

적응변조 시스템에서 동시 무선 정보 및 전력 전송의 전송률-에너지 성능 개선을 위한 SNR 기반 전력 분할 수신기

권 구 형*, 이 충 용^o

An SNR-Based Power Splitting Receiver for Rate-Energy Performance Improvement of SWIPT in Adaptive Modulation Systems

Kuhyung Kwon*, Chungyong Lee^o

요 약

본 논문에서는 적응변조 시스템에서 동시 무선 정보 및 전력 전송 시 전송률-에너지 성능 개선을 위한 Signal-to-Noise Ratio (SNR) 기반 전력 분할 수신기를 제안한다. 제안 기법은 SNR에 따라 power splitting ratio를 결정하여 최대 discrete-rate spectral efficiency 및 최대 평균 에너지 수확량을 달성한다. 본 논문에서는 제안 기법의 discrete-rate spectral efficiency가 기존 적응변조 기법이 갖는 최대 성능과 동일함을 보이고, Rayleigh 페이딩 채널에서의 평균 에너지 수확량을 수식적으로 분석한다. 모의실험을 통해 제안 기법의 discrete-rate spectral efficiency를 기존 적응변조 기법과 비교하며, 도출된 평균 에너지 수확량을 실험값과 비교하여 성능에 대한 수식적 분석이 타당함을 보인다.

Key Words : SWIPT, adaptive modulation, spectral efficiency, energy harvesting, power splitting

ABSTRACT

We propose an SNR-based power splitting receiver structure for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) in adaptive modulation systems which achieves improved rate-energy performance. The proposed scheme determines a power splitting ratio in order to achieve both the maximum discrete-rate spectral efficiency and maximum average harvested energy. In this paper, we verify that the proposed scheme has the same discrete-rate spectral efficiency that the conventional adaptive modulation systems can achieve, and derive the average harvested energy in the Rayleigh fading channel. We compare the discrete-rate spectral efficiency of the proposed scheme with that of the conventional adaptive modulation systems and verify that the analyzed average harvested energy performance is valid comparing with the simulation results.

* 본 연구는 한국연구재단 논문연구과제(NRF-2015R1D1A1A01058644) 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, khkwon@csp.yonsei.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, cylee@yonsei.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-07-207, Received July 26, 2017; Revised September 29, 2017; Accepted September 29, 2017

I. 서 론

최근 사물인터넷(Internet of Things; IoT) 서비스에 대한 관심이 증가하고 이를 실현하기 위한 관련 연구가 활발히 진행됨에 따라, IoT 기기의 유한한 배터리 용량을 극복하기 위한 radio frequency (RF) 신호 기반의 무선 전력 전송에 대한 연구가 주목받고 있다^[1]. RF 신호를 이용한 무선 전력 전송은 타 기법들에 비해 기존 데이터 시스템을 바탕으로 쉽게 구현할 수 있다는 장점을 갖는다. 특히, 직교 주파수 분할 시스템에서 주기적 전치 부호(cyclic prefix) 신호의 전력을 수확하거나 전이중(full-duplex) 시스템에서 발생하는 자기 간섭(self-interference) 전력을 수확하는 등 기존 시스템에서 데이터 전송을 뿐 아니라 에너지를 추가적으로 얻기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^[2,3]. 하지만 기존 데이터 시스템들 중 적응변조(adaptive modulation) 시스템에서의 데이터 및 전력 동시 전송(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer; SWIPT)과 관련된 연구는 미비하다.

적응변조 기법은 채널 환경에 따라 유동적인 변조 차수를 사용함으로써 기존의 고정된 변조 차수(modulation order)를 사용하는 시스템 대비 전송률 향상을 위하여 제안된 바 있으며 현재 long term evolution (LTE) 시스템에서도 사용되고 있다^[4]. 적응 변조 기법에서 변조 차수를 결정하는 요소는 수신 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio; SNR)로, 주어진 목표 비트 오류율(Bit Error Rate; BER)에 대하여 특정 변조 차수를 사용할 수 있는 수신 신호 대 잡음비는 일정 범위를 갖는다는 것이 잘 알려져 있다.

