무선 중계 네트워크에서 간섭 채널 기반의 TSR 프로토콜을 위한 에너지 하베스팅 최적화 모델 설계

Design of Energy Harvesting Optimization Model for TSR Protocol based on Interference Channel in Wireless Relay Networks

김 현 태, 나 인 호
군산대학교

Kim hyun-tae, Ra in-ho
Kunsan National University

요약

본 논문에서는 간섭신호가 존재하는 무선 에너지 중계 네트워크 환경에서 중계 노드의 에너지 수확률을 결정하는 TSR 기반 에너지 하베스팅 기법의 성능을 향상시키기 위하여 간섭을 고려한 전송채널 분석 모델과 에너지 하베스팅 최적화 기법을 제안한다. 특히, 간섭 신호를 고려한 최적의 수신기 모드 스위칭 메커니즘 설계를 위한 최적의 에너지 수확률(energy harvesting ratio) 결정 기법을 제안하여 RF 에너지 하베시팅 시스템의 처리율을 최대화 할 수 있도록 하였다.

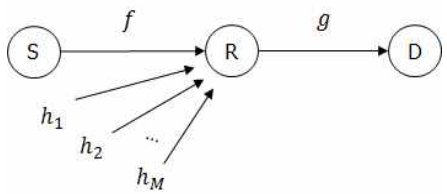
Ⅰ. 서론

데이터 전송을 수행하는 무선 노드의 에너지 효율성 문제는 무선 중계 네트워크 설계 시 고려해야 할 중요한 사항으로 알려져 있다. 또한, 잘 알려진 바와 같이 협조 중계 방식(cooperative relaying)은 다수의 중계 노드들을 경유하여 발신지(source) 노드에서 최종 목적지(destination) 노드로 정보를 전송하는 방식으로 네트워크내의 에너지 효율을 향상시킬 수 있다[1]. 이때 중계 노드는 전달된 RF 신호를 통해 에너지 수확과 정보 디코딩을 동시에 수행하여 제한된 에너지 용량 문제를 극복하기 할 수 있다[2].

이와 관련하여 논문 [1]에서는 무선 노드에서 수신된 동일한 신호로부터 전력을 획득하고 동시에 정보를 디코딩할 수 있는 이상적인 수신기 설계 기법을 제시한 바 있다. 그러나 수신된 RF 신호로부터 에너지 수확과 정보 디코딩을 동시에 수행하는 수신노드 회로를 설계하는 하는 것은 물리적으로 불가능하다. 이와 같은 문제 해결을 위해 TS(time switching)와 PS(power splitting) 기반의 수신기 구조가 연구되고 있다[3]. 이러한 구조의 수신기 모델은 에너지 효율성과 처리율 간의 trade-off에 관한 분석을 통하여 에너지 효율성을 개선하는 것을 목적으로 하고 있다. 논문 [4]에서는 DF(decode and forward) 중계 네트워크에서 중계 노드가 TSR(time switching relaying) 방식으로 정보를 디코딩하고 에너지를 수확할 때 정보 신호뿐만 아니라 간섭 신호(co-channel interference)를 모두 고려한 에르고딕 용량에 대한 분석모델을 제시하였다. 논문 [5]에서는 AF(amplify and forward) 중계 네트워크에서 TS 수신기 구조를 이용한 처리율 최대화 문제를 해결하기 위하여종단간 SNR과 아웃티지 확률로부터 에너지 수확률의 최적화 기법을 제시하였다. 또한 다중 중계 에너지 하베스팅 네트워크에서 달성 가능한 처리율을 최대화하기 위한 최선의 중계 노드 선정 방식(relay selection)을 제시하였으나 에너지 수확률 및 처리율 최적화 과정에서 송수신 노드를 제외한 다른 노드들로부터의 발생되는 CCI(Co-Channel Interference) 신호로 인한 처리율 저하 문제를 고려하지 않았다.

간섭 신호가 존재하는 무선 에너지 중계 네트워크 환경에서 중계 노드의 에너지 수확률은 종단간 처리율과 네트워크 수명에 상당한 영향을 미친다고 알려져 있다. 본 논문에서는 무선 수신기의 에너지 하베스팅을 위해 TSR 프로토콜을 기반으로 하여 채널간섭 신호가 존재하는 협조 중계 네트워크에서 달성 가능한 처리율이 최대가 될 수 있도록 에너지 수확률을 결정하는 최적화 기법을 제시한다.

