

6G IoT 네트워크에서 패킷 결합을 활용한 시공간 부호 기반 분산 중계 기법

이하은, 이영석, 이기훈, 정방철

충남대학교

haeunlee@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Space-Time Coded Fully-Distributed Relaying Technique Using Packet Combining for 6G IoT Networks

Ha-Eun Lee, Young-Seok Lee, Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung

Chungnam National University

요약

본 논문에서는 6G 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크에서 시공간 부호(space-time coding: STC) 기반 분산 중계 기술을 제안한다. 구체적으로, 제안하는 기술은 송신기로부터 첫 번째 홉에서 직접 신호를 수신한 수신기가 복호에 실패하더라도 해당 패킷을 저장한 후, 두 번째 홉에서 중계기들로부터 분산 시공간 부호를 통해 수신한 패킷과 첫 번째 홉에서 수신한 패킷을 결합하는 패킷 결합(packet combining: PC)기술을 통해 수신기에서의 패킷 오류 성능을 개선한다. 본 논문에서는 제안하는 기술의 패킷 오류 확률(outage probability)을 이론적으로 분석하고 모의실험을 통해 제안하는 기술의 성능 향상과 이론적 분석 결과를 검증한다.

I. 서론

6G 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크는 일반적으로 다양한 서비스 응용을 지원하기 위해 대규모 연결성을 요구한다. 저전력으로 동작하도록 설계된 IoT 단말은 광역 네트워크 환경에서 에너지 효율성을 향상하기 위해 다중 중계기들을 이용하는 협력 중계 통신을 활용한다 [1], [2]. 한편, 6G 대규모 IoT 네트워크에서는 액세스 포인트(access point) 또는 기지국이 다중 중계기들을 직접 제어하는 중앙 집중형 동작의 복잡도가 매우 높아지게 된다. 따라서, 최근에는 모든 중계기가 각각 분산형으로 동작하면서 IoT 단말의 통신을 지원하는 분산 중계 기술에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다 [3-5]. 제안된 연구들 가운데 [4]와 [5]에서는 최적 다이버시티 이득을 얻기 위해 중계기에서 시공간 부호(space-time coding: STC)를 활용하는 시공간 부호 기반 분산 중계 기술을 제안하였다. 특히, [4]에서는 무작위 행렬을 이용하여 단일 안테나를 갖는 두 중계기가 시공간 부호 신호를 송신하는 시공간 부호 기반 분산 중계 기술이 제안되었으나 실제적인 무선 통신 환경을 고려하지 않은 한계가 있다. 또한, [5]에서는 연속 중계 네트워크(barrage relay networks)에서 시공간 부호를 활용하는 분산 중계 기술을 제안하여 다중 중계기들이 협력하는 두 번째 홉에서 공간 다이버시티 효과를 극대화하였으나, 첫 번째 홉에서 송신기의 신호가 수신기로 직접 신호가 전달되는 가능성에 대해서 고려하지 않았다.

본 논문에서는 6G IoT 중계 네트워크에서 첫 번째 홉에서 송신기의 신호가 수신기에 도달하는 신호와 다중 중계 노드로부터 시공간 부호를 활용하여 수신기에 도달하는 두 번째 홉 신호를 결합하여 수신기의 패킷 오류 성능을 향상시키는 패킷 결합(packet combining: PC)을 활용한 시공간 부호 기반 분산형 중계 기술(fully distributed STC-PC: FD-STC-PC)을 제안한다. 구체적으로, 제안하는 기술은 첫 번째 홉에서 송신기로부터 직접 신호를 수신할 때 수신기가 복호에 실패하더라도 해당 패킷을 저장하고, 다중 중계기들로부터 수신한 패킷과 함께 결합하여 송신 신호 복호를 시도하여 중계 네트워크에 존재하는 모든 무선 채널의 결합 이득을 최대화하고자 한다. 본 논문에서는 주요 연구 결과로서 제안하는 FD-STC-PC 기술에 대한 통신 성능의 수학적 분석하고, 모의실험을 통해 제안하는 기술이 기존 기법에 비해 향상된 통신 성능을 갖는다는 것을 검증한다.

