

# 비대칭 환경에서 듀얼홉 통신시스템의 자원할당 성능분석

조웅

## Performance Analysis of Resource Allocation in Asymmetric dual-hop Communication System

Woong Cho

요약

통신시스템에서 중계기는 전체 시스템의 성능을 향상시키는 장점으로 인해 다양한 통신환경에서 적용되어져 왔다. 본 논문에서는 하나의 중계기를 이용하는 듀얼홉 통신시스템에서 비대칭 통신 시나리오를 고려한 시스템의 성능을 분석한다. 성능분석은 비트오류율을 사용한다. 먼저 대칭 환경과 비대칭 환경에서의 전체 성능을 비교하고 자원 할당에 따른 성능을 분석한다. 자원할당은 에너지 할당과 중계기 위치 할당을 고려한다. 에너지 할당과 중계기 위치에 따른 성능을 각각 분석하고 두 가지 자원을 동시에 고려했을 경우에 대한 성능 또한 분석한다. 성능분석을 기반으로 하여 대칭 환경과 비대칭 환경에서의 자원할당 효과에 대해 논의한다.

ABSTRACT

Relay has been applied various communication environments due to its advantages of performance enhancement in communication systems. In this paper, we analyze the performance of a dual-hop communication system which uses one relay by considering asymmetric communication scenarios. The performance is based on bit error rate. Firstly, we compare the overall performance of dual-hop communication system under symmetric and asymmetric, and then analyze the performance depending on the resource allocation. Energy allocation and relay location are considered in the resource allocation. The performance of overall system for each energy allocation and relay location is analyzed. In addition, we analyze the performance of communication system when both energy and relay location are considered simultaneously. Based on the analyzed performance, we discuss the effect of resource allocation for symmetric and asymmetric environments.

키워드

Relay, Dual-hop, Performance Analysis, Bit Error rate, Resource Allocation  
중계기, 듀얼홉, 성능분석, 비트오류율, 자원할당

강원대학교 전자정보통신공학과

• 접수일 : 2024. 06. 30  
• 수정완료일 : 2024. 07. 21  
• 게재확정일 : 2024. 08. 12

• Received : Jun. 30, 2024, Revised : Jul. 21, 2024, Accepted : Aug. 12, 2024

• Corresponding Author : Woong Cho

Dept. of Electronics, Information and Communication Engineering, Kangwon  
National University

Email : wcho@kangwon.ac.kr

## I. 서론

무선통신 시스템 구성에 있어 송신기에서 수신기로 신호를 전송할 때 중계기를 이용하여 신호를 전송함으로써 전체 통신시스템의 전송률향상, 통신 신뢰성 증가 및 통신범위 확장 등의 장점을 제공할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 중계기는 이동통신 뿐만 아니라 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 혹은 위성통신 환경에서도 적용이 가능하며 다양한 통신방식을 적용한 성능분석이 진행되었다. 성능분석은 대부분이 대칭 채널 환경을 고려하여 대표적인 중계 방식인 복조 후 전송(DF: Decode-and-Forward) 혹은 증폭 후 전송(AF: Amplify-and-Forward) 방식 두 가지에 대하여 수행되어져 왔다[1-6]. 송신기-중계기 및 중계기-수신기 사이에서 동기 전송방식과 비동기 방식을 채널에 따라 동시에 적용할 때의 성능분석이 진행되었으며 [7], 신호를 전송하는 형태가 서로 다른 일반적인 전송방식과 공간시간부호(STC: Space Time Coding) 방식이 혼재하는 경우에서의 성능분석 또한 진행되었다[8]. 비동기 방식을 적용한 비대칭 채널 환경하에서의 성능분석이 소개되었으나 자원할당을 고려한 성능분석은 수행되지 않았다[9]. 본 논문에서는 동기방식을 사용하는 듀얼홉 통신시스템을 사용하여 비대칭 채널, 즉 송신기-중계기 및 중계기-수신기 사이의 채널 환경이 다른 경우에 대해 자원할당을 고려한 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서는 채널 환경, 시스템 모델 및 비트오류율(BER: Bit Error Rate)에 대해 소개한다. III장에서는 에너지 할당 및 중계기 위치 할당을 고려한 성능을 분석한다. IV장에서는 분석된 내용을 기반으로 하여 결론을 내린다.

