

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.3.7>

IIBC 2014-3-2

기회주의적인 중계기 사용에 대한 협력 다이버시티의 성능 분석

Performance Analysis of Cooperative Diversity on the Usage of Opportunistic Relay

김태욱*, 공형윤**

Tae-Wook Kim*, Hyung-Yun Kong**

요약 협력통신을 실제 무선 통신 시스템에 적용하기 위해서는 정보 전달을 담당하는 중계기를 설치해야한다. 그러나 중계기 설치의 비용 및 전력 낭비의 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 일반적인 중계기의 사용을 재고하여, 효율적인 중계기 사용을 위해 중계기를 사용자 모바일 단말기로 정의하였다. 제안하는 프로토콜에 따라 중계기(사용자 단말기)의 상태에 대해 유힬, 무휴상태로 나누었으며, 수신단에 대해 기지국 모델, 사용자 단말기 모델을 적용하였다. 이 경우, 추가적인 비용 없이 실제 네트워크에 협력 통신을 적용할 수 있으며, 네트워크 용량 및 스펙트럼 효율을 높일 수 있다. 마지막으로, 제안한 프로토콜을 레일리 페이딩 환경에서 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 전체적인 시스템 모델의 비트오류율(BER)을 분석한다.

Abstract The data forwarding transmission is an important function of the relay in cooperative communication in wireless communication systems. However, additional relay cause the waste of power consumption and cost. Therefore, in this paper, we consider how to use the user mobile devices in stead of relays to deal with this problem. In this paper, we proposed the protocol that divide each relay into two states of idle and non-idle. The receiver has two functions of base station and user mobile device. In this case, it is possible that no additional cost, and improve the spectral efficiency and network capacity. We verified BER performance for the proposed protocol over Rayleigh fading through Monte-Carlo simulation.

Key Words : Cooperative Communication, Relay Using Scheme, Decode and Forward, Maximum Ratio Combining

1. 서 론

무선 통신 시스템에서 사용자의 증가는 곧 트래픽의 증가를 의미한다. 미래창조부 통계를 참고하면, 2012년 2월 대비 2014년 2월에는 약 2배의 트래픽이 증가되었다^[1]. 현재 모바일 시장은 사용자의 급격한 증가와 더불어

LTE(Long Term Evolution), LTE-A(Long Term Evolution-Advanced)의 보급으로 인해 엄청난 트래픽을 처리함과 동시에 사용자가 원하는 수준의 QoS(Quality of Service)를 만족시켜하는 문제에 직면해있다. 트래픽 증가에 따라 소비자가 요구하는 QoS를 달성하기 위해 중소형 기지국의 추가적인 설치의 근본적인 해결책이 아

*준회원, 울산대학교 전기공학부

**정회원, 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(교신저자)
접수일자 2014년 5월 7일, 수정완료 2014년 6월 7일
게재확정일자 2014년 6월 13일

Received: 7 May, 2014 / Revised: 7 June, 2014

Accepted: 13 June, 2014

*Corresponding Author: hkong@mail.ulsan.ac.kr

School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea

널빤더리 전력 낭비 및 간섭을 야기할 수 있다. 이러한 이유로 기지국의 추가적인 설치 없이 네트워크 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 협력통신(Cooperative Communication)이 개발되었다^[2]. 일반적인 협력통신 모델에서 중계기는 수신 받은 메시지를 전달하는 역할을 담당한다. 이때, 중계기에서 증폭 후 전달, 복호 후 전달 등의 기법을 적용하여 오수신율을 줄이고, 수신단의 협력 다이버시티 이득을 높이기 위해 사용되었다^[3]. 또한, 중계기 배치를 통해 협력 다이버시티 이득을 높이는 방안이 연구되었다^[4].

