

재전송을 고려한 무선 전송 단에서 실시간 데이터 전송 모델의 분석

Analysis of a Wireless Transmitter Model Considering Retransmission for Real Time Traffic

김태용*, 김영용**
(Tae-Yong Kim, Young Yong Kim)

Abstract - There are two types of packet loss probabilities used in both the network layer and the physical layer within the wireless transmitter such as a queueing discard probability and transmission loss probability. We analyze these loss performances in order to guarantee Quality of Service (QoS) which is the basic of the future network. The queueing loss probability is caused by a maximum allowable delay time and the transmission loss probability is caused by a wireless channel error. These two types of packet loss probabilities are not easily analyzed due to recursive feedback which, originates as a result at a queueing delay and a number of retransmission attempts. We consider a wireless transmitter to a M/D/1 queueing model. We configurate the model to have a finite-size FIFO buffer in order to analyze the real-time traffic streams. Then we present the approaches used for evaluating the loss probabilities of this M/D/1/K queueing model. To analyze the two types of probabilities which have mutual feedbacks with each other, we drive the solutions recursively. The validity and accuracy of the analysis are confirmed by the computer simulation. From the following solutions, we suggest a minimum of 'a Maximum Allowable Delay Time' for real-time traffic in order to initially guarantee the QoS. Finally, we analyze the required service rate for each type utilizing real-time traffic and we apply our valuable analysis to a N-user's wireless network in order to get the fundamental information (types of supportable real-type traffics, types of supportable QoS, supportable maximum number of users) for network design.

Key Words :무선 전송, 전송 손실, 큐 손실, 실시간 데이터, QoS (Quality of Service)

1. 무선 네트워크 환경

1.1 무선 네트워크 환경에서 실시간 데이터 전송

본문 무선 네트워크 환경은 여러 부분에서 유선 환경과의 차이점을 가지며 전송 단에서의 손실이 유선 환경과 가장 구별되는 특징이다. 실시간 데이터의 경우 전송 단에서의 데이터 손실은 실시간 데이터의 최대 지연 허용 시간을 초과한 전송 지연에 의한 큐 손실과 무선 채널에서의 전송 손실 두 가지로 나눌 수 있다. 전송 단에서 패킷은 최대 지연 허용 시간을 넘지 않는 동안 재전송 기회를 부여하게 된다. 따라서 재전송으로 인한 서버 이용률이 증가하게 되고, 큐에서의 전송 지연은 증가하게 된다. 큐에서의 전송지연 증가는 곧 새로운 패킷 도착 시에 큐에서 최대 지연 허용 시간을 초과할 확률이 높아짐을 의미한다. 이러한 두 가지 패킷 손실 확률은 다음의 상호 피드백 관계를 갖게 된다. 새로 도착한 패킷을 서비스 하는 비율은 재전송 기회(전송 시에 채널에서의 손실 확률 결정)에 의해 결정된다. 이로 인해 큐에서의 지연 크기(실시간 데이터의 최대 지연 허용 시간 초과 따른 손실 확률 결정)가 달라져, 최대 지연 허용 시간 까지 재전송 하는 시스템이라면, 피드백으로 인해 재전송 횟수가 달라진다.

본 논문에서는 전송 단을 FIFO M/D/1/K 큐로 모델링 하였다. 무한한 크기를 갖는 버퍼를 고려한 일반적인 FIFO M/D/1 큐이지만, 실시간 데이터의 최대 지연 허용 시간을 고려하여 패킷 서비스 시간에 따른 유한한 크기의 버퍼를 갖는다. 큐에 쌓인 패킷의 전송지연으로 인해 새로 도착한 패킷의 최대 지연 허용 시간 안에 전송할 수 없다고 판단될 때 큐 손실이 발생하고 이를 분석하였다. 또한 전송 손실을 분석하기 위해 재전송에 따른 양방향 피드백을 고려한 모델을 분석하였다. 결과를 바탕으로 먼저 지원 가능한 최소의 전송지연 허용 시간을 구하여 서비스 가능한 실시간 데이터의 종류를 판단하였다. 이후 실시간 데이터의 QoS를 만족하는데 필요한 서비스 속도를 분석하였다.

