

http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.4.87

IIBC 2015-4-11

최적의 전력 분배 방안이 적용된 복호 후 전송 프로토콜

Decode and Forward Protocol applied to Optimal Power Allocation

김태욱*, 공형윤**

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

요약 본 논문에서는 복호 후 전송 프로토콜이 적용된 중계기에 전력 분배 프로토콜을 적용하여 수집되는 전력량을 최대화함과 동시에 수신단의 수신 불량 문제를 해결할 수 있는 전력 분배 인자 α 를 선택하는 방안을 제안한다. 레일 리 페이딩과 복호 후 전송 프로토콜의 영향이 적용된 모의실험 파라미터를 통해 무선 기기가 배치된 실제 네트워크의 상황을 고려하며, 최적의 전력 분배 인자 α 의 값을 네트워크에 적용할 경우 배치되어 있는 무선 기기의 채널 용량 및 수신 성능, 네트워크의 효율성을 최적화 시킬 수 있다. 전체적인 시스템의 단대단 아웃티지 확률, 채널 용량, 비트 오류율에 대한 성능을 몬테-카를로 실험을 통해 분석함으로써 시스템의 성능을 평가한다.

Abstract In this Paper, we proposed optimization of system performance, optimal splitting factor α applied to power splitting protocol with relay protocol with decode and forward undergo co-channel interference. We can possible to optimize and maximize the channel capacity of the receive performance and the efficiency of the network through optimal factor of splitting protocol. We verified BER performance and Channel capacity and Outage probability for the proposed scheme over Rayleigh fading through Monte-Carlo simulation.

Key Words : Energy Harvesting, Cooperative Communication, Decode and Forward, Power Allocation

1. 서론

최근 무선 센서 네트워크의 증가로 인해, 유지 및 보수
의 필요성이 증가하고 있으며 독립적인 전력원으로 인해
추가적인 전력의 공급이라는 한계점이 존재한다. 이를
보완하기 위해 주변에 전파되고 있는 신호를 수집하여 전
력원으로 삼는 에너지 하베스팅 기술이 제안되었다^[1-2].
또한 제안된 기술을 협력 네트워크에 적용할 경우, 중계
기의 전력원을 독립적으로 구성할 수 있다. 또한 네트워
크의 배치가 자유로워지는 장점이 존재하기에 [3-4]에서
는 중계기에서 전력 수집을 위한 시간 조정, 전력 분배

프로토콜을 제안하였다. [5-6]에서는 중계기 배치를 고려
하여 동일 채널 간섭 요인이 포함된 환경을 제안하였다.
무선 기기가 동일 채널 간섭을 겪을 경우, 수신측은 간섭
수준에 따라 수신 불능 현상 겪거나 수신 품질이 불량할
수 있다. 그러나 [3]에서 제안된 에너지 하베스팅 기술을
통해 중계기에서 수집되는 전력량이 증가됨을 예상할 수
있다. 또한 [3-7]의 에너지 하베스팅 기술이 적용된 중계
기는 복호 후 전송 프로토콜을 적용되었으나 실제 네트
워크의 상황을 고려되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 복호 후 전송 프로토콜이 적용
된 중계기에 전력 분배 프로토콜을 적용하여 수집되는

*준회원, 울산대학교 전기공학부

**정회원, 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(교신저자)
접수일자 2015년 5월 22일, 수정완료 2015년 7월 2일
게재확정일자 2015년 8월 7일

Received: 22 May, 2015 / Revised: 2 July, 2015 /

Accepted: 7 August, 2015

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

School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea

전력량을 최대화함과 동시에 수신단의 수신 불량 문제를 해결할 수 있는 전력 분배 인자를 찾는 방안을 제안한다. 레일리 페이딩을 통해 실제 네트워크의 상황이 고려된 상태에서 단대단 노드의 아웃티지 확률, 채널 용량, 비트 오류율에 대한 성능을 몬테-카를로 실험을 통해 확인하며, 결과를 바탕으로 최적의 전력 분배 인자를 찾는다. 실제 네트워크에 대한 최적의 전력 분할 요인을 찾을 경우, 수신단의 채널 용량 및 수신 성능을 극대화할 수 있다.

