Journal of Korea Multimedia Society Vol. 20, No. 12, December 2017(pp. 1849-1855)
https://doi.org/10.9717/kmms.2017.20.12.1849

분산 재전송 시스템에서 제한된 정보를 이용한 전력제어 성능 분석

김 해 수†

Power Control with Limited Information in Distributed ARQ Retransmission Scheme

Haesoo Kim†

ABSTRACT

The main purpose of cooperative communications is improvement of communication quality and efficient use of transmission power. In this paper, a cooperative retransmission method is proposed, where neighbor nodes that receive messages correctly between transmit and receive nodes will participate in retransmission of the erroneous packet of the direct link. When the proposed retransmission method is used, the performance of the PER can be greatly improved. In case that the limited information is included in the NACK message, the transmit power of the retransmission packet can be reduced using the proper power control method.

Key words: Cooperative Communications, Distributed Retransmission, PER Performance, IR ARQ, Power Control

1. 서 론

협력통신(cooperative communications)은 소형 이동통신 단말에서 장착할 수 있는 안테나의 수나 전력의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 관심을 받고 있는 통신방식이다. 협력통신의 기본 개념은 다수의 단말에 장착된 안테나들을 이용하여 가상의 다중 안테나 통신방식을 구현하는 것이다[1-3]. 분산 빔포밍(distributed beamforming)은 협력통신에 참여하는 다수의 단말을 이용하여 시스템의 성능을 높이는 방법 중의 하나로, 다수의 협력노드(cooperating nodes)에서 송수신한 동일한 신호를 적절한 신호처리를 통해 빔포밍 이득을 얻는 방법이다.

기존의 단일 단말을 이용한 송신 빔포밍 방법에서는 송신단에서 하나의 발진기(oscillator)를 사용하고 안테나 사이의 간격이 크지 않기 때문에 각 안테나에서 전송되는 신호의 위상 동기만을 주로 고려하였다. 그러나 분산 빔포밍의 경우 서로 다른 위치에 있는 다수의 단말들이 각각의 발진기를 사용하여 동일한 신호를 전송하기 때문에 빔포밍 이득을 얻기 위해서는 위상 동기뿐만 아니라 주파수 및 시간 동기까지 고려해 주어야 한다.

주파수 및 위상 동기를 얻기 위한 방법으로 기준 신호나 피드백 신호를 이용하는 방법들이 연구되었다[4-6]. 그리고 송수신단의 신호전송 과정에서 수신 패킷에 에러가 발생한 경우 이를 재전송하는 과정에 분산 빔포밍을 이용하는 효율적인 협력통신 방식이 제안 되었는데, 이때 분산 빔포밍을 통해 전달되는 신호의 동기는 재전송을 요구하는 패킷을 통해 얻는 방식을 이용하고 있다[7]. 분산 빔포밍을 사용하는

※ Corresponding Author : Haesoo Kim, Address: (38428) Gamasil-gil 50, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk, Korea, TEL : +82-53-600-5546, FAX : +82-53-600-5559, E-mail : haesookim@kiu.ac.kr
Receipt date : Oct. 20, 2017, Approval date : Nov. 8, 2017
† Dept. of Electronics Engineering, Kyungil University

협력통신 방식에서의 채널 용량 및 평균 패킷 전송 지연에 대한 분석이 있었으나, 이는 완전한 동기가 이루어졌다는 가정 하에 이루어졌다[8]. 또한 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 시스템과 단일 반송파(single carrier) 시스템에서의 동기 에러에 의한 영향 분석 및 성능 비교가 진행되었다[9-10]. 그러나 분산 재전송 시스템에서 동기 에러가 있는 경우에 대한 PER 성능 및 협력 노드들의 전송 전력 소모를 줄일 수 있는 파워 컨트롤 방법에 대해서는 아직 연구가 부족한 상태이다.

