비대칭 망에서 TCP 성능 향상을 위한 동적 응답 패킷 재생성 기법

안준철° 이지현 임경식
경북대학교 컴퓨터과학과
{jcahn°,hyuny}@ccmc.knu.ac.kr kslim@knu.ac.kr

A Dynamic ACK Regeneration Scheme to Improve TCP Performance over Asymmetric Networks

Joonchul Ahn° Jihyun Lee Kyungshik Lim
Dept. of Computer Science, Kyungpook National University

요 약

비대칭 율이 높은 비대칭 망에서 동작하는 TCP의 성능은 상향 링크의 혼잡 발생 여부에 좌우된다. 상향 링크에 실리는 응답 패킷 트래픽이 링크의 대역폭을 넘어서게 되면 응답 패킷이 손실되거나 전송 지연이 길어져서 성능을 저하시킨다. 상향 링크의 혼잡 문제를 해결하는 대표적인 방법으로 응답 패킷 필터링/재생성 기법을 들 수 있다. 본 논문에서는 해당 기법의 문제점을 해결한, 송신측 TCP의 상태에 따라 응답 패킷 재생성 작업을 수행하는 동적 패킷 재생성 기법을 제안한다. 이 기법은 정확한 응답 패킷을 재생성하고, 이를 순서 뒤바뀜 없이 송신측에 전송하도록 하여 혼잡 제어 구간에서의 성능을 향상시킨다. 또, TCP가 혼잡 제어 상태에 있는 동안에만 응답 패킷 재생성 작업을 수행하도록 하여 불필요한 응답 패킷 트래픽과 패킷 재생성에 드는 부하를 줄인다.

1. 서론

주위에 존재하는 망의 상당수는 물리적이거나 경제적인 이유로 상향 링크와 하향 링크의 대역폭을 달리 두고 있는 비대칭 망이다. 비대칭 망에서는 상향 링크의 혼잡 발생 여부가 TCP의 성능을 결정짓는 가장 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 상향 링크의 혼잡 발생을 피하거나 발생된 혼잡을 완화시키는 방법을 사용하면 비대칭 망의 TCP 성능을 향상시킬 수 있다.

상향 링크에 발생하는 혼잡을 줄이기 위한 다양한 연구가 이미 제안되어 있으며, 크게 패킷 헤더 등을 압축하여 패킷의 크기를 줄이는 방법, 수신측에서 응답 패킷을 적게 생성하도록 하는 방법, 생성된 응답 패킷을 중간에서 필터링하여 패킷의 수를 줄이는 방법으로 분류할 수 있다[1]. 본 논문에서는 패킷 필터링을 사용하여 상향 링크의 혼잡을 줄인 망에서의 TCP 성능 향상에 초점을 맞추고, 기존 연구들이 가지고 있는 문제점들을 해결하여 더 높은 성능을 얻을 수 있는 새로운 기법을 제안한다.

본 논문의 2장에서는 현재까지 제안된 여러 가지 기법들 중 대표적인 비대칭 망 TCP 성능 향상 기법에 대해 설명한다. 3장에서는 논문에서 제안하는 동적 응답 패킷 재생성 기법에 대해 설명한다. 4장에서는 논문에서 제안하는 기법을 다양한 환경에 적용하였을 때의 성능 측정 결과를 분석하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

응답 패킷 필터링(AF) 기법[1]을 사용는 경우, 줄어든 응답 패킷 때문에 혼잡 윈도우의 증가 속도가 느려지고 데이터 트래픽이 몰리는 문제점이 발생한다[2]. 이를 해결하기 위해 응답 패킷 재건(AR) 기법[1]이 제안되어 있으며, 이와 유사한 기법으로 응답 패킷 압축 및 해제(AC/C) 기법[1,3]이 있다.

AF는 혼잡 구간이 시작되는 지점의 전송 큐를 검색하여 같은 TCP 연결에 해당하는 응답 패킷이 있는 경우 하나만 남기고 모두 제거한다. 이와 같은 방법은 상향 링크에 실리는 응답 패킷 트래픽을 대폭 줄일 수 있어 높은 비대칭 율의 망에서도 훌륭한 혼잡 완화 효과를 얻을 수 있다. 이 기법을 단독으로 사용할 때의 문제점을 보완하기 위해 일반적으로 AR을 같이 사용한다.

