

무선 환경의 네트워크에서 랜덤 선형 네트워크 코딩 적용 성능 분석

정회원 이 규 환*, 종신회원 김 재 현*, 조 성 현**°

A Performance Analysis of Random Linear Network Coding in Wireless Networks

Kyu-Hwan Lee* *Regular Member*, Jae-Hyun Kim*, Sunghyun Cho**° *Lifelong Members*

요 약

최근 무선 환경에서 네트워크 효율성 증대를 위하여 네트워크 코딩에 대한 연구들이 많이 진행되고 있다. 본 논문에서는 무선 환경에서 RLNC를 적용하기 위한 고려사항들을 분석해 본다. 우선 기존의 멀티캐스트에서 사용하는 방식으로 무선 분산 환경에 RLNC에 적용 가능한지 살펴보았다. 시뮬레이션 결과, 멀티캐스트에서 사용하는 방식대로 적용한 RLNC에서는 디코딩 실패가 발생하였고, X 구조에서 인코딩과 디코딩을 모두 수행하여 디코딩 실패를 제거한 RLNC는 전송 이득이 많지 않았다. 또한 본 논문에서는 hidden 노드 문제, 코딩 기회 분석, RLNC 오버헤드 등의 무선 환경에서 실제적인 고려사항을 분석해 보았다.

Key Words : RLNC, network coding, wireless LAN, Mesh Network

ABSTRACT

Recently, studies for the network coding in the wireless network to achieve improvement of the network capacity are conducted. In this paper, we analysis considerations to apply RLNC in the wireless network. First of all, we verify whether the RLNC method in multicast is applied to distributed wireless network. In simulation results, the decoding failure can occur in the original manner of multicast. In RLNC which conducts encoding and decoding in X topology to gets rid of the decoding failure, the RLNC gain is insignificant. In this paper we also discuss considerations such as the hidden node problem, the occurrence of coding opportunity, and the RLNC overhead which are practical issues in the wireless network.

I. 서 론

네트워크 코딩은 2000년 Ahlswede의 논문 발표 이후로 유무선 네트워크의 연구에서 많은 관심을 받고 있다^[1-4]. 네트워크 코딩은 무선 환경에서 멀티캐스트 뿐만 아니라 유니캐스트 응용에도 기존의 라우팅 방식을 사용했을 경우보다 더 나은 네트워크 처리량과

통신의 신뢰성을 제공 할 수 있기 때문에 많은 연구가 이루어졌다^[4-11]. 특히 RLNC(Random Linear Network Coding)는 코드 선택이 유용하기 때문에 분산 환경에서 많이 연구되고 있다^[4]. 일반적으로 네트워크 코딩에서 결정적 코드 구성 알고리즘은 전체 네트워크를 통제 하는 중앙 집중 설계가 필요한데 이러한 코드 구성 알고리즘은 네트워크가 실시간으로 변

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0010967)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0026829)

* 아주대학교 전자공학과 무선 인터넷 연구실({lovejiyoon7, jkim}@ajou.ac.kr)

** 경상대학교 컴퓨터과학과 및 공학연구원 (dr.shcho@gnu.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-07-323, 접수일자 : 2011년 7월 27일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 5일

화하는 구조에서는 유용하지 않다. 또한 중앙 집중 설계는 실제 구현하기도 어렵다. RLNC에서는 모든 코드의 계수가 패킷을 인코딩하고 전송하는 노드에서 랜덤하게 선택되기 때문에 분산 환경에서도 쉽게 구현이 용이하다. 하지만 대다수의 RLNC 연구에서는 무선 시스템의 실제적인 문제점과 기존 시스템과의 호환성을 고려하지 않고 이론적이고 네트워크 코딩만을 위한 시스템에 대하여 연구되었다. 그러므로 실제적으로 RLNC를 무선 환경에 적용하기 위해서는 다음과 같은 고려사항들이 반영되어야 한다.

- 1) 무선 매체: 무선 환경에서 패킷들은 유선이 아닌 무선 매체를 통하여 전달된다. 그러므로 무선 환경에서 각 노드들은 이러한 브로드캐스트 성질을 이용하여 네트워크 코딩에 활용 할 수 있다. 만약 노드들이 자신의 전송반경 내 노드들의 모든 전송을 엿들 수 있다면, 네트워크 코딩과 엿들음(Overhearing)을 통하여 ‘무임승차’ (Free-riding) 전송이 가능하다. ‘무임승차’ 전송이란 라우팅만을 사용할 경우 여러 번 패킷 전송할 것을 네트워크 코딩 사용으로 한번의 패킷 전송만으로 여러 정보를 전송하는 것을 의미한다.
- 2) 코딩 구조: 네트워크 코딩 기회를 얻기 위해서는 체인 구조나 X 구조 같은 코딩 구조가 네트워크에 존재해야 된다. 이러한 코딩 구조에서 ‘무임승차’ 전송은 엿들음 패킷에 의해서 가능하고, 네트워크에서는 ‘무임승차’ 전송에 의하여 더 향상된 네트워크 처리율을 제공 할 수 있다.
- 3) 코딩 묶음 단위(coding batch set): RLNC의 소스에서 패킷들은 코딩 묶음 단위로 인코딩 된다. 그러므로 만약 RLNC를 수행하는 중간 노드에서 같은 묶음 단위의 패킷을 인코딩을 하지 않는다면 목적 노드에서는 자신의 패킷을 복원 할 수가 없다.
- 4) 응용: RLNC는 분산 환경의 멀티캐스트 전송을 위하여 설계되었다. 그러므로 RLNC는 멀티캐스트 전송이나 intra-session 네트워크 코딩에 적합하다. intra-session 네트워크 코딩은 같은 세션에 속해 있는 패킷만 인코딩하는 방식이다. 하지만 실제적인 무선 네트워크에서는 멀티캐스트 전송보다는 유니캐스트가 더 많이 사용된다.

