DCF와 DCF with XOR에서 동적인 트래픽 상태에 따른 네트워크 코딩 지연시간 분석

(Network Coding delay analysis under Dynamic Traffic in DCF without XOR and DCF with XOR)

오 하 영 † 리 준 걸 † 김 종 권 ††
(Hayoung Oh) (Junjie Lee) (Chong-kwon Kim)

요 약 네트워크 코딩은 소스의 패킷이 최종 목적지로 전송되는 데 있어 총 전송 횟수를 줄여 전체 네트워크 측면에서 성능(throughput)의 이득이 있기 때문에 현재 매우 각광받고 있는 무선 기술 중 하나이다. 하지만 소스의 패킷을 최종 목적지까지 보내는데 거치게 되는 중간의 코딩 노드가 다른 소스의 패킷을 네트워크 코딩(XOR)하는 데 필요로 하는 시간(processing delay)과 다른 패킷이 전송될 때까지 해당 패킷이 큐에서 기다려야 하는 시간(queuing delay)이 추가적으로 필요하기 때문에 delay측면에서 손해를 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이런 queuing delay가 각 소스에서 발생한 패킷들의 arrival rate에 매우 의존적임을 분석한다. 또한 패킷 arrival rate에 따른 동적인 트래픽 상태에서 네트워크 코딩을 사용하지 않을 때(DCF without XOR)와 사용할 때(DCF with XOR)를 지연 시간 분석을 통해 비교한다.

키워드 : 네트워크 코딩, XOR, DCF, 큐잉 딜레이

Abstract Network coding is a promising technology that increases the system throughput via reducing the number of transmission for a packet delivered from the source node to the destination node. Nevertheless, it suffers from the metrics of end-to-end delay. Network Coding scheme takes more processing delay which occurs as coding node encodes (XOR) a certain number of packets that relayed by the coding node, and more queuing delay which occurs as a packet waits for other packets to be encoded with. Therefore, in this paper, we analyze the dependency of the queuing delay to the arrival rate of each packet. In addition, we analyze and compare the delay in DCF without XOR and DCF with XOR under dynamic traffic.

Key words : Network coding, XOR, DCF, Queuing delay

· 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원사업(IITA-2009-C1090-0902-0006)의 연구결과로 수행되었음
· 이 논문은 2009년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음
· 본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 창의적연구진흥사업(No. R01-2007-000-20154-0) 지원으로 수행되었음
· 이 논문은 SWCC 2008에서 '네트워크 코딩에서 동적인 트래픽 상태에 따른 지연 시간 분석'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

† 비 회 원 : 서울대학교 컴퓨터공학과
hyoh@popeye.snu.ac.kr
jjlee@popeye.snu.ac.kr
†† 종신회원 : 서울대학교 컴퓨터공학과 교수
ckim@snu.ac.kr

논문접수 : 2008년 9월 16일
심사완료 : 2009년 4월 8일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.
정보과학회논문지: 정보통신 제36권 제3호(2009.6)

1. 서 론

네트워크 코딩은 크게(random) linear network coding과 XOR로 나뉠 수 있다. Linear network coding은 multicast환경에서 패킷이 중간 노드들을 거칠 때마다 변형(linear transformation)되어 목적지가 받고자 하는 패킷 개수만큼 선형 방정식(linear equation)을 받게 되면 해석이 가능하다는 특징이 있다. 이는 각 목적지가 같은 패킷을 불필요하게 받는 것을 막아주고, 목적지의 채널 상황이 다양해서 패킷 성공 수신률이 서로 다를 때 전송 실패 후 재전송 패킷 횟수를 줄여주기 때문에 이득이 있다. 반면, XOR은 Alice-Bob topology, X-topology등 다양한 토폴로지에서 각 소스가 목적지로 패킷 전송 시 중간 노드가 네트워크 코딩 후 1번의 브로드캐스팅을 통해 각 목적지로 패킷을 전송해 패킷 전송 횟수를 줄여주는 기술이다. 따라서 네트워크 코딩 기

술은 네트워크 성능(throughput)을 높여주어 이론 상으로 머물러 있던 네트워크 성능이 실제 네트워크에서도 얻어질 수 있다는 것을 증명할 수 있기 때문에 현재 많은 각광을 받고 있는 기술 중 하나이다. [1]에서는 유선의 multicast환경에서 이를 증명하였고, 추후 많은 논문들에서 무선의 환경에서도 가능함을 보였다.

