

공간변조기반 주파수 효율적인 물리계층 네트워크 코딩

박정홍, 정방철, 김완호*, 이웅섭*
충남대학교, *경상대학교

Jhpark81.win@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr, whkim.win@gmail.com, wslee@gnu.ac.kr

A Spectrally-Efficient Physical-Layer Network Coding with Spatial Modulation

Jeonghong Park, Wan Ho Kim*, Bang Chul Jung, Woongsup Lee*
Chungnam National University, *Gyeongsang National University

요 약

기존 양방향 중계기 네트워크의 주파수 효율성을 증가시키기 위하여 물리계층 네트워크 코딩과 다중안테나 기술을 결합하는 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 양방향 중계 채널에서 두개의 송신단에서 공간 변조방식을 사용하는 시스템을 고려하였다. 공간 변조방식은 다수의 안테나 중 1 개의 안테나만을 사용하여 신호를 전송하는 기술로서 안테나 선택에 추가적인 정보비트를 할당하는 기술로 향후 이동통신 시스템에 유용할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 공간변조 방식과 물리계층 네트워크 코딩을 결합한 전송 기법의 성능을 분석한다. 특히, 본 논문에서는 물리계층 네트워크 코딩 뿐 아니라 채널 코딩도 함께 고려하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 기법이 기존 기술에 비하여 월등한 BER 성능을 보임을 확인하였다.

I. 서 론

최근 양방향 중계 채널 통신에서 주파수의 효율을 개선하기 위하여 물리계층 네트워크 부호화 (physical-layer network coding, PNC) 기술이 제안되었다 [1]. PNC 기술은 2 개의 소스 노드들이 동시에 패킷들을 중계노드로 전송하고 중계기에서는 무선채널을 통하여 중첩된 신호로부터 네트워크 코딩된 신호를 얻는 기술로서, 2 개의 소스 노드가 서로 패킷을 주고받는데 2 개의 패킷 전송 시간을 필요로하는 주파수 효율적인 데이터 중계 기술이다. 한편, 최근 기하급수적으로 증가하는 데이터 트래픽을 해결하는 방법으로 제안된 MIMO 기술의 가격 경쟁력을 개선하기 위해 공간변조 (spatial modulation, SM) 기술이 제안되었다 [2]. SM 기술은 안테나의 개수와 동일하게 존재하는 RF 채널의 개수를 하나로 줄여 MIMO 기술의 송수신 복잡도, 에너지 비효율성 문제 등을 해결하는 기술이다. SM 기술은 입력된 비트 열에 따라 변조된 심볼을 전체 전송 안테나 중 하나의 안테나를 선택하여 전송하는 기술이다. 최근, 앞서 설명한 PNC 기술과 다중안테나 기술을 결합하는 기술이 제안되었다 [3]. [3]에서는 페이딩 채널에서 중계노드의 안테나 개수가 두 개이고 각 소스 노드는 1 개의 안테나를 사용하고 BPSK 변조방식을 사용하는 환경에서 PNC 기술을 적용하였다.

본 논문에서는 소스노드와 중계기의 안테나 개수가 2 개 이상인 양방향 MIMO 중계 채널에서 두 소스 노드가 SM 기법으로 신호를 전송하는 SM-PNC 기술의 성능을 분석한다. 특히, 본 논문에서는 페이딩 채널에서의 통신 성능을 개선하기 위하여 채널 코딩을 동시에 고려하였다. 저자들의 지식에 의하면 현재까지 PNC, SM, 채널 코딩 기술을 동기에 결합한 기술 본 논문이 처음이다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 두 소스 노드(A,B)와 하나의 중계노드(C)로 이루어진 양방향 중계 네트워크 시스템을

