

# 에너지 수확 및 브로드캐스팅 중계기를 가진 자유 공간 광 통신에서의 전력 할당과 보안 아웃티지 확률 분석

정 대 교\*, 김 동 우°

## Power Allocation and Secrecy Outage Analysis in Free-Space Optics Communications with an Energy Harvesting and Broadcasting Relay

Dae-Kyo Jeong\*, Dongwoo Kim°

### 요 약

자유 공간 광(free-space optics, FSO) 통신에서 에너지 수확은 태양 전지판(solar panel)을 이용한 광검출기(photodetector)로 에너지를 수확하면서 동시에 통신을 할 수 있는 자유 공간 광 통신 시스템이다. 본 논문에서는 자유 공간 광 통신을 이용한 무선 통신과 에너지 수확(energy harvesting) 및 브로드캐스팅 릴레이 시스템에 대한 파워 할당과 보안 아웃티지 확률(secrecy outage probability) 분석하고 최적 파워 할당을 구해본다.

**Key Words** : Free-Space Optical (FSO) communication, Energy harvesting, Secrecy outage probability

### ABSTRACT

For energy harvesting in free-space optical communications, a solar panel is used as a photodetector. It is capable of simultaneous data transmission and energy harvesting in free-space optical communications systems. In this letter, we present secrecy outage performance of simultaneous

energy harvesting and broadcasting relay system and provide an optimal power allocation at the relay.

### I. 서 론

최근 레이저를 이용하는 자유 공간 광 통신 기술에 대하여 큰 관심 모아지고 있다. 자유 공간 광 통신 기술은 빠른 전송 속도와 빠른 네트워크 구축 시간 등 여러 가지 장점들이 있음에도 불구하고 안개와 같은 기상 조건에 따른 전송 성능의 신뢰성 문제를 해결하지 못해 지금까지 통신업계에서 외면을 받아 왔다. 그러나 최근 업체들의 기술혁신으로 이러한 기술적인 문제점들이 점차 개선되고 있다<sup>1)</sup>.

자유 공간 광 통신 분야에서 최근에 이루어진 연구 중 태양 전지판을 이용해 제작한 광-검출기로 광 신호를 수신하여 데이터 신호를 얻고 동시에 전기에너지로 전환하는 시스템에 대해 이루어진 논문이 발표되었다<sup>2,3)</sup>. 이러한 자유 공간 광 통신을 이용한 광 신호를 수신하여 데이터 신호를 얻고 동시에 에너지 수확을 하는 릴레이를 이용한 네트워크에서 보안 아웃티지를 분석한 논문도 있다<sup>4)</sup>. 그러나 기존 연구는 릴레이에서 브로드캐스팅 환경을 고려하지 않은 연구이다. 본 논문의 분석 대상 시스템은 릴레이에서 브로드캐스팅 환경을 고려하는 것으로, 첫 번째 홉(hop)은 자유 공간 광 통신이 이루어지는 무선 백혈망으로 간주하고 두 번째 홉은 무선 주파수를 이용하여 브로드캐스팅이 이루어지는 액세스망으로 간주하는 이동통신 백혈/액세스망 시스템에 대한 모형이다. 이러한 시스템에서는 릴레이에서 데이터 수신을 위한 파워와 에너지 수확을 위한 파워가 적절하게 분배되어야 한다. 예를 들면, 데이터 수신을 위한 파워의 비율을 늘리면 에너지 수확을 위한 파워가 낮아져 브로드캐스팅을 위한 파워가 줄어들지만, 도청 노드의 평균 수신 파워도 함께 낮아지게 된다. 본 논문에서는 자유 공간 광 통신 채널의 매개변수, 무선 주파수를 사용하는 채널의 평균 파워, 소스의 송신파워 그리고 사용자 수의 함수로 표현되는 보안 아웃티지 확률을 최소로 하는 릴레이에서의 최적 파워 할당을 구하기 위한 모형을 제시하고, 첫 번째 홉의 수신 신호-대-잡음비와 액세스망을 통해 브로드캐스팅 되는 사용자의 수에 따른 릴레이의 최적 파워 할당을 각각 수치적으로 구해보

