

서브 패킷 단위의 네트워크 코딩 및 채널 코딩 결합 기법

김성연*, 신지태^o

A Joint Sub-Packet Level Network Coding and Channel Coding

Seong-yeon Kim*, Jitae Shin^o

요 약

최근 네트워크의 전송 효율 증가를 위한 네트워크 코딩 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 네트워크 코딩 기법 중 하나인 Random Linear Network Coding(RLNC)를 서브패킷 단위로 적용하고 이를 오류 정정 코드 중 하나인 Low-Density Parity-Check(LDPC)와 결합한 결합 코드인 A Joint Sub-Packet Level Network Coding and LDPC 기법을 제안하고, 네트워크 코딩 기법의 특성을 동일하게 가지며 제안방법을 사용함으로써 발생하는 추가적인 오류정정 성능을 보이고자 한다. 시뮬레이션 결과, 여분의 패킷을 획득하였을 때, LDPC만을 사용하는 것과 비교하여 오류 정정 능력이 향상되는 것을 확인하였다.

Key Words : RLNC, Network coding, LDPC, Channel coding, Error correction

ABSTRACT

Recent studies on network coding scheme for increasing transmission efficiency of the network has been actively conducted. In this paper, we apply RLNC in sub-packet unit and propose a joint scheme of sub-packet level network coding and LDPC code. The proposed method can have similar ability of network coding and obtain further error correction capability. The simulation results show that the proposed one enhances error correction capability compared to the case using only LDPC when extra packets are received.

I. 서 론

최근 스마트 기기들이 대중화됨에 따라, 유무선 네트워크상의 트래픽이 급증하게 되었다. Ahlswede는 네트워크 코딩 기법을 사용하면 유선망에서 네트워크가 멀티캐스트 프로토콜을 사용할 때, 중간 노드에서 전송받은 데이터를 결합하여 전송함으로써 최대 전송 효율을 낼 수 있다는 것을 수학적으로 증명하였다^[1]. Li는 중간 노드에서 패킷을 선형적으로 결합하여 전송하였을 때, 이론적으로 네트워크를 최대로 활용할 수 있다는 것을 보였다^[2]. 하지만 이러한 선형 네트워

크 코딩과 같은 결정적 코드 구성 알고리즘은 패킷의 선형 결합에 사용되는 계수를 특정한 값으로 사용할 시, 네트워크상의 중간 노드에 문제가 발생하여 동작하지 않거나 해당 링크에 손상이 있을 경우 적용될 수 없으며, Ho는 이러한 문제를 다루기 위해 특정 크기를 가진 유한 필드에서 무작위로 선택된 계수들을 선택하여 패킷을 결합하는 Random Linear Network Coding(RLNC)기법을 제안하였다^[3]. RLNC는 패킷을 인코딩 하는 모든 노드에서 무작위로 선택된 계수를 이용하여 패킷을 선형 결합하는 만큼, 분산 환경에서 구현이 가능하며 네트워크 상태가 가변적인 무선 네

* 본 연구는 미래창조과학부가 지원한 2015년 정보통신/방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음.

※ 이 논문은 2015년도 산업통상자원부의 '창의산업융합 특성화 인재양성사업'의 지원을 받아 연구되었음.(공고번호 N0000717)

• First Author : Dep. of Human ICT Convergence, Sungkyunkwan University, creative24@skku.edu, 학생회원

◦ Corresponding Author : School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University, jishin@skku.edu, 정회원
논문번호 : KICS2015-03-049, Received March 9, 2015; Revised April 13, 2015; Accepted April 13, 2015

트위크에서도 사용될 수 있기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다⁴¹.

하지만 이러한 네트워크 코딩 기법들은 각 채널의 오류가 발생하지 않을 때의 이론적인 성능을 보여주며, 실제 네트워크에서는 이러한 오류를 피할 수 없다. 네트워크 코딩을 실제적으로 적용하기 위해서는 아직 고려할 점이 많다. Lee는 IEEE802.11s 기반 무선 메시 네트워크에서 네트워크 코딩을 적용하기 위한 고려사항을 분석하고, 격자 네트워크에서 RLNC 기법을 사용하였을 때 발생하는 코딩 이득에 대해 분석하였으며 RLNC 기법을 코딩구조가 존재하는 네트워크에 적용할 경우, 네트워크 처리량 측면에서 코딩 이득을 나타내는 것을 증명하였고⁵¹, Park은 다중 홉 네트워크에서 최적화된 네트워크 코딩 기법을 제안하고, 이에 대한 처리율을 측정하였다⁶¹. 하지만 채널에 오류가 발생할 경우, 이러한 코딩 이득은 크게 감소한다.

