

# 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

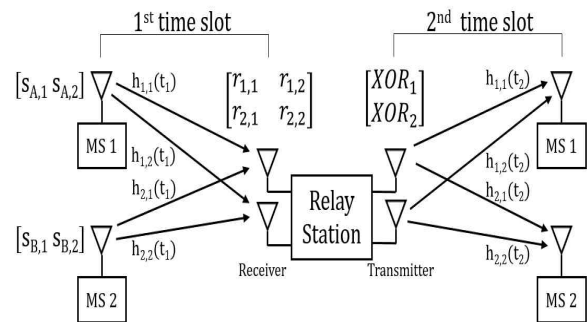


그림 1. 양방향 중계 채널에서 시공간 선 부호기반 전송 기법

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  $\sigma$ 에 대해 4차까지 계산하여 정리하면 (3)을 다음과 같이 근사할 수 있다:

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

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.

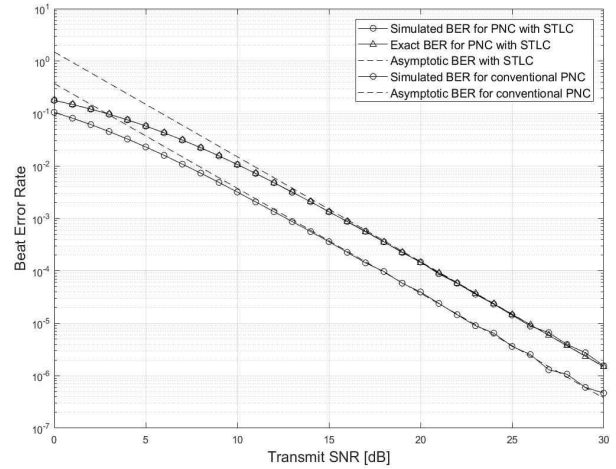


그림 2. 제안한 시공간 선 부호의 양방향 중계 채널에서의 BER성능

### 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.