본 논문에서는 송신 노드에서 전송한 패킷을 수신 노드에서 정상적으로 수신하지 못하여 재전송이 필요한 경우, 송수신 노드 사이의 메시지를 정상적으로 수신한 주변 노드들이 재전송에 참여하는 시스템을 고려한다. 송수신 노드는 IR(Incremental Redundancy) ARQ(Automatic ReQuest) 방법을 이용하여 패킷을 송수신 한다고 가정하며, 이때의 주변 노드들이 재전송에 cakdu할 때의 PER 성능 향상을 모의실험을 통해 확인하였다. 또한 원하는 PER 성능이 정해진 경우, 이를 만족하는 범위에서 적절한 파워 컨트롤을 수행할 수 있는 방법을 제안하고 모의실험을 통해 이를 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 분산 재전송 시스템의 모델에 대해서 기술하였다. 3장에서는 제안한 시스템 모델에서의 PER 성능을 보이고 있으며, 미리 설정한 PER 성능을 만족하는 파워 컨트롤 방법을 제안하고 모의실험 결과를 통해 이를 검증하였다. 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템은 다수의 주변 노드들이 송신 노드와 수신 노드 사이에 균일하게 분포하고, 각 주변 노드들은 송수신 노드와의 채널 정보를 사전에 가지고 있지 않다고 가정한다. 또한 고려하는 무선 네트워크의 구성에 참여하는 노드들은 동일 주파수를 통하여 시분할 방식(time-division duplexing)으로 패킷을 송수신하고, 송신 단말은 주어진 시간에 데이터 패킷을 수신 단말로 전송한다. 수신 노드는 데이터 패킷의 정상적인 수신 여부에 따라 이에 대한 응답을 송신 노드에 전송하고, 이와 같은 데이터의 송수신 과정은 중앙의 통제 없이 각 노드들이 독립적으로 판단하여 움직인다고 가정한다.

지연이 허용되는 데이터 전송의 경우, 수신된 패킷에 에러가 발생하면 일반적으로 미리 설정된 ARQ (Automatic ReQuest) 방식을 이용하여 패킷의 재전송이 이루어진다. 본 논문에서 고려하고 있는 송수신 링크 사이의 주변 노드들이 참여하는 분산 재전송 방법은 다음과 같다. 송신 노드는 주어진 시간 슬롯에 수신 노드에 패킷을 전송하고, 송수신 링크의 주변에 있는 노드들 중에서 송신 패킷을 수신하여 복조할 수 있는 노드들도 함께 복조를 진행한다. 송신 노드는 수신 노드로부터 ACK 메시지를 정상적으로 수신하면 다음 패킷을 전송하게 된다. 이때 송신 패킷을 복조했던 주변 노드들은 ACK 메시지를 정상적으로 수신하거나 주어진 시간동안 아무런 메시지를 듣지 못하는 경우에는 복조한 패킷을 폐기한다. 수신 노드에서 메시지를 정상적으로 수신하지 못하여 NACK 메시지를 보내는 경우, 송신 패킷을 정상적으로 복조했던 주변 노드들 중에서 NACK 메시지를 정상적으로 수신한 주변 노드들이 다음 시간 슬롯에 데이터 패킷을 수신 노드로 재전송한다. 주변 노드들에서 재전송 되는 패킷은 NACK 메시지를 정상적으로 수신한 노드들만 참여하기 때문에 수신 노드와의 신호 품질이 우수할 확률이 매우 높다.

송수신 링크에 위치한 주변 노드들은 송수신 노드가 서로 주고받는 메시지를 정상적으로 수신하는 가에 따라 독립적으로 재전송에 참여하게 된다. 따라서 주변 노드에서 재전송이 이루어지는 경우 다수의 주변 노드들이 참여하게 될 가능성이 있다. 이러한 경우 다수의 재전송 신호가 수신 노드에서 적절하게 합해지기 위해서는 위상과 주파수의 동기를 맞추어야 한다. 재전송에 참여하는 주변 노드들은 수신 노드와의 채널 정보(Channel State Information)를 NACK 메시지로부터 획득하고, 이를 이용하여 위상과 주파수 보정에 사용한다[7]. 본 논문에서 고려하고 있는 작은 영역의 무선 네트워크 시스템에서는 패킷 심볼의 길이가 분산 노드들과 수신 노드 사이의 전송 지연 차이보다 충분히 커서 시간 동기에 의한 영향은 무시가 가능하다고 가정한다.