## II. 성능분석

이 장에서는 채널 환경 및 시스템 모델을 소개하고 전체 통신시스템의 성능을 비트오류율로 나타낸다.

### 2.1 채널 환경

그림 1은 다양한 형태의 중계기 및 채널 환경을 나타내고 있다. 송신기에서 중계기를 거쳐 수신기로

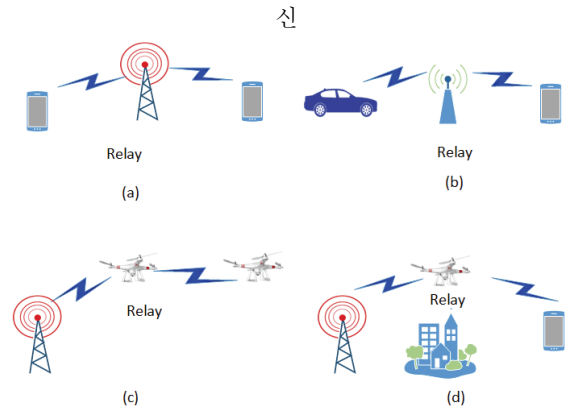


그림 1. 중계기 및 채널 환경 (a)이동통신환경 (b)차량통신환경 (c)무인항공기환경1 (d)무인항공기 환경2  
Fig. 1 Relay and channel environments (a)mobile communication (b)vehicular communication (c)AV 1 (d)AV 2

호가 전송될 경우 중계기는 기존의 기지국 형태, 무선AP(Access Point) 혹은 무인항공기 등이 사용될 수 있으며 송신기-중계기 와 중계기-수신기는 주어진 환경에서 송수신기 위치 및 주변 환경에 따라 대칭 혹은 비대칭이 될 수 있다.

### 2.2 시스템 모델 및 비트오류율

본 논문에서는 복조 후 전송 방식을 이용하여 신호가 전송되는 경우를 고려한다. 즉 송신기에서 중계기로 신호를 전송하면 중계기에서는 신호를 복조한 후 재변조 하여 수신기로 전송한다. 이때 중계기와 수신기에서 수신되는 신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{ij} = \sqrt{E_i} h_{ij} T_i + n_{ij} \quad \dots (1)$$

송신기를  $s$ (source), 중계기를  $r$ (relay), 수신기를  $d$ (destination)로 나타낸다고 하면 식(1)에서  $i, j \in \{s, r, d\}$  이고  $\sqrt{E_i}, i \in \{s, r\}, T_i, i \in \{s, r\}$ 는 송신기와 중계기에서 전송되는 신호의 에너지 및 변조신호,  $h_{ij}$ 와  $n_{ij}$ 는 각각 채널 페이딩 계수와 잡음을 나타낸다. 본 논문에서는 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 신호를 전송한다고 가정한다. 따라서  $T_i = e^{j\pi m}, m \in \{0, 1\}$ 으로 표현된다. 페이딩 계수는 평균이 0이고 분산이  $\sigma_{ij}^2$ , 잡음은 평균이 0이고 분산이

$N_0$ 인 복소가우시안분포를 가진다고 가정한다. 따라서 순시 신호대 잡음비 (SNR: Signal-to-Noise Ratio)와 평균 신호대 잡음비는 각각  $\gamma_{ij} = |h_{ij}|^2 E_i / N_0$  와  $\bar{\gamma}_{ij} = \sigma_{ij}^2 E_i / N_0$ 로 나타낼 수 있다. 듀얼홉 통신시스템을 가정하고 이진 방식을 이용하여 신호를 전송할 경우 비트오류율은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[10].

$$P_e = P_{e, sr} + P_{e, rd} - 2P_{e, sr}P_{e, rd} \quad \dots (2)$$

여기서  $P_{e, sr}$ 와  $P_{e, rd}$ 는 각각 송신기와 중계기 사이에서의 비트오류율 중계기와 수신기 사이에서의 비트오류율을 나타낸다. BPSK방식을 이용하여 신호를 전송할 경우 부가백색가우시안 채널(AWGN: Additive White Gaussian Noise), 레일레이(Rayleigh) 및 라이시안(Rician) 채널에서 비트오류율은 식 (3), (4) 및 (5)로 나타내어진다[11].