\* 본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : Hanyang University Department of Electronics and Communications Engineering, dkjeong@wnl.hanyang.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Hanyang University Division Of Electrical Engineering, dskim@hanyang.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2017-06-175, Received June 20, 2017; Revised July 14, 2017; Accepted July 14, 2017

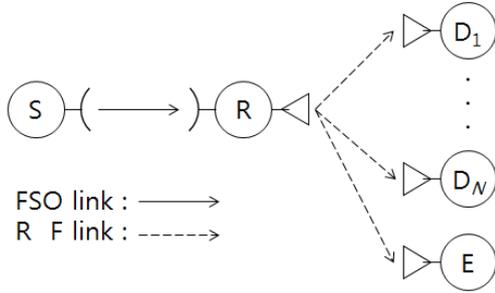


그림 1. 시스템 모델  
Fig. 1. System model

고, 최적 파워 할당의 경향을 알아보고자 한다.

### II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 가정한 시스템 모델이다. 소스(S)와 릴레이(R) 사이의 링크는 자유 공간 광 통신으로 구성되고 릴레이와 다수의 사용자(D<sub>1</sub>~D<sub>N</sub>) 그리고 도청노드(E) 사이의 링크는 무선 주파수 대역을 이용한 통신으로 구성되어있다.

소스가 자유 공간 광 통신방법을 이용하여 전송해서 릴레이가 수신했을 때 수신 신호-대-잡음비는  $\gamma_{SR}$ 로 표현한다. 여기서  $\gamma_{SR}$ 의  $a(0 \leq a \leq 1)$  비율만큼은 수신 신호를 복호하는데 사용하고  $1-a$  비율만큼은 에너지 수확에 사용한다. 에너지 수확에 의해 축적된  $(1-a)\gamma_{SR}$  파워는 릴레이가 다수의 사용자에게 브로드캐스팅 할 때 사용되어진다. 릴레이에서 다수의 사용자 사이의 채널을  $h_1, h_2, \dots, h_N$ 으로 가정했을 때 릴레이와 다수의 사용자의 실질적인 수신 신호-대-잡음비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{RD} = (1-a)\gamma_{SR} \min(|h_n|^2/\sigma_n^2), \quad (1)$$

위 식에서  $n=1,2,\dots,N$  이고  $\sigma_n^2$ 은 다수의 사용자의 수신 잡음 파워이다. 릴레이에서는 복호-후-전달 (decode-and-forward, DF) 방식을 사용한다고 가정하면 소스와 다수의 사용자 사이의 단-대-단 신호-대-잡음비는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma_{SRD} = \min(a\gamma_{SR}, \gamma_{RD}). \quad (2)$$

릴레이와 도청노드 사이의 채널을  $h_E$ 이라고 가정했을 때 릴레이가 브로드캐스팅한 신호를 도청노드가 수신할 때 수신 신호-대-잡음비는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma_{RE} = (1-a)\gamma_{SR}|h_E|^2/\sigma_E^2, \quad (3)$$

위 식에서  $\sigma_E^2$ 은 도청노드의 수신 잡음 파워이다.

소스에서 다수의 사용자까지의 단-대-단 수신 신호-대-잡음비인 식 (2)와 릴레이에서 도청노드 사이의 수신 신호-대-잡음비인 식 (3)을 이용하여 전체 시스템의 보안 전송률(secretcy rate)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C = \left[ \log_2 \left( \frac{1 + \gamma_{SRD}}{1 + \gamma_{RE}} \right) \right]^+, \quad (4)$$

위 식에서  $[\cdot]^+ = \max(\cdot, 0)$  이다.

