

# 혼합된 변조 방식을 적용한 차등 분산 협력 네트워크의 자원 할당 효과

조 응

## Effect of Resource Allocation in Differential Distributed Cooperative Networks with Mixed Signaling Scheme

Woong Cho

요 약

협력 네트워크는 중계기를 이용하여 신호를 전송하고, 수신기에서는 여러 중계기를 통해서 수신된 신호를 결합하여 복조함으로써 통신성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 송신기-중계기 사이에서는 일반적인 변조 방식을 사용하고 중계기-수신기 사이에서는 공간 시간 코드 방식을 적용하는 협력 네트워크 시스템을 가정하여, 자원 할당에 따른 효과를 분석한다. 일반적인 변조 방식은 동기 변조 방식과 차등 변조 방식 두 가지를 고려하고 공간 시간 코드 방식은 차등 변조 방식을 적용한다. 자원 할당은 중계기의 위치와 전송에너지를 고려하며 중계기의 개수에 따른 성능 또한 분석한다.

### ABSTRACT

Cooperative networks enhance the performance of communication systems by combining received signals from the several relay nodes where the source node transmits signals to relay nodes. In this paper, we analyze the effect of resource allocation in cooperative networks. We assume that the cooperative networks use the conventional modulation scheme between the source and relay nodes, and adopt space-time code between the relays and destination node. Both the synchronous and differential modulations are applied for the conventional scheme and differential modulation is used for the space-time code. We consider relay location and energy allocation for resource allocation, and the performance of cooperative networks depending on the number of relay is also investigated.

### 키워드

Cooperative Networks, Resource Allocation, Energy Allocation, Location Allocation, Bit Error Rate  
협력 네트워크, 자원 할당, 에너지 할당, 위치 할당, 비트 오류율

## 1. 서 론

송신기에서 수신기로 신호를 전송할 때 중계기를 이용해서 전송하는 방법은 전송 범위의 확장, 데이터

전송률의 향상 및 통신 음영지역의 감소 등의 장점을 제공한다. 수신기에서 여러 개의 중계기로부터 수신되는 신호를 결합하여 신호를 복조하는 협력 네트워크는 가상의 다중입력 다중출력 구조를 제공하여 전체

• 교신저자: 대구가톨릭대학교 자동차ICT융합공학과  
• 접수일: 2020. 10. 09  
• 수정완료일: 2020. 11. 12  
• 게재확정일: 2020. 12. 15

• Received : Oct. 09, 2020, Revised : Nov. 12, 2020, Accepted : Dec. 15, 2020  
• Corresponding Author : Woong Cho  
Dept. Automotive ICT Convergence Engineering, Daegu Catholic University,  
Email : wcho@cu.ac.kr

통신시스템의 성능을 향상시킬 수 있다[1, 2].

협력 네트워크에서는 중계기가 송신기로부터 수신되는 신호를 처리하는 방식에 따라 중계 프로토콜이 결정되는데, 대표적인 프로토콜이 증폭 후 전송(AF: Amplify-and-Forward) 프로토콜과 복조 후 전송(DF: Decode-and-Forward) 프로토콜이다. 증폭 후 전송 방식은 단순히 수신된 신호를 증폭해서 전송하는 방식이며, 복조 후 전송 방식은 수신된 신호를 복조 및 재변조하여 전송하는 방식이다. 신호전송 방식은 두 가지의 대표적인 방식이 있다. 첫 번째 방식은 일반적인 변조방식을 이용하여 반복적인 형태로 신호를 전송하는 방식이며, 두 번째 방식은 공간 시간 코드 (STC: Space Time Code)를 생성하여 각각의 중계기에 신호를 전송하는 방식이다[3-5]. 또 다른 방식은 두 가지 방식을 혼합하여 송신기와 중계기 사이에서는 일반적인 전송방식을 사용하고 중계기와 수신기 사이에서는 공간 시간 코드를 사용하는 방식이다. 이 방식은 혼합된 신호전송 형태로 여겨질 수 있는데 혼합 형태의 신호전송방식을 고려한 협력 네트워크의 성능이 분석되었다[6, 7]. 통신시스템에서 자원 할당은 제한된 자원을 효율적으로 배분하여 최적의 성능을 도출해내는데 적용될 수 있다. 협력 네트워크에서도 한정된 에너지 조건하에 송신기와 중계기에 다양한 에너지 할당에 따른 최적의 성능을 도출하였고, 중계기의 위치를 고려한 성능분석 결과 또한 제시되었다[2, 8, 9].

