

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.5.67>

IIBC 2014-5-9

에너지 하베스팅을 적용한 중계기의 성능 분석

Performance Analysis of Relay applied to Energy Harvesting

김태욱, 공형윤*

Tae-Wook Kim, Hyung-Yun Kong*

요약 본 논문에서는 협력 통신에 에너지 하베스팅 기법을 적용할 경우 발생하는 잡음을 최소화하고 성능을 개선시킬 수 있는 방안을 제안하였다. 제안된 기법은 에너지 하베스팅 노드에서 수집된 전력을 저장하고 저장된 전력을 바탕으로 중계기를 사용한다. 이때, 중계기에서는 복호 후 전송(Decode and Forward) 기법을 적용하여 잡음의 영향을 최소화하였고, 수신단에서는 최대비 결합(Maximal Ratio Combining) 기법을 적용하여 다이버시티 이득을 얻었다. 따라서 제안된 기법을 일반적인 네트워크 환경에 적용할 경우 중소형 중계기의 구동에 필요한 전력을 제거할 수 있으며, 전력의 수집으로 인해 단말기 및 네트워크의 효율성을 증가시킬 수 있다. 마지막으로, 제안한 프로토콜을 레일리 페이딩 환경에서 전력 수집 효율 및 비트오류율(Bit Error Rate), 아웃티지 확률(Outage Probability)을 통해 시스템의 성능을 평가한다.

Abstract In this paper, an energy harvesting scheme is applied in the cooperative communication. The proposed scheme uses an energy harvesting relay in which the relay harvests the energy from the source node and transfers to the power form in forwarding the received data to the destination node. The well-known maximal ratio combining (MRC) technique is applied to increase the diversity gain at the destination. Therefore, with applying the proposed energy harvesting scheme, the limited power at the relay is solved, and the operation efficiency of the network and the mobile devices is improved. Finally, performance of the proposed protocol is analyzed in terms of bit error rate, outage probability, power collection efficiency.

Key Words : Energy Harvesting, Cooperative Communication, Relay Using Scheme, Decode and Forward, Maximum Ratio Combining, Interference Mitigation

1. 서론

일반적인 무선 네트워크에서 사용자 단말기에 저장된 전력은 효율적으로 사용되어야 하며, 한정된 전력으로 사용자에게 우수한 품질을 제공해야 한다. 품질이 열악한 환경 혹은 음영 지역에서는 사용자 단말기의 전력 소비가 증가하게 되므로 중소형 기지국의 설치가 이루어졌다.

그러나 소형 기지국의 무분별한 설치는 전력 낭비와 간섭을 유발하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 수집된 전력을 바탕으로 노드를 동작시키는 에너지 하베스팅에 대한 연구가 활발히 진행되었다^[1-4]. [5]에서는 중계기에서 전력을 수집하여 전력원으로 사용함과 동시에 메시지를 전달하는 기법을 제안하였다. 에너지 하베스팅 기법을 송신단, 중

*정회원, 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(교신저자)
접수일자 : 2014년 6월 5일, 수정완료 : 2014년 8월 24일
게재확정일자 : 2014년 10월 10일

Received: 5 June, 2014 / Revised: 24 August, 2014

Accepted: 10 October, 2014

*Corresponding Author: hkong@ulsan.ac.kr

School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea

계기, 수신단의 단대단 통신에 적용하였으며 중계기에 에너지 하베스팅 수신기와 복조 수신기 회로를 설치하였다. 따라서 에너지 하베스팅 수신기에서 메시지를 전력화시키며 메시지 수신기에서 메시지를 수신하게 된다. 수집된 전력을 바탕으로 활성화되는 중계기는 증폭 후 전달(Amplify and Forward) 기법을 사용하여 수신단까지 메시지를 전달한다. 그러나 이러한 기법의 경우, 에너지 변환 과정에서 잡음이 포함될 수 있으며 메시지의 증폭 과정에서 상대적으로 많은 전력을 소모하게 되면 중계기는 불능상태에 빠지게 된다. 또한, 증폭 후 전달 방식을 사용하게 됨으로 수신단에서는 잡음으로 인한 비트 오류율이 증가하게 된다.