최근, 협력통신의 경우 COMP(Coordinated Multi Point)라는 기술이 개발되고 LTE-A 시스템에 적용되었으나^[5], 이 기법의 경우 협력통신의 기본인 중계기를 사용하는 방식이 아닐뿐더러, 국소적인 적용이라 볼 수 있다. 또한, 협력통신을 실제 무선 통신 시스템에 적용하기 위해선 정보 전달을 담당하는 일반적인 중계기의 설치를 시행해야하지만, 이 경우 중소형 기지국의 추가와 같은 비용이 발생하며 전력 낭비의 요인이 되므로, 일반적인 중계기 사용 방법에 대한 재고의 필요성이 존재한다.

따라서, 본 논문에서는 추가적인 비용과 전력 낭비 없이 중계기의 활용성을 높일 수 있는 방안을 제안한다. 중계기는 메시지를 전달하는 역할뿐만 아니라, 메시지를 생성하여 수신단으로 전송할 수 있는 일반적인 사용자 모바일 단말기로 가정하였다. 본 논문의 시나리오에서는 2개의 중계기를 사용하였으며, 중계기는 자신의 메시지를 가지고 있는 상태인 무휴상태(Non-Idle State), 자신의 메시지를 가지고 있지 않은 유휴상태(Idle State)로 정의한다. 또한, 수신단에 대해 기지국 수신단 모델, 사용자 단말기 수신단 모델을 적용하여 비트에러율(BER)을 측정 한 뒤, 전체적인 시스템 모델의 성능을 분석한다.

II장에서는 본 논문에서 제안하는 시스템 모델에 대해 소개하며, III장에서는 각 상태에 따른 모의 실험 결과를 통해 시스템의 성능을 평가한다. 최종적으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단(Source : S)와 2개의 수신단(Destination : D) 사이에 존재하는 중계기(Relay : R)에 대해 그림 1과 같이 2개의 중계기와 2개의 수신단 형태로

배치되었을 때, 비트에러율을 통해 시스템 성능을 분석한다. 본 논문의 시나리오는 그림 1과 같다. 그림 1의 시스템 모델에서 S는 송신단, D₁은 1차 수신단, D₂는 2차 수신단(중계기 R₁의 수신단), 중계기 R₁, R₂가 배치되었다. 중계기 R₁은 수신단 D₁과 D₂의 중복 커버리지에 존재하며, 중계기 R₂는 수신단 D₁의 커버리지에 존재한다. 또한, 수신단 D₁과 D₂의 연결은 유선과 무선 2가지 모델로 고려한다. 이때, h_i ($i = 0, 1, 2$)는 송신단과 중계기, D₁까지의 채널 계수(Channel Coefficient)이며, h_i ($i = 4, 5$)는 중계기에서 수신단 D₁, 수신단 D₂까지의 채널 계수이고, h_i ($i = 6$)는 D₁과 D₂ 사이의 유선, 무선 채널 계수이다.

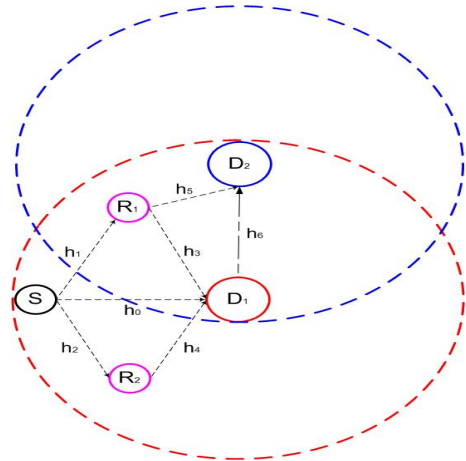


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

전송단 S의 메시지를 x_1 , 중계기 R₁의 메시지를 x_2 라고 가정하며 중계기에서 복호된 x_1 은 \hat{x}_1 으로 표현한다.

시스템에 사용된 중계기가 2개인 본 논문에서는 전송을 위한 준비단계를 가진다. 준비단계에서 송신단은 중계기로 채널 상태 정보(CSI : Channel State Information) 및 중계기의 상태를 요구하는 메시지를 보낸다. 중계기는 송신단으로 채널 상태 정보(CSI) 및 중계기의 상태를 전송하게 된다. 준비단계가 완료되면 송신단 S에서 전송을 시작한다.

