

# 안테나별 전력 제한이 있는 경우 시공간 선 부호 기반 에너지 효율이 높은 양방향 중계 시스템

이한결(중앙대학교), 정진곤(중앙대학교), \*정방철(충남대학교)

{forener, jgjong}@cau.ac.kr; bcjung@cnu.ac.kr

## Energy Efficient Space-Time Line Coded Two-Way Relay System Under Per-Antenna Power Constraints

Han-Gyeol Lee, Jingon Joung, \*Bang Chul Jung

Chung-Ang University, \*Chungnam National University

### 요약

본 논문에서는 두 안테나를 갖는 단말기가  $M$ 개 안테나를 갖는 기지국에 신호를 전송하는 양방향 중계(Two-Way Relay: TWR) 시스템에서 안테나별 전력 제한이 있는 경우(Per Antenna Power Constraints: PAPC), 시공간 선 부호화기법(space-time line code: STLC) 기반 TWR 시스템을 제안하고, 모의실험을 통해 성능을 분석한다. 모의실험 결과 최대 송신 전력량이 23 dBm 이하인 소형 기지국의 경우 기존 공간분할다중접속(Space-Division Multiple Access: SDMA) 방식보다 개선된 에너지 효율(energy efficiency: EE)을 확인할 수 있었다.

### I. 서론

양방향 중계(Two-Way Relay TWR) 시스템은 중계 시스템에서 두 단계에 걸쳐 정보를 교환하는 시스템이다. 첫 단계에서 중계기가 각 단말기에서 신호를 수신하여 결합한다. 둘째 단계에서 중계기가 결합한 신호를 방송하고, 각 단말기가 그 신호를 수신하여 다른 단말기의 신호를 검파한다. 시공간 선 부호화기법(space-time line code: STLC)은 송신단에서 채널 정보를 가지고 신호를 부호화하여 전송하고, 수신단에서 수신된 신호들의 선형조합으로만 복호화하여 최대 공간 다이버시티 이득을 얻는 기법이다 [1]. 본 논문에서는 [2]를 바탕으로 TWR 시스템에 STLC를 적용하고 모의실험을 통해 기존 공간분할다중접속(Space-Division Multiple Access: SDMA) 방식 TWR 시스템 대비 STLC 기반 TWR 시스템 EE를 분석 비교한다.

### II. 본론: 시공간 선 부호를 적용한 양방향 중계 시스템

본 논문에서는 두 안테나를 갖는 두 단말기가  $M$ 개 안테나를 갖는 기지국을 통해 신호를 교환하는 양방향 중계 시스템에서 기존 SDMA 방식 대신 STLC를 적용한 시스템을 제안한다. 기지국을 통한 정보 교환은 두 단계를 거쳐 이루어진다. 두 소스 노드(Source Node: SN)를 각각 SnA, SnB라 하고 두 SN으로부터 정보 심벌  $[a_1, a_2]$ ,  $[b_1, b_2]$ 을 중계 노드(Relay Node: RN)가 수신한다고 하자. RN은 첫 단계에서 기존 시공간 블록부호화기법(space-time block code: STBC) 방식으로 수신한 정보심벌로부터 아래와 같은 추정값  $[\tilde{\mathbf{a}}^T \tilde{\mathbf{b}}^T]$ 을 얻는다:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{a}} \\ \tilde{\mathbf{b}} \end{bmatrix} = \Gamma^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \mathbf{H}_m^H \mathbf{r}_m \\ \sum_{m=1}^M \mathbf{G}_m^H \mathbf{r}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} + \Gamma^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \mathbf{H}_m^H \mathbf{n}_m \\ \sum_{m=1}^M \mathbf{G}_m^H \mathbf{n}_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