따라서 본 논문에서는 잡음 문제를 해결하여 비트 오류율을 감소시킬 수 있으며, 중계기에서는 에너지를 수집할 수 있는 방안을 제안한다. 본 논문의 시나리오에서 에너지 하베스팅 노드인 중계기는 메시지를 수집하여 자신의 전력원으로 삼고, 전력이 일정 수치 이하로 떨어질 경우 충전하는 시간을 가지며, 중계기가 충전 상태에 있을 경우, 송신단과 수신단은 직접 통신을 하게 되는 일반적인 상태가 된다. 반면, 중계기의 전력이 충분하면 활성화 상태가 되며 수신된 메시지의 전송을 시작한다. 중계기는 복호 후 전송(Decode and Forward) 기법을 사용하며 수신단에서는 최대비 결합(Maximal Ratio Combining) 기법을 사용함으로써 다이버시티 이득을 취할 수 있다. 따라서 제안된 기법을 중계기에 적용하면 기존 기법의 문제점인 잡음과 불능 상태를 해결할 수 있으며 네트워크의 효율성도 높아진다. 제안된 기법과 기존 기법의 충전 효율과 비트 오류율, 아웃지 확률을 비교 분석함으로써 제안된 기법의 성능을 평가한다.

II장에서는 본 논문에서 제안하는 시스템 모델에 대해 소개하며, III장에서는 모의 실험 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 경우에 대한 충전 효율 및 비트 오류율, 아웃지 확률을 분석함으로써 시스템의 성능을 평가한다.

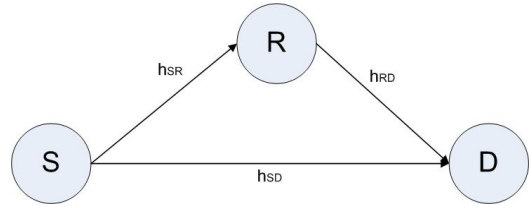


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

그림 1의 시스템 모델에서 S는 송신단으로서 전송을 원하는 사용자, D는 수신단, R은 중계기를 의미하며, 중계기는 에너지 하베스팅이 적용된 노드로서 전력 사용에 따라 활성, 비활성 상태를 나타낸다. 또한, h_{SR} , h_{RD} , h_{SD} 의 각 값은 채널 정보(Channel Information)를 의미한다. 메시지의 전송 전 준비 단계에서 중계기 R은 충전된 상태로 가정한다.

첫 번째 시간 슬롯에서 송신단 S는 중계기 R과 수신단 D로 자신의 메시지를 전송한다. 따라서, 각 노드는 다음과 같은 메시지를 수신한다.

$$\begin{aligned} y_{SR} &= \sqrt{P_S} h_{SR} x_1 + n_0 \\ y_{SD} &= \sqrt{P_S} h_{SD} x_1 + n_1 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 P_S 는 송신단 S의 전송 전력이며, h_{SR} , h_{SD} 는 각 노드 사이의 채널 정보, x_1 은 송신단 S의 메시지이다. 또한, n_0 , n_1 은 평균이 0, 분산이 N_0 인 AWGN(Additive White Gaussian Noise)를 의미한다. 수신단 D에서는 임계 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio) γ_{th} 이상의 수신 신호대 잡음비인 γ_{SR} (송신단과 중계기 사이)와 γ_{RD} (중계기와 수신단 사이의) 결과를 비교하여 복호의 성공 여부를 판단한다.

1. 에너지 하베스팅 방안

시스템에 표현된 중계기에서는 에너지 하베스팅 기법이 적용되어 있으며, 기회주의적 방법으로 전력을 수집하며 그림 2와 같이 표현된다.

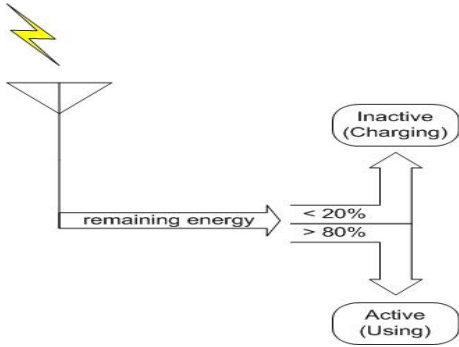


그림 2. 중계기의 에너지 하베스팅 과정
 Fig. 2. The process of energy harvesting relay

그림 2에서 중계기의 에너지 하베스팅 과정은 두 가지로 나뉜다. 첫 번째, 중계기의 잔여 전력이 최대치의 20% 미만일 경우 비활성화 상태가 되며, 송신단 메시지의 전송을 중단하고 주변 정보를 수집하여 전력을 충전한다. 두 번째, 잔여 전력이 최대치의 20% 이상일 경우 중계기에서는 복호 후 전송(Decode and Forward) 기법을 사용한다. 또한, 이 과정에서 전력의 잔여량이 20% 미만일 경우, 비활성화 상태에서 충전을 하게 되며 최대 전력량의 80% 이상이 될 때까지 지속된다. [5]에서 정의된 전력 수집량을 본 논문에 적용하면 다음의 수식과 같다.

