

IoT 네트워크에서 시공간 선부호를 활용한 버퍼기반 협력중계시스템의 지연 성능 분석

염정선, 정방철†
한경국립대학교, †아주대학교
jsyeom@hknu.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Delay Performance Analysis of Buffer-Based Cooperative Relaying Systems with STLC for IoT Networks

Jeong Seon Yeom, Bang Chul Jung†
Hankyong National University, †Ajou University

요약

본 논문은 시공간 선부호화(Space-Time Line Coding, STLC) 협력 중계 노드 시스템에서 중계 노드가 단일 버퍼를 갖는 경우에 패킷 지연 성능을 수학적으로 분석한다. 구체적으로 중계 노드는 복호 후 전송(decode-and-forward)으로 동작하며 채널 이득 기반 기하적 전송 기법에 의해 신호를 수신 노드에 전송한다. 만약 다수의 중계 노드 중 하나의 중계 노드가 기하적 전송 조건에 만족하지 못한다면 해당 패킷을 버퍼에 저장하여 다음 시간 슬롯에 전송을 고려한다. 이때 중계 노드의 버퍼에 저장된 패킷이 지속적으로 전송 지연이 되는 것을 방지하기 위해서 특정 지연 시간에 도달하면 채널 조건에 상관없이 전송한다. 기존 분석된 아웃티지 확률을 기반으로 지연 성능을 수학적으로 분석하고 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통해 분석의 정확성을 검증한다.

1. 서론

6G IoT 네트워크에서는 종단 간의 연결이 항상 보장되기 어렵거나 반드시 요구되지 않는 상황이 많아, 송수신 노드 사이의 데이터 손실을 줄이기 위한 방안으로 버퍼를 갖는 협력 중계 노드 시스템이 활발히 연구되고 있다 [1].

기존에 단일 버퍼기반 공간 선부호화(Space-Time Line Coding, STLC) 협력 중계 시스템에서 중계 노드와 수신 노드 간의 채널 이득을 기반으로 협력 전송 기법이 제안되었으며 아웃티지 확률이 수학적으로 분석되었다 [2].

본 논문에서는 참고문헌 [2]에서 제안된 기하적 전송을 고려한 단일 버퍼기반 STLC 협력 중계 시스템에서의 평균 패킷 지연 성능을 수학적으로 분석한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 수학적 분석 결과의 정확성을 검증한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 한 개의 송신 노드와 K 개의 중계 노드, 그리고 한 개의 수신 노드가 존재하는 다중 중계 노드 협력 시스템을 고려한다. 여기서 송신 노드와 중계 노드는 단일 안테나를 가지며, 수신 노드는 두 개의 수신 안테나를 갖는다. 송신 노드에서 수신 노드까지 직접적으로 연결된 채널은 없다고 가정한다. 그리고 각 중계 노드는 패킷을 저장할 수 있는 단일 버퍼를 갖는다. 중계 노드 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 에서 수신하는 t 번째 신호는 다음과 같다.

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

여기서 $[t]$ 는 t 번째 신호와 관련된 표기이며, P_s 는 송신 노드의 송신 전력, $h_{s,k}$ 는 송신 노드에서 k 번째 중계 노드까지의 무선 페이딩 채널이며 $\mathcal{CN}(0, \sigma_{sr}^2)$ 의 분포를 따른다. x 는 송신 노드의 송신 신호, n_k 는 k 번째 중계 노드에서의 잡음이며 분포는 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 이다.

각 중계 노드는 수신 신호를 복호화하며 t 번째 신호를 성공적으로 복호화한 중계 노드들의 집합은 다음과 같이 정의한다.

$$D[t] = \{k \in \{1, 2, \dots, K\} : \log_2(1 + (P_s |h_{s,k}[t]|^2)/N_0) \geq 2R\}, \quad (2)$$

여기서 R 은 목표 전송률이다.

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

또한, 버퍼에 저장된 시간이 최대 지연 허용 시간(T_{max})에 도달했을 경우 채널의 이득 값과 상관없이 신호를 전송한다.

협력 중계 노드 시스템에서 수신단에서의 효율적인 채널 이득을 얻기 위해 각 중계 노드는 수신 노드까지의 채널 벡터 $\mathbf{h}_{k,d} = [h_{k,1}, h_{k,2}]^T$ 를 기반으로 시공간 선 부호화(space-time line code, STLC) 전송 기법을 이용한다. 그러므로 k 번째 중계 노드의 전송 신호는 다음과 같다.

