

양방향 중계 네트워크에서 시공간 선 부호의 성능분석

배재원, 서진우, 하병우, 김종민, 정방철*, 정진곤**

한국과학영재학교, *충남대학교, **중앙대학교

jwje0219@gmail.com, skjin0702@gifted.or.kr, louneqitdve@gmail.com,

franzkim@gmail.com, *bcjung@cnu.ac.kr, **jgjoung@cau.ac.kr

Performance Analysis for Space-Time Line Code in Two-Way Relaying Networks

Jae Won Bae, Jin Woo Seo, Byung Woo Ha, Jong Min Kim,

Bang Chul Jung*, and Jingon Joung**

Korea Science Academy of KAIST, *Chungnam National University,

**Chung-Ang University

요약

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 두 단말기가 두 안테나를 갖는 한 중계노드 (Relay Station: RS)를 통해 서로 정보를 교환하는 양방향 중계 네트워크에서 시공간 선 부호(Space-Time Line Code: STLC)의 비트 오류 확률 (Bit Error Rate: BER) 성능을 분석한다. 양방향 중계노드에 XOR-기반 물리계층 네트워크 코딩 기법을 적용하고, 두 시간슬롯을 사용하여 정보를 교환하는 모델을 가정한다. 또한, 각 슬롯에서 데이터를 전송할 때 BPSK 변조방식을 사용하였다. 두 단말기는 첫째 시간슬롯에 STLC를 적용하여 데이터를 전송하고, 중계노드는 둘째 시간슬롯에 시공간 블록 부호 (Space-Time Block Code: STBC)를 사용하여 데이터를 전송한다. 둘째 시간슬롯에서 STBC 성능에 관한 연구는 활발히 진행 되었으나, STLC를 사용한 첫째 시간슬롯에 성능분석 연구는 아직까지 이루어지지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 학계에 보고되지 않은 최초로 이론적 결과로, XOR기반 네트워크 부호화한 BPSK 심벌에 BER성능과 다이버시티 이득(Diversity Order)을 수학적으로 정확히 분석한다. 또한, 컴퓨터 모의실험을 통해 수학적으로 분석한 결과의 정확성을 검증하였다.

I. 서론

양방향 중계 채널(Two-Way Relay Channel, TWRC)은 단말 중심 사물 네트워크 또는 5G 이동통신 네트워크 성능 분석을 위한 매우 중요한 통신 모형이다. 최근 양방향 중계 채널 무선통신을 위해 물리계층 네트워크 코딩 기법이 제안되었으며, 그 성능이 분석되었다 [1]. 대부분의 물리계층 네트워크 코딩 연구들에서는 두 단말과 중계 노드 사이에 무선통신 채널을 중계노드가 알고 있다고 가정한다. 중계 노드에서 두 단말기 사이에 무선통신 채널을 추정하기 위해서는 직교하는 참조신호(reference signals)를 필요로 한다. 한편, 송신단에서 무선통신 채널을 알고 있을 때 송수신단 다중안테나 수와 같은 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 시공간 선 부호 (Space-Time Line Code: STLC)가 제안되었다 [2]. 또한, 협력 시공간 선 부호기법 (Cooperative STLC)이 다중 중계노드가 존재하는 네트워크를 위해 제안되었으며, 수신노드에서 오류 확률이 기존 다중협력 중계기법과 견주어 탁월하다는 것이 모의실험을 통해 검증되었다 [3].

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 두 단말기가 두 안테나를 갖는 중계노드를 통해 서로 정보 교환을 하는 물리계층 네트워크 코딩기반 양방향 중계 채널에서 시공간 선 부호기법의 성능을 이론적으로 분석한다. 두 단말기는 첫째 시간 슬롯동안 중계노드로 동시에 시공간 선 부호화한 BPSK 심벌을 전송하고, 중계노드는 두 단말기로부터 동시에 전송된 심벌을 두 안테나로 수신한다. 두 단말기로부터 전송된 심벌을 복호한 후 중계노드는 XOR-기반 네트워크 부호화를 수행하여, 둘째 시간 슬롯동안 네트워크 부호화한 BPSK 심벌을 시공간 블록 부호(Space-Time Block Code: STBC [4])를 사용하여 두 단말에게 동시에 전송한다. 둘째 시간 슬

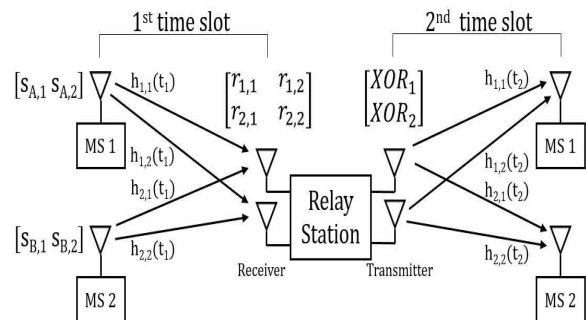


그림 1. 양방향 중계 채널에서 시공간 선 부호기반 전송 기법

롯에 동작 및 성능 분석은 기존 연구 [4]에 있으며, 본 논문에서는 첫째 시간 슬롯에 동작과 성능 분석을 다룬다.