II. FD-STC-PC 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 두 개의 중계기 노드(R_1, R_2)가 각각 단일 안테나를 갖는 소스 노드(S)와 목적지 노드(D)의 송수신을 지원하는 통신 환경을 고려한다 [5]. 이때, 모든 노드는 시 분할 다중 접속(time division multiple access: TDMA) 프로토콜을 통해 신호를 송수신한다고 가정하였다. 따라서, 첫 번째 시간 슬롯은 S 가 신호를 광역 전파하는 과정이 이루어지고,

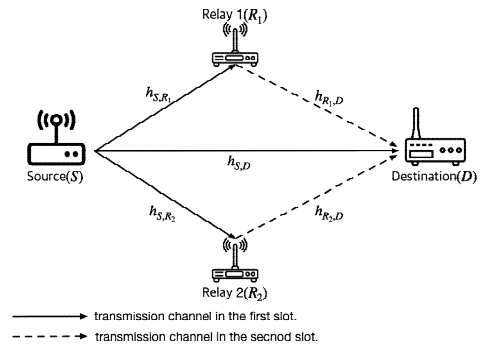


그림 1. FD-STC-PC의 시스템 모델

두 번째 시간 슬롯은 첫 번째 시간 슬롯에서 S 가 전송한 신호를 성공적으로 복호한 중계기가 D 로 신호를 전파한다. 이때, 본 논문에서는 네트워크 전체 복잡도를 고려하여 중계기 간 통신은 고려하지 않았다. 또한, 본 논문에서는 [4], [5]와 같이 중계기가 완전 분산형 시공간 블록 코딩(FD space-time block coding: FD-STBC)을 사용한다고 가정하여 하나의 시간 슬롯을 두 개의 미니 슬롯(mini-slot)으로 구분하여 시스템이 동작한다고 가정했고, 이때 두 미니 슬롯 동안 무선 채널은 변하지 않는다고 가정하였다.

따라서, 첫 번째 시간 슬롯에서 두 미니 슬롯 동안 S 는 패킷 신호 $\mathbf{x} (\in \mathbb{C}^2)$ 를 광역 전파함으로써 $j (\in \{R_1, R_2, D\})$ 노드가 수신하게 되는 신호 $\mathbf{y}_{S,j}^{(1)} (= [y_{S,j,1}^{(1)}, y_{S,j,2}^{(1)}]^T)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\mathbf{y}_{S,j}^{(1)} = \sqrt{P} \sqrt{d_{S,j}^{-\alpha}} \tilde{\mathbf{h}}_{S,j}^{(1)} \mathbf{x} + \mathbf{w}_{S,j}^{(1)},$$

여기서 P 는 송신 전력을 나타내고, $d_{S,j}$ 는 S 와 노드 j 사이의 거리를 의미하며, α 는 경로 감쇄 지수를 나타낸다. 본 논문에서 $\tilde{\mathbf{h}}_{i,j}^{(t)}$ 는 $t (\in \{1, 2\})$ 제 시간 슬롯에서 노드 $i (\in \{S, R_1, R_2\})$ 와 j 사이의 무선 채널을 의미하며 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다. 설명의 용이함을 위해, 본 논문에서는 $\sigma_{i,j} := d_{i,j}^{-\alpha}$ 로 치환하여 노드 i 와 j 사이의 거리를 고려한 $\mathbf{h}_{i,j}^{(t)} = \sqrt{d_{i,j}^{-\alpha}} \tilde{\mathbf{h}}_{i,j}^{(t)}$ 를 유효 무선 채널로 고려한다. 또한, $\mathbf{w}_{i,j}^{(t)} (= [w_{i,j,1}^{(t)}, w_{i,j,2}^{(t)}]^T)$ 는 두 미니 슬롯 동안 발생한 열잡음 벡터를 나타내며 각 원소는 통계적으로 각각 독립적인 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 분포를 따른다고 가정하였다.

