

양방향 중계채널에서 중계기 다중안테나가 물리계층네트워크 코딩의 성능에 미치는 영향

박정홍¹ · 정방철^{1*} · 반태원²

Effect of Multiple Antennas at a Relay Node on the Performance of Physical-Layer Network Coding in Two-Way Relay Channel

Jeonghong Park¹ · Bang Chul Jung^{1*} · Tae-Won Ban²

^{1*}Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

요 약

본 논문에서는 양방향 중계 채널에서 중계기에 다중안테나가 존재할 경우 물리계층 네트워크 코딩 기법의 성능 분석을 수행하였다. 2개의 소스 노드는 하나의 안테나를 가진다고 가정하고 중계기에는 다중안테나가 설치되었다고 가정한다. 본 논문에서는 소스 노드와 중계노드에 각각 하나의 안테나가 존재하는 기존 시스템을 중계기에 다중안테나가 존재하는 환경으로 확장한다. 특히, 중계기에서 2개의 소스 노드들로부터 도착한 패킷을 복호하는 과정에서 각 패킷을 복호한 후 네트워크 부호화를 수행하는 개별복호기술과 소스 노드들로부터 도착한 2개의 패킷을 동시에 고려하여 직접복호하는 기술을 비교분석한다. 다중안테나기반의 중계기를 사용할 경우 물리계층 네트워크 코딩의 비트오류성능이 중계기의 안테나의 개수가 증가함에 따라 향상되는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we investigate the effect of multiple antennas at a relay node on the performance of physical-layer network coding (PNC) in the two-way relay channel (TWRC). We assume that two source nodes have a single antenna and the relay node has multiple antennas. We extend the conventional TWRC environment with a single antenna at both relay and source nodes to the case of multiple antennas at the relay node. In particular, we consider two decoding strategies: separate decoding (SD) and direct decoding (DD). The SD decodes each packet from the two sources and performs the network coding with bit-wise exclusive OR (XOR) operation, while the DD decodes the network-coded packet from the two sources. Note that both decoding strategies are based on log-likelihood ratio (LLR) computation. It is shown that the bit error rate (BER) performance becomes significantly improved as the number of antennas at the relay node.

키워드 : 양방향 중계 채널, 물리계층 네트워크 코딩, 채널 코딩, 다중입출력 안테나

Key word : Two-way relaying channel, physical-layer network coding, channel coding, MIMO

Received 14 April 2016, Revised 18 April 2016, Accepted 23 April 2016

* 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/jkice.2016.20.8.1438>

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/licenses/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. 서론

최근 양방향 중계 채널 통신에서 데이터 전송률과 신뢰성을 향상시키기 위한 기술로 네트워크 부호화(network coding) 기술이 제안되었다. 네트워크 부호화 기술은 중계 노드가 두 소스 노드에서 전송된 신호를 단순히 전달해주는 역할에서 그치지 않고 입력 정보들을 네트워크 부호화를 통해 새로운 출력정보를 만들어 두 소스 노드로 송신하는 기술이다[1]. 이처럼 네트워크 부호화를 적용하지 않은 기존의 양방향 중계 채널 통신은 두 소스 노드 간에 정보를 주고받는데 네 번의 패킷 전송 시간이 필요한 반면, 네트워크 부호화 기술을 적용함으로써 세 번의 패킷 전송 시간으로 노드 간 통신이 가능하다. 그로 인해 데이터 전송시간을 단축시키고, 그에 따라 데이터 전송률과 주파수 효율을 높일 수 있다.

네트워크 부호화를 적용한 시스템보다 주파수 효율과 데이터 전송률을 증가시키기 위한 기술로 물리계층 네트워크 코딩(physical-layer network coding, PNC) 기술이 연구되었다[2]. 물리계층 네트워크 코딩은 첫 번째 패킷 전송 시간 동안 두 소스 노드들이 동시에 패킷들을 중계 노드로 전송하여도 그 중첩된 신호로부터 네트워크 코딩된 신호를 얻을 수 있다는 점에서 착안하여, 두 번째 패킷 전송 시간 동안 중계 노드가 수신한 두 패킷으로부터 네트워크 코딩된 신호를 얻어 두 소스 노드에게 네트워크 코딩된 패킷을 전송하여 노드 간에 정보를 주고받는데 두 번의 패킷 전송 시간이 필요한 보다 주파수 효율적인 데이터 중계 기술이다.