$$P_{e, ij} = Q\left(\sqrt{2\gamma_{ij}}\right) \quad \dots (3)$$

$$P_{e, ij} = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{ij}}{1 + \bar{\gamma}_{ij}}} \right) \quad \dots (4)$$

$$P_{e, ij} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(1+K)\sin^2\theta}{(1+K)\sin^2\theta + \bar{\gamma}_{ij}} \times \exp\left(-\frac{K\bar{\gamma}_{ij}}{(1+K)\sin^2\theta + \bar{\gamma}_{ij}}\right) d\theta \quad \dots (5)$$

식 (5)에서  $K$ 는 라이시안 계수를 나타내며, 채널 환경에 따라 다른 값을 가질 수 있다. 식 (2)를 이용하여 듀얼홉 통신시스템의 비트오류율을 구할 수 있으며 각각의 채널에 따른 비트오류율은 식 (3), (4), (5)를 적용하여 구할 수 있다.

그림 2는 다양한 채널 환경하에서의 신호대잡음비에 따른 비트오류율을 나타내고 있다. 신호대잡음비는 송신기와 중계기에서 동일한 값을 사용한다고 가정하였다. 대칭 환경과 비대칭 환경 두 가지 모두를 고려하였다. 대칭 채널의 경우 둘 다 채널 상태가 양호할 경우(부가백색가우시안채널)에 성능이 좋음을 확인할 수 있다. 전체 그림에서 성능이 가장 좋지 않은 경우는 양쪽 채널 모두 가시선(LOS: Line-Of-Sight)이 확보되지 않은 레일레이 채널인 경우임을 확인할 수 있다. 라이시안 채널의 경우  $K=3$ 을 적용하였는데  $K=0$ 인 경우는 레일레이와 동일한 채널로 바뀐다. 비대칭 채널의 경우에는 한쪽 채널의 상태가 양호하다고 하

더라도 다른 한쪽 채널의 상태가 좋지 않으면 전체 성능이 저하됨을 확인할 수 있다.

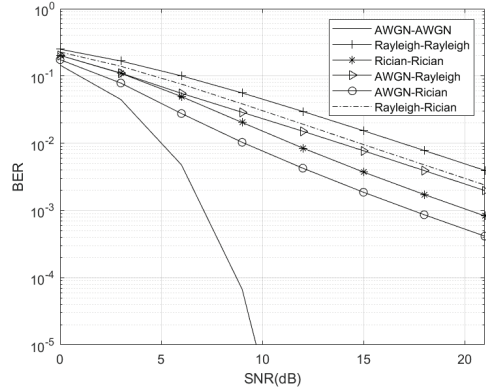


그림 2. 다양한 채널 환경에서의 비트오류율  
Fig. 2 Bit Error Rate in various channel environments

### III. 자원할당에 따른 성능

이 장에서는 앞 장에서 나타낸 시스템 모델과 비트오류율을 이용하여 자원할당에 따른 성능을 분석한다. 자원할당은 에너지 할당과 중계기 위치를 고려한다. 에너지 할당은 송신기와 중계기에서 전송되는 에너지의 합을 전체 에너지라고 가정하고 전체 에너지를 고정한 상태에서 송신기와 중계기에서 전송되는 에너지를 변화시키면서 에너지 할당에 따른 성능을 비교한다. 식 (6)은 전체 에너지( $E_T$ ) 식을 나타낸다.

$$E_T = E_s + E_r \quad \dots (6)$$

중계기의 위치에 따른 영향을 분석하기 위해서는 식(7)과 같은 관계를 이용한다.

$$\sigma_{ij}^2 = C \cdot D_{ij}^{-\alpha}, i, j \in \{s, r, d\} \quad \dots (7)$$

여기서  $C$ 는 상수로서 1을 사용하며,  $D_{ij}$ 는 송신기-중계기 거리, 중계기-수신기 및 송신기-수신기 거리를 나타내며  $\alpha$ 는 경로감쇄계수(path loss exponent)를 나타내는데 본 논문에서는 이동통신 환경에서 널리 사용되는 4를 이용한다. 송신기-중계기-수신기 전체의 거리는 식 (8)과 같은 관계를 가진다고 가정한다.

$$D_{sd} = D_{sr} + D_{rd} \quad \dots (8)$$

식 (8)은 중계기를 이용하는 전체 시스템이 선형

상(Line topology)을 가지는 것을 의미한다. 위 식을 이용하여  $D_{sd}$ 가 고정된 상태에서 중계기의 위치를 변화시킬 경우의 성능을 분석한다.