두 번째 시간 슬롯에서는 첫 번째 시간 슬롯에서 S 가 광역 전파한 신호를 성공적으로 복호한 중계기만이 FD-STBC를 이용하여 D 로 신호를 전달한

다. 본 논문에서는 노드 j 에서의 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise: SNR) ρ_j 가 주어진 임계 SNR ρ_{th} 보다 큰 경우 복호에 성공했다고 가정하였다. 일반성을 잃지 않고, 두 번째 시간 슬롯에서 모든 중계 노드가 디코딩에 성공했다고 가정할 때 D 에서의 수신 신호는 다음과 같다:

$$\mathbf{y}_{R,D}^{(2)} = \sum_{k=1}^2 \sqrt{P} \mathbf{B}(\mathbf{x}) \mathbf{R} h_{R,D}^{(2)} + \mathbf{w}_{R,D}^{(2)},$$

$$= \sqrt{P} \begin{bmatrix} h_{R_1,D} r_{11} x_1 + h_{R_1,D} r_{12} x_2 \\ h_{R_1,D} r_{12} x_1 - h_{R_1,D} r_{11} x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{R_2,D} r_{21} x_1 + h_{R_2,D} r_{22} x_2 \\ h_{R_2,D} r_{22} x_1 - h_{R_2,D} r_{21} x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{R,D,1}^{(2)} \\ w_{R,D,2}^{(2)} \end{bmatrix}$$

여기서 $\mathbf{R} (\in \mathbb{C}^{2 \times 2})$ 은 [4]에서 제시된 FD-STBC를 위한 식별 행렬을 나타내고 $\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2 & x_1 \end{bmatrix}$ 는 2×2 STBC 행렬을 나타낸다.

따라서, 모든 시간 슬롯에 대해 D 에서 수신한 신호를 결합한 유효 수신 신호 $\mathbf{y} (\in \mathbb{C}^4)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\mathbf{y} = \sqrt{P} \mathbf{H} \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{w}}$$

$$= \sqrt{P} \begin{bmatrix} h_{S,D} & 0 \\ 0 & h_{S,D} \\ h_{R_1,D} r_{11} + h_{R_2,D} r_{21} & h_{R_1,D} r_{12} + h_{R_2,D} r_{22} \\ h_{R_1,D} r_{12} + h_{R_2,D} r_{22} & -h_{R_1,D} r_{11} - h_{R_2,D} r_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{S,D,1}^{(1)} \\ w_{S,D,2}^{(1)} \\ w_{R,D,1}^{(2)} \\ w_{R,D,2}^{(2)} \end{bmatrix}$$

최종적으로, 모든 시간 슬롯에 대한 유효 채널 행렬 $\mathbf{H} (\in \mathbb{C}^{4 \times 2})$ 을 이용하여 PC를 적용한 $u (= \{1, 2\})$ 째 패킷 신호는 다음과 같다:

$$\tilde{\mathbf{y}}_u = \frac{\mathbf{H}^H}{\sqrt{\mathbf{H}^H \mathbf{H}}_{u,u}} \mathbf{y}.$$

만약 첫 번째 시간 슬롯에서 복호에 실패한 중계 노드가 발생했을 경우, 복호에 실패한 중계 노드 인덱스를 갖는 항을 삭제하여 유효 수신 신호 및 채널 행렬을 재구성하여 PC를 적용할 수 있다.