RN은 둘째 단계에서 (1)의 추정값  $[\tilde{\mathbf{a}}^T \tilde{\mathbf{b}}^T]$ 으로  $\hat{\mathbf{a}}$ ,  $\hat{\mathbf{b}}$ 을 재생산하고, 이를 (2)와 같이 STLC신호로 변조하여 두 시간 슬롯을 통해 SnA, SnB로 방송한다 [2]:

$$\begin{bmatrix} s_{1,m}^* \\ s_{2,m}^* \end{bmatrix} = \alpha_m \left( \begin{bmatrix} h_{1,m} & h_{2,m} \\ h_{2,m}^* - h_{1,m}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b}_1^* \\ \hat{b}_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{1,m} & g_{2,m} \\ g_{2,m}^* - g_{1,m}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{a}_1^* \\ \hat{a}_2^* \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

여기서  $s_{t,m}$ 은 RN의  $m$ 째 안테나를 통해 시간  $t \in \{t_3 = 1, t_4 = 2\}$ 에 전송하는 STLC 심벌이고,  $\alpha_m$ 은 RN의  $m$ 째 안테나 전력제한(Per Antenna Power Constraints: PAPC)을 위한 크기 조정 상수이다.  $h_{k,m}$ ,  $g_{k,m}$ 은 ( $k \in \{1, 2\}$ ) 각각 SnA, SnB의  $k$ 째 안테나에서 RN의  $m$ 째까지의 무선채널이다.  $\hat{\mathbf{a}}$ 과  $\hat{\mathbf{b}}$ 을 통해 SnA와 SnB가 신호를 교환하도록 RN은  $m$ 째 안테나를 통하여 각각 STLC 신호  $s_{1,m}$ 을 첫째 시간 슬롯에,  $s_{2,m}$ 을 둘째 시간 슬롯에 순차적으로 방송한다. SnA가 RN의 모든 안테나로부터 수신하는 신호는 다음과 같다:

$$y_{A,k,1} = \sum_{m=1}^M (h_{k,m} \alpha_m ((h_{1,m}^* \hat{b}_1^* + h_{2,m}^* \hat{b}_2^*) + (g_{1,m}^* \hat{a}_1^* + g_{2,m}^* \hat{a}_2^*))) + z_{A,k,1} \quad (3)$$

$$y_{A,k,2} = \sum_{m=1}^M (h_{k,m} \alpha_m ((h_{2,m}^* \hat{b}_1^* - h_{1,m}^* \hat{b}_2^*) + (g_{2,m}^* \hat{a}_1^* - g_{1,m}^* \hat{a}_2^*))) + z_{A,k,2} \quad (4)$$

$y_{A,k,t}$ 는 SnA의  $k$ 째 안테나에서  $t \in \{t_3 = 1, t_4 = 2\}$ 째 시간 슬롯의 수신 신호이고,  $z_{A,k,t}$ 는 여기에 더해진 덧셈꼴 백색 잡음이다. SnA는 수신한 STLC 신호를 복호화하기 위하여  $y_{A,k,t}$ 로부터 아래 선형 결합 신호를 생성한다:

$$\bar{y}_{A,1} = y_{A,1,1} + y_{A,2,2}^* \quad (5)$$

$$\bar{y}_{A,2} = -y_{A,1,2} + y_{A,2,1}^* \quad (6)$$

위 두 선형 결합 신호를  $\gamma_h = \sum_{m=1}^M \alpha_m \gamma_{h,m}$ 으로 정의되는 RN에서 SnA가 지의 유효채널 이득으로 나누면, 교환되는 신호  $\hat{b}_1$ 과  $\hat{b}_2$ 의 추정값  $\tilde{b}_1$ 과  $\tilde{b}_2$ 를 얻는다. 이때  $\gamma_{h,m}$ 은 다음과 같이 정의된다[2]:

