

임계값 기반 FSO/RF-FSO 스위칭 시스템의 보안 아웃티지

정 대 교*, 박 철 순*, 김 동 우^o

Secrecy Outage of Threshold-Based FSO/RF-FSO Switching Systems

Dae-Kyo Jeong*, Cheol-Sun Park*,
Dongwoo Kim^o

요 약

임계값 기반 자유 공간 광(free-space optics, FSO)/무선 주파수(radio frequency, RF)-FSO 혼합 스위칭 시스템의 보안 아웃티지 확률을 분석하고 스위칭에 사용하는 최적의 임계값을 구한다. 항상 좋은 채널만 선택하여 전송하는 오퍼튜니스틱 전송(opportunistic transmission)과 비교하였을 때, 대략 6.37-98.52% 개선했던 보안 아웃티지 확률을 얻을 수 있음을 보인다.

Key Words : Hybrid FSO/RF-FSO systems, threshold-based switching transmission, opportunistic transmission, secrecy outage

ABSTRACT

In this letter, we present threshold-based FSO/RF-FSO switching and provide an optimal threshold that minimizes the secrecy outage probability. Compared with an opportunistic transmission that selects the best between FSO and RF-FSO links, the proposed switching is shown to achieve about 6.37-98.52% reduction in secrecy outage probability.

1. 서 론

자유 공간 광(free-space optics, FSO) 통신은 높은 데이터 처리량과 높은 보안성을 제공하는 것으로 잘 알려져 있다. 뿐만 아니라, 대부분의 무선 주파수(radio frequency, RF) 통신과는 다르게 사용 면허가 필요하지 않은 넓은 스펙트럼을 이용할 수 있으므로, 갈수록 심해지는 무선 주파수 자원 부족 문제를 해결할 수 있는 대안으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 FSO 통신은 난기류(atmospheric turbulence)와 기상 조건에 큰 영향을 받게 된다. 안개는 FSO 링크의 성능 저하에 대한 주요 원인이 되지만 비는 큰 영향을 주지 않는다고 알려져 있다^[1,2]. 그러나 RF(특히, 밀리미터파 RF)는 비에는 취약하지만 안개에는 큰 영향을 받지 않는다^[3,4]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 RF 통신과 FSO 통신을 상호 보완적으로 이용하여 전송하는 잡종형(hybrid) FSO/RF 통신과^[4,5] 혼합형(mixed) RF/FSO 릴레이 기술^[6-8] 등이 제시되었다.

본 논문은 그림 1에서 보이는 것과 같이 소스(source, S) 노드와 데스티네이션(destination, D) 노드 사이에 FSO 링크가 주된 통신 경로로 존재하고, 우회 경로로서 RF-FSO 링크가 설정되는 잡종/혼합형 FSO/RF-FSO 시스템을 대상으로 무선 통신 보안성에 대한 결과를 제시한다. 또한, 본 논문은 통신 경로 설정 방법이 주된 FSO 링크의 채널이 기상 조건 등으로 임계값 기준보다 악화되면 우회 경로를 선택하는 간편한 스위칭(switching-based transmission, ST) 방법을 보안성능이 좋은 방법으로 제안한다. 비교 대상이 되는 방법으로 주된 경로와 우회경로의 채널을 모두 모니터링한 후 수신 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)가 더 좋은 경로를 선택하는 오퍼튜니스틱 전송(opportunistic transmission, OT) 방법이 고려된다. 본 논문에서 보안 성능은 보안 아웃티지 확률(secrecy outage probability)로 평가되며, 이를 최소화하기 위한 스위칭 임계값이 구해진다. 수치 실험으로, 본 논문에서 해석적으로 구해진 보안 아웃티지 확률이 시뮬레이션 결과와 정확히 일치한다는 것을 보이고, RF 신호를 도청하는 도청자(eavesdropper)가 있는 환경에서 OT 방법과 비교하여, 제안하는 ST 방법의

* 이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : (ORCID:0000-0001-5977-4156) Hanyang University Research Institute of Engineering & Technology, daekyo12@hanyang.ac.kr, Post-Doc., 정희원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-5541-5738) Hanyang University Division of Electrical Engineering, dkim@hanyang.ac.kr, 정교수, 정희원

* Agency for Defense Development, csun1402@add.re.kr

논문번호 : 202008-210-A-LU, Received August 21, 2020; Revised October 6, 2020; Accepted October 7, 2020