본 논문에서는 IEEE 802.11s와 같은 기존 무선 네트워크에서 RLNC를 적용 할 수 있는지 분석한다. 또한 본 논문에서는 다양한 분석 결과를 바탕으로 RLNC를 무선 환경에 적용하기 위한 필수 고려사항

을 도출한다. 본 논문의 내용은 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서는 멀티캐스트가 아닌 다수의 유니캐스트 전송이 존재하는 환경에서 RLNC를 적용 할 수 있는지 살펴본다. (Global RLNC)
- (2) RLNC를 적용 했을 경우 네트워크 부하량과 전력 소모량에 대하여 결과를 분석한다. (Local RLNC)
- (3) 본 논문의 다양한 결과를 바탕으로 RLNC를 무선 환경에 적용하기 위하여 필요한 중요 고려사항에 대하여 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련연구에 대하여 살펴본다. 3장과 4장에서는 무선 환경에서 global RLNC와 local RLNC의 적용 가능성에 대하여 살펴본다. 5장에서는 무선 환경에서 RLNC를 적용하기 위한 고려사항들을 살펴보고 6장에서 결론을 맺는다.

II. 관련연구

네트워크 코딩은 Ahlswede의 논문에 의해 처음 소개 되었다. Ahlswede의 논문에서는 멀티캐스트 전송 환경에서 네트워크 코딩을 적용하면 기존 라우팅을 사용 했을 경우보다 네트워크 용량이 증가할 수 있고 네트워크 용량이 최대 max-flow min-cut 영역에 도달 할 수 있다는 것을 보였다^[1]. Li의 연구에서는 코딩 계수를 계산된 영역 이상 크기의 유한 필드에서 선택하면 네트워크 코딩에 선형코드를 사용해도 이론적으로 최대 네트워크 용량에 도달 할 수 있다는 것을 보였다^[2]. Ho의 논문에서는 처음으로 멀티캐스트에서 RLNC의 개념에 대하여 제시하였다^[3]. RLNC를 수행하는 노드는 수신한 패킷들을 랜덤하게 선택된 계수로 선형 결합하여 전송 패킷을 생성한다. Ho의 논문에서는 주어진 영역 이상의 크기를 가진 유한 필드에서 계수를 선택 했을 경우 목적노드에서 디코딩 확률을 이론적으로 계산하였고, 그 확률이 1에 가깝다는 것을 보였다.

Inter-session 네트워크 코딩에서는 가능하다면 서로 다른 세션의 패킷들의 인코딩을 수행한다^[5,6]. 대표적인 연구에는 Katti의 논문이 있다^[7]. Katti의 논문에서는 XOR 네트워크 코딩과 무선 매체의 브로드캐스트 성질을 이용하여 기회적인 엿들음과 코딩을 수행한다. Inter-session 네트워크 코딩이외에는 Intra-session 네트워크 코딩이 있다. Intra-session 네트워크 코딩은 같은 세션에 속한 패킷만을 인코딩한다^[7,9]. 대표적으로 chachulski의 논문이 있다^[8]. chachulski의

논문에서는 전송되는 각각의 패킷들이 독자적인 정보를 가질 수 있게 RLNC를 사용하는 기회적인 라우팅 기술에 대하여 제안했다.

네트워크 코딩은 물리계층에도 적용 될 수 있다^[10,11]. Zhang의 논문에서는 원 신호와 결합 된 신호를 전파 신호 레벨에서 진폭과 위상 향으로 구성된 방정식으로 나타내어 수신하고자 하는 신호를 복호하는 방식을 제안했다^[10]. 하지만 이러한 방식은 패킷을 전송하는 두 노드의 전송 동기가 정확하게 맞아 야 된다. Katti의 연구에서는 패킷 레벨이 아니라 심볼 단위로 네트워크 코딩을 수행하는 방식을 제안하였다^[11].

기존의 연구에서는 주로 무선 환경 특성의 고려나 기존 시스템과의 호환보다는 주로 이론적인 최대 네트워크 용량 계산이나 네트워크 코딩만을 위한 시스템 연구가 진행되었다. 그러므로 본 논문에서는 RLNC를 무선 환경에 적용하기 위하여 여러 가지 측면으로 분석하고 고려사항들을 도출해 본다.

