

# 다중 중계 노드 환경에서 분산 시공간 선 부호를 사용한 협업통신 시스템 윤장혁(충남대), 염정선(충남대), 정방철(충남대), 정진곤(중앙대)

201501758@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr, jgjoung@cau.ac.kr

## A Cooperative Communication System with Distributed Space-Time Line Codes for Multi-Relay Node Environments

Jang Hyeak Yoon (CNU), Jeong Seon Yeom (CNU), Bang Chul Jung(CNU), and Jin Gon Joung (CAU)

### 요약

본 논문은 송신 노드와 수신 노드 사이에 다중 중계 노드가 존재하는 환경에서 중계 노드에서 시공간 선 부호(Space Time Line Code: STLC)를 사용한 새로운 협업 통신 시스템을 제안한다. 송신 노드로부터 복호에 성공한 각 중계 노드는 자신과 수신 노드 사이 채널 정보를 활용하여 수신 노드로부터 별도 피드백 정보 없이 시공간 선 부호화된 신호를 전송하고, 수신 노드는 전송한 중계 노드와 관련 채널 정보 없이 각 안테나에 도착한 수신 신호를 결합하여 신호를 복호한다. 본 논문에서 제안한 기법의 성능 분석을 위하여 기존에 제안된 협업 통신 기법들과 제안한 분산 시공간 선 부호를 활용한 기법의 오류 확률을 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio: SNR)와 중계 노드 수에 대해 비교하여 그 성능을 검증한다. 중계 노드의 수가 증가하면 제안한 기법이 피드백이 없는 기존 기법들 뿐 아니라 피드백을 사용하는 중계 노드 선택 기법보다도 좋은 성능을 보이는 것은 매우 흥미롭다.

### I. 서론

송신 노드와 수신 노드 사이에 다중 중계 노드가 존재하는 협업 통신 시스템은 공간 다이버시티를 제공함으로써 시스템 성능을 향상할 수 있는 방법으로 알려져 있다 [1]. 특히, 송신 노드로부터 도착한 패킷의 복호에 성공한 다중 중계 노드들에서 maximum ratio transmission (MRT)을 활용하는 것이 최적의 다이버시티를 얻는 것으로 알려져 있다 [2]. 그러나 MRT를 구현하기 위해서는 복호에 성공한 중계 노드들과 수신 노드 사이의 순시적 (instantaneous) 무선 채널 정보를 수신 노드가 획득하고 계산하여 복호에 성공한 중계 노드들에게 매순간 피드백해야 하고 이는 시스템 운영에 큰 부담을 준다. 다른 협력 중계 기법으로 복호에 성공한 중계 노드들 중 수신 노드까지의 채널이 가장 좋은 중계 노드만 신호를 전송하는 기회적 중계 노드 선택 기법이 제안되었다 [3]. 그러나 이 기법 또한 중계 수신 노드가 복호에 성공한 중계 노드들과 자신의 채널 정보를 획득하고 신호를 전송할 중계 노드 정보를 중계 노드들에게 매순간 알려줘야 한다. 특히, 중계 노드의 수가 많을 경우 다수의 중계 노드로부터 수신 노드까지의 채널을 수신 노드가 획득하는 것은 상대적으로 까다롭다. [2][3]의 단점을 보완하기 위하여 비교적 수월한 채널 획득 과정으로서 수신 노드로부터 파일럿 신호를 수신하여 각 중계 노드가 수신 노드까지의 채널을 안다고 가정하고, 수신 노드에 수신된 모든 수신 신호들이 같은 위상을 갖도록 제어하는 협업적 위상 조향 기법이 제안되었다 [4]. 협업적 위상 조향 기법은 수신 노드로부터 피드백을 요구하지 않아 구현이 용이하다.

하지만 앞서 소개한 전송 기술들은 수신 노드가 다중 안테나를 갖는 환경에서 성능 향상을 기대하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 다중 안테나를 갖는 수신 노드를 가정하고 송신 노드로부터 패킷 복호에 성공한 각 중계 노드가 분산 시공간 선 부호(Space Time Line Code: STLC)를 사용하여 다중 노드 협력 다이버시티 이득을 향상시킬 수 있는 새로운 협력 통신 시스템을 제안한다. STLC는 송신단에서 채널 정보를 사용해 전송 신호들을 부호화하여 전송하고 다중 안테나 수신단에서 수신 신호들을 간단히 선형 결합함으로써 최대 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기술이다 [5]. 본 논문에서는 단일 안테나 송신 노드,  $K$ 개의 단일 안테나 중계 노드 2개 안테나를 갖는 수신 노드가 존재하는 통신 환경을 고려한다.

