

패킷부분재전송기법의 수율 최저 한계

Lower Bound of Partial Packet Recovery

정 충 교*

Jeong, Choong-Kyo

Abstract

Wireless carrier sense multiple access (CSMA) systems are widely used but show extremely different transmission efficiency according to the operation environment. Simulation or prototype deployment is needed to see the transmission efficiency of a wireless CSMA system with the partial packet retransmission scheme. The lower bound for the transmission efficiency of such a system is found mathematically in this work. This shows how much the partial packet retransmission scheme improves the transmission efficiency quantitatively. It also shows that the maximum throughput is obtained at higher offered load compared to the conventional CSMA system without the partial packet transmission. The result of this work can be applied to IEEE 802.11 networks or wireless mesh networks.

키워드: 패킷부분재전송, 오류정정부호, 자동패킷재전송, 반송과감지다중접속

Keywords: *partial packet retransmission, forward error correction, automatic repeat request, retransmission, carrier sense multiple access*

1. 서론

데이터를 패킷으로 묶어 전송할 때 발생할 수 있는 전송비트오류에 대응하는 기술은 두 가지이다. 하나는 오류정정부호(FEC: Forward Error Correction)이고 다른 하나는 자동패킷재전송(ARQ: Automatic Repeat Request)이다. 유선통신에서는 일반적으로 전송비트오류가 많이 발생하지 않으므로 오류정정부호를 사용하지 않고 자동패킷재전송 기술을 사용한다. 아주 가끔씩만 발생하는 전송비트오류를 해결하기 위해 매 패킷마다 오류정정부호를 삽입하면 효과에 비해 비용이 크기 때

문이다. 어쩌다 한 번 전송비트오류가 날 때마다 전송비트오류가 발생한 패킷을 재전송하는 방법으로 링크의 신뢰성을 확보하는 것이다.

무선통신에서는 전송비트오류가 유선통신에 비해 훨씬 자주 발생하므로 오류정정부호를 사용하는 것이 일반적이다. 전송비트오류가 빈번히 발생하는 상황에서 오류정정부호를 사용하지 않고 재전송에만 의존한다면 패킷에 전송비트오류가 있을 때마다 매번 패킷을 재전송해야 하고 게다가 재전송 자체도 성공 확률이 낮으므로 재전송 부담이 지나치게 많아져 전송 효율이 떨어지기 때문이다. 따라서 하나의 패킷 내에 적은 전송비트오류가 발생하면 오류정정부호를 이용하여 수신기가 스스로 오류를 보정함으로써 일차적인 전송비트오류를 해결하고 한 패킷 내에서 발생한 전송비트오류의 수가 너무 많아 오류정정부호로 이를 복구할 수 없는 경우에만 재전송을 하는 것이 일반적이다.

* 강원대학교 컴퓨터정보통신공학전공 교수, 공학 박사

패킷을 재전송하는 경우 그 패킷 전체를 재전송하는 것이 일반적이지만 패킷의 일부분에서만 전송비트오류가 있는 경우에는 패킷 전체를 재전송하지 않고 비트전송오류가 발생한 부분을 포함하여 패킷의 일부분만을 재전송함으로써 전송 링크의 효율을 높일 수 있다. 이렇게 하는 기술이 최근에 제안되었는데 [1, 2] 이를 이 논문에서는 패킷부분재전송(PPR: Partial Packet Retransmission) 기법이라 부르기로 한다. 이 기술은 무선통신 환경을 염두에 두고 제안된 것이다. 유선통신에서는 전송비트오류 확률이 매우 낮아 그 의미를 찾기 어려운 반면 무선통신에서는 일부 비트만 오류인 패킷이 빈번히 수신되기 때문에 이 패킷부분재전송 기법이 큰 효과를 발휘한다. 무선통신에서는 무선전송로의 전송특성 자체로 인한 전송비트오류가 빈번히 발생하며 이런 전송비트오류가 연달아 발생하는 특성이 있다. 또 분산제어통신방식을 사용하는 경우 둘 이상의 송신자가 보낸 패킷들이 충돌하는 경우가 빈번히 발생하는데 이것도 역시 일부 비트만 오류인 패킷이 수신되는 원인이 된다.