2. 시스템 모델과 분석

2.1 시스템 모델

전송 단 모델은 서비스 속도가 $\mu(t)$ 이고 무선 채널에서의 손실을 줄이기 위해 선택적 재전송 프로토콜을 사용한 모델을 고려했다. $\lambda(t)$ 의 패킷 도착 속도를 갖는 전송 단에서 도착 패킷은 서버에서 서비스 받기 전에 도착 버퍼에 누적되는 큐 모델로 생각할 수 있다. 서버는 재전송 우선 서비스 원칙을 사용하여, 재전송 버퍼가 비어 있지 않는 한 재전송 데이터를 먼저 서비스 하도록 한다. 여기서 피드백 채널은 에러 없다고 고려하여 Round Trip Delay(RTD) 이후 ACK과 NACK을 언제나 성공적으로 전송할 수 있다.

저자 소개

* 金台容 : 延世大學 電氣電子學科 碩士課程
** 金泳龍 : 延世大學 電氣電子學科 助教授 · 工博

2.2 큐 모델 분석

전송 단을 M/D/1 큐를 가정하면, 재전송 우선 서비스 원칙을 고려하였기에 재전송 패킷의 버퍼는 항상 비어있게 되고, 도착 패킷과는 달리 전송 지연을 겪지 않는다[3]. 즉 도착 버퍼의 패킷은 서버의 서비스 속도에서 재전송 패킷 서비스 속도를 제외한 서비스 속도를 갖는다.

$$\mu_a(t) = \mu(t) - \mu_{re}(t) \quad (1)$$

이 둘의 비율은 다음과 같다[2].

$$\mu_a(t) = \mu_{a,k}, \text{ if } k * RTD \leq t \leq (k+1) * RTD \quad (2)$$

, where

$$\mu_{a,k} = \sum_{i=0}^{k-1} (\mu - \mu_{a,i}) \prod_{j=1}^{k-i} E_{ch}(j), \quad 0 \leq k < n$$

$$\mu_{a,k} = \sum_{i=k-n}^{k-1} (\mu - \mu_{a,i}) \prod_{j=1}^{k-i} E_{ch}(j), \quad k \geq n$$

$$\mu_{a,0} = 0$$

채널에 따른 전송 시의 에리는 Rayleigh Fading Channel을 고려하여, Memory ARQ에서의 k번째 전송의 손실 확률 알려진 값을 사용하였다[1].

$$E_{Ch}(k) = e^{-S_t/k} \sum_{i=k}^{\infty} \frac{(S_t/R)^i}{i!}, \quad k = 1, \dots, n$$

, S_t : threshold
, R : mean power signal to noise ratio

2.3 재전송 고려한 M/D/1/K 큐

먼저 큐 손실을 구한다. M/D/1 큐에서 무한 한 크기의 버퍼를 가정하더라도 실시간 데이터의 경우 QoS를 만족시키기 위해 최대 지연 허용 시간 D를 가지며 최대 지연 허용 시간 안에 서비스 할 수 없는 경우 도착 패킷은 손실된다. 이로 인해 제한되는 K 크기의 버퍼를 갖는다.

$$K = \left\lceil \frac{D \mu_a(t)}{RTD} \right\rceil \quad (4)$$

이러한 M/D/1/K 큐의 안정된 상태에서의 j개의 패킷이 존재 할 확률 분포는 다음과 같이 알려졌다[4].

$$P_0(K) = \frac{1}{1 + \rho b_{K-1}}, \quad P_j(K) = \frac{b_j - b_{j-1}}{1 + \rho b_{K-1}}, \quad j = 1, \dots, K-1$$

$$P_K(K) = 1 - \frac{b_{K-1}}{1 + \rho b_{K-1}} \quad (5)$$

$$\text{where, } b_K = \sum_{i=0}^K \frac{(-1)^i}{i!} (K-i)^i e^{(K-i)\rho} \rho^i, \quad \forall K \geq 1$$

도착 큐의 손실 확률 는 도착 패킷이 큐에 쌓이지 않고 손실될 확률이며, 이는 큐가 꽉 차있는 확률 $P_K(K)$ 이다.

$$P_{Q_loss} = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{K-1} \frac{(-1)^i}{i!} (K-i)^i e^{(K-i)\rho} \rho^i}{1 + \rho \sum_{i=0}^{K-1} \frac{(-1)^i}{i!} (K-i)^i e^{(K-i)\rho} \rho^i} \quad (6)$$

전송 손실은 재전송을 포함한 전송 시에 무선 채널에서의 잡음으로 인한 패킷 손실을 의미한다.