본 논문에서는 채널 환경에 따라 변조 차수가 결정되었을 경우 해당 범위 내의 수신 신호 대 잡음비에 대하여 그 값의 크고 작음은 데이터 전송률의 향상/손실과 무관하다는 점에 착안하여, 수신 신호 대 잡음비에 따라 power splitting ratio를 결정하는 SWIPT 수신기를 제안한다. 제안 기법은 기존 적응변조 시스템과 동일한 discrete-rate spectral efficiency를 유지하는 동시에 에너지 측면에서 추가적인 성능을 얻는다. 본론에서는 시스템 모델 및 적응변조 기법에 대하여 서술하고 제안 기법이 기존과 동일한 discrete-rate spectral efficiency를 가짐을 보이며, 평균 에너지 수확량 성능을 Rayleigh 페이딩 채널 가정 하에 분석한다. 또한 모의실험을 통해 제안 기법의 전송률 성능을 확인하고, 평균 에너지 수확량 성능의 이론값과 실험 값이 일치함을 검증한 후 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델 및 적응변조 기법

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 단일 안테나 기지국(Base Station; BS)이 하나의 단일 안테나 단말(User Equipment; UE)에 SWIPT를 지원하는 시스템을 가정한다. 기지국의 평균 송신 전력을 P_{Tx} 라 할 때, 단말의 수신 신호 $y(t)$ 는 식 (1)과 같다.

$$y = \sqrt{P_{Tx}}hs + n_A \quad (1)$$

식 (1)에서 h 는 기지국-단말 간 하향 링크 Rayleigh 채널을 나타내며, h 는 평균 0, 분산 1의 복소 가우시안 랜덤변수이다. s 는 1의 평균 전력을 갖는 송신 심볼이며, n_A 는 단말 수신 안테나에서 더해지는 부가 백색 가우시안 잡음으로 평균 0 및 분산 σ_A^2 의 통계적 특성을 갖는 가우시안 랜덤변수이다.

그림 1의 SNR 기반 power splitting SWIPT 수신기 구조에서 ρ 는 power splitting ratio를 나타내며 $0 \leq \rho \leq 1$ 의 값을 갖는다. 수신 신호의 ρ 에 해당하는 비율은 데이터 수신기로 입력되며, 데이터 디코더에서의 부가 잡음 n_D 를 고려한 신호는 식 (2)와 같다.

$$y_D = \sqrt{\rho}y + n_D = \sqrt{\rho P_{Tx}}hs + \sqrt{\rho}n_A + n_D \quad (2)$$

식 (2)에서 n_D 는 평균 0 및 분산 σ_D^2 의 가우시안 랜덤변수를 나타낸다. 일반적으로 수신 안테나에서 더해지는 잡음은 데이터 디코딩 과정에서 발생하는 processing 잡음에 비해 그 크기가 매우 작으므로, 본 논문에서는 $\sigma_A^2 \approx 0$ 를 가정한다^[5].

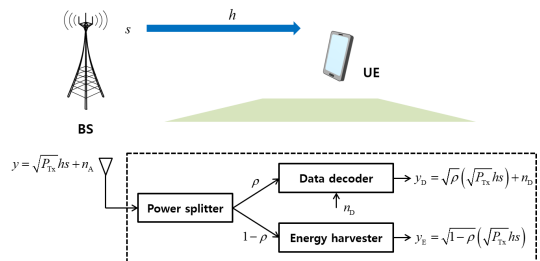


그림 1. 단일 기지국 및 단일 단말로 이루어진 시스템 모델
Fig. 1. System with a single base station and a single user equipment

2.2 적응변조 기법

적응변조 기법은 채널 환경 및 그에 따른 수신 신호 대 잡음비에 따라 송신 심볼의 변조 차수를 결정하는 송수신 기법으로, 고정된 변조 차수를 사용하는 기존 통신 시스템 대비 전송률을 증대하는 기법이다. 본 논문에서는 실제 시스템에서의 구현을 고려하여 이산 변조 차수 $M_k = 2^{2k}$ ($k = 0, 1, \dots, K_{\max}$)의 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation; QAM) 신호를 전송하는 적응변조 시스템을 고려한다. 변조 차수 M_k ($k \geq 1$)의 심볼은 단일 심볼 당 $2k$ 비트에 해당하는 정보를 포함하며, $k = 0$ 의 경우 데이터를 전송하지 않는다. 이산 변조 차수는 최대 $M_{\max} = 2^{2K_{\max}}$ 로 제한된다.