특히, [2,3]은 XOR이라는 비트 레벨의 네트워크 코딩 기술을 실제로 구현하여 네트워크 코딩을 사용하지 않을 때보다 38%이상 네트워크 성능이 좋아짐을 보여주었다. 또한, 최근에는 신호 레벨에서의 인위적인 간섭(interference)을 이용한 네트워크 코딩이 기존 비트 레벨의 네트워크 코딩 기술보다 전송 횟수를 1번 더 줄일 수 있음을 밝혔다. 이런 네트워크 코딩은 P2P, efficient content distribution, energy efficiency, opportunistic routing등 많은 응용에서 사용될 수 있다.

DCF(Distributed Coordination Function)은 무선 통신의 기본 원리를 제공해주는 표준으로 IEEE 802.11에서 제안되었다. 무선 통신시 각 station은 공기라는 매체를 공유하기 때문에 동시에 패킷 전송시 충돌로 인해 전송 실패가 발생하게 된다. 따라서 DCF는 이러한 충돌의 확률을 줄이기 위해서 각 station들이 전송 전에 임의의 backoff 시간을 정하고, 그 시간을 채널이 idle하다고 판단되는 시간 동안 감소시켜 가장 먼저 0에 도달하는 station이 전송을 행하는 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)를 사용하고 있다. 하지만 일반 DCF는 station이 많아지거나, packet arrival rate가 높아져서 네트워크가 saturation상태가 될수록 패킷간의 많은 충돌로 인해 네트워크 성능 저하가 유발된다.

반면, 네트워크 코딩은 소스의 패킷이 최종 목적지로 전송되는 데 있어 총 전송 횟수를 줄여주기 때문에 네트워크가 saturation될수록 throughput 의 이득이 있다. 하지만 앞서 설명한 바와 같이 중간의 코딩 노드가 다른 소스의 패킷을 네트워크 코딩(XOR)하는 데 필요로 하는 시간(processing delay)과 다른 패킷이 전송될 때까지 해당 패킷이 큐에서 기다려야 하는 시간(queuing delay)이 추가적으로 필요하기 때문에 delay측면에서 손해를 볼 수 있다. 특히, 네트워크가 light loaded 될수록 queuing delay가 커질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이런 queuing delay가 각 소스에서 발생한 패킷들의 arrival rate에 매우 의존적임을 분석한다. 또한 패킷 arrival rate에 따른 동적인 트래픽 상태에서 네트워크 코딩을 사용하지 않을 때(DCF without XOR)와 사용 할 때를 (DCF with XOR) 지연 시간 분석을 통해 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론에 이어 2장에서는 관련 연구에 대하여 설명한다. 3장에서는 queuing delay가 각 소스에서 발생한 패킷들의 arrival rate에 매우 의존적임을 분석하고 이에 따른 동적인 트래픽 상태에서 네트워크 코딩을 사용하지 않을 때(DCF without XOR)와 사용할 때(DCF with XOR)를 지연 시간 분석을 통해 비교한다. 마지막으로 4장에서 결론을 도출한다.