RLNC와 같은 네트워크 코딩 기법의 경우 디코딩에 필요한 충분한 개수의 패킷을 얻지 못했을 때 패킷 인코딩에 사용된 모든 데이터를 얻을 수 없기 때문에 이러한 오류에 대처하기 위한 연구가 이루어지고 있다. Nguyen은 전송하고자 하는 데이터를 계층적으로 네트워크 코딩하여 전송함으로써 패킷 오류가 발생하더라도 상위 계층의 데이터를 획득할 수 있게 하는 Hierarchical Network Coding (HNC) 기법을 제안하였다⁷¹. Yoon은 MIMO 릴레이 네트워크에서 HNC를 활용한 SVC비디오 전송 기법을 제안하였고⁸¹, Phuc은 UDP환경에서 추가적인 패킷 전송 시, 해당 패킷의 형태에 따라 디코딩 확률이 달라지며 이에 대해 가장 효율적인 패킷 인코딩 방법을 제안하였다⁹¹.

하지만 실제 전송환경에서의 오류는 전송하는 패킷의 일부분에만 발생하는 경우가 많다. 이에 대해 Katti는 심벌 단위로 인코딩 및 디코딩 되는 네트워크 코딩의 특성을 이용하여 심벌 오류에 대처할 수 있는 Symbol-level Network Coding 기법을 제안하였다¹⁰¹. 또한 오류 정정 부호를 사용하면 이러한 오류에 대처할 수 있다. 즉, 오류가 발생하지 않는 채널에서 패킷 전송횟수 등의 감소를 통해 전송효율을 높이는 네트워크 코딩 기법과 전송 효율은 떨어지지만 추가적인 데이터 전송을 통해 오류를 줄일 수 있는 채널 코딩 기법을 같이 고려한 네트워크-채널 결합 코드를 사용함으로써, 네트워크 코딩 기법을 좀 더 실제적으로 다룰 수 있다.

네트워크-채널 결합 코드에는 크게 보내고자 하는 데이터에 FEC 코드를 더해 네트워크 코딩하는 방법과 보내고자 하는 데이터를 네트워크 코딩하여 생성

된 각각의 패킷에 채널 코딩을 적용하여 전송하는 방법이 있으며, 이러한 결합코드에 대해 양방향 릴레이 (two-way relay) 채널에서의 터보 네트워크 부호화 다중 접속 (multiple access) 채널에서 LDPC부호 convolutional 부호등의 연구가 진행되었다¹¹⁻¹³¹.

또한 특정 네트워크 토폴로지에서 결합코드의 성능을 보여주는 연구도 진행되었다. Hausl은 양방향 릴레이 채널에서 사용자(mobile station)와 기지국(base station)이 릴레이(relay station)을 통해 데이터를 주고 받을 때의 결합코드인 Joint Network Coding and Channel Coding (JNCC)을 제안하였다¹⁴¹. 먼저 첫 번째 시간에 사용자가 기지국과 릴레이로 패킷을 전송하고, 두 번째 시간에 기지국이 사용자와 릴레이로 패킷을 전송한다. 그리고 세 번째 시간에 릴레이가 각각의 인코딩된 패킷을 XOR 결합하여 기지국과 사용자에게 전송함으로써 사용자와 기지국이 각기 전송받은 패킷을 터보 디코딩 하여 얻을 수 있게 하였다. Nessa 는 두 개의 송신지에서 서로 다른 패킷을 릴레이를 통해 하나의 목적지로 전달하고자 할 때의 결합코드 기법인 Joint Network and Fountain Coding (JNFC)를 제안하고 SNFC(Separate Network and Fountain Coding)과 비교 하였다¹⁵¹. 해당 연구의 경우, 목적지 노드에서 전송받은 각각의 패킷을 하나의 묶음으로 하여 오류 정정을 함으로써, 단일 패킷보다 큰 code rate와 code word를 생성하고 이를 한 번에 디코딩함으로써, 오류 정정율을 높이고자 하였다. 하지만 해당 연구는 각각의 노드에서 서로 다른 패리티 검사 행렬을 사용하는데, 목적지 노드에서 모든 패리티 검사 행렬에 대한 정보를 가지고 있어야 하며, 네트워크 토폴로지의 변화에 대응하기 어려운 점이 있다. 이에, 본 논문에서는 각 노드에서 하나의 패리티 행렬만을 공유하며 다양한 네트워크 구조에 대응이 용이한 네트워크-채널 결합 코드에 대해 연구하고자 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안하고자 하는 결합코드 기법을 제안하고 실험을 위한 시스템 모델을 구성한다. 3장에서는 제안하고자 하는 결합코드 기법에 대한 실험 결과를 제시하며, 4장에서 결론을 맺는다.