III. Global RLNC

본 장에서는 멀티캐스트에 맞게 설계되어 있는 RLNC를 멀티캐스트가 아닌 다수의 유니캐스트 환경에 적용 할 수 있는지 살펴본다. 무선 환경에서는 멀티캐스트보다는 다수의 유니캐스트가 실제적이고 적용가능한 시나리오이다. 본 논문에서는 이 방식을 global RLNC로 명명한다. 그러므로 본 논문에서는 목적노드에서 RLNC 멀티캐스트의 인코딩 방식을 적용해도 본래의 데이터 패킷을 디코딩 할 수 있다고 가정하고 본 논문의 가정 사항이 올바른지 검증한다. 본 논문에서는 무선 환경의 멀티 홉 네트워크를 고려한다. 본 논문에서는 IEEE 802.11s를 타깃 시스템으로 고려한다^[11-14]. IEEE 802.11s에서는 라우팅 프로토콜로 AODV와 proactive 라우팅 프로토콜을 정의하고 있으므로 본 논문에서는 AODV를 라우팅 프로토콜로 사용한다. 전력 소모량 모델은 논문^[14]을 참조했다. 최대 재전송 횟수는 4이다. 모든 RLNC 기능은 IP와 MAC 계층 사이의 NC(Network Coding) 계층에 구현된다. 본 논문에서 사용하는 용어들은 표 1과 같다.

3.1 동작 설명

Global RLNC의 동작은 그림 1과 같다.

- 네트워크 코딩 준비: RLNC set(교차, 브로드캐스트, 엇들음 노드)은 라우팅 패스에 의해서 결정된다. 선택하고자 하는 플로우들의 모든 엇들음 노드가 다른 코딩 플로우의 브로드캐스트 노드가 전송하는 패

표 1. 용어 정의

용어	Value
고유 패킷	본래의 데이터 패킷
코딩 패킷	RLNC에 의해 인코딩된 패킷
수신 패킷	목적노드에서 수신한 패킷
전달 패킷	중계노드에서 라우팅에 의해 전달하는 패킷
브로드캐스트 패킷	RLNC를 위해 브로드캐스트 되는 패킷
Batch set 순번	Batch set 순번은 batch set이 생성된 순번을 나타낸다. 그러므로 batch set 순번이 같은 패킷들만 인코딩과 디코딩이 가능
코딩 플로우	Crossover 노드에서 인코딩하는 패킷의 플로우
교차 노드	-같은 batch set에 있는 패킷들을 인코딩 수행(Global RLNC) -코딩 플로우의 패킷들을 인코딩 수행(Local RLNC)
브로드캐스트 노드	crossover 노드의 1홉 이전 노드로 crossover, overhearing 노드가 모두 패킷을 수신 할 수 있도록 패킷을 브로드캐스트 함
엇들음 노드	crossover 노드의 1홉 이후 노드로 crossover, broadcasting 노드의 패킷을 모두 수신함

- 킷을 엇들음 수 있어야 RLNC set으로 선정될 수 있다. RLNC set이 선정되면 교차 노드는 선정된 브로드캐스트, 엇들음 노드에게 제어 메시지를 전송한다.
- 네트워크 코딩: 교차 노드와 엇들음 노드에서는 코딩 플로우와 재전송 버퍼에 저장하고 있는 패킷들 중에서 같은 batch set 순번의 패킷들을 인코딩한다. 본 논문에서 목적노드는 수신, 전달, 코딩, 브로드캐스트 패킷을 사용하여 고유 패킷을 디코딩 할 수 있다고 가정한다. 브로드캐스팅 노드의 패킷을 수신한 교차 노드는 패킷 버퍼링을 수행한다. RLNC에서는 같은 batch set 순번의 패킷들만 인코딩과 디코딩이 가능하기 때문에 패킷 버퍼링이 필수적이다. 모든 노드에서는 재전송을 위해 수신, 전달, 브로드캐스팅 패킷을 일정기간 동안 재전송 버퍼에 저장한다.
 - 디코딩& NACK전송: 만약 목적 노드에서 일정시간동안 디코딩을 수행하지 못했다면 이전 노드에게 NACK 패킷을 전송한다. 이전 노드는 해당하는 batch set 순번의 패킷들을 인코딩하여 목적노드에게 재전송한다.