AR은 혼잡 구간을 벗어난 곳에서 필터링 된 응답 패킷을 미리 정해진 기준을 적용하여 다시 만들어내는 방법이다. 이렇게 만들어진 응답 패킷들은 필터링 전과 유사한 상태로 되돌아갈 수 있게 해 주어 송신측의 혼잡 윈도우 증가 속도를 높이고 데이터 트래픽이 몰리는 현상을 완화시켜 준다.

AC/C는 전송 큐에서 응답 패킷을 제거할 때 제거되는 패킷의 정보를 남아있는 패킷에 저장하도록 하여 차후 이 정보를 바탕으로 제거된 응답 패킷을 제거되기 전의 상태로 되돌리는 방식이다. 이 방식은 AF/AR에 비해 재생성 된 응답 패킷의 시퀀스 넘버 정확도가 높지만 압축된 응답 패킷의 드랍을 고려하지 않는다.

AF/AR 및 AC/C가 가지는 문제점은 다음과 같다. 첫 째, 비트 에러에 의해 응답 패킷이 드랍되거나 큰 RTT를 갖는 망에서 동작하는 경우, 재생성한 응답 패킷 사이의 전송 간격이 잘못 계산되어 응답 패킷들 사이의 전송 순서가 뒤바뀔 수 있다. 둘 째, 필터링 되지 않은 응답 패킷에 손실이 발생하면 필터링 전에 비해 재생성된 응답 패킷의 수가 적어질 수 있다. 세 째, 혼잡 제어 구간을 벗어난 상태에서도 계속해서 응답 패킷의 재생성을 수행하여 불필요한 트래픽을 생성하고 및 재생성 작업을 수행하는 노드의 부하를 높인다.

3. 동적 응답 패킷 재생성

동적 응답 패킷 재생성 기법(DAR)은 필터링으로 제거되었거나

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10562-0)와 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원으로 수행되었음.

지연 응답된 응답 패킷을 재생성하는 기능, 재생성된 응답 패킷을 송신측으로 전송할 때 패킷 사이의 시간 간격을 계산하는 기능, 응답 패킷 재생성 기능이 동작하는 기간을 결정하기 위해 송신측 TCP가 혼잡 제어 구간에 있는지의 여부를 예측하는 혼잡 제어 상태 예측 기능으로 구성된다.

3.1 응답 패킷 재생성

송신측에서 전송한 데이터 패킷의 시퀀스 넘버와 정확히 일치하는 응답 패킷을 재생성하기 위해서 시퀀스 넘버 리스트를 사용한다. 시퀀스 넘버 리스트는 여러 개의 엔트리를 링크드 리스트로 연결한 형태를 갖는다. 정보 유지를 위해 사용되는 메모리의 양을 줄이기 위해 각각의 엔트리에는 크기가 같은 다수의 연속된 세그먼트를 합친, 블록 단위의 정보를 저장한다. 그림 1은 시퀀스 넘버 리스트의 엔트리 구조이다. (next는 다음 엔트리의 포인터를, start는 블록의 시작 시퀀스 넘버를, end는 종료 시퀀스 넘버를, size는 블록을 구성하는 데이터 세그먼트의 크기를 의미한다.)

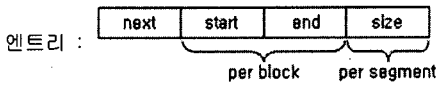

그림 1. 시퀀스 넘버 리스트 엔트리 구조

수신측에서 전송한 새로운 응답 패킷을 수신하면, 정상적인 응답 패킷(중복 응답 패킷, 순서가 뒤바뀐 응답 패킷 제외)들 중 가장 마지막으로 수신한 응답 패킷의 응답 시퀀스 넘버와 새로 수신된 응답 패킷의 응답 시퀀스 넘버를 사용하여 시퀀스 넘버 리스트를 검색한다. 리스트에서 두 응답 시퀀스 넘버 사이에 존재하는 데이터 패킷의 시퀀스 넘버를 모두 찾아낸 후 이들을 응답 시퀀스 넘버로 갖는 응답 패킷들을 재생성한 후 송신측으로 전송한다. 재생성된 응답 패킷들은 일정 시간 간격을 두고 송신측으로 전송하여 데이터 트래픽이 몰리는 현상을 방지한다. 새로운 응답 패킷을 수신할 때마다 응답을 받은 데이터 패킷들의 정보를 시퀀스 넘버 리스트에서 제거한다.