널리 사용되고 있는 분산제어방식인 반송파감지 다중접속(CSMA: Carrier Sense Multiple Access)의 성능은 유선통신과 무선통신의 경우 큰 차이가 있다. 유선통신에서는 전송로의 왕복지연시간 동안만 충돌이 발생하지 않으면 성공적인 패킷 전송이 보장되기 때문에 일반적인 환경에서 90% 근처의 전송효율을 달성할 수 있다. 그러나 무선통신에서는 송수신기간 왕복지연시간에 의한 충돌 발생 외에 송신기의 송수신 모드 전환시간에 따른 충돌과 보이지 않는 단말기(hidden terminal)로부터 전송된 패킷과의 충돌이 추가적으로 가능하여 전송효율이 유선통신에 비해 크게 떨어진다.

이 중에서 특히 보이지 않는 단말기로부터 전송된 패킷과의 충돌은 네트워크 환경에 따라 그 영향이 매우 크다. 패킷 전송이 많은 단말기들이 좁은 지역에 밀집된 경우에는 반송파감지기능의 효과가 매우 낮아져 극단적인 경우 전송효율이 반송파 감지를 하지 않는 고전적인 aloha [3] 시스템에 접근하게 되는 반면 그 반대의 경우에는 유선통신 시스템에 접근하게 된다. 이런 이유로 하여 일반적인 무선통신 반송파감지시스템의 성능을 수학적으로 분석하는 일은 매우 어려우며 특정 무선통신 반송파감지시스템의 성능을 평가하려면 모의실험이나 실제 실험을 해야 한다.

무선통신 반송파감지시스템에 패킷부분재전송기법을 적용할 때도 이런 복잡성을 그대로 유지가 되면서 패킷부분재전송기법 탓으로 인해 그 복잡성이 더욱 높아지므로 정확한 전송효율을 수학적으로 산출하기가 어렵다. 이 논문에서는 반송파감지 기능이 없는 무선통신시스템에 패킷부분재전송

기법을 적용할 때의 전송효율을 수학적으로 산출한다. 이 결과는 반송파감지 기능이 있는 무선통신시스템에 패킷부분재전송기법을 적용할 때 얻을 수 있는 전송효율의 최소 한계에 해당한다. 반송파감지 기능이 있는 무선통신시스템에서 각 단말기의 부하와 지역적 밀집도에 따라 반송파감지 기능의 효과가 달라지는데 그 최악의 경우는 반송파감지 기능이 없을 때이기 때문이다. 위에서 언급한 바와 같이 구체적인 특정 통신시스템의 전송효율은 모의실험이나 실제 실험을 통해 측정해야 하겠지만 어떤 경우에도 이 논문에서 제시한 최저한계는 보장된다. 이 결과는 전통적인 IEEE 802.11 무선근거리통신망이나 무선랜네트워크 등에 적용될 수 있다.

서론에 이어 2장에서는 이 논문의 내용과 관련된 기존 연구를 살펴보고 관련 지식을 서술한다. 3장에서는 분석 모델을 설정하고 수학적 분석을 수행하여 그 수치적 결과를 제시하고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

패킷재전송기법은 다시 고정재분할재전송기법과 임의재전송기법으로 나눌 수 있다. 고정재분할재전송기법[1]은 패킷을 전송하기 전에 패킷을 일정 길이의 조각들로 분할한 후 각 조각마다 오류확인부호를 첨부한 후 이들을 다시 하나의 패킷으로 조합하여 보내고 수신측에서는 각 조각별 오류 발생 여부를 점검하고 오류가 발생한 조각에 대해서만 송신측에 재전송을 요구하여 부분적인 재전송이 이루어지도록 하는 방식이다. 이 경우의 패킷형식을 그림 1에 보였다.

헤더	조각1	CRC1	조각2	CRC2	...	조각n	CRCn
----	-----	------	-----	------	-----	-----	------

그림 1 고정재분할재전송기법에서 사용하는 패킷 형식

임의재전송기법[2]이란 송신측에서는 예전과 같은 방법으로 패킷을 송신하되 수신측에서 패킷 단위로 오류 발생 여부를 점검하고 오류가 발생한 경우에 물리 계층의 도움을 받아 패킷을 구성하는 각 심볼마다의 오류 발생 가능성을 판단하고 오류가 발생했을 가능성이 높은 부분만을 재전송하도록 요구하는 방식이다. 단 각 심볼의 오류 가능성을 판단하기 위해 물리계층을 도움 받으면 수신기가 Viterbi 디코더[4]를 사용하거나 코드간 해밍거리(Hamming distance) [5]가 큰 (코딩 이득이 큰) 주파수확산통신 같은 코딩기술을 이용해야 한

다.