II. A Joint Sub-Packet Level Network and LDPC(SPNC-LDPC)

2.1 시스템 모델

본 논문에서 제안하는 결합코드 제안 기법은 목적지 노드에서 여분의 패킷을 획득하였을 때, 기존의

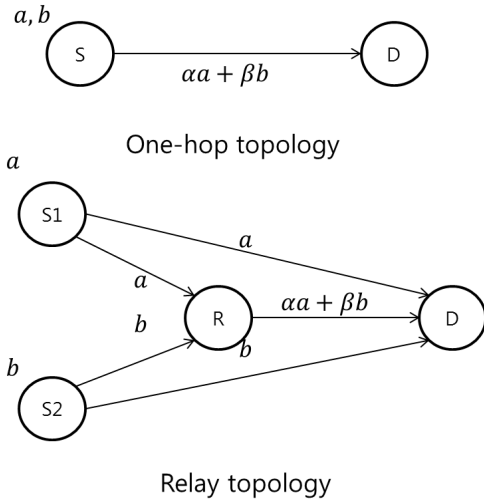


그림 1. 일 대 일 노드 및 릴레이 네트워크 토폴로지
Fig. 1. One-hop network and Relay network

LDPC 기법보다 나은 오류 정정율을 보이도록 하는 것으로, 네트워크 구성은 그림 1과 같이 일대일 링크 및 릴레이 노드로 구성된 네트워크 환경을 가정함으로써, Inter-Session 및 Intra-session 네트워크 코딩을 고려하였다. 전체 결합코드 시스템 구성은 그림 2와 같다. 일대일 노드 간 전송의 경우, 전송하고자 하는 데이터를 소스 노드에서 네트워크 코딩 기법을 이용하여 결합하며, 릴레이 네트워크의 경우, 릴레이 노드에서 전송받은 패킷을 네트워크 코딩 기법을 이용해 결합하여 전송한다.

목적지에서는 먼저 전송받은 패킷을 1차-LDPC 디코더를 통해 오류를 검출하고 정정한다. 목적지에서 네트워크 디코딩에 필요한 충분한 개수의 패킷을 얻

을 시, 원래의 데이터를 얻을 수 있다. 디코딩에 필요한 충분한 개수의 패킷을 얻지 못했을 시, 목적지는 오류가 발생한 패킷을 재활용할 수 있다. 목적지는 오류가 발생한 패킷이라 하더라도 여분의 패킷을 가지고 있을 때, 네트워크 코딩의 특성을 이용하여 오류가 발생한 위치를 추정할 수 있다. 또한 이러한 추정을 바탕으로 LDPC 디코더의 입력 값을 수정하고 2차-LDPC 디코더를 통해 오류를 추가적으로 정정 가능하게 한다.

2.2 SPNC-LDPC

Ho가 제안한 RLNC에서의 데이터를 결합하는 과정은 그림 3과 같다. 해당 노드가 전달 받은 패킷 혹은 결합하고자 하는 패킷 M 의 개수가 N 개일 때, 인코딩된 패킷 P_k 의 결합 방식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_k = \sum_{i=1}^N \alpha_i^k \cdot M_i \quad (1)$$