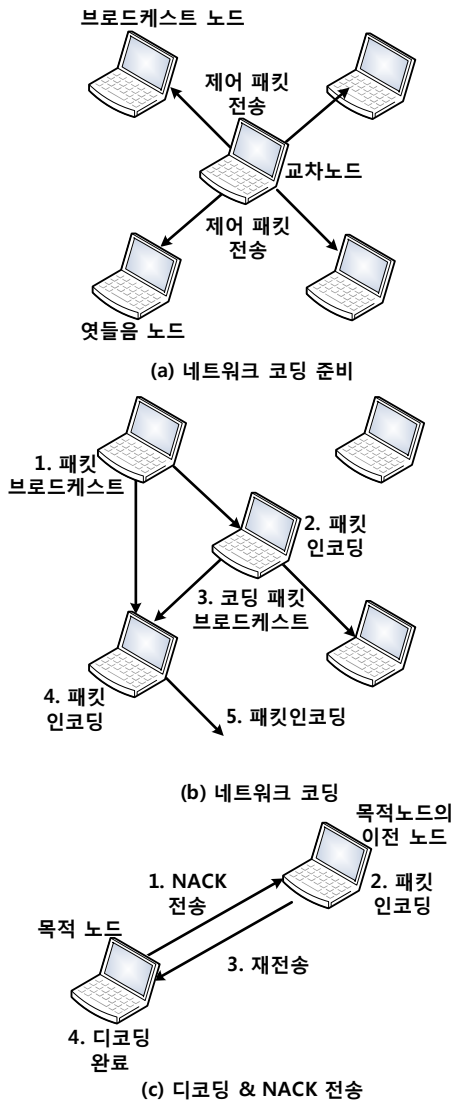


그림 1. Global RLNC의 동작 과정

3.2 검증 및 성능 분석

본 절에서는 간단한 X 구조에서 네트워크 부하량과 전력 소비량에 대하여 성능 분석을 수행하고 Grid 구조의 네트워크에서 global RLNC를 검증한다. X구조는 그림 1의 (a)와 같이 두 개의 플로우가 중계노드에서 교차되어 있는 구조를 나타내고 grid 구조는 노드들이 격자 형태로 배치되어 있는 것을 의미한다. Grid 구조의 네트워크에서는 모든 노드는 promiscuous 모드로 동작하고 hidden 노드 문제를 해결하기 위하여 수정된 RTS/CTS를 사용한다. 라우팅 metric으로는 홉 수를 사용한다. 각각의 플로우는 uniform 분포의 서로 다른 시간에 네트워크에 들어오고 트래픽은 고

정된 1500byte의 패킷 크기와 1초의 패킷 inter-arrival 시간으로 생성된다. batch set 순번은 패킷이 생성될 때마다 1씩 증가한다. 노드의 전송 범위는 100미터이며 시뮬레이션 시간은 10분이다.

3.2.1 간단한 X구조

그림 2와 3은 각각 총 네트워크 부하량과 전력 소비량을 나타낸다. 네트워크 부하량(Wireless LAN load)은 상위 계층에서 MAC 계층으로 전달되는 초당 비트수이다. 그림 2와 3의 Conv.은 RLNC는 각각 라우팅 프로토콜만을 사용했을 경우와 네트워크에 RLNC를 적용했을 경우를 나타낸다. 2개 플로우가 교차된 X구조에서 네트워크 코딩의 네트워크 부하량 이득(G_{load})은 약 25%이고, 전력 소비량 이득(G_{power})은 7.47%이었다. 네트워크 부하량과 전력 소비량 이득은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{load} = 1 - \frac{L_{total,RLNC}(bits/sec)}{L_{total,legacy}(bits/sec)} \quad (1)$$

$$G_{power} = 1 - \frac{P_{total,RLNC}(bits/sec)}{P_{total,legacy}(bits/sec)} \quad (2)$$

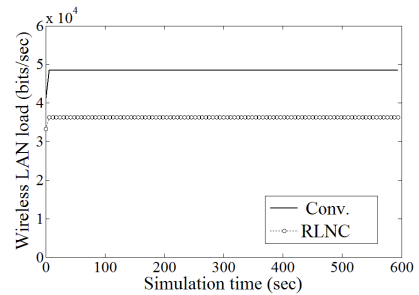


그림 2. X 구조에서 네트워크 부하량 (Global RLNC)

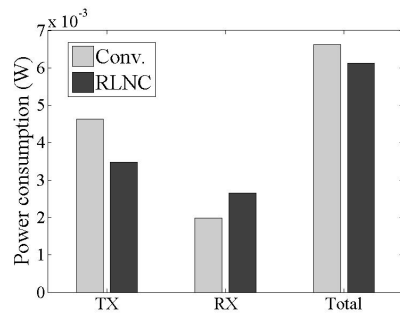


그림 3. X 구조에서 전력 소비량 (Global RLNC)

L_{total} 은 총 네트워크 부하량을 의미하고 P_{total} 은 총 전력 소모량을 의미한다. X 구조에서는 교차노드에서 두 개의 패킷을 인코딩하여 한번만 전송하기 때문에 라우팅만 사용했을 경우(4번 전송)보다는 1번의 전송을 덜 하게 된다. 그러므로 이론적인 이득이 25%가 된다. 결과를 통하여 간단한 X구조에서는 이론적인 계산과 마찬가지로 RLNC가 이득이 있음을 알 수 있다.