Ⅱ. 시스템 및 채널 모델

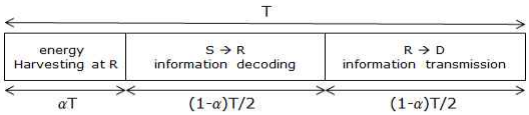


▶▶ 그림 1. 협조 중계 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 발신 노드(S)가 에너지 제한적인 중계 노드(R)를 통하여 정보를 목적 노드로 전송하는 무선 중계 네트워크 모델을 가정한다. 각 노드는 단일 안테나를 가지며, 동일한 주파수 대역을 사용하고 반이중 모드(half duplex mode)로 운영된다. 정보 전송 경로는 S-R 홉과 R-D 홉과 같이 두 홉으로 구성되며, 각 홉의 채널은 복소 채널 이득(complex channel gain)으로 각각 f와 g라고 가정한다. 또한 h_i는 i번째 간섭노드(interferer)와 중계 노드간의 채널 페이딩 이득이다.

그림 2는 TSR 프로토콜의 전송 블록 구조(transmission block structure)에 관한 것으로서 중계 노드의 에너지 하베스팅과 정보 디코딩을 위한 타임 슬롯의 구조를 나타낸다. 중계 노드는 우선 수신된 RF 신호로부터 에너지 수확율(α)에 따라 αT 시간동안 에너지를 저장한

다. 두 번째 구간 $(1-\alpha)T/2$은 발신 노드와 중계 노드 간의(S-R 홉) 정보전달을 위해 사용되고 세 번째 구간 $(1-\alpha)T/2$는 중계 노드와 목적 노드간의(R-D 홉)의 정보를 전달하는데 할당된다. S-R 홉의 발신 노드 S는 전송신호(s)를 전력 P_s로 중계 노드 R에게 송신한다. 이 때 중계 노드의 수신신호는 수식 (1)과 같다. 여기서, s_i와 P_i는 i번째 간섭노드의 정보신호와 전력이다. n_r은 평균이 0이고 분산이 σ_r^2인 중계 노드의 잡음(AWGN)이다.



▶▶ 그림 2. 중계 노드에서의 TSR 프로토콜

$$y_r = \sqrt{P_s} fs + \sum_{i=1}^{M} \sqrt{P_k} h_i s_i + n_r \quad (1)$$

중계 노드는 각 블록 구간에서 αT 시간동안에 수신된 정보 신호와 간섭 신호로부터 에너지(E_r)를 수확한다. 에너지(E_r)는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$E_r = \eta\left(P_s|f|^2 + \sum_{i=1}^{M} P_i|h_i|^2\right)\alpha T \quad (2)$$

여기서 η는 에너지 전화효율($0 \le \eta \le 1$)이고 h_i는 i번째 간섭 노드의 채널 페이딩 이득이다.

중계 노드는 수확된 전체 에너지를 목적 노드로 정보를 전달하는데 소비한다고 가정한다. 따라서 수식 (2)로부터 중계 노드의 송신 전력(P_r)은 수식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$P_r = \frac{E_r}{(1-\alpha)T/2} = \frac{2\alpha\eta}{1-\alpha}\left(P_s|f|^2 + \sum_{i=1}^{M} P_i|h_i|^2\right) \quad (3)$$

여기서 P_i는 간섭 노드의 송신전력이다.

D-R 홉은 중계 노드가 목적 노드로 정보신호(s_r)를 전달할 때 목적 노드의 수신신호는 수식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_d = \sqrt{P_r} g s_r + n_d \quad (4)$$

Ⅲ. 처리율 및 에너지 수확 최적화 모델

무선 중계 네트워크에서 발신 노드와 목적 노드간의 순시 종단간 수신 SINR(instantaneous end-to-end receive SINR)은 S-R 홉의 SINR(γ_{sr})에 대해 $\gamma_{sr} = P_s|f|^2/(\sigma_r^2 + I_r)$이고, R-D 홉의 SINR($\gamma_{rd}$)에 대해 $\gamma_{rd} = P_r|g|^2/\sigma_d^2$으로 계산될 수 있다. 이처럼 두 홉으로 구성된 경로의 종단간 수신 SINR(γ_{end})은 논문 [10]에서 제시한 수식에 따라 수식 (5)과 같이 계산될 수 있다.

