JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 19, No. 12 : 2813~2819 Dec. 2015

부분 패킷 중첩 환경에서 물리계층 네트워크 코딩에 관한 연구

임현우[1] · 정방철[2*] · 반태원[1] · 성길영[1]

On the Practical Physical-Layer Network Coding with Partially Overlapped Packets

Hyeonwoo Lim[1] · Bang Chul Jung[2*] · Tae-Won Ban[1] · Kil-Young Sung[1]

[1]Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea
[2*]Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

요 약

본 논문에서는 두 노드가 하나의 중계 노드를 통하여 서로 데이터를 주고 받는 양방향 중계 채널에서 물리계층 네트워크 코딩을 적용하여 데이터 전송률을 향상시키는 기술을 고려한다. 특히, 두 노드가 데이터를 중계 노드로 전송할 때 패킷의 길이가 서로 다른 통신 상황을 고려한다. 시뮬레이션 결과를 통하여 두 노드가 전송한 길이가 다른 패킷들의 겹치는 정도에 따라 두 패킷 중 길이가 긴 패킷의 비트오류확률(bit error rate, BER)이 변화하는 것을 확인하였다. 길이가 짧은 패킷의 경우 전체 패킷이 항상 겹치므로 패킷의 겹침 정도와 상관없이 BER이 일정하고 길이가 긴 패킷의 경우 겹침정도가 작을수록 BER 성능이 좋아진다. 네트워크 코드가 적용된 패킷의 BER은 두 패킷 중 높은 BER을 갖는 패킷의 성능에 의존하므로 향상된 BER을 달성하기 위하여 새로운 방식의 전송방식이 필요함을 알 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, we investigate the physical layer network coding (PNC) technique in a two-way relay channel (TWRC) where two source nodes send and receive data with each other via a relay node. In particular, we consider the communication scenario where packet length from the two sources is different from each other. We analyze the bit error rate (BER) of the received packet at the relay node according to degree of overlapping between two packets. The BER of the short packet remains unchanged regardless of the degree of overlapping since the entire packet is overlapped with the longer packet, while the BER of the longer packet becomes improved as the degree of overlapping decreases. Thus, we need a novel transmission scheme to enhance BER performance of the PNC technique in TWRC environments since the overall BER performance of the PNC technique at the relay node depends on the worse BER between two ovelapping packets' BERs.

키워드 : 양방향 중계 기술, 물리계층 네트워크 코딩, 채널 코딩, 패킷 겹침

Key word : Two-way relaying technique, physical-layer network coding, channel coding, packet overlapping

Received 14 September 2015, **Revised** 24 September 2015, **Accepted** 08 October 2015

*** Corresponding Author** Bang Chul Jung (E-mail:bcjung@cnu.ac.kr, Tel:+82-42-821-6580)
Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.12.2813 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons org/li-censes/by-nc/3 0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering

Ⅰ. 서 론

최근 인터넷 기반의 음성 통신, 고품질 고화질의 응용 프로그램, 온라인 게임, 고화질 영상, 사회 관계망 서비스 등과 같은 서비스들이 활성화되면서 모바일 데이터 트래픽이 기하급수적으로 증가하고 있다[1]. 이처럼 증가하는 데이터 트래픽을 효과적으로 서비스하기 위해 차세대 이동통신 시스템에 대한 연구와 기술 표준이 제시되고 있다. 향후 5세대 이동통신시스템에 적용될 것으로 예상되는 핵심기술들은 공통적으로 높은 주파수 효율성이 요구되고 있다. 최근 전이중 중계 기술이 재조명되고 있으나 아직까지 실용화되지 못하고 실험실 수준의 검증이 진행되고 있다[2,3]. 따라서 실제 시스템에서 사용중인 반이중 중계기를 활용하여 보다 주파수 효율적인 전송방식을 연구하는 것이 중요하다[4].