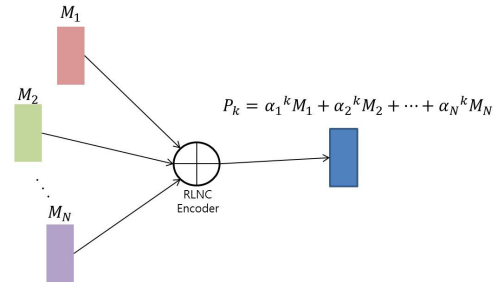


그림 3. RLNC 인코딩 과정
Fig. 3. RLNC Encoding process

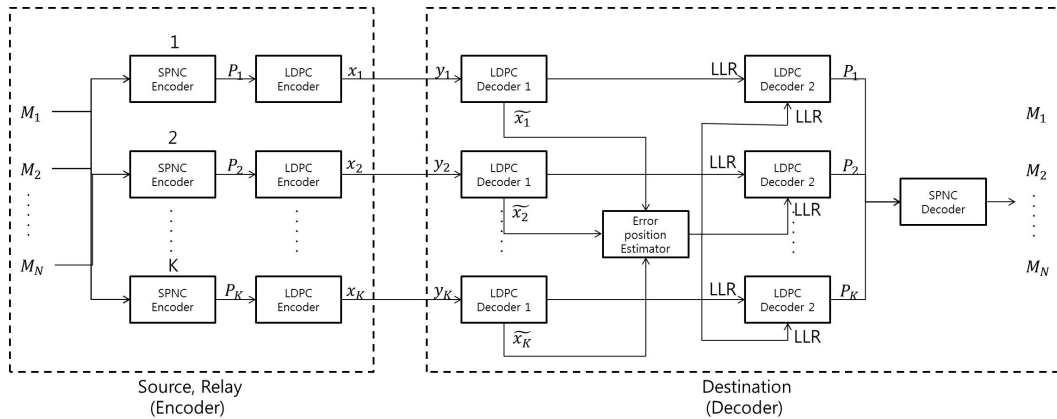


그림 2. 전체 제안 시스템 구성
Fig. 2. Overall Block Diagram of Proposed System

서브 패킷 단위의 네트워크 코딩 기법은 이와 유사하게 구성 된다. 그림 4와 같이 결합하고자 하는 패킷이 있을 때, 해당 노드는 각각의 패킷을 서브 패킷 단위로 나누어 결합한다. 하나의 패킷이 s 개의 서브 패킷으로 구성될 때, 패킷 M_i 는 식(2)와 같이 구성된다.

$$M_i = \{SM_1^i | SM_2^i | \dots | SM_s^i\} \quad (2)$$

서브 패킷 단위의 결합 구조식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SP_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^s \alpha_{ij}^k \cdot SM_j^i \quad (3)$$

식 (3)과 같이 조합된 각각의 서브 패킷을 다시 s 개만큼 묶어 식 (4)와 같이 하나의 패킷으로 만들 수 있으며, 이후 해당 패킷을 LDPC를 통해 인코딩 하여 전송한다.

$$P_k = \{SP_1 | SP_2 | \dots | SP_s\} \quad (4)$$

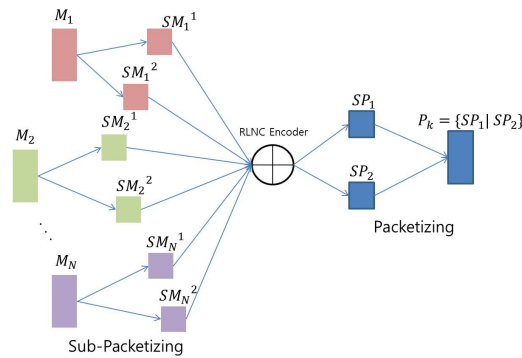


그림 4. SPNC 인코딩 과정
Fig. 4. SPNC Encoding process

2.3 1차-LDPC 디코더

본 논문에서 제안하는 결합 코드에는 오류 정정 부호로 LDPC 기법이 사용되었다. Gallager가 제안한 LDPC부호는 1996년 Mackay와 Neal에 의해 재발견되면서 우수한 오류 정정 부호로 평가 받고 있다^{[16][17]}. 또한 LDPC부호는 조직 부호로써, code word에 data word를 포함하고 있어 오류 정정 실패 시 data word의 일부분을 얻는 것이 용이하다^[18]. 본 논문에서 제안하는 결합코드에서는 목적지 노드에서 전송받은 패킷들을 각각 1차-LDPC 디코더를 통해 오류 정정한다.