$$E_h = \frac{\eta P_S |h|^2}{d_1^m} \quad (2)$$

식 (2)은 에너지 하베스팅 기법이 적용된 중계기에서 수집되는 전력량을 수식화한 것이다. 여기서 η 은 전력 전환 효율을 의미하며 내부 회로에 의존되는 값이다. P_S 는 송신단의 전송 전력이며 $|h|^2$ 는 채널 이득(Channel Gain)을 의미하며, d_1^m 은 송신단에서 중계기까지의 거리를 의미한다.

또한 중계기가 활성화 상태에 있을 때, 중계기에서 복호 후 전송 기법을 사용하며, 복호가 성공적으로 이루어진다면 수신단에서는 최대비 결합(Maximal Ratio Combining) 기법을 사용하여 협력 다이버시티 이득을 얻는다.

2. 아웃티지 확률 분석

본 논문의 시스템 모델에서 송신단 S는 자신의 메시지 x_1 을 중계기와 수신단으로 전송한다. 이때의 아웃티

지 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{S \rightarrow R}^{out} = \Pr [SNR_{S \rightarrow R} < \gamma_{th}] \quad (3)$$

식 (3)은 송신단에서 중계기 사이의 아웃티지 확률이며 $SNR_{S \rightarrow R}$ 은 γ_{SR} 을 의미한다.

$$P_{R \rightarrow D}^{out} = \Pr [SNR_{R \rightarrow D} < \gamma_{th}] \quad (4)$$

식 (4)는 중계기와 수신단 사이의 아웃티지 확률이며 $SNR_{R \rightarrow D}$ 은 γ_{RD} 를 의미한다. 또한, 식 (3), (4)를 합하여 시스템 모델의 전체적인 아웃티지 확률을 구할 수 있다.

$$P_{total}^{out} = \Pr [SNR_{S \rightarrow R} < \gamma_{th}] + (1 - \Pr [SNR_{S \rightarrow R} < \gamma_{th}]) \cdot \Pr [SNR_{R \rightarrow D} < \gamma_{th}] \quad (5)$$

식 (5)는 중계기에서 수신 실패할 확률, 중계기에서는 수신에 성공한 뒤 수신단에서 수신 실패할 확률을 합한 아웃티지 확률을 의미한다. 식 (5)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{total}^{out} &= \Pr [\gamma_{SR} < \gamma_{th}] + (1 - \Pr [\gamma_{SR} < \gamma_{th}]) \\ &\quad \cdot \Pr [\gamma_{RD} < \gamma_{th}] \\ &= \int_0^{\gamma_{th}} f_{SR}(\gamma_{SR}) d\gamma_{SR} \\ &\quad + \left(1 - \int_0^{\gamma_{th}} f_{SR}(\gamma_{SR}) d\gamma_{SR} \right) \\ &\quad \cdot \int_0^{\gamma_{th}} f_{RD}(\gamma_{RD}) d\gamma_{RD} \\ &= F_{\gamma_{SR}}(\gamma_{th}) + (1 - F_{\gamma_{SR}}(\gamma_{th})) \cdot F_{\gamma_{RD}}(\gamma_{th}) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 통해 시스템의 전체적인 아웃티지 확률을 구할 수 있으며, $f_{\gamma_{SR}}(\gamma_{SR})$ 은 확률 밀도 함수(Probability Density Function), $F_{\gamma_{SR}}(\gamma_{SR})$ 은 확률 분포 함수(Probability Distribution Function)이다. 또한, [6]을 통해 위 식 (6)의 확률 분포 함수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
P_{total}^{out} &= 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}N_0}{P_{SR}}\right) \\
&+ \exp\left(-\frac{\gamma_{th}N_0}{P_{SR}}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}N_0}{P_{R,D}}\right)\right) \\
&= 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}N_0}{P_{SE}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\gamma_{th}N_0}{P_{R,D}}\right)
\end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)을 통해 전체적인 시스템의 아웃티지 확률을 분석할 수 있다.