$\gamma_{SR}$ 는 감마-감마 페이딩(Gamma-Gamma fading)을 가정한다.  $\gamma_{SR}$ 의 확률밀도함수는 다음과 같이 표현된다<sup>51</sup>.

$$f_{\gamma_{SR}}(x) = \frac{(\alpha\beta/\sqrt{\gamma_{SR}})^{\frac{\alpha+\beta}{2}} x^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times K_{\alpha-\beta} \left( 2\sqrt{\alpha\beta} \sqrt{\frac{x}{\gamma_{SR}}} \right), \quad (5)$$

위 식에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 페이딩 매개변수이고  $\bar{\gamma}_{SR}$ 은 평균 신호-대-잡음비를 나타내며  $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 은 제2종 변형 베셀 함수를 나타낸다. 릴레이에서 다수의 사용자 그리고 도청노드 사이의 채널은 레일리 페이딩(Rayleigh fading)으로 가정한다.

### III. 보안 아웃티지 확률 분석

식 (4)와 같이 전체 시스템의 보안 전송률이 주어졌을 때 목표 보안 전송률  $R$  보다 보안 전송률이 작을 경우 아우티지가 발생한다. 이와 같은 경우에 보안 아웃티지 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr \left\{ \log_2 \left( \frac{1 + \gamma_{SRD}}{1 + \gamma_{RE}} \right) < R \right\} \\ &= \Pr \left\{ T - 2^R (1-a) |h_E|^2/\sigma_E^2 < \frac{2^R - 1}{\gamma_{SR}} \right\} \\ &= \int_0^\infty F_\Omega \left( \frac{2^R - 1}{x} \right) f_{\gamma_{SR}}(x) dx, \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서  $T = \min(a, (1-a)\min(|h_n|^2/\sigma_n^2))$ 이고  $\Omega = T - 2^R (1-a) |h_E|^2/\sigma_E^2$  이며  $F_\Omega(\cdot)$ 는  $\Omega$ 의 누적분포함수 이다.  $\Omega$ 의 누적분포함수를 구하기 위해서는

$$F_{\Omega}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{w_E} e^{-\frac{N\sigma_x^2}{(1-a)w_n}} \left( 1 - e^{-\left(\frac{N\sigma_n^2}{w_n\sigma_E^2} + \frac{1}{w_E}\right) \frac{(a-x)\sigma_E^2}{2^R(1-a)}} \right), & x < a, x \geq 0 \\ 1, & x \geq a, x \geq 0 \\ e^{\frac{x\sigma_E^2}{2^R(1-a)w_E} - \frac{1}{w_E} e^{-\frac{N\sigma_x^2}{(1-a)w_n}} \left( \left(\frac{N\sigma_n^2}{w_n\sigma_E^2} + \frac{1}{w_E}\right) \frac{x\sigma_E^2}{2^R(1-a)} - e^{-\left(\frac{N\sigma_n^2}{w_n\sigma_E^2} + \frac{1}{w_E}\right) \frac{(a-x)\sigma_E^2}{2^R(1-a)}} \right)}, & x < 0. \end{cases} \quad (8)$$

먼저  $T$  에 대한 누적분포함수를 알아야 한다.  $T$  에 대한 누적분포함수는 다음과 같다.

$$F_T(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{x}{1-a} \sum_{n=1}^N \frac{\sigma_n^2}{w_n}}, & 0 \leq x \leq a \\ 1, & x > a. \end{cases} \quad (7)$$

위 식에서  $w_n$  은 릴레이에서  $n$  번째 사용자 간의 평균 채널 파워를 의미한다. 식 (7)을 이용하여  $\Omega$ 의 누적분포함수를 구하면 식 (8)과 같다. 식 (5)와 식 (8)를 식 (6)에 대입하면 보안 아웃티지 확률을 얻을 수 있다.

#### IV. 릴레이의 파워 할당 방법

릴레이에서 소스로부터 받은 광 신호를  $a$  만큼은 신호를 복호하기 위해서 사용하고  $1-a$  만큼은 다수의 사용자에게 전송할 때 필요한 파워를 에너지 수확한다.  $a$ 가 커지면 릴레이가 신호를 복호하는데 유리하고 도청노드의 수신 신호-대-잡음비가 작아져서 도청을 방해 할 수 있지만 다수의 사용자에게 전송하기 위한 파워가 부족해져서 다수 사용자가 신호를 복호하는데 불리하다. 이러한 현상 때문에 최적의  $a$  값을 찾아야 한다. 본 논문에서 최적의  $a$  값은 전체 시스템의 보안 아웃티지 확률을 최소화 하는  $a$  값이 최적의  $a$  값이다.  $a$  값을 구하는 식은 다음과 같다.

$$a^* = \operatorname{argmin}(P_{out}), 0 \leq a \leq 1. \quad (9)$$

최적의  $a$  값은 경사 하강법(gradient descent)을 이용하여 얻을 수 있다<sup>6)</sup>.