본 논문에서는 혼합된 신호전송 방식을 이용하고 복조 후 전송 프로토콜을 적용한 협력 네트워크의 자원 할당에 따른 성능을 분석한다. 혼합된 신호전송 방식을 적용하여 중계기의 위치에 따른 성능분석이 일부 이루어졌으나[9], 주어진 중계기 위치에서 신호대 잡음비 (SNR: Signal-to-Noise Ratio)에 따른 성능이 제시되었지만 에너지 할당을 고려한 성능은 분석되지 않았다. 자원 할당은 에너지 할당 및 중계기 위치 두 가지를 고려한다. 신호 변조 방식은 송신기와 중계기 사이에서는 동기 방식인 이진 위상천이변조(BPSK: Binary Phase Shift Keying)과 비동기 방식인 차등 이진 위상천이변조 (DBPSK: Differential BPSK) 두 가지를 적용하고 중계기와 수신기 사이에는 차등 공간 시간 코드전송 방식을 적용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 시스템 모델과 신호결정 원칙을 소개하고, III장에서는 자

원 할당을 고려한 성능분석 결과를 제시한다. 분석된 결과를 바탕으로 한 결론을 IV장 에서 논의한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 송신기, 여러 개의 중계기 및 하나의 수신기가 있는 협력 네트워크를 고려한다. 그림 1은 신호전송 모델을 나타낸다. 송신기(source),  $L$ 개의 중계기(relay), 수신기(destination)는 각각  $s$ ,  $\{r_k\}_{k=1}^L$ , 및  $d$ 로 나타낸다. 송신기에서 중계기로 신호를 전송할 때 이진신호만 고려하는데 동기방식을 적용할 경우 BPSK신호로 전송하고 비동기 방식인 경우에는 DBPSK신호를 전송한다. 중계기에서는 수신된 신호를 해당되는 변조방식에 맞게 복조한 다음 차등 단일 공간 시간 코드(DUSTC: Differential Unitary Space Time Code [10])를 생성하여 각각의 중계기에서 해당되는 신호를 수신기로 전송한다. 공간 시간 코드는 순환구조를 가지는 대각선 디자인을 이용하는데, 중계기의 개수  $L$ 과 동일한  $L$ 개의 대각선 성분을 가지는 코드를 생성하여  $k$ 번째 중계기는  $k$ 번째 대각선성분의 신호를 전송한다. 수신기에서는 중계기로부터 수신된 신호를 재배열하여 수신된 코드에 해당되는 신호를 복조하게 된다.

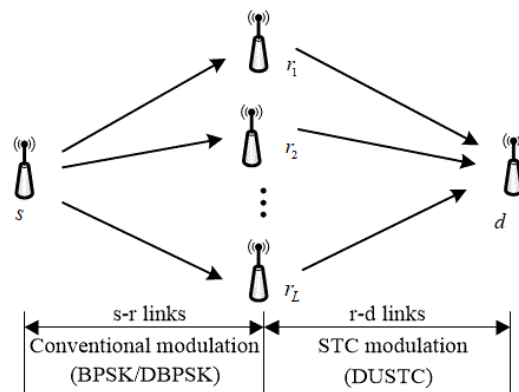


그림 1. 시스템 모델  
Fig. 1 System Model

본 논문에서  $E_i, i \in \{s, r\}$ 는  $i$ 노드에서 송신되는 심볼당 에너지를 나타내며,  $h_n^{i,j}$ 와  $z_n^{i,j}$ 는 각각  $i-j$  링

크( $i, j \in \{s, r_k, d\}$ )에서의 페이딩계수 (fading coefficient)와 잡음을 나타내는데,  $h_n^{i,j}$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma_{i,j}^2$ 인 복소 가우시안 분포(Complex Gaussian distribution)로 가정하고,  $z_n^{i,j}$ 는 평균이 0이고 분산이  $N_j$ 인 복소 가우시안 분포로 가정한다.  $R\{\cdot\}$ 은 실수부신호를 나타내며  $(\cdot)^*$ 는 켈레복소수 (complex conjugate)를 나타낸다. 또한  $\text{diag}\{a_1, \dots, a_L\}$ 는 대각선 성분이  $[a_1, \dots, a_L]$ 인 대각선 행렬을 나타낸다.