Fig. 1은 애드 혹(Ad-Hoc) 네트워크에서 제안한 분산 재전송 방법의 예를 보이고 있다. 첫 단계는 송수신 노드 사이의 데이터 및 ACK/NACK 메시지의 교환을 보이고 있으며, 주변 노드들 중에서 R4와 R5

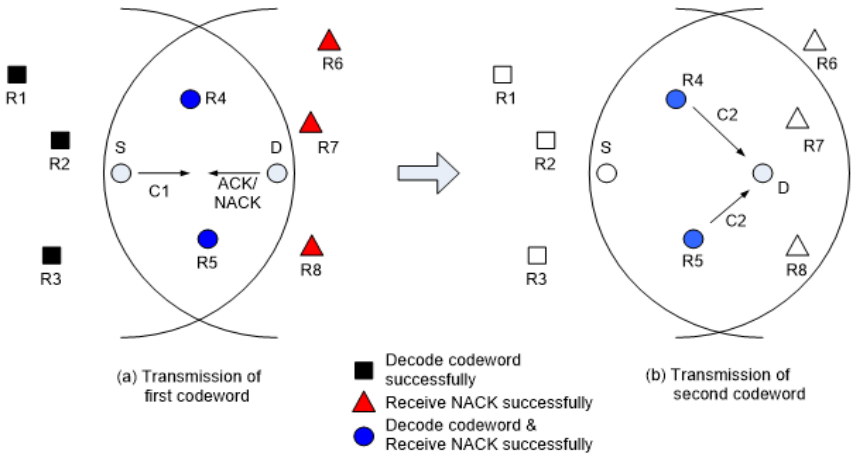

Fig. 1. Example of the cooperative retransmission scheme.

노드가 송신 노드에서 전송하는 데이터 패킷과 수신 노드의 응답인 ACK(또는 NACK) 메시지를 정상적으로 수신하고 있다. 수신 노드가 송신 노드의 데이터 패킷을 정상적으로 수신하지 못해 재전송을 위한 NACK 메시지를 보낸 경우, Fig. 1(b)에서 보이는 바와 같이 R4와 R5에서 NACK 메시지에서 추출한 채널 정보를 통해 위상과 주파수 동기를 보상한 두 번째 코드워드(C2)를 수신 노드에 전송하게 된다. 여기에서 재전송 되는 두 번째 코드워드는 사용하는 ARQ 방법에 따라 첫 번째 코드워드와 동일할 수도 있고 다른 코드워드가 될 수도 있다. 두 번째 단계에서 주변 노드들에 의해 데이터 패킷의 재전송이 이루어지는 동안 송신 노드는 랜덤 백오프(random back-off) 과정을 수행하게 되며, 이 기간 동안 수신 노드로부터 ACK 메시지를 수신하게 되면 재전송 과정을 중단하고 정상적인 수행 과정을 통해 다음 데이터 패킷을 전달한다. 만약 NACK 메시지를 랜덤 백오프 기간에 수신하게 되면 해당 NACK 메시지를 패기하고 일반적인 재전송 과정을 수행한다.

제안한 분산 재전송 방법은 다음과 같은 장점들이 있다. 첫째로 주변 노드들에 관련된 사전 정보나 협력 통신 노드들을 사전에 구성하기 위한 초기 과정이 필요 없기 때문에 이를 위한 부가적인 정보 교환을 위한 시간을 필요로 하지 않는다. 둘째로는 재전송에 참여하는 주변 노드들은 송수신 노드가 주고받는 메시지를 정상적으로 수신하기 때문에 재전송 신호의 품질이 우수할 확률이 높고, NACK 메시지를 이용하여 동기를 보상하는 방법을 사용하면 수신 노드에서 분산 빔포밍(distributed beamforming)과 유사한 이득을 얻을 수 있다. 마지막으로 NACK 메시지에 일부 정보를 포함하여 재전송을 요구하는 방법을 사용하면 해당 정보를 이용하여 재전송에 신호의 송신 전력을 줄일 수 있다.

