

멀티홉 무선망에서 목적지 기반 네트워크 코딩 가능 노드 결정

안상현*, 타미르*

Destination-Based Network Coding Capable Node Determination in Multi-hop Wireless Networks

Sanghyun Ahn*, Ganzorig Tamir*

요 약

멀티홉 무선망에서 플로우가 교차하는 노드의 네트워크 코딩 가능 여부를 검사하기 위한 조건인 PCC와 RFCC가 기존에 제안되었다. PCC의 경우 교차 노드가 하나인 경우에만 정확하게 동작한다. 이 문제를 해결하기 위해 RFCC는 중간 노드의 디코딩 가능성을 고려한 네트워크 코딩 조건을 정의했다. 그러나 중간 노드의 디코딩 가능성 검사와 디코딩으로 인한 코딩 연산 횟수가 증가하는 문제가 있다. 본 논문에서는 이 오버헤드를 줄이기 위해서 목적지 노드에서만 디코딩이 가능하도록 하고, 이를 위한 네트워크 코딩 조건인 DCC를 정의한다. DCC의 성능을 시뮬레이션 수행을 통해 분석한다.

Key Words : Network coding, Coding condition, Multi-hop wireless network, Coding capable

ABSTRACT

Previously, PCC and RFCC were proposed for the network coding possibility test of flow-intersecting nodes in a multi-hop wireless network. PCC works correctly only if there is only one intersecting node. RFCC solves this problem by defining the network coding conditions with considering decoding

possibility at intermediate nodes. However, this may increase decoding possibility test overhead and coding operations at intermediate nodes. In this paper, we define DCC which can decrease this overhead by allowing decoding only at destinations. We analyze the performance of DCC by simulations.

I. 서 론

유선망의 효율을 높이기 위해 네트워크 코딩이 [1]에서 처음 제안됐으며, [2]는 무선 링크의 브로드캐스트 특성을 활용해서 유니캐스트 전송 효율을 높이기 위해 네트워크 코딩을 사용한 COPE을 제안했다. 무선망에서의 네트워크 코딩 기법에 대한 연구는 다양한 계층에 대해서 진행되었다^[3,4], [5-10]은 멀티홉 무선망 환경에서 라우팅과 관련된 네트워크 코딩 기법에 대한 연구로, [5-6]은 네트워크 코딩 기회를 극대화시키는 중앙집중형 라우팅 방식을, [7-9]는 중앙집중형이 아닌 분산형으로 네트워크 코딩 가능성을 고려한 라우팅 방식을 제안했다. [7-10]은 멀티홉 무선망 환경에서 코딩 가능 노드를 결정하는 조건을 정의했다. [7-9]는 플로우들이 만나는 교차(intersecting) 노드에서의 네트워크 코딩 가능성을 검사하기 위한 네트워크 코딩 조건을 제시했다. [7]은 플로우 상에 단일 교차 노드가 존재하는 경우만 제대로 동작하며, 다수의 교차 노드가 존재할 때는 디코딩이 안 되는 문제가 발생한다. 따라서 [8], [9]는 다수의 교차 노드가 플로우 상에 존재하는 경우에 대한 네트워크 코딩 조건을 제안했다. [10]은 코딩 가능성을 높이기 위해서 플로우 상의 노드가 아닌 경우에도 엮들기를 통한 네트워크 코딩 가능성을 검사할 수 있도록 하는 네트워크 코딩 조건을 제안했다. 그러나 이 경우 인코딩 가능성을 높일 수는 있지만 플로우 상의 모든 노드뿐만 아니라 주변 노드들에 대해서도 네트워크 코딩 가능성을 검사하기 때문에 네트워크 코딩 가능성 검사에 따른 오버헤드가 커지는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 플로우 상에 다수의 교차 노드가 존재하는 경우에 효과적으로 네트워크 코딩 가능성 검사를 할 수 있도록 해주는 네트워크 코딩 조건인 DCC(Destination Coding Condition)를 제안한다. DCC의 성능을 다수의 교차 노드가 존재하는 경우에

* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2015R1A2A2A04005646).