평균 비트 오류율의 상한값은 변조 차수 및 평균 수신 신호 대 잡음비 $\bar{\gamma}$ 에 의하여 결정되며, 심볼 당 짝수 개의 비트를 전송하는 정사각 심볼 성상도를 갖는 M_k -QAM 기법에 대한 평균 비트 오류율 상한값은 식 (3)과 같다.

$$BER \leq 0.2 \exp\left(-1.5 \frac{\bar{\gamma}}{M_k - 1}\right) \quad (3)$$

식 (3)의 우변은 평균 비트 오류율의 상한값인 P_b 에 대한 근삿값을 나타낸다.

$$P_b \approx 0.2 \exp\left(-1.5 \frac{\bar{\gamma}}{M_k - 1}\right) \quad (4)$$

식 (4)를 통해 M_k 의 변조 차수를 갖는 송신 심볼에 대하여 목표 비트 오류율 이하의 오류율을 만족하기 위한 수신 신호 대 잡음비의 문턱값을 구할 수 있으며, 이는 식 (5)와 같다.

$$\Gamma_k = \frac{M_k - 1}{1.5} \ln \frac{1}{5P_b} \quad (5)$$

주어진 채널에 대한 신호 대 잡음비 γ_i 가

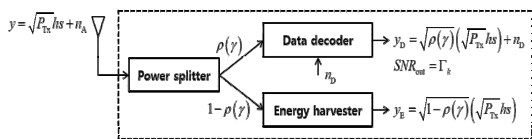


그림 2. 제안하는 SNR 기반 전력 분할 SWIPT 수신기 구조
Fig. 2. Proposed SNR-based power splitting SWIPT receiver structure

$\Gamma_k \leq \gamma_i < \Gamma_{k+1}$ 의 범위를 만족할 때, P_b 이하의 비트 오류율을 보장하는 심볼 당 비트 수는 최대 $\log_2 M_k = 2k$ 로 제한된다. 이 때, 데이터 디코더에서 $(\gamma_i - \Gamma_k)$ 의 수신 신호 대 잡음비에 해당하는 수신 신호의 일부 전력은 추가적인 전송률 향상에 기여하지 못한다. 다음 장에서는 이러한 적응변조 시스템에서 주어진 채널에 대한 최대 전송률을 만족하는 동시에 수신 신호의 잉여 전력을 수확하는 기법을 제안한다.

III. SNR 기반 전력 분할 SWIPT 수신기

3.1 제안 기법의 수신기 구조

본 논문에서 제안하는 수신기 구조는 그림 2와 같다. 이 때, 수신 안테나에서의 신호 y 는 식 (6)과 같다.

$$y = \sqrt{P_{Tx}}hs + n_A \quad (6)$$

$\sigma_A^2 \approx 0$ 를 가정했을 때, power splitter의 입력 신호 대 잡음비는 식 (7)과 같다.

$$SNR_{\in} = \frac{P_{Tx}|h|^2}{\sigma_D^2} = \gamma \quad (7)$$

단말 수신기는 power splitter를 통해 수신 전력의 ρ ($0 \leq \rho \leq 1$)의 비율에 해당하는 신호를 데이터 디코딩에 이용하며, 나머지 $(1 - \rho)$ 비율의 전력에 해당하는 수신 신호는 그 에너지를 수확한다. ρ 에 따른 데이터 디코더 및 에너지 수확기의 입력 신호 모델은 각각 식 (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_D = \sqrt{\rho}(\sqrt{P_{Tx}}hs) + n_D \quad (8)$$

$$y_E = \sqrt{1 - \rho}(\sqrt{P_{Tx}}hs) \quad (9)$$

식 (8)로부터 power splitter 출력 신호 대 잡음비를 ρ 에 따른 식으로 표현할 수 있으며, 이는 식 (10)과 같다.

$$SNR_{out} = \rho \frac{P_{Tx}|h|^2}{\sigma_D^2} \quad (10)$$

한편, 에너지 수확기에서의 단위 시간 당 에너지 수확량은 식 (11)과 같다.

$$P_E = (1 - \rho) P_{Tx} |h|^2 \quad (11)$$

즉, 수신 신호 대 잡음비가 $\Gamma_k \leq \gamma < \Gamma_{k+1}$ 을 만족할 경우 변조 차수는 M_k 으로 결정되며, 이를 유지하는 범위 내에서 ρ 의 값이 최소일 때 최대의 에너지 수확량을 얻을 수 있다. 따라서 에너지 수확량을 최대화하는 ρ 및 그에 따른 SNR_{out} 은 각각 식 (12), (13)과 같다.

$$\rho(\gamma) = \frac{\Gamma_k}{\gamma} = \frac{\sigma_D^2}{P_{Tx} |h|^2} \Gamma_k \quad (12)$$

$$SNR_{out} = \Gamma_k \quad (13)$$

다음 절에서는 제안 기법의 discrete-rate spectral efficiency가 기존의 적응변조 시스템과 동일함을 보이고, Rayleigh 페이딩 채널에서 평균 에너지 수확량 성능을 분석한다.