3. 제안한 분산 재전송 시스템의 PER 성능 및 파워 컨트롤

제안된 협력 재전송 방식에서 위상 및 주파수 보정을 사용했을 때의 실패 확률(outage probability)에 대한 분석은 이루어졌다[7]. 해당 분석에서는 공정한 비교를 위해서 전체 전송 전력을 균일하다고 가정하였으나, 무선 애드혹 네트워크에서는 전력 소모 및 다른 통신 링크에 대한 간섭을 줄이기 위해 파워 컨트롤은 필수적이다. 그러나 제안한 분산 재전송 방법에서는 주변 노드들이 서로간의 정보 부족으로 인해 독립적으로 동작하기 때문에 각 노드들에서의 송신 전력 조절은 불가능하다. 본 장에서는 제안한 분산 재전송 방법을 사용하였을 때의 PER 성능에 대한 모의 실험 결과를 보이고, 원하는 PER 성능이 설정된 겨이우 재전송 메시지의 송신 전력을 제어하는 방법에 대해 알아본다.

3.1 제안한 시스템의 PER 성능

본 논문에서는 재전송 방식으로 IR(Incremental Redundancy) ARQ 방식을 사용하는 시스템을 고려한다. IR ARQ 재전송 방식은 재전송 되는 데이터

패킷의 길이가 전체 데이터를 재전송하는 방식에 비해 짧기 때문에 제안된 협력 재전송 방식이 유용하게 적용될 수 있다. IR ARQ 방식에서 제안된 재전송 방법을 사용했을 경우의 PER 성능을 살펴보기 위해, $K=4$이고 $R_c=1/3$ 인 길쌈부호(convolutional code)를 고려하였다. 다항식 생성기(polynomial generator)는 $g_1=15_{(8)}$, $g_2=17_{(8)}$, $g_3=13_{(8)}$이고, 첫 코드 블록(C1)은 전체 코드 블록을 천공해서 얻은 $R_c=1/2$의 길쌈부호이며, 천공된 나머지 코드 블록(C2)은 필요에 따라 수신 노드에 전송하게 된다. 전송 대역폭은 1 MHz이고 BPSK 변조를 사용하며, 전송 정보 데이터의 길이는 10 ms, 즉 1250 바이트로 가정한다.

Fig. 2는 송수신 노드 사이에 3개 및 5개의 주변 노드들이 위치하고 있으며 도플러 주파수가 20 Hz이고, 최대 주파수 오프셋(frequency offset)이 2 kHz에서 균일하게 분포하는 경우의 PER 성능을 보이고 있다. 송수신 노드 사이의 거리를 d_{sd}, 송신 노드에서 주변 노드 사이의 거리를 d_{sr}, 주변 노드에서 수신 노드 사이의 거리를 d_{rd}라 할 때, 주변 노드들의 위치는 $d_{sr}=0.2d_{sd}$, $d_{rd}=d_{sd}$라 가정하였다. 주변 노드들이 재전송에 참여하는 경우, NACK 메시지를 이용하여 위상 및 주파수의 동기 보상을 수행하였을 때의 성능 향상을 확인하기 위해 동기 보상을 하지 않는 경우와 동기 보상을 수행하였을 때의 성능을 함께 보이고 있다. 그림에서 보이는 것과 같이 NACK 메시지를 사용하여 동기 보상을 하는 경우 완전한 동기를 이룰

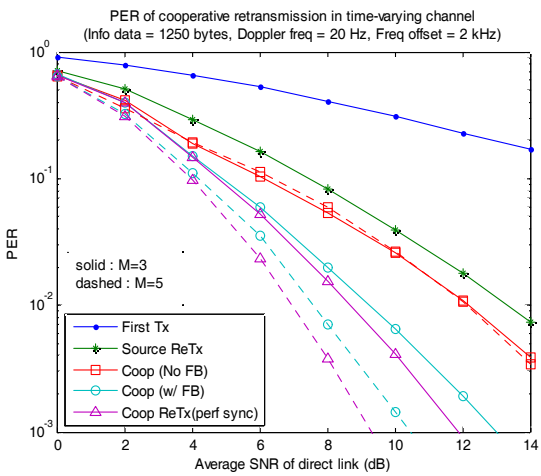

Fig. 2. PER performance of IR ARQ scheme with cooperative retransmission.

때와 비슷한 성능을 보이며, 송신 노드에서의 재전송 방법보다 월등한 성능을 보이고 있다. 동기 보상을 하지 않는 경우 송신 노드에서의 재전송보다는 우수한 성능을 보이고 있으나 동기 불일치에 의해 주변 노드들의 수가 증가하여도 이에 따른 이득을 보이지 못하고 있다.