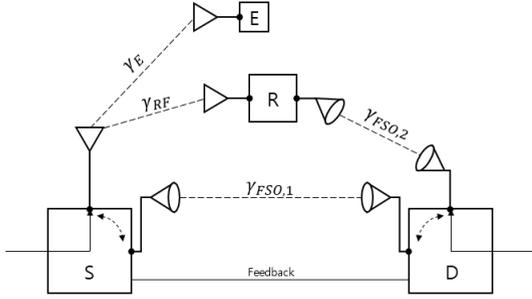


그림 1. 혼합형 FSO/RF 보안 시스템 모델
Fig. 1. Hybrid/mixed FSO/RF system with eavesdroppers

보안 아웃티지 확률이 SNR에 따라 약 6.37~98.52% 우월함을 확인하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 시스템의 모델이다. 소스(S)와 테스트네이션(D) 사이의 주된 링크는 FSO 링크이고 우회 링크는 듀얼홉(dual-hop) RF-FSO 링크이다. 본 논문에서는 우회 링크를 소스에서 테스트네이션까지 직접 연결하는 RF 링크가 아닌 FSO 링크로 중계되는 듀얼홉 링크로 가정한 이유는 듀얼홉 전송에서는 RF 전송파워를 직접 전송보다 더 작게 설계할 수 있고 따라서 보안 아웃티지 확률을 더 낮출 수 있기 때문이다. 물론, 우회 링크를 직접 연결되는 RF 링크로 가정하더라도 본 논문의 전체적인 결과는 변화하지 않는다. 도청자(E)는 RF 채널만 도청이 가능하다고 가정한다. FSO 신호는 매우 좁은 빔(narrow beam)이 사용되어 전송되기 때문에 직진성이 매우 높고, RF 신호와 달리 벽과 같은 장애물을 통과할 수 없다. 이러한 성질을 갖는 FSO 신호를 감청하기 위해서는 도청자가 불법 수신기를 FSO 송신기와 수신기 사이의 가시선(line-of-sight, LOS) 전파 경로 위에 직접 위치시켜야 하는데, 이 방법은 물리적으로 은폐가 어렵고 또한 적법한 FSO 수신기의 수신 신호 세기를 직접적으로 떨어뜨리기 때문에 불법 수신기 존재여부를 파악하기가 용이하다. 이런 이유로 본 논문에서는 FSO 링크의 도청이 불가능하다고 가정한다 [9,10].

소스와 테스트네이션 사이의 FSO 링크의 수신 SNR($\gamma_{FSO,1}$)이 임계값(γ_{th})보다 크면 소스는 FSO 링크를 통해 신호를 전송하고 임계값 보다 작으면 RF-FSO 링크를 사용한다. 듀얼홉 RF 링크의 수신 SNR은 γ_{RF} 로 표기하고 FSO 링크의 수신 SNR은

$\gamma_{FSO,2}$ 로 표기한다. 듀얼홉의 릴레이는 복호-후-전달(decode-and-forward) 방식을 사용한다고 가정하면, SNR은 $\gamma_R = \min(\gamma_{RF}, \gamma_{FSO,2})$ 로 표기된다. 그리고 도청자의 수신 SNR은 γ_E 로 표기하자. ST를 이용한 하이브리드 FSO/RF 시스템에서 테스트네이션의 수신 SNR($\gamma_{ST}^{(D)}$)과 도청자의 수신 SNR($\gamma_{ST}^{(E)}$)은 임계값에 따라 각각 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\gamma_{ST}^{(D)} = \begin{cases} \gamma_{FSO,1}, & \gamma_{FSO,1} \geq \gamma_{th} \\ \gamma_R, & \gamma_{FSO,1} < \gamma_{th} \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma_{ST}^{(E)} = \begin{cases} 0, & \gamma_{FSO,1} \geq \gamma_{th} \\ \gamma_E, & \gamma_{FSO,1} < \gamma_{th} \end{cases} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 이용하여 보안 전송률(secretcy rate)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{ST} = \max \left(\log_2 \left(\frac{1 + \gamma_{ST}^{(D)}}{1 + \gamma_{ST}^{(E)}} \right), 0 \right). \quad (3)$$

각각의 FSO 통신 링크는 강, 중, 약의 난기류로 인한 조도(irradiance intensity)의 변화를 반영할 수 있는 모델인 감마-감마 페이딩(Gamma-Gamma fading)을 겪는다고 가정한다[11]. FSO 링크의 수신 SNR에 대한 누적 확률 분포 함수는 다음과 같다[5].