II장에서는 본 논문에서 제안하는 시스템 모델에 대해 소개하며, III장에서는 모의실험 결과를 통해 시스템의 성능을 평가한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단(Source : S)과 수신단(Destination : D) 사이에 중계기(Relay : R)가 그림 1과 같이 배치되었을 경우, 전력 분배 인자에 대한 단 대 단 노드의 아웃티지 확률 및 채널 용량, 비트 오류율을 분석함으로써 시스템의 성능을 평가한다.

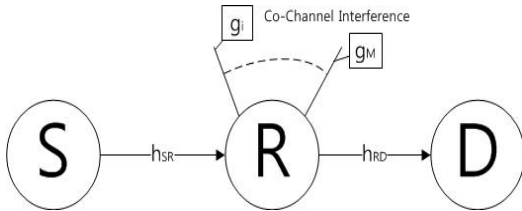


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

그림 1에서 중계기는 전력 분배 프로토콜이 적용되며 동일 채널 간섭을 겪는다. 송신단과 중계기, 중계기와 수신단, 각 채널의 정보는 h_{SR} , h_{RD} 로 주어지며 간섭 요인의 채널은 $g_1, g_2, \dots, g_M (i=1, \dots, M)$ 으로 구성된다.

$$y_{SR} = \sqrt{P_S} x_s h_{SR} + \underbrace{\sum_{i=1}^M \sqrt{P_i} x_i g_i}_{\text{Co-Channel Interference}} + n_r \quad (1)$$

식 (1)은 동일 채널 간섭을 겪는 중계기에서 수신되는 신호를 표현한 식이다. $\sqrt{P_S} x_s h_{SR}$ 은 송신단의 전송 전력 P_S , 메시지 x_s , 송신단과 중계기 사이의 채널 상태 정보

h_{SR} 이며, $\sum_{i=1}^M \sqrt{P_i} x_i g_i$ 는 동일 채널을 통해 수신되는 간섭 요인이며 전송 전력, 메시지, 채널 상태 정보는 유사하다. n_r 은 평균이 0, 분산이 N_0 인 AWGN(Additive White Gaussian Noise)를 의미한다. 또한 $\sum_{i=1}^M$ 은 동일 채널의 수를 의미한다. 본 논문에서는 실제 네트워크 환경과 유사한 동일 채널 간섭을 표현하기 위해 간섭의 크기를 0, 5, 10dB로 표현하였다.

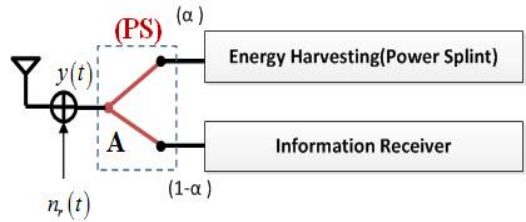


그림 2. 전력 분배 프로토콜
Fig. 2. Power splint protocol

본 논문에서는 위 그림 2와 같은 전력 분배 프로토콜을 사용하기 때문에 식 (1)을 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$y_{SR} = \underbrace{\sqrt{(1-\alpha)P_S} x_s h_{SR} + \sum_{i=1}^M \sqrt{(1-\alpha)P_i} x_i g_i + \sqrt{(1-\alpha)} n_r}_{\text{Information Receiver}} \quad (2)$$

$$+ \underbrace{\sqrt{\alpha P_S} x_s h_{SR} + \sum_{i=1}^M \sqrt{\alpha P_i} x_i g_i + \sqrt{\alpha} n_r}_{\text{Energy Harvesting}}$$

식 (2)에 나타나듯이 전력 분할 프로토콜을 적용할 경우, 메시지 수신 파트와 전력 수집 파트로 나눌 수 있다. 따라서 식 (2)와 같은 분할을 통해 아래와 같은 전력 수집량 및 신호 대 잡음 비에 대한 식을 구할 수 있다.

$$EH = \eta \left(P_S |h_{SR}|^2 + \sum_{i=1}^M P_i g_i^2 \right) \alpha \frac{T}{2} \quad (3)$$

