 세션에 대해 서비스 커브가 할당이 되었을 때, 세션 내의 트래픽 특성이 동적으로 변하는 경우 이에 유연하게 대응하지 못하는 문제점을 갖는다. 뿐만 아니라 서비스커브는 GPS 기반 알고리즘에 비해 구현 복잡도가 훨씬 크다. SC는 각 세션당 마감곡선(deadline curve), 활성화 곡선(eligibility curve), 그리고 가상시간 곡선(virtual time curve)을 유지해야 하는데, 이 곡선들은 비선형이기 때문에 기존의 공정 규잉 알고리즘에 비해 스케줄링을 위한 가상시간 계산이 훨씬 복잡하다. SC 이외에도 서비스 지연과 대역폭을 분리하고자 몇몇 알고리즘이 제안되었다. [14]에서는 시간윈도우 개념을 사용하여 시간윈도우 내에서는 우선순위가 높은, 즉 짧은

지연을 요하는 세션을 먼저 서비스하는 방식을 제안하였다. 그러나 이 방식은 각 세션에게 우선순위를 어떻게 최적으로 할당할 것인가 하는 문제가 존재한다. [15]에서는 두개의 전송속도를 정의하여 정상적인 트래픽이 유입될 경우는 하나의 전송속도를 이용하여 Frame-Based Fair Queueing [16] 처럼 동작하면서, 비정상적인 트래픽이 유입될 경우, 다른 전송속도를 적용하여 세션의 지연성능이 악화되는 것을 방지하는 방식이다. 그러나 이 방식이 지연과 대역폭을 완전히 분리하지 못한단.

본 연구에서는 각 세션에게 서비스 대역폭과 서비스 지연의 관점에서 공정하게 서비스할 수 있는 틀을 제공한다. 이 틀을 통해 세 가지 형태의 서비스를 제공하려고 한다. 첫째로, 각 세션에게 서비스 대역폭과 서비스 지연 두 관점을 동시에 고려해서 공정한 서비스를 제공한다. 기존의 공평큐잉 알고리즘들은 대역폭 관점에서만 공정 서비스를 제공했고, 서비스 지연은 경계치 이하로 서비스되는 것을 보장하였지만, 본 논문은 이 두 인자를 동시에 고려한 공정서비스를 제공한다. 둘째로, 대역폭 보장을 원하는 세션에게 보장서비스를 제공한다. 오디오나 비디오 세션, 혹은 파일전송 세션의 경우 세션 설정시에 일정한 서버 대역폭 보장을 요구할 수 있는데, 이 세션 설정이 수락된 후, 실제 서비스가 진행될 때, 각 세션에게 약속했던 대역폭을 보장한다. 마지막으로, 간헐적으로 패킷을 생성하는 지연 민감 세션과 끊임없이 패킷을 생성하는 처리 지향 세션간 서비스 경쟁시, 지연 민감 세션이 우선적으로 처리될 수 있는 기반을 제공해준다. VoIP(Voice over IP), 웹, 텔넷 세션들은 파일 전송 세션에 비해 트래픽을 적게 생성하지만, 빠른 처리를 요하는 지연 민감 세션들인데, 기존의 GPS 기반의 알고리즘들은 지연과 대역폭간의 의존성이 발생하기 때문에, 지연 민감 세션을 서비스 시 큰 대역폭 설정을 요구한다. 본 연구에서는 큰 대역폭 설정 없이 지연 민감한 세션에게 빠른 서비스를 제공할 수 있는 기반을 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 본 논문에 사용할 기호를 정의하고 지연-대역폭 정규화 개념을 설명한다. 3 장에서는 이 개념을 이용하여 서비스하는 모델과 모델을 참조하여 스케줄링을 수행하는 스케줄링 알고리즘을 설명하고, 마지막으로 4 장에서 결론을 맺는다.

2. 지연-대역폭 정규화

본 논문에서는 네트워크 라우터와 스위치를 서버에 N 개의 세션이 서버용량(혹은 링크용량) C 를 공유한다고 가정하였다. 서버는 세션의 패킷이 입력큐에 대기 중일 때 항상 서비스하는 작업보존(work-conserving) 방식으로 동작한다. 서버에는 가중치 w_i 를 가진 세션 i 가 생성한 패킷 $P_i(k)$, $k=1,2,\dots$ 들이 도착한다. 세션 i 의 k 번째 패킷 $P_i(k)$ 는 길이 $L(P_i(k))$ 를 가지고 시간 $A(P_i(k))$ 에 도착하여 스케줄러에 의해 서비스된 후 시간 $F(P_i(k))$ 에 서버를 떠난다. 이때 패킷 $P_i(k)$ 의 서비스 지연 $d_i(k)$ 는 도착시간과 종료시간의 차이이다.