응답 패킷 재생성 기능은 데이터 패킷 하나 당 하나의 응답 패킷을 생성한다. 이는 수신측이 지연 응답을 사용하고 있더라도 해당 기능을 사용하지 않는 것처럼 만들어 주어 송신측의 혼잡 윈도우 증가 속도를 높인다[4].

3.2 전송 시간 간격 계산

필터링 된 응답 패킷을 재생성할 경우, 재생성된 응답 패킷들은 다음 응답 패킷을 받기 전까지 모두 전송측으로 전송되어야만 응답 패킷 사이의 순서 뒤바뀜 현상이 발생하지 않는다. 그림 2는 AR의 시간 간격 계산식과 DAR의 시간 간격 계산식을 비교한 것이다. AR은 응답 패킷의 손실 등을 고려하지 않으므로 시간 간격이 크게 계산되어 16번 패킷과 14번 패킷이 서로 뒤바뀌는 문제가 발생한다. 이 문제를 개선하기 위해서 일시적인 전송 지연이나 송신측의 전송 윈도우 크기 제약으로 인한 지연 등을 제외하는 시간 간격 계산식이 필요하다.

새로운 응답 패킷을 수신하면 가장 마지막으로 수신한 응답 패킷과의 시간차 Δt를 계산한다. 계산된 시간차를 사용하여 응답 패킷 사이의 평균 시간차 Δt_{avg}를 구한다. 여기서, Δt_{avg}는 시간 간격 계산 시 제외해야 하는 지연 값들이 반영되어 있는 값이다. 일반적으로 Δt_{avg}보다 큰 Δt에는 망의 일시적인 지연이나 전송 윈도우 제약으로 인한 대기 시간이 포함되어 있을 확률이 높다. 따라서, 이러한 값들을 제외한 나머지 값들을 평균한 유효 평균 시간차 Δt_{eff}를 구하여 패킷 사이의 전송 시간 간격 계산에 사용한다. (식 (1)의 t_{new}는 새로 수신한 응답 패킷이며,

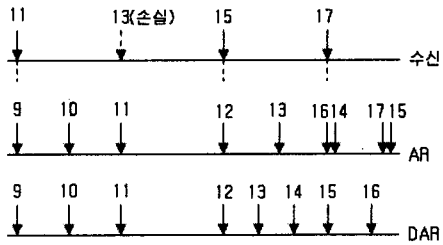

그림 2. 패킷 손실로 인한 응답 패킷 전송 순서 뒤바뀜

t_{prev}는 가장 마지막으로 수신한 응답 패킷의 수신 시간이다.)

$$\Delta t = t_{new} - t_{prev} \quad (1)$$

$$\Delta t_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}{n} \quad (2)$$

$$\Delta t_{eff} = \frac{\sum_{\Delta t < \Delta t_{avg}} \Delta t_i}{\sum_{\Delta t < \Delta t_{avg}} i} \quad (3)$$

재생성 응답 패킷 사이의 시간 간격 δt는 아래의 식을 사용하여 구한다. (아래의 식에서 δa는 시퀀스 넘버 리스트에서 구한, 두 응답 패킷 시퀀스 넘버 사이에 존재하는 데이터 패킷의 개수이다.)

$$\delta t = \frac{\Delta t_{eff}}{\delta a} \quad (4)$$

응답 패킷 사이의 시간 간격이 구해지면 재생성한 패킷을 해당 간격만큼의 지연 시간을 두면서 송신측으로 전송한다. 새로 수신한 응답 패킷까지 전송한 후에는 다음 응답 패킷이 수신될 때까지 기다린다.

본 논문에서 제안하는 계산식을 사용할 경우, 그림 2의 DAR처럼 17번 응답 패킷이 수신되기 전에 재생성 패킷들을 모두 전송할 수 있게 되어 순서 뒤바뀜 현상 발생 문제가 크게 개선된다.