물리계층의 도움을 받는다고 해도 각 심볼별 오류 여부의 판단이 정확할 수는 없다. 그러나 전송 비트오류가 다른 패킷과의 충돌에 의한 것이라면 전송비트오류가 충돌이 지속되는 시간동안 지속적으로 발생하게 되므로 쉽게 오류가 발생한 부분을 판별해 낼 수 있음이 연구를 통해 밝혀진 바 있다 [2]. 이 기법에서는 또 충돌이 패킷의 앞부분에서 발생하는 경우 헤더가 망가져 패킷 동기를 잡을 수 없고 패킷 헤더에 있는 필수 정보를 알 수 없게 되는 문제를 해결하기 위해 각 패킷에 헤더와 동일한 내용을 꼬리부분에 추가해 준다.

고정재분할재전송기법은 구현이 단순한 반면 각 조각마다 추가되는 오류확인코드 때문에 패킷 당 헤더에 의한 부대비용(overhead)이 크다는 점과 아주 작은 양의 전송비트오류가 발생한 경우에도 그 부분이 포함된 조각 전체를 모두 재전송해야 된다는 점이 단점이다. 임의재전송기법은 구현이 다소 복잡한 반면 전송비트오류가 발생한 부분만 재전송하며 패킷 당 헤더에 의한 부대비용이 낮다는 점이 장점이다. 그 밖에 고정재분할재전송기법의 경우 조각의 크기를 상황에 따라 최적의 크기를 산정해 내고 이에 맞게 설정해야 한다는 운영상의 부담이 있다.

3. 모델 설정 및 성능 분석

무한히 많은 단말기들로부터 일정 길이의 패킷들이 포아송 프로세스에 따라 만들어지며 만들어진 패킷은 버퍼링 없이 즉시 하나의 무선 채널을 통해 전송된다. 수신기는 임의재전송기법에 따라 작동하며 전송비트오류가 발생한 부분은 적절한 절차에 따라 재전송된다. 재전송되는 부분은 새로 발생된 데이터와 합쳐져 패킷 길이는 항상 일정하게 만들어진다. 새로이 발생하는 데이터와 재전송되는 데이터를 합쳐 전체 패킷 발생률이 λ packets/s이라고 가정한다. 각 패킷의 길이가 일정하므로 패킷의 전송시간도 일정하며 이를 t_L s/packet이라고 하자. 그러면 시간 t 동안 k 개의 패킷이 발생할 확률은 $P_k(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^k}{k!}$ 이며 이 때 부하율을 $\rho = \lambda t_L$ 로 정의한다.

특정 패킷 하나를 관심패킷이라 부르기로 하고 이 패킷과 다른 패킷의 충돌 상황을 분류하면 그림 2와 같이 네 가지 경우를 생각할 수 있다. 즉 관심패킷은 (가)에서처럼 전체가 성공적으로 전송될 수도 있고 (나)와 (다)에서처럼 일부만 전송에 성공하고 나머지는 재전송되어야 하는 경우도 있으며 전체가 손실되는 (라)와 같은 경우도 있다.

시스템의 수율을 구하기 위해 먼저 관심패킷 중 성공적으로 전송되는 부분의 전송 시간 T 의 기대값을 구한다.

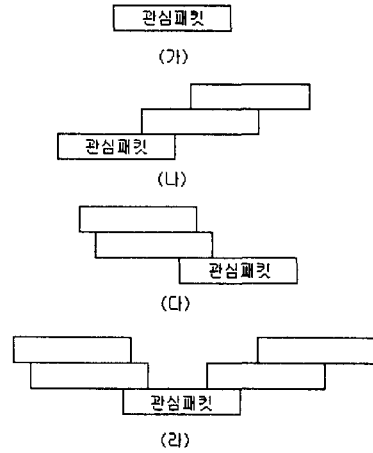


그림 2 패킷 충돌의 네 경우

(가) 관심패킷이 발생한 순간 충돌이 없고, 관심패킷 전송이 끝날 때까지 충돌이 없는 경우로서 관심패킷 발생 순간부터 그 전 t_L 동안 다른 패킷 발생이 없고, 관심패킷 발생 순간부터 그 후 t_L 동안에도 다른 패킷 발생이 없는 때에 해당한다. 이렇게 될 확률은 $P_0(t_L) \cdot P_0(t_L) = e^{-\lambda t_L} \cdot e^{-\lambda t_L} = e^{-2\lambda t_L} = e^{-2\rho}$ 이며 이 경우 T 의 기대값은 t_L 이다.