첫 번째 시간 슬롯에서 송신단은 중계기와 수신단으로 자신이 보내려고 하는 정보를 보낸다. 두 번째 시간 슬롯에서 중계기는 수신받은 메시지를 수신단으로 전송하며, 중계기 자신의 메시지가 존재할 경우 XOR 연산을 거친 뒤 전송한다. 세 번째 시간 슬롯에서 수신단 D₁, D₂

는 전송 받은 메시지를 복호한다. 이 과정에서, 2개의 중계기가 모두 유휴상태일 때, 2개의 중계기 중 하나만 유휴상태일 때, 2개의 중계기가 모두 무휴상태인 경우로 나누어 각각의 경우를 Case 1, Case 2, Case 3로 정의하였다. 각 경우에서 중계기는 복호 후 전달 기법을 사용하며, 수신단에서는 최대비 결합 기법을 이용하여 결합하고 최종 신호를 복호한다.

각각의 경우는 다음과 같다.

1. Case 1

두 개의 중계기가 유휴상태이므로 일반적인 중계기 사용과 같은 방식으로 전송을 진행한다. 첫 번째 시간 슬롯에서 수신단 D_1 및 중계기 R_1, R_2 로 메시지를 전달하게 되고, R_1 과 R_2 에서는 메시지의 복호를 시도한다. 두 번째 시간 슬롯에서 복호 후 전송 기법을 이용해 수신단 D_1 으로 메시지를 전송한다. Phase 3에서는 수신된 메시지를 최대비 결합 기법을 적용하여 최종 신호를 복호한다.

중계기 $R_{1,2}$ 에서 수신한 메시지는 다음과 같다.

$$y_{R_i} = \sqrt{P_S} h_i x_1 + n_i \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

식 (1)의 P_S 는 전송되는 메시지의 전력을 의미한다. h_i 는 채널 계수이며, x_1 는 송신단에서 전송한 메시지이고, n_i 는 평균이 0, 분산이 N_0 인 AWGN(Additive White Gaussian Noise)를 의미한다.

또한, 임계값 γ_{th} 이상의 수신 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio) γ_{SR} (송신단과 중계기 사이의 신호대 잡음비), γ_{RD} (중계기와 수신단 사이의 신호대 잡음비) 결과를 비교하여 복호의 성공 유무를 판단하며 Case 2, 3에서 동일하게 적용된다.

$$\begin{aligned} \text{성공: } & \Pr[\gamma_{SR} \geq \gamma_{th}] \\ \text{실패: } & \Pr[\gamma_{SR} < \gamma_{th}] \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 γ_{th} 은 임계 신호대 잡음비, γ_{x_1} 은 R에 수신된 메시지의 신호대 잡음비이며 $\frac{|h_i|^2 P_S}{N_0}$ 이다.

2. Case 2

한 개의 중계기만 유휴상태이므로 다음과 같은 방식으로 전송을 진행한다. 이때, 중계기 R_1 은 무휴상태, 중계기 R_2 는 유휴상태이므로, 중계기 R_1 에서의 메시지는 XOR 연산을 통해 결합된 메시지를 x_3 이라고 가정하며, x_3 는 $x_1 \oplus x_2$ 이며, 중계기 R_2 의 메시지는 x_1 을 복호한 \hat{x}_1 이다. 또한, 식 (2)를 이용하여 복호의 성공유무를 판단한다. 수신단 D_1 과 D_2 로 전송되는 메시지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_1: y_{D_1} &= \sqrt{P_S} h_i x_1 + n_i \quad (i = 0, 4) \\ &: y_{D_1} = \sqrt{(1-\alpha)P_S} h_i x_3 + n_i \quad (i = 3) \\ D_2: y_{D_2} &= \sqrt{\alpha P_S} h_i x_3 + n_i \quad (i = 5) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 i 가 0인 경우는 송신단 S와 수신단 D_1 사이의 직접 전송이며, i 가 4인 경우는 유휴상태의 중계기를 사용하여 전송된 경우이다. i 가 3인 경우는 무휴상태의 중계기를 통해 전송됨을 의미한다. 이때의 α 는 전송 전력을 정하는 기준이 되며, 송신단 S와 중계기 R_1 의 메시지가 동등한 관계를 가진다고 가정하여 0.5로 지정하였다. 전송 결과, D_1 에서는 유휴상태의 중계기에서 전송된 송신단 S의 메시지와 XOR로 결합된 메시지, 직접 전송 받은 메시지가 존재한다. 최대비 결합 기법을 사용하여 직접 전송된 메시지와 유휴상태의 중계기에서 전송된 송신단 S의 메시지를 결합하여 결과값을 얻게 되며, 이 값을 유선 전송 방식과 무선 전송 방식으로 수신단 D_2 에 전송하여 중계기 R_1 의 메시지를 얻게 된다.