II. 제한한 양방향 중계 채널을 위한 시공간 선 부호 기법

그림 1에 양방향 중계 시스템을 위해 제한한 시공간 선 부호기반 전송 기법을 나타내었다. 앞서 설명한바와 같이 양방향 중계채널은 단일 안테나를 갖는 두 단말과 두 안테나를 갖는 한 중계노드로 구성된다. 이때 각 단말기는 자신과 중계노드 사이 무선통신 채널을 알고 있으며, 중계노드는 이 채널을 모른다고 가정한다. 무선통신 채널은 연속한 두 시간 슬롯동안 변하지 않는다고 가정한다. 첫째 시간 슬롯에서 단말

$k(k=1,2)$ 는 무선통신 채널 정보를 이용하여 (1)과 같이 시공간 선 부호화를 수행한다.

$$\begin{aligned} s_{k,1} &= h_{k,1}^* x_{k,1} + h_{k,2}^* x_{k,2} \\ s_{k,2} &= h_{k,2}^* x_{k,1} - h_{k,1}^* x_{k,2}, \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $h_{k,j}(j=1,2)$ 는 k 째 단말기와 중계노드의 j 째 안테나 사이에 채널을 나타내고, $x_{k,i}(i=1,2)$ 는 k 째 단말기의 i 째 BPSK 전송 심벌을 나타낸다 ($x_{k,i} \in \{+1, -1\}$). 이때 $h_{k,j}$ 는 정규분포 $CN(0,1)$ 을 따른다. 중계노드의 i 째 수신안테나에 j 째 심벌 시간에 수신한 신호를 $r_{i,j}$ 라 할 때, 다음과 같이 행렬 및 벡터를 사용해 수신 신호를 나타낼 수 있다:

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\gamma_1}} \begin{bmatrix} h_{1,1} \\ h_{1,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{\gamma_2}} \begin{bmatrix} h_{2,1} \\ h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{2,1} & s_{2,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} \\ z_{2,1} & z_{2,2} \end{bmatrix}.$$

여기서 $\sqrt{\gamma_i} = \|\vec{h}_i\| = \sqrt{h_{i,1}^2 + h_{i,2}^2}$, $i=1,2$,이며, 수신 신호를 $\sqrt{\gamma_i}$ ($i=1,2$)로 나누어 각 단말기에서 송신 전력을 정규화 하였다 [2]. 이때, $z_{i,j}$ 는 $CN(0, \sigma^2)$ 분포를 따른다고 가정한다. 따라서 수신단 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)는 $1/\sigma^2$ 이다. 중계 노드는 시공간 선 부호화 수신 신호로부터 (2)와 같이 선형 결합을 수행한다.

$$\begin{aligned} \tilde{r}_1 &= r_{1,1} + r_{2,2} = \sqrt{\gamma_1} x_{1,1} + \sqrt{\gamma_2} x_{2,1} + z_{1,1} + z_{2,2} \\ \tilde{r}_2 &= r_{2,1} - r_{1,2} = \sqrt{\gamma_1} x_{1,2} + \sqrt{\gamma_2} x_{2,2} + z_{2,1} - z_{1,2}. \end{aligned} \quad (2)$$

중계노드는 선형 결합한 (2)와 최대우도 검파기법(Maximum Likelihood Detector, MLD)을 사용해 각 단말기에서 전송한 심벌의 네트워크 부호화한 심벌을 추정한다 [1]. (2)에 과정은 중계노드에서 각 단말기 사이에 채널 정보를 전혀 사용하지 않는 단순한 선형 결합 과정이라는 것이 제안한 STLC-기반 양방향 중계기에 장점이라고 할 수 있다.

