

클러스터 기반 다중 홉 무선 네트워크에서 ARQ 를 사용한 기회적 중계 기법

*남응국, **이재홍
 서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소
 *eknam@snu.ac.kr

Opportunistic Relaying with ARQ for Cluster-based Multihop Wireless Networks

*Eungkuk Nam **Jae Hong Lee
 Department of Electrical Engineering and INMC
 Seoul National University

요 약

본 논문에서는 클러스터 기반 다중 홉 무선 네트워크에서 중계기 협력 ARQ 를 이용한 기회적 중계 기법을 제안한다. 클러스터 간 통신 시 성능을 열악하게 만들 수 있는 채널 페이딩 효과를 줄이기 위하여 각 클러스터 간 통신에 중계기를 이용한 협력 통신을 적용한다. 또한 다중 홉 통신에서는 중간 홉에서 오류가 발생할 경우 전송 도중 정보를 잃게 되는 전송 실패의 가능성이 존재한다. 따라서 전송 실패의 가능성을 줄이기 위하여 중계기로부터 재전송을 받을 수 있는 중계기 협력 ARQ 기법을 적용한다. 본 논문에서는 제안한 기법에 대한 전송 실패 확률을 분석한다. 그리고 모의 실험에서는 제안한 기법이 ARQ 를 사용하지 않은 기법과 성능 비교하여 신뢰도 측면에서 더 좋은 성능을 보임을 확인한다.

1. 서 론

다중 홉 중계 기법은 무선 네트워크에서 제공해 줄 수 있는 서비스의 범위를 확장시키는데 매우 효과적인 방법이다 [1][2]. 직접 전송(direct transmission)을 할 경우 양질의 정보를 서비스 할 수 없는 경우와 달리 다중 중계기들의 연계를 통하여 양질의 데이터를 오류 없이 서비스할 수 있는 장점을 가지고 있다[2]. 따라서 중계기들을 이용한 서비스 제공자(source)와 서비스 수요자(destination) 간 다중 홉 통신은 점점 미래 무선 네트워크로 주목 받고 있다[2].

그러나 서비스 제공자와 서비스 수요자 사이에 홉의 개수가 너무 많이 증가 할 경우 오히려 정보에 대한 신뢰도와 전송 효율 모두 열악해 질 수 있다[3]. 그리고 전체 네트워크에서의 총 에너지 소비량도 불필요하게 증가되는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 클러스터를 이용하여 홉의 개수를 효율적으로 줄인 수 있고 이에 따라 전체적인 에너지 소비와 노드 간 간섭을 최소화 하면서 홉 간 통신을 위한 오버헤드도 효과적으로 줄인 수 있다. 또한 클러스터 헤드(cluster head)를 에너지 잔여 정도와 노드 접근성에 따라 클러스터 내에서 주기적으로 바꿔줌으로 전체 네트워크 유지 시간(network lifetime)을 증가시킬 수 있다[4]. 그리고 클러스터 내에 있는 노드끼리는 상대적으로 더 좋은 채널 환경을 가질 가능성이 크기 때문에 클러스터 헤드가 클러스터 내에 있는 중계기에게 재전송을 요청하여 재전송 받을 경우 오류가 없는 정보를 받을 수 있는 확률이 더 크다.

본 논문에서는 클러스터 기반 다중 홉 무선 네트워크에서 중계기 협력 ARQ(automatic repeat request)를 이용한 기회적 중계 기법을 제안한다. 다중 홉 통신 시 중간 홉에서 전송 도중 오류가 발생할 경우 정보를 잃게 되는 전송 실패(transmission failure)의 가능성이 있다. 이러한 전송 실패를 줄이기 위하여 같은 클러스터 내에 있는 중계기로부터 재전송을 받을 수 있는 중계기 협력 ARQ 기법을 적용한다. 또한 클러스터 간 통신 시 성능을 열악하게 만들 수 있는 채널 페이딩(channel fading) 효과를 줄이기 위하여 각 클러스터 간 통신 시 협력 통신을 적용한다. 본 논문에서는 제안한 기법에 대한 전송 실패 확률을 분석하고 제안한 기법을 ARQ 를 사용하지 않은 기법과 성능 비교를 함으로써 제안한 기법의 성능을 확인한다.