(나) 관심패킷이 발생한 순간 충돌이 없고, 관심패킷 전송이 끝나기 전에 다른 패킷이 적어도 하나 이상 발생하는 경우로서 관심패킷의 앞부분은 성공적으로 전송된다. 이렇게 관심패킷이 발생한 순간 충돌이 없으려면 관심패킷 발생 순간부터 그 전 t_L 동안 다른 패킷 발생이 없어야 하며 그 확률은 $P_0(t_L) = e^{-\lambda t_L} = e^{-\rho}$ 이다. 이 때 관심패킷 중 성공적으로 전송되는 부분의 전송 시간 T 가 일정 시간 t 보다 작을 확률은 $P(T \leq t) = 1 - e^{-\lambda t}$ 이므로 T 의 기대값은

$$\begin{aligned}
 E[T] &= \int_0^{t_L} t \lambda e^{-\lambda t} dt \\
 &= -t_L e^{-\lambda t_L} - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t_L} + \frac{1}{\lambda} \\
 &= -t_L e^{-\rho} - \frac{1}{\lambda} e^{-\rho} + \frac{1}{\lambda}
 \end{aligned}$$

이다.

(다) 관심패킷이 발생한 순간 이미 전송 중인 개 이상의 다른 패킷들과 충돌하고, 관심패킷이 전송되는 동안 다른 패킷의 발생이 없는 경우로서 관심패킷의 뒷부분은 성공적으로 전송된다. 이렇게 되려면 관심패킷 발생 순간부터 그 후 t_L 동안은 다른 패킷 발생이 없어 하며 그 확률은 $P_0(t_L) = e^{-\lambda t_L} = e^{-\lambda t_L} = e^{-\rho}$ 이다. 이 때 관심패킷 중 성공적으로 전송되는 부분의 전송 시간 T 가 일정 시간 t 보다 작을 확률은 $P(T \leq t) = 1 - e^{-\lambda t}$ 이므로 T 의 기대값은

$$\begin{aligned} E[T] &= \int_0^{t_L} t \lambda e^{-\lambda t} dt \\ &= -t_L e^{-\lambda t_L} - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t_L} + \frac{1}{\lambda} \\ &= -t_L e^{-\rho} - \frac{1}{\lambda} e^{-\rho} + \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

이다.

(라) 관심패킷이 발생한 순간 이미 전송 중인 개 이상의 다른 패킷들과 충돌하고, 관심패킷의 전송이 끝나기 전에 하나 이상의 다른 패킷이 발생하는 경우로서 이 때에는 관심패킷의 앞부분 헤더와 뒷부분 꼬리가 모두 충돌에 의해 손실되므로 수신측에서 관심패킷을 전혀 수신할 수 없게 된다. 이렇게 되려면 관심패킷 발생 순간부터 그 전 t_L 동안 적어도 한 개 이상의 다른 패킷이 발생하고, 관심패킷 발생 순간부터 그 후 t_L 동안에도 하나 이상의 다른 패킷 발생해야 하며 그 확률은

$$\begin{aligned} &\{1 - P_0(t_L)\} \cdot \{1 - P_0(t_L)\} \\ &= (1 - e^{-\lambda t_L}) \cdot (1 - e^{-\lambda t_L}) \\ &= 1 - 2e^{-\lambda t_L} + e^{-2\lambda t_L} \\ &= 1 - 2e^{-\rho} + e^{-2\rho} \end{aligned}$$

이다.