III. FD-STC-PC의 정전 확률(outage probability) 분석

본 논문에서는 수신 SNR을 기반으로 D 에서의 정전 확률(outage probability)을 수학적으로 분석한다. 첫 번째 시간 슬롯에서 복호에 성공한 중계 노드의 수를 n 이라 할 때 n 에 따른 D 에서의 수신 SNR은 다음과 같다:

$$\rho_D = \begin{cases} \rho_0 |h_{S,D}|^2, & n = 0, \\ \rho_0 (|h_{S,D}|^2 + |h_{R_k,D}|^2) & k \in \{1, 2\}, \quad n = 1, \\ \rho_0 (|h_{S,D}|^2 + |h_{R_1,D} r_{11} + h_{R_2,D} r_{21}|^2 + |h_{R_1,D} r_{12} + h_{R_2,D} r_{22}|^2), & n = 2, \end{cases}$$

여기서 $\rho_0 (= P/N_0)$ 는 송신 SNR을 나타낸다. 따라서, n 이 주어졌을 때 조건부 정전 확률 $\Pr(\epsilon|n)$ 은 D 에서의 수신 SNR(ρ_D)이 임계 SNR(ρ_{th})보다 낮을 확률을 의미하며 각 n 에 대해서 다음과 같이 유도된다.

$$\Pr(\epsilon|n=0) = 1 - e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 \sigma_{S,D}}},$$

$$\Pr(\epsilon|n=1, k) = \frac{1}{\sigma_{S,D} - \sigma_{R_k,D}} \left(\sigma_{S,D} e^{-\frac{\rho_{th}}{\sigma_{S,D} \rho_0}} - \sigma_{R_k,D} e^{-\frac{\rho_{th}}{\sigma_{R_k,D} \rho_0}} \right),$$

$$\Pr(\epsilon|n=2) \leq \Pr(\epsilon|n=0) \cdot \left[\frac{\frac{\rho_{th}}{\rho_0} (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2} + \frac{\rho_{th}}{\rho_0}) E\left(\frac{\rho_{th}}{\rho_0 (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2})}\right) - \sigma_{D,R_1} \left(\sigma_{D,R_1} + \frac{\rho_{th}}{\rho_0}\right) e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2})}} + \sigma_{D,R_2} \sigma_{D,R_1}}{\sigma_{D,R_1} \sigma_{D,R_2}} \right]$$

$$- \frac{\frac{\rho_{th}}{\rho_0} (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2} + \frac{\rho_{th}}{\rho_0}) E\left(\frac{\rho_{th}}{\rho_0 (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2})}\right) - \frac{\rho_{th}}{\rho_0} (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2}) e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2})}}}{\sigma_{D,R_1} \sigma_{D,R_2}}$$

$$\times \frac{\frac{\rho_{th}}{\rho_0} (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2} + \frac{\rho_{th}}{\rho_0}) E\left(\frac{\rho_{th}}{\rho_0 (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2})}\right) - \sigma_{D,R_2} \left(\sigma_{D,R_1} + \frac{\rho_{th}}{\rho_0}\right) e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 (\sigma_{D,R_1} + \sigma_{D,R_2})}} + \sigma_{D,R_1} \sigma_{D,R_2}}{\sigma_{D,R_1} \sigma_{D,R_2}},$$

여기서, $\Pr(\epsilon|n=1, k)$ 은 중계 노드 R_k 만 복호에 성공했을 때의 조건부 정전 확률을 나타내며 $E(\cdot)$ 는 지수 적분 함수를 의미한다. 최종적으로, 전체 확률 정리(total probability theorem)에 의해 종단(end-to-end) 정전 확률 $\Pr(\epsilon)$ 의 상한은 발생할 수 있는 모든 n 에 대해 다음과 같이 유도된다.

$$\Pr(\epsilon) = \Pr(\epsilon|n=0) \Pr(n=0) + \Pr(\epsilon|n=1, 1) \Pr(n=1, 1) + \Pr(\epsilon|n=1, 2) \Pr(n=1, 2) + \Pr(\epsilon|n=2) \Pr(n=2)$$