2.1 지연-대역폭 정규화 개념

서버가 각 세션에게 제공하는 서비스는 두 가지 측면이 있다. 즉 얼마만큼 많은 서비스가 제공되었는가 하는 서비스 양(또는 대역폭) 측면과 이 서비스 각각이 얼마나 신속히 제공되었는가 하는 서비스 지연 측면이다. 서버가 각 세션에게 서비스를 제공할 때는 이 두 측면 모두를 고려하여 공평하게 서비스해야 한다.

본 논문에서는 서비스 대역폭 측면과 서비스 지연 측면을 하나의 개념으로 통합시킨 서비스 가치(Value of Service: VoS)를 제안한다. VoS 는 세션이 서버에 의해 받은 서비스 양과 서비스 각각의 지연을 정규화 시킨 개념이다. 이 VoS 는 받은 서비스 양이 많아질수록, 받은 서비스의 지연이 작아질수록 커지게 된다. 각 패킷의 서비스지연은 패킷이 서버 내에서 겪는 대기시간과 서비스 시간의 합이 되는데, 이 지연의 값을 평가하기 위해선 얼마나 신속히 서비스 되었는지 판단할 수 있는 기준이 필요하다. 현재 서버에 대기중인 세션들의 패킷이 세션의 가중치에 비례하여 공정하게 서비스 된다면, 이는 GPS 에 의해 실행된 것과 같은 결과를 낼 것이므로 기준은 GPS 모델이 적당하다. 위 사항을 고려하여 k 번째 패킷까지 서비스했을 때 서비스 가치 VoS 를 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$VoS(P(k)) = \sum_k L(P(k)) * f\left(\frac{d^{GPS}(P(k))}{d(P(k))}\right) \quad (1)$$

여기에서 $d^{GPS}(P(k))$ 는 k 번째 패킷의 GPS 모델에서의 서비스 지연을 의미한다. 함수 $f(\cdot)$ 는 기준 지연인 $d^{GPS}(P(k))$ 과 실제 지연 $d(P(k))$ 간 비를 기준으로 정의되며, 로그함수, 선형함수, 지수함수 등의 다양한 형태로 정의될 수 있다. 만약 이 함수가 선형함수로 정의 된다면, 이는 기준 지연과 실제 지연간의 비 값이 선형적으로 변할 때, 서비스 가치 역시 선형적으로 변한다는 것을 의미한다.

3. 지연-대역폭 정규화 모델

지연-대역폭 정규화 모델은 각 세션이 제공받는 서비스를 서비스 양과 서비스 지연측면에서 고려하여 각 세션에게 세션의 가중치에 비례하는 서비스를 제공하고자 하는 모델이다. 각 세션이 제공받는 서비스는 식(1)에서 정의된 서비스 가치로 표현된다. 이 절에서는 서비스 가치의 개념을 이용하여 각 세션에게 공정한 서비스를 제공하고자 하는 지연-대역폭 정규화(fluid delay-bandwidth normalization: DBN) 모델을 소개하고, 이 모델을 구체화하여 실제 스케줄링을 수행하는 패킷 단위 지연-대역폭 정규화(packet-by-packet delay-bandwidth normalization: PDBN) 알고리즘을 설명한다.

3.1 지연-대역폭 정규화 모델

지연-대역폭 정규화(DBN) 모델은 각 세션의 VoS 값을 기준으로 대기중인 세션들의 패킷을 서비스 한다. 이 모델에서

패킷을 서비스 할 때, 대기중인 모든 세션에게 자신의 예약용량이 보장되도록 서비스되고, 가장 작은 VoS 값을 가진 세션에게는 잔여 서버 용량이 더해져 서비스 된다. 이 모델은 구체적으로 다음과 같이 정의된다

- 1) 세션 i 는 자신의 VoS 값을 유지하는데, 이는 현재까지 자신이 받은 서비스를 나타낸다. VoS 값은 처음 세션 i 가 서버에 도착한 경우 서버 VoS 값으로 한다. 세션 i 가 현재 길이 L 인 k 번째 패킷을 서비스 받은 후 VoS 값은 세션 i 의 예약용량 r_i 까지 고려하여 다음과 같이 갱신된다.

$$VoS_i(P(k)) = \sum_k \frac{L(P_i(k)) * f\left(\frac{d^{GPS}(P_i(k))}{d(P_i(k))}\right)}{r_i} \quad (2)$$

- 2) DBN 모델은 서버 VoS 값을 유지하는 데, 이는 서버에 의해 제공된 누적된 서비스를 나타낸다. 이 변수 값은 초기에는 0 으로 정해지며, 패킷이 서비스를 받을 때 마다 갱신된다. 크기가 $L(P(k))$ 인 k 번째 패킷의 서비스가 끝나는 시점에 서버 VoS 값 $V(P(k))$ 는 다음과 같이 갱신된다.