식 (2)를 통해 구해지는 식 (3)은 중계기에서 수집되는 전력량이며, η 는 전환 효율, α 는 분배율, T 는 전력 수집 및 메시지 수신, 전송에 대한 주기이다. 기본적으로 전력 수집 및 메시지 수신에 대한 주기는 $T/2$, 전송은 $T/2$ 로 설정되어 있다. 또한 식 (3)의 수집되는 전력량을 통해 중계기의 전송 전력을 구할 수 있다.

$$P_R = \frac{EH}{(1-\alpha)T/2} = \frac{\alpha n \left(P_S |h_{SR}|^2 + \sum_{i=1}^M P_i |g_i|^2 \right)}{(1-\alpha)} \quad (4)$$

중계기의 전송 전력은 식 (4)와 같으며 α 와 $1-\alpha$ 에 대한 비율로 전송 전력의 크기를 결정한다. 위 식 (4)를 적용할 경우, 수신단에서는 다음과 같은 신호를 수신한다.

$$y_{RD} = \sqrt{P_R} x_R h_{RD} + n_d \quad (5)$$

$$= \sqrt{\frac{\alpha n \left(P_S |h_{SR}|^2 + \sum_{i=1}^M P_i |g_i|^2 \right)}{(1-\alpha)}} x_R h_{RD} + n_d$$

식 (5)는 식 (1)에서 설명한 것과 마찬가지로 h_{RD} 는 각 노드 사이의 채널 정보, x_R 은 중계기에서 복호된 송신단의 메시지, n_d 는 가우시안 잡음이며 P_R 은 중계기 R에서 수집된 전력을 바탕으로 만들어진 전송 전력이다. 위 식 (2), (5)를 바탕으로 시스템 전체의 단대단 신호 대 잡음 비를 구할 수 있다.

$$\gamma_{SR} = \frac{(1-\alpha)P_S |h_{SR}|^2}{N_0 + (1-\alpha) \sum_{i=1}^M P_i |g_i|^2}, \gamma_{RD} = \frac{P_R |h_{RD}|^2}{N_0} \quad (6)$$

[6]에서는 복호 후 전송이 적용된 중계기의 수신 및 복호 가능성에 대해 고려하지 않았다. 따라서 위 식 (6)에서 송신단과 중계기 사이의 신호 대 잡음 비 γ_{SR} 는 복호 후 전송 프로토콜에 대한 수신 및 복호 가능성이 고려된 신호 대 잡음 비이다. 이를 통해 시스템의 실제적인 아웃티지 확률과 채널 용량에 대한 성능을 평가할 수 있다.

전체적인 시스템의 아웃티지 성능을 확인하기 위한 단대단 아웃티지 확률은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\gamma_{total} = \min(\gamma_{SR}, \gamma_{RD}) = \min \left(\frac{P_S |h_{SR}|^2}{N_0 + \sum_{i=1}^M P_i |g_i|^2}, \frac{P_R |h_{RD}|^2}{N_0} \right) \quad (7)$$

$$= \min \left(\frac{P_S |h_{SR}|^2}{N_0 + \sum_{i=1}^M P_i |g_i|^2}, \frac{\alpha n \left(P_S |h_{SR}|^2 + \sum_{i=1}^M P_i |g_i|^2 \right) |h_{RD}|^2}{(1-\alpha)N_0} \right)$$

식 (7)은 단대단 아웃티지 확률을 구하기 위한 각 채널 (송신단-중계기, 중계기-수신단) 사이의 신호 대 잡음 비 γ_{SR}, γ_{RD} 의 최소값을 추출하는 과정이다. γ_{SR}, γ_{RD} 은 식

(7)에서 구한 복호 후 전송 프로토콜이 적용된 신호 대 잡음 비이며 이를 통해 다음 식 (8)와 같은 아웃티지 확률에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$P_{out}^{endtoend} = 1 - \Pr[\gamma_{\min} < \gamma_{th}] \quad (8)$$

또한, 채널 용량에 대한 성능을 확인하기 위해 다음과 같은 방법을 통해 분석한다.