2. 관련연구

2.1 DCF(Distributed Coordination Function)

DCF는 무선망에서 동일한 채널을 공유하고 있는 station들 간에의 충돌을 해결하기 위해 IEEE 802.11에서 제안한 표준이다[4]. 무선망에서 충돌이 불가피한 이유는 station들이 자신과 경쟁하고 있는 다른 station들이 언제 전송을 시작할지 알 수 없어 여러 개의 station들이 propagation delay 이내의 시간에 동시에 전송하는 상황이 발생될 수 있기 때문이다. 따라서 IEEE 802.11 표준에서는 이러한 충돌의 확률을 줄이기 위해서 각 station들이 전송 전에 임의의 backoff 시간을 정하고, 그 시간을 채널이 idle하다고 판단되는 시간 동안 감소시켜 가장 먼저 0에 도달하는 station이 전송을 행하는 CSMA/CA를 사용하고 있다.

2.2 Network Coding

네트워크 코딩은 이론상으로만 존재하던 최적의 네트워크 성능을 전송 패킷 횟수를 줄여 실제 네트워크에서도 가능하도록 만들어 주는 개념이다. 네트워크 코딩은 XOR 혹은(random) linear coding와 같이 크게 2가지로 나뉠 수 있다. XOR이라는 방식은 두 개 이상의 플로우(source-destination pair)가 중간의 같은 노드를 지날 때 네트워크 코딩이라는 연산 후 1번의 브로드캐스팅을 통해 해당 목적지로 전송될 수 있기 때문에 패킷 전송 횟수를 줄이는 방식이다. 반면, linear coding은 multicast 환경에서 중간의 노드들이 패킷을 변형(linear transformation)하여 전송하고, 목적지는 받고자 하는 패킷 개수만큼 선형 방정식(linear equation)을 받기 때문에 이를 해석할 수 있는 방식이다[5]. Linear transformation 이란 패킷이 노드를 거칠 때마다 패킷 앞에 coefficient라는 vector가 붙어 패킷을 변형시키는 것으로 만약 coefficient가 1이면 linear coding을 의미하고, 1보다 작은 값 중에 임의의 값을 선택해 패킷이 linear transformation 되면 random linear coding이라고 한다[6]. 최근에는 무선환경에서 오히려 신호의 간섭을 이용하여 네트워크 코딩의 효과를 보려는 연구와[7] 2계층과 네트워크 코딩의 효과를 동시에 높이려는 cross-layer접근방식의 연구도 진행되고 있다[8].

그림 1에서 i) DCF without XOR는 소스 노드 1과 3에서 각각 발생된 패킷이 네트워크 코딩없이 중간 노드 2를 거쳐 각각의 목적지 노드 3과 1에게 전달될 때 도

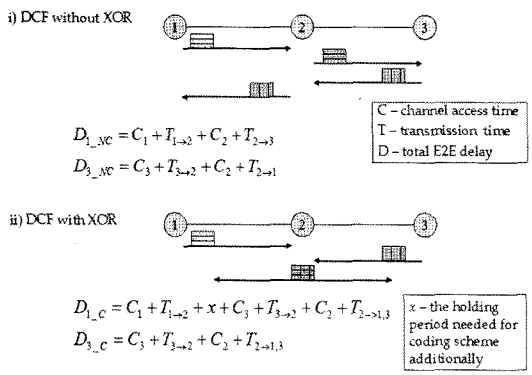

그림 1 DCF without XOR and DCF with XOR

착하는데 걸리는 시간 D_{1_NC}과 D_{3_NC}을 나타낸다. D_{1_NC}은 소스 노드 1이 채널을 잡는 시간(C_1), 소스 노드 1에서 중간 노드 2까지 데이터가 전송되는 데 걸리는 시간($T_{1\to2}$), 중간 노드 2가 채널을 잡는 시간(C_2)과 중간 노드 2에서 목적지 노드 3까지 데이터가 전송되는 데 걸리는 시간($T_{2\to3}$)들을 모두 합한 시간이다. 마찬가지로 D_{3_NC}은 소스 노드 3이 채널을 잡는 시간(C_3), 소스 노드 3에서 중간 노드 2까지 데이터가 전송되는 데 걸리는 시간($T_{3\to2}$), 중간 노드 2가 채널을 잡는 시간 (C_2)과 중간 노드 2에서 목적지 노드 1까지 데이터가 전송되는 데 걸리는 시간($T_{2\to1}$)들을 모두 합한 시간이다.