주파수 효율적 데이터 중계방식 기술 중 각광을 받고 있는 대표적인 기술은 물리 계층 네트워크 코딩 (physical-layer network coding, PNC)이다. 물리계층 네트워크 코딩의 핵심적인 아이디어는 첫 번째 패킷 전송 시간 동안 두 소스 노드들이 동시에 패킷들을 중계 노드로 전송하여도 그 중첩된 신호로부터 네트워크 코딩된 신호를 얻을 수 있다는 것이다[5-7]. 지금까지 제시된 물리계층 네트워크 코딩 기술은 대부분 두 소스 노드가 전송한 패킷의 길이가 같다는 가정을 하고 있다. 그러나 실제로 무선통신 시스템에서 전송되는 패킷의 길이는 매우 다양하다.

최근 이렇게 양방향으로 전송되는 패킷의 길이가 다른 환경에서 네트워크 코딩 기법을 적용하는 연구가 진행되었다[8]. [8]에서는 각 노드에서 전송하는 패킷의 길이가 다를 때 중계 노드에서 겹치는 부분만큼만 네트워크 코딩을 하여 방사하고, 겹치지 않는 부분은 네트워크 코딩 없이 단일방향으로 전송하여 총 네 번의 패킷 전송시간을 갖는 network coding after fragmentation (NaF) 방식과 패킷 길이가 긴 비트를 기준으로 중계 노드에서 패킷 길이가 짧은 비트를 zero-padding하여 패킷 길이를 맞춘 후 네트워크 코딩된 패킷을 방사하는 network coding after padding (NaP)방식을 비교 분석하였다. 그러나 [8]에서 고려한 네트워크 코딩은 2번의 전송 슬롯을 사용하는 물리계층 네트워크 코딩이 아닌 3번의 전송 슬롯을 사용하는 네트워크 코딩 기법이다.

따라서, 본 논문에서는 2번의 전송 슬롯을 활용하는 물리계층 네트워크 코딩 기술을 패킷 길이가 서로 다른 환경에 적용하는 시스템을 고려한다. 물리계층 네트워크 코딩에서 중계기는 길이가 다른 두 패킷이 중첩되어 수신되었을 때 중첩된 신호로부터 각각의 신호를 검출하여 네트워크 코딩된 패킷을 만들어야 한다. 따라서 본 논문에서는 첫 번째 패킷 전송 시간에서 서로 다른 길이를 갖는 패킷들을 복호하는 과정을 설명하고 그 성능을 분석한다. 첫 번째 패킷 전송시간에서 네트워크 부호화된 패킷이 성공적으로 획득되면 두 번째 패킷 전송시간에는 기존의 물리계층 네트워크 부호화 기법과 동일하게 전송한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 시스템 모델을 제시하고 물리계층 네트워크 부호화 기술의 복호를 위하여 [9]에서 제안한 개별 복호 (separate decoding)에 기반한 LLR 계산 기법을 설명한다. 3장에서 서로 교환하는 패킷의 길이가 다른 경우의 성능 차이를 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통해 분석하고 4장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델

2.1. 다중접속구간에서의 복호

그림 1은 두 개의 소스 노드 (A, C)와 하나의 중계 노드 (B)로 구성된 3개의 노드를 가지는 선형 네트워크 모델을 나타낸다. 첫 번째 패킷 전송 시간 (time slot 1) 동안 두 소스 노드 A와 C가 동시에 중계 노드 B로 데이터를 전송하고, B에서는 A와 C의 중첩된 신호를 수신한다. 여기서 두 소스 노드 각각의 패킷의 길이가 다르기 때문에 짧은 패킷 길이만큼 겹쳐서 중계 노드 B로 전송되고, 짧은 패킷의 전송이 끝나고 남은 시간 동안은 긴 패킷의 데이터만 전송된다. 그림 1에서는 C에서 전송된 패킷의 길이가 더 길다고 가정하였다. 그리고 중계 노드 B는 다중접속구간 (multiple access phase)인 첫 번째 패킷 전송 시간 동안 수신된 신호를 복호하고 네트워크 코딩된 패킷을 만들어낸다. 본 논문에서 중계 노드에서 사용하는 네트워크 코딩 기술은 배타적 논리합 (exclusive OR, XOR) 연산을 사용하였다. 복호가 성공적으로 이루어졌다면 두 번째 패킷 전송 시간 (time slot2)인 방송 구간 (broadcast phase) 동안 복호된 신호