1차-LDPC 디코더를 통해 오류가 정정된 패킷은 그대로 사용되며, 오류 정정에 실패한 패킷은 오류가 포함된 data word와 code word의 log-likelihood ratios (LLR)를 사용한다.

2.4 오류 추정 기법(Error Estimation)

RLNC를 이용하여 N 개의 패킷을 결합할 때, 목적지에서 이를 디코딩하기 위해서는 최소 N 개 이상의 인코딩된 패킷을 필요로 한다. 디코딩 과정은 목적지 노드가 전송받은 계수벡터와 인코딩된 데이터를 가우스-조단 소거법을 이용하여 이루어진다. 하지만 디코딩에 필요한 패킷 개수가 N 보다 작을 때, 목적지 노드는 인코딩에 사용된 모든 패킷을 잃는다.

LDPC를 이용하여 채널에서 발생하는 오류를 정정하고자 할 때, 패킷에 발생한 오류를 정정하지 못할 시, 목적지는 해당 패킷에 오류가 발생하였는지에 대해서는 알 수 있지만, 오류가 발생한 심벌의 위치에 대해서는 알 수 없다. 본 논문에서 제안하는 결합코드에서의 오류 추정 기법은 목적지가 패킷 내 오류 발생 유무에 상관없이 여분의 패킷을 확보하였을 때 각 패킷 내 발생한 오류의 대략적인 위치를 추정하기 위해 사용된다. 목적지 노드가 K 개의 패킷을 전송 받았을 때($K > N$), RLNC 디코딩은 K 개의 패킷 중 N 개의 조합으로 이루어진다. 이 때 오류 없이 전송 받은 패킷의 개수를 M 개라 하면($K > N > M$) 이에 대한 디코딩 가능한 모든 조합의 수는 ${}_{K-M}C_{N-M}$ 과 같다. 오류 추정 기법은 이러한 모든 경우의 수에 대해 RLNC 디코딩을 실행하고, 이에 대한 결과를 서로 비교함으로써 이루어진다. 인코딩 과정에 사용된 계수벡터가 패킷의 헤더에 포함되어 오류가 발생하지 않았다고 가정할 때, 오류 추정의 예는 그림 5와 같다. 인코딩된 데이터의 특정 부분에 오류가 발생 하였을 때, 이를 이용해 디코딩할 시, 해당 오류가 발생한 위치의 열의 모든 부분에 오류가 발생한다. 이러한 RLNC 디코딩 과정의 특성을 이용하여, 추가 패킷에 대한 모든 경우의 수에 대해 디코딩을 실행하고, 각 열에 대해 모든 디코딩 결과를 비교한다. 해당 비교 후, 각 열에 대해 디코딩 결과가 같을 경우, 그 경우에 사용된 모든 패킷의 해당 위치의 심벌에는 오류가 발생하지 않았으며, 디코딩 결과가 다를 경우, 그 경우에 사용된 모든 패킷의 해당 위치의 심벌에 최소 하나 이상의 오류가 발생 한 것으로 추측 할 수 있다. 해당 오류 추정 기법은 네트워크 코딩을 서브 패킷 단위의 RLNC를 적용함으로써, 동일한 개수의 여분 패킷에 대해 더 많은 여분의 서브 패킷을 확보할 수 있어 효과를 향상시키

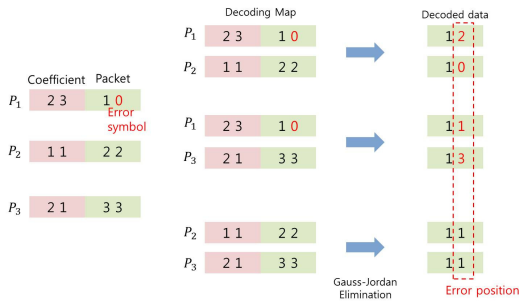


그림 5. 오류 추정의 예
Fig. 5. An example of error estimation

고자 하였다.