$$C = E \left[\min \left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{SR}), \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{RD}) \right\} \right] \quad (9)$$

식 (9)은 일반적인 단대단 채널 용량에 관한 식이며 식 (6)이 적용된 신호 대 잡음 비 γ_{SR}, γ_{RD} 을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있으며 단대단 채널 성능에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$C = E \left[\min \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(1-\alpha)P_S |h_{SR}|^2}{N_0 + (1-\alpha) \sum_{i=1}^M P_i |g_i|^2} \right), \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_R |h_{RD}|^2}{N_0} \right) \right\} \right] \quad (10)$$

또한 단대단 비트 오류율에 대한 성능은 다음과 같은 과정을 통해 확인할 수 있으며 일반적인 M-QAM의 평균 비트 오류율은 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_k \approx \frac{4}{\log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3|h_k|^2}{M-1} \times \frac{E_S}{N_0}} \right) \quad (11)$$

식 (11)에서 M 은 심볼의 수이며, h_k 는 채널 상태 정보, E_S/N_0 는 신호 대 잡음 비이며, 주어진 식을 본 논문의 복호 후 전송 프로토콜이 적용된 단대단 비트 오류율에 대한 식으로 수정할 수 있다.

$$\epsilon_k \approx \frac{4}{\log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3|\min(h_{SR}, h_{RD})|^2}{M-1} \times \min(\gamma_{SR}, \gamma_{RD})} \right) \quad (12)$$

따라서 위 식 (12)은 식 (7), (10)과 같은 형태로 표현하게 되며 이를 통해 본 논문에서 제안된 시스템 대한 단대단 비트 오류율로 정의할 수 있다.

$$\epsilon_k \approx \frac{4}{\log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3 \min(h_{SR, RD})^2}{M-1} \times \min\left(\frac{(1-\alpha)P_2 h_{SR}^2}{N_0 + (1-\alpha) \sum_{i=1}^M P_i |g_i|^2}, \frac{P_R h_{RD}^2}{N_0}\right)} \right) \quad (13)$$

최종적으로 위에서 정의된 전체 시스템의 아웃티지 확률 및 채널 용량, 비트 오류율을 통해 복호 후 전송 프로토콜의 영향이 포함된 시스템의 단대단 성능을 확인할 수 있다. 또한 각 과정에는 전력 분할 인자 α 가 포함되어 α 가 시스템에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 따라서 전력 분할 인자 α 를 통해 시스템의 성능을 최적화할 수 있는 값을 찾아낼 수 있다.

III. 모의실험

본 장에서는 제안된 방안의 성능 평가를 위해 모의실험을 진행하였으며 사용된 파라미터는 아래 표 1에 간략히 나타내었다.

표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. Simulation parameters

Fading	Rayleigh fading
Path loss exponent	3
γ_{th}	5dB
SNR	10, 20, 30dB
Co-Channel interference	0, 5, 10dB
Conversion efficiency(η)	1

표 1을 통해 모의실험에 사용된 파라미터를 확인할 수 있다. 채널 환경은 레일리 페이딩을 적용하였고 경로 손실 지수는 실외 환경에 대한 대표적 지수인 3, 아웃티지 확률을 분석하기 위한 임계 신호 대 잡음 비는 5dB이며 송신단과 수신단 사이의 거리를 정규화하여 1로 설정하고 중계기와의 거리는 0.5로 설정, 동일 채널 간섭에 대한 수준은 실제 무선 네트워크 환경을 실현하기 위해 0, 5, 10dB로 설정하였다. 또한 전력 전환 효율 η 는 이상적인 환경이라는 가정을 통해 1로 설정하였다.

