6G IoT 네트워크용 버퍼기반 협력 시공간 선 부호화 기술의 성능 분석

이예림, 염정선, 정방철
충남대학교
yyy0587@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Buffer-Aided Cooperative Space-Time Line Code for 6G IoT Networks

Ye Rim Lee, Jeong Seon Yeom, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요 약

본 논문은 단일 버퍼를 가진 다중 중계 노드 시스템에서 시공간 선 부호화 기술(space time line code, STLC)의 협력적 전송의 성능을 분석한다. 구체적으로 K 개의 반이중 통신 (half-duplex) 중계 노드 중 송신 노드의 신호를 성공적으로 복호화한 중계 노드만 수신 노드까지의 채널을 고려하여 기회적 전송을 한다. 만약 신호가 기회적 전송 조건을 만족하지 못했다면 버퍼에 저장되고 전송 조건을 만족하면 수신 노드로 전송한다. 본 논문에서는 위 시스템에 대한 아웃티지 확률의 수학적 분석 방법을 제시하며 분석 결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 수학적 분석의 정확함을 검증한다.

Ⅰ. 서 론

IoT (Internet-of-Things) 네트워크에서 실시간으로 통신할 필요가 없거나 불가능한 환경인 경우 데이터를 가진 단말이 즉시 데이터를 전송하지 않고 우선 버퍼에 저장하여 전송이 가능한 조건이 만족되었을 때 데이터를 네트워크에 전송할 수 있다[1]. 이러한 IoT 네트워크는 전송지연이나 네트워크 연결이 보장되지 않는 환경에서 안정적인 통신 서비스를 제공하기 위해서 제안 및 고려되었다. 특히 통신 거리가 먼 환경에 있어서 전송지연이 존재하는 중계 시스템을 위해 버퍼를 갖는 중계 노드 기술이 고려된다.

협력적 중계 시스템의 성능 향상을 위해 [2]에서는 시공간 선 부호화 (space-time line code, STLC) 기법을 이용하여 유효 채널의 공간 다이버시티 이득을 증가함으로써 오류 확률의 성능을 향상하였다.

본 논문에서는 단일 버퍼 기반의 협력 중계 무선 토신 시스템에서 효과적인 오류 확률 성능 향상을 위해 중계 노드 단에서 STLC 기법과 기회적 전송 기법을 적용하며 이에 대한 시스템의 아웃티지 확률을 수학적으로 분석한다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문의 시스템 모델은 단일 안테나를 갖는 한 개의 송신 노드와 K 개의 중계 노드, 그리고 두 개의 안테나를 갖는 한 개의 수신 노드로 구성되며 목표 전송율은 R 이다. 수신 노드는 중계 노드를 통해서만 송신 노드의 신호를 수신한다고 가정한다. 또한, 각 중계 노드는 자신과 연관된 채널 상태 정보를 알고 패킷을 저장할 수 있는 한 개의 버퍼를 가지고 있다. 그러므로 $k(\in 1,2,...,K)$ 번째 중계 노드에서 수신하는 t 번째 신호는 다음과 같다.

$$y_k[t]=\sqrt{P}h_{s,k}[t]x[t]+n_k[t], \quad (1)$$

여기서 P는 송신 노드의 송신 전력, $h_{s,k}$는 송신 노드와 k 번째 중계 노드 사이 무선 채널, x는 송신 노드의 송신 신호, n_k는 k 번째 중계 노드에서의 잡음을 의미한다. 채널 $h_{s,k}$는 모든 k에 대해 $\mathcal{CN}(0,\sigma_{s,r}^2)$의 분포를 따르고 잡음은 $\mathcal{CN}(0,N_0)$의 분포를 따른다. 이하 $[t]$는 편의상 생략한다.

송신 신호를 복호화에 성공한 중계 노드만 수신 노드로의 전송에 참여할 수 있으며, 복호화에 성공한 중계 노드의 집합 $D[t]$은 아래와 같다.

$$D=\{k\in\{1,2,..,K\}:\log_2(1+P|h_{s,k}|^2/N_0)\geq 2R\}, \quad (2)$$

두 번째 홉에서 t 번째 패킷에 대해 중계 노드의 기회적 전송 조건은 $D[t]$에 포함된 중계 노드들의 채널 크기 중 최솟값이 수식 (3)으로 주어지는 임계치 $Q_{th}=\alpha\sqrt{R'}/\sqrt{|D|}$ 이상일 경우이며 그렇지 않은 경우, 패킷을 버퍼에 저장한다. 여기서 $R'=(2^{2R}-1)N_0/P$, α는 임계치 조절 파라미터이다.

또한, 버퍼에 저장된 시간이 최대 지연 허용 시간($T_{\max}$)에 도달했을 경우 채널의 이득 값과 상관없이 신호를 전송한다. k 번째 중계 노드가 전송하는 STLC 신호는 다음과 같다.

$$s_{k,1}=\frac{h_{k,1}^*x_1+h_{k,2}^*x_2^*}{\sqrt{|D|}\,\|\mathbf{h}_{k,d}\|}, \quad s_{k,2}=\frac{h_{k,2}^*x_1^*-h_{k,1}^*x_2}{\sqrt{|D|}\,\|\mathbf{h}_{k,d}\|}, \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{h}_{k,d}=[h_{k,1},h_{k,2}]^T$는 전송 조건이 만족할 때 신호 t에 대한 각 중계 노드에서 수신 노드 사이의 무선 채널 벡터이며 각각 $\mathcal{CN}(0,\sigma_{r,d}^2)$의 분포를 따르며 $|D[t]|$는 복호화에 성공한 중계 노드의 개수이다. 각 중계 노드가 두 개의 시간 슬롯 동안 전송한 2개의 STLC 신호에 대해 수신 노드의 수신 신호는 다음으로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2}\end{bmatrix}=\sum_{k\in D}\sqrt{\frac{P}{|D|}}\,\mathbf{h}_{k,d}[s_{k,1}\ s_{k,2}]+\begin{bmatrix} n_{1,1} & n_{1,2} \\ n_{2,1} & n_{2,1}\end{bmatrix}, \quad (4)$$

여기서 $r_{m,l}$과 $n_{m,l}$ $(m,l\in\{1,2\})$은 각각 l 번째 시간 슬롯에서 m 번째 안테나로 수신된 신호와 잡음을 의미한다.