* First and Corresponding Author : University of Seoul Department of Computer Science and Engineering, ahn@uos.ac.kr, 종신회원

* University of Seoul Department of Computer Science and Engineering, 학생회원

논문번호 : KICS2016-10-288, Received October 4, 2016; Revised November 11, 2016; Accepted January 9, 2017

대한 네트워크 코딩 조건인 RFCC(Reinforced Coding Condition)^[8,9]의 성능과 시뮬레이션을 통해 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 기존에 제안된 플로우 상의 교차 노드에서의 네트워크 코딩 조건에 대해서 소개하며, III절에서는 본 논문에서 제안하는 목적지 기반 네트워크 코딩 조건인 DCC에 대해서 설명한다. IV절에서는 Qualnet 기반의 시뮬레이션을 통해 제안 방식의 성능을 분석하며, 마지막으로 V절에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

[7]은 두 개 플로우 간의 네트워크 코딩 가능성을 만족하는 코딩 노드 c 를 결정하는 PCC(Primary Coding Condition)를 정의했다.

(PCC1) There exists $d_1 \in D(c, F_1)$ such that $d_1 \in U(c, F_2)$ or $d_1 \in N(s_2)$, $s_2 \in U(c, F_2)$. AND

(PCC2) There exists $d_2 \in D(c, F_2)$ such that $d_2 \in U(c, F_1)$ or $d_2 \in N(s_1)$, $s_1 \in U(c, F_1)$.

여기서 s_i , d_i 는 각각 i 번째 소스와 목적지를, F_i 는 플로우 f_i 의 경로를 의미한다. $D(n, F_i)$ 는 F_i 에서 노드 n 보다 하향(downstream)에 있는 노드들의 집합을, $U(n, F_i)$ 는 F_i 에서 노드 n 보다 상향(upstream)에 있는 노드들의 집합을 나타낸다. $N(s_i)$ 는 노드 s_i 의 1-홉 이웃 노드들의 집합을 의미한다.

그러나 플로우 경로 상에 여러 개의 교차 노드가 존재하는 경우 PCC를 적용하면 코딩 가능 노드가 잘못 결정될 수 있으며, 예를 들어, 그림 1에서 D_3 은 P_3 을 디코딩해낼 수 없다 (두 노드 간 가는 점선은 전송을 엿들음(overhear) 수 있음을, P_i 는 F_i 의 패킷을 의미하며, 소스 노드는 S_i , 목적지 노드는 D_i , 교차 노드는 R_i , 그 외 노드는 N_i 로 표시되어 있다). 따라서 [8], [9]에서 RFCC(Reinforced Coding Condition)를 정의했으며, 다음 조건 중 하나만 만족하면 c_i 는 코딩 가능 노드가 된다. 여기서 F_x 는 플로우 f_i 의 경로이며, F_x 상 n 개의 잠재적인 코딩 가능 노드(교차 노드)를 소스에서 목적지쪽으로 c_i , $i = 1, 2, \dots, n$, 이라 하고, f_x 와 f_i 가 만나는 노드를 c_i 라 한다.

(RFCC1) There exists $k \in (D(c_{i-1}, F_x) \cap U(c_i, F_x)) \cup c_i$ such that $k \in U(c_{i-1}, F_{i-1})$ or $k \in N(s_1)$, $s_1 \in U(c_{i-1}, F_{i-1})$. OR

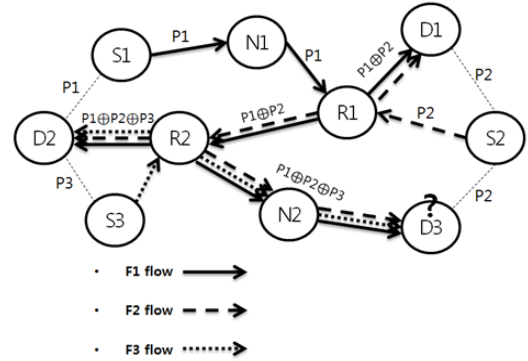


그림 1. 목적지 D_3 에서 패킷 P_3 을 디코딩할 수 없는 세 개의 플로우에 대한 PCC 예[6,7]
Fig. 1. An example of PCC with three flows where the destination D_3 can not decode the packet P_3 [6,7]

(RFCC2) There exists $t \in D(c_i, F_i)$ such that $t \in N(q)$, $q \in (D(c_{i-1}, F_x) \cap U(c_i, F_x)) \cup c_{i-1}$. OR

(RFCC3) There exists $t \in D(c_i, F_i)$ such that $t \in U(c_j, F_j)$ or $t \in N(s_j)$, $s_j \in U(c_j, F_j)$, for $j < i$.