$$\gamma_{end} = \frac{\gamma_{sr}\gamma_{rd}}{\gamma_{sr} + \gamma_{rd} + 1} \quad (5)$$

종단간 수신 SINR로부터 평균 종단간 수신 SINR와 아웃티지 확률(P_{out})로부터 달성 가능한 처리율(τ)을 계산할 수 있다. 달성 가능한 처리율의 최대화를 위해 최적의 에너지 수확률을 결정하기 해법은 다음과 같이 네 단계의 계산 과정을 통하여 구할 수 있다.

Step-1) 평균 종단간 수신 SINR

평균 종단간 SINR(Γ_{end})은 SINR(γ_{end})와 S-R 채널 이득 f에 관한 확률밀도함수를 통하여 수식 (6)과 같이 계산된다. 여기서 $F = |f|^2$이고 $f_F(\cdot)$은 F에 관한 확률밀도함수(pdf)이다.

$$\Gamma_d = \int_0^{\infty} \gamma_{end} f(F) dF \quad (6)$$

Step-2) 아웃티지 확률

P_{out}는 주어진 채널로 신호가 성공적으로 전송되었는지를 판단하는 값으로 사용된다. 에너지 하베스티 중계 네트워크의 아웃티지 확률은 수식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \Pr[\gamma_{end} < \gamma_{th}] \quad (7)$$

Step-3) 종단간 처리효율

무선 통신 환경에서 간섭 신호가 존재할 때 종단간의 처리율(τ_{end})율은 식 (8)과 같이 계산된다[4]. 여기서 $C = 1$ [bits/sec/Hz]으로 가정한다.

$$\tau_{end} = \frac{C(1-\alpha)(1-P_{out})}{2} \quad (8)$$

Step-4) 최적 에너지 수확률

에너지 제한적인 중계 노드는 발신 노드의 정보 신호와 간섭 노드의 송신 신호로부터 에너지를 수확하는 비율(α)는 수식 (9)로부터 결정될 수 있다. 에너지 수확률의 최적해를 α^*라고 할 때 α^*은 중계 노드의 에너지 수준이 결정되면서 동시에 종단간 처리율이 최대가 된다.

$$\alpha^* = \arg max_{\alpha}\left\{\frac{(1-\alpha)(1-P_{out})}{2}\right\} \quad (9)$$

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 에너지 하베스팅 기반 무선 중계 네트워크에서 간섭신호가 존재하는 경우에 처리율을 최대화하기 위하여 중계 노드의 에너지 수확률에 대한 최적해를 계산하고 TSR 기반 에너지 하베스팅 방식에서 간섭이 에너지 효율과 처리효율에 미치는 영향에 관한 최적화 분석 모델을 제안하였다. 제안된 최적화 모델은 아웃티지 확률에 따라 에너지 수확률을 채널 환경에 적응적으로 대응하여 시스템 처리율을 최대화하면서 에너지 제한된 무선 네트워크의 수명을 연장시킬 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 20 16R1A2B4013002

■ 참 고 문 헌 ■

[1] L. Varshney, "Transporting Information and Energy Simultaneously," IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), pp. 1612-1616, 2008

[2] A Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. Kennedy, "Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing," IEEE Trans. Wireless Comm., Vol.12, No. 7, pp. 3622-3636, Jul. 2013

[3] Y. Liu, L. Wang, M. Elkashlan, T. Q. Duong, and A. Nallanathan, "Two-way Relaying Networks with Wireless Power Transfer: Policies Design and Throughput Analysis," IEEE Global Commun. Conf. (CLOBECoM), pp. 4030-4035, 2014

[4] Y. Gu, and S. Aissa, "Interference Aided Energy Harvesting in Decode and Forward Relaying Systems," IEEE international Conf. on Communications (ICC), 2014, pp. 5378-5382.

[5] S. Atapattu, H. Jiang, j. Evans, and C. Tellambura, "Time-Switching Energy Harvesting in Relay Networks," IEEE International Conf. on Commu., pp. 5416-5421, Jun. 2015.