

# 무인항공기를 이용한 중계네트워크: 물리계층 동향분석 및 성능향상 이슈

조웅

Relay Network using UAV: Survey of Physical Layer and Performance Enhancement Issue

Woong Cho

요 약

무인항공기는 오락산업을 비롯하여 민간 및 국방 분야 등의 다양한 분야에서 널리 적용되고 있다. 무인항공기를 통신시스템에 적용하는 기술 또한 주요한 응용분야 중 하나이다. 중계기는 통신성능향상 및 통신거리 확장의 장점으로 인해 통신시스템에서 많은 관심을 받아왔다. 본 논문에서는 중계기로의 무인항공기에 대한 연구동향을 물리계층에 초점을 맞추어 알아본다. 먼저 현재 무인항공기를 중계기로 적용하여 연구된 사항을 소개하고 무인항공기를 이용한 중계네트워크의 기본적인 성능을 듀얼홉 통신시스템에서 복조 후 전송 프로토콜을 적용하여 분석한다. 성능은 심벌오류율로 나타내며 무인항공기 채널은 비대칭 환경을 가정하여 적용한다. 마지막으로 성능분석을 기반으로 하여 물리계층에서 성능향상을 위해 필요한 사항에 대해 논의한다.

## ABSTRACT

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) is widely used in various areas such as civil and military applications including entertainment industries. Among them, UAV based communication system is also one of the important application areas. Relays have been received much attention in communication system due to its benefits of performance enhancement and coverage extension. In this paper, we investigate UAVs as relays especially focusing on physical layer. First, we introduce the research on UAV application for the relays, then the basic performance of relay networks in dual-hop communication system is analyzed by adopting decode-and-forward (DF) relaying protocol. The performance is represented using symbol error rate (SER) and UAV channels are applied by assuming asymmetric environments. Based on the performance analysis, we discuss performance enhancement issues by considering physical layer.

## 키워드

UAV, Relay Network, Physical Layer, Performance Enhancement  
무인 항공기, 중계 네트워크, 물리 계층, 성능 향상

## 1. 서 론

무인항공기는 가격하락 및 기능증대로 인해 다양한

산업 및 군사 분야에서 사용되어지고 있다[1]. 무인항공기는 날씨 모니터링, 산불 감지, 교통제어, 응급 구조 및 검색, 통신 중계 등의 다양한 분야에서 응용될

교신저자 : 중원대학교 컴퓨터공학과

• 접수일 : 2019. 08. 14  
• 수정완료일 : 2019. 09. 14  
• 게재확정일 : 2019. 10. 15

• Received : Aug. 14, 2019, Revised : Sep. 14, 2019, Accepted : Oct. 15, 2019

• Corresponding Author : Woong Cho  
Dept. Computer Engineering, Jungwon University,  
Email : wcho@jwu.ac.kr

수 있다. 무인항공기는 날개의 종류에 따라 고정날개 방식과 회전날개 방식의 두 가지의 종류로 분류될 수 있다. 일반적으로 고정날개 방식은 빠른 속도와 무거운 동체를 가지고 계속 이동하는 기능을 제공하는데 이 경우는 정지한 상태로 조사 및 탐색 등의 기능을 제공하기에는 부적합하다. 이에 반해서 회전날개 방식은 속도와 무게에 있어서 제한이 따르지만 자유로운 방향 전환과 공중에 정지한 상태의 기능제공이 가능하다. 따라서 무인항공기의 선택은 응용분야에 따라서 달라질 수 있다. 다양한 응용분야 중 무인항공기를 이용한 통신시스템은 일반적으로 세 가지의 기능을 제공한다. 즉, 공중 기지국으로서의 무인항공기, 중계기로서의 무인항공기, 그리고 데이터 전송 및 수집 장치로서의 무인항공기 등으로 사용될 수 있다[2]. 민간 응용분야에서 통신관점 따른 무인항공기 네트워크의 구성 및 다양한 요구사항이 분석되었으며[1] 밀리미터파 및 셀룰러 시스템을 이용한 무인항공기와 관련된 다양한 연구 이슈가 소개되었다[3,4]. 무인항공기의 다양한 기능에 따라 통신과 제어를 동시에 고려한 구현 이슈에 대한 사항 또한 논의되었다[5]. 중계기를 이용한 통신은 통신영역을 확장할 수 있고 데이터 전송률 및 전체적인 통신성능을 향상시킬 수 있는 장점을 지니고 있다[6]. 다양한 중계프로토콜 및 전송방식을 고려한 시스템의 성능이 분석되었으며, 송신기와 중계기의 에너지 할당 및 중계기의 위치에 따른 성능 또한 분석되었으며[7,8], 중계통신을 철도 통신에 적용한 성능분석 결과가 소개되었다[9].