3.2 제안 기법의 Discrete-Rate Spectral Efficiency

Discrete-rate spectral efficiency는 적응변조 기법의 성능 지표로, 채널 환경에 따른 전송 비트 수에 의해 결정되는 전송률 성능이다. 수신 신호 대 잡음비에 따른 discrete-rate spectral efficiency는 식 (14)와 같다.

$$R = \sum_{k=0}^{K_{max}} (\log_2 M_k) \int_{\Gamma_k}^{\Gamma_{k+1}} p(\gamma) d\gamma \quad (14)$$

식 (14)에서 $p(\gamma)$ 는 채널에 따라 결정되는 수신 신호 대 잡음비에 대한 확률 밀도 함수이며, 최대 변조 차수는 K_{max} 로 제한되므로 $\Gamma_{K_{max}+1} = \infty$ 이다. 제안하는 시스템의 수신 신호 대 잡음비가 $\Gamma_k \leq \gamma < \Gamma_{k+1}$ ($k=0,1,\dots,K_{max}$)을 만족할 경우, 식 (13)의 power splitter의 출력 신호 대 잡음비는 식 (15)를 만족한다.

$$\Gamma_k \leq SNR_{out} < \Gamma_{k+1}, \quad (k=0,1,\dots,K_{max}) \quad (15)$$

즉, 제안 기법은 동일 채널 조건에서 기존 기법과 같은 길이인 $\log_2 M_k$ 의 비트열을 전송하므로 기존 적응변조 시스템의 discrete-rate spectral efficiency 성능을 유지한다.

3.3 제안 기법의 Average Harvested Energy

본 절에서는 제안 수신기의 평균 에너지 수확량을 Rayleigh 페이딩 채널에서 수식적으로 분석한다. 제안 수신기는 수신 전력의 $(1 - \rho)$ 에 해당하는 비율을 수확하므로, 평균 에너지 수확량 성능은 식 (16)과 같다.

$$\bar{E} = E\{P_E\} \quad (16)$$

식 (16)에 식 (11) 및 식 (12)를 대입하여 도출한 평균 에너지 수확량은 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \sum_k E\{P_{Rx} - \sigma_D^2 \Gamma_k\} \\ &= \sigma_D^2 \sum_{k=0}^{K_{max}-1} \int_{\Gamma_k}^{\Gamma_{k+1}} (\gamma - \Gamma_k) p(\gamma) d\gamma \\ &\quad + \sigma_D^2 \int_{\Gamma_{K_{max}}}^{\Gamma_{K_{max}+1}} (\gamma - \Gamma_{K_{max}}) p(\gamma) d\gamma \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)에서 첫 번째 항은 $0 \leq k \leq K_{max} - 1$ 에 대한 변조 차수 M_k 의 심볼을, 두 번째 항은 최대 변조 차수의 심볼을 전송할 경우 얻을 수 있는 평균 에너지 수확량을 의미한다. 식 (17)의 첫 번째 항을 A 라 할 때, A 에 Rayleigh 페이딩 채널의 수신 신호 대 잡음비 γ 에 대한 확률분포를 대입하면 식 (18)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A &= \sigma_D^2 \sum_{k=0}^{K_{max}-1} \left\{ \int_{\Gamma_k}^{\Gamma_{k+1}} \gamma \frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \exp\left(-\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \gamma\right) d\gamma \right. \\ &\quad \left. + \Gamma_k \int_{\Gamma_k}^{\Gamma_{k+1}} \left(-\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}}\right) \exp\left(-\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \gamma\right) d\gamma \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에서 적분식의 연산을 위하여 $x = (\sigma_D^2 / P_{Tx}) \gamma$ 로 치환하면 식 (19)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= \sigma_D^2 \sum_{k=0}^{K_{max}-1} \left\{ \int_{\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \Gamma_k}^{\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \Gamma_{k+1}} \frac{P_{Tx}}{\sigma_D^2} x \exp(-x) dx \right. \\ &\quad \left. + \Gamma_k \int_{\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \Gamma_k}^{\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \Gamma_{k+1}} \exp\left(-\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \gamma\right) d\gamma \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)를 제안 기법의 평균 에너지 수확량 성능을 의미하는 식 (17)의 첫 번째 항에 대입하면 식 (20)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{E} = & \sigma_D^2 \sum_{k=0}^{K_{\max}-1} \left\{ \left(-\frac{P_{Tx}}{\sigma_D^2} \right) (x+1) \exp(-x) \right\}_{x = \left(\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \right) \Gamma_{k+1}}^{x = \left(\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \right) \Gamma_k} \\ & + \Gamma_k \exp \left(-\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \gamma \right) \Bigg|_{\gamma = \Gamma_k}^{\gamma = \Gamma_{k+1}} \Bigg\} \\ & + P_{Tx} \exp \left(-\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \Gamma_{K_{\max}+1} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)의 연산 결과, 제안 기법의 평균 에너지 수확량 성능은 최종적으로 식 (21)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{E} = & P_{Tx} \\ & - \sigma_D^2 \sum_{k=0}^{K_{\max}-1} (\Gamma_{k+1} - \Gamma_k) \exp \left(-\frac{\sigma_D^2}{P_{Tx}} \Gamma_{k+1} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)에서 첫 번째 항 P_{Tx} 는 Rayleigh 페이딩 채널에서 수신 신호의 모든 전력을 수확하는 시스템 ($\rho=0$)에서 달성할 수 있는 평균 에너지 수확량 성능을 의미한다. 두 번째 항은 적응변조 기법을 이용한 데이터 송신 과정에서 소비되는 에너지를 의미하며, M_k 의 변조 차수를 갖는 심볼에 대한 SNR 범위의 양 끝 값의 차에 의하여 결정된다.