한편, 최근 기하급수적으로 증가하는 데이터 트래픽을 감당하기 위해 다중안테나 기술(MIMO)이 제안되었다. MIMO 기술은 두 개 이상의 안테나를 사용하여 데이터 전송률을 높이거나 데이터의 정확성을 높이는 기술로 3GPP, LTE [3]와 wireless local access network(WLAN) [4]등의 이동통신시스템에 채택되어 성공적인 상용화를 이끌었다. 또한 2020년 상용화를 목표로 하는 5세대 이동통신의 주요 기술 중 하나로 고려되고 있다[5].

최근 페이딩 채널에서 중계기의 안테나 개수가 두 개 이상인 다중 안테나 시스템의 성능이 비약적으로 향상되는 것에서 착안하여, 다중 안테나 환경에 물리계층 네트워크 코딩을 적용하는 연구가 진행되었다[6]. 그러나[6]에서는 중계기의 안테나 개수가 두 개인 상황만을

가정하였고, 각 소스 노드가 오직 BPSK 변조 방식을 사용한 경우에 대해서만 분석을 시도하였다. 3GPP LTE 시스템이나 IEEE 802.11 등의 시스템에서는 송수신 안테나가 4~8개 정도 고려하고 있다. 앞으로 개발될 5G 이동통신 시스템에서는 수십 개의 안테나가 사용될 것으로 예상된다. 본 논문에서는 양방향 중계 채널 통신에서 중계기의 안테나 개수가 2개 이상인 다중안테나 중계기를 고려한 물리계층 네트워크 코딩 기술을 제안한다. 또한 기존에 제안된 BPSK 변조 방식과 추가적으로 QPSK, 그리고 16QAM 변조 방식을 사용한 경우의 성능을 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 두 노드가 하나의 중계 노드를 통하여 서로 데이터를 주고받는 양방향 중계 네트워크 시스템에서 중계기의 안테나가 2개 이상인 시스템 모델을 고려한다. 아래 그림 1은 두 개의 소스 노드(A와 C)와 하나의 중계 노드(B)로 구성된 3개의 노드를 가진 선형네트워크 모델을 나타낸다. 그림 1에서서는 각 소스 노드는 하나의 안테나를 가지고 중계 노드는 두 개의 안테나를 가지는 상황을 설명하고 있다. 첫 번째 패킷 전송 시간 동안 A와 C가 동시에 서로 다른 채널 벡터를 통해 중계 노드로 데이터를 전송하고, 중계 노드(B)에서 A와 C가 중첩된 벡터 신호를 수신한다. 중계 노드 B는 다중접속 구간인 첫 번째 패킷 전송 시간동안 수신된 신호를 복호하고 네트워크 코딩된 패킷을 만들어 낸다. 본 논문에서는 중계 노드에서 사용하는 네트워크 코딩 기술로서 배타적 논리합(XOR) 연산을 고려한다. 복호가 성공적으로 이루어졌다면 두 번째 패킷 전송 시간인 방송 구간 동안 복호된 신호들의 XOR 연산으로 얻어진 네트워크 코딩된 패킷을 중계 노드(B)가 방사한다. 두 번째 패킷 전송 시간 동안 소스 노드(A와 C)들은 중계 노드로부터 수신한 네트워크 패딩된 패킷을 복호한 후 첫 번째 타임 슬롯에서 자신이 전송한 패킷과 수신된 패킷을 다시 한 번 XOR 연산을 하여 상대방이 자신에게 전송한 패킷을 얻는다. 따라서 중계 노드에서 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_{Bi} = h_{Ai}x_A + h_{Ci}x_C + n_{Bi} \quad (1)$$

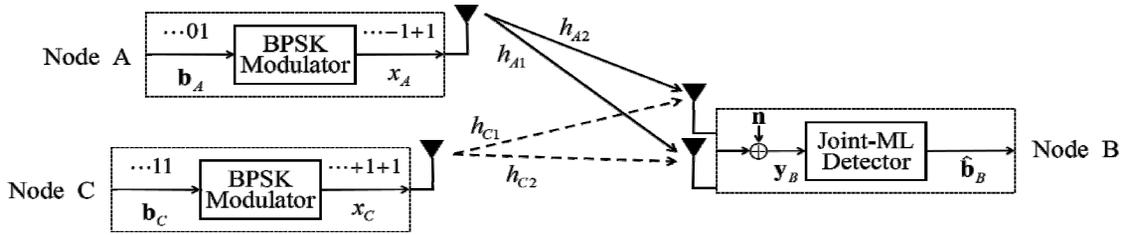


Fig. 1 Transmission/Reception procedure of the PNC in the multiple access phase.