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

여기서 $|D[t]|$ 는 집합 $D[t]$ 의 크기를 의미한다. 집합 $D[t]$ 에 포함되어있는 모든 중계 노드들이 협력 전송을 위해 동시에 두 개의 시간 슬롯 동안 2개의 STLC 신호를 각각 전송한다면 수신 노드에서의 수신 신호는 다음과 같다.

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

여기서 P_r 는 중계 노드단의 총 송신 전력, $r_{m,l}$ 과 $n_{m,l}$ ($m, l \in \{1, 2\}$)은 각각 l 번째 시간 슬롯에서 m 번째 안테나로 수신된 신호와 잡음을 의미한다.

수신 노드에서의 복호화 성공 조건은 다음과 같다.

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

III. 평균 패킷 지연 성능 분석

본 시스템의 평균 패킷 지연(Average Packet Delay, APD) 성능은 참고 문헌 [2]의 근사적 아웃티지 확률 분석 결과를 바탕으로 유도될 수 있다.

P_o	중계 시스템의 종단 아웃티지 확률	$P_{K,k}$	복호화 성공 중계 노드의 개수가 K 개 중 k 개일 확률
$P_{m,1}$	m 개 중계 노드의 전송 조건 충족에 의한 전송시 수신 노드의 복호화 성공 확률	$P_{m,0}$	m 개 중계 노드의 전송 조건 미충족에 의한 전송시 수신 노드의 복호화 성공 확률
P_{min}	중계 노드의 전송 조건 충족 확률		

$$APD \approx 2 + P_o \left[\sum_{k=1}^K P_{K,k} P_{k,1} \left\{ \sum_{s=0}^{T_{max}-1} s P_{min}(1 - P_{min})^s \right\} + \sum_{k=1}^K P_{K,k} P_{k,0} T_{max} \left\{ 1 - \sum_{s=0}^{T_{max}-1} P_{min}(1 - P_{min})^s \right\} \right] \quad (6)$$

IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

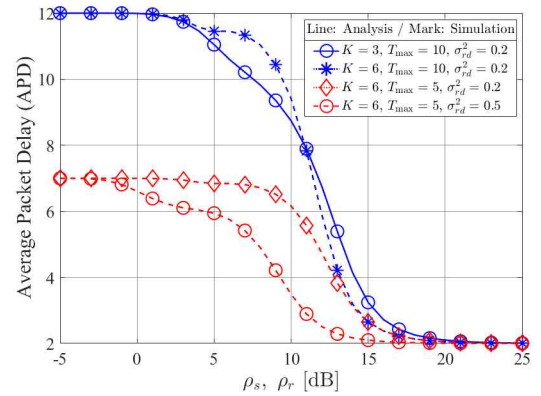


그림 1 단일 버퍼기반 STLC 협력 중계 시스템의 지연 성능 분석

그림 1은 단일 버퍼기반 STLC 협력 중계 시스템의 APD를 보여준다. 근사적인 수학적 성능 분석과 시뮬레이션 결과가 거의 완벽하게 일치하는 것을 보인다. 아웃티지 성능을 향상시키는 경우인 중계 노드의 개수가 증가, 채널 이득의 평균 증가에 따라 APD가 낮아지는 경향을 보인다. T_{max} 는 APD의 상한을 결정하기 때문에 T_{max} 가 감소할수록 지연 성능이 향상된다. 하지만 아웃티지 성능 측면에서는 감소하는 경향을 보일 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터 사업의 지원(IIIPT-2025-RS-2024-00436406)과 자재도 위성통신 핵심기술 기반 큐브위성 개발 과제의 지원(RS-2024-00396992)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] S. Lee, J. Youn, Y. Kim, and B. C. Jung, "Buffer-aided cooperative phase steering technique for delay-tolerant networks," in *Proc. Int. Conf. ICT Convergence (ICTC)*, Oct. 2021.
- [2] 이예림, 염정선, 정방철, "6G IoT 네트워크용 버퍼기반 협력 시공간 선 부호화 기술의 성능 분석," *한국통신학회 추계종합학술발표회*, Nov. 2022.