### II. STLC를 사용한 협업 통신 시스템

그림 1은 본 논문에서 고려하는 다중 중계 노드가 있는 협업 통신 환경에서 STLC를 활용한 two-hop 반이중 통신 시스템을 묘사한다. 네트워크는 단일 안테나를 갖는 송신 노드 ( $t$ )와 두 안테나를 갖는 수신 노드 ( $d$ ), 단일 안테나를 갖는  $K$ 개 중계 노드 ( $r$ )로 구성되어 있다. 송신 노드와 수신 노드 사이에 채널 환경은 매우 열악하여 송신 노드는 오직 중계 노드를 통해 수신 노드와 통신한다고 가정한다. 이 때 모든 중계 노드는 송신 노드와 수신 노드로부터 같은 거리에 존재하고 two-hop동안 모든 무선 채널은 변하지 않는다고 가정한다.

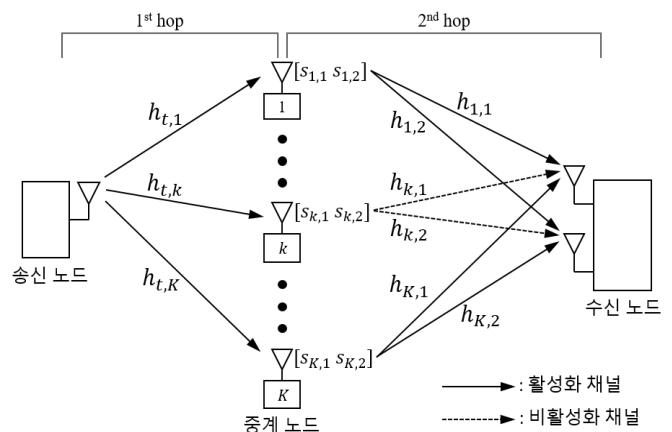


그림 1. STLC를 사용한 분산 협업통신 시스템

첫째 hop에서 송신 노드는 무선채널을 통해 모든 중계 노드들에게 데이터를 전송한다. 각 중계 노드에서 수신한 신호는 다음과 같다.

$$y_k = h_{t,k} \sqrt{P_t} x_t + n_k \quad (1)$$

여기서  $y_k$ 는  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$  번째 중계 노드의 수신 신호이고,  $h_{t,k}$ 는 송신 노드로부터  $k$  번째 중계 노드 사이의 무선 채널이며, 모든 채널은  $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  분포를 따른다고 가정한다. 본 논문에서는  $K$ 개의 중계 노드가 존재한다고 가정한다. 중계 노드는 송신 노드 사이 채널을 파일럿 신호를 통해 완벽히 측정하여 알고 있다고 가정한다.  $P_t$ 는 송신 노드 송신 전력이고,  $x_t$ 는 송신 신호이며,  $n_k$ 는  $k$  번째 중계 노드에서의 잡음으로 분포  $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 를 따른다고 가정한다. 중계 노드는 수신 신호를 독립적으로 복호를 시도한 후 복호에 성공한 중계 노드들은 둘째 hop에서 송신 노드 데이터를 수신 노드로 전송한다. 이러한 복호에 성공한 중계 노드의 집합 ( $D$ )은 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$D = \{k \in \{1, 2, \dots, K\} : |h_{t,k}|^2 \geq R'\}, \quad R' = (2^{2R} - 1) / \rho$$

여기서  $R$ 은 송신단에서 수신단까지 요구되는 전송률을 의미하며, 두 hop을 사용하는 무선 통신 시스템은 듀티 사이클 동안 주파수 효율이 감소되는 것을 보상하기 위해 송신 노드와 수신 노드가 직접 통신하는 시스템보다 데이터 전송률을 두 배 증가해야 한다.  $\rho = P_t / N_0$ 는 송신 SNR을 의미한다.

둘째 hop에서 복호에 성공한 각 중계 노드는 STLC를 사용하여 두 수신 안테나를 갖는 수신 노드에게 신호를 전송한다. 이 때 각 노드는 자기 자신으로부터 수신 노드 사이 무선 채널을 수신 노드의 참조 (파일럿) 신호 수신을 통하여 알고 있다고 가정한다. STLC의 적용을 위해 신호는 두 개의 시간 슬롯으로 구분하여 전송된다. 각 시간 슬롯동안 중계 노드에서 전송하는 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s_{k,1} &= h_{k,1}^* x_1 + h_{k,2}^* x_2 \\ s_{k,2} &= h_{k,2}^* x_1 - h_{k,1}^* x_2 \end{aligned}$$