3. Case 3

두 개의 중계기가 모두 무휴상태이므로 다음과 같은 방식으로 전송을 진행한다. 송신단 S에 수신된 CSI를 비교하여 가장 우수한 채널 값을 가지는 중계기를 가장 좋은 성능의 중계기로 지정한다. 이 경우 다음과 같은 수식을 사용하여 최우수 중계기를 선택한다.

$$\max \left(\min \left(\frac{|h_1|^2 P_S}{N_0}, \frac{|h_3|^2 P_S}{N_0} \right), \min \left(\frac{|h_2|^2 P_S}{N_0}, \frac{|h_4|^2 P_S}{N_0} \right) \right) \quad (4)$$

최우수 중계기는 자신의 메시지 x_2 와 송신단 S의 메시지 x_1 을 수신단 D_1 으로 전송해야 하기 때문에 XOR 연

산을 통해 전송할 메시지 x_3 를 합성한다. 수신단 D_1 에서는 직접 전송을 통해 수신 받은 송신단 S의 메시지 x_1 을 사용하여 최우수 중계기의 메시지 x_2 를 복호하고 유선 또는 무선 전송을 통해 수신단 D_2 로 전송한다.

본 논문의 시스템 모델 중 Case 2, 3에서는 유선 전송 혹은 무선 전송을 통해 중계기 R_1 의 메시지를 수신단 D_2 에 전달한다. 이때, 수신단의 전송은 수신단이 기지국인 경우, 유선 전송이 가능하며, 사용자 모바일 단말기인 경우, 무선 전송이 가능하다. 유선 전송은 광케이블로 구성되어 있기 때문에 이론적인 잡음은 존재하지 않으며, 사용자 모바일 단말기일 경우, 잡음 모델은 레일리 페이딩으로 정의된다.

제안된 시스템 모델의 세 가지 경우에는 2개의 중계기를 사용하였다. 이때, Case 1과 Case 3이 존재할 경우의 수는 각각 1 가지이다. 따라서, 참여 중계기를 늘일 경우 Case 1, 3이 나타날 확률은 매우 적으므로, 본 논문에서 제안된 프로토콜을 사용하면 Case 2가 지배적이다. 이러한 시나리오는 유희 상태와 무휴 상태가 혼재되어있는 실제적인 무선 통신 환경과 유사하다.

III. 모의 실험

본 장에서는 시스템 모델에서 제시한 세 가지 경우에 대한 모의 실험을 진행하였다. 모의 실험에서 이용되는 파라미터는 아래 표 1에 간략히 나타내었다.

표 1. 모의 실험 파라미터

Table 1. Simulation parameters

Fading	Rayleigh fading
Path loss exponent	3
Modulation	BPSK
γ_{th}	5dB
SNR	0 ~ 20 dB
Relay's protocol	Decode and Forward
Combining scheme	Maximum Ratio

모의 실험 파라미터에서 페이딩 환경은 일반적인 레일리 페이딩을 고려하였으며, 경로 손실 지수는 실외 환경을 고려해 3으로 지정하였다^[6]. BPSK 모듈레이션을 적용하였고, 수신 임계값인 γ_{th} 는 ^[7]를 참고하여 5dB로 지정하였다. 또한, 수신단 D_1 과 D_2 , S- D_1 의 거리를 정규

화하여 1로 설정하였으며, 중계기 R_1 , R_2 는 S와 0.6에 위치한다.