$$\gamma_{h,m} = |h_{1,m}|^2 + |h_{2,m}|^2 \quad (7)$$

이를 통해서 얻어낸 추정값  $\tilde{b}_1$ 과  $\tilde{b}_2$ 는 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \tilde{b}_1 &= \bar{y}_{A,1} / \gamma_h \\ &= \hat{b}_1 + \frac{1}{\gamma_h} \sum_{m=1}^M \left\{ \alpha_m \left( (h_{1,m} g_{1,m}^* + h_{2,m} g_{2,m}^*) \hat{a}_1 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (h_{1,m} g_{2,m}^* - h_{2,m} g_{1,m}^*) \hat{a}_2^* \right) \right\} + \frac{z_{A,1,1} + z_{A,2,2}^*}{\gamma_h} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{b}_2 &= \bar{y}_{A,2} / \gamma_h \\ &= \hat{b}_2 + \frac{1}{\gamma_h} \sum_{m=1}^M \left\{ \alpha_m \left( (-h_{1,m} g_{2,m}^* + h_{2,m} g_{1,m}^*) \hat{a}_1^* \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (h_{1,m} g_{1,m}^* + h_{2,m} g_{2,m}^*) \hat{a}_2 \right) \right\} - \frac{z_{A,1,2} - z_{A,2,1}^*}{\gamma_h} \end{aligned} \quad (9)$$

위  $\tilde{b}_1$ 와  $\tilde{b}_2$ 에서  $\gamma_h$ 는 쉽게 계산할 수 있다. 여기서, (8), (9)에 둘째 항인 자기간섭은 SN에서 제거되기 어렵다. 왜냐하면 부가적인 통신 없는 간섭 채널을 추정하기 어렵기 때문이다. 하지만 충분히 큰  $\gamma_h$ 에 대하여 이런 자기간섭 영향은 무시할 정도로 작을 것이다.

같은 방식으로 SnB에서 RN으로부터 STLC 신호를 받아 (10), (11)을 수신하고 선형결합 신호 (12), (13)을 만든다:

$$y_{B,k,1} = \sum_{m=1}^M (g_{k,m} \alpha_m ((h_{1,m}^* \hat{b}_1 + h_{2,m}^* \hat{b}_2) + (g_{1,m}^* \hat{a}_1 + g_{2,m}^* \hat{a}_2))) + z_{B,k,1} \quad (10)$$

$$y_{B,k,2} = \sum_{m=1}^M (g_{k,m} \alpha_m ((h_{2,m}^* \hat{b}_1 - h_{1,m}^* \hat{b}_2) + (g_{2,m}^* \hat{a}_1 - g_{1,m}^* \hat{a}_2))) + z_{B,k,2} \quad (11)$$

$$\bar{y}_{B,1} = y_{B,1,1} + y_{B,2,2}^* \quad (12)$$

$$\bar{y}_{B,2} = -y_{B,1,2} + y_{B,2,1}^* \quad (13)$$

$\bar{y}_{B,1}$ ,  $\bar{y}_{B,2}$ 로부터 교환하는 신호  $\hat{a}_1$ 과  $\hat{a}_2$ 의 추정값  $\tilde{a}_1$ 과  $\tilde{a}_2$ 를 아래와 같이 얻을 수 있다:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_1 &= \bar{y}_{B,1} / \gamma_g \\ &= \hat{a}_1 + \frac{1}{\gamma_g} \sum_{m=1}^M \left\{ \alpha_m \left( (g_{1,m} h_{1,m}^* + g_{2,m} h_{2,m}^*) \hat{b}_1 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (g_{1,m} h_{2,m}^* - g_{2,m} h_{1,m}^*) \hat{b}_2^* \right) \right\} + \frac{z_{B,1,1} + z_{B,2,2}^*}{\gamma_g} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{a}_2 &= \bar{y}_{B,2} / \gamma_g \\ &= \hat{a}_2 + \frac{1}{\gamma_g} \sum_{m=1}^M \left\{ \alpha_m \left( (-g_{1,m} h_{2,m}^* + g_{2,m} h_{1,m}^*) \hat{b}_1^* \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (g_{1,m} h_{1,m}^* + g_{2,m} h_{2,m}^*) \hat{b}_2 \right) \right\} - \frac{z_{B,1,1} - z_{B,2,2}^*}{\gamma_g} \end{aligned} \quad (13)$$

결과적으로 SnA는  $\tilde{b}$ 를 수신하고 SnB는  $\tilde{a}$ 를 수신함으로써 각각의 단말기는 정보를 교환한다.