III. 모의 실험

본 장에서는 시스템 모델의 성능 평가를 위해 모의 실험을 진행하였다. 모의 실험에서 적용한 파라미터의 수치는 아래 표 1에 나타내었다.

표 1. 모의 실험 파라미터

Table 1. Simulation parameters

Fading	Rayleigh fading
Path loss exponent	3
Modulation	BPSK
SNR Threshold	5dB
SNR	0 ~ 20 dB
Relay's protocol	Decode and Forward
Combining scheme	Maximum Ratio
Energy harvesting point	20% / 80%
Conversion efficiency(η)	1

표 1의 모의 실험 파라미터에서 레일리 페이딩을 적용하였으며, 경로 손실 지수는 실외 환경을 고려해 3으로 지정하였다^[7]. 비트 오류율을 측정하기 위해 BPSK 모듈레이션을 적용하였으며, 임계 신호대 잡음비는 5dB로 지정하였다^[8]. 또한, 송신단과 수신단 사이의 거리를 정규화하여 1, 중계기와의 거리는 0.5로 지정하였다. 전환 효율 η 는 기존 기법과의 차이를 비교하기 위해서 1로 지정하였다.

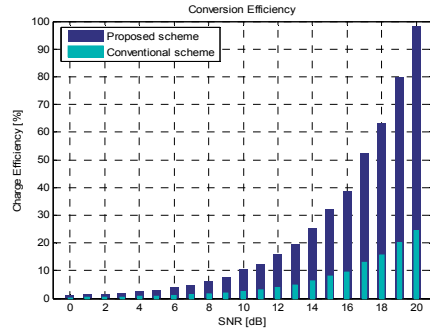


그림 3. 전환 효율의 비교

Fig. 3. Comparison of conversion efficiency

그림 3은 본 논문에서 제시된 시스템 모델에 대한 에너지 전환 효율을 그래프로 표현한 것이다. 기존의 기법

에서 표현된 수식은 $E_h = \frac{\eta \rho P_s |h|^2}{d_1^m} \cdot \left(\frac{T}{2}\right)$ 표현되며

전력의 일정 부분을 ρ 값을 이용하여 분할하였다. 이 값은 메시지의 전달과 에너지 하베스팅의 전력 분할을 나타낸다. 따라서, 값이 분할되는 정도가 0.5라고 가정할 때, 위의 그래프 'Conversion Efficiency'에서 기존 기법의 효율을 수치화 할 수 있다. 제안된 기법의 경우 분할하는 부분이 필요하지 않음으로서 위와 같은 결과를 얻을 수 있고 평균 적으로 4배의 이득을 얻을 수 있었다. 기존의 기법에서는 메시지의 전송을 위해 수집된 메시지의 전력을 분할하게 되며 이 과정에서 에너지의 손실이 발생한다. 반면, 제안된 기법에서는 활성화, 비활성화 상태가 되므로 에너지의 손실은 발생하지 않으나, 비활성화 상태에서 사용자는 직접 통신만을 사용해야한다. 그러나 활성화 상태의 이득이 기존의 기법에 비해 우수하며, 네트워크의 참여 노드를 확장 시킬 경우 활성화 상태가 지배적으로 유지되는 것을 예상해 볼 수 있다. 또한, 그래프의 전체적인 모형이 지수 함수 형태를 띄는 것은 채널 특성으로 인해 신호의 세기가 감쇄되기 때문이다. 따라서 낮은 dB에서 얻을 수 있는 전력이 약하며 높은 dB에서 얻을 수 있는 전력이 높은 것을 알 수 있다.

그림 4는 기존의 기법과 제안된 기법, 직접 통신 간의 비트 오류율을 나타내며 기법 간의 평가를 위해 직접 통신이 가능한 상태에서 모의 실험을 진행하였다. 그래프 'MRC-Conventional'의 경우, 에너지 하베스팅 노드인 중계기에서 증폭 후 전송 기법을 적용하였으며, 수신단에서는 최대비 결합 기법으로 복호하였다.