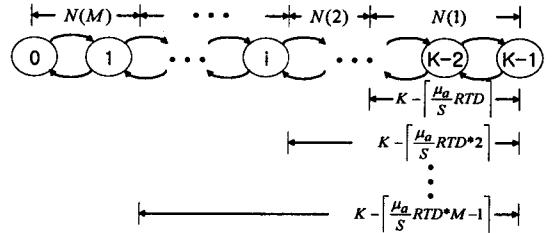


그림 1. 재전송 가능 횟수 마르코프 모델

(3)에서 재전송 횟수에 따른 손실 확률과 다음의 지연 허용 시간 안에서의 최대 재전송 횟수(M)를 고려해 전송 손실 값을 구한다. 그림 1. 의 마르코프 모델을 고려하면 실시간 데이터 패킷의 지연 허용 시간 안에 총 전송 횟수는 M 이다.

$$M = \left\lceil \frac{D}{RTD} \right\rceil \quad (7)$$

큐에서의 지연은 재전송 가능 횟수를 제한하고, 따라서 도착 큐에 패킷이 들어왔을 때 쌓여있는 큐의 크기가 재전송과 최초 전송 1회를 포함해 총 j번 전송 가능한 위치에 쌓일 확률을 구하여야 한다. 패킷의 총 전송 횟수 확률 분포 $N(j)$ 는 다음과 같다.

$$N(1) = \prod_{i=K-\left\lceil \frac{\mu_a}{S} RTD \right\rceil}^{K-1} P_i \quad N(j) = \prod_{i=K-\left\lceil \frac{\mu_a}{S} RTD * (j-1) \right\rceil}^{K-1} P_i, \quad j = 2, \dots, M-1$$

$$N(M) = \prod_{i=0}^{K-\left\lceil \frac{\mu_a}{S} RTD * (M-1) \right\rceil} P_i$$

, K : queue size, P_i : state probability of queue

평균 전송 손실 확률 P_{T_loss} 는 재전송을 포함한 총 전송 횟수에 따른 패킷 손실 확률 $E_{Ch}(k)$ 과 재전송 횟수를 결정지어 주는 $N(j)$ 로 다음과 같이 구한다.

$$P_{T_loss} = \sum_{j=1}^M N(j) \cdot F(j)$$

, where $F(j) = E_{Ch}(1) * E_{Ch}(2) * \dots * E_{Ch}(j)$

2.4 안정된 상태의 손실 분석

큐 손실과 전송 손실 각각이 주는 피드백 값들을 반복적으로 사용하며 평균 전송 지연 시간 W의 변화를 기준으로 안정된 상태에서의 큐 손실과 전송 손실의 균사적 해를 구하도록 하였다. 먼저 큐 손실에 영향을 미치는 피드백 항목은, 앞장에서 재전송 횟수 확률 분포를 통해 평균 재전송 횟수를 구해 이를 이용하여 $\mu_a(t)$ 를 구한다. 이 값은 다시 큐의 지연시간에 영향을 주고 이로 인해 재전송 확률 분포가 달라진다. 이러한 두 개의 관계식에서 재귀적으로 균사적인 해를 구한다. 기준은 기존에 알려진 식 (10)의 평균 전송 지연 시간 값(W_N)을 사용하였으며, W_N 변화가 한 개의 패킷을 서비스 하는데 걸리는 시간($S/\mu_a(t)$) 보다 작다면 반복적인 계산을 종료하고 이 값을 균사적인 분석 값으로 산출하였다.

$$W_N = \left(N - 1 - \frac{\sum_{k=0}^{N-1} b_k - N}{\rho b_{N-1}} \right)^T \quad (10)$$

3. 시뮬레이션 결과 분석 및 결론

3.1 예제 모델 분석

시뮬레이션 시간	100000 s
패킷 크기	1000 bit
서비스 속도	1 M bps
최대 지연 허용 시간	30 ms
Round Trip Delay	5 ms
Memory ARQ에서 총 전송 횟수에 따른 채널 손실 확률	1회: 0.3229, 2회: 0.0589, 3회: 0.0074, 4회: 0.0007, 5회: 0.0001, 그 이상: 0

표 1. 시뮬레이션과 분석의 비교를 위한 매개변수

그림 2에서 분석한 모델이 시뮬레이션 결과에 근사함을 알 수 있고, 두 손실의 결과로 재전송 제한에 따른 손실 확률을 얻고 이에 따라 지원 가능한 최대 지연 허용 시간의 최소값을 다음 과정을 통해 구할 수 있다.