3.3 혼잡 제어 상태 예측

필터링 된 응답 패킷을 재생성하여 성능을 향상시키는 방법은 송신측이 혼잡 구간에 있는 동안에만 유효하므로 송신측이 해당 구간을 벗어난 후에는 응답 패킷의 재생성이 성능에 별다른 영향을 미치지 못한다. 따라서, 송신측의 혼잡 윈도우를 예측하여 필요한 구간에서만 응답 패킷을 재생성하도록 하여 성능 감소 없이 불필요한 응답 트래픽과 부하를 없앤다.

시퀀스 넘버 리스트는 송신측으로부터 수신한, 응답을 받지 못한 데이터 패킷의 정보가 들어있다. 리스트 내에 저장되어 있는 데이터 패킷들의 전체 크기 변화를 지속적으로 관찰하여 크기 증가 기울기가 감소하는 부분을 slow-start 구간을 벗어난 시점으로 판단하고 응답 패킷 재생성 동작을 중지한다. 해당 구간을 벗어난 상태에서 송신측으로부터 리스트 내에 있는 데이터 패킷을 수신하게 될 경우, 송신측의 재전송 타임아웃이 일어난 것으로 판단하고 응답 패킷 재생성 동작을 다시 수행한다.

4. 성능 평가 및 분석

DAR의 성능을 평가하기 위해 ns-2 네트워크 시뮬레이터[5]를 사용하였다. 시뮬레이터의 버전은 2.28이며, 레드햇 9.0 기반의 펜티엄4 시스템에 설치하여 성능을 측정하였다.

그림 3은 시뮬레이션에 사용된 비대칭 망 환경 설정을 보여준다. 두 라우터 사이의 구간을 비대칭 링크로 구성하였으며, 상향 링크의 대역폭 변화에 따른 성능의 변화를 확인하기 위해 대역폭을 8, 16, 24Kbps로 변화시켜 가면서 성능을 측정하였다. 또, 비트 에러로 인한 데이터 패킷 및 응답 패킷의 드랍이 발생되는 환경에서의 성능을 확인하기 위해 비트 에러가 없는 경우와 10^{-7}, 10^{-6}의 비트 에러 율을 갖는 경우로 나누어 성능을 측정하였다. 송신측과 수신측 사이에는 단일 TCP 연결이 주어져있으며, 시뮬레이션 시간을 50초로 하여 총 50회 반복한 후 얻어진 결과들의 평균값을 취하였다.

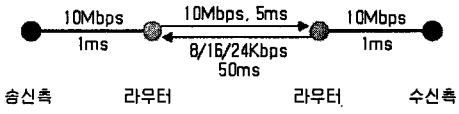

그림 3. 시뮬레이션 환경

그림 4는 상향 링크의 대역폭과 비트 에러 율에 따른 각 기법별 TCP 처리량을 나타내고 있다. 아무 기법도 적용하지 않은 경우(그림의 Normal 막대 바)의 처리량은 상향 링크의 대역폭이 감소함에 따라 큰 폭으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이에 반해 AF/AR과 AF/DAR을 적용시켰을 때에는 아무 기법도 적용하지 않은 경우에 비해, 비트 에러가 있는 환경에서는 최소 21%에서 최대 204%, 비트 에러가 없는 환경에서는 최소 66%에서 최대 232%의 처리량 증가가 이루어졌음을 확인할 수 있다. AF/AR과 AF/DAR 사이의 처리량 차이를 살펴보면, AF/DAR의 처리량이 비트 에러가 있는 환경에서는 5%에서 26%, 비트 에러가 없는 환경에서는 0.1%에서 0.2% 더 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 DAR의 응답 패킷 재생성 기능과 전송 시간 간격 계산 기능이 AR에 비해 혼잡 제어 구간에서의 처리량을 더 높일 수 있기 때문이다.