본 논문에서는 중계기로서의 무인항공기에 대한 구현 이슈를 물리계층에 초점을 맞추어 분석한다. 먼저 기존에 논의 되었던 다양한 연구결과를 소개하고 무인항공기 채널을 가정한 성능을 분석한다. 분석된 성능을 기반으로 하여 추후 성능 향상을 위해 고려해야 할 사항에 대해 소개한다.

## II. 중계기로서의 무인항공기

이 장에서는 중계기로서의 무인항공기와 관련된 기존 연구내용 및 추후에 논의되어야 할 사항들에 대해 알아본다. 그림 1은 중계기로서의 무인항공기 적용 시나리오를 나타내었다. 그림에서처럼 무인항공기는 기

지국과 기지국 사이, 기지국과 이동터미널 사이 혹은 기지국과 또 다른 무인항공기 사이에서 중계기로써 사용될 수 있다. 또한 중계기와 기지국/이동터미널은 air-to-air 혹은 air-to-ground 채널 두 가지 형태를 가질 수 있으며, 각각의 채널은 적용환경에 따라 서로 다른 채널상태로 나타내어질 수 있다.

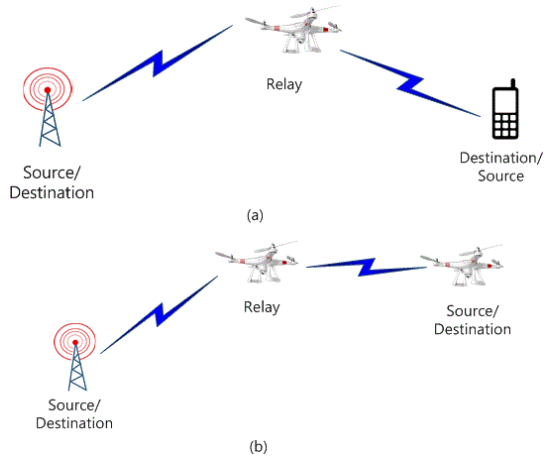


그림 1. UAV채널 시나리오 (a) air-to-ground, air-to-ground 시나리오 (b) air-to-air, air-to-ground 시나리오

Fig. 1 UAV channel scenarios (a) air-to-ground, air-to-ground scenario (b) air-to-air, air-to-ground scenario

무인항공기는 일반 이동통신환경에 비해 다양한 위치에 존재할 수 있다. 중계기로서 무인항공기가 적용될 경우 다양한 위치와 높이를 고려한 중계 통신 시스템의 성능이 분석되었으며 전체 성능을 향상시키기 위해 무인항공기의 위치를 최적화 하는 방안이 소개되었다[10,11]. 무인항공기는 일반 이동통신에서 적용되는 중계기와는 다르게 전력을 계속해서 공급하지 못하는 상황이 일반적이다. 응용분야 따라 전체시스템의 신뢰성 보다는 에너지를 효율적인 사용이 요구되는 경우가 있다. 이런 상황을 고려하여 무인항공기의 에너지 사용을 최적화 하는 방안이 제시되었다[12,13].

하나의 무인항공기를 중계기로 간주하여 신호를 전송하는 방식을 확장하여 여러 개의 무인항공기가 존재하는 경우를 가정하여 수신단에서 여러 중계 무인항공기로부터 수신되는 신호를 결합하여 전체적인 시스템 성능을 향상 시키는 협력 다이버시티기법을 적

용한 성능분석이 다양한 시나리오에서 분석되었다 [11,14]. 하지만 비대칭 채널을 적용한 성능분석은 일부 소개되었으나 성능 최적화 방안은 다루어지지 않았다.