여기서 $\Pr(n=0)$ 과 $\Pr(n=2)$ 는 각각 첫 번째 시간 슬롯에서 모든 중계 노드가 복호에 성공하지 못 할 확률과 두 중계 노드가 모두 복호에 성공 할 확률을 의미하고, $\Pr(n=1, k)$ 은 R_k 노드만 복호에 성공할 확률을 나타내며 각 확률은 다음과 같다:

$$\Pr(n=0) = \left\{ 1 - e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 \sigma_{S,R_1}}} \right\} \left\{ 1 - e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 \sigma_{S,R_2}}} \right\},$$

$$\Pr(n=2) = e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 \sigma_{S,R_1}}} e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 \sigma_{S,R_2}}},$$

$$\Pr(n=1, k) = e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 \sigma_{S,R_k}}} \left\{ 1 - e^{-\frac{\rho_{th}}{\rho_0 \sigma_{S,R_{1,2} \setminus k}}} \right\}.$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

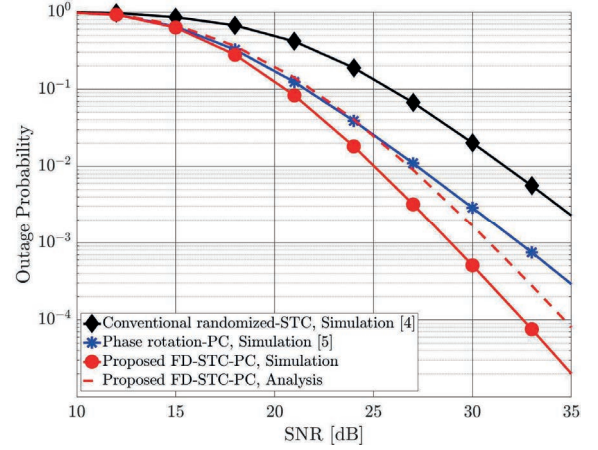


그림 2. 제안하는 FD-STC-PC의 정전 확률 성능 및 분석 결과

그림 2는 제안하는 FD-STC-PC의 송신 SNR 대비 정전 확률 성능을 도시한 결과이다. 이때, 각 노드의 위치는 (x, y) 좌표에서 노드 S 를 원점으로 할 때 각각 $R_1: (2, 1, 0.5)$, $R_2: (2, 1, -0.5)$, $D: (5, 0)$ 로 설정하였고 경로 감쇄 지수 α 는 3.5로 설정하였다. 또한, 신호 복호를 위한 임계 SNR ρ_{th} 는 0dB로 설정하였다. 그림 2를 통해 제안하는 기법이 종래의 randomized-STC 기법 [4]과 PC를 적용한 위상 편이(phase rotation) 중계 기법 [5]과 비교하였을 때 가장 우수한 정전 확률 성능을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 본 논문에서 이론적으로 분석한 정전 확률 성능 상한이 모의실험 결과를 잘 표현하는 것을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2019-0-00964, 스펙트럼채널지를 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발) 및 한국연구재단(No. NRF-2022R1I1A3A0373740)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] D. C. Nguyen *et al.*, "6G Internet of Things: A comprehensive survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 1, pp. 359-383, Jan. 2022.
- [2] U. Uyoata, J. Mwangama, and R. Adeogun, "Relaying in the Internet of Things (IoT): A survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 132675-132704, Sep. 2021.
- [3] L. Gigli, I. Zyrianoff, F. Montori, C. Aguzzi, L. Roffia, and M. D. Felice, "A decentralized oracle architecture for a blockchain-based IoT global market," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 61, no. 8, pp. 86-92, Aug. 2023.
- [4] 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.
- [5] 이기훈, 이호원, 최정욱, 박수범, 정방철, "연속 중계 네트워크를 위한 분산형 시공간 부호 기술", *한국통신학회 추계종합학술발표회*, Jun. 2023.