2. 시스템 모델

하나의 서비스 제공자와 하나의 서비스 수요자가 존재하고 서비스 제공자와 서비스 수요자 사이에 중계기들이 존재하는 클러스터 기반 다중 홉 무선 네트워크를 고려하자. 클러스터를 구성할 때는 모든 노드들이 접치는 부분 없이 각각의 클러스터에 포함되도록 노드들을 나눈다. 클러스터 헤드는 노드 접근성과 각 노드들의 에너지 잔여에 의해 선택된다고 가정한다. 여기서 클러스터 헤드는 클러스터 간 정보 전달 시 클러스터를 제어하는 역할을 가진다.

하나의 클러스터에는 두 개의 중계기 집합이 있다. 하나는 포워딩(forwarding)을 위한 중계기 집합이고, 다른 하나는 재전송을 위한 중계기 집합이다. 포워딩을 위한 중계기 집합에는 K_i 개의 중계기가 존재하고 재전송을 위한 중계기 집합에는 하나 이상의 중계기가 존재한다고 가정한다.

모든 노드들은 오직 하나의 안테나만 달려 있다고 가정한다. 그리고 노드들은 동시에 정보를 송수신 할 수 없다고 가정한다. 하나의 타임 슬롯에 하나의 홉만 활성화되도록 시분할 다중 접속(TDMA: time division multiple access)을 사용한다고 가정한다. 시분할 동시 송수신 방식(TDD: time division duplex)을 고려하면, 순방향 링크와 역방향 링크에서의 채널 상태가 역(reciprocal)의 관계에 있다고 가정한다. 그리고 중계기 기법은 복호 후 전송 기법(decode-and-forward)을 사용한다고 가정한다.

2.1 채널 모델

정확한 채널 추정을 위하여 채널들은 각각 독립적인 느린 플랫 페이딩으로 가정한다. k 번째 클러스터 간 통신에서 첫 번째 단계에서의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_1^k = f^k \sqrt{E_c^k} X_c + n_1^k, \tag{1}$$

$$y_{relay}^k = h_{i,j}^k \sqrt{E_c^k} X_c + n_{i,j}^k \tag{2}$$

f^k 와 $h_{i,j}^k$ 는 k 번째 클러스터 간 통신에서 i 번째와 $i+1$ 번째 클러스터 헤드 간, i 번째 클러스터 헤드와 i 번째 포워딩(forwarding)을 위한 중계기 집합의 선택된 중계기 j 간 채널 계수이다. X_c 는 클러스터 헤드로부터 송신된 프레임이고 E_c^k 는 송신된 신호의 평균 에너지를 의미한다. n_1^k 와 $n_{i,j}^k$ 는 각각 클러스터 헤드와 중계기에서의 가우시안 백색 잡음(Gaussian white noise)이다.

두 번째 단계에서 $i+1$ 번째 클러스터 헤드에서 수신된 신호는 다음과 같다.

$$y_2^k = g_{i,j}^k \sqrt{E_r^k} X_r + n_2^k \tag{3}$$

$g_{i,j}^k$ 는 선택된 중계기와 $i+1$ 번째 클러스터 헤드간 채널 계수이다. X_r 는 선택된 중계기로부터 송신된 프레임이고 E_r^k 는 송신된 신호의 평균 에너지를 의미한다. n_1^k 와 n_2^k 는 $i+1$ 번째 클러스터 헤드에서의 가우시안 백색 잡음이다.

3. ARQ 를 이용한 다중 홉 통신 알고리즘

각 클러스터 헤드는 포워딩을 위한 중계기 집합에서 클러스터 헤드와 중계기 간 채널이 가장 좋은 중계기를 선택한다. 첫 번째 단계에서 클러스터 헤드는 선택된 중계기와 다음 클러스터 헤드에게 정보가 들어있는 프레임을 보낸다. 그리고 두 번째 단계에서 선택된 중계기가 수신된 프레임을 다음 클러스터 헤드에 전송한다. 그러면 신호를 수신한 클러스터 헤드는 최대비 합성법(MRC: maximum ratio combining)을 이용하여 두 단계를 거쳐 수신한 신호를 결합한다.