수식 (1)에서 중계 노드의 안테나가 두 개인 시스템에서 $\mathbf{y}_B = [y_{B1} \ y_{B2}]^T$ 은 i 번째 안테나를 통해 수신된 신호 벡터이고, $\mathbf{h}_m = [h_{m1} \ h_{m2}]^T$ 은 소스 노드 (A와 C)와 중계 노드 사이의 무선 채널 벡터를 나타낸다. $\mathbf{n}_B = [n_{B1} \ n_{B2}]^T$ 는 i 번째 안테나를 통해 중계 노드에서 더해진 가우시안 잡음 $n_{Bi} \sim CN(0, \sigma_{Bi}^2)$ 을 나타낸다. 각 무선채널은 $\mathbf{h}_{mi} \sim CN(0, \sigma_{mi}^2)$ 인 Rayleigh 분포를 따른다고 가정하였고, 중계 노드는 수신 패킷이 겪은 무선 채널 계수를 알고 있다고 가정한다. 여기서 $m \in \{A, C\}$ 이고, $i \in \{1, 2\}$ 이다.

특히, 그림 1은 중계 노드의 안테나가 두 개인 양방향 중계 시스템에서 두 소스 노드가 BPSK 변조방식을 사용하였을 때 첫 번째 패킷 전송 시간 동안 A와 C가 동시에 서로 다른 채널 벡터를 통해 중계 노드 (B)로 데이터를 전송하는 다중접속 구간에서 각 노드에서의 송수신 과정을 보여준다.

여기서 \mathbf{b}_m 는 송신노드에서 전송하는 정보비트를 나타내고, x_m 는 BPSK 변조기를 통과한 변조된 심볼을 나타내고, $\hat{\mathbf{b}}_B$ 은 중계 노드에서 복호된 신호를 나타낸다. 여기서 $m \in \{A, C\}$ 이다. 물리계층 네트워크 코딩 기법이 제안된 가장 큰 이유는 첫 번째 패킷 전송 시간동안 중계 노드에서 중첩된 신호로부터 네트워크 코딩된 패킷을 얻는 것이다. 중계 노드에서 네트워크 코딩된 패킷

이 얻어지면 두 번째 패킷 전송 시간 동안 중계 노드에서 중첩된 신호로부터 네트워크 코딩된 패킷을 얻는 것이다. 중계 노드에서 네트워크 코딩된 패킷이 얻어지면 두 번째 패킷 전송 시간동안 네트워크 코딩된 신호를 전송하게 되는데, 이때부터 네트워크 코딩이 적용되지 않은 기존의 방식과 동일하다 [7]. 따라서 본 논문에서는 각 소스 노드 (A와 C)에서 x_A 와 x_C 를 전송하였을 때 중계 노드 B에서 복호된 신호인 $\hat{\mathbf{b}}_B$ 로부터 네트워크 코딩된 신호를 얻는데 중점을 두었다. 특히, 그림 1에서 Joint-ML Detector는 III장에서 설명하는 복호 방식이 수행되는 블록이다. 중계 노드 (B)에서 수신한 \mathbf{y}_B 로부터 $\hat{\mathbf{b}}_B$ 를 얻는 방법은 다음 장에서 살펴보도록 한다.

III. 다중접속구간에서의 복호 방법

3.1. 개별 복호 (Separate decoding)

개별 복호는 LLR 계산을 통하여 결합 최대 우도검출을 이용하여 수식 (1)로부터 x_A 와 x_C 모두를 각각 복호하는 것이다. 이 기술은 수신된 패킷을 복호하는데 두 번의 패킷 복호 과정이 필요하다. 두 패킷을 복호한 후에 두 복호된 패킷끼리 XOR 연산을 통해 네트워크 코딩된 패킷을 얻을 수 있다. 그림 1에서는 각 소스 노드들이 BPSK 변조를 사용하였을 때, 중계 노드 B는

$$LLR(x_A) = \log \frac{\Pr(\mathbf{y}_B | x_A = 1, x_C = 1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B) + \Pr(\mathbf{y}_B | x_A = 1, x_C = -1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B)}{\Pr(\mathbf{y}_B | x_A = -1, x_C = 1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B) + \Pr(\mathbf{y}_B | x_A = -1, x_C = -1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B)} \quad (2)$$