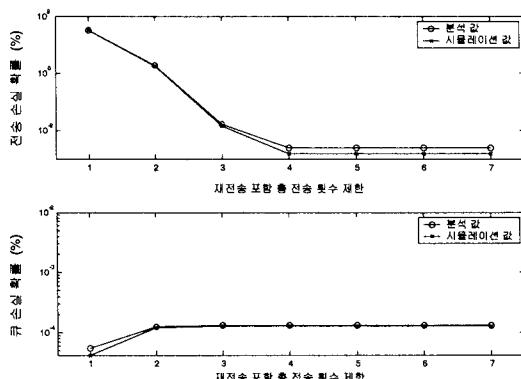


그림 2. 큐 손실과 전송 손실의 분석 값과 시뮬레이션 결과 비교

분석 결과를 바탕으로 우리는 서비스 하는 패킷의 QoS 요구사항을 기준으로 최저 재전송 가능 횟수를 보장하는 D (전송 지연 허용 시간)를 정한다.

$$D \geq RTD * N_R \quad (12)$$

이때 QoS 보장을 위해 최대 허용 전송 지연 시간의 최소값은 Memory ARQ를 가정했을 때의 채널의 손실 확률과 밀접한 관계가 있음을 알아내고 QoS 보장을 위해 요구되는 총 전송 가능 횟수 N_R 을 근사적인 값으로 구하였다.

$$N_R = \{\max(\lfloor r \rfloor) \mid F(r) < PER \text{ requirement}\}$$

, where $F(r) = E_{Ch}(1) * E_{Ch}(2) * \dots * E_{Ch}(r) \quad (13)$

예를 들면 QoS에서의 손실 확률 0.1% 의 보장을 위해 최소한 보장되어야 하는 최대 전송 지연 허용 시간은 재전송을 포함한 총 전송 가능 횟수가 3회 이상 지는 시간(15ms)보다 커야 실시간 데이터의 QoS를 보장해 줄 수 있다. 이를 근거

로 표 2의 QoS를 요구하며 1M bps의 도착 속도를 갖는 실시간 데이터에 대하여 각 데이터의 QoS 요구사항을 만족시키는 최소한의 필요 서비스 속도(그림 3)를 구하였다.

패킷 손실 확률 (PER)	0.1 %
최대 지연 허용 시간 (D)	15, 20, 30, 40, 50 ms

표 2. QoS 요구 사항

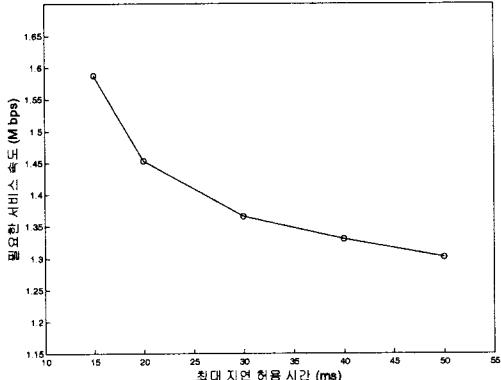


그림 3. 실시간 데이터의 QoS를 만족 시키기 위해 요구되는 서비스 속도

3.2 결론

우리는 전송 단에서의 네트워크 계층에서 본 큐 손실과 물리 계층에서 본 전송 손실 두 가지 패킷 손실을 분석하였다. 분석에 따른 의미 있는 결과로 제한된 전송 허용 시간을 가지는 실시간 전송의 경우, 지원 가능한 최소의 전송 지연 허용 시간을 구하고 이후 서비스의 QoS를 만족시키기 위해 필요한 서비스 속도를 분석하였다. 본문의 분석을 이용하면 QoS를 보장하는 서비스 망을 구성하는데 기초적인 정보(QoS 보장에 따른 최대 지원 사용자 수, 사용자 수에 따른 지원 가능 실시간 데이터의 종류)를 얻을 수 있다.

* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성·지원사업의 연구결과로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] J. F. Hayes, "Adaptive feedback communications" IEEE Trans. Commun. Technology, vol. 16, Feb. 1968.
- [2] Zhi quan and Jong-Moon Chung "Asymptotic Loss of Real-Time Traffic in Wireless Mobile Networks with Selective-Repeat ARQ" IEEE Commun. Letters, vol. 8, no. 9, September 2004
- [3] Zhi quan and Jong-Moon Chung "Analysis of Packet Loss for Real-Time Traffic in Wireless Mobile Network with ARQ Feedback" IEEE Commun. WCNC 2004
- [4] Olivier Brun and Jean-Marie Garcia "Analytical Solution of Finite Capacity M/D/1 Queue" J. Appl. Prob. 37, 2000
- [5] Leonard Kleinrock "Queueing Systems Volume 1: Theory", January 1975