이 때 만약 결합하여 수신된 신호에 오류가 발견되면 클러스터 헤드는 재전송을 위한 중계기 집합에 재전송 요청을 한다. 각 중계기들은 이전 클러스터 헤드로부터 받은 신호를 순환 리턴던시 검사(CRC: cyclic redundancy check)를 통해 오류가 없는 중계기들은 정보가 있는 프레임을 클러스터 헤드에 전송한다. 클러스터 헤드는 가장 먼저 도착한 신호를 받아 오류 검사를 한 후, 오류가 있으면 전 과정을 다시 수행하고, 오류가 없으면 다음 클러스터에 신호를 전송하여 최종적으로 서비스 수요자에 프레임을 전송한다.

4. 전송 실패 확률 분석

서비스 제공자는 현재 프레임이 서비스 수요자에 도달하고 난 후에야 새로운 프레임을 송신한다고 가정한다. T_{max}^k 를 최대 재전송 횟수로 놓자. 그러면 k 번째 클러스터 간 통신에서 성공적인 전송에 대한 경우는 다음과 같다[5].

E_0^k : k 번째 재전송을 위한 중계기 집합에서 재전송 없이 전송 다음 클러스터까지 프레임 전송 성공

E_J^k : k 번째 재전송을 위한 중계기 집합에서 J 번째 재전송 후 프레임 전송 성공. $1 \leq J \leq T_{max}^k$

E_0^k 가 발생된 확률은 다음과 같다.

$$\Pr(E_0^k) = 1 - p_{overall}^k \tag{4}$$

$p_{overall}^k$ 는 k 번째 클러스터 간 통신에서 포워딩 전송 시 발생하는 프레임 오류이다. $p_{overall}^k$ 는 다음과 같다.

$$p_{overall}^k = p_{rel}^k \times p_e^k + (1 - p_{rel}^k) \times p_{ne}^k \tag{5}$$

p_{rel}^k 은 선택된 중계기에서의 프레임 오류, p_e^k 는 선택된 중계기에서 프레임 오류가 났을 때 정보를 수신한 클러스터 헤드에서 발생할 수 있는 프레임 오류, p_{ne}^k 는 선택된 중계기에서 프레임 오류가 나지 않았을 때 정보를 수신한 클러스터 헤드에서 발생할 수 있는 프레임 오류를 의미한다.

q_j^k 를 클러스터 헤드와 재전송을 위한 중계기 집합과의 j 번째 재전송을 했을 시 발생할 수 있는 프레임 오류라고 놓자. 그러면 E_J^k 가 발생된 확률은 다음과 같다.

$$\Pr(E_J^k) = (1 - \Pr(E_0^k)) \left\{ (1 - q_1^k) + q_1^k (1 - q_2^k) + q_1^k q_2^k (1 - q_3^k) + \dots + q_1^k \dots q_{J-1}^k (1 - q_J^k) \right\} \tag{6}$$

p_s 와 p_d 를 각각 서비스 제공자와 첫 번째 클러스터 헤드, 마지막 클러스터 헤드와 서비스 수요자 사이에서 발생할 수 있는 프레임 오류로 놓자. 그러면 전송 도중 프레임을 잃을 총 확률은 다음과 같다.

$$P_F = 1 - (1 - p_0)(1 - p_L) \prod_{k=1}^I \left(\Pr(E_0^k) + \sum_{j=1}^{T_{max}^k} \Pr(E_j^k) \right) \tag{7}$$

I 는 클러스터 간 통신의 횟수이다.

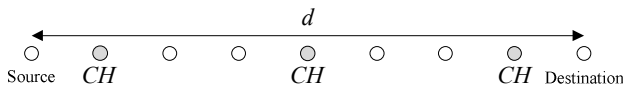


그림 1. 선형 네트워크 모델

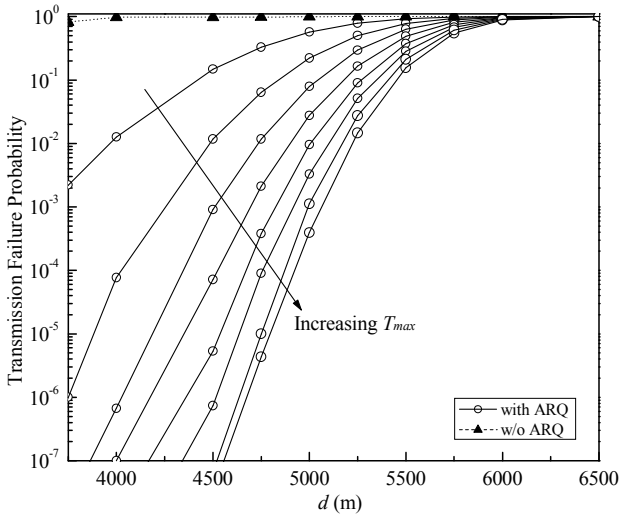


그림 2. 전송 실패 확률 비교. $T_{max} = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$