$$LLR(x_C) = \log \frac{\Pr(\mathbf{y}_B | x_A = 1, x_C = 1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B) + \Pr(\mathbf{y}_B | x_A = -1, x_C = 1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B)}{\Pr(\mathbf{y}_B | x_A = 1, x_C = -1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B) + \Pr(\mathbf{y}_B | x_A = -1, x_C = -1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B)} \quad (3)$$

$$LLR(x_A \oplus x_C) = \log \frac{\Pr(\mathbf{y}_B | x_A = 1, x_C = 1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B) + \Pr(\mathbf{y}_B | x_A = -1, x_C = -1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B)}{\Pr(\mathbf{y}_B | x_A = 1, x_C = -1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B) + \Pr(\mathbf{y}_B | x_A = -1, x_C = 1, \mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B)} \quad (4)$$

$\mathbf{h}_A = [h_{A1} \ h_{A2}]^T$ 채널을 통과한 노드 A로부터 수신 신호 $\mathbf{h}_{A_i} x_A$ 와 $\mathbf{h}_C = [h_{C1} \ h_{C2}]^T$ 채널을 통과한 노드 C로부터 수신 신호 $\mathbf{h}_{C_i} x_A$ 가 각각 더해진 8개의 수신 신호 $\hat{\mathbf{y}}_B$ 의 후보를 알고 있다고 가정한다. 중계 노드는 실제 수신된 수신 신호 \mathbf{y}_B 와 8개의 수신 신호 후보들을 이용하여 각 소스 노드들에서 변조된 심볼 x_A 와 x_C 의 LLR 값은 수식 (2), (3)을 통해 얻는다.

수식 (2)는 x_A 를 복호하기 위한 수식이고, 수식 (3)은 x_C 를 복호하기 위한 수식이다. 수식 (2), (3)에서 계산된 각 정보 비트에 대한 LLR값은 복호기에 입력되고, 복호 오류가 존재하지 않는다면 복호된 정보비트 $\hat{\mathbf{b}}_A$ 와 $\hat{\mathbf{b}}_C$ 를 각각 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 각각의 정보비트를 이용해 중계 노드는 네트워크 코딩된 패킷을 생성한다. 따라서 개별 복호는 네트워크 코딩된 패킷을 얻기 위해 두 번의 복호 과정이 필요하다. 이와 같은 방식으로 QPSK, 16QAM과 같은 고차원 변조방식에서의 LLR 계산이 가능하다. 그러나 그 복잡도는 큰 폭으로 증가한다.

3.2. 직접 복호 (Direct decoding)

기지대역에서 수신신호를 처리하는 대부분의 전력 소모와 시간 지연은 채널 복호기에서 발생한다. 따라서 중계 노드에서의 전력소모를 줄이고 시간 지연 성능을 향상시키기 위한 기술로 직접 복호를 제안했다[8,9]. 직접 복호의 기본적인 아이디어는 일반적인 채널코드의 선형성을 이용하는 것이다. 여기서 채널코드의 선형성이란 채널 코딩된 신호 c_A 와 c_C 를 각각 복호한 후에 네트워크 코딩을 하는 것과 네트워크 코딩 패킷을 생성한 후에 복호를 해도 결과 값이 같은 특성을 말한다. 네트워크 코딩된 패킷의 LLR 값은 다음 식으로 구할 수 있다. 수식 (4)은 네트워크 코딩된 패킷($x_A \oplus x_C$)을 복호하기 위한 수식이다. 수식 (4)에서 계산된 각 정보 비트에 대한 LLR 값은 복호기에 입력되고, 복호 오류가 존재하지 않으면 네트워크 코딩된 패킷을 바로 얻을 수 있다. 따라서 직접 복호는 네트워크 코딩된 패킷을 얻기 위해 한 번의 복호 과정이 필요하다. 이와 같은 방식으로 QPSK, 16QAM과 같은 고차원 변조방식에서의 LLR 계산이 가능하므로 개별 복호 방식에 비해 복잡도 매우 감소한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문은 두 노드가 하나의 중계 노드를 통하여 서로 데이터를 주고받는 양방향 중계 네트워크에서 중계 노드의 안테나 개수가 2개 이상인 다중 안테나 중계기를 고려한 물리계층 네트워크 코딩을 적용하였을 때의 성능을 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 성능의 비교를 위해 모듈레이션의 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. 또한 각각의 변조기법에 따라 중계 노드의 안테나 개수를 2, 4개로 늘려가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 복호방식은 양방향 중계기 시스템에서 최적 성능을 보이는 수신된 심볼과 모든 후보 심볼과의 거리를 구해 거리가 가장 짧은 심볼로 복호하는 최근접 (nearest neighbor) 복호방식을 고려하였다 [10]. 위의 두 실험 모두 물리계층 네트워크 코딩 기술이 적용되지 않고 페이딩 채널에서 신호가 전송 되었을 때 (Reff)의 성능을 기준으로 BER 분석을 하였다.

