

적응변조를 사용하는 에너지 하베스팅 중계기 네트워크의 처리율

서지환, 홍승근, 이재홍
서울대학교

jihwansuh@snu.ac.kr, hsg403@snu.ac.kr, jhlee@snu.ac.kr

Throughput Maximization of Energy Harvesting Relay Networks with Adaptive Modulation

Jihwan Suh Seung Geun Hong Jae Hong Lee
Seoul National University

요 약

본 논문에서는 하나의 중계기가 하나의 송신기로부터 신호를 받아 증폭한 후에 수신기로 재전송하는 방식으로 송신기와 수신기 사이의 통신을 돕는 네트워크를 고려하였다. 중계기가 독자적인 에너지원이 없는 경우 일정한 양을 에너지를 확보하여 중계에 사용하기 위해서 송신기로부터의 신호를 에너지로 하베스팅하는 모델을 생각하였다. 또한, 나아가 현재의 다양한 무선통신 네트워크에서 사용중인 적응변조를 적용하여 항상 일정 이상의 비트오율을 만족할 수 있는 더욱 현실적인 모델이 되도록 하였다. 이러한 모델에서 정해진 만큼의 시간을 하베스팅에 사용했을 경우 처리율을 구하였으며, 나아가 그 시간을 최적화하여 유도한 처리율을 최대화하는 문제를 만들었다.

1. 서론

적응전송 기법은 무선통신 연구에서 많이 연구되었던 주제로 여러 가지 무선통신에서 사용할 수 있다. 적응전송 기법의 기본적인 아이디어는 채널상태에 따라 송신전력, 변조레벨, 코딩기법, 코딩율 등을 조절하여 원하는 비트오율 (bit error rate, BER)을 만족시키면서 평균적인 스펙트럼 효율을 높일 수 있는 기법이다[1]. 그 중 적응변조는 변조레벨을 조절하여 수신된 신호의 비트당 신호대잡음비 (signal-to-noise-ratio, SNR)를 유지하고 이에 따라 채널상태에 상관없이 원하는 BER 을 만족시킬 수 있는 방법이다[2]. 이런 적응변조 기법은 다양한 네트워크 환경에서 옛날부터 현재까지 계속 연구되고 있으며, 그 예로서는 다중중계기가 있는 무선 네트워크 환경에서 처리율이 분석한 것이다[3].

에너지 하베스팅 기술은 독자적인 에너지원이 없어 에너지의 제약을 받는 네트워크의 수명을 늘리는 방법으로 주목을 받고 있다. 기존에는 태양광 발전 혹은 풍력 발전 등 자연환경으로부터 에너지를 하베스팅하는 방법을 사용하였으나 이러한 방법은 일정한 양을 에너지의 확보를 보장할 수 없기 때문에 무선 네트워크 환경에서 에너지의 제약을 받는 송수신기에 에너지 제약이 없는 송신기가 하베스팅을 위한 신호를 전송함으로써 일정 이상의 에너지를 확보하고 이를 다시 정보전송에 이용하는 simultaneous wireless information and power transfer(SWIPT) 방법이 제안되었다[4]. SWIPT 는 다양하게 응용될 수 있으며, 그 예로 중계기가 에너지에 제약이 있어 송신기로부터 신호를 받아 에너지를 하베스팅하고 그 에너지로 송신기로부터 수신기로의 정보전송을 돕는 방식이

연구되었다[5], [6].

SWIPT 와 에너지 제약을 가진 중계기를 동시에 고려한 기존의 연구에서는 채널용량을 분석하였다. 하지만 현재 셀룰러 시스템인 LTE-A 와 그 외에 다양한 통신 시스템에서 적응변조가 사용되고 있기 때문에 에너지 제약을 가진 중계기가 있는 네트워크에서 적응변조를 적용한 경우에 대한 연구를 진행할 필요가 있다.

