다중 중계 노드 환경을 위한 선택적 협력 시공간 선 부호 시스템

윤장혁, 정방철, 정진곤*

충남대학교, *중앙대학교

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

A Selective and Cooperative Space-Time Line Code System for Multi-Relay Node Environments

Janghyuk Yoon, Bang Chul Jung, Jingon Joung*

Chungnam National University, *Chung-Ang University

요 약

본 논문은 송신 노드와 수신 노드 사이에 시공간 선 부호(Space Time Line Code: STLC)를 사용하여 신호를 전송하는 다중 중계 노드가 존재하는 무선 통신 환경에서, 통신에 참여하는 중계 노드의 최대 개수를 제한하는 선택적 협력 시공간 선부호 (Selective and Cooperative STLC: Selective CoSTLC) 기법을 제안한다. 송신 노드로부터 전송된 신호의 복호에 성공한 중계 노드는 수신 노드와 자신사이의 무선 채널이득 값에 반비례하는 유예 시간 (back-off time) 뒤에 자신이 신호를 전송할 것임을 다른 중계노드들에게 알려 두 번째 홉에서 협력 통신에 참여할 자격을 얻는다. 자격을 얻은 중계 노드 개수가 최대 중계 노드 개수에 도달할 경우 그 외의 중계 노드들은 전송을 포기하고, 자격을 얻은 중계 노드들은 일정 시간 이후에 두 번째 홉에서의 전송을 시작한다. 자격을 얻은 모든 중계 노드는 자신과 수신 노드 사이 채널 정보를 활용하여 수신 노드로부터 별도의 피드백 없이 시공간 선 부호화된 신호를 전송하고, 수신 노드는 중계 노드와의 채널 정보 없이 두 안테나로 수신한 신호를 선형 결합하여 신호를 복호한다. 본 논문에서 제안한 기법의 성능 분석을 위해, 기존 협렵 중계 통신 기법들과 제안한 선택적 협력 STLC 통신 기법의 통신 오류 (Outage) 확률을 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio: SNR)와 전체 중계 노드 수에 대해 검증한다. 본 논문에서 제안한 선택적 협력 STLC 통신 기법은 기회적 중계 기법를 포함한 기존 협력 중계 통신 기법들 보다 좋은 성능을 보인다. 또한, 제안한 기법의 다중중계노드의 선택은 분산적으로 구현이 가능하여 실제 구현 가능성이 높다.

Ⅰ. 서 론

송신 노드와 수신 노드 사이에 다중 중계 노드가 존재하는 협업 통신 시스템은 공간 다이버시티를 제공함으로써 시스템 성능을 향상할 수 있는 기법으로 알려져 있다 [1]. 이 환경에서 최적 송간 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기법은 두 번째 홉에서 Maximum Ratio Transmission (MRT)기법[2]을 적용하는 것이나 수신 노드가 모든 중계 노드 사이의 채널 정보를 획득하고 매순간 모든 중계 노드에게 전송전력의 정규화 값을 피드백해야 하기 때문에 시스템 운영에 부담이 크다. 이 피드백 오버헤드를 줄이기 위해 복호에 성공한 중계 노드들 중 수신 노드와의 채널이 가장 좋은 중계 노드만 신호를 전송하는 기회적 중계 노드 선택 기법이 제안되었다 [3]. 그러나 이 기법 또한 수신 노드가 매순간 복호에 성공한 중계 노드들과의 채널 정보를 획득하고 신호를 전송할 중계 노드를 결정하여 중계노드들에게 알려야 한다. 위의 기법들의 단점을 보완하기 위해, 각 중계 노드가 수신 노드로부터 참조 신호를 수신하여 채널 정보를 획득하고, 수신단에서 특정 위상값으로 신호들이 정렬되도록 만드는 협업 위상 조향 기법이 [4]에서 제안되었다. 그러나 협업 위상 조향 기법의 경우 수신 노드 안테나가 1개인 경우에만 적용이 가능하다.

최근 수신 노드의 안테나가 2개인 환경에서 효과적인 공간 다이버시티를 제공하는 협력 시공간 선 부호화 기법이 제안되었다 [5]. 협력 시공간 선 부호화 기법은 송신단이 채널 정보를 알 때 최대 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있다 [6]. 또한, 시공간 선 부호의 고유한 특성을 사용하여 협업 통신 시스템에서 높은 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기법으로, 첫 번째 홉에서 송신 노드로부터 수신한 패킷의 복호에 성공한 모든 중계 노드가 두 번째 홉의 패킷 중계에 참여하고, 수신 노드와의 채널정보를 활용하여 분산적으로 시공간 선 부호를 형성하여 효과적으로 공간 다이버시티를 제공하는 기술이다.