반면, ii) DCF with XOR은 소스 노드 1과 3에서 각각 발생된 패킷이 중간 노드 2에서 XOR 네트워크 코딩을 통해 각각의 목적지 노드 3과 1에게 전달될 때 도착하는데 걸리는 시간 D_{1_C}과 D_{3_C}을 나타낸다. D_{1_C}은 소스 노드 1이 채널을 잡는 시간(C_1), 소스 노드 1에서 중간 노드 2까지 데이터가 전송되는 데 걸리는 시간($T_{1\to2}$), 중간 노드가 네트워크 코딩을 위해 다른 소스 노드 3으로부터 데이터가 전송될 때까지 큐에서 기다리는 시간(x), 소스 노드 3이 채널을 잡는 시간(C_3), 소스 노드 3에서 중간 노드 2까지 데이터가 전송되는 데 걸리는 시간($T_{3\to2}$), 중간 노드 2가 채널을 잡는 시간(C_2), 중간 노드 2의 브로드캐스팅을 통해 데이터가 목적지 노드 1과 3에게 성공적으로 전송되는 데 걸리는 시간($T_{2\to1,3}$)들을 모두 합한 시간이다. 마찬가지로 D_{3_C}은 소스 노드 3이 채널을 잡는 시간(C_3), 소스 노드 3에서 중간 노드 2까지 데이터가 전송되는 데 걸리는 시간($T_{3\to2}$), 중간 노드 2가 채널을 잡는 시간(C_2)과 중간 노드 2에서 목적지 노드 1과 3에게 데이터가 성공적으로 전송되는 데 걸리는 시간($T_{2\to1,3}$)들을 모두 합한 시간이다.

여기서 주목할 부분은 x라는 기간이다. x는 네트워크 코딩을 위해 추가적으로 필요로 하는 queuing delay기간으로 x의 값은 각 소스 노드에서 발생하는 packet arrival rate(λ)에 의존한다. 그림 2에서 i) case 1은 노드1의 패킷이 코딩 노드 2에 도착한 후, 노드 3의 패킷이 바로 코딩 노드 2로 도착하기 때문에 코딩 노드 2가 두 패킷을 XOR하여 브로드캐스팅 할 수 있는 상황을 보여준다. 이것이 가능한 이유는 노드 1의 패킷이 채널을 잡고 전송하는 동안 t라는 시점에 노드 3에서 λ라는 arrival rate로 패킷이 발생하여 노드 1의 패킷 전송이 완료된 후 바로 노드 3번이 채널을 잡고 패킷을 전송할

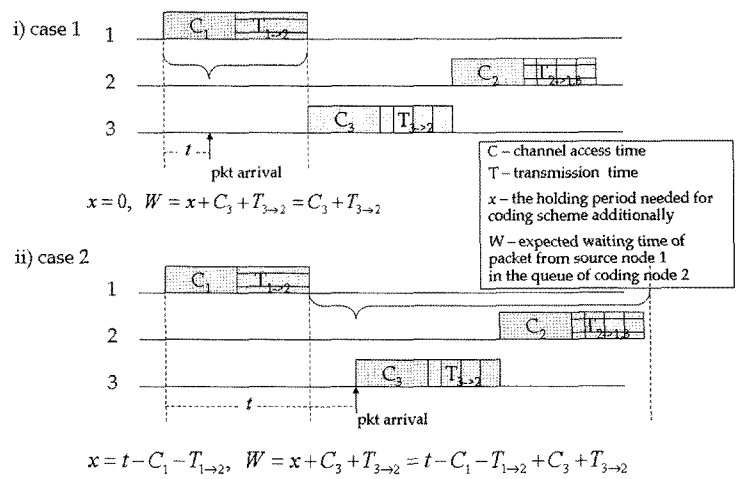

그림 2 x값에 따른 queuing delay(W)의 기대값

수 있기 때문이다.