그림 2는 Case 1에 대해 송신단 S와 수신단 D의 직접 통신과 중계기를 사용한 방식에 대해 비트오류율(BER)로 수치화하여 성능을 비교하였다. 그림 2에서 그래프 'Case 1'은 중계기 R_1 , R_2 직접 전송을 통해 얻은 x_1 을 최대비 결합(MRC) 기법을 사용하여 복호한 결과이다. 그래프 'Direct Transmission'에서 신호대 잡음비(SNR)가 6dB일 때 10^{-1} 수준의 비트오류확률을 가지고 있지만, 그래프 'Case 1'은 10^{-4} 수준의 비트오류확률을 가지고 있다.

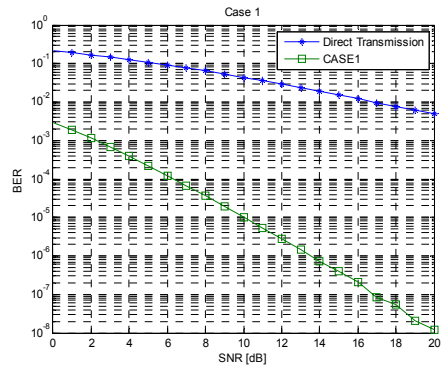


그림 2. Case 1에 대한 BER
Fig. 2. BER about Case 1

또한, 그래프 'Case 1'은 전체적으로 그래프 'Direct Transmission'보다 우수함을 알 수 있다. 중계기를 사용하여 수신단에서 MRC 기법을 적용하면 협력 다이버시티를 높일 수 있으며, 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다^[8].

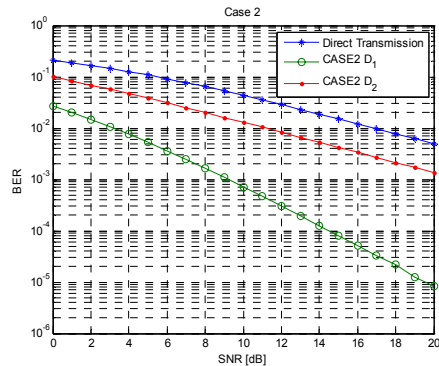


그림 3. Case 2에 대한 BER(D_1 에서 D_2 의 전송은 유선 모델 적용)
Fig. 3. BER about Case 2(Between D_1 to D_2 applied wire model)

그림 3은 Case 2에 대해 직접 통신, 수신단 D₁에서 복호된 메시지 x_1 , 수신단 D₂에서 복호된 메시지 x_2 에 대해 비트오류율(BER)로 수치화하여 성능을 비교하였다. 여기서 수신단 D₁에서 수신단 D₂의 전송은 수신단을 기지국으로 가정한 뒤, 광케이블을 이용한 유선 전송 모델을 적용하였다. 그림 3에서 그래프 'Case 2 D₁'은 D₁에 수신된 x_1 을 최대비 결합(MRC) 기법을 통해 복호된 결과를 의미하며, 그래프 'Case 2 D₂'는 D₂에 수신된 R₁의 메시지 x_1 과 D₁에서 D₂로 전송된 x_1 을 XOR 연산을 통해 얻은 x_2 에 대한 결과를 의미한다. 그래프 'Direct Transmission'에 비해 그래프 'Case 2 D₁, D₂'는 비트오류 확률(BER)에서 전체적으로 우수하다. 그림 3에서 그래프 'Case 2 D₁'을 그림 2의 그래프 'Case 1'과 비교하면, 10dB에서 18배의 오류 확률이 증가한다. 이것은 중계기 1개를 사용함으로써 협력 다이버시티 이득이 감소되었기 때문이다. 그러나 시스템 전체로 보았을 때, 전반적인 성능이 우수한 것을 알 수 있다. 또한, 그림 3의 그래프 'Case 2 D₂'의 경우 그래프 'Direct Transmission'에 비해 전체적으로 우수한 것을 확인할 수 있다. 이것은 그래프 'Case 2 D₂'의 전송 모델이 기지국으로 가정한 유선 전송 모델이기 때문이다. 유선 전송의 경우, 이론적인 잡음이 존재하지 않기 때문에 그래프 'Direct Transmission' 보다 비트오류율(BER) 성능이 우수하다.