가정한다. 소스노드와 중계노드는 N_t, N_r 개의 안테나를 각각 가지고 있고, 두 소스노드는 SM 기법으로 컨볼루션코딩된 신호를 전송한다고 가정한다. 그림 1 은 SM-PNC 의 첫 번째 타임슬롯 구간인 다중접속 구간의 시스템모델을 나타낸다. 두 번째 패킷 전송 시간인 방송 구간 동안은 기존의 컨볼루션 코딩 무선 통신 [4]과 같고 본 논문에서는 다중접속 구간에 초점을 두고 설명한다. 그림 1 에서 $\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{m}_i$ 는 i 번째 노드의 입력비트, 코드워드, 변조된 심볼을 각각 나타낸다. $V(\cdot), M(\cdot)$ 는 인코딩 함수, 변조 함수를 각각 나타낸다. 따라서 $\mathbf{v}_i = V(\mathbf{u}_i), \mathbf{m}_i = M(\mathbf{v}_i)$ 을 얻을 수 있다. 두 노드는 SM 기술의 매핑 방식으로 변조심볼 $\mathbf{m}_i$ 가 만들어 진다고 가정한다. 각 노드는 변조된 심볼을 동시에 전송을 하고 중계기는 페이딩 채널을 통과한 $\mathbf{y}_R$ 신호를 수신한다. 중계기에서 수신한 신호 $\mathbf{y}_R \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}_R = \mathbf{H}_A \mathbf{x}_A + \mathbf{H}_B \mathbf{x}_B + \mathbf{n} \quad (1)$$

수식 (1) 에서 $\mathbf{H}_A \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}, \mathbf{H}_B \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 는 노드 A 에서 노드 C 그리고 노드 B 에서 노드 C 사이의 페이딩 채널행렬을 나타내고 각 원소는 independent and identically distributed (i.i.d.)이고 $h_{i,j} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 인 콤플렉스 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 은 중계노드에서의 AWGN 을 나타내고 각 원소는 $n_{i,j} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 인 콤플렉스 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 또한 중계노드는 각 소스노드와 중계기 사이의 채널정보를 안다고 가정한다. PNC 과정에 의해 각 노드의 패킷의 XOR ($\oplus$)을 고려할 때 중계노드는 $\mathbf{u}_R = \mathbf{u}_A \oplus \mathbf{u}_B$ 를 얻는 것을 목표로 한다. 컨볼루션 코딩의 선형성에 따라 다음의 수식을 얻을 수 있다.

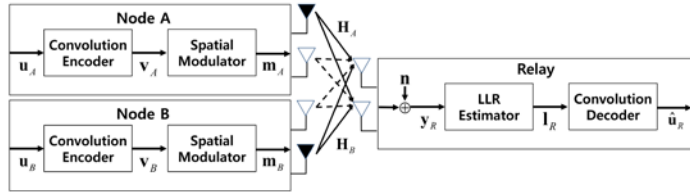


Figure 1. Transmission/reception procedure of multiple access phase in SM-PNC

$$I_R^{v_A} = \log \left(\frac{\Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, H_A, H_B) + \Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, H_A, H_B)}{\Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, H_A, H_B) + \Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, H_A, H_B)} \right) \quad (3)$$

$$I_R^{v_B} = \log \left(\frac{\Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, H_A, H_B) + \Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, H_A, H_B)}{\Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, H_A, H_B) + \Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, H_A, H_B)} \right) \quad (4)$$