들의 XOR 연산으로 얻어진 네트워크 코딩된 패킷을 중계 노드 B가 두 소스 노드에게 방사한다. 이 때, 짧은 패킷의 전송이 끝나고 긴 패킷의 데이터만 전송된 시간 동안은 네트워크 코딩할 데이터가 없으므로 수신된 데이터 자체가 송신된다. 두 번째 패킷 전송 시간 동안 B로부터 수신한 패킷을 복호한 후 두 소스 노드 (A, C)는 첫 번째 타임 슬롯에서 전송한 자신의 데이터와 다시 한 번 XOR 연산을 수행하여 A와 C가 원하는 패킷을 얻을 수 있다.

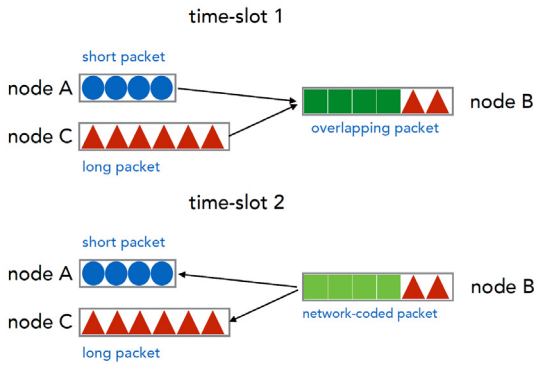

Fig. 1 System model

본 논문에서는 물리계층 네트워크 코딩 전송 과정 중 첫 번째 패킷 전송 시간 동안의 전송에 중점을 둔다. 첫 번째 패킷 전송 시간 동안의 전송이 성공적으로 끝나면 네트워크 코딩 된 패킷의 전송은 네트워크 코딩이 적용되지 않은 기존의 방식과 동일하기 때문이다[5].

먼저 L_S와 L_L은 전송된 패킷 중 길이가 짧은 패킷의 기저대역 심벌개수와 긴 패킷의 기저대역 심벌개수를 나타내고, 그림 1에서와 동일하게 소스 노드 C에서 전송된 패킷의 길이가 더 길다고 가정한다. 따라서 첫 번째 패킷 전송 시간 동안 중계 노드에서 수신된 l번째 기저대역신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_B(l) = h_{AB}x_A(l) + h_{CB}x_C(l) + n_B(l) \ (\text{for } 0 < l \le L_S) \quad (1)$$

$$y_B(l) = h_{CB}x_C(l) + n_B(l) \ (\text{for } L_S < l \le L_L) \quad (2)$$

h_{AB}와 h_{CB}는 소스 노드 (A, C)와 중계 노드 (B) 사이 각각의 무선 채널 계수를 나타내고, n_B항은 B에서의 $n_B \sim CN(0,\sigma_B^2)$ 분포를 따르는 AWGN 잡음을 나타낸다. 무선채널은 $h_{iB} \sim CN(0,\sigma_{iB}^2)$인 Rayleigh 분포를 따르고, 중계 노드는 수신 패킷이 겪은 무선 채널 계수를 알고 있다고 가정한다. 여기서 $i \in \{A, C\}$이다.