3.2 제안한 제한된 정보를 활용한 파워 컨트롤

Fig. 2에서 보이는 PER 성능은 송신 노드에서 재전송이 이루어지는 방법과 주변 노드들이 재전송에 참여하는 방법을 공정하게 비교하기 위하여 재전송에 참여하는 주변 노드들의 총 송신 전력을 균일하게 유지하였다. 그러나 재전송에 참여하는 주변 노드들은 다른 노드들의 정보를 가지고 있지 않기 때문에 총 전송 전력을 균일하게 유지하는 것은 불가능하다. 따라서 실제적인 운용에서는 재전송에 참여하는 주변 노드들은 각자 최대 전송 전력으로 재전송에 참여하는 방법이 사용될 수 있다. 그러나 이 경우 노드의 전력 손실 및 주변의 다른 전송 채널에 간섭이 증가하게 된다. 또 다른 방법으로는 NACK 메시지를 수신할 때의 수신 전력을 이용하여 각 주변 노드들이 전송 전력을 조절하는 방법을 사용할 수 있으나, 이 경우 수신 노드에서 수신한 첫 번째 코드 블록의 수신 전력을 알고 있지 못하기 때문에 두 번째 코드 블록을 이용하여 적절한 에러 복구가 불가능할 경우가 발생할 수 있다. 본 장에서는 이러한 문제점을 보완하기 위한 파워 컨트롤 방법에 대해 알아보도록 한다.

앞에서 보인 PER 성능 분석에 사용한 $R_c=1/3$의 길쌈부호로 IR ARQ를 적용하는 시스템에 대해 고려한다. 수신 노드는 첫 번째 코드 블록에서 에러가 발생한 경우 미리 정해진 PER 성능을 이용하여 다음 코드 블록에서 필요로 하는 전력을 계산한다. 길쌈부호를 사용하는 경우, B 정보 비트를 가지는 PER의 상계(union bound)는 다음과 같이 주어진다[11].

$$PER_{pkt}=\sum_{j=1}^{B}P_e(j)<B\cdot T(W) \tag{1}$$

식 (1)에서 $P_e(j)$는 j 번째 심벌의 에러 확률이고, $T(W)$는 해당 길쌈부호의 특성 함수(transfer function)으로 $W=e^{-E_s/N_o}$으로 주어진다. 여기에서 E_s는 심벌 에너지이고 N_o는 잡음 분산이다. 주어진 길쌈

부호인 $K = 4$, $g_1 = 15_{(8)}$, $g_2 = 17_{(8)}$, $g_3 = 13_{(8)}$의 전달 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$T(W)|_{R=1/3} = \frac{W^{10}(3-4W^2+5W^4-4W^6+W^8)}{1-2W^2-2W^4+2W^6-4W^8+4W^{10}-W^{12}} \approx 3W^{10}+2W^{12}+15W^{14}+24W^{16}+87W^{18}+188W^{20}+577W22 \quad (2)$$

식 (2)에서 주어진 PER 상계는 전체 코드 블록의 심볼 에너지에 대한 것이다. 그러나 IR ARQ 방법에서는 첫 번째 코드 블록과 다음 코드 블록의 수신 심볼 에너지가 서로 상이하기 때문에 두 코드 블록의 평균 심볼 에너지 E_s를 사용한다.

$$E_s = \frac{E_{s,1}T_{s,1} + E_{s,2}T_{s,2}}{T_{s,1} + T_{s,2}} \quad (3)$$

여기에서 $E_{s,i}$와 $T_{s,i}$는 각각 i 번째 코드 블록의 수신 심볼 에너지와 수신 시간을 나타낸다. 첫 번째 코드 블록에 대한 $E_{s,1}$은 이미 수신 노드에서 알고 있기 때문에 원하는 PER 성능을 만족할 수 있는 다음 코드 블록의 심볼 에너지 $E_{s,2}$를 식 (1)과 (2)를 사용하여 구할 수 있고, 이 정보는 NACK 메시지에 포함되어 전송된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 제안된 IR ARQ 방법을 이용한 시스템에서의 PER 성능과 재전송 패킷에 사용되는 평균 전송 전력을 보이고 있다. 시뮬레이션에서는 PER 성능을 10^{-2}로 설정하였고, 전송하고자 하는 정보는 250 bytes를 가지며 이는 BPSK 변조를 사용하면 전송 시간은 2 ms에 해당한다. Fig. 3에서 보이는 것과 같이 파워 콘트롤을 사용한 경우의 PER 성능은 설정한 PER 내에서 총 송신 전력을 사용하는 경우와 유사한 성능을 나타내고 있다. 주변 노드들이 참여하는 제안된 재전송 방법을 사용하는 경우 높은 SNR 구간에서 원하는 PER 성능을 유지하면서 재전송 패킷에 사용되는 평균 전송 전력이 크게 줄어드는 것을 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