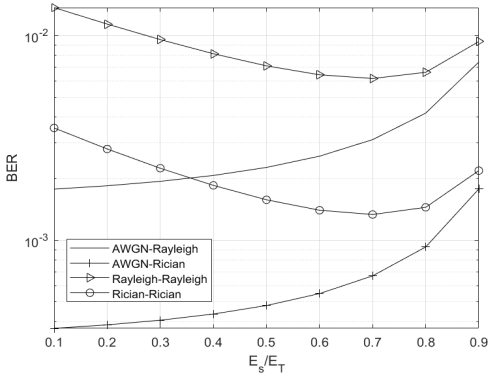


그림 3. 에너지 할당에 따른 비트오류율

Fig. 3 Bit Error Rate depending on energy allocation

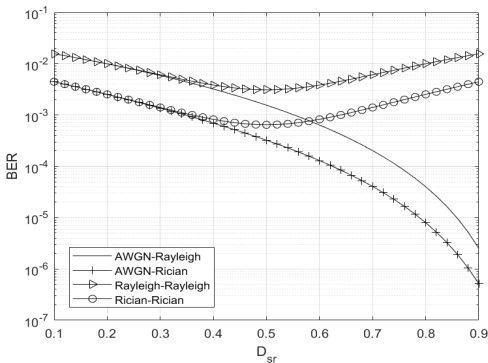


그림 4. 중계기 위치에 따른 비트오류율

Fig. 4 Bit Error Rate depending on relay location

그림 3과 4는 에너지 할당과 중계기 위치를 자원 할당으로 고려했을 경우 각각의 비트오류율을 나타낸다. 에너지 할당은 전체 에너지( $E_T$ )을 10dB로 가정하였고  $D_{sd} = 1$ 로 가정하여 중계기가 송신기와 수신기 중간에 위치( $D_{sr} = 0.5$ )에 있다고 가정한 후, 에너지 할당 값을 변화시킬 경우의 성능을 분석하였다. 대칭 채널의 경우에는 송신기의 에너지가 증가할수록 비트오류율이 향상되다가 특정지점을 지나면 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 비대칭 채널의 경우에는 채널 환경이 양호한 링크에 적은 에너지를 할당하고 많

은 에너지를 채널 상태가 좋지 않은 링크에 할당함으로써 좋은 성능을 획득할 수 있음을 알 수 있다.

중계기 위치를 고려한 성능에서는 송신기와 중계기에서 동일한 에너지(10dB)로 신호를 전송한다고 가정하고, 중계기 위치를 변화시킬 경우의 성능을 분석하였다. 대칭 채널의 경우 특정지점에서 최적의 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 비대칭 채널의 경우에는 중계기가 수신기에 가까워질수록 성능이 향상됨을 알 수 있는데, 채널 상태가 좋지 않은 링크의 거리를 줄임으로 전체 시스템 성능이 향상되는 것을 알 수 있다.

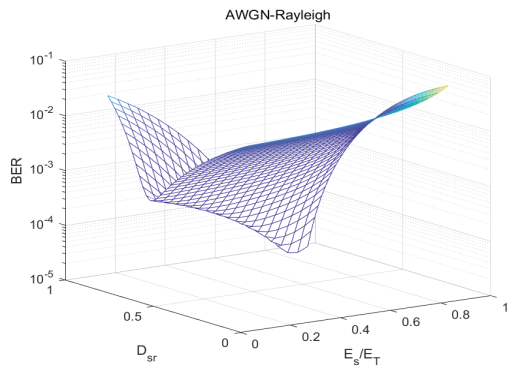


그림 5. 비대칭 채널 환경에서 에너지 할당과 중계기 위치를 동시에 고려했을 경우의 비트오류율

Fig. 5 Bit Error Rate depending on both energy allocation and relay location in asymmetric channel