3.2.2 Grid 구조

Grid 구조 네트워크에서는 5X5 grid 구조 시나리오를 고려한다. 각 노드 간 가로, 세로 사이는 50미터로 배치했다. 네트워크의 모든 노드는 소스 노드로 동작하며 목적노드는 랜덤하게 선택하였다. 그림 4는 총 네트워크 부하량을 나타낸다. Grid 구조 네트워크에서는 RLNC에서 네트워크 부하량이 라우팅만 사용했을 경우보다 더 많은 것을 살펴볼 수 있다. 목적노드에서 최대 재전송 횟수만큼 재전송을 수행해도 디코딩 조건을 만족하지 못하여 12%의 디코딩 실패가 발생했고 RLNC에서 네트워크 부하량이 더 증가하게 되었다. 디코딩 실패가 발생하는 원인은 그림 5와 같이 플로우가 서로 다른 방향을 가지기 때문에 가정했던 대로 목적노드(D3)에서 원하는 만큼 패킷을 수신

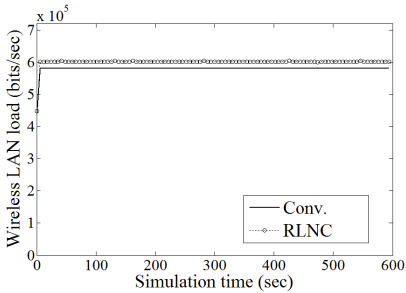


그림 4. Grid 구조에서 네트워크 부하량 (Global RLNC)

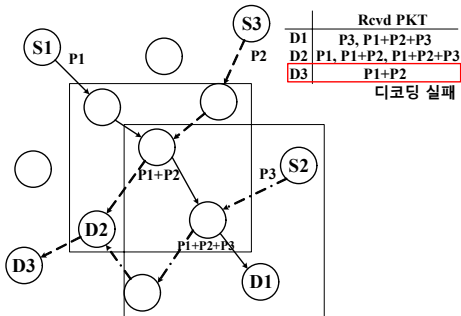


그림 5. Global RLNC에서 디코딩 실패 원인

하지 못하기 때문이다(D3에서는 P1과 P2가 인코딩된 패킷을 두 개 이상 수신해야 디코딩이 가능하지만 그림 5에서 D3은 1개의 패킷만 수신가능하다.) 그림 5에서 S와 D는 각각 소스와 목적노드를 의미하고, P는 패킷을 의미한다.

IV. Local RLNC

본 장에서는 디코딩 실패를 없애기 위하여 global RLNC 대신 local RLNC을 사용하고, 성능을 분석한다. global RLNC와 local RLNC의 가장 큰 차이점은 디코딩을 목적노드가 아닌 엿들음 노드에서 수행한다는 것이다. 또한, local RLNC에서는 교차노드에서 코딩 플로우의 패킷에 대해서만 인코딩을 수행한다. 그러므로 local RLNC에서는 디코딩 실패가 발생하지 않는다.

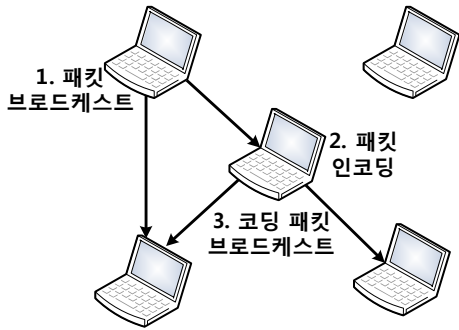
4.1 동작 설명

Local RLNC의 동작은 그림 6과 같다.

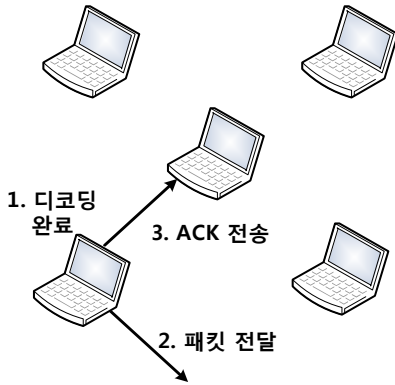
- 네트워크 코딩 준비: global RLNC와 같은 동작과정을 거친다.
- 네트워크 코딩: 엿들음 노드에서 디코딩을 수행하기 위해서는 교차노드에서 코딩 플로우의 패킷 중 같은 batch set 순번을 가진 패킷들만 인코딩을 수행해야 된다. 그러므로 교차노드에서는 수신한 코딩 플로우의 패킷들을 버퍼링하다가 모든 코딩 플로우의 패킷이 도착하면 인코딩을 수행한다.
- 디코딩 & ACK 전송: 디코딩이 가능한 엿들음 노드는 즉시 디코딩을 수행하여 자신의 고유 패킷을 복원하고 다음 노드에게 전달한다. 만약 목적 노드이면 엿들음 노드이면 복원한 고유 패킷은 상위 계층으로 전달된다. 디코딩을 완료한 엿들음 노드는 ACK 패킷을 교차 노드에게 전송하여 디코딩이 완료됨을 알린다. 만약 일정시간동안 엿들음 노드에서 ACK 패킷을 전송하지 않으면 교차노드는 새롭게 코딩 패킷을 생성하여 재전송한다.

4.2 성능 분석

본 절에서는 grid 구조의 네트워크에서 네트워크 부하량과 전력 소모량에 대하여 성능 분석을 수행한다. global RLNC와 마찬가지로 5X5 grid 구조 네트워크를 고려하였으며 시뮬레이션 환경은 global RLNC와 동일하다.