패킷의 길이가 긴 경우의 PER 성능과 재전송 패킷에 대한 송신 전력의 시뮬레이션 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 보이고 있다. 정보 비트는 1250 bytes로 BPSK로 변조한 경우 10 ms의 전송 시간을 가진다. 그림에서 보는 바와 같이 전송 패킷의 길이가 긴 경

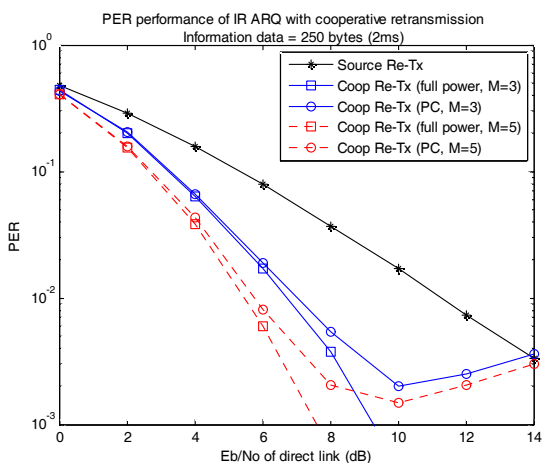

Fig. 3. PER performance with the cooperative IR ARQ scheme (target PER=10^{-2}, packet length = 2 ms)

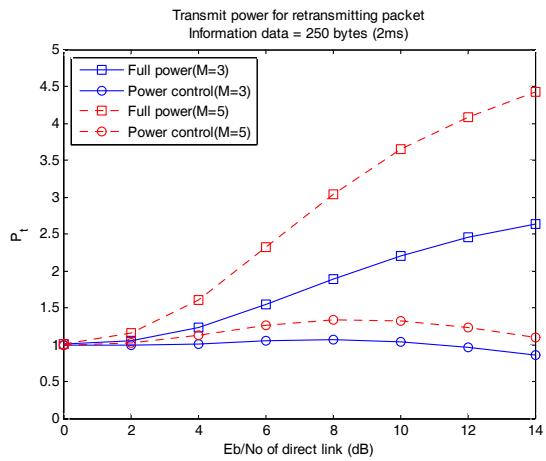

Fig. 4. Average transmit power for retransmission with the cooperative IR ARQ scheme (target PER= 10^{-2}, packet length = 2 ms).

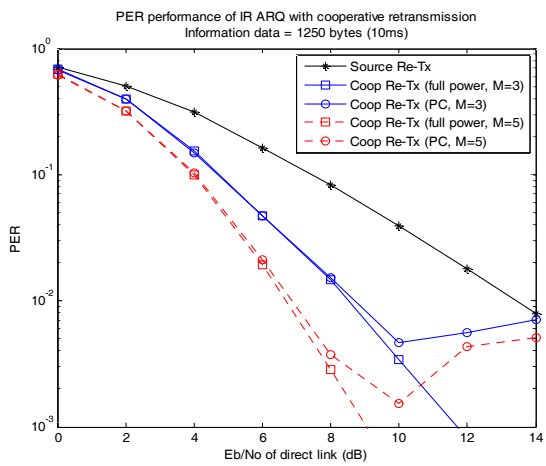

Fig. 5. PER performance with the cooperative IR ARQ scheme (target PER=10^{-2}, packet length = 10 ms).