2.5 2차-LDPC 디코더

LDPC 디코딩에 사용되는 입력 값에는 인코딩된 데이터의 각 비트가 ‘1’ 또는 ‘0’ 값을 가질 확률 정보인 소프트 정보(soft-information)가 사용되며 이러한 소프트 정보는 목적지에서 수신 받은 신호로 정해진다. 2차-LDPC 디코더는 수신 받은 신호로 정해진 소프트 정보와 1차-LDPC 디코더를 통해 결정된 비트 값에 대해 오류 추정 기법을 이용하여 추정된 오류 위치 정보를 이용하여 새롭게 생성된 소프트 정보를 입력 값으로 가진다. 새로운 소프트 정보 생성 과정은 다음과 같다. 오류 추정 이후, 데이터의 각 비트에 대해 오류가 발생하지 않은 것으로 추정되면, 해당 비트 값에 대한 소프트 정보를 ‘1’ 또는 ‘0’에 가깝게 수정하며, 각 비트에 대해 오류가 발생한 것으로 추정되면 해당 비트에 대한 소프트 정보를 확신 할 수 없으므로 기존의 소프트 정보를 그대로 사용한다. 이와 같은 과정을 통해 새로운 소프트 정보는 기존의 소프트 정보에 대해 비교적 정확한 값을 가지며 이를 2차-LDPC 디코더의 입력으로 한다. 또한 2차-LDPC 디코더를 통해 패킷들의 추가적인 오류 정정이 이루어지면 오류 추정 및 2차-LDPC 디코더를 반복적으로 사용할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

3.1 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안하는 네트워크·채널 결합 코드인 SPNC-LDPC에 대해 AWGN 채널에서 제안하는 소스 노드에서 보내고자 하는 데이터를 목적지 노드에서 오류 없이 모두 수신할 확률인 Decoding Probability를 통해 성능을 확인하고자 하였다. 그림 1

과 같이 일대일 노드 간 전송의 경우, 소스 노드에서 보내고자 하는 패킷의 개수가 N 일 때, 네트워크 코딩을 통해 인코딩된 패킷을 K 개 생성하여 전송하였으며 ($K > N$), 이를 RLNC와 LDPC를 사용한 Separate Network and Channel Coding (SNCC) 및 Repetition code와 LDPC를 사용한 Non-NC와 비교하였으며, 시뮬레이션 결과 그림 6과 같이 주어진 실험 환경에서 제안하는 결합코드 기법을 사용하였을 때 약 0.8~1.7dB의 코딩 이득을 보이는 것을 확인하였다.

릴레이 네트워크의 경우 SNCC, SNFC 및 JNFC와 제안방법을 비교하였다. 소스와 릴레이 간 링크 및 릴레이와 목적지간 링크의 SNR은 소스와 목적지간 SNR+2dB로 설정하였으며, SNFC와 JNFC의 경우 소스와 릴레이 간 링크의 오류가 없다고 가정하였다. 릴레이 노드에서는 소스 노드로부터 전송받은 패킷만을 인코딩 하여 전송한다. 시뮬레이션 결과 그림 7과 같이 주어진 실험 환경에서 제안하는 결합 코드 기법을 사용하였을 때 SNCC 및 SNFC와 비교하여 약 1~3dB의 코딩 이득을 보이는 것을 확인하였다. 또한

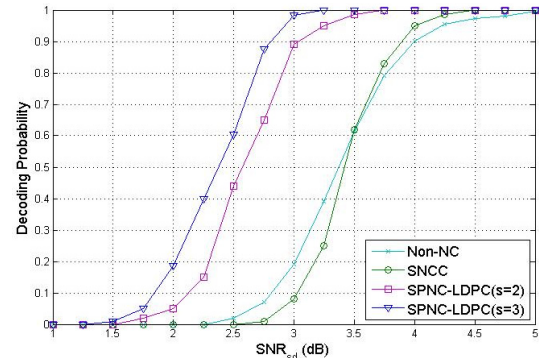


그림 6. 일대일 노드 경우의 시뮬레이션 결과(N=2, K=3)
Fig. 6. Simulation result(One hop topology)

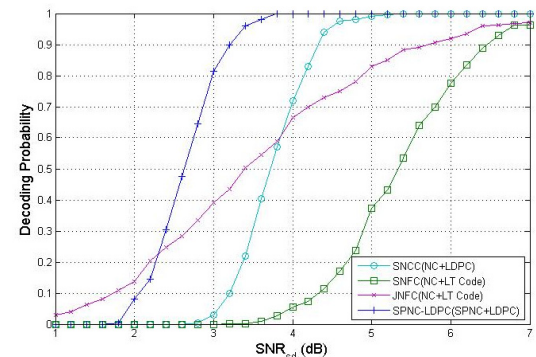


그림 7. 릴레이 네트워크 경우의 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation result(Relay topology)