(a) 네트워크 코딩



(b) 디코딩 & ACK 전송

그림 6. Local RLNC의 동작 과정

4.2.1 Grid 구조

그림 7과 8은 각각 총 네트워크 부하량과 전력 소모량을 나타낸다. 총 네트워크 부하량은 기존 라우팅만을 적용한 시스템과 비교하여 2.35% 감소하였다. 하지만 이는 매우 적은 이득이었다. 적은 량의 RLNC 네트워크 부하량 이득과 관련해서는 다음 장에서 좀 더 살펴보기로 한다. 그림 8의 총 전력 소비량에서는 RLNC를 적용한 네트워크가 더 많은 전력을 소비하는 것을 살펴 볼 수 있었다. RLNC에서는 전송 전력

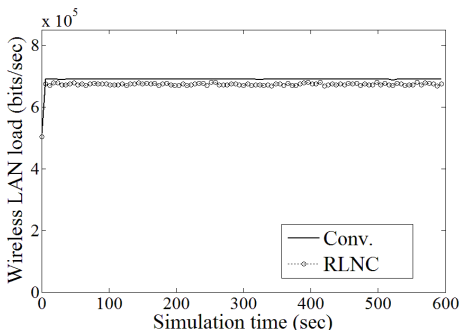


그림 7. Grid 구조에서 네트워크 부하량 (Local RLNC)

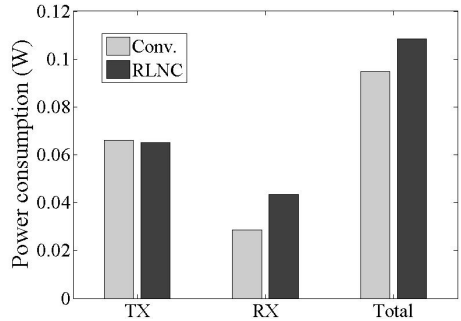


그림 8. Grid 구조에서 전력 소비량 (Local RLNC)

소모는 감소하였지만 수신 전력 소모가 급격히 증가하여 총 전력 소모량이 기존 라우팅만 사용하는 네트워크보다 더 많이 소모됨을 살펴 볼 수 있다. 수신 전력 소모량이 증가한 이유는 패킷을 브로드캐스트 할 때 노드의 전송 범위 안에 모든 노드들이 패킷을 수신하기 때문이다. 일반적으로 무선 랜에서는 RTS/CTS를 사용하면 패킷을 수신하지 않는 노드들은 sleeping 모드로 동작하기 때문에 수신 전력 소모량이 발생하지 않는다. 하지만 네트워크 코딩을 사용하는 네트워크에서는 모든 패킷을 수신하여 네트워크 코딩에 활용해야 하기 때문에 RTS를 수신해도 sleeping 모드로 동작할 수 없다. 그러므로 네트워크 코딩은 ‘무임승차’가 아니다. 노드 배치 밀도에 따라서 전력 소모 증가량과 네트워크 부하량 감소량 간에 이율배반적인 관계를 가지고 있다. 다음 장에서 좀 더 자세히 노드 배치 밀도와 네트워크 코딩 이득에 대하여 분석할 것이다.

V. RLNC를 적용하기 위한 실제적인 고려사항

본 장에서는 RLNC를 무선 환경에 적용하기 위한 실제적인 고려 사항들에 대하여 살펴본다.

5.1 Hidden 노드 문제

분산 네트워크 내에 있는 노드들이 데이터 패킷 전송 시 충돌을 회피하기 위하여 캐리어 센싱을 하는데, 이는 중앙 집중방식이 아닌 분산 방식으로 각 단말에서 수행하기 때문에 hidden 노드 문제로 패킷 충돌이 발생할 수 있다. 만약 B 노드의 캐리어 센싱 범위에는 A와 C 노드가 있지만 A와 C 노드는 서로의 캐리어 센싱 범위에 벗어나 있고 A와 C 노드가 동시에 B노드에 패킷을 전송한다면 패킷 충돌이 발생한다. 무선 랜에서는 RTS/CTS 기법으로 hidden 노드 문제를 완화한다. 하지만 RTS/CTS 기법에서는 데이터 패킷을 수신하는 노드를 제외한 모든 RTS를 수신한 노드는

sleeping 모드로 전환되기 때문에 무선 매체의 브로드캐스트 특성을 이용할 수가 없기 때문에 무선 분산네트워크에 네트워크 코딩을 적용하기 위해서는 RTS/CTS를 사용 할 수가 없다. 그러므로 네트워크 코딩을 사용하는 네트워크에서는 hidden 노드 문제가 다시 야기 될 수 있다. 네트워크 코딩 네트워크에서 hidden node 문제를 해결하기 위해서는 RTS/CTS 기법의 수정이 필요하다. 예를 들어, RTS를 수신한 모든 노드는 패킷 수신 모드로 동작하도록 수정하면 무선 매체의 브로드캐스트 특성을 이용하면서 hidden 노드 문제를 완화할 수 있다.

