

IoT 네트워크에서 지연 성능 향상을 위한 다중 버퍼기반 중계 프로토콜

이예림, 염정선, 정방철
충남대학교

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

A Multi-Hop Relaying Protocol with Multiple Buffers for Reducing Delay in IoT Networks

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

요약

본 논문은 다중 버퍼를 갖는 다중 중계 노드 시스템에서 패킷 지연 성능 향상을 위한 중계 프로토콜을 제안한다. 구체적으로 송신 노드의 신호를 성공적으로 부호화한 중계 노드들은 기화적 전송 기법에 의해 신호를 전송하며 기화적 전송 조건에 만족하지 못한다면 패킷을 버퍼에 저장하며 주파수 효율성 향상을 위해 송신 노드로부터 추가적인 신호를 수신한다. 중계 노드의 다중 버퍼에 저장된 패킷의 수가 증가할수록 큐(queue) 지연이 발생하므로 일정 패킷이 버퍼에 저장되면 모든 큐를 제거하도록 한다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과로부터 제안하는 지연 성능 향상 중계 프로토콜이 기존 다중 버퍼기반 프로토콜과 비교하여 지연 성능이 향상됨을 검증한다.

1. 서론

6G IoT 네트워크에서 종단 간의 지속적인 연결이 필요하지 않거나 불가능한 환경에서 송신 노드가 전송한 데이터의 손실을 막기 위해 송신 노드와 수신 노드 사이에 버퍼를 갖는 협력 중계 노드 시스템이 활발히 연구되고 있다[1]. 기존에 제안된 다중 버퍼기반 협력 중계 시공간 선 부호화 기술[2]에서는 버퍼의 큐(queue) 상태를 고려하지 않았으며 기화적 전송으로 인한 심각한 듀티 사이클 손실(duty cycle loss)을 극복하지 못하였다.

본 논문에서는 다중 버퍼기반 협력 중계 노드 시스템에서 [2]의 연구를 확장하여 지연 시간 측면에서 성능 향상을 위해 중계 프로토콜을 제안한다. 중계 노드에서의 지속적인 큐 지연을 감소시키고 두 번째 홉에서의 기화적 전송에 의한 미전송 기간에 첫 번째 홉이 전송하도록 하여 전체 시스템 동작 시간을 감소시킨다. 제안하는 다중 버퍼기반 중계 프로토콜을 기존 다중 버퍼기반 중계 프로토콜과 비교하여 지연 성능이 향상됨을 검증한다.

II. 시스템 모델

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 가정한다. 각 중계 노드는 패킷을 저장할 수 있는 N 개의 버퍼를 갖는다. 중계 노드 k ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$)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 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 시공간 선 부호화(space-time line code, STLC) 전송 기법을 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 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. 다중 버퍼기반 지연 성능 향상 중계 프로토콜

중계 노드는 기화적 전송 기법에 의해 전송 조건을 만족하는 경우에만 신호를 전송할 수 있다. 세 가지 전송 조건은 다음과 같다. 1) 복호화한 중계 노드들의 채널 중 최소 채널 이득이 임계값 $Q_{th} = \alpha\sqrt{R}/\sqrt{|D[t]|}$ 이상인 경우에 전송한다. 2) 특정 패킷이 버퍼에 저장된 시간이 최대 지연 허용 시간(T_{max})에 도달한 경우이며 만약 특정 시간에 위 두 조건을 만족하는 신호가 두 개 이상이라면, 해당된 t 값이 가장 작은 신호를 우선 전송한다. 3) 큐 지연 감소를 위한 버퍼 초기화 과정으로서 어느 하나의 중계 노드에서 버퍼 크기(N_{buffer}) 만큼 패킷이 저장된다면 중계 노드들의 버퍼에 있는 패킷을 모두 수신 노드로 전송한다. 이때 송신 노드는 일시적으로 전송을 중단한다.

중계 노드의 전송 조건 1)과 관련하여 만약 최소 채널 이득 조건을 만족하지 못하는 경우 중계 노드는 신호를 전송하지 못하므로 해당 시간에 대해 듀티 사이클 손실이 발생하게 되므로 이를 위해 송신 노드가 중계 노드에 신호를 전송한다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

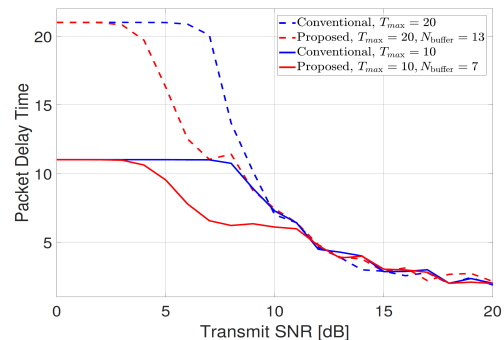


그림 1 다중 버퍼기반 중계 프로토콜에서 패킷 지연 성능 비교

그림 1은 제안하는 다중 버퍼기반 중계 프로토콜과 기존 프로토콜의 패킷 지연 성능을 비교한다. 채널의 분산은 각각 $\sigma_{sr}^2 = 1$, $\sigma_{rd}^2 = 0.1$ 이며 $K=10$, $\alpha=1.2$, $R=0.75$ 이다. 제안하는 기법에서 N_{buffer} 는 T_{max} 보다 작은 수로 설정한다. 제안하는 프로토콜은 기존 프로토콜보다 낮은 신호대 잡음 비에서 더 낮은 패킷 지연 시간을 제공한다. 그 이유는 제안하는 프로토콜에서 기화적 전송에 의해 전송이 이루어지지 않는 경우가 많더라도 버퍼 초기화를 위한 전송 조건과 버퍼 크기와 최대 지연 허용시간의 설정에 의해 패킷 전송 확률이 증가하여 지연 시간이 감소하게 된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R111A3073740).

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, 김용재, 정방철, "DTN 환경에서 다중 버퍼기반 협력 시공간 선 부호화 기술," *한국통신학회 하계종합학술발표회*, Jun. 2022.