### III. 에너지 효율 비교

에너지 효율(Energy Efficiency: EE)은 기본적으로 전력 소모량(Watt) 대비 주파수 효율(bits/sec/Hz/Watt)로 정의된다. 본 논문에서는 EE를  $\eta$

로 표기한다.

$$\eta = \frac{\text{주파수 효율}}{\text{전력 소모량}} \quad [\text{bits/sec/Hz/Watt}] \quad (14)$$

모의실험에서  $\eta$ 를 양방향 중계 시스템 정보교환의 둘째 단계에서 발생하는 총 전력 소모량 대비 SN으로 에리 없이 중계된 전송 비트로 측정하였으며[2],  $\eta$ 의 단위인 [bits/sec/Hz/Watt]를 [bits/Hz/Joule]로 바꾸면 아래와 같다:

$$\eta = \frac{\sum_{t=1}^T ((1-\epsilon)N)}{\sum_{t=1}^T c \sum_{m=1}^M P_m + MP_{fix} T} \quad [\text{bits/Hz/Joule}] \quad (15)$$

여기서  $\epsilon$ 은  $N$ -비트 데이터를  $T$ 번 전송할 때 비트 오류율(Bit Error Ratio: BER)이다.  $c$ 는 무선 주파수 회로에서 발생한 간접 전력 소모량에 의한 시스템 비효율성( $c > 1$ )이다.  $P_m$ 은  $m$ 째 안테나 전송전력량이고  $P_{fix}$ 는 시간 슬롯별 고정 전력 소모량이다. 이 모의실험에서  $N=100$ ,  $T=10^4$ 이고  $c=5.26$ ,  $P_{fix}=45$  dBm이다. 그림 1은 기존 SDMA 방식 TWR 대비 본 논문에서 제안한 STLC 방식 기반 TWR 시스템의 EE 개선율(%)이다. 안테나 개수가 34개 이상인 경우, 안테나 총 전력 제한량이 26 dBm 이하인 저전력 시스템에서 10% EE 개선율을 확인할 수 있었다. 반면 안테나 총 전력량이 36 dBm 이상인 고전력 시스템에서는 EE가 떨어지는 것을 확인 하였다.

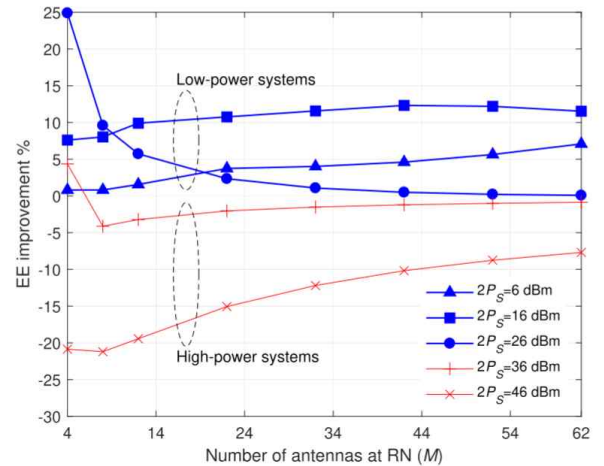


그림 1. SDMA 방식 대 STLC 기반 TWR 시스템의 안테나 개수 당 EE개선율(%).

### IV. 결론

본 논문에서  $M$ 개 안테나를 갖는 STLC 기반 TWR 시스템을 제안하였다. PAPC 조건 아래 기존 SDMA 방식 TWR 시스템과 비교하여 본 논문에서 제안한 방식이 저전력 시스템의 EE를 개선할 수 있음을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2018R1A4A1023826)

### 참고 문헌

- [1] J. Joung, "Space-time line code," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1023-1041, Feb. 2018.
- [2] J. Joung, "Energy efficient space-time line coded regenerative two-way relay under per-antenna power constraints," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 47026-47035, Sep. 2018.