5.2 코딩 기회 발생

무선에서 네트워크 코딩을 수행하기 위해서는 X구조와 같은 특정 코딩 구조가 존재해야 한다. 본 논문에서는 실제 얼마나 많은 코딩 기회가 발생하는지 분석 했다. 시뮬레이션 시나리오는 노드를 grid로 배치하고 소스노드와 목적노드를 임의로 선택하고 네트워크의 모든 노드가 소스노드로 동작하는 분산 네트워크를 구성하고 고정된 네트워크 크기에 노드 수(세션 수)를 점차 증가하면서 네트워크 코딩 구조 발생 경향(시나리오 1)과 고정된 노드 수(세션 수)에 네트워크 크기를 점차 증가하면서 네트워크 코딩 구조 발생 경향(시나리오 2)을 분석하였다. 시뮬레이션 환경은 4장과 같다. 표 2와 3은 각각 시나리오 1과 2에서 평균 네트워크 코딩 수행 노드 발생 수와 네트워크의 전체 path의 평균 홉 수를 나타낸다. 시나리오 1에서는 네

표 2. 코딩 구조 발생 경향 분석 (네트워크 크기 고정 = 40000m²)

노드 수	코딩 구조 수	홉 수
16	1.2	2.01
25	2.05	1.99
36	3.8	1.91
49	5.5	1.91
64	7.55	1.92

표 3. 코딩 구조 발생 경향 분석 (노드 수 고정 = 49)

네트워크 크기	코딩 구조 수	홉 수
22500	2.6	1.56
40000	5.5	1.91
62500	8.35	2.25
90000	10	2.82
122500	15.5	3.5

트워크 크기가 고정되어 있기 때문에 세션 수가 증가해도 전체 path의 평균 홉 수는 거의 동일하였다. 네트워크 코딩 구조 수는 세션 수가 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 살펴 볼 수 있다. 시나리오 2에서는 노드 수는 고정되어 있지만 네트워크 크기가 변화하기 때문에 네트워크 크기가 커짐에 따라서 평균 홉 수도 증가하게 된다. 네트워크 코딩 구조 수는 평균 홉 수가 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 살펴 볼 수 있다. 따라서 네트워크에서 path의 평균 홉 수와 노드 수(세션 수)의 증가가 네트워크 코딩 수행 노드 발생에 영향을 미치는 것을 살펴 볼 수 있다. 네트워크 코딩을 통하여 얻을 수 있는 순수 이득을 아래와 같이 계산해보면 그림 9와 10과 같이 나타낼 수 있다. $N_{NC,gain}$ 은 코딩 구조의 수를 나타내고, 이는 네트워크 코딩에 의해서 감소 할 수 있는 전송 홉수를 의미한다. N_{total} 은 기존 라우팅만 사용 했을 경우 패킷을 소스노드에서 목적노드까지 전달하기 위하여 필요한 전송 홉수 있다.

$$G_{idle} = \frac{N_{NC,gain}}{N_{total}} \tag{3}$$

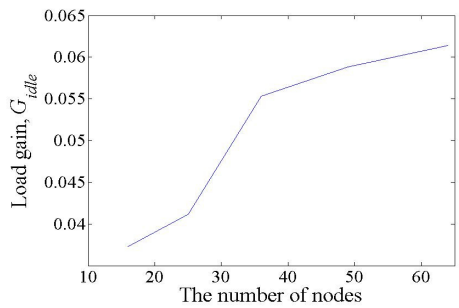


그림 9. 순수한 네트워크 코딩 이득 (네트워크 크기 고정, 노드 수 변화)

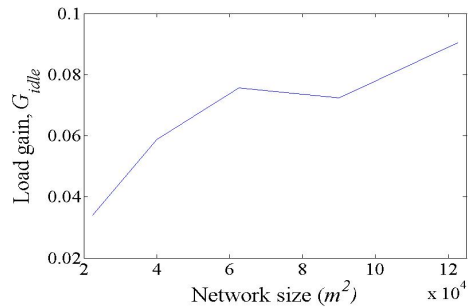


그림 10. 순수한 네트워크 코딩 이득 (노드 수 고정, 네트워크 크기 변화)

그림 9의 시나리오 1에서는 네트워크 코딩 수행 노드 수의 증가에 따라 최대 6%, 그림 10의 시나리오 2에서는 최대 9%정도 네트워크 코딩의 순수 이득이 발생하는 것을 살펴 볼 수 있다. 하지만 실제 네트워크 코딩에 의한 전송 이득은 네트워크 코딩 오버헤드로 인하여 감소 할 것이다.

5.3 RLNC 오버헤드

RLNC를 무선 환경에 적용하기 위해서는 추가적인 제어 패킷과 패킷 헤더에서 추가적인 오버헤드가 필요하다. 제어 패킷은 코딩 구조를 구성하기 위하여 전송되고, 패킷의 인코딩과 디코딩을 위하여 계수가 패킷 헤더에 포함되어 전송되어야 한다. 패킷 헤더에 추가적인 오버헤드는 데이터 크기가 헤더 크기보다 훨씬 크기 때문에 무시할 만한 것 같지만 패킷은 여러 홉을 거쳐서 전송되기 때문에 네트워크 전체 측면에서 볼 때는 영향을 미칠 수가 있다.