$$F_{\gamma_{FSO,i}}(x) = \frac{2^{\alpha_i + \beta_i - 2}}{\pi \Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} \times G_{1,5}^{4,1} \left(\frac{(\alpha_i \beta_i)^2}{16 \bar{\gamma}_{FSO,i}} x \mid \alpha_i, \frac{\alpha_i + 1}{2}, \frac{\beta_i}{2}, \frac{\beta_i + 1}{2}, 0 \right), x \geq 0, \quad (4)$$

여기서 α_i 와 β_i 는 페이딩 매개변수이고 $\bar{\gamma}_{FSO,i}$ 는 평균 SNR를 나타내며 $I(\cdot)$ 는 감마함수를 나타내고 $G_{p,q}^{m,n} \left(x \mid \begin{smallmatrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{smallmatrix} \right)$ 는 Meijer G-함수를 나타낸다.

RF 통신 링크는 LOS와 NLOS(non-line-of-sight)를 고려하기 위하여 Nakagami-m 페이딩을 겪는다고 가정하면, 수신 SNR(γ_U)에 대한 확률 밀도 함수는 다음과 같다[5].

$$f_{\gamma_U}(x) = \left(\frac{m_U}{\bar{\gamma}_U} \right)^{m_U} \frac{x^{m_U-1}}{\Gamma(m_U)} \exp \left(-\frac{m_U x}{\bar{\gamma}_U} \right), x \geq 0, \quad (5)$$

여기서 $U \in \{RF, E\}$ 이고 m_U 는 페이딩 파라미터이며 $\bar{\gamma}_U$ 는 U 링크의 평균 SNR을 나타낸다. 그리고 γ_U

에 대한 누적 확률 분포 함수는 다음과 같다^[2].

$$F_{\gamma_U}(x) = \gamma(m_U, m_U x / \bar{\gamma}_U) / \Gamma(m_U), \quad (6)$$

여기서 $\gamma(\cdot, \cdot)$ 는 불완전 감마함수를 나타낸다.

III. 보안 아웃티지 확률

식 (3)과 같이 보안 전송률이 주어졌을 때 목표 보안 전송률 R 보다 보안 전송률이 작을 경우 아웃티지가 발생한다. 이와 같은 경우에 보안 아웃티지 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr \left\{ \log_2 \left(\frac{1 + \gamma_{ST}^{(D)}}{1 + \gamma_{ST}^{(E)}} \right) < R \right\} \\ &= \Pr \left\{ \gamma_{FSO,1} \geq \gamma_{th}, \log_2(1 + \gamma_{FSO,1}) < R \right\} \\ &\quad + \Pr \left\{ \gamma_{FSO,1} < \gamma_{th}, \log_2 \left(\frac{1 + \gamma_R}{1 + \gamma_E} \right) < R \right\} \\ &= \begin{cases} F_{\gamma_{FSO,1}}(T) - F_{\gamma_{FSO,1}}(\gamma_{th}) \\ \times [1 - \Pr \{ \gamma_R < 2^R \gamma_E + T \}] \end{cases}, \gamma_{th} < T, \\ &= F_{\gamma_{FSO,1}}(\gamma_{th}) \Pr \{ \gamma_R < 2^R \gamma_E + T \}, \gamma_{th} \geq T \end{cases}, \quad (7)$$

여기서 $T = 2^R - 1$ 이고 $\Pr \{ \gamma_R < 2^R(1 + \gamma_E) - 1 \}$ 은 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pr \{ \gamma_R < 2^R(1 + \gamma_E) - 1 \} &= \int_0^\infty F_{\gamma_R}(2^R(1+x)-1) f_{\gamma_E}(x) dx \\ &= \int_0^\infty [1 - \{1 - F_{\gamma_{RF}}(2^R(1+x)-1)\}] \\ &\quad \times [1 - F_{\gamma_{FSO,2}}(2^R(1+x)-1)] f_{\gamma_E}(x) dx. \end{aligned} \quad (8)$$

IV. 최적 스위칭 임계값

ST방법을 이용한 잡중/혼합형 FSO/RF 시스템의 보안 아웃티지 확률을 최소화하는 임계값을 얻기 위해 식 (7)의 보안 아웃티지 확률을 γ_{th} 에 대해 미분을 하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_{out}}{d\gamma_{th}} = \begin{cases} f_{\gamma_{FSO,1}}(\gamma_{th}) [\Pr \{ \gamma_R < 2^R \gamma_E + T \} - 1], & \gamma_{th} < T \\ f_{\gamma_{FSO,1}}(\gamma_{th}) \Pr \{ \gamma_R < 2^R \gamma_E + T \}, & \gamma_{th} \geq T \end{cases} \quad (9)$$

식 (9)의 일차 미분식에서 $\gamma_{th} < T$ 인 경우 $dP_{out}/d\gamma_{th} \leq 0$ 이고, $\gamma_{th} \geq T$ 인 경우 $dP_{out}/d\gamma_{th} \geq 0$ 이기 때문에 최적의 임계값 γ_{th}^* 는 T 이다.