$$I_R^{(v_A \oplus v_B)} = \log \left(\frac{\Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, H_A, H_B) + \Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, H_A, H_B)}{\Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, H_A, H_B) + \Pr(y_R | m_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, m_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, H_A, H_B)} \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_R &= V(\mathbf{u}_R) = V(\mathbf{u}_A \oplus \mathbf{u}_B) \\ &= V(\mathbf{u}_A) \oplus V(\mathbf{u}_B) = \mathbf{v}_A \oplus \mathbf{v}_B \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 중계노드에서의 log-likelihood rate (LLR) 값은 수식 3, 4, 5 와 같이 주어진다. 여기서 각 수식은 SM-PNC 기술로 2bps, $N_t = 2$, 입력 비트 00, 01, 10, 11 에 따라 $[-10]^T$, $[10]^T$, $[0-1]^T$, $[01]^T$ 을 각각 전송하는 경우의 LLR 을 나타낸다. 또한 수식 3, 4 은 개별복호방법을 나타내는 LLR 이고 수식 4 는 직접복호방법 [5]을 나타내는 LLR 이다. 개별 복호방법은 수식 (1)로부터 $\mathbf{u}_A$, $\mathbf{u}_B$ 모두를 각각 복호하는데 두 번의 패킷 복호를 수행 후 복호된 두 패킷을 XOR 하여 소스 노드로 전송하는 방법이고 직접 복호방법은 수식 (2)의 채널 코드의 선형성을 이용하는 것이다.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문은 SM-PNC 시스템의 성능을 분석하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 중계노드는 $N_r = 4$ 개의 안테나를 가지고 있고, 채널코딩기법은 1/3 부호율을 갖는 polynomials [557, 663, 711]인 컨볼루션코드를 사용하였다. 그림 2 에서 Coded, Conv.는 소스 노드의 안테나는 1 개이고, 2bps 로 QPSK 를 사용하여 전송하는 기존의 물리계층 채널코딩 기법을 나타내고, Coded, Prov. 는 2bps 로 $N_t = 2$ 개이고 입력 비트 00, 01, 10, 11 에 따라 $[-10]^T$, $[10]^T$, $[0-1]^T$, $[01]^T$ 을 각각 전송하는 SM-PNC 기법을 나타낸다. x 축은 비트당 노이즈 파워인 E_b / N_0 를 나타내고 y 축은 BER 을 나타낸다. 그림 2 에서 2bps 를 전송하는 두 경우에서 기존의 PNC 기법의 성능보다 SM-PNC 기법의 성능이 더 뛰어난 것을 확인할 수 있다. SM-PNC 의 경우에 소스노드의 안테나개수는 기존의 PNC 기법보다 더 많지만 RF 체인의 개수는 동일하게 사용된다. 따라서 주파수 효율을 높이기 위해 소스 노드에서 고차원의 변조심볼만 사용하는 경우 보다는 RF 체인의 개수는 동일하게 사용하면서 안테나의 개수를 증가시켜 SM-PNC 기법을 사용하는 것이 BER 성능을 개선시키는 효과가 있다는 것을 확인할 수 있다.

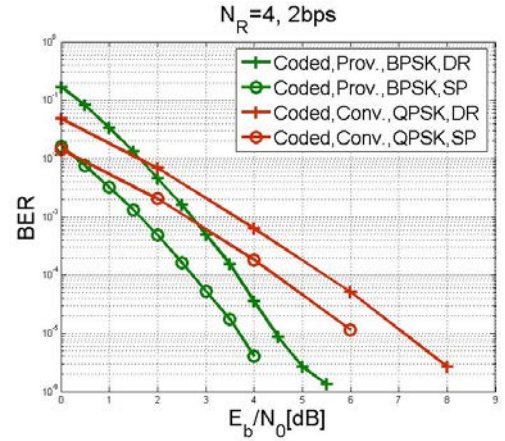


Figure 2. BER performance of the proposed SM-PNC with multiple antennas.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by IITP grant funded by the Korea government (MSIP) (No. B0126-15-1064, Research on Near-Zero Latency Network for 5G Immersive Service).

참 고 문 헌

- [1] S. Zhang, S. Liew, and P. P. Lam, "Physical-layer network coding," in *Proc. of ACM MOBICOM*, Sep. 2006.
- [2] R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 545-547, 2008.
- [3] 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.
- [4] D. Soldani and S. Dixit, "Wireless relays for broadband access," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 3, pp. 58-66, Mar. 2008.
- [5] 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.