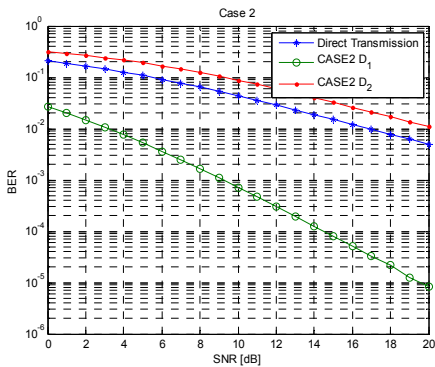


그림 4. Case 2에 대한 BER(D₁에서 D₂의 전송은 무선 모델 적용)
 Fig. 4. BER about Case 2(Between D₁ to D₂ applied wireless model)

그림 4는 Case 2에 대하여 직접 통신, 수신단 D₁에서 복호된 메시지 x_1 , 수신단 D₂에서 복호된 메시지 x_2 를

비트오류율(BER)로 수치화하여 성능을 비교하였다. 그러나 여기에서는 수신단 D₁에서 수신단 D₂의 전송을 사용자 모바일 단말기로 가정하여 무선 전송 모델을 적용하였다. 그림 4에서 그래프 'Case 2 D₁'은 D₁에 수신된 x_1 을 MRC 기법을 통해 복호된 결과를 의미하며, 그래프 'Case 2 D₂'는 D₂에 수신된 R₁의 메시지 x_1 과 D₁에서 D₂로 전송된 x_1 을 XOR 연산을 통해 얻은 x_2 에 대한 결과를 의미한다. 그림 3과 비교하여 그래프 'Case 2 D₁'은 차이가 없음을 확인할 수 있지만, 그래프 'Case 2 D₂'는 10dB에서 8배의 오류 확률이 증가 하며 전체적으로 5~8배의 오류 확률이 증가하였다. 이러한 이유는 그림 3의 그래프 'Case 2 D₂'는 유선 전송 모델을 적용하였고, 그림 4의 그래프 'Case 2 D₂'는 무선 전송 모델을 적용하였기 때문이다. 이와 같은 경우, 사용자의 요구 서비스 품질이 감소된다. 그러나, 장치 대 장치(D2D : Device to Device) 통신 관점에서 살펴보면, 통신망 과부하를 해결할 수 있는 장점을 가지고 있다.

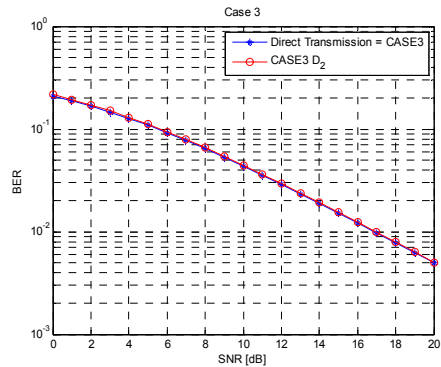


그림 5. Case 3에 대한 BER
 Fig. 5. BER about Case 3

그림 5는 Case 3에 대해 직접 통신과 D₂에서 복호된 x_2 에 대해 비트오류율(BER)로 수치화하여 성능을 비교하였다. 시스템 모델에서 Case 3는 가장 좋은 성능의 중계기를 사용한다고 정의하였다. 그러나, Case 3에서 가장 우수한 중계기는 자신의 메시지 x_2 를 가지고 있다. 따라서, D₂에서는 D₁에서 복호된 x_1 과 R₁에서 전송된 x_3 를 이용하여 R₁의 메시지 x_2 를 복호한다. 그림 5의 경우, 그래프 'Case 3', 그래프 'Case 3 D₂'는 복호 시 직접 전송으로 수신된 신호만을 이용하기 때문에 직접 전송의 그래프와 동일한 양상을 나타내고 있다.