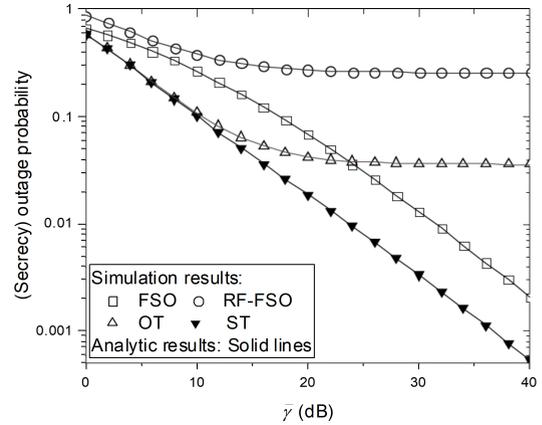


그림 2. 평균 신호 대 잡음비에 따른 보안 아웃티지 및 아웃티지 확률

Fig. 2. The secrecy outage probability and the outage probability according to the average signal-to-noise ratio

V. 수치적 결과

수치적 관찰을 위해서 FSO 링크에 대한 페이딩 파라미터는 중급의 난기류(moderate turbulence)를 가정한 $\alpha_i = 2.296$, $\beta_i = 1.822$ ^[8] 값을 이용하였고, RF 링크에 대한 페이딩 파라미터는 $m_{RF} = m_E = 3$ 로 각각 설정하고, 각 링크의 평균 SNR은 $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_{FSO,i} = \bar{\gamma}_{RF} = 20\bar{\gamma}_E$ 의 관계를 가진다고 가정한다, 목표 보안 전송률은 $R = 1$ 로 설정한다.

그림 2는 식 (7)에 최적 스위칭 임계값을 적용하였을 때의 ST의 보안 아웃티지 확률과 RF-FSO 링크만 이용한 것, OT를 이용한 하이브리드 FSO/RF-FSO 시스템의 보안 아웃티지 확률 및 FSO 통신만을 이용한 아웃티지 확률을 비교한 그림이다. 실험이 진행된 모든 SNR 구간에서 ST를 이용하는 경우가 비교 대상으로 정한 모든 다른 경우보다 우수한 보안 아웃티지 성능을 나타내는 것을 볼 수 있다. OT의 경우 낮은 SNR 구간에서는 ST와 거의 동일한 성능을 내나 높은 SNR로 갈수록 성능 차이가 나는 것을 관찰할 수 있다. RF-FSO 링크만 이용하는 경우 평균 SNR이 증가함에 따라 적법한 수신기의 SNR도 높아지지만 도청기의 SNR도 높아지기 때문에 보안 아웃티지 확률이 0이 되지 못하고 특정한 하한 값으로 접근한다. OT의 경우에도 RF-FSO 링크의 γ_R 과 FSO 링크의 $\gamma_{FSO,1}$ 중에 큰 값을 가지는 링크를 선택해서 전송하기 때문에 RF-FSO 링크가 선택될 확률이 0이 되지 않으면 도청 확률이 존재하고, 평균 SNR이 증가함에 따라 γ_E 가 역시 증가하기 때문에 RF-FSO 링크만 이용하는

표 1. ST가 각 방법 대비 보안 아웃티지를 감소시킨 비율
Table 1. The performance improvement percentage by ST compared with each of reference methods

SNR(dB)	FSO	RF	OT
10	61.81%	73.26%	6.37%
20	72.61%	93.11%	55.46%
30	74.11%	98.70%	90.77%
40	74.02%	99.79%	98.52%

경우와 마찬가지로 보안 아웃티지 확률이 0이 되지 못하고 특정한 하한 값에 접근하게 된다. 그러나 FSO만 이용하는 경우 평균 SNR이 높아지더라도 도청기가 도청을 할 수 없다고 가정하였기 때문에 수신기의 SNR이 높아지면 아웃티지 확률은 계속해서 감소하여 0이 된다. FSO 링크의 아웃티지 확률의 점근분석(asymptotic analysis)를 통해 기울기를 얻으면 다음과 같다.