$$V(P(k)) = V(P(k-1)) + \frac{L(P(k)) * f\left(\frac{d^{GPS}(k)}{d(k)}\right)}{\sum_i r_i} \quad (3)$$

- 3) DBN 모델은 각 세션에 할당된 예약용량 r_i 와 현재 서버에 대기중인 세션의 VoS 값에 의해 각 세션의 서비스용량이 결정된다. 모든 대기중인 세션에게는 자신의 예약용량으로 만큼 서비스를 제공하며, 가장 작은 VoS 값을 가진 세션에게 그 세션의 예약용량과 나머지 서버용량의 합으로 서비스를 제공한다. 즉 대기중인 세션 i 가 받는 서비스 용량 SC_i 는 다음과 같다.

$$SC_i = \begin{cases} C - \sum_{j \in B, j \neq i} r_j & \text{최소 VoS 값을 가진 세션} \\ r_i & \text{나머지 대기중인 세션} \end{cases} \quad (4)$$

여기에서 B 는 현재 서버에 대기중인 세션의 집합이다. 이와 같이 최소 VoS 값을 갖는 세션에게는 모든 잔여 서버 용량을 제공하여 과거에 못 받은 서비스에 대한 보상을 해주며, 나머지 대기중인 세션에게는 기본적인 예약용량을 제공함으로써 자신의 예약 용량만큼은 보장이 되도록 한다.

3.2 패킷 단위 지연-대역폭 정규화 알고리즘

패킷 단위 지연-대역폭 정규화(Packet-by-packet delay-bandwidth normalization: PDBN) 알고리즘은 앞절에서 정의된 DBN 모델을 구체화하여 패킷을 서비스한다. DBN 모델은 각 세션의 예약용량을 보장하면서 서버에 대기중인

세션들을 VoS 를 기준으로 서비스 하는 것이었다. 실제 시스템에서는 한번에 한 패킷씩 서비스 받기 때문에, 이 장에서는 이 사항을 고려하여 서비스를 제공하는 PDBN 알고리즘을 소개한다.

PDBN 알고리즘에서는 서버를 위해 1 개의 변수, 그리고 각 세션의 패킷을 처리하기 위해 세션당 1 개의 변수, 패킷당 4 개의 변수를 유지한다. 즉 서버를 위해 식(3)에서 정의된 서버 VoS 변수를 유지하고, 세션당 식(2)에서 정의된 현재까지 받은 지연-대역폭 정규화 서비스 가치인 세션 VoS 값을 유지하고, 패킷당 도착시간, 종료시간, 서비스 시작시간(Eligible Start Time), 그리고 기대 종료시간(Expected Finish Time)값을 유지한다. 서비스 시작시간은 현재 한 패킷이 서비스 될 준비가 된 경우에도 서비스 개시가 최대 전 패킷의 기대 종료시간까지 늦추어 질수가 있는 데, 이는 다른 세션의 예약용량을 보장하기 위해서이다. 기대 종료시간은 대기중인 모든 세션이 자신의 예약용량으로 서비스 받고, 최소 VoS 값을 갖는 세션은 자신의 예약용량과 서버의 잔여용량의 합으로 서비스를 받을 때 종료시간을 나타낸다. 도착시간과 종료시간은 VoS 값을 계산하기 위해서 필요하며, 서비스 시작시간과 기대 서비스 종료시간은 예약용량을 보장하면서 스케줄링하기 위해 필요하다. $A(P_i(k))$, $F(P_i(k))$, $ES(P_i(k))$, $EF(P_i(k))$ 를 각각 세션 i 의 k 번째 패킷의 도착시간, 서비스 종료시간, 서비스 시작시간, 그리고 기대 종료시간이라 하면 알고리즘의 구체적인 동작은 다음과 같다.

- 1) 세션 i 의 k 번째 패킷이 도착한 경우, 도착시간은 실시간으로 정해지며, 서비스 시작시간은 각 세션의 예약용량을 보장하기 위해 정의된 서비스 개시 가능시각으로 다음과 같이 정해진다.

$$ES(P_i(k)) = \max(\text{real_time}, EF(P_i(k-1))) \quad (5)$$

- 2) 패킷 전송이 끝난 경우, 종료시간은 실시간으로 정해지며, 스케줄러는 현재 서비스가 종료된 패킷의 도착시간과 종료시간을 이용하여 서버 VoS 값과 현재 서비스가 끝난 세션의 VoS 값을 식(2)과 (3)를 이용하여 갱신한다
- 3) 스케줄러는 이 VoS 값과 식(4)에서 정의된 각 세션의 서비스용량을 이용하여 현재 대기중인 각 세션들의 대기큐에 있는 첫번째 패킷 $P_i(\cdot)$ 의 기대 종료시간 $EF(P_i(\cdot))$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$EF(P_i(\cdot)) = \begin{cases} L(P_i(\cdot)) & \text{최소 VoS 값을 가진 세션} \\ C - \sum_{j \in B, j \neq i} r_j & \\ L(P_i(\cdot)) & \text{나머지 대기 중인 세션} \end{cases} \quad (6)$$

여기에서 $P_i(\cdot)$ 는 세션 i 의 대기큐의 첫번째 패킷을 의미한다

- 4) 패킷들은 기대 종료시간 $EF(P_i(\cdot))$ 값을 기준으로 오름차순으로 서비스되도록 스케줄링한다.