5. 모의 실험

그림 1 과 같이 간단한 선형 네트워크 모델을 가정하자. CH 는 클러스터 헤드를 의미한다. 그리고 CH 사이에 있는 두 개의 노드 중 왼쪽에 있는 노드는 협력 통신을 위한 중계기고, 다른 하나는 재전송을 위한 노드이다. 그림 1 과 같이 각 노드들은 각각 같은 거리에 위치하고 있다고 가정한다. 송신하는 모든 노드들의 송신 전력은 모두 같다고 가정한다. 노드 i 의 전송에 의한 노드 j 에서의 평균 신호 대 잡음비(SNR: signal-to-noise)은 $\bar{\gamma}_{i,j} = K_0 d_{i,j}^{-\alpha}$ 로 설정한다. K_0 는 송신 전력, 안테나 이득 등에 의한 효과를 나타내고, $d_{i,j}$ 는 노드 i 와 노드 j 사이의 거리를 의미하며, α 는 경로 손실 지수를 나타낸다. 모의 실험에서는 $K_0 = 10^9$, $\alpha = 3$ 으로 설정한다[6]. 프레임의 크기는 200 비트로 가정한다. 그리고 각 홉에서의 최대 재전송 횟수는 모두 동일하다고 가정한다. 즉, k 를 생략 하여 T_{max}^k 를 T_{max} 로 대체할 수 있다.

그림 2 는 제안한 기법에서 T_{max} 값을 1 에서 8 까지 변경하여 서비스 제공자와 서비스 수요자 간 전송 실패 확률을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 제안한 기법의 신뢰도는 T_{max} 값이 증가할수록 향상되는 것을 볼 수 있다. 또한 ARQ 를 사용하지 않은 기법보다 신뢰도 측면에서 더 좋은 성능을 가짐을 볼 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 클러스터 기반 다중 홉 무선 네트워크에서 중계기 협력 ARQ 를 이용한 기회적 중계 기법이 제안되었다. 클러스터 간 통신은 채널 상태를 고려한 중계기 선택 후 협력 통신을 통해 이루어진다. 정보를 수신한 클러스터 헤드는 오류 검사를 통해 오류가 발견되었을 때 재전송을 위한 중계기 집합에 재전송을 요청한 후 정보를 재전송 받는다. 그리고 본 논문에서는 제안된 기법에 대하여 서비스 제공자와 서비스 수요자 간 전송 실패 확률을 분석하였다. 이를 바탕으로 컴퓨터 모의 실험에서는 ARQ 를 사용하지 않은 기법과 전송 실패 확률 성능을 비교하였다. 모의 실험에서 제안된 기법은 최대 재전송 횟수 T_{max} 값이 증가함에 따라 신뢰도도 향상 되는 것을 볼 수 있었다. 또한 제안된 기법이 ARQ 를 사용하지 않은 기법에 비하여 신뢰도 측면에서 더 좋은 성능을 가짐을 볼 수 있었다.

7. 감사의 글

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0017437)

References

- [1] J. Boyer, D. D. Falconer, and H. Yanikomeroglu, "Multihop diversity in wireless relaying channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 10, pp. 1820-1830, Oct. 2004.
- [2] S. W. Peter and R. W. Heath, Jr., "The future of WiMAX: Multihop relaying with IEEE 802.16j," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 104-111, Jan. 2009.
- [3] M. Sikora, J. N. Laneman, M. Haenggi, D. J. Costello, Jr., and T. E. Fuja, "Bandwidth- and power-efficient routing in linear wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 25, no. 6, pp. 2624-2633, June 2006.
- [4] O. Younis and S. Fahmy, "HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 3, no. 4, pp. 366-379, Oct.-Dec. 2004.
- [5] E. Nam and J. H. Lee, "Randomized DSFC with relay-assisted ARQ for decentralized wireless relay networks," in *Proc. IEEE VTC 2010-Fall*, Ottawa, Canada, Sep. 2010.
- [6] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4/e, McGraw-Hill, 2001.