본 논문에서는 적응변조가 적용된 경우에 하나의 중계기가 시분할 방식으로 먼저 에너지를 송신기로부터 하베스팅을 하고 남은 시간 동안에 하베스팅한 에너지를 사용하여 송신기에서 수신기로의 정보전송을 중계하는 모델을 고려하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 시스템 모델에 대해 살펴본 후, 3 절에서는 적응변조를 적용한 경우 시스템의 처리율을 구하고 하베스팅을 하는 시간을 최적화하여 이를 최대화하는 문제를 만들었다. 마지막으로 4 절에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

이 논문에서는 하나의 송신기 (S), 하나의 수신기 (D), 하나의 증폭후전송(amplify-and-forward, AF) 기반의 중계기 (R) 로 구성된 시스템을 다루고 있다. 각 노드들은 하나의 안테나를 가지고 있고 송신기와 수신기 사이에 직경로는 없다고 가정한다. 중계기는 독자적인 에너지원이 없다고 가정하고 이에 중계기는 송신기로부터 에너지를 하베스팅하고

이를 사용하여 송신기로부터의 정보신호를 증폭한 후에 수신기로 전송하게 된다. 또한 중계기의 회로에서 소모되는 전력은 송신파위에 비해서 매우 작기 때문에 무시한다고 가정한다. 송신기와 중계기의 송신전력을 각각 P_s , P_R 라고 하자.

송신기와 중계기사이의 채널과 중계기와 수신기사이의 채널 모두 레일리 페이딩 채널을 가정한다. 각 채널계수를 h_1 , h_2 로 두고 두 계수는 평균이 0 이고 분산은 각각 σ_s^2 , σ_d^2 인 복소 가우시안 확률변수이다. 채널계수는 일정한 블록시간 T 동안 일정한 값을 갖고 하나의 블록시간에서 다음 블록시간으로 갈 때 독립적으로 다시 분포에 따라 결정된다고 가정한다.

블록시간 중에서 α 만큼의 해당되는 시간 αT 을 중계기가 송신기로부터 신호를 받아 하베스팅하는데 사용하고 남은 시간의 반 $(1-\alpha)T/2$ 을 송신기가 중계기에 정보전송에 나머지 반 $(1-\alpha)T/2$ 을 중계기가 받은 신호를 증폭하여 수신기에 전송하는데 사용한다.

하베스팅에 사용되는 αT 동안 중계기에서 하베스팅한 에너지 E_h 는 아래와 같다.

$$E_h = \eta P_s |h_1|^2 \alpha T. \quad (1)$$

위 식에서 $0 < \eta < 1$ 는 에너지 하베스팅 회로의 효율이다.

중계기는 하베스팅한 에너지를 $(1-\alpha)T/2$ 의 시간동안 모두 사용하므로 중계기의 송신전력 P_R 는 아래와 같다.

$$P_R = \frac{2E_h}{(1-\alpha)T}. \quad (2)$$

(1)을 (2)에 대입하여 α 에 대해서 표현하면 아래와 같다.

$$\alpha = \frac{P_R}{P_R + 2\eta P_s |h_1|^2}. \quad (3)$$

(3)의 식은 최적의 α 를 찾는 것과 최적의 P_R 을 찾는 것이 동일한 문제임을 보여준다.

송신기에서 보낸 신호에 대한 수신기에서의 SNR 은 아래와 같다[7].

$$\begin{aligned} \gamma_D &= \frac{\frac{P_s |h_1|^2}{\sigma_s^2} \times \frac{P_R |h_2|^2}{\sigma_d^2}}{\frac{P_s |h_1|^2}{\sigma_s^2} + \frac{P_R |h_2|^2}{\sigma_d^2} + 1} \\ &= \frac{P_s P_R |h_1|^2 |h_2|^2}{P_s |h_1|^2 + P_R |h_2|^2 + \sigma_s^2 \sigma_d^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 σ_s^2 과 σ_d^2 는 중계기와 수신기에서 생기는 백색가우시안 잡음의 분산이다.

