

DTN환경에서 다중 버퍼기반 협력 시공간 선 부호화 기술

이예림, 염정선, 김용재*, 정방철
충남대학교, *한국해양과학기술원

yyy0587@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, yongjaekim@kiost.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Multiple Buffer-Aided Cooperative Space-Time Line Code for Delay-Tolerant Networks

Ye Rim Lee, Jeong Seon Yeom, Yongjae Kim*, and Bang Chul Jung
Chungnam National University, *Korea Institute of Ocean Science & Technology

요약

본 논문은 송신 노드와 수신 노드 사이에 다중 버퍼를 갖는 다수의 중계 노드가 존재하여 시공간 선 부호(Space Time Line Code) 이용하여 협력적으로 송신 노드의 신호를 수신 노드에게 전달하는 기술을 제안한다. 구체적으로 송신 노드의 신호를 성공적으로 부호화한 중계 노드들은 기회적으로 신호를 동시에 전송한다. 만약 특정 신호가 기회적 전송 조건에 만족하지 못한다면 버퍼에 저장된 다음 호부의 신호에 대해 기회적 전송 조건 여부를 판별하고 전송 조건에 부합한다면 전송 기회를 제공한다. 다중 버퍼를 사용함으로써 다수의 신호가 저장될 수 있으며 또한 송신 노드에서의 큐(queue) 지연을 감소시킬 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과로부터 제안하는 다중 버퍼 기반 협력 통신 시스템은 단일 버퍼 시스템과 비교하여 종단 지연 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

1. 서론

지연-내성 네트워크(delay-tolerant networks, DTN)는 지속적인 연결성을 보장할 수 없는 이중 네트워크 간의 연결성 문제를 해결하는 네트워크이다. DTN은 특히 지속적으로 연결이 제한되는 저궤도(low earth orbit) 위성 네트워크에서 요구되어 최근 많은 연구가 진행되었다 [1]. 이러한 지연이 존재하는 중계 시스템을 위해 버퍼를 갖는 중계 노드 기술이 제안되었다 [2]. 또한, 다수의 중계 노드를 배치하여 공간 다이버시티(spatial diversity)를 제공하며 채널 정보를 중계 노드에서만 알고 있다고 가정하여 각 중계 노드에서 위상 조향 기법을 적용한다. 하지만 단일 버퍼를 고려한 위 기술은 높은 종단 간 지연을 발생시킨다. 또한, 다중 수신 안테나 시스템에서 위상 조향 기법을 적용하여 높은 채널 이득을 얻기 어렵다.

본 논문에서는 다중 버퍼를 고려한 협력 통신 시스템에서 다중 수신 안테나의 효과적인 채널 이득 향상을 위해 시공간 선 부호화(space-time line coding, STLC) 기술과 기회적 전송 기법을 적용한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 다중 버퍼 시스템이 단일 버퍼 시스템과 비교하여 종단 지연 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

II. 시스템 모델 및 아웃지 확률 성능 분석

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 한 개의 송신 노드와 K 개의 중계 노드, 그리고 두 개의 안테나를 갖는 한 개의 수신 노드가 존재하는 다중 중계 노드 협력 시스템을 고려한다. 송신 노드에서 수신 노드까지 직접적으로 연결된 채널은 없다고 가정하며, 수신 노드는 오직 중계 노드를 통해서만 송신 노드의 신호를 수신한다. 각 중계 노드는 패킷을 저장할 수 있는 N 개의 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 관련한 표기이며, P_s 는 송신 노드의 송신 전력, $h_{s,k}$ 는 송신 노드에서 k 번째 중계 노드까지의 무선 페이딩 채널, x 는 송신 노드의 송신 신호, n_k 는 k 번째 중계 노드에서의 잡음이다. 본 논문에서 무선 페이딩 채널 및 잡음의 분포는 각각 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 와 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 이다.

각 중계 노드는 수신 신호를 부호화하며 t 번째 신호를 성공적으로 부호화한 중계 노드들의 집합은 다음과 같다.

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

여기서 R 은 목표 전송률이다.

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 STLC를 이용한다. 그러므로 k 번째 중계 노드의 전송 신호는 다음과 같다.

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

여기서 $|D[t]|$ 는 집합 $D[t]$ 의 크기를 의미한다. 집합 $D[t]$ 에 포함되어있는 모든 중계 노드들이 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 은 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 부호화 성공 조건은 다음과 같다.

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

III. 다중 버퍼 기반 중계 노드의 기회적 전송기법

중계 노드에서 부호화된 신호는 기회적 전송기법에 의한 전송 조건을 만족하지 못하는 경우 수신 노드에 전송되거나 손실되지 않고 중계 노드들의 버퍼에 각각 저장된다. 기회적 전송을 위해 아래 두 조건 중 하나를 충족해야 한다.

1) 신호 $x[t]$ 를 부호화한 중계 노드들의 채널 이득 중 최소 채널 이득이 임계값 $Q_{th}/\sqrt{|D[t]|}$ 이상인 경우 신호 $x[t]$ 를 수신 노드에 전송한다.

$$Q_{th}/\sqrt{|D[t]|} < \min_{k \in D} \|\mathbf{h}_{k,d}[t]\|. \quad (5)$$

2) 중계 노드단의 버퍼에 존재하는 모든 신호들에 대해서 큐(queue) 지연을 계산하여 버퍼 사이즈 N 과 동일한 최대 큐 지연에 도달한 신호를 전송한다. 만약 특정 시간에 위 두 조건을 만족하는 신호가 두 개 이상이라면, 할당된 t 값이 가장 작은 신호에 대한 STLC 신호를 우선 전송한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

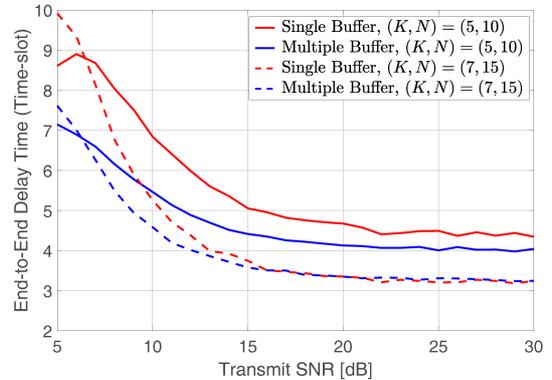


그림 1 중계 협력 시스템에서 다중 버퍼와 단일 버퍼의 종단 지연 성능

그림 1은 제안하는 다중 중계 노드 협력 시스템에서 다중 버퍼와 단일 버퍼의 종단 지연 성능을 보인다. 채널의 분산은 $\sigma^2 = 1$ 이며 $Q_{th} = 2$, $R = 1.2$ 이다. 단일 버퍼 시스템에서는 중계 노드단의 버퍼에 큐가 존재하는 경우 송신 노드가 중계 노드로 신호 송신을 하지 않기 때문에 송신 노드에서부터 큐 지연이 발생한다. 하지만 제안하는 다중 버퍼 시스템에서는 중계 노드의 버퍼에 큐가 존재하더라도 송신 노드에서 신호를 수신할 수 있으므로 송신 노드에서의 큐 지연이 발생하지 않는다. 또한, 중계 노드단에서 큐 지연의 최대 허용값이 버퍼 크기와 동일하여 버퍼 넘침(buffer overflow)를 방지할 수 있다. 그러므로 종단 지연 성능은 제안하는 다중 버퍼 중계 노드 시스템이 더 월등하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양 바이오로거 고도화 및 상용화).

참고 문헌

- [1] S. Chen *et al.* "Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 218-228, Apr. 2020.
- [2] 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.