본 논문에서는 [5]에서 제안된 협력 시공간 선 부호 기법의 성능을 더욱 향상하기 위해 첫 번째 홉에서 복호에 성공한 중계 노드 중 채널환경이 좋은 일부 중계 노드들만이 두 번째 홉에서 패킷 중계에 참여하는 "선택적 협력 시공간 선 부호 시스템"을 제안한다.

Ⅱ. 선택적 협력 시공간 선 부호 시스템

그림 1은 제안하는 선택적 협력 시공간 선 부호 시스템 모델을 보여준다. 전체 시스템은 단일 안테나를 갖는 송신 노드 (s)와 두 안테나를 갖는 수신 노드 (d), 송수신 노드 사이에 존재하는 단일 안테나를 갖는 K 개

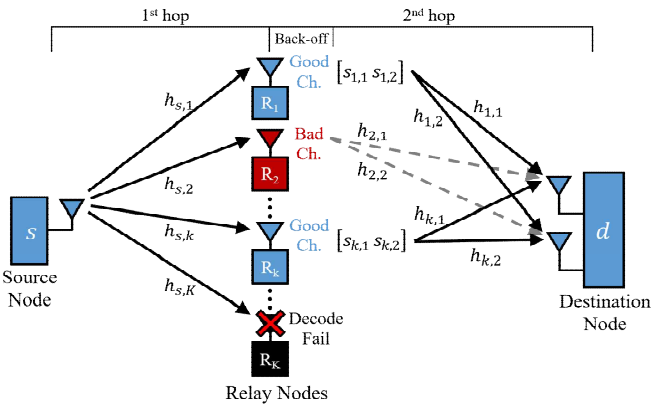

그림 1. 선택적 협력 시공간 선 부호 시스템.

중계 노드 ($k, 1 \le k \le K$)로 구성되어 있다. 송신 노드와 수신 노드 사이 채널 환경은 매우 열악하여, 송신 노드는 오직 중계 노드를 통해 수신 노드와 통신한다고 가정하고, 두 홉 동안 모든 무선 채널은 변하지 않는다고 가정한다. 또한, 중계 노드는 자신과 송신 노드 사이의 채널을 알고 있다고 가정한다.

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

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

여기서 y_k는 $k \in \{1,2,...,K\}$ 번째 중계 노드의 수신 신호이고, $h_{s,k}$는 송신 노드로부터 k째 중계 노드 사이 무선 채널이며, 모든 채널은 $\mathcal{CN}(0,\sigma_1^2)$ 분포를 따른다고 가정한다. P_t는 송신 노드 송신 전력이고, x는 송신 신호이며, n_k는 k째 중계 노드에서의 잡음으로, 분포 $\mathcal{CN}(0,N_0)$를 따른다고 가정한다. 모든 중계 노드는 수신한 신호의 복원을 진행하며, 복원에 성공한 중계 노드의 집합 D를 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$D = \left\{k \in \{1,2,...,K\}: |h_{s,k}|^2 \ge g = (2^{2R}-1)/\rho\right\} \quad (2)$$

여기서 R은 송신 노드에서 수신 노드까지 요구되는 전송률을 의미하며, 두 홉을 사용하는 무선 통신 시스템은 두 홉 동안 주파수 효율이 감소되는 것을 보상하기 위해 송신 노드와 수신 노드가 직접 통신하는 시스템보다 데이터 전송률이 두 배

증가해야 한다. (2)에서 $\rho = P_t/N_0$는 송신 신호대잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)를 나타낸다.