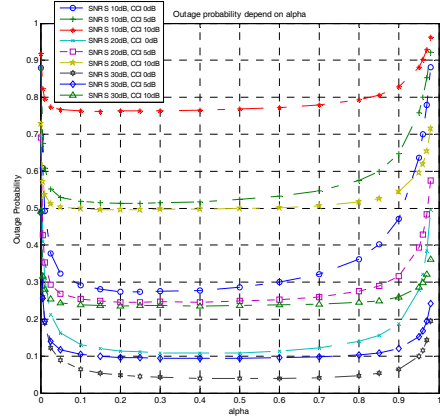


그림 3. 전력 분배 인자에 따른 아웃티지 확률

Fig. 3. Outage probability of depend on alpha

그림 3은 통해 전력 분배 인자 α 에 따른 아웃티지 성능을 확인할 수 있다. 송신단의 신호 대 잡음 비는 10, 20, 30dB로 지정되어 있으며 동일 채널 간섭 요인은 0, 5, 10dB로 설정되어있다. [4, 6]에서 유사한 모의실험을 진행하였으나 기존 논문의 경우, α 의 값이 증가할수록 아웃티지 성능이 우수해지는 것을 확인할 수 있으며 본 논문의 모의실험은 일정 범위 내에서 최적의 아웃티지 성능이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 기존의 논문이 복호 후 전송 프로토콜에 대한 고려가 포함되지 않았기 때문이다. 위 그래프에선 송신단의 신호 대 잡음 비가 증가할수록, 동일 채널 간섭의 수준이 증가할수록 전력 분배 인자 α 의 값이 특정 범위 내에 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 α 의 값이 낮아질 경우 γ_{SR} 의 값이 증가, 수집되는 전력량은 낮아지는 경향을 나타낸다. 또한 α 의 값이 높아질 경우 γ_{RD} 의 값이 감소, 수집되는 전력량은 높아지는 경향을 나타낸다. 이러한 이유는 식 (7)의 아웃티지 확률에 대한 공식으로 인해 송신단과 중계기 사이의 신호 대 잡음 비 γ_{SR} 과 중계기와 수신단 사이의 신호 대 잡음 비 γ_{RD} 중 낮은 값을 가지는 단의 신호 대 잡음 비를 출력하기 때문이다.

그림 4는 식 (10)을 바탕으로 전력 분할 인자 α 대해 모의실험 된 결과이다. 그림 3과 비교할 경우, 전혀 다른 양상을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 송신단과 중계기 사이의 신호 대 잡음 비가 증가하고 동일 채널 간섭이 일정한 그래프만 확인할 경우, 전력 분배 요인인 α 의 값이 0에서 0.8까지 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

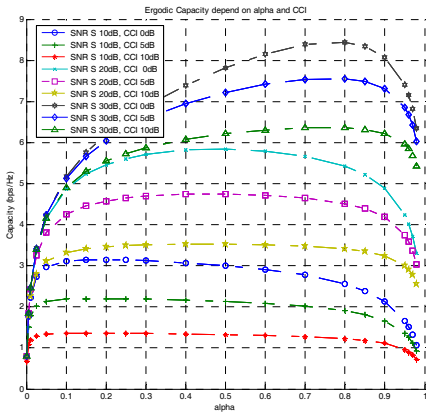


그림 4. 전력 분배 인자에 따른 용량 성능
 Fig. 4. Ergodic capacity depend on alpha

간섭의 수준이 증가할 경우, α 의 증가폭은 줄어들지만 증가하는 현상하는 동일하다. 이러한 현상은 그래프의 최고지점까지 중계기와 수신단 사이 신호 대 잡음 비 γ_{RD} 의 영향을 받기 때문이며 이 구간에서는 동일 채널 간섭의 영향을 받지 않기 때문이다. 따라서 α 의 값이 커질수록 전송 전력의 크기의 증가로 채널 용량이 증가하게 되며 채널 용량의 최고점에서는 송신단과 중계기 사이의 신호 대 잡음 비 γ_{SR} 의 영향을 받게 되어 감소하게 된다.