수신 노드에서 t 번째 패킷에 대한 복호화 성공 조건은 다음과 같다.

$$\log_2\left(1+P/(2N_0|D|)\left(\sum_{k\in D}\|\mathbf{h}_{k,d}\|\right)^2\right)>2R. \quad (5)$$

Ⅲ. 아웃티지 확률 분석

아웃티지 확률 분석 방법은 $|D[t]|$를 조건부로 하여 아웃티지 확률과 $|D[t]|$가 주어질 확률을 각각 유도하여 전체 확률의 법칙을 사용한다. 이때, 기회적 전송에 의해 $T_{\max}$ 이전과 $T_{\max}$에 전송하는 채널의 분포가 서로 다르므로 개별 아웃티지 확률을 고려해야 한다. 또한, 정확한 채널 분포 유도가 어려움으로 중심 극한 정리에 따른 가우시안 근사화를 사용한다.

이를 고려한 다중 중계 시스템에서 단일 버퍼기반 협력적 STLC 전송의 아웃티지 확률 P_{out}은 다음과 같다.

$$P_{out}=1-\sum_{k=0}^{K}P_{K,k}\left(P_{k,T_{\max}}P_{k,I}+\left(1-P_{k,T_{\max}}\right)P_{k,O}\right),$$

$$P_{K,k}=\binom{K}{k}\exp\left(-R'/\sigma_{s,r}^2\right)^k\left(1-\exp\left(-R'/\sigma_{s,r}^2\right)\right)^{K-k},$$

$$P_{k,T_{\max}}=\sum_{t=1}^{T_{\max}}\exp\left(-kQ_{th}^2/\sigma_{r,d}^2\right)\left\{1-\exp\left(-kQ_{th}^2/\sigma_{r,d}^2\right)\right\}^{t-1},$$

$$P_{k,I}=\begin{cases}1, & \text{if } kR'<kQ_{th}\\ \exp\left((Q_{th}^2-R')/\sigma_{r,d}^2\right), & \text{if } k=1,\ kR'\geq kQ_{th}\\ \operatorname{erfc}\left(\left(\sqrt{kR'}-k\mu\right)/\sqrt{2k\xi}\right)/\operatorname{erfc}\left(\left(kQ_{th}-k\mu\right)/\sqrt{2k\xi}\right), & \text{otherwise,}\end{cases} \quad (6)$$

$$P_{k,O}=\begin{cases}\exp\left(-kR'/\sigma_{r,d}^2\right), & \text{if } k=1\\ \operatorname{erfc}\left(\dfrac{2\sqrt{R'}-\sqrt{k\sigma_{r,d}^2\pi}}{\sqrt{2\,\sigma_{r,d}^2(4-\pi)}}\right)/\operatorname{erfc}\left(\dfrac{-\sqrt{k\pi}}{\sqrt{2(4-\pi)}}\right), & \text{if } k\geq 2.\end{cases}$$

여기서 μ와 ξ는 $|D[t]|=1$일 때 수신 노드의 유효 채널 크기의 평균과 분산을 의미한다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과 및 결론

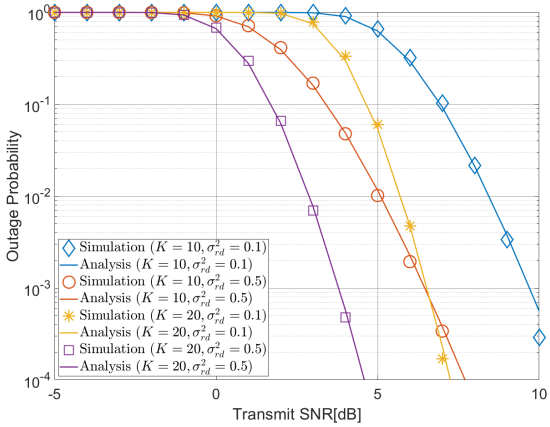

그림 1 단일 버퍼 기반 협력 시공간 선 부호화 기술의 아웃티지 확률

그림 1은 다중 중계 노드 협력 시스템에서 단일 버퍼 기반 협력 시공간 선 부호화 전송 기법의 아웃티지 확률을 보여준다. 시스템 파라미터 $\sigma_{s,r}^2=1$, $R=0.75$, $T_{\max}=10$이다. 중계 노드의 수와 $\sigma_{r,d}^2$의 변화에 따른 다양한 분석 결과는 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 매우 유사한 것을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1A4A1032580).

참 고 문 헌

[1] F. Z. Benhamida, A. Bouabdellah, and Y. Challal, "Using delay tolerant network for the Internet of Things: Opportunities and challenges," in *Proc. ICICS*, Apr. 2017.

[2] J. Youn, J. S. Yeom, J. Joung, and B. C. Jung, "Cooperative space-time line code for relay-assisted internet of things," *Elsevier ICT Express*, July 2022 (early access).