#### V. 시뮬레이션 및 수치적 결과

본 논문에서 시뮬레이션 및 수치적 결과를 관찰하기 위하여 자유 공간 광 통신 링크에 대한 페이딩 파라미터  $\alpha = 2.901, \beta = 1.042$ 로 릴레이에서 다수의 사용

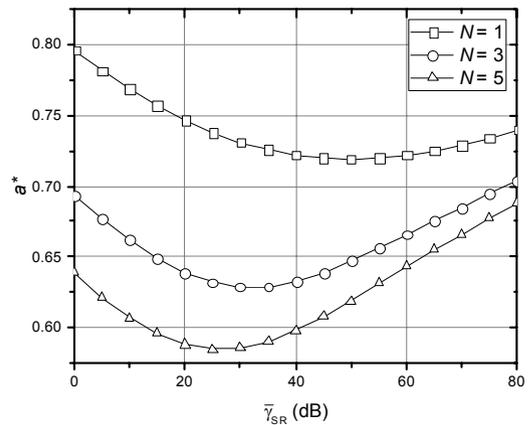


그림 2. 사용자의 수와 소스와 릴레이 사이 링크의 평균 신호-대-잡음비에 따른 릴레이에서의 최적 파워 할당  
Fig. 2. The optimal power allocation in the relay according to the number of users and the average signal-to-noise ratio of the link between the source and the relay

자간 평균 채널 파워는  $w_n = 10$ 으로 릴레이에서 도청 노드사이의 평균 채널 파워는  $w_E = 0.1$ 로 설정한다. 수신 잡음 파워는  $\sigma_n^2 = \sigma_E^2 = 1$ 로 설정한다. 그리고 목표 보안 전송률은  $R = 1$ 로 설정한다.

그림 2는 식 (9)를 이용하여 소스와 릴레이 사이의 평균 신호-대-잡음비  $\bar{\gamma}_{SR}$ 와 사용자의 수  $N$ 에 대하여 최적의 파워 할당을 나타낸 그림이다. 사용자의 수가 다르고 같은  $\bar{\gamma}_{SR}$ 를 가질 경우에 사용자의 수가 많아 질수록 에너지 수확을 위한 파워 할당이 높아진다. 사용자의 수가 고정이고  $\bar{\gamma}_{SR}$ 이 다를 경우 낮은 평균 신호-대-잡음비를 가질 경우에는 릴레이에서 신호 복호를 위한 파워 할당이 높다가 평균 신호-대-잡음비가 높아짐에 따라 신호 복호를 위한 파워 할당이 낮아지다가 높은 평균 신호-대-잡음비를 가질 경우 신호 복호를 위한 파워 할당이 다시 높아지는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 식 (6)을 이용하여 소스와 릴레이 사이의

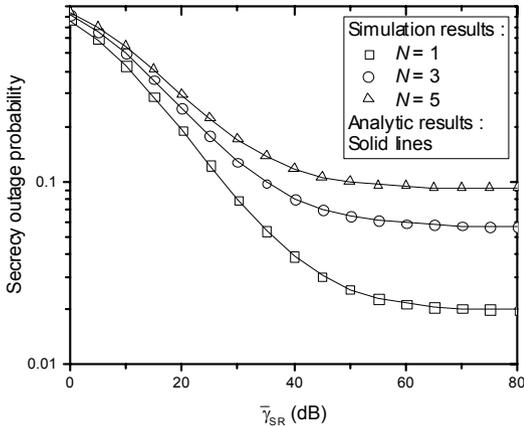


그림 3. 사용자의 수와 소스와 릴레이 사이 링크의 평균 신호-대-잡음비에 따른 보안 아웃티지 확률(최적 파워 할당 사용)