RFCC의 경우 플로우 상의 중간 노드에서 디코딩이 가능한 경우 디코딩을 하도록 허용함으로써 목적지에서 원하는 패킷을 수신할 수 있도록 하고 있다. 즉, 그림 1에서 N_2 가 $P_1 \oplus P_2$ 를 엿들 수 있는 경우 (즉, N_2 가 R_1 의 이웃 노드인 경우) N_2 가 $P_1 \oplus P_2 \oplus P_3$ 로부터 P_3 을 디코딩해서 D_3 에게 전송하면 되기 때문에 R_2 는 코딩 가능한 노드가 된다. 그러나 RFCC의 경우 교차 노드의 코딩 가능성 검사를 위해 모든 중간 노드에 대해 조건 검사를 해야 하기 때문에 오버헤드가 증가하는 단점이 있다.

III. 목적지 기반 네트워크 코딩 조건

본 논문에서는 멀티홉 무선망 환경에서 여러 플로우 간 네트워크 코딩이 교차 노드에서 가능한지 여부를 결정하는 오버헤드를 줄이기 위해서 RFCC와 달리 디코딩을 목적지에서만 하도록 제한한다. 이를 위해 PCC를 만족하는 교차 노드 R_n 에 대해서 목적지 노드 d_i (d_i 는 플로우 f_i 의 목적지 노드)에서의 디코딩 가능성을 검사하기 위한 DCC(Destination Coding Condition)가 만족되면 R_n 은 f_i 를 위한 코딩 가능 노드가 된다.

(DCC1) There exists $d_i \in D(R_n, F_i)$, such that $(d_i \in (D(R_{n-1}, F_{jk}) \cap U(R_n, F_{jk})) \cup R_{n-1})$ or $(d_i \in N(k))$, $k \in (D(R_{n-1}, F_{jk}) \cap U(R_n, F_{jk})) \cup R_{n-1}$. OR

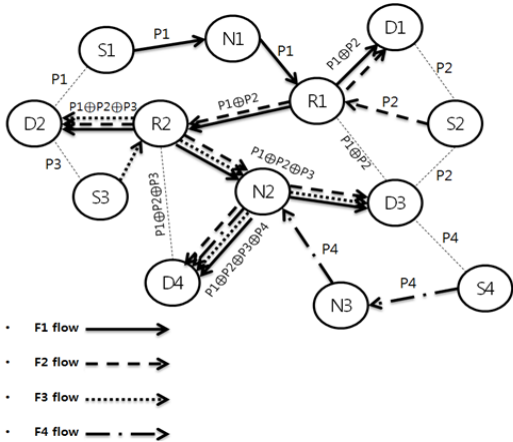


그림 2. DCC 기반 코딩 가능 노드 R1, R2, N2 결정
Fig. 2. Determining R1, R2 and N2 as coding capable nodes based on DCC

(DCC2) There exists $d_i \in D(R_n, F_i)$, such that $d_i \in (D(R_{n-1}, F_j))$ or $(d_i \in N(k), k \in D(R_{n-1}, F_j))$ for $i \neq j$.

여기서 F_{jk} 는 f_j 와 f_k 가 인코딩된 플로우의 경로를 의미한다. (DCC1)은 그림 2에서 D3가 R1과 R2 사이 (R1 포함)에 존재하는 노드로부터 f_1, f_2 의 인코딩된 패킷인 $P1 \oplus P2$ 를 수신할 수 있는 이웃 노드이던지 또는 D3가 R1과 R2 사이의 노드이면 된다는 것이다. (DCC2)는 D3가 f_1 에서 R1보다 하향에 있던지 또는 f_1 에서 R1보다 하향에 있는 노드의 이웃 노드이면 f_1, f_2 의 인코딩된 패킷을 $P1 \oplus P2$ 를 수신함으로써 원래 수신하고자 하는 $P3$ 를 수신할 수 있음을 의미한다.