그림 2은 물리계층 네트워크 코딩이 적용된 네트워크에서 BPSK 변조기법을 사용하였을 때의 중계기 안테나 개수에 따른 BER 성능을 나타낸다. 그림 2에서 개별 복호와 직접 복호 방식 모두 거의 비슷한 성능을 보인다. 그러나 중계기 안테나가 2개일 때 개별 복호와 직접 복호 모두 물리계층 네트워크 코딩 기술이 적용되지 않는 경우 (Reff)에 비하여 10^{-3} 의 BER 성능을 기준으로 약 4dB 정도의 성능차이를 보이는 반면, 중계기 안테나가 4개일 때 개별 복호와 직접 복호 모두 물리계층 네트워크 코딩 기술이 적용되지 않는 경우 (Reff)에 비하여 10^{-3} 의 BER 성능을 기준으로 약 3dB 정도의 성능차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 중계기 안테나 개수가 증가할수록 물리계층 네트워크 코딩을 적용하지 않은 환경에 가까워진다는 것을 의미한다.

그림 3, 4는 동일한 네트워크 환경에서 변조기법으로 각각 QPSK, 16QAM을 사용하였을 때 중계기 안테나 개수에 따른 BER 성능을 나타낸다. 전반적으로 BPSK 변조 방식을 사용한 그림 2와 매우 유사한 경향을 보인다. 예를 들어, 그림 3에서 비트오류 확률 10^{-3} 를 만족시키기 위하여, 수신 안테나 개수가 4개인 경우 수신 안테나 개수가 2개일 때에 비하여 약 8dB의 전력을

절약할 수 있음을 알 수 있고 그림 4에서는 비트오류 확률 10^{-3} 를 만족시키기 위하여, 수신 안테나 개수가 4개인 경우 수신 안테나 개수가 2개일 때에 비하여 약 10dB의 전력을 절약할 수 있음을 알 수 있다. 복호 기법에 따른 성능 차이는 나타나지 않고, 중계기의 안테나 개수가 증가함에 따라 물리계층 네트워크 코딩을 적용하지 않은 환경에 가까워짐을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과 그래프들을 통하여 부호화 되지 않은 코드를 사용하는 시스템에서는 복호 방식에 따른 성능 차이가 거의 없고 중계기의 안테나 개수가 증가할수록 네트워크 코딩기술이 적용되지 않은 기존 기술에 점차 가까워지는 것을 알 수 있다. 또한 고차원 변조 방식이 사용될수록 물리계층 네트워크 코딩기술의 복호 성능이 물리계층 네트워크 코딩기술이 적용되지 않은 기존 기술에 비하여 저하된다는 것을 알 수 있다.