표 1. 실험환경
Table 1. The Simulation Parameters

Parameter	Value
Channel	AWGN, Fading
Channel Coding	LDPC(528,480)
Modulation	BPSK
Packet size	480 bits

JNFC와 비교하여 낮은 SNR에서는 낮은 오류 정정율을 보이지만 높은 SNR에서는 데이터의 신뢰도가 상대적으로 크게 확보되는 것을 확인하였다. JNFC의 경우, 소스와 릴레이간 오류가 없다고 가정하였으므로 실제 오류가 발생함을 감안하면 전체적으로 제안방법의 성능이 높다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 결과분석

실험 결과, 본 논문에서 제안한 결합코드를 사용하여 패킷을 전송할 경우 추가적인 오류 정정을 통해 더 높은 디코딩 확률을 보여주는 것을 확인하였다. 실험 결과를 통해 여분의 패킷을 더 전송하거나, 각 패킷을 구성하는 서브 패킷의 수 s 를 늘릴수록 오류 정정 성능의 효율이 커지는 것을 확인하였다.

하지만 서브 패킷의 수를 크게 할 경우 서브 패킷의 크기가 작아지기 때문에 오류 추정 개선도가 감소한다. 시뮬레이션 결과, 그림 6과 같이 동일한 시뮬레이션 환경에서 $s=2$ 일 때 기존 대비 약 0.8dB의 코딩 이득을 보이나 $s=3$ 일 때 약 1.2dB만이 개선되었다. 또한 서브 패킷의 수를 크게 할 경우, 오류 추정 과정에서의 연산과정이 증가한다. 동일한 시뮬레이션 환경에서 $s=3$ 일 때의 오류 추정 연산 시간은 $s=2$ 일 때와 비교하여 최대 약 6배가 소모된다. 따라서 오류 정정 능력과 오류 정정 연산 속도를 비교하여 서브 패킷의 개수 및 크기를 고려하여 설계하여야 한다.

또한 각 패킷을 구성하는 서브 패킷의 수가 많을수록 패킷의 헤더에 추가되는 오버헤드의 크기가 커지는 것을 고려할 필요가 있다. RLNC를 사용하여 패킷을 인코딩 할 때 인코더는 특정 크기의 유한필드 GF(2^q)에서 계수를 무작위로 선택하여 패킷을 선형 결합하는데 N 개의 패킷을 결합할 경우, 각 패킷에는 $N \cdot q$ bit의 오버헤드가 추가 된다. 이때, SPNC를 이용하여 각 패킷을 서브 패킷 단위로 나누어 결합하면 $N \cdot q \cdot s$ bit의 오버헤드가 추가 되고, 나누어지는 서브 패킷의 수가 많아질 때마다 선형적으로 증가하므로, 이를 전체 패킷 크기 등을 고려하여, 전송 효율에 크게 영향을 미치지 않는 정도로 설계하여야 한다.

IV. 결 론

본 논문에서 우리는 서브 패킷 단위의 네트워크 코딩과 LDPC를 결합한 SPNC-LDPC기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 이에 대한 결과를 분석하였다. 시뮬레이션 결과 목적지에서 여분의 패킷을 전송 받았을 때 네트워크 코딩 기법과 채널 코딩 기법이 상호 보완적으로 작용함으로써 기존 대비 오류 정정 능력이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 연산 속도 및 추가적으로 발생하는 오버헤드 등을 고려하여 설계하여야 하며, 이를 실험적으로 분석할 필요가 있다. 또한 HNC 및 Unequal Error Protection(UEP)와 같이 상대적으로 높은 계층의 데이터를 우선적으로 보호할 수 있는 방법에 대해 연구할 필요가 있다.