반면, ii) case 2는 노드1의 패킷이 코딩 노드 2에 도착한 후, x라는 기간 후 t라는 시점에 노드 3에서 λ라는 arrival rate로 패킷이 발생하여 채널을 잡고 코딩 노드 2에게 패킷을 전송하는 경우를 보여준다. 즉 ii) case 2는 i) case 1에 비해서 노드 3에서 패킷이 발생하는 arrival rate (λ)가 느리기 때문에 코딩 노드 2가 양쪽 패킷을 코딩하기 전에 x라는 기간을 추가적으로 기다려야 한다는 단점이 있다. 따라서 각 노드에서 발생하는 패킷이 Poisson arrival을 따른다고 했을 때, 노드 1번에서 발생한 패킷이 코딩 코드의 큐에서 기다려야 하는 시간의 기대값 (W)는 그림 2의 iii) expected W와 같이 구해질 수 있다. 즉, i) case와 같이 packet arrival rate (λ) 빨라서 네트워크 트래픽이 saturated되어 있으면 iii) expected W에서 x=0인 경우가 되기 때문에 W값은 (1)과 같은 식이 되며, ii) case와 같이 packet arrival rate (λ)가 느려서 네트워크 트래픽이 light loaded되어 있으면 iii) expected W에서 $x=t-C_1-T_{1->2}0$인 경우가 되기 때문에 W값은 (2)와 같은 식이 된다.

$$W1=\int_0^{C_1+T_{1\to 2}} \lambda e^{-\lambda t}\cdot\left(C_3+T_{3\to 2}\right)dt \qquad (1)$$

$$W2=\int_{C_1+T_{1\to 2}}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t}\cdot\left(t-C_1-T_{1\to 2}+C_3+T_{3\to 2}\right)dt \qquad (2)$$

결과, 그림 3은 한 패킷이 전달되는 데 걸리는 시간 (T)과 패킷 도착 속도(λ)에 따른 queuing delay(W)의 각 파트에서 발생될 확률을 나타낸 그래프이다. q1은 W1이 발생될 확률을 의미하며, q2는 W2가 발생될 확률을 의미한다. 그림 3과 4를 통해 한 패킷이 전달되는 데 걸리는 시간(T)가 커지거나, packet arrival rate(λ)가 클수록 노드1이 채널을 잡고 데이터를 전송하는 동안 노드 3에서 패킷이 발생될 확률이 커지기 때문에 (q1>q2) W1>W2가 됨을 알 수 있다. 또한, T가 작아지거나, packet arrival rate(λ)가 작아질수록 노드 1이

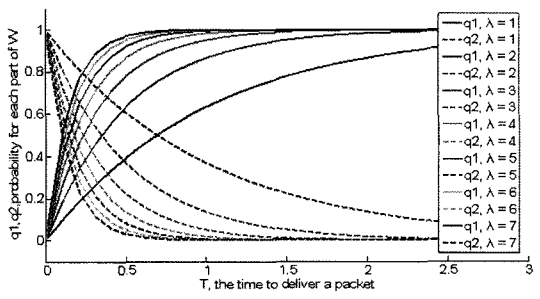

그림 3 T값에 따른 queuing delay(W)의 각 파트가 발생될 확률(q1, q2)

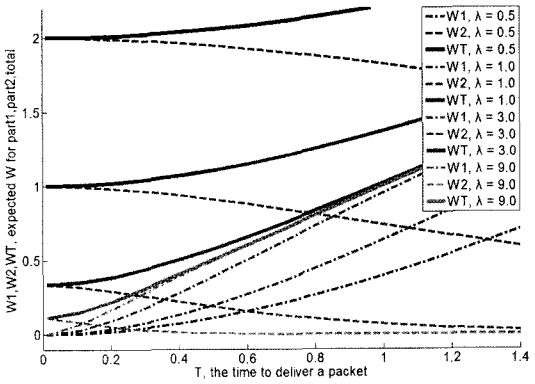

그림 4 T값에 따른 flow 1, flow 2 and total expected W(W1, W2, WT)