그림 2는 A와 C 각각의 패킷 길이가 다른 경우 첫 번째 패킷 전송 시간 동안 짧은 패킷 길이만큼 중첩되어 중계 노드 B에 수신된 신호를 나타내고, 그림 3은 짧은 패킷의 전송이 끝나고 남은 시간 동안 긴 패킷에서 짧은 패킷의 길이만큼을 제외한 패킷이 B에 수신된 신호를 나타낸다. 두 그림에서 각각의 소스 노드는 BPSK 모듈레이션을 사용하였다. 따라서 송신된 신호의 조합에 따라 소스 노드 A와 C 패킷이 겹쳐서 수신된 신호의 후보는 네 개가 되고, 긴 패킷의 데이터만 전송된 구간의 수신된 신호의 후보는 두개 존재한다. 각각의 수식은 아래와 같다.

$$(x_{AB}, x_{CB}) \in \{(1,1),(1,-1),(-1,1),(-1,-1)\}$$
$$(x_{CB}) \in \{(1),(-1)\}$$

두 번째 패킷 전송 시간 동안 A와 C에서 수신된 l번째 심볼은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$y_A(l) = h_{AB}x_B(l) + n_A(l) \quad (3)$$

$$y_C(l) = h_{CB}x_B(l) + n_C(l) \quad (4)$$

$x_B(l)$는 B로부터 네트워크 코딩된 패킷의 모듈레이션 심볼을 나타내고, $\sigma_A^2 = \sigma_B^2 = \sigma_C^2$ 라 가정한다.

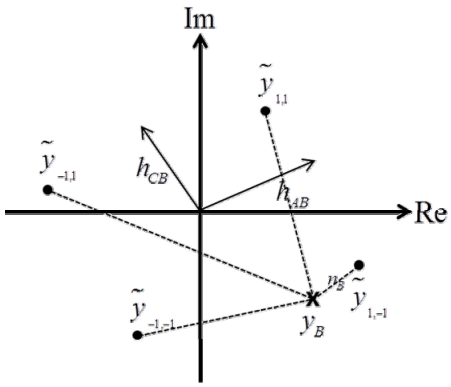

Fig. 2 Received signal at relay node at time slot 1 when both sources transmit BPSK symbols

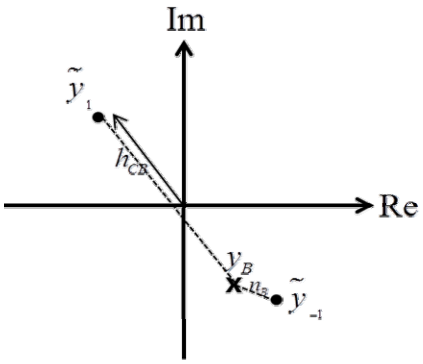

Fig. 3 Received signal at relay node at time slot 1 when a source transmits BPSK symbols

2.2. 다중접속구간에서의 복호

물리계층 네트워크 코딩 기술에서 가장 중요한 문제는 첫 번째 슬롯의 중계 노드에서 중첩된 신호로 부터 네트워크 코딩된 패킷을 얻는 것이다. 따라서 본 장에서는 각 소스 노드 (A, C)에서 x_A와 x_C를 전송하였을 때 중계 노드 B에서 복호된 신호로부터 네트워크 코딩된 신호를 얻는 과정을 설명한다. 네트워크 코딩된 패킷의 복호는 기존의 통신 시스템에서와 같은 방법으로 실행되고 그 과정은 각 링크의 채널상태에 의존한다. 그러나 첫 번째 패킷 전송 시간 동안 중계 노드에 중첩된 신호의 검출과 채널의 복호는 두 소스 노드 (A, C) 모두의 채널상태 (h_{AB}, h_{CB})에 의존하기 때문에 쉽지 않다. 따라서 중계 노드에서 네트워크 코딩된 패킷의 복호 성능을 아는 것은 중요하다. 왜냐하면 각각의 노드들이 전송률 선택 또는 검출과 코딩 기술 선택(MCS)에 사용하기 때문이다. 그러므로 본 논문의 식 (1)로부터 네트워크 코딩된 패킷을 어떻게 얻을 지에 주목하자.

