

연속 중계 네트워크를 위한 분산형 시공간 부호 기술

이기훈*, 이호원[†], 최정욱[‡], 박수범[‡], 정방철*

*충남대학교, [†]한경국립대학교, [‡]엘아이지넥스원

kihun.h.lee@cnu.ac.kr, hwlee@hknu.ac.kr, jungwook.choi2@lignex.com, sbpark93@lignex1.com, bcjung@cnu.ac.kr

Randomized Distributed Space-Time Coding for Barrage Relay Networks

Ki-Hun Lee*, Howon Lee[†], Jungwook Choi[‡], Soobum Park[‡], Bang Chul Jung*

*Chungnam National University, [†]Hankyong National University, [‡]LIG Nex1

요약

본 논문에서는 연속 중계 네트워크(barrage relay network: BRN)에 분산형 시공간 부호(distributed space-time coding: DSTC) 기법을 적용하고 모의실험을 통해 효율성을 검증한다. 구체적으로, 하나의 통제된 연속 지역(controlled barrage region: CBR)을 고려하며, 각 노드는 분산형 시공간 부호를 이용하여 신호를 전송한다. 모의실험 결과 종래 연속 중계 네트워크 대비 매우 향상된 정전 확률(outage probability) 성능을 보이는 것으로 검증했다.

I. 서론

연속 중계 네트워크(barrage relay network: BRN)는 네트워크 중심전의 기반 통신 체계 중 하나인 전술이동통신체계와 같은 전술(tactical) 모바일 애드혹 네트워크(mobile ad-hoc networks: MANET)를 위해 제안된 네트워크 기술이다 [1]-[4]. 이는 시분할 다중 접속과 자율 협력 통신에 기반하며, 결론적으로 전술 모바일 애드혹 네트워크에서 라우팅 프로토콜의 필요성을 없애고 낮은 오버헤드로 대규모 네트워크에 대한 확장성을 용이하게 한다는 장점이 있다. 한편, 분산형 시공간 부호(distributed space-time coding: DSTC)는 협력 통신 네트워크에서 분산된 다수의 중계 노드를 다수의 송신 안테나처럼 활용하여 다이버시티 이득을 유도하기 위해 제안되었다 [5]. 본 논문에서는 연속 중계 네트워크에 분산형 시공간 부호 기술의 적용을 제안하고 모의실험을 통해 효율성을 검증한다.

II. 분산형 시공간 부호 기반 연속 중계 네트워크

연속 중계 네트워크에 분산형 시공간 부호 기법을 적용하고 성능을 검증하기 위해 [2]와 같은 토폴로지에서도 종단 간 정전 확률(end-to-end outage probability) 성능을 분석한다. 소스 노드(S)와 목적지 노드(D) 및 두 노드 사이에 있는 두 개의 중계 노드(R1, R2)로 구성된 하나의 통제된 연속 지역(controlled barrage region: CBR)을 고려하며, 각 노드는 단일 안테나를 갖는다고 가정한다. 소스 노드부터 시작하여 연쇄적으로 복호화에 성공한 노드가 해당 신호를 방송(broadcasting)하며, 송신을 한번 수행한 노드는 더 이상 전송하지 않는다.

첫 번째 시간 슬롯에서 소스 노드의 방송 이후 시간 슬롯 $t \in \{2, 3\}$ 에서 노드 $j \in \{R1, R2, D\}$ 로 수신되는 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\mathbf{y}_j^{(t)} = \mathbf{B}\mathbf{R}\mathbf{h}_j^{(t)} + \mathbf{n}_j^{(t)} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{R1} & \mathbf{r}_{R2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{R1}^{(t-1)} b_{R1}^{(t-1)} h_{i,R1} \\ a_{R2}^{(t-1)} b_{R2}^{(t-1)} h_{i,R2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{j1}^{(t)} \\ n_{j2}^{(t)} \end{bmatrix},$$

여기서 \mathbf{B} 는 시공간 부호를 나타내며, 본 논문에서는 Alamouti 코드를 이용한다. 즉, x_1 과 x_2 는 소스 노드가 첫 번째 시간 슬롯에 전송하는 두 개의 연속적인 변조 신호를 나타낸다. 또한, \mathbf{R} 은 각 중계 노드의 시그니처(signature) 벡터 $\mathbf{r}_i \in \mathbb{C}^{2 \times 1}$, $i \in \{R1, R2\}$ 로 구성된 행렬이며, \mathbf{r}_i 는 서로 독립적으로 단위 복소 초구(complex hypersphere) 표면상에서 균등분포에 따라 선택된다. 한편, $a_i^{(t-1)} \in \{0, 1\}$ 과 $b_i^{(t-1)} \in \{0, 1\}$ 은 각각 $t-1$ 번째 시간 슬롯에서 노드 i 의 송신 여부 및 복호화 성공 여부를 나타내기 위한 지표 변수이다. 구체적으로, $t-1$ 번째 시간 슬롯에서 노드 i 가 신호를 송신하면 $a_i^{(t-1)} = 0$, 그렇지 않으면 $a_i^{(t-1)} = 1$ 이 되고, 동일한 시간 슬롯에서 노드 i 가 신호 복호에 성공하면 $b_i^{(t-1)} = 1$, 그렇지 않으면 $b_i^{(t-1)} = 0$ 이 된다. 마지막으로, $\mathbf{h}_j = [h_{j,S}, h_{j,R1}, h_{j,R2}]^T$ 와 $\mathbf{n}_j^{(t)}$ 는 각각 복소 가우시안 $\mathcal{CN}(0, \Omega_j)$ 및 $\mathcal{CN}(0, \mathbf{N}_j)$ 분포를 따르는 노드 간 무선 채널 및 잡음 벡터를 나타낸다. Alamouti 코드의 특성에 따라 목적지 노드에 수신되는 두 변조 신호는 독립적으로 검파될 수 있으며, 이에 따라 수신 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)는 다음과 같이 정의할 수 있다 [5]:

$$\rho_D^{(1)} = \rho_0 \|\mathbf{h}_{D,S}\|^2 \text{ and } \rho_D^{(t)} = \rho_0 \|\mathbf{R}\mathbf{h}_D^{(t)}\|^2, t \in \{2, 3\},$$

여기서 ρ_0 는 각 노드의 송신 신호 대 잡음비를 나타낸다. 최종적으로, 목적지 노드에서 총 세 시간 슬롯 동안의 수신 신호 대 잡음비가 모두 특정 임계치 ρ_{th} 보다 낮은 경우를 종단 간 정전(outage)으로 정의한다.

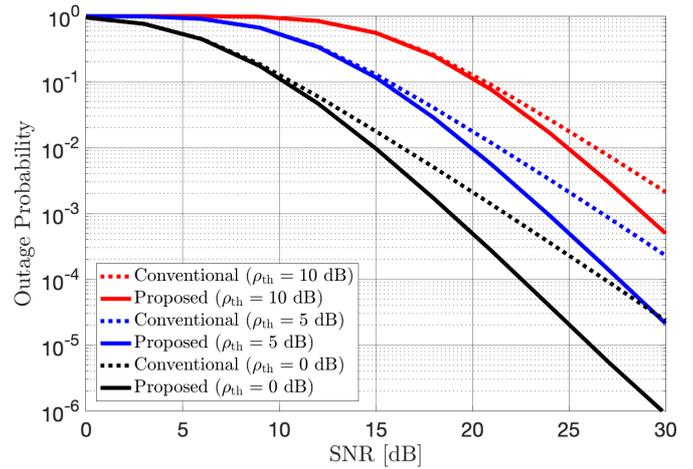


그림 1. 분산형 시공간 부호 기반 연속 중계 네트워크의 정전 확률 모의실험 결과

III. 모의실험 결과 및 결론

그림 1은 본 논문에서 제안한 분산형 시공간 부호 기반 연속 중계 네트워크(Proposed, 실선)와 종래 협력 통신 기반 연속 중계 네트워크(Conventional, 점선)의 송신 신호 대 잡음비 대비 종단 간 정전 확률의 모의실험 결과를 나타낸다. 네 개의 노드(S-R1-R2-D)가 [2]에서와 같이 직선상에 등간격으로 배치되어 있는 토폴로지를 가정했으며, Ω_j 는 각각 다음과 같이 정의된다: $\Omega_{R1} = \text{diag}(1, 0, 1)$, $\Omega_{R2} = \text{diag}(0.125, 1, 0)$, $\Omega_D = \text{diag}(0.037, 0.125, 1)$. 또한, 수신 신호 대 잡음비의 임계치 ρ_{th} 는 $\{0, 5, 10\}$ dB를 각각 고려했으며, 이는 목적지 노드에서의 정전 여부뿐만 아니라 각 중계 노드에서 신호 복호 성공 여부를 위한 임계치를 나타낸다. 모의실험 결과는 연속 중계 네트워크에서 분산형 시공간 부호 기법의 적용이 통신 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다. 특히, 두 개의 중계 노드만이 있음에도 신호 대 잡음비가 증가함에 따라 현격한 통신 성능 향상을 도출할 수 있는 것으로 검증했다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement-Grant funded by the Defense Acquisition Program Administration (DAPA) (KRIT-CT-21-030).

참고 문헌

- [1] T. R. Halford and K. M. Chugg, "Barrage relay networks," in *Proc. Inf. Theory and Appl. Workshop*, La Jolla, CA, USA, 2010, pp. 1-8.
- [2] S. Talarico, M. C. Valenti and T. R. Halford, "Unicast barrage relay networks: Outage analysis and optimization," in *Proc. 2014 IEEE MILCOM*, Baltimore, MD, USA, 2014, pp. 537-543.
- [3] 이기훈, 박규동, 전기윤, 전병천, 정방철 "차세대 전술이동통신체계를 위한 이동 기지국 배치 최적화 기법," *한국통신학회논문지*, vol. 47, no. 4, pp. 603-606, Apr. 2022.
- [4] W. Son, J. Choi, S. Park, H. Lee, and B. C. Jung, "A time synchronization protocol for barrage relay networks," *Sensors*, vol. 23, no. 5, pp. 2447, Feb. 2023.
- [5] B. Sirkeci-Mergen and A. Scaglione, "Randomized space-time coding for distributed cooperative communication," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 10, pp. 5003-5017, Oct. 2007.