IV. 모의실험

모의실험에서는 표 1의 실험 환경에서 제안 기법의 discrete-rate spectral efficiency가 기존의 적응변조 시스템과 동일함을 보이고, 평균 에너지 수확량의 분석값이 타당함을 실험적으로 확인한다. 실험 결과, 제안하는 SNR 기반의 power splitting SWIPT 수신기는 SNR과 무관하게 고정된 power splitting ratio를 사용하는 기존 SWIPT 수신기에 비해 높은 discrete-rate spectral efficiency 성능을 갖는다. 또한, 제안 기법은 적응변조 시스템이 가질 수 있는 최대 전송률 성능을 갖는다. 제안 기법은 높은 신호 대 잡음비 구간에서

표 1. 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Target BER	10^{-3}
Maximum modulation order	$M_{\max} = 2^6$
Channel	Rayleigh fading channel

적응변조 시스템에서의 최대 변조 차수의 제한으로 인하여 그 성능이 심볼 당 최대 6 비트에 수렴하는 특징을 갖는다.

그림 4는 제안하는 SNR 기반 power splitting SWIPT 수신기에서 얻을 수 있는 평균 에너지 수확량을 송신 신호 대 잡음비에 따라 나타낸 그래프이다. 그래프에서 점선에 해당하는 비교군은 제안 기법에서 $\rho=0$ 의 특수한 경우를 나타내며, 이는 에너지 수확 (energy harvesting; EH) 시스템을 의미한다. 그래프의 반점선에 해당하는 비교군은 고정된 power splitting ratio $\rho=0.5$ 를 사용하는 기존 SWIPT 기법을 의미한다. 그림 3 및 그림 4를 통해 제안 기법은 SNR에 무관하게 고정된 power splitting ratio를 사용하는 기존 SWIPT 수신기 대비 데이터 전송률 및 평균 에너지 수확량 측면에서 모두 우수한 성능을 나타

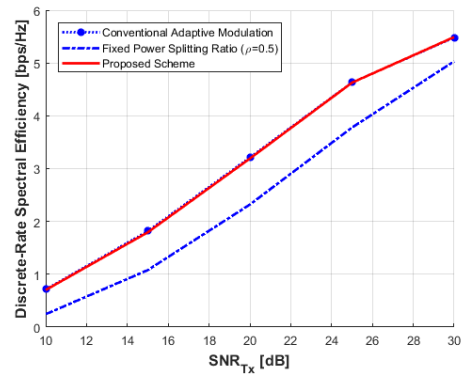


그림 3. $K_{\max} = 3$ 의 적응변조 시스템에서의 discrete-rate spectral efficiency
Fig. 3. Discrete-rate spectral efficiency in adaptive modulation system with $K_{\max} = 3$