본 장에서 네트워크 코딩된 패킷을 얻기 위해 A와 C 각각의 노드에서 전송된 패킷을 복호한 후에 두 복호된 패킷끼리 XOR 연산을 통해 네트워크 코딩된 패킷을 얻는 개별 복호를 사용하였다. 개별 복호는 대수 가능성비 (log-likelihood ratio, LLR) 계산에 의한 결합 최대 우도추정 (joint maximum likelihood)검출을 이용하여 식 (1)로부터 x_A와 x_C 모두를 각각 복호 하는 것이다.

그림 2는 A와 C에서 전송하는 패킷의 길이가 다를 경우 짧은 패킷 길이만큼 겹쳐져 B로 전송되었을 때 후보군으로 가능한 네 개의 수신 신호 y_B를 나타내고 그림 3은 짧은 패킷 길이만큼 겹쳐져 B로 전송된 후 남은 시간 동안 전송되는 긴 패킷만 B로 전송될 때 후보군으로 가능한 두 개의 신호 y_B를 나타낸다. 중계 노드는 송신단에서 사용된 변조 기법과 채널상태를 알고 있기 때문에 수신 신호의 후보들은 중계 노드에서 알고 있다. 개별 복호를 위한 채널 코딩된 c_A와 c_C의 LLR 값을 아래의 식을 통해 얻을 수 있다.

$$\Lambda(c_A) = \log\frac{\Pr(c_A=0|y_B)}{\Pr(c_A=1|y_B)} \tag{5}$$

$$\Lambda(c_C) = \log\frac{\Pr(c_C=0|y_B)}{\Pr(c_C=1|y_B)} \tag{6}$$

Pr(Ω)는 Ω가 발생할 확률을 나타낸다. 변조기법의 심볼 생성 법칙을 이용하여 식(5)와 식(6)의 확률을 계산할 수 있다. 예를 들어, 두 소스 노드가 0은 1로, 1은 -1로 맵핑하는 BPSK 변조 방식을 사용한다고 가정하면 식(5)와 식(6)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\Lambda(c_A) &= \log\frac{\Pr(y_B|x_A=1,x_C=1)+\Pr(y_B|x_A=1,x_C=-1)}{\Pr(y_B|x_A=-1,x_C=1)+\Pr(y_B|x_A=-1,x_C=-1)} \\ &= \log\frac{\exp(-\frac{|y_B-y_{1,1}|^2}{2\sigma^2})+\exp(-\frac{|y_B-y_{1,-1}|^2}{2\sigma^2})}{\exp(-\frac{|y_B-y_{-1,1}|^2}{2\sigma^2})+\exp(-\frac{|y_B-y_{-1,-1}|^2}{2\sigma^2})}\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\Lambda(c_C) &= \log\frac{\Pr(y_B|x_A=1,x_C=1)+\Pr(y_B|x_A=-1,x_C=1)}{\Pr(y_B|x_A=1,x_C=-1)+\Pr(y_B|x_A=-1,x_C=-1)} \\ &= \log\frac{\exp(-\frac{|y_B-y_{1,1}|^2}{2\sigma^2})+\exp(-\frac{|y_B-y_{-1,1}|^2}{2\sigma^2})}{\exp(-\frac{|y_B-y_{1,-1}|^2}{2\sigma^2})+\exp(-\frac{|y_B-y_{-1,-1}|^2}{2\sigma^2})}\end{aligned} \tag{8}$$

그림 3과 같이 짧은 패킷 길이만큼 겹쳐져 B로 전송이 끝나면 남은 시간 동안 긴 패킷에서 짧은 패킷의 길이만큼을 제외한 패킷만 수신된다. 그림 1에서 C에서 전송된 패킷의 길이가 더 길다고 가정하였기 때문에 남은 시간 동안 수신되는 패킷은 C이고 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 위와 같은 방식으로 확률을 계산하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Lambda(c_C) = \log\frac{\Pr(y_B|x_C=1)}{\Pr(x_C=-1)} = \log\frac{\exp(-\frac{|y_B-y_1|^2}{2\sigma^2})}{\exp(-\frac{|y_B-y_{-1}|^2}{2\sigma^2})} \tag{9}$$