3. 적응변조와 처리율

본 논문에서는 적응변조의 방법으로 일정 송신전력을 사용하고 채널코딩을 사용하지 않으면서 변조레벨을

변화시키는 M -ary quadrature amplitude modulation (M -QAM)을 사용한다. SNR 을 m_i 개로 나누었을 때, SNR 이 m 번째 ($m=1, \dots, m_i$) 영역에 들어가면 변조레벨은 $M = 2^m$ 이 된다. 원하는 BER 을 만족시키는 영역을 설정하기 위해서, 백색가우시안 채널에서 2^m -QAM 의 BER 의 근사식을 SNR 이 γ 일 때 살펴보면 아래와 같다. [8]

$$P_{b_m}(\gamma) \approx \frac{1}{5} \exp\left(\frac{-3\gamma}{2(2^m-1)}\right). \quad (5)$$

(5)를 이용하게 항상 P_b 보다 낮은 BER 을 만족시키기 위한 적응변조의 역치를 구하면 아래와 같다.

$$\gamma_m = -\frac{2}{3} \ln(5P_b)(2^m-1), \quad m=1, 2, \dots, m_i. \quad (6)$$

(4)의 SNR 이 (6)에 의해서 변조레벨이 m_0 로 결정되었을 때 처리율은 아래와 같다.

$$\tau = m_0 \times \frac{(1-\alpha)T/2}{T_s}. \quad (7)$$

여기서 T_s 는 심볼길이이고 계산의 편의를 위해서 1 로 두자.

이제 (4), (6), (7)을 이용하여 처리율을 최대화하는 최적화 문제를 만들어보면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \tau &= \frac{m_0(1-\alpha)T}{2} \\ \text{s.t. } \gamma_{m_0} &\leq \gamma_D < \gamma_{m_0+1}. \end{aligned} \quad (8)$$

단, $\gamma_0 = 0$, $\gamma_{m_i+1} = \infty$ 이다.

(8)을 푸는 것으로 에너지 제약을 가진 중계기가 있는 네트워크에서 적응변조가 적용된 경우 최대의 처리율을 달성하기 위해서 얼마만큼의 시간을 하베스팅하는데 할당을 해야 하는지 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 하나의 AF 중계기가 송신기와 수신기의 통신을 돕는 협력통신에서 중계기에 에너지 제약이 있고 현재 셀룰러 환경에서 사용중인 적응변조를 사용하는 경우 어떤 처리율을 달성할 수 있는지를 살펴보았으며, 이를 최대화하는 최적화 문제를 만들었다.

감사의 글

이 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2009-0083495, 2011-0017437)

참고문헌

- [1] A. J. Goldsmith and S.-G. Chua, " Variable-rate variable-power MQAM for fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 10, pp. 1218- 1230, Oct. 1997.
- [2] Z. Boudia, A. Ghrayeb, and K. A. Qaraqe, " Adaptive spatial modulation for spectrum sharing systems with limited feedback," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 6, pp. 2001- 2014, June 2015.
- [3] T. Nechiporenko, P. Kalansuriya, and C. Tellambura, " Performance of optimum switching adaptive M-QAM for amplify-and-forward relays," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 5, pp. 2258- 2268, June 2009.
- [4] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, " Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4754- 4767, Nov. 2013.
- [5] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, " Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 7, pp. 3622- 3636, Jul. 2013.
- [6] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, " Wireless-powered relays in cooperative communications: Time-switching relaying protocols and throughput analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 5, pp. 1607- 1622, Jul. 2013.
- [7] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G.W.Wornell, " Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062- 3080, Dec. 2004.
- [8] M.-S. Alouini and A. J. Goldsmith, " Adaptive modulation over Nakagami fading channels," *J. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1/2, pp. 119- 143, May 2000.