References

- [1] R. Ahlswede, N. Cai, S. Li, and R. Yeung, "Network information flow," *Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204-1216, Jul. 2000.
- [2] S. Li, R. Yeung, and N. Cai, "Linear network coding," *Inf. Theory*, vol. 49, no. 2, pp. 371-381, Feb. 2003.
- [3] T. Ho, M. Medard, R. Koetter, D. R. Karger, M. Effros, J. Shi, and B. Leong, "A random linear network coding approach to multicast," *Inf. Theory*, vol. 52, no. 10, pp. 4413-4430, Oct. 2003.
- [4] R. Koetter and M. Medard, "An algebraic approach to network coding," *Networking*, vol. 11, no. 5, pp. 782-795, Oct. 2003.
- [5] K. Lee, S. Cho, and J. Kim, "Feasibility analysis of network coding applied to IEEE802.11s wireless mesh networks," *J. KICS*, vol. 37B, no. 11, pp. 1014-1021, Nov. 2012.
- [6] M. Park and W. Yoon, "Optimized multipath network coding in multirate multi-hop wireless network," *J. KICS*, vol. 37B, no. 9, pp. 734-740, Nov. 2012.
- [7] K. Nguyen, T. Nguyen, and S. Cheung, "Peer-to-peer streaming with hierarchical network coding," in *Proc. Int. Conf. Multimedia and Expo*, pp. 396-399, Beijing, China, Jul. 2007.
- [8] J. Yoon, C. Ahn, and J. Shin, "Video-aware

prioritized network coding over MIMO relay networks,” *J. KICS*, vol. 37A, no. 9, pp. 746-752, Nov. 2012.

- [9] P. Chau, S. Kim, Y. Lee, and J. Shin, “Hierarchical random linear network coding for multicast scalable video streaming,” in *Proc. Int. Conf. APSIPA*, pp. 1-7, Chiang Mai, Thailand, Dec. 2014.
- [10] S. Katti, D. Katabi, H. Balakrishnan, and M. Medard, “Symbol-level network coding for wireless mesh networks,” *ACM SIGCOMM*, vol. 38, no. 4, pp. 401-412, Aug. 2008.
- [11] C. Hausl and J. Hagenauer, “Iterative network and channel decoding for the two-way relay channel,” in *Proc. Int. Conf. Commun.*, vol. 4, pp. 1568-1573, Istanbul, Turkey, Jun. 2006.
- [12] C. Hausl, F. Schreckenbach, I. Oikonomidis, and G. Bauch, “Iterative network and channel decoding on a tanner graph,” in *Proc. Conf. Commun., Control and Computing*, Monticello, USA, Sept. 2005.
- [13] L. Xian, T. Fuja, J. Kliewer, and D. Costello, “A network coding approach to cooperative diversity,” *Inf. Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3714-3722, Oct. 2007.
- [14] C. Hausl and P. Dupraz, “Joint network-channel coding for the multiple-access relay channel,” in *Proc. Int. Conf. Sensor and Ad Hoc Commun. Netw.*, pp. 817-822, Reston, USA, Sept. 2006
- [15] A. Nessa, M. Kadoch, and B. Rong, “Joint network channel fountain scheme for reliable communication in wireless networks,” in *Proc. Int. Conf. ICNC*, pp. 206-210, Honolulu, USA, Feb. 2014.
- [16] R. G. Gallager, “Low-density parity-check codes,” *Inf. Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, Jan. 1962.
- [17] D. J. C. MacKay and R. M. Neal, “Near shannon limit performance of low density parity check codes,” *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 18, pp. 1645-1646, Aug. 1996.
- [18] S. Lin and D. Costello, *Error control coding: Fundamentals and applications*, vol. 114, Upper Saddle River: Pearson-Prentice Hall, 2004

김 성 연 (Seong-yeon Kim)



2013년 8월 : 성균관대학교 정보통신공학부 졸업
 2013년 9월~현재 : 성균관대학교 휴먼ICT 융합학과 석사과정
 <관심분야> 네트워크 코딩, HCI

신 지 태 (Jitae Shin)



1986년 2월 : 서울대학교 전기공학과 학사
 1988년 2월 : KAIST 원자력공학과 석사
 2001년 5월 : Univ. of Southern California (USC), Dept. of Electrical Eng. 석사 및 박사
 1988년~1991년 : 한국전력공사 고리원자력 발전소
 1988년~1996년 : 한국원자력연구소 계측제어설계부
 2001년 8월~2002년 2월 : 경희대학교 정보통신전문대학원 교수
 2002년 3월~현재 : 성균관대학교 정보통신대학 교수
 <관심분야> 멀티미디어 통신/네트워크, 이동휴대 방송기술, 유무선 통신네트워크 시스템, 영상처리