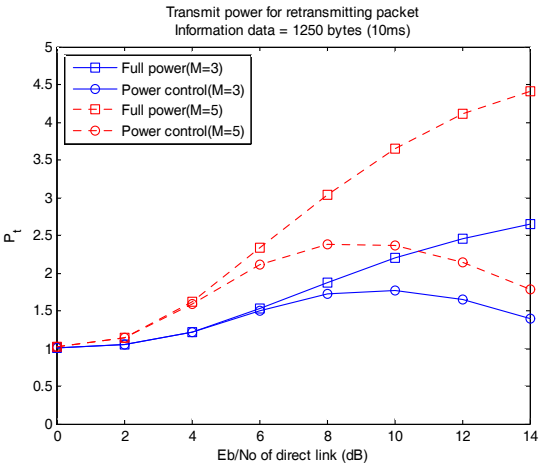

Fig. 6. Average transmit power for retransmission with the cooperative IR ARQ scheme (target PER= 10^{-2}, packet length = 10 ms).

우에도 제안된 재전송 방법을 사용해 원하는 PER 성능을 만족시키고 있으며 재전송 패킷에 대한 평균 전송 전력에서도 큰 이득을 얻는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 분산 재전송 시스템에서의 PER 성능 및 재전송 메시지의 전송 전력을 줄일 수 있는 파워 콘트롤 방법에 대해 알아보았다. 제안한 재전송 방법을 사용하여 송수신 링크의 주변에 위치한 노드들을 사용하여 패킷의 재전송을 수행하는 경우, 송신 노드의 재전송에 비해 우수한 성능을 보이고 있다. 다수의 주변 노드들이 재전송에 참여할 때 NACK 메시지를 이용하여 위상 및 주파수의 동기를 보상하는 경우에는 PER 성능은 월등히 향상되는 것을 확인하였다. 또한 NACK 메시지에 재전송 메시지에 필요한 수신 전력을 포함하여 전달하는 경우, 원하는 PER 성능을 유지하면서 재전송에 필요한 송신 전력을 상당히 줄일 수 있었다.

REFERENCE

[1] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G.W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 5, No. 12, pp. 3062-3080, 2004.

[2] T.E. Hunter and A. Nosratinia, "Diversity through Coded Cooperation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 5, No. 2, pp. 283-289, 2006.

[3] R. Mudumbai, G. Barriac, and U. Madhow, "On The Feasibility of Distributed Beamforming in Wireless Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 5, pp. 1754-1763, 2007.

[4] D.R. Brown III, G. Prince, and J. McNeil, "A Method for Carrier Frequency and Phase Synchronization to a Distant Stationary Antenna through AWGN Channel," *Proceeding of IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, pp. 278-282, 2005.

[5] D.R. Brown III and H.V. Poor, "Time-slotted Round-Trip Carrier Synchronization for Distributed Beamforming," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 56, No. 11, pp. 5630-5643, 2008.

[6] R. Mudumbai, J. Hespanha, U. Madhow, and G. Barriac, "Scalable Feedback Control for Distributed Beamforming in Sensor Networks," *Proceeding of IEEE International Symposium on Information Theory*, pp. 137-141, 2005.

[7] H. Kim and R.M. Buehrer, "A Technique to Exploit Cooperation for Packet Retransmission in Wireless Ad Hoc Networks," *Journal of Communications and Networks*, Vol. 10, No. 2, pp. 148-155, 2008.

[8] H. Kim, "Throughput and Delay Performance with a Cooperative Retransmission Scheme Using Distributed Beamforming," *Journal of Communications and Networks*, Vol. 13, No. 4, pp. 306-312, 2011.

[9] H. Kim and K. Lee, "Effect of Synchronization Errors with Distributed Beamforming in OFDM Systems," *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 51, No. 1, pp. 3-10, 2014.

[10] H. Kim and S.G. Kwon, "System Performance with Synchronization Errors in Distributed Beamforming Systems," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 452-459, 2015.

[11] A.J. Viterbi, *CDMA Principles of Spread Spectrum Communication*, Addison-Wesley, MA, USA, 1995.

김 해 수

1993년 고려대학교 전자공학과 학사
1995년 고려대학교 전자공학과 석사
2008년 Virginia Tech. ECE 박사
1995년~2000년 삼성전자 정보통신연구소 선임연구원
2009년~2010년 LG전자 MC연구소 책임연구원
2010년~현재 경일대학교 전자공학과 부교수
관심분야 : 무선통신, 협력통신, 인지통신, 센서네트워크