IV. 성능 분석

Qualnet 기반의 시뮬레이션을 이용해서 DCC와 RFCC를 비교했다. 시뮬레이션 망은 그림 3과 같이 10개 노드로 구성했으며, 시뮬레이션 시간은 30초로 설정했고, IEEE 802.11b와 CBR 트래픽을 사용했다. 표 1에 시뮬레이션 환경 파라미터들이 제시되어 있다.

그림 4는 플로우 수에 따른 중간 노드에서의 네트워크 코딩 인코딩 횟수를 보여준다. RFCC는 중간 노드에서 디코딩을 할 수 있기 때문에 목적지에서만 디코딩이 가능한 DCC보다 코딩 횟수가 1.5배 정도로 많다.

그림 5는 플로우가 3개인 경우에서의 패킷 전송 간격(interval)에 따른 중간 노드에서의 네트워크 코딩 인코딩 횟수를 보여준다. 패킷 전송 간격이 커질수록 생성되는 패킷 수가 작아지며, 따라서 중간 노드에서

표 1. 시뮬레이션 파라미터들
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Simulation area	1000m × 1000m
Traffic model	CBR
Number of nodes	10
Simulation time	30 s
MAC protocol	IEEE 802.11b
Number of flows	3~6 (default 3)
Interpacket interval	1 packet/5~40ms
Packet size	512 bytes

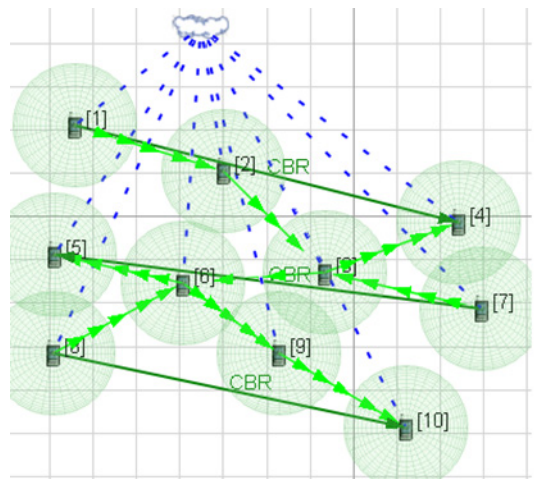


그림 3. 10개 노드와 3개 플로우로 구성된 시뮬레이션 망
Fig. 3. Simulation network with 10 nodes and 3 flows

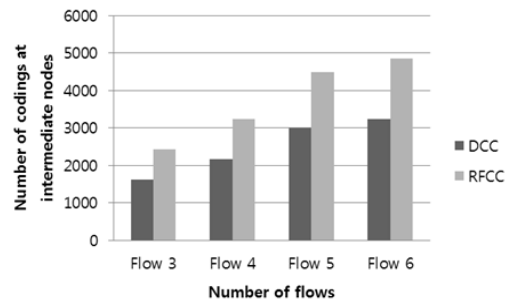


그림 4. 플로우 개수에 따른 중간 노드에서의 인코딩 연산 횟수
Fig. 4. The number of encoding operations at intermediate nodes vs. the number of flows

의 코딩 가능성이 줄어들게 된다.

그림 6은 플로우가 3개인 경우의 패킷 전송 간격에 따른 패킷 전송 성공률을 보여준다. 패킷 전송 간격이 커지면 충돌 가능성이 줄어들어서 패킷 전송 성공률

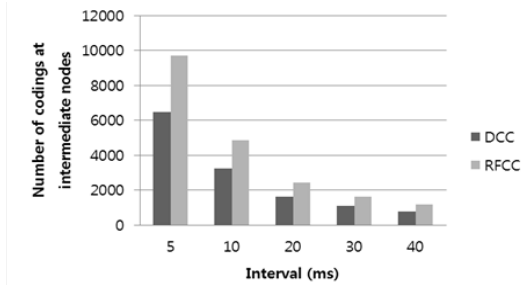


그림 5. 패킷 전송 간격에 따른 중간 노드에서의 인코딩 연산 횟수
 Fig. 5. The number of encoding operations at intermediate nodes vs. inter-packet interval