### III. 성능분석

이 장에서는 기본적인 통신성능을 비대칭 무인항공기 채널을 가정하여 분석한다. 통신성능은 심벌오류율을 이용하여 나타낸다. 본 논문에서는 송신기에서 중계기를 거쳐 수신기까지 전송되는 환경을 듀얼홉 통신시스템을 가정하여 적용한다. 이때 중계기는 송신기로부터 수신되는 신호를 복조하여 재변조하여 전송하는 복조 후 전송 (DF: Decode-and-Forward) 프로토콜을 적용하며, 송신기를 s(source), 중계기를 r(relay), 그리고 수신기를 d(destination)라고 표기한다. 송신기에서 변조된 신호를 중계기로 전송하면 중계기에서 수신된 신호는 아래 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$y_{s,r} = \sqrt{E_s} h_{s,r} T_s + n_r \quad (1)$$

중계기에서 수신된 신호는 복조 및 재변조되어 수신기로 전송되며 수신기에서의 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{r,d} = \sqrt{E_r} h_{r,d} T_r + n_d \quad (2)$$

수신된 신호는 중계기 및 수신기에서 하나의 심벌구간에 해당심벌을 복조한다. 식(1)과 (2)에서  $\sqrt{E_i}$ ,  $i \in \{s,r\}$ 는 송신기 및 중계기에서 전송되는 에너지를,  $T_i$ ,  $i \in \{s,r\}$ 은 송신신호를 나타내는데 본 논문에서는 동기전송방식인 경우에는 위상변조신호 (PSK: Phase Shift Keying)를 가정하고 비동기전송방식인 경우에는 차등위상변조신호 (DPSK: Differential Phase Shift Keying)를 사용한다.  $h_{i,j}$ ,  $i, j \in \{s,r,d\}$ 와  $n_j$ ,  $j \in \{r,d\}$ 는 각각 채널 페이딩 계수와 잡음을 나타내는데 페이딩 계수는 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ , 잡음은 평균이 0이고 분산이  $N_0$ 인 복조가우시안 분포를 가진다고 가정한다. 이때 채널 페이딩 계수는 채널의 상태에 따라 각기 다른 분포를 가진다. 따라서 순시 신호대 잡음비 (SNR: Signal-to-Noise Ratio)는  $\gamma_{i,j} = |h_{i,j}|^2 E_i / N_0$  평균 신호대 잡음비는

$\bar{\gamma}_{i,j} = \sigma^2 E_i / N_0$ 로 나타낼 수 있다. 부가백색가우시안잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)채널인 경우에는 식 (1)과 (2)의  $h_{i,j}$ 는 1로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 신호의 성능을 분석을 위해 2진 신호를 전송한다고 가정한다. 따라서 복조 후 전송 프로토콜을 사용하는 듀얼홉 통신 시스템의 심벌오류율은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[15].

$$P_e = P_{e,s-r} + P_{e,r-d} - 2P_{e,s-r}P_{e,r-d} \quad (3)$$

위 식에서  $P_{e,s-r}$ 와  $P_{e,r-d}$ 는 각각 송신기와 중계기 사이의 심벌오류율 및 중계기와 수신기 사이의 심벌오류율을 나타낸다. 동기방식을 이용하여 이진신호를 전송했을 경우 부가백색가우시안 채널과 레일레이 (Rayleigh) 채널에서의 심벌오류율은 식 (4), (5)와 같이 나타내어진다[16].

$$P_{e,i-j} = Q\left(\sqrt{2\bar{\gamma}_{i,j}}\right) \quad (4)$$

$$P_{e,i-j} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{i,j}}{1 + \bar{\gamma}_{i,j}}}\right) \quad (5)$$

차등변조방식을 이용하여 이진신호를 전송했을 경우 부가백색가우시안 채널, 레일레이 채널 및 라이시안 (Rician) 채널에서의 심벌오류율은 식 (6), (7) 및 (8)로 나타내어진다[16].

$$P_{e,i-j} = \frac{1}{2} \exp(-\bar{\gamma}_{i,j}) \quad (6)$$

$$P_{e,i-j} = \frac{1}{2(1 + \bar{\gamma}_{i,j})} \quad (7)$$

$$P_{e,i-j} = \frac{1}{2} \left( \frac{1+K}{1+K+\bar{\gamma}_{i,j}} \right) \exp\left( -\frac{K\bar{\gamma}_{i,j}}{1+K+\bar{\gamma}_{i,j}} \right) \quad (8)$$

식 (8)에서  $K$ 는 라이시안 계수를 나타내며 값이 0 일 때는 레일레이 채널의 경우와 동일한 식 (7)로 표현된다. 따라서 식 (3)을 이용하고 각 채널에 따른 심벌오류율은 식 (4)~(7)을 적용하여 다양한 환경에서의 심벌오류율을 구할 수 있다.