Fig. 3. The secrecy outage probability according to the number of users and the average signal-to-noise ratio of the link between the source and the relay(using optimal power allocation)

평균 신호-대-잡음비  $\bar{\gamma}_{SR}$ 와 사용자의 수  $N$ 에 대하여 식 (9)를 통해 얻은 최적의 파워 할당 값을 사용했을 때 보안 아웃티지 확률을 나타낸 그림이다. 본 논문의 시스템 모델은 다수의 사용자에게 브로드캐스팅 하는 것을 가정하였기 때문에 사용자의 수가 많아질 수록 만족시켜야 될 사용자가 많아지기 때문에 보안 아웃티지 성능은 감소된다. 그림 3은 사용자의 수가 많아 지게 됨에 따라 보안 아웃티지 성능이 나빠지는 것을 볼 수 있다. 소스와 릴레이 사이의 평균 신호-대-잡음 비  $\bar{\gamma}_{SR}$ 가 높을 경우 다수의 사용자에게 유리하나 도청노드에게도 유리하게 작용하게 됨으로 소스와 릴레이 사이의 평균 신호-대-잡음비가 높아질수록 보안 아웃티지 성능은 점점 포화상태로 된다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 자유 공간 광 통신을 이용한 무선 통신과 에너지 수확 및 브로드캐스팅 릴레이 시스템에 대한 파워 할당과 보안 아웃티지 확률 분석에 대해 다루었다. 구체적으로는, 자유 공간 광 통신 링크의 평균 수신 신호-대-잡음비와 사용자의 수에 따라 릴레이에서 최적의 파워 할당을 수치적으로 보여주었다. 그리고 최적 파워 할당이 됐을 때 자유 공간 광 통신 링크의 평균 수신 신호-대-잡음비와 사용자의 수에 따른 보안 아웃티지 확률을 비교하였다. 본 논문이 분석한 시스템은 이동통신 백험망에서 응용될 수 있는 것

으로, 기지국에 대한 전원 공급이 어려운 환경에서 자유 공간 광 통신을 이용하여 백험망으로 사용자 데이터를 수신함과 동시에 사용자에게 브로드캐스팅 할 때 필요한 파워를 에너지 수확 기법을 통해 수집하는 시스템에 대한 것이다. 본 논문에서는 보안 아웃티지 확률을 최소화 하는 기지국의 데이터 수신 파워와 에너지 수확 파워에 대한 최적 파워 할당을 보여주었다. 그러나 본 논문에서는 도청 노드의 평균 채널파워를 정수 값으로 가정을 하는 한계가 있었다. 향후 도청 노드의 평균 채널 파워를 가정하지 않고 도청 노드를 포아송 점 과정(Poisson Point Process, PPP)으로 가정한 모델에서의 보안 아웃티지를 최소화하는 기지국에서의 파워 할당문제에 대한 연구를 진행할 예정이다.

## References

- [1] Y. G. Kim, S. S. Cho, and Y. Y. Lim, "Overview of free space optics," *Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 17, no. 6, pp. 39-47, Dec. 2002.
- [2] Z. Wang, D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "On the design of a solar-panel receiver for optical wireless communications with simultaneous energy harvesting," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 8, pp. 1612-1623, Aug. 2015.
- [3] J. Fakidis, S. Kucera, H. Claussen, and H. Haas, "On the design of a free space optical link for small cell backhaul communication and power supply," in *Proc. IEEE ICCW 2015*, pp. 1428-1433, London, UK, Jun. 2015.
- [4] D.-K. Jeong and D. Kim, "Secrecy outage analysis of FSO communications with simultaneous energy harvesting," in *Proc. KICS Summer Conf. 2017*, pp. 1016-1017, Jeju Island, Korea, Jun. 2017.
- [5] T. Rakia, H.-C. Yang, M.-S. Alouini, and F. Gebali, "Outage analysis of practical FSO/RF hybrid system with adaptive combining," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 8, pp. 1366-1369, Aug. 2015.
- [6] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.