그림 5는 식 (13)를 통해 얻을 수 있는 모의실험 결과이며 전체적인 시스템의 비트 오류율을 나타낸다. 비트 오류율의 경우, 송신단에서 전송된 신호와 수신단에서 복호한 신호의 비교를 통해 시스템의 실제 성능을 확인할 수 있는 지표이다. 위 그래프에서 알 수 있듯이 신호 대 잡음 비와 동일 채널 간섭이 변하더라도 비트 오류율의 성능은 특정한 α 의 범위 내에 존재함을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 복호 후 전송 프로토콜이 적용된 중계기의 성능과 밀접한 연관을 가진 식 (13)를 적용한 모의실험이기 때문이다. 또한 제안된 방식 중 SNR 30dB, CCI 0dB와 직접 통신 SNR 30dB를 비교한 결과 성능이 우수한 성능을 나타내는 $\alpha = 0.35$ 에서 유사한 값을 나타냄을 확인할 수 있었으며, 이러한 오차가 발생된 원인은 직접 통신의 경우 수신단에서 동일 채널 간섭의 영향을 받지 않기 때문이다.

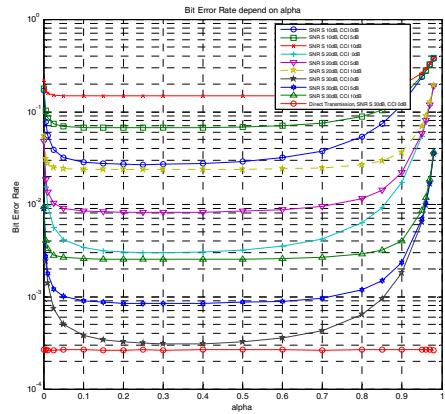


그림 5. 전력 분배 인자에 따른 비트 오류율
 Fig. 5. Bit error rate depend on alpha

최종적으로 위 그래프 3, 4, 5를 통해 전력 분할 인자 α 에 대한 최적의 값을 유추할 수 있다. 그림 4에 나타난 것처럼 최상의 채널 용량을 위해 주변 상태에 따라 전력 분할 인자 α 를 변화시킬 경우, 채널 용량을 늘여날 수 있으나 수신단의 복호 불능이라는 치명적인 문제를 야기할 수 있으며 이러한 문제는 아래 그림 5의 모의실험 결과로 증명된다.

IV. 결론

본 논문에서는 복호 후 전송 프로토콜이 적용된 중계기에 전력 분배 프로토콜을 적용하여 수집되는 전력량을 최대화함과 동시에 수신단의 수신 불량 문제를 해결할 수 있는 전력 분배 인자 α 를 선택하는 방안을 제안한다. 레일리 페이딩과 복호 후 전송 프로토콜의 영향이 적용된 모의실험 파라미터를 통해 무선 기기가 배치된 실제 네트워크의 상황을 고려하였다. 또한 최적의 전력 분배 인자 α 의 값을 전체적인 시스템의 단대단 아웃티지 확률, 채널 용량, 비트 오류율에 대한 성능을 몬테-카를로 실험을 통해 증명하였다. 실험 결과를 바탕으로 네트워크에 배치된 무선 기기의 채널 용량 및 수신 성능, 네트워크의 효율성을 최적화 할 수 있다.

References

- [1] J. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Pervasive Comput.*, Vol 4, No 1, pp 18~27, Jan, 2005.
- [2] L. Liu, R. Zhang, and K.-C. Chua, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol 12, No 1, pp. 288~300, Jan, 2013.
- [3] Tae Wook Kim, Hyung Yun Kong, "Optimal Performance of Power Splitting Protocol in Energy Harvesting Undergo Co-Channel Interference", *The Institute of Internet Broadcasting and Communication*, Vol 15, No 3, pp 67-71, Jun 2015.
- [4] Tae Wook Kim, Hyung Yun Kong, "Performance Analysis of The Relay Applied Energy Harvesting", *The Institute of Internet Broadcasting and Communication*, Vol 14, No 5, pp 67-72, Oct 2014.
- [5] A. Bletsas. H. Shin. and M. Z. Win, "Cooperative communication in the presence of co-channel interferences and outdated channel information", *IEEE Commun. Letters*, Vol 17, No 10, pp. 1948~1951, Oct 2013.
- [6] Yanju Gu, Sonia Aissa, "Interference Aided Energy Haversting in Decode-and-Forward Relaying Systems", *IEEE ICC* 2014.
- [7] Ali.A Nasir, Xiangyun Zhou, Salman Durrani, "Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol 12, No 1, pp. 3622~3636, July 2013.

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, 전력 수집

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