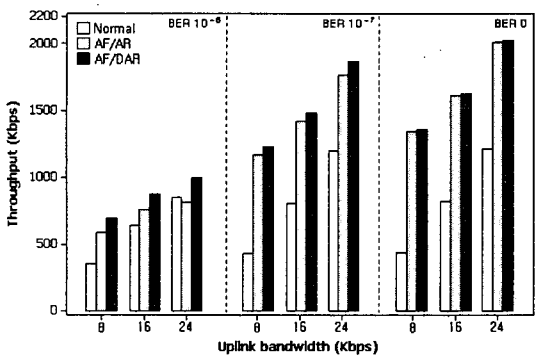

그림 4. 일반 환경, AF/AR, AF/DAR에서의 TCP 성능

그림 5는 비트 에러 율 10^{-7}, 상향 링크 대역폭 8Kbps인 환경에서 AF/AR과 AF/DAR의 평균치에 가장 가까운 시뮬레이션 결과를 하나씩 선택한 후 시간의 변화에 따른 응답 패킷의 트래픽 변화를 나타낸 것이다. (송신측 혼잡 제어가 일어난 시점이 서로 다르다). 그림에서, AR은 통신이 이루어지는 동안 계속해서 필터링 된 응답 패킷을 재생성하지만, DAR은 송신측 TCP가 혼잡 제어 구간 내에 있는 동안에만 응답 패킷을 재생성하므로 전체적으로 적은 양의 응답 패킷 트래픽을 유지하고 있다. AR은 패킷 드랍으로 인한 혼잡 제어 발생 시 응답 패킷

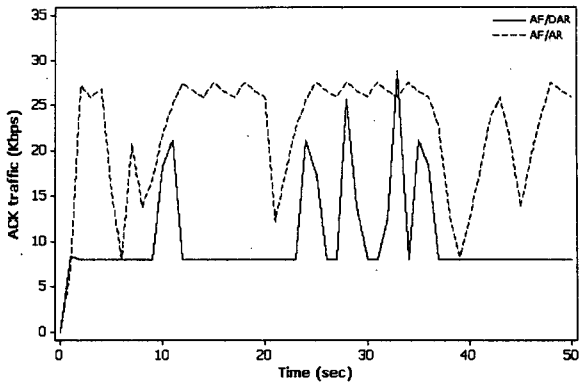

그림 5. 응답 패킷 트래픽

의 트래픽이 줄어드는 형상을 보이지만, DAR은 혼잡 제어 발생 시 응답 패킷의 재생성 량이 많아져서 트래픽이 늘어나는 형상을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과를 통해서 DAR이 AR보다 혼잡 제어 구간을 더 빨리 벗어날 수 있도록 하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서 제안하는 DAR은 필터링 된 응답 패킷을 재생성할 때 데이터 패킷의 시퀀스 넘버와 일치하는 응답 패킷을 만들 수 있도록 하여 정확한 응답 패킷의 재생성이 이루어질 수 있도록 하며, 지연 응답 기법을 사용하지 않는 환경과 같은 효과를 발생시켜 혼잡 윈도우의 증가 속도를 높인다. 또한 재생성 된 응답 패킷 사이의 전송 시간 간격을 결정하는 새로운 계산식을 사용하여 응답 패킷의 전송 순서 뒤바뀜 현상을 개선, 성능을 향상시킨다. 그리고 TCP가 혼잡 제어 구간 내에 있을 때에만 응답 패킷 재생성을 수행하도록 하여 응답 패킷 재생성에 드는 부하와 응답 패킷 트래픽을 줄인다.

향후 과제로서 다양한 비대칭 망 환경에서 DAR 기법의 성능을 확인하는 연구가 필요하며, 응답 패킷 필터링이 적용되지 않는 망에서의 DAR 적용에 관한 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] H. Balakrishnan et al., "TCP Performance Implications of Network Path Asymmetry," RFC3449, December 2002.

[2] C. Barakat and E. Altman, "On ACK Filtering on a slow Reverse Channel," Proceedings of the First Cost 263 International Workshop on Quality of Future Internet Services, pp. 80-92, 2000.

[3] N. Samaraweera, "Return Link Optimization for Internet Service Provision Using DVB-S networks," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 29, Issue 3, July 1999.

[4] T. Iang and D. Floreani, "The Impact of delayed Acknowledgements on TCP performance over Satellite Links," Proceedings of the first workshop on Wireless mobile internet, pp. 56-61, 2001.

[5] K. Fall and K. Varadhan, ns Notes and Documentation, LBNL, April 2005, http://www.isi.edu/nsnam/ns/.