$$\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\log(P_{out})}{\log(\bar{\gamma})} = -\frac{\beta_1}{2}. \quad (10)$$

ST의 경우도 평균 SNR이 높아지게 되면 RF-FSO 링크를 선택하는 경우가 점점 줄어들기 때문에 평균 SNR이 증가함에 따라 보안 아웃티지 확률이 감소되는 정도가 위의 식 (10)과 같은 것을 확인할 수 있다. 그림 2에서 평균 SNR이 40 dB인 경우 FSO와 ST의 기울기가 각각 -0.8762, -0.8869로 거의 일치하고 그림에서는 포함되어 있지 않지만 100 dB인 경우 모두 -0.9092로 식 (10)의 값에 근접한다.

또한, 본 논문에서 사용된 해석적 아웃티지가 시뮬레이션 결과와도 일치하는 것을 그림 2에서 확인할 수 있다. 표 1은 본 논문이 제안한 ST방법이 다른 각 방법과 비교하여 SNR에 따라 보안 아웃티지의 우월한 정도를 비율로 요약한 표이다. ST로 대략 6.37%에서 98.52%까지의 감소된 아웃티지 확률을 얻을 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 잡종/혼합형 FSO/RF-FSO 시스템의 통신 보안을 위해 임계값 기준의 ST 방법을 적용하고, 보안 아웃티지를 최소화하는 임계값을 구하였다. 용량이나 아웃티지 등 일반 통신 성능을 극대화하는 OT보다 제안하는 ST가 보안 아웃티지 측면에서 더 우수함을 수치 실험으로 보였다. OT는 제안하는 ST보다 측정해야 하는 채널 정보가 더 많고 경로 선택의 복잡도가

가 더 높음을 고려할 때, 제안하는 ST가 잡종/혼합형 FSO/RF-FSO의 훌륭한 전송 방법이 됨을 알 수 있다.

References

- [1] F. Nadeem, V. Kvicera, M. Awan, E. Leitgeb, S. Muhammad, and G. Kandas, "Weather effects on hybrid FSO/RF communication link," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 9, pp. 1687-1697, Dec. 2009.
- [2] H. Wu and M. Kavehrad, "Availability evaluation of ground-to-air hybrid FSO/RF links," *Int. J. Wir. Inf. Netw.*, vol. 14, no. 1, pp. 33-45, Mar. 2007.
- [3] F. Giannetti, M. Luise, and R. Reggiannini, "Mobile and personal communications in the 60 GHz band: A survey," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 10, pp. 207-243, Jul. 1999.
- [4] N. D. Chatzidiamantis, G. K. Karagiannidis, E. E. Kriezis, and M. Matthaiou, "Diversity combining in hybrid RF/FSO systems with PSK modulation," in *Proc. IEEE ICC 2011*, pp. 1-6, Kyoto, Japan, Jun. 2011.
- [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] D.-K. Jeong, C.-S. Park, and D. Kim, "Statistical analysis of noise propagation effect for mixed RF/FSO AF relaying application in wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 20, no. 4, Feb. 2020.
- [7] D.-K. Jeong and D. Kim, "Power allocation and secrecy outage analysis in free-space optics communications with an energy harvesting and broadcasting relay," *J. KICS*, vol. 42, no. 8, pp. 1558-1561, Aug. 2017.
- [8] E. Zedini, I. S. Ansari, and M.-A. Alouini, "Performance analysis of mixed Nakagami-m and Gamma-Gamma dual-hop FSO transmission systems," *IEEE Photon. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-20, Feb. 2015.
- [9] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: challenges and

- mitigation techniques,” *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 19, no. 1, pp. 57-96, First Quarter 2017.
- [10] M. Kaine-Krolak and M. E. Novak, “*An introduction to Infrared technology: Applications in the home, classroom, workplace, and beyond*,” Trace R&D Center, Univ. Wisconsin, Madison, WI, USA, 1995. [Online]. Available: http://trace.wisc.edu/docs/ir_intro/ir_intro.htm
- [11] M. A. Al-Habash, L. C. Andrews, and R. L. Phillips, “Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media,” *Opt. Eng.*, vol. 40, no. 8, pp. 1554-1562, Aug. 2001.