III. BER 성능 분석

양방향 중계채널에 첫째 시간 슬롯에서 물리계층 네트워크 코딩과 시공간 선 부호가 결합된 전송 기법의 BER은 아래와 같다 (자세한 유도과정은 페이지 분량 제한 때문에 생략한다):

$$\Pr(E) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1+10\sigma^2+27\sigma^4}{(1+4\sigma^2)^{5/2}} \right) + \frac{1}{2^2 \times 3^3 \times 5^7} (\alpha + \beta + \gamma) \quad (3)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{54675(275+2470\sigma^2+5829\sigma^4)}{(1+4\sigma^2)^{5/2}} - \frac{164025(22275+200700\sigma^2+6349\sigma^4)}{(9+4\sigma^2)^{5/2}}$$

$$\beta = \frac{24300\sigma^2(1518750+3628125\sigma^2+3220500\sigma^4+1239500\sigma^6+174096\sigma^8)}{(5+2\sigma^2)^3(9+4\sigma^2)^{5/2}}$$

$$\gamma = \frac{218700\sigma^2(6250+59375\sigma^2+173500\sigma^4+154500\sigma^6+44592\sigma^8)}{(5+2\sigma^2)^3(1+4\sigma^2)^{5/2}}.$$

(3)에 도출한 BER분석은 현재까지 학계에 보고되지 않은 최초로 이론적 분석 결과로서 [1]에서 제시된 각 단말기로부터 중계노드 사이 무선 채널 값을 중계노드가 알고 있는 경우에 BER 분석에 대응된다. 또한, SNR 값이 10dB이상인 높은 SNR 구간에서 테일러 정리를 적용하여 σ 에 대해 4차까지 계산하여 정리하면 (3)을 다음과 같이 근사할 수 있다:

$$\Pr(E) \approx \frac{3}{2}(\text{SNR})^{-2} + O((\text{SNR})^{-3}). \quad (4)$$

여기서 다이버시티 이득이 2가 된다는 것을 알 수 있다. 이는 송신 안테나가 한개이고 수신안테나가 두개인 Single-Input Multiple-Output (SIMO) 채널의 최적 다이버시티 이득과 동일한 결과이다.

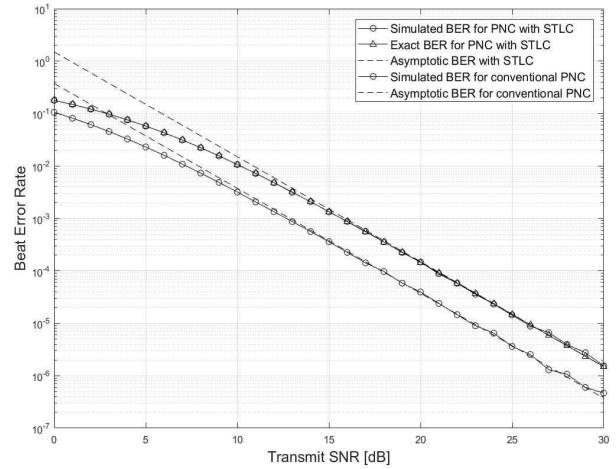


그림 2. 제안한 시공간 선 부호의 양방향 중계 채널에서의 BER성능

IV. 시뮬레이션 결과

그림 2는 본 논문에서 제안한 시공간 선 부호와 물리계층 네트워크 코딩 기법을 결합한 양방향 중계 시스템에 첫째 시간 슬롯 BER 성능을 보여준다. 또한, 동일한 네트워크 환경에서 중계 노드가 각 단말기 사이 무선통신 채널을 알고 있을 때 BER 성능과 본 논문에서 제안한 STLC-기반 양방향 중계기 BER성능을 비교하였다. 여기서, 제시한 시공간 선 부호 기법에 BER 성능은 기존 물리계층 네트워크 부호화 기법보다 3dB 성능 열화가 있음을 확인하였다. 이는 시공간 선 부호의 근본적인 성능 열화로 중계노드에서 무선 통신 채널을 모르고 복호를 시도하는 것 때문에 발생하는 피할 수 없는 성능 열화이다 [2]. 본 논문 (3)에서 제시한 이론적 BER 성능 분석은 컴퓨터 모의실험 결과와 정확히 일치함에 주목하자. 또한, SNR이 높아짐에 따라 (4)에서 근사화한 간단한 성능분석도 컴퓨터 시뮬레이션과 매우 근접한 결과를 보임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 KAIST 부설 한국과학영재 학교 Research & Education 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] R. H. Y. Louie, Y. Li and B. Vucetic, "Practical physical layer network coding for two-way relay channels: Performance analysis and comparison," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 9, no. 2, pp. 764-777, Feb. 2010.
- [2] J. Joung, "Space-time line code," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1023-1041, Feb. 2018.
- [3] J. H. Yoon, S. Yeom, B. C. Jung, and J. Joung, "A cooperative communication system with distributed space-time line codes for multi-relay node environments," *Proc. KICS-Summer Conference*, Jun. 2018.
- [4] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbank, "Space-time block coding for wireless communications: Performance results," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 451-460, Mar. 1999.