첫 번째 홉에서 수신한 패킷 복호에 성공한 각 중계 노드는 두 번째 홉에서 수신 노드로부터 참조 신호를 수신하여 채널 정보를 획득한 후 채널 벡터의 norm (이득)을 계산한다. 이후 각 중계 노드는 자신이 신호를 전송할 것이라는 것을 $T/(1+\|\boldsymbol{h}_k\|)$ 시간 후에 다른 중계노드들에게 방송한다. 이 때 T는 최대 유예시간 (maximum backoff time)을 의미하고, $\boldsymbol{h}_k = [h_{k,1} h_{k,2}]^T$ 는 k째 중계 노드와 수신 노드 사이 무선 채널 벡터이며, $h_{k,j}$는 k 번째 중계 노드와 수신 노드의 j째 안테나 사이의 무선 채널을 나타낸다 ($k \in D$). 중계 노드와 수신 노드 사이의 모든 채널은 $\mathcal{CN}(0,\sigma_2^2)$의 분포를 따른다고 가정한다. 모든 중계 노드는 다른 중계 노드의 송신 여부를 지속적으로 관찰한다 (carrier sensing). 송신 여부를 고지한 중계 노드 개수 $|D|$가 제한된 최대 개수 $K_{\max}$에 도달하면 송신을 고지하지 못한 중계 노드들은 송신을 포기한다. 반면에 중계를 고지한 복수의 중계노드들은 $|D| = K_{\max}$이거나, T 시간이 흐르면 정해진 일정시간 후에 동시에 패킷을 수신노드로 전송한다. 최종적으로 송신할 자격을 얻은 중계 노드들의 집합을 K'으로 정의하면 K'은 다음 식을 만족한다: $0 \le |K'| \le K_{\max}$. 이와 같은 스케쥴링 과정을 통해 수신단으로부터 피드백이 없이 분산적으로 중계 노드들을 선택하여 통신하는 것이 가능하다.

송신 여부를 고지하여 송신 자격을 획득한 각 중계노드는 시공간 선 부호를 사용하여 두 수신 안테나를 가지는 수신 노드에게 신호를 전송한다. 이 때, 신호는 두 시간 슬롯으로 구분되어 전송되며, 각 시간 슬롯동안 중계 노드에서 전송하는 신호는 다음과 같다 [5]:

$$\begin{aligned} s_{k,1} &= \left(h_{k,1}^* x_1 + h_{k,2}^* x_2^*\right)/\|\boldsymbol{h}_k\|, \\ s_{k,2} &= \left(h_{k,2}^* x_1^* - h_{k,1}^* x_2\right)/\|\boldsymbol{h}_k\| \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $s_{k,i}$는 $i \in \{1,2\}$ 번째 시간 슬롯에 k째 중계 노드가 송신하는 시공간 선 부호화된 신호를 나타내고, x_i는 중계 노드가 전송할 두 개의 데이터 가운데 i째 데이터이다. 따라서, 수신 노드에서 두 시간 슬롯 동안 받는 신호는 다음과 같이 행렬로 표현할 수 있다:

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{P_r}{N}} \sum_{k \in K'} \boldsymbol{h}_k \begin{bmatrix} s_{k,1} & s_{k,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1,1} & n_{1,2} \\ n_{2,1} & n_{2,2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $r_{j,i}$는 i째 시간 슬롯에 j째 수신 노드 안테나가 수신하는 신호이고, P_r은 K'의 중계 노드의 전체 송신 전력을 나타내며, $n_{j,i}$는 $r_{j,i}$에 더해진 잡음으로 $\mathcal{CN}(0,N_0)$를 따른다고 가정한다. N은 두 번째 홉에서 복호에 성공하고 중계에 참여하는 중계 노드 수 $|K'|$의 평균으로 다음과 같이 주어진다.

$$N \triangleq \mathbb{E}[|K'|] = \sum_{k=1}^{K} \min\{k, K_{\max}\} \binom{K}{k} \left(e^{-g/\sigma_1^2}\right)^k \left(1 - e^{-g/\sigma_1^2}\right)^{K-k} \quad (5)$$

수신 노드는 x_1과 x_2를 복호하기 위해 다음과 같이 두 슬롯동안 수신한 네 개의 수신 신호를 결합하여 복호과정을 수행한다:

$$\begin{aligned} r_{1,1} + r_{2,2}^* &= \sum_{k \in K'} \|\boldsymbol{h}_k\| x_1/\sqrt{N} + n_{1,1} + n_{2,2}^*, \\ r_{2,1}^* - r_{1,2} &= \sum_{k \in K'} \|\boldsymbol{h}_k\| x_2/\sqrt{N} + n_{2,1}^* - n_{1,2} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 수신 노드에서의 유효 수신 SNR을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\gamma(|K'|) = \frac{\rho}{2N} \left(\sum_{k \in K'} \|\boldsymbol{h}_k\| \right)^2 \quad (7)$$