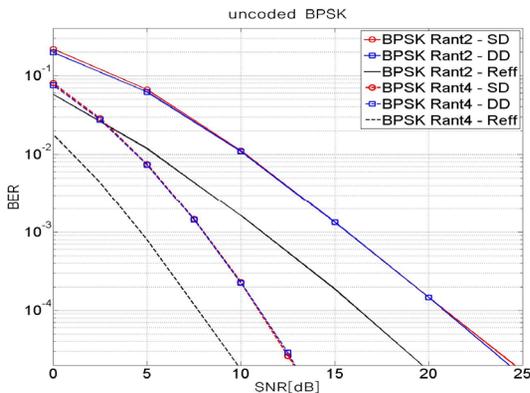


Fig. 2 BER performance of the proposed PNC with BPSK

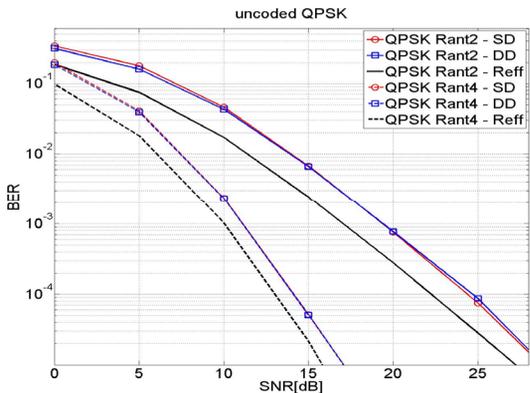


Fig. 3 BER performance of the proposed PNC with QPSK

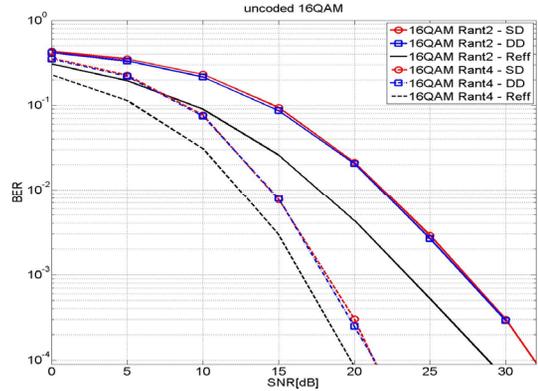


Fig. 4 BER performance of the proposed PNC with 16QAM

V. 결론

본 논문에서는 두 노드가 하나의 중계 노드를 통하여 서로 데이터를 주고받는 양방향 중계 네트워크에서 중계 노드의 안테나의 개수가 2개 이상인 다중 안테나 환경을 고려하여 물리계층 네트워크 코딩 기법을 적용하여 결과를 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 중계기의 안테나의 개수가 증가함에 따라 비트 오류 확률의 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 예를 들어, 16QAM 변조 방식이 사용되고 비트오류 확률 10^{-3} 를 만족시키기 위하여, 수신 안테나 개수가 4개인 경우 수신 안테나 개수가 2개일 때에 비하여 약 10dB의 전력을 절약할 수 있음을 확인하였다. 따라서 고차원 변조방식과 MIMO 기술의 적절한 혼용을 통해 차세대 무선 통신 시스템에서 요구하는 높은 데이터 전송률을 충족시킬 수 있을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (MSIP) (NRF-2016R1A2B4014834).

REFERENCES

[1] S. -Y. R. Li, R. W. Yeung, and N. Cai, "Linear network coding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 2, pp. 371-381, Feb. 2007.

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

[3] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming, *3G Evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*, 2nd edition, Elsevier, 2008.

[4] H. Jin, B. C. Jung, H. Y. Hwang, and D. K. Sung, "A MIMO-based collision mitigation scheme in uplink WLANs," *IEEE Comm. Lett.*, vol. 12, No. 6, pp. 417-419, Jun. 2008.

[5] F. F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, pp. 37-60, Jan. 2013.

[6] M. Huang, J. Yuan, and T. Yang, "Error probability of physical-layer network coding in multiple-antenna two-way relay channel," *IEEE GLOBECOM*, pp. 4725- 4730, Dec. 2012.

[7] D. Soldani and S. Dixit, "Wireless relays for broadband access," *IEEE Communi. Mag.* vol. 46, no. 3, pp. 58-66, Mar. 2008.

[8] 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.

[9] 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.

[10] M. Park, I. Choi and I. Lee, "Exact BER analysis of physical layer network coding for two-way relay channels," in *Proc. of IEEE VTC*, May 2011.



박정홍(Jeonghong Park)

2011년 2월 한국평생교육진흥원 정보통신공학과 학사
 2015년 8월 경상대학교 정보통신공학과 박사
 2015년 9월~2016년 5월 충남대학교 정보통신연구소 박사후연구원
 ※관심분야 : 압축센싱, 차세대 이동통신 시스템(4G, Beyond 4G, and 5G), 간섭 정렬, MIMO, 공간변조시스템



정방철(Bang Chul Jung)

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사
 2004년 8월 KAIST 전자전산학과 석사
 2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사
 2008년 3월~2009년 8월 KAIST IT 융합연구소 팀장
 2009년 9월~2010년 2월 KAIST IT 융합연구소 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 IT 융합연구소 겸직교수
 ※관심분야 : 무선통신, 통계적 신호처리, 정보이론, 압축센싱, 이동통신 시스템



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