채널을 잡고 데이터를 전송하는 동안 노드 3에서 패킷이 발생될 확률이 작아지기 때문에 (q1<q2) W1<W2가 됨을 알 수 있다. 그림 4에서 W1은 q1에 대한 expected W를, W2는 q2에 대한 expected W를 의미하며 WT는 W1과 W2의 Total을 의미한다.

3. 결 론

네트워크 코딩은 성공적인 패킷 전송에 있어 총 전송 횟수를 줄여 전체 네트워크 측면에서 throughput의 이득이 있기 때문에 현재 매우 각광받고 있는 무선 기술 중 하나이다. 하지만 소스의 패킷이 최종 목적지까지 가는데 거치게 되는 중간의 코딩 노드가 다른 소스의 패킷을 네트워크 코딩(XOR)하는 데 필요로 하는 시간 (processing delay)과 다른 패킷이 전송될 때까지 해당 패킷이 큐에서 기다려야 하는 시간(queuing delay)이 추가적으로 필요하기 때문에 delay측면에서 손해를 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이런 queuing delay가 각 소스에서 발생한 패킷들의 arrival rate에 매우 의존적임을 분석한다. 또한 패킷 arrival rate에 따른 동적인 트래픽 상태에서 네트워크 코딩을 사용하지 않을 때 (DCF without XOR)와 사용 할 때(DCF with XOR)를 지연 시간 분석을 통해 비교한다. 본 논문의 결과는 앞으로 네트워크 코딩에 관해 다양한 연구에 기초가 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li, and R. W. Yeung, "Network Information Flow," *(IEEE Transactions on Information Theory*, IT-46, pp. 1204-1216, 2000).

[2] Sachin Katti, Hariharan Rahul, Wenjun Hu, Dina Katabi, Muriel Medard and Jon Crowcroft, *"XORs*

in the Air: Practical Wireless Network Coding," ACM SIGCOMM 2006, Pisa, Italy, September 2006.
[3] Sachin Katti, Dina Katabi, Wenjun Hu, Hariharan Rahul and Muriel Medard, "*Practical Network Coding for WirelessEnvironments*," Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, September 2005.
[4] IEEE, "International Standard [for] Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN Medium.
[5] Shuo-Yen Robert Li, *Senior Member, IEEE*, Raymond W. Yeung, *Fellow, IEEE*, and Ning Cai, "Linear Network Coding," IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL.49, NO.2, FEBRUARY 2003.
[6] S. Chachulski, M. Jennings, S. Katti, and D. Katabi, "Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing," in Proc. of ACM SIGCOMM, 2007.
[7] Sachin Katti, Shyamnath Gollakota, and Dina Katabi, "Embracing Wireless Interference: Analog Network Coding," ACM SIGCOMM, 2007.
[8] Y. E. Sagduyu and A. Ephremides, "On Joint MAC and Network Coding in Wireless Ad Hoc Networks," IEEE Transactions on Information Theory, 2007.

오 하 영

1998년 3월~2002년 2월 덕성여자대학교 전산학(학사). 2001년 11월~2004년 2월 신한 금융 지주회사. 2004년 3월~2006년 2월 이화여자대학교 컴퓨터공학부(석사). 2006년 9월~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 무선랜, 애드혹망, 센서 네트워크, 보안 및 이동성

리 준 걸

2006년 중국 지린 대학교 컴퓨터공학부(학사). 2008년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부(석사). 2008~현재 팬텍&큐리텔의 s/w엔지니어. 관심분야는 무선랜, 애드혹망, 센서 네트워크, 옵티컬 네트워크

김 종 권

정보과학회논문지 : 정보통신
제 36 권 제 3 호 참조