전송시간이 t_L 인 패킷이 발생했을 때 이 중 성공적으로 전송되는 부분의 전송시간 T 의 기대값 $E[T]$ 을 (가) (나) (다) (라)의 네 경우를 모두 고려하여 계산하면

$$\begin{aligned} E[T] &= e^{-2\rho} \cdot t_L + 2e^{-\rho} \cdot \left(-t_L e^{-\rho} - \frac{1}{\lambda} e^{-\rho} + \frac{1}{\lambda}\right) \\ &\quad + (1 - 2e^{-\rho} + e^{-2\rho}) \cdot 0 \end{aligned}$$

네트워크의 수율 r 은 발생한 총 트래픽(재전송 트래픽 포함)에 $E[T]$ 를 곱하여 구할 수 있으므로

$$\begin{aligned} r &= \lambda E[T] \\ &= 2(e^{-\rho} - e^{-2\rho}) - \lambda t_L e^{-2\rho} \end{aligned}$$

$$= 2(e^{-\rho} - e^{-2\rho}) - \rho e^{-2\rho}$$

그림 3은 부하율 ρ 의 변화에 따른 수율 변화를 보여준다. 비교를 위해 이 그림에는 aloha 네트워크와 slotted aloha 네트워크의 수율 변화도 함께 보였다. aloha 네트워크의 성능은 패킷부분재전송 기법을 사용하지 않는 반송과감지다중접속망의 최저한계라고 볼 수 있다.

부하율 ρ 의 변화에 따른 수율을 관찰하기 위해 수율 r 을 ρ 에 대해 미분하면

$$\frac{dr}{d\rho} = -2e^{-\rho} + 3e^{-2\rho} + 2\rho e^{-2\rho}$$

이다. 그림 4는 $\frac{dr}{d\rho}$ 를 보여준다. ρ 가 약 0.857

일 때 $\frac{dr}{d\rho} = 0$ 이며 이 때의 수율이 약 0.334이며 이것이 최소한계의 최대값이다.

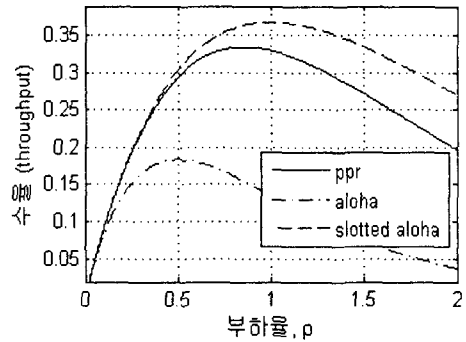


그림 3 부하율 변화에 따른 수율 변화

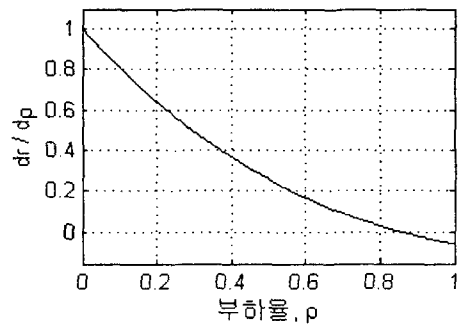


그림 4 부하율 변화에 따른 수율 변화율

5. 결론

매우 널리 사용되고 있으면서도 상황에 따라 매

우 다른 전송효율을 보이는 반송파감지다중접속기술에 패킷부분재전송기법을 도입했을 때 그 전송효율을 알기 위해서는 모의실험이나 실제실험을 해야 한다. 이 논문에서는 모의실험이나 실제실험을 하기 전에 수학적으로 그 최저 한계를 알 수 있도록 수학적 분석 방법을 제시하였다. 분석을 통해 패킷부분재전송기법을 사용하면 그렇지 않은 경우에 비해 전송효율의 최저한계가 얼마나 증가하는지 정량적으로 알게 되었으며 더 높은 부하율에서 전송효율의 최고치가 달성된다는 것을 알게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] Kyle Jamieson and Hari Balakrishnan, "PPR: Partial Packet Recovery for Wireless Networks," In Proc. of the SIGCOMM'07, August 27 - 31, 2007, Kyoto, Japan.
- [2] R. Ganti, P. Jayachandran, H. Luo, and T. Abdelzaher, "Datalink Streaming in Wireless Sensor Networks," In Proceedings of 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SENSYS, November, 2006, Boulder, CO.
- [3] Andrew S. Tanenbaum, Computer Networks, 4th edition, Prentice-Hall 2003.
- [4] J. Hagenauer and P. Hoehner, "A Viterbi Algorithm with Soft-Decision Outputs and its Applications," In Proc. of the IEEE GLOBECOM, Dallas, TX, Nov. 1989.
- [5] John G. Proakis, Digital Communications, 3rd edition, McGraw-Hill 1995.