4. 결론

본 논문에서는 세션에게 주어지는 서비스를 지연과 대역폭으로 분리하고, 이 두 가지를 정규화시킨 서비스 가치를 정의하였다. 서비스가치 개념을 이용하여 지연과 대역폭 관점에서 공정한 서비스를 할 수 있는 모델과 이 모델을 참조하여 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 이 모델과 알고리즘을 통해 세 종류의 서비스, 즉 세션에게 자신의 가중치에 비례하는 지연-대역폭 관점의 서비스 제공, 일정 대역폭 보장을 원하는 세션에게 보장서비스 제공, 그리고 지연 민감 세션과 처리지향 세션간 경쟁시, 지연 민감 세션이 우선서비스를 받을 수 있는 기반 서비스 제공을 실현하였다. 앞으로의 연구 계획은 첫 번째는 제안한 모델 및 알고리즘의 분석에 관한 것이다. 유체 지연-대역폭 정규화 모델과 알고리즘의 서비스 지연, 진행되는 서비스 양의 차이, 그리고 대기중인 패킷 양의 차이 등을 분석할 예정이다. 두 번째는 성능평가를 통해 제시된 모델과 알고리즘의 특성을 분석하고, 다른 공정 큐잉 및 서비스커브 알고리즘과 지연 성능을 비교할 예정이다.

참고문헌

- [1] A. Parekh and R. Gallager, "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Single-Node Case," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 1, no. 3, pp.344-357, 1993.
- [2] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, "Analysis and Simulation of a Fair Queueing Algorithm," in *Proc. of ACM SIGCOMM*, pp. 1-12, 1989.
- [3] P. Goyal, H. Vin, and H. Cheng, "Start-Time Fair Queueing: A Scheduling Algorithm for Integrated Services Packet Switching Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 5, no. 5, pp. 690-704, 1997.
- [4] J. Bennett and H. Zhang, "WF²Q: Worst-case Fair Weighted Fair Queueing," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 120-128, 1996.
- [5] S. Golestani, "A Self-clocked Fair Queueing Scheme for Broadband Applications," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 636-646, 1994.
- [6] D. Stiliadis, and A. Varma, "Rate-Proportional Servers: A Design Methodology for Fair Queueing Algorithms," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 164-174, 1998.
- [7] D. Stiliadis, and A. Varma, "Latency-Rate Servers: A General Model for Analysis of Traffic Scheduling Algorithms," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 6, no. 5, pp. 611-624, 1998.
- [8] S. Lu, V. Bharghavan, and R. Srikant, "Fair Scheduling in Wireless Packet Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 7, no. 4, pp. 473-489, 1999.
- [9] P. Ramanathan and P. Agrawal, "Adapting Packet Fair Queueing Algorithms to Wireless Networks," in *Proc. of MOBICOM '98*, 1998.
- [10] T. S. E. Ng, D. C. Stephens, I. Stoica, and H. Zhang, "Supporting Best-Effort Traffic with Fair Service Curve," in *Proc. of IEEE GLOBECOM*, pp. 1799-1807, 1999.
- [11] R. Cruz, "Quality of Service Guarantees in Virtual Circuit Switched Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 6, pp.1048-1056, 1995.
- [12] H. Sariowan, "SCED: A Generalized Scheduling Policy for Guaranteeing Quality-of-Service," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 7, no. 5, pp. 669-684, 1999.
- [13] J. Bennett and H. Zhang, "Hierarchical Packet Fair Queueing Algorithm," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 5, no. 5, pp. 676-689, Oct. 1997.
- [14] S. Wang, Y. C. Wang, and K. J. Lin, "A Priority-Based Weighted Fair Queueing Scheduler for Real-Time Network," in *Proc. of IEEE RTCSA*, pp. 312-319, 1999.
- [15] F. Aghareparast and C. V. M. Leung, "Efficient Fair Queueing with Decoupled Delay-Bandwidth Guarantees," in *Proc. of IEEE GLOBECOM*, pp. 2601-2605, 2001.
- [16] D. Stiliadis and A. Varma, "Efficient Fair Queueing Algorithms for Packet-Switched Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 175-185, April 1998.