그림 2는 다양한 비대칭 채널 환경에서 신호대 잡음비에 따른 심벌오류율을 나타내고 있다. 송신기-중계기 사이의 신호대 잡음비와 중계기-수신기 사이의 신호대 잡음비는 동일한 것으로 가정하였다. 채널환경은 송신기-중계기 및 중계기-수신기 사이 채널이 각기

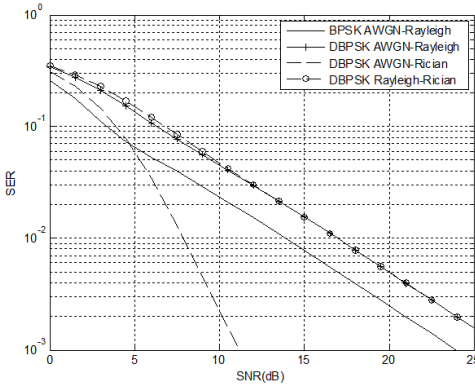


그림 2. 다양한 채널에 따른 심벌오류율  
Fig. 2 Symbol error rate depending on various channel scenarios

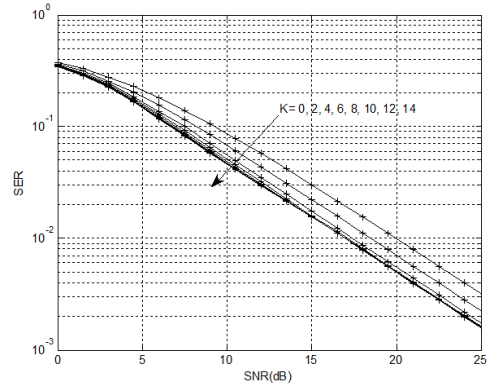


그림 4. 레일레이-라이시안 채널 환경 하에서 다양한 라이시안 계수에 따른 심벌오류율  
Fig. 4 Symbol error rate in Rayleigh-Rician channel scenario depending on various K factor

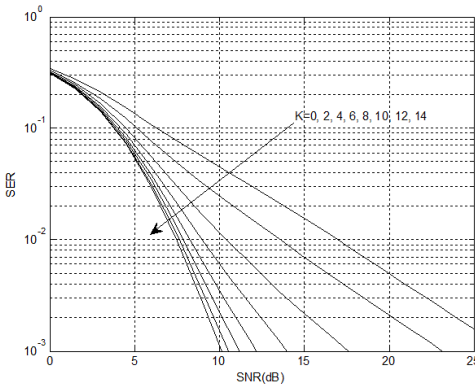


그림 3. 부가백색잡음가우시안-라이시안 채널 환경 하에서 다양한 라이시안 계수에 따른 심벌오류율  
Fig. 3 Symbol error rate in AWGN-Rician channel scenario depending on various K factor

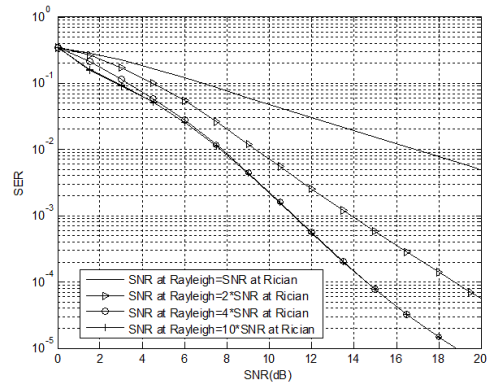


그림 5. 레일레이-라이시안 채널 환경 하에서 다양한 SNR값에 따른 심벌오류율  
Fig. 5 Symbol error rate in Rayleigh-Rician channel scenario depending on various SNR value

다른 상태를 가진 것으로 가정하였다. 일반적으로 air-to-air 채널은 부가백색가우시안잡음 채널로 나타내어지고 air-to-ground 채널은 레일레이 혹은 라이시안 채널로 나타내어진다. 그림 2에서 라이시안 계수는 10을 사용하였다. 그림에 나타나 있듯이 일반적으로 동기 전송방식이 차등 변조방식에 비해 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 양쪽 채널중 하나의 채널이 좋지 않은 상태에서는 전체 시스템의 성능이 저하됨을 확인할 수 있다. 이는 한쪽 채널에서의 성능저하가 전체 성능에 영향을 미치는 것에서 발생하는 현상이다. 그림 3과 4는 각각 부가백색가우시안