Ⅲ. 시뮬레이션 결과

그림 2와 3은 제안한 선택적 협력 시공간 선 부호 시스템의 성능을 각각 SNR과 K에 따라 보여준다. 각 그림에는 비교를 위해 기존 협력 통신 기법들의 성능도 포함하였다. 그림 2는 $K = 10$, $K_{\max} = K/2$일 때, 제안하는 선택적 시공간 선 부호 시스템의 오류 (Outage) 확률을 보여준다. 제안한 기법은 모든 SNR 영역에서 기존 기법들보다 좋은 성능을 보인다. 그림 3은 송신 SNR을 18dB로 고정했을 때, 전체 중계 노드 수 대비 오류 확률을 나타낸다. 여기서도 $K_{\max} = K/2$로 가정하였다. 이 때, 제안한 선택적 협력 시공간 선 부호 시스템이 기존 기법들보다 K가 6개 이상일 때는 성능을 향상하였다. 그러나 K가 6보다 작을 때는 [5]에서 제안된 협력 시공간 선 부호 시스템처럼 첫 번째 홉에서 복호에 성공한 모든 중계노드가 두 번째 홉에서의 통신에 참여하는 기법, 즉, 항상 $K' = D$ 인 시스템이 더 나은 성능을 보인다.

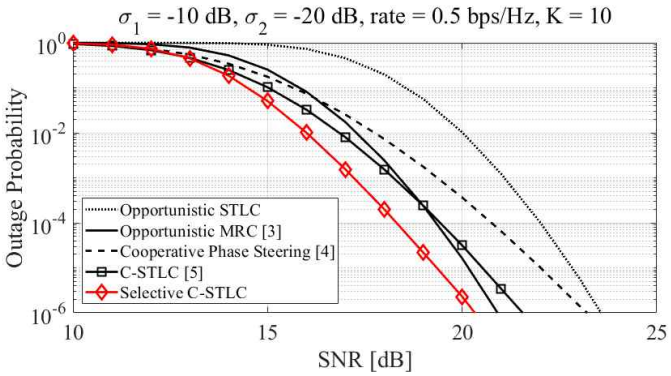

그림 2. SNR 대비 오류 확률 시뮬레이션 결과.

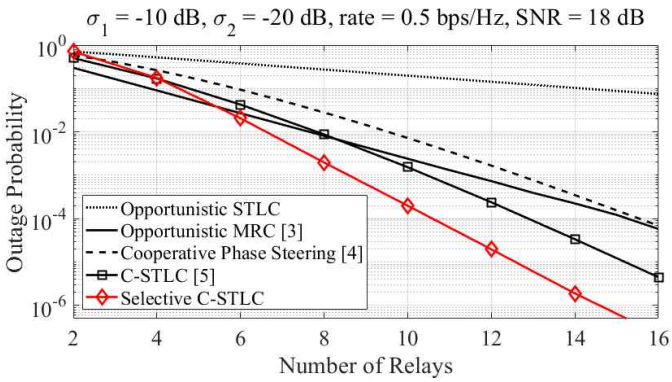

그림 3. 전체 중계 노드 수 대비 오류 확률 시뮬레이션 결과.

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 기존 협력 시공간 선 부호 시스템의 성능을 더욱 향상하는 "선택적 협력 시공간 선 부호 시스템"을 제안하였다. 제안한 시스템은 각 중계 노드들이 자신과 수신 노드와의 채널 이득에 반비례하는 유예 시간을 설정하여 송신 여부를 고지함으로써, 수신단으로부터의 피드백 없이 분산적으로 동작하며 중계 성능을 향상할 수 있는 것을 확인하였다. 추후 연구에서는 제안한 선택적 협력 시공간 선 부호 시스템이 최적 성능을 달성하는 선택해야할 중계 노드의 최적 수와 송신 전력 설계를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2019-2017-0-01635)

참 고 문 헌

[1] T. W. Ban, B. C. Jung, W. Choi, and D. K. Sung, "Performance Analysis of Two Relay Selection Schemes for Cooperative Diversity," IEEE PIMRC'07, Sept.2007.

[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] 윤장혁, 염정선, 정방철, 정진곤, "다중 중계 노드 환경에서 분산 시공간 선 부호를 사용한 협업 통신 시스템," *한국통신학회 하계종합학술대회*, Jun. 2018

[6] J. Joung, "Space - time line code," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1023-1041, Feb. 2018.