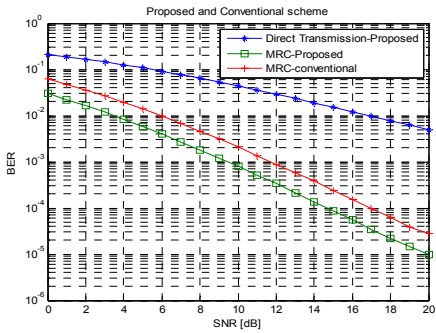


그림 4. 비트 오류율 성능 분석
 Fig. 4. Performance analysis of bit error rate

또한, 그래프 ‘MRC-Proposed’는 에너지 하베스팅 노드인 중계기에서 복호 후 전송 기법을 적용하였고, 수신단에서는 최대비 결합 기법으로 복호하였다. 두 기법은 직접 통신의 성능보다 우수한 것을 예상할 수 있으며, 모의 실험 결과에서는 7배 ~ 13배의 이득을 얻을 수 있었다. 또한, 두 그래프는 2배 정도의 이득 차이가 존재하며 이 이득값은 에너지 하베스팅 노드인 중계기에서 어떤 기법을 적용해 전송할 것인지 나타낸다. 증폭 후 전송 기법의 경우, 전송 과정에서 잡음의 영향이 증가하게 되고 에너지 전환 과정에서 전환 잡음이 발생하게 된다. 따라서 수신단의 복호 과정에서 잡음으로 인해 제안된 기법에 비해 오류율이 증가하게 된다.

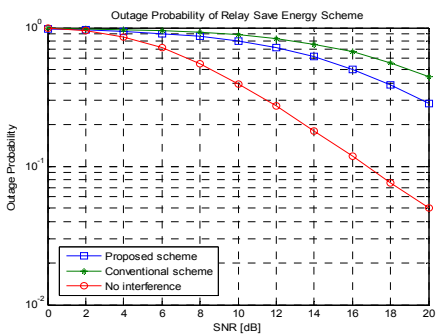


그림 5. 아웃티지 확률 분석
 Fig. 5. Analysis of outage probability

그림 5는 제안된 기법과 기존의 기법, 간섭이 없는 환경에서의 아웃티지 확률을 수치화한 그래프이다. 그래프 ‘Proposed scheme’의 경우, 5.0×10^{-1} 의 수치를 나타내며, 그래프 ‘Conventional scheme’의 경우 6.7×10^{-1} 의

수치를 나타낸다. 두 그래프 간의 차이는 기존의 기법에서 전력을 전환하는 과정에서 발생하는 잡음의 영향이다. 네트워크 상에서 발생하는 잡음 외에 추가적인 잡음이 발생하는 경우이므로 잡음의 세기가 클 경우, 노드가 비활성 상태가 될 수 있다. 반면, 제안된 기법은 전력을 저장하여 사용하기 때문에 전력 전환 과정에서 잡음이 발생되지 않으며 메시지의 전송 과정에 영향을 미치지 않는다.

IV. 결론

본 논문에서는 협력 통신에 에너지 하베스팅 기법을 적용하여, 수집된 전력을 저장하고 저장된 전력을 바탕으로 중계기를 작동시킬 수 있는 방안을 제안하였다. 에너지 하베스팅 노드인 중계기는 수집된 전력을 저장하여 중계기를 구동시키는 방식이며 기존의 기법에서 발생하는 잡음의 영향 및 성능을 개선시켰다. 중계기는 복호 후 전송 기법을 적용하여 잡음의 영향을 최소화 했으며, 수신단에서는 최대비 결합 기법을 적용해 비트 오류율을 최소화하였다. 따라서 제안된 기법을 일반적인 네트워크 환경에 적용할 경우 중소형 중계기의 구동에 필요한 전력을 제거할 수 있으며, 전력의 수집으로 인해 단말기 및 네트워크의 효율성을 증가시킬 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. R. Varshney, “Transporting information and energy simultaneously”, in *Proc. 2008 IEEE Int. Symp. Inf. Theory.*
- [3] P. Grover and A. Sahai, “Shannon meets Tesla: wireless information and power transfer,” in *Proc. 2010 IEEE Int. Symp. Inf. Theory.*
- [4] 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.

- [5] Ali A. Nasir, Xiangyun Zhou, Salman Durrain, Rodney A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing", IEEE Trans. Wireless Commun., Vol 12, No 7, pp 3622~3636, July, 2013.
- [6] Hyunkee Min, Woohyun Seo, Jemin Lee, Sungsoo Park, and Daesik Hong, "Reliability Improvement Using Receive Mode Selection in the Device-to-Device Uplink Period Underlying Cellular Networks," Trans. Wirel. Commun, 2011, 10, (2), pp. 413-418
- [7] 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.
- [8] 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.

저자 소개

김 태 욱(학생 회원)



- 2007년 2월 ~ 2014년 2월 : 울산대학교 전기공학부 학사
- 2014년 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>