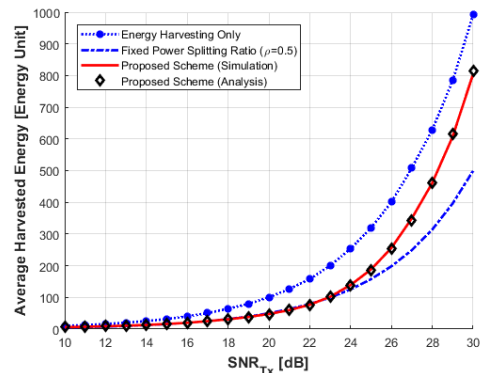


그림 4. $K_{\max} = 3$ 의 적응변조 시스템에서의 평균 에너지 수확량
Fig. 4. Average harvested energy in adaptive modulation system with $K_{\max} = 3$

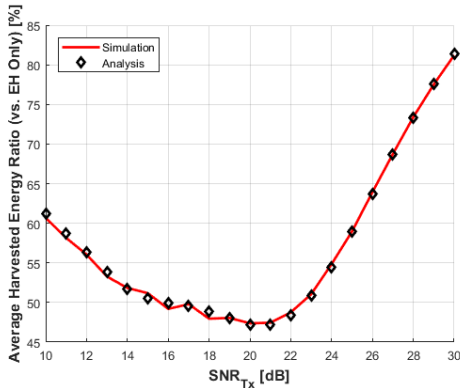


그림 5. $K_{\max} = 3$ 의 적응변조 시스템에서 제안 기법의 에너지 수확 시스템 대비 성능비

Fig. 5. Ratio of the energy performance of the proposed scheme compared with energy harvesting-only system in adaptive modulation system with $K_{\max} = 3$

냄을 확인할 수 있다. 그림 5는 $K_{\max} = 3$ 에 대하여 $\rho = 0$ 시스템 대비 제안 기법의 평균 에너지 수확량의 비율을 백분율로 나타낸 그래프이다. 그림 4와 그림 5를 통해 본문에서 분석한 제안 시스템의 평균 에너지 수확량 성능에 대한 이론값이 실험값과 일치함을 검증하였다. 또한, 제안 기법은 기존 적응변조 시스템이 갖는 최대의 전송률 성능을 유지함과 동시에 송신 신호 대 잡음비에 따라 기존의 에너지 수확 시스템 대비 최소 약 45% 및 그 이상에 해당하는 평균 에너지 수확량 성능을 추가적으로 얻을 수 있다.

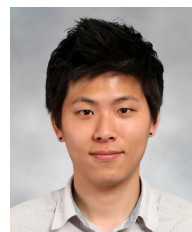
V. 결론

본 논문에서는 채널 환경에 의해 결정되는 수신 SNR에 따라 power splitting ratio를 결정하는 SWIPT 수신기를 제안하였다. Discrete-rate spectral efficiency에 대한 수식 분석을 통해 제안 기법이 적응변조 시스템의 최대 성능과 동일한 성능을 가짐을 보였다. 모의실험에서는 기존 적응변조 시스템 및 고정된 power splitting ratio를 갖는 종래의 SWIPT 수신기에 비해 전송률 측면에서 높은 성능을 나타냄을 확인하였다. 또한, Rayleigh 페이딩 채널에서 제안 기법의 평균 에너지 수확량 성능을 수식적으로 분석하였으며, 모의실험 결과와의 비교를 통해 수식 분석이 타당함을 검증하였다.

References

- [1] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 5, pp. 1989-2001, May 2013.
- [2] M. Maso, S. Lakshminarayana, T. Q. S. Quek, and H. V. Poor, "The price of self-sustainability for block transmission systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 8, pp. 1549-1562, Aug. 2015.
- [3] K. Kwon, H. Na, and C. Lee, "Sum-rate enhancement scheme with energy recycling in full-duplex two-user cellular system," in *Proc. 2016 IEIE Fall Conf.*, pp. 254-257, Daegu, Republic of Korea, Nov. 2016.
- [4] 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.
- [5] H. Chen, Y. H. Li, Y. X. Jiang, Y. Y. Ma, and B. Vucetic, "Distributed power splitting for SWIPT in relay interference channels using game theory," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 410-420, Jan. 2015.

권 구 형 (Kuhyung Kwon)



2013년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학과 학사 졸업
 2013년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합 과정
 <관심분야> 통신 신호처리, MIMO, SWIPT

이 충 용 (Chungyong Lee)



1987년 : 연세대학교 전자공학과 학사 졸업

1989년 : 연세대학교 전자공학과 석사 졸업

1995년 : Georgia Institute of Technology 전자공학과 박사 졸업

1996년~1997년 : 삼성전자 선임연구원

1997년~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 교수

<관심분야> 통신 신호처리, MIMO, 협력통신 시스템, 군사전자