변조 심볼은 같은 확률로 생성되고, 베이즈 룰을 따른다고 가정했다. 식 (7)-(9)에서 구해진 각각의 LLR 값은 채널 복호기에 입력되고, 복호 오류가 존재하지 않는다면 정보비트 b_A, b_C를 얻을 수 있다. 따라서 개별 복호의 경우 두 번의 복호 과정이 필요하고, 네트워크 코딩은 $b_B = b_A \oplus b_C$로 계산된다.

개별 복호 방법으로 16QAM과 같은 높은 차수의 모듈레이션 기술에서의 LLR 값 계산이 가능하지만, 복잡도가 큰 폭으로 증가한다. 만약 소스 노드가 M- QAM을 사용할 경우, 중계 노드에서의 수신 신호 후보개수는 M^2로 기하급수적으로 증가한다.

Ⅲ. 모의실험 결과 및 분석

본장에서는 두 노드가 하나의 중계 노드를 통하여 서로 데이터를 주고받는 양방향 중계 채널에서 두 소스 노드가 데이터를 중계 노드로 전송할 때 패킷의 길이가 서로 다른 일반적인 상황에 물리계층 네트워크 코딩을 적용하였을 때의 BER 성능을 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보인다. 성능의 비교를 위해 변조방식의 차수(M)를 2, 4, 16개로 각각 늘여가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 M=2는 BPSK 변조기법을 나타내고, M=4는 QPSK 변조기법을 나타내고, M=16은 16QAM 변조기법을 나타낸다.

그림 4는 양방향 중계 채널에서 두 소스 노드에서 전송하는 패킷의 길이가 다른 일반적인 상황에서 물리계층 네트워크 코딩을 적용하였을 때 각기 다른 시뮬레이션 환경에서의 BER 성능을 나타낸다. 상용 이동통신 시스템에서 사용되는 1/3의 부호율을 갖고 부호 생성 다항식이 [557, 663, 711]인 convolutional code를 사용하였고, 변조기법으로는 BPSK를 사용하였다. 이때 길이가 짧은 패킷 (Short), 긴 패킷 (Long) 그리고 네트워크 코딩이 적용된 패킷의 BER 성능을 보여준다. 그림 4에서 짧은 패킷은 A와 C 패킷의 겹치는 정도와 상관없이 짧은 패킷 길이만큼 겹쳐서 전송되기 때문에 짧은 패킷의 BER은 거의 동일한 성능을 나타낸다. 그러나 긴 패킷의 경우 30% 중첩된 패킷의 성능이 70% 중첩된 패킷보다 더 좋은 성능을 나타낸다.

그림 5, 6은 동일한 네트워크 환경에서 각각 QPSK, 16QAM 변조기법을 사용하였을 때 길이가 짧은 패킷과 긴 패킷의 BER 성능을 보여준다. 전반적으로 BPSK 변조 방식을 사용한 그림 4와 유사한 경향을 보이나 변조방식의 차수가 증가하고 겹치는 정도가 적을수록 성능이 향상되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 긴 패킷과 짧은 패킷의 겹치는 정도가 짧아질수록 긴 패킷의 신호만 보내지는 시간이 길어지는 것에 기인한다. 즉, 수신된 데이터 자체만 송신되는 시간이 길어질수록 BER 성능이 개선됨을 알 수 있다.