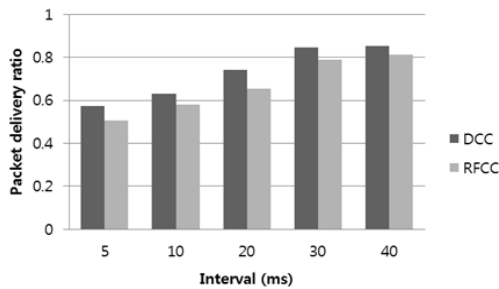


그림 6. 패킷 전송 간격에 따른 패킷 전송률
 Fig. 6. Packet delivery ratio vs. inter-packet interval

이 증가한다. 전반적으로 DCC가 패킷 전송 성공률이 RFCC보다 높게 나타났다. 그 이유는 RFCC의 경우 중간 노드에서 디코딩이 성공적으로 되지 않으면 목적지 노드에서 원하는 패킷을 수신할 수 없는 가능성이 존재하기 때문이다. 중간 노드에서의 디코딩이 성공하려면 중간 노드가 디코딩에 필요한 패킷을 성공적으로 엿들어야만 한다. 그러나 무선 링크의 가변적인 특성으로 인해 제대로 엿들지 못한 경우 RFCC가 불필요하게 인코딩한 결과가 되어 목적지에서 성공적으로 수신하지 못하게 된다.

V. 결 론

본 논문에서는 여러 개의 플로우가 존재하는 멀티홉 무선망에서 네트워크 코딩으로 인한 이득을 극대화하면서도 인코딩, 디코딩으로 인한 오버헤드를 줄임으로써 전송 효율을 높이기 위한 네트워크 코딩 조건인 DCC를 정의했다. DCC는 RFCC와 달리 중간 노드에서의 디코딩 가능성 검사를 수행하지 않아도 된다는 점에서 효율적이다. 시뮬레이션을 통해 DCC의 성능이 RFCC보다 코딩 연산 횟수, 패킷 전송 성공률 측면에서 우수함을 보였다.

References

- [1] R. Ahlswede, N. Cai, S. Li, and R. Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204-1216, 2000.
- [2] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Médard, and J. Crowcroft, "XORs in the air: practical wireless network coding," in *Proc. ACM SIGCOMM*, vol. 16, no. 3, pp. 497-510, 2008.
- [3] G. Lee, Y. Shin, J. Koo, and S. Choi, "Practical implementation and performance evaluation of random linear network coding," *J. KICS*, vol. 40, no. 9, pp. 1786-1792, 2015.
- [4] S. Khan, M. Alam, N. Müllner, and M. Fränzle, "Cooperation and network coding based MAC protocol for VANETs," in *Proc. IEEE VNC*, pp. 64-67, Dec. 2015.
- [5] B. Ni, N. Santhapuri, Z. Zhong, and S. Nelakuditi, "Routing with opportunistically coded exchanges in wireless mesh networks," in *Proc. IEEE WiMesh*, pp. 157-159, Sept. 2006.
- [6] S. Sengupta, S. Rayanchu, and S. Banerjee, "An analysis of wireless network coding for unicast sessions: the case for coding-aware routing," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1028-1036, May 2007.
- [7] J. Le, J. C. S. Lui, and D. M. Chiu, "DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks," in *Proc. IEEE ICDCS*, pp. 462-469, 2008.
- [8] B. Guo, H. Li, C. Zhou, and Y. Cheng, "General network coding conditions in multihop wireless networks," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-5, 2010.
- [9] B. Guo, H. Li, C. Zhou, and Y. Cheng, "Analysis of general network coding conditions and design of a free-ride-oriented routing metric," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1714-1727, 2011.
- [10] T. V. Vu, "Application of network coding in wireless networks : coding conditions and adaptive redundancy control," Ph. D. Thesis, l'Université Pierre et Marie Curie, 2014.