잡음-라이시안 및 레일레이-라이시안 채널 환경 하에서 차등변조방식을 적용했을 경우 다양한 라이시안 K계수에 따른 성능을 나타내었다. 그림 3에 나타난 것처럼 한쪽 채널이 부가백색가우시안잡음 채널인 경우에는 라이시안 K계수가 증가하면 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 만약 K값이 무한대 값을 가지게 되면 라이시안채널은 부가백색가우시안채널과 동일한 채널이 된다. 이와는 반대로 한쪽 채널상태가 좋지 못하면 그림 2와 동일하게 라이시안 K값에 증가함에도 불구하고 성능향상을 획득하지 못함을 확인할

수 있다. 그림 5는 레일레이-라이시안 채널 환경 하에서 라이시안 채널환경의 신호대 잡음비는 고정시킨 상태에서 레일레이 채널 환경의 신호대 잡음비를 증가 시킬 경우의 심벌오류율을 나타내었다. 여기서  $K=10$ 을 적용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 신호대 잡음비를 증가시키면 전체 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있으나 성능향상에는 한계가 있음을 확인할 수 있다.

#### IV. 성능향상 이슈

중계기로서의 무인항공기를 실제시스템에 적용하여 시스템의 성능을 분석하고 성능최적화를 수행하기 위해서는 다양한 환경을 고려하는 것이 필요하다. 이를 위해 실제 환경에서 중계기를 이용한 채널측정이 이루어 졌다[14]. 일반적으로 공중에서 무인항공기와 무인항공기 사이에는 직접파가 보장되는 반면에 무인항공기와 지상 장치(기지국, 이동단말기) 사이에는 주변 환경에 따라 직접파가 보장되지 않을 수가 있다. 따라서 그림 1에 나타낸 것처럼 송신기-중계기 링크와 중계기-수신기 링크가 서로 대칭적인 채널을 지니지 않을 경우가 있다. 이와 같은 상황을 고려하여 비대칭 환경을 적용한 성능 분석이 앞장에서 소개되었다. 또한 일부 논문에서도 비대칭 채널에서의 성능 분석이 소개되었으며[17] 비대칭 전송방식을 고려한 듀얼홉 시스템의 성능분석 또한 일부 소개되었다[18]. 하지만 성능분석에서 알 수 있듯이 비대칭 채널환경에서는 한쪽 채널상태에 따른 성능저하가 발생함을 알 수 있으며 이를 상쇄시킴으로써 전체 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 물리계층 측면에서 보면 무인항공기를 중계기로 사용할 경우 이러한 비대칭 환경을 고려함과 동시에 중계기의 에너지 및 위치(높이) 분배/할당의 효과를 적용한 성능 분석이 필요하다. 무인항공기를 사용하여 통신을 진행하는 경우에는 실제 적용되는 응용분야에 따라 요구사항이 달라질 수 있다. 즉, 에너지 효율과는 상관없이 고신뢰성이 필요한 경우가 있을 수 있고, 정해진 최소기준의 성능을 보장하면서 에너지 효율을 최대화하는 경우가 있을 수 있으며, 최소한의 데이터 전송을 보장하면서 통신 거리를 최대한 확장하는 경우가 있

을 수 있다. 따라서 무인항공기를 중계기로 적용할 경우, 다양한 환경을 고려하러 분석된 성능을 바탕으로 하여 응용분야에 부합되게 최적의 시스템을 디자인하는 것이 필요하다.

#### V. 결 론

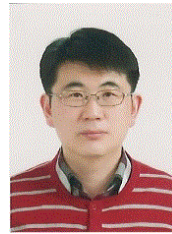
본 논문에서는 무인항공기의 여러 응용분야 중 통신시스템의 중계기로 적용될 경우 고려되어야 할 사항을 물리계층을 중심으로 소개하였다. 먼저 무인항공기와 무선통신에서 사용되는 중계기에 관련된 연구결과를 소개하였다. 또한 비대칭 환경을 가정한 무인항공기 채널에서의 성능을 심벌오류율을 이용하여 분석하였다. 이를 기반으로 하여 추후 무인항공기를 중계기에 적용할 경우 성능향상 및 최적화에 필요한 사항을 물리계층에 중점을 두어 알아보았다. 비대칭 채널환경을 극복하기 위해서는 중계기의 위치(높이) 및 에너지할당을 고려하고 정해진 요구사항을 반영한 최적화 방안 제시가 필요하다.