여기서  $s_{k,i}$ 는  $i \in \{1,2\}$  짝 시간 슬롯에  $k$  번째 중계 노드가 전송하는 신호를 나타내고  $h_{k,j}$ 는  $k$  짝 중계 노드와 수신 노드의  $j$  번째 안테나 사이의 무선 채널을 나타낸다. 그리고  $x_i$ 는 송신 노드 데이터를 절반으로 나눈 두 개의 데이터 가운데  $i$  짝 데이터이다. 수신 노드에서 두 시간 슬롯 동안 받는 신호는 다음과 같이 행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{|D|} \frac{\mathbf{h}_k^T}{\|\mathbf{h}_k\|} \frac{\sqrt{P_r}}{N} [s_{k,1} \ s_{k,2}] + \begin{bmatrix} n_{1,1} & n_{1,2} \\ n_{2,1} & n_{2,2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

여기서  $r_{j,i}$ 는  $i$  번째 시간 슬롯에  $j$  번째 수신 노드 안테나가 수신하는 신호이고,  $\mathbf{h}_k = [h_{k,1} \ h_{k,2}]$ 는  $k$  번째 중계 노드와 수신 노드 사이 무선 채널 벡터이며, 모든 채널은  $\mathcal{CN}(0, \sigma_2^2)$  분포를 따른다.  $N$ 은 복호에 성공한 평균 중계 노드 수로써 다음과 같이 구할 수 있다 [4].

$$N \cong \mathbb{E}[|D|] = \sum_{k=1}^K k \binom{K}{k} \left( e^{-R/\sigma_1^2} \right)^k \left( 1 - e^{-R/\sigma_1^2} \right)^{K-k}$$

여기서  $|D|$ 는 복호에 성공한 중계 노드 집합에 속하는 원소의 개수를 나타내고,  $P_r$ 은 중계 노드들이 사용하는 전체 전력을 나타낸다.  $n_{j,i}$ 는  $i$  번째 시간 슬롯에서  $j$  번째 수신 노드 안테나에서 발생한 잡음으로  $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 를 따른다고 가정한다. 수신 노드는  $x_1$ 과  $x_2$ 를 복호하기 위해 다음과 같이 두 슬롯동안 수신한 네개의 수신 신호를 결합하여 복호과정을 수행한다.

$$\begin{aligned} r_{1,1} + r_{2,2}^* &= \sum_{k=1}^{|D|} \frac{\|\mathbf{h}_k\|}{N} x_1 + n_{1,1} + n_{2,2}^*, \\ r_{2,1}^* - r_{1,2} &= \sum_{k=1}^{|D|} \frac{\|\mathbf{h}_k\|}{N} x_2 + n_{2,1}^* - n_{1,2} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 수신 노드에서의 유효 수신 SNR을 다음과 같이 유도한다.

$$\gamma(D) = \begin{cases} 0, & |D|=0 \\ \frac{\rho}{2N} \left( \sum_{k=1}^{|D|} \|\mathbf{h}_k\| \right)^2, & |D| \neq 0. \end{cases} \quad (4)$$

#### IV. 시뮬레이션 결과

그림 2,3에서는 두 개의 안테나를 갖는 수신 노드, 송신 노드, 다중 중계 노드로 구성된 네트워크에서 제안한 STLC기반 협업 통신 시스템의 오류 확률 성능을 분석하기 위하여 기존 기회적 중계 노드 선택 기법 [3], 위상 조향 기법 [4], 협력 Decoding and Forward (DF) 전송 기법을 함께 고려한다. 이때 고려된 협력 DF 기법은 복호에 성공한 모든 중계기가 동시에 신호를 수신 노드로 전송하는 기법을 나타낸다. 기회적 중계 노드 선택 기법은 수신단 다중안테나를 고려하여 중계 노드 채널 벡터들 가운데 가장 큰 채널 벡터의 Norm을 갖는 중계 노드를 선택하였다. [4]에서 제안된 위상 조향 기법도 수신단 다중안테나를 고려하여 각 중계 노드에서 수신 노드까지의 2개의 채널 Coefficient를 합하여 등가채널을 구한 후, 이 등가채널을 통과한 다중 신호가 수신단에서 그 위상이 정렬되도록 기존의 위상조향 기법을 변형하여 성능 분석에 적용하였다.