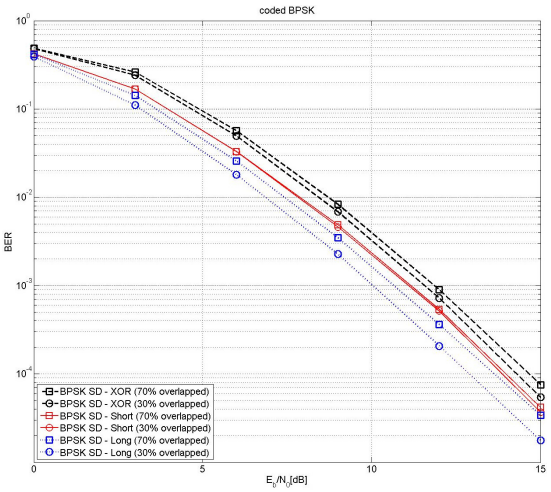

Fig. 4 BER of Physical-Layer Network Coding with Partially Overlapped Packets (BPSK)

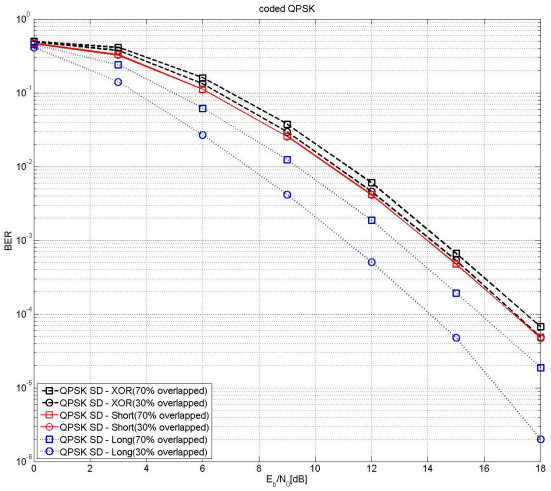

Fig. 5 BER of Physical-Layer Network Coding with Partially Overlapped Packets (QPSK)

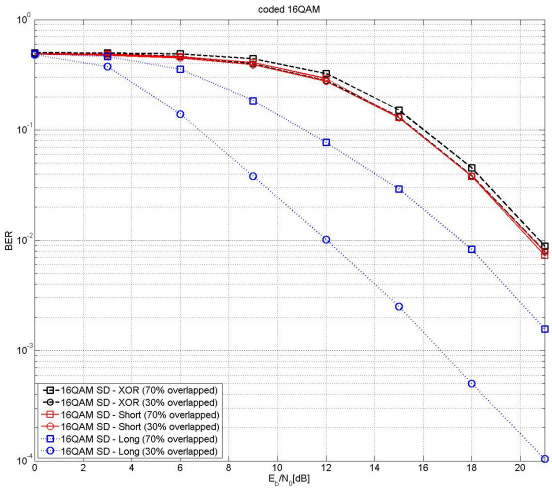

Fig. 6 BER of Physical-Layer Network Coding with Partially Overlapped Packets (16QAM)

또한 그림 4, 5, 6에서 보는 바와 같이 각각의 노드에서 전송한 패킷을 복호 한 후 네트워크 코딩하게 되면 두 패킷 중 높은 BER을 갖는 짧은 패킷의 BER의 성능에 의존함을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문은 양방향 중계 채널에서 두 소스 노드가 데이터를 중계 노드로 전송할 때 패킷의 길이가 서로 다른 일반적인 상황에서 물리계층 네트워크 코딩을 적용하여 데이터 전송률을 향상시키는 기술을 고려하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 두 노드가 전송하는 패킷의 길이가 다를 경우 패킷들이 겹치는 정도가 적을수록 두 패킷 중 길이가 긴 패킷의 BER이 낮아지는 것을 확인하였다. 네트워크 코드가 적용된 패킷의 BER은 두 패킷 중 높은 BER을 갖는 패킷의 성능에 의존하는 것을 고려하면 양방향 중계 통신 환경에서 물리계층 네트워크 코딩을 사용하였을 때, 보다 향상된 BER을 달성하기 위하여 새로운 방식의 전송방식이 필요함을 알 수 있다. 또한 각각의 소스 노드에서 전송하는 패킷의 길이가 다를 경우 패킷의 길이를 동일하게 만드는 효과적인 방법에 대한 연구와 그에 따른 새로운 복호방식에 대한 연구가 추후 이루어져야 할 것이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was support by IITP grant funded by the Korea government (MSIP) (No. B0126-15-1064, Research on Near-Zero Latency Network for 5G Immersive Service) and was supported by the Gyeongsang National University Fund for Professors on Sabbatical Leave, 2013.