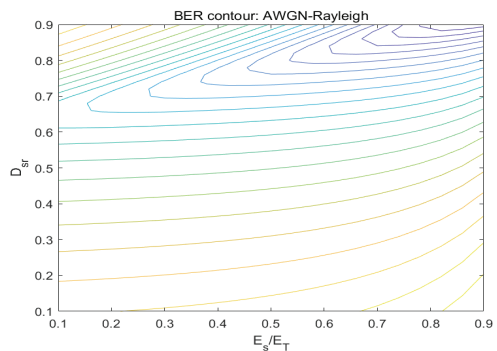


그림 6. 비대칭 채널 환경에서 에너지 할당과 중계기 위치를 동시에 고려했을 경우의 비트오류율-등고선

Fig. 6 Bit Error Rate depending on both energy allocation and relay location in asymmetric channel-contour

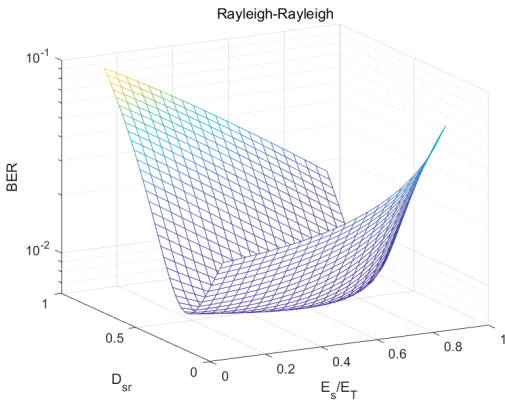


그림 7. 대칭 채널 환경에서 에너지 할당과 중계기 위치를 동시에 고려했을 경우의 비트오류율  
Fig. 7 Bit Error Rate depending on both energy allocation and relay location in symmetric channel

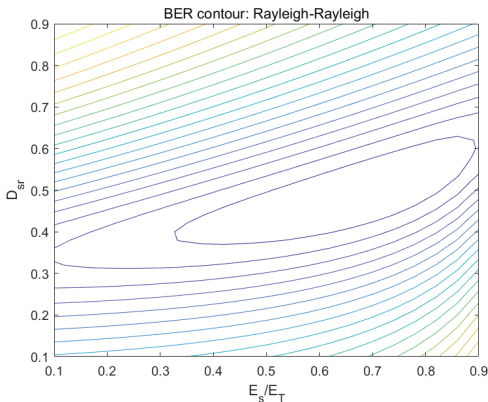


그림 8. 대칭 채널 환경에서 에너지 할당과 중계기 위치를 동시에 고려했을 경우의 비트오류율-등고선  
Fig. 8 Bit Error Rate depending on both energy allocation and relay location in symmetric channel-contour

그림 5, 6은 에너지 할당과 중계기 위치를 동시에 고려했을 경우 비대칭 채널(백색부가가우시안-레이-레이)에서의 비트오류율과 오류율 등고선을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 중계기가 송신기에 가까워지고 중계기에 더 많은 에너지가 할당될수록 성능이 향상됨을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 에너지 할당과 중계기 위치 할당에 따른 성능분석을 각각 수행했을 경우와 일치한

다. 즉 통신 링크의 상태가 좋지 않으면서 많은 에너지를 할당하고 통신 링크의 거리를 줄임으로써 전체 통신 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 나타낸다.

그림 7, 8은 에너지 할당과 중계기 위치를 동시에 고려했을 경우 대칭 채널(레이-레이-레이)에서의 비트오류율과 오류율 등고선을 나타내고 있다. 그림 5, 6과는 다르게 대칭 채널에서는 특정 정해진 중계기 위치를 찾고 적정값의 에너지를 할당함으로써 최적의 성능을 획득할 수 있음을 알 수 있다.