4장에서의 결과와 같이 RLNC를 포함한 네트워크 코딩을 적용하기 위해서는 추가적인 수신 전력 소비가 발생 할 수 있다. 그러므로 네트워크 코딩에서 필요한 노드만 수신하도록 하는 방법 개발이 필요하다.

VI. 결 론

본 논문에서는 RLNC를 무선 환경에 적용하기 위하여 여러 가지 측면으로 분석해 보았다. 첫 번째로 본 논문에서는 기존의 RLNC 방식을 멀티캐스트 방식이 아닌 유니캐스트 방식을 사용할 때 적용 할 수 있는지 분석했다(Global RLNC). 분석 결과 기존 방식대로 적용하면 디코딩 실패가 발생하고 유니캐스트에 적용하기 위해서는 교차노드에서 코딩 방식을 수정해야 된다는 것을 알 수 있었다. 두 번째로 본 논문에서는 디코딩 실패를 제거한 RLNC방식을 네트워크에 적용하고 성능을 분석했다(Local RLNC). 분석결과 RLNC의 네트워크 부하량 이득이 크지 않고 전력 소모량 측면에서는 수신 전력 소모 때문에 더 많은 전력을 소모하는 것을 살펴 볼 수 있었다. 마지막으로 본 논문에서는 RLNC를 적용하기 위하여 필요한 실제적인 고려사항들에 대하여 분석해 보았다. 결론적으로 RLNC를 실제 무선 환경에 적용하기 위해서는 적은 코딩 구조가 발생하는 문제^[15], 추가적인 수신 전력 소모, 그리고 무선에서 발생하는 hidden 노드 문제를 해결하기 위한 연구들이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Ahlswede, et al., "Network information flow," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.46, pp.1204-1216, 2000.
- [2] S. Y. R. Li, et al., "Linear network coding," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.49, pp.371-381, 2003.
- [3] T. Ho, et al., "A Random Linear Network Coding Approach to Multicast," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.52, pp.4413-4430, 2006.
- [4] S. Y. R. Li, et al., "Linear Network Coding: Theory and Algorithms," *Proceedings of the IEEE*, Vol.PP, pp.1-16, 2011.
- [5] S. Katti, et al., "XORs in the Air: Practical Wireless Network Coding," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.16, pp.497-510, 2008.
- [6] L. Jilin, et al., "How Many Packets Can We Encode? - An Analysis of Practical Wireless Network Coding," in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2008, pp.371-375.
- [7] Y. Wu, et al., "Minimum-energy multicast in mobile ad hoc networks using network coding," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.53, pp.1906-1918, 2005.
- [8] S. Chachulski, et al., "Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing," in *Proc. ACM SIGCOMM*, 2007, pp.169-180.
- [9] C. Fragouli, et al., "Wireless Network Coding: Opportunities & Challenges," in *Proc. IEEE MILCOM*, 2007, pp.1-8.
- [10] S. Zhang, et al., "Physical-layer network coding," in *Proc. ACM MobiCom*, 2006, pp.358-365.
- [11] S. Katti, et al., "Symbol-level network coding for wireless mesh networks," in *Proc. SIGCOMM*, 2008, pp.401-412.
- [12] "IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,"

IEEE Std 802.11-2007 , pp.C1-1184, 2007.

- [13] "IEEE Draft Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications-Amendment 10: Mesh Networking," IEEE P802.11s/D12.0, May 2011, pp.1-391, 2011.
- [14] L. M. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2001, pp.1548-1557.
- [15] B. Guo, et al., "Analysis of General Network Coding Conditions and Design of a Free-Ride-Oriented Routing Metric," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.60, pp.1714-1727, 2011.

이 규 환 (Kyu-Hwan Lee)

정회원



2007년 아주대학교 전자공학부 졸업
 2007년~현재 아주대학교 전자공학과 석/박사 통합과정
 <관심분야> 네트워크 코딩, WLAN, 무선망 QoS, Ad-hoc, Mesh network 등

김 재 현 (Jae-Hyun Kim)

종신회원



1987년~1996년 한양대학교 전산과 학사 및 석/박사 졸업
 1997년~1998년 미국UCLA 전기전자과 박사 후 연수
 1998년~2003년 Bell Labs, Performance Modeling and QoS Management Group, 연구원

2003년~현재 아주대학교 전자공학부 부교수

<관심분야> 무선인터넷, QoS, MAC 프로토콜, IEEE 802.11/15/16/20, 3GPP, 국방 기술네트워크 등

조 성 현 (Sunghyun Cho)

종신회원



1995년 2월 한양대학교 컴퓨터공학과 공학사
 1997년 2월 한양대학교 컴퓨터공학과 공학석사
 2001년 8월 한양대학교 컴퓨터공학과 공학박사
 2009년 9월~현재 경상대학교 컴퓨터과학부 조교수

2006년 10월~2008년 2월 Stanford University, Postdoctoral Visiting Scholar

2001년 9월~2006년 10월 삼성종합기술원 및 삼성 전자 정보통신연구소 전문연구원

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 자동차 통신