REFERENCES

[1] Cisco, “Global mobile data traffic forecast update, 2014-2019,” *White paper*, Feb. 2015.

[2] S. Goyal, Pei Liu, S. S. Panwar, A. Robert, R.A DiFazio, Rui Yang, and - 50 - E. Bala, “Full duplex cellular systems: Will doubling interference prevent doubling capacity?” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 5, pp. 121-127, May 2015.

[3] S. Hong, J. Brand, J. Choi, M. Jain, J. Mehlman, S. Katti, and P. Levis,“Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 114-121, Feb. 2014.

[4] B. Rankov and A. Wittneben, “Spectral efficient protocols for half duplex fading relay channels,” *IEEE JSAC*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007

[5] S. Zhang, S. Liew, and P. P.Lam, “Physical-layer network coding,” in *Proc. of ACM MOBICOM*, Sep. 2006.

[6] H. J. Yang, B. C. Jung, and J. Chun, "Zero-forcing based two-phase relaying with multiple mobile stations," *Asiloma Conference on Signals, Systems, and Computers*, Oct. 2008.

[7] S. H. Kim, B. C. Jung, and D. K. Sung, "Transmit power optimization for two-way relay channels with physical-layer network coding," *IEEE Communications Letters*, Vol. 19, No. 2, pp. 151-154, Feb. 2015.

[8] J. S. Lee, H. S. Ryu, and C. G. Kang, "Network coding for turbo-coded system in asymmetric two-way relay", *Journal of KICS*, vol. 2010, no. 6, pp. 362-363, Jun. 2010.

[9] B. C. Jung, "A Practical Physical-Layer Network Coding for Fading Channels" *International Journal of KIMICS*, vol. 8, no. 6, pp. 655-659, Dec. 2010.

임현우(Hyeonwoo Lim)

2013년 2월 경상대학교 정보통신공학과 학사
2015년 8월 경상대학교 정보통신공학과 석사
※관심분야 : 네트워크코딩, 차세대 이동통신 시스템(4G, Beyond 4G, and 5G)

정방철(Bang Chul Jung)

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사
2004년 8월 KAIST 전자전산학과 석사
2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사
2008년 3월 ~ 2009년 8월 KAIST IT융합연구소 팀장
2009년 9월 ~ 2010년 2월 KAIST IT융합연구소 연구교수
2010년 3월 ~ 2014년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수
2014년 3월 ~ 2015년 8월 경상대학교 정보통신공학과 부교수
2015년 9월 ~ 현재 충남대학교 전자공학과 부교수
2010년 4월 ~ 현재 KAIST IT융합연구소 겸직교수
※관심분야 : 무선통신시스템, 통계적 신호처리, 정보이론, 압축센싱

반태원(Tae-Won Ban)

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사
2010년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사
2000년 2월 ~ 2012년 8월 KT 네트워크부문
2012년 9월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
※관심분야 : 이동통신, 자원관리, 간섭관리, 협력 및 중계통신, 인지통신, 주파수 공유, 차세대 이동통신 시스템

성길영(Kil-Young Sung)

1980년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
1985년 2월 건국대학교 전자공학과 석사
2000년 2월 부경대학교 전자공학과 박사
현재 경상대학교 정보통신공학과 교수
※관심분야 : VLSI array, Computer architecture, Image compression