그림 5-8의 결과로 볼 때 비대칭과 대칭의 경우 모두 최적의 성능을 나타내는 부분이 있음을 확인할 수 있다. 비대칭 채널의 경우에는 채널 상태가 좋지 않은 링크를 보상에 주는 방향으로 에너지와 중계기 위치를 할당함으로써 성능을 향상할 수 있고 대칭 채널의 경우에는 적절한 중계기 위치와 에너지를 할당함으로써 최적의 성능을 제공하는 값을 찾을 수 있음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 비대칭 채널에서 자원할당을 고려한 듀얼홉 통신시스템의 성능을 분석하고 비대칭 채널과 대칭 채널에서의 성능을 비교하였다. 비대칭 채널 환경에서는 통신환경이 열악한 채널에 많은 에너지를 할당하고 중계기 위치를 조절하여 통신거리를 줄임으로써 통신시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 대칭 채널에서는 송신기와 수신기 사이의 일정 지점을 선택하고 적절한 에너지를 할당함으로써 최적의 성능을 획득할 수 있음을 확인하였다. 본 논문의 결과는 복조 후 전송방식을 이용하는 듀얼홉 통신시스템의 성능 최적화에 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2023년도 강원대학교 대학회계 학술 연구조성비로 연구하였음.

본 논문은 울산시-ETRI 2차 공동협력사업의 일환으로 수행되었음. [24AB1600, 제조 혁신을 위한 주력산업 지능화 기술 개발 및 산업현장에서 사람-이동체-공간 자율협업지능 기술 개발]



## References

- [1] A. Ribeiro, X. Cai, and G. B. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 3, May 2005, pp. 1264-1273. <https://doi.org/10.1109/TWC.2005.846989>
- [2] W. Cho, "Energy allocation in dual-hop communication system: comparative study," *ICT Express*, vol. 7, no. 3, Sept. 2021, pp. 380-383. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2020.12.007>
- [3] Z. Abdullah, S. Kisseleff, W. A. Martins, G. Chen, L. Sanguinetti, K. Ntontin, A. Papazafeiropoulos, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, "Cooperative hybrid networks with active relays and RISs for B5G: Applications, challenges, and research directions," *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 1, Feb. 2024, pp. 126-132. <https://doi.org/10.1109/MWC.012.2200292>
- [4] M. Can and I. Altunbas, "Outage probability analysis of Rate-Splitting Multiple-Access-based hybrid satellite-terrestrial relay network with relay selection," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 5, Oct. 2023, pp. 6508-6517. <https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3276343>
- [5] Q. Li, P. Si, Y. Zhang, J. Wang, D. Zhang, and F. R. Yu, "UAV altitude, relay Selection, and user association optimization for cooperative relay-transmission in UAV-IRS-based THz networks," *IEEE Trans. Green Communications and Networking*, vol. 8, no. 2, June. 2024, pp. 815-826. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2023.3347567>
- [6] L. Bariah, W. Jaafar, S. Muhaidat, H. Elgala, and H. Yanikomeroglu, "On the error performance of LoRa-enabled aerial networks over shadowed Rician fading channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 10, Oct. 2022, pp. 2322-2326. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3193409>
- [7] W. Cho and H-B. Cho "Effect of relay location in cooperative networks with partially differential modulation scheme," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 6, 2015, pp. 671-676. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2015.10.6.671>
- [8] W. Cho, "Relay network using UAV: survey of physical layer and performance enhancement issue," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 5, 2019, pp. 901-906. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2019.14.5.901>
- [9] W. Cho, "Effect of Resource Allocation in Differential Distributed Cooperative Networks with Mixed Signaling Scheme," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 6, 2020, pp. 1131-1136. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2020.15.6.1131>
- [10] 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. <https://doi.org/10.1109/TWC.2003.819030>
- [11] M. K. Simon and M-S. Alouini, *Digital communication over fading channels, 2nd Edition*. New York: Wiley, 2005.

## 저자 소개

## 조웅(Cho, Woong)



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~2020년 2월 중원대학교 컴퓨터공학과 교수

2020년 3월~2023.2월 대구가톨릭대학교 소프트웨어융합학과 교수

2023년 3월~현재 강원대학교 전자정보통신공학과 교수

※ 관심분야 : 무선통신, 협력통신, 차량통신, ITS