IV. 결 론

일반적인 협력통신에서는 중계기 설치를 통해 협력 다이버시티 이득을 극대화한다. 그러나 본 논문에서는 중계기 추가에 따른 비용 및 전력 낭비를 줄이고자 중계기를 사용자 모바일 단말기로 사용하는 방안을 제안하였다. 또한 중계기로 사용할 경우, 발생 가능한 세 가지 상태를 제시하였다. 또한, n 개의 중계기가 존재하는 시스템 모델에 적용할 경우, 유휴 상태와 무휴 상태가 혼재되어 있는 실제 무선 통신 환경과 유사함을 알 수 있다. 모의 실험 Case 2는 기지국의 유선 전송 모델로서 수신된 메시지의 비트에러율(BER) 성능이 우수하였으나, 무선 전송 채널로 적용할 경우 수신단 D_2 에서 복호 시 비트에러율(BER) 성능이 하향됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 성능 하향 문제에 대해 장치 대 장치(D2D : Device to Device) 통신을 적용해 연구 중에 있다. 그러나, 성능 하향 보다 시급한 문제인 무선 네트워크의 스펙트럼 자원 부족 및 통신망 과부하 문제에 대해, 본 논문에서 제안된 프로토콜을 적용할 경우 추가적인 중계기 설치 없이 네트워크 용량 및 스펙트럼의 효율을 증가시킬 수 있다.

References

- [1] Ministry of Science, ICT and Future Planning, Wireless Data Traffic Statistics, Aug 1 2014, <http://www.msip.go.kr>
- [2] Aria Nostatinia, Todd E. Hunter, "Cooperative communication in wireless network", IEEE Communication Magazine, vol 42, pp 74~80, Oct 2004.
- [3] Joong-Bin Kim, Dong-Woo Kim, "Cooperative diversity technique", The Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol 25, no 5, pp 38~46, April 2008.
- [4] Lyum Kim, Hyung-Yun Kong, "Performance Analysis of Incremental Cooperative Communication with Relay Selection Based on The Relays Arrangement", The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol 22, no 10, pp 941~950, Oct 2011.
- [5] P. Marsch and G. P. Fettweis, "Coordinated Multi-Point in Mobile Communications," Cambridge

University Press, July 2011.

- [6] L. Carisio and A. J. M. Soares, "Simplified Characterization of the Urban Propagation Environment for Path Loss Calculation," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol.58, no.1, Jan 2010.
- [7] So-Young Lee, Jin-Young Kim, "Optimal Soft Decision for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems", The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol 22, no 4, pp 423~429, April 2011.
- [8] Farhadi, G., Beaulieu, N.C., "Performance Analysis of Convolutional Codes over Fading Channels with Maximum Ratio Combining Diversity", Communications ICC '06 IEEE International Conference on, vol 11, pp 5166~5171, June 2006.

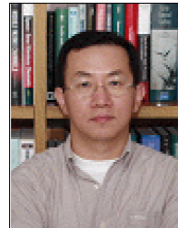
저자 소개

김 태 욱(준회원)



- 2007 2월~2014년 2 월 : 울산대학교 전기공학부 학사
- 2014 3월~현재 : 울산대학교 전기공학부 석사
- 주관심분야 : 인지 기술, 협력 통신

공 형 윤(정회원)



- 1989년 2월 : New York Institute of Technology(미국) 전자공학과 학사
- 1991년 2월 : Polytechnic University (미국) 전자 공학과 석사
- 1996년 2월 : Polytechnic University (미국) 전자 공학과 박사
- 1996년~1996년 : LG전자 PCS팀장
- 1996년~1998년 : LG 전자 회장실 전략 사업단
- 1998년~현재 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심분야 : 모듈레이션, 채널 부호화, 검파 및 추정 기술, 협력통신, 센서네트워크