#### References

- [1] S. Hayat, E. Yanmaz, and R. Muzaffar, "Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint," *IEEE Commun. Surveys Tuts.* vol. 18, no. 4, 2016, pp. 2624-2661.
- [2] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, May 2016, pp. 36-42.
- [3] C. Zhang W. Zhang, W. Wang, L. Yang, and W. Zhang, "Research challenges and opportunities of UAV millimeter-wave communications," *IEEE Wireless. Commun.*, vol. 16, no. 1, Feb. 2019, pp. 58-62.
- [4] Y. Zeng, J. Lyu, and R. Zhang, "Cellular-connected UAV: potential, challenges, and promising technologies," *IEEE Wireless. Commun.*, vol. 16, no. 1, Feb. 2019, pp. 120-127.

- [5] J. Zhao, F. Gao, G. Ding, T. Zhang, W. Jia, and A. Nallanathan, "Integrating communications and control for UAV systems: opportunities and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, Feb. 2018, pp. 67519-67527.
- [6] A. Ribeiro, X. Cai, and G. B. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 4, no. 3, May 2005, pp. 1264-1273.
- [7] R. Cao and L. Yang, "The affecting factors in resource optimization for cooperative communications: A case study," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 11, no. 12, Dec. 2012, pp. 4351-4361.
- [8] W. Cho, R. Cao, and L. Yang, "Optimum resource allocation for amplify-and-forward relay networks with differential modulation," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 56, no. 11, Nov. 2008, pp. 5680-5691.
- [9] W. Cho, B. Kim and H. Cho, "Performance of downlink with dual-hop communication systems in railway environments," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 1, Jan. 2017, pp. 69-74.
- [10] Y. Chen, W. Feng, and G. Zheng, "Optimum placement of UAV as relays," *IEEE Commun. Letters*, vol. 22, no. 2, Feb. 2018, pp. 248-251.
- [11] M. M. Azari, F. Rosas,, K-C. Chen, and S. Pollin, "Ultra reliable UAV communication using altitude and cooperative diversity," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 66, no. 1, Jan. 2018, pp. 330-344.
- [12] K. Li, W. Ni, X. Wang, R. P. Liu, S. S. Kanhere, and S. Jha, "Energy-efficient cooperative relaying for unmanned aerial vehicles," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 15, no. 6, June 2016, pp. 1377-1386.
- [13] D. Yang, Q. Wu, Y. Zeng, and R. Zhang, "Energy tradeoff in ground-to-UAV communication via trajectory design," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 67, no. 7, July 2018, pp. 6721-6726.
- [14] Y. Sho, R. Enami, J. Wensowitch, and J. Camp, "Measurement-based characterization of LOS NLOS drone-to-ground channel," *Proc. on IEEE WCNC*, Barcelona, Spain, Apr. 2018, pp. 1-6.
- [15] M. O. Hasna and M-S. Alouini, "End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, Nov. 2003, pp. 1126-1131.
- [16] M. K. Simon and M-S. Alouini, *Digital communication over fading channels, 2nd Edition*. New York: Wiley, 2005.
- [17] Y. Chen, N. Zhao, Z. Ding, and M-S. Alouini, "Multiple UAVs as relays: multi-hop single link versus multiple dual-hop links," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 9, Sept. 2018, pp. 6348-6359.
- [18] W. Cho, "Effect of energy allocation in dual-hop communication systems with DF protocol," *IET Electronics Letters*, vol. 54, no. 11, May 2018, pp. 726-728.

저자 소개



**조 웅(Woong Cho)**

1997년 울산대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1999년 한양대학교 대학원 전자통신공학과학과 졸업(공학석사)

2003년 Univ. of Southern California 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사)  
 2007년 Univ. of Florida 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사)  
 2008년 2월~2011년 2월 한국전자통신연구원  
 2012년 3월~현재 중원대학교 컴퓨터공학과 교수  
 ※ 관심분야 : 무선통신, 협력통신, ITS