그림 2는  $K=10$ 일 때 제안한 STLC기반의 협력 통신 시스템의 오류 확률을 SNR의 증가에 따라 보여준다. 모든 기법들은 송신 SNR이 증가할수록 오류 확률이 감소함을 볼 수 있다. 제안한 기법은 기존 피드백이 없는 협력 DF기법과 위상 조향 기법보다 항상 좋은 성능을 보인다. 특히, 낮은 SNR에서는 피드백 기반의 기회적 중계 노드 선택 기법보다도 좋은 성능을 보인다. 그림 3은 송신 SNR을 고정하고 ( $\rho=18$ dB) 중계 노드의 수를 변화시키면서 제안한 기법의 오류 확률을 보여준다. 주목할 것은 중계 노드의 수가 늘어나면 ( $K \geq 9$ ) 제안한 기법이 피드백을 요구하는 기회적 중계 노드 선택 기법보다도 낮은 오류 확률 성능을 달성한다. 또한, 위상 조향 기법도  $K \geq 16$ 일 때 기회적 중계 노드 선택 기법보다 우수함을 확인하였다.

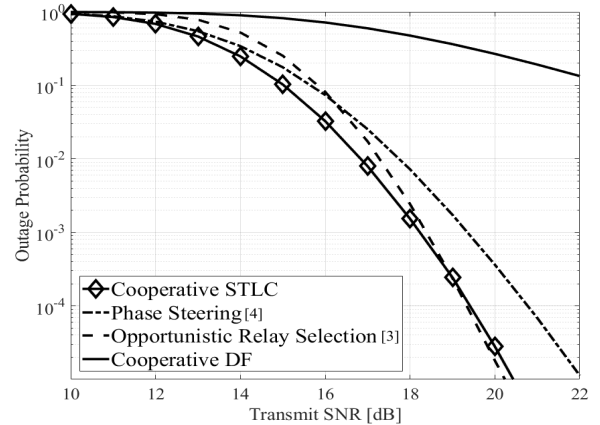


그림 2. 제안한 기법의 SNR에 따른 Outage 확률

( $R = 0.5$ bps/Hz,  $\sigma_1^2 = -10$  dB,  $\sigma_2^2 = -20$  dB,  $K=10$ )

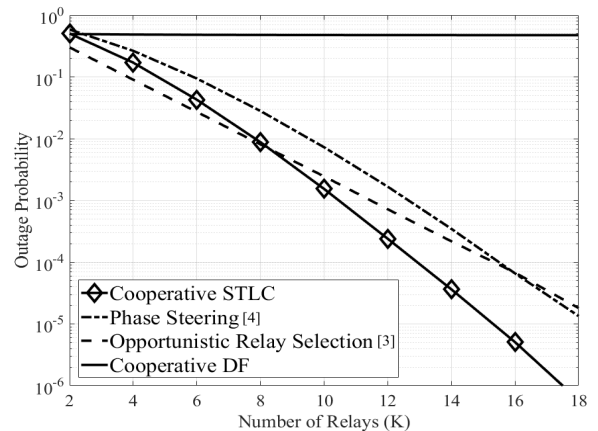


그림 3. 제안한 기법의 K에 따른 Outage 확률

( $R = 0.5$ bps/Hz,  $\sigma_1^2 = -10$  dB,  $\sigma_2^2 = -20$  dB,  $\rho = 18$ )

#### V. 결론

본 논문에서는 송수신 노드 사이에 다중 중계 노드가 존재하는 환경에서 분산 시공간 선 부호 (STLC)를 사용하여 수신 노드에서 오류 확률 성능을 향상하는 새로운 협업 시스템을 제안하였다. 제안한 기법은 수신 노드로부터 피드백 정보를 요구하지 않는 기존 협력 DF 기법이나 협력 위상 조향 기법보다 항상 우수한 성능을 달성하며, 중계 노드의 수가 많은 경우에는 피드백을 요구하는 기회적 중계 노드 선택 기법보다도 더 향상된 오류 확률 성능을 달성한다. 추후 연구에서는 제안한 협력 STLC기반 협력 통신 시스템의 오류 확률을 수학적으로 분석할 예정이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2016년도 미래창조과학부/교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2016R1A2B4014834 /2016R1D1A1B03930250).

#### 참고 문헌

- [1] J. N. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004..
- [2] T. K. Y. Lo, "Maximum ratio transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, pp. 1458-1461, Oct. 1999.
- [3] A. Bletsas, A. Khisti D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659-672, Mar. 2006.
- [4] T. W. Ban, W. Choi, B. C. Jung, and D. K. Sung, "A cooperative phase steering scheme in multi-relay node environments," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 1, pp. 72-77, Jan. 2009.
- [5] J. Joung, "Space-time line code," *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 1023-1041, Feb. 2018.