송신기에  $n$ 번째 변조된 신호를  $x_n^s$ 이라고 하면  $k$ 번째 중계기  $r_k, k \in \{1, \dots, L\}$ 에서 수신된  $n$ 번째 신호는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n^{s,r_k} = \sqrt{E_s} h_n^{s,r_k} x_n^s + z_n^{s,r_k} \quad (1)$$

여기서  $x_n^s$ 은 BPSK인 경우  $s_n^s$ , DBPSK인 경우  $x_{n-1}^s s_n^s$ 이고  $s_n^s = e^{j2\pi m/2}, m \in \{0, 1\}$ 인 변조 신호를 나타내며 DBPSK일때의 초기값  $x_1^s$ 은 1로 가정한다. 중계기에서의 신호 결정 원칙은 식 (2)와 같다[6, 7].

$$\hat{s}_n^{r_k} = \begin{cases} \arg \max_m R\left\{\left(h_n^{s,r_k}\right)^* y_n^{s,r_k} s_n^s\right\}, \text{BPSK} \\ \arg \max_m R\left\{\left(y_n^{s,r_k}\right)^* y_{n-1}^s s_n^s\right\}, \text{DBPSK} \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)를 적용하여 복조된 신호를 이용하여 중계기에서는  $L$ 개의 중계기 개수에 대응되는 단일 공간 시간 코드를 생성한 후  $k$ 번째 대각선 성분을 수신기로 송신한다. 중계기에서는 차등 변조방식을 이용하여 신호를 생성하므로  $n$ 번째 차등 신호 블록은 초기값  $\mathbf{X}_0^r = \mathbf{I}_L$ 인  $\mathbf{X}_n^r := \mathbf{X}_{n-1}^r \mathbf{V}_n^{Q_n}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $\mathbf{V}_n^{Q_n}$ 는  $Q_n \in \{0, 1, \dots, M-1\}, M=2^L$ 값을 가지는  $L \times L$  대각선 단일 행렬 (diagonal unitary matrix),  $\mathbf{I}_L$ 은  $L \times L$  단위행렬(identity matrix)을 각각 나타낸다. 행렬  $\mathbf{V}_n^{Q_n}$ 는  $\mathbf{V}_n^{Q_n} = \mathbf{V}_1^{Q_n}$ 로 나타내며  $\mathbf{V}_1$ 은 식 (3)과 같이 정의된다[6, 7, 10].

$$\mathbf{V}_1 = \begin{pmatrix} e^{j(2\pi/M)u_1} & 0 & \dots \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & e^{j(2\pi/M)u_L} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서  $u_l \in \{0, \dots, M-1\}, l = \{1, \dots, L\}$ 을 나타낸다. 따라서 수신기에서 수신된  $n$ 번째 블록 신호는 식 (4)

와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Y}_n^d = \mathbf{E}_r^{1/2} \mathbf{H}_n^{r,d} \mathbf{X}_n^{r,d} + \mathbf{Z}_n^d \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{E}_r = \text{diag}\{E_{r_1}, \dots, E_{r_L}\}, \mathbf{H}_n^{r,d} = \text{diag}\{h_n^{r_1,d}, \dots, h_n^{r_L,d}\}$   $\mathbf{Z}_n^d = \text{diag}\{z_n^{r_1,d}, \dots, z_n^{r_L,d}\}$ 는 각각 중계기에서 송신되는 에너지, 채널 및 잡음에 해당되는 신호 블록을 나타낸다. 본 논문에서  $i-j$  링크사이의 순간 신호대잡음비 (instantaneous signal-to-noise ratio)와 평균 신호대잡음비는 각각  $\gamma_{i,j} = |h_n^{i,j}|^2 E_i / N_j$ 와  $\bar{\gamma}_{i,j} = \sigma_{i,j}^2 E_i / N_j$ 로 나타낸다.

중계기와 수신기 사이에서의 신호전송은 차등 변조 방식을 적용하므로 신호 결정 방식 또한 식 (2)의 DBPSK복조와 유사한 방식을 적용할 수 있으며 주어진 코드블록  $\mathbf{X}_n^r = \mathbf{X}_n^m$ 에 대한 신호 결정 원칙은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[6, 7].

$$\hat{Q}_n = \arg \max_{m \in \{1, \dots, M-1\}} \|\mathbf{Y}_{n-1}^d + \mathbf{Y}_n^d \mathbf{V}_n^{mH}\| \quad (5)$$

여기서  $\|\cdot\|$ 는 프로베니우스 놈 (Frobenius norm)을 나타내며  $(\cdot)^H$ 는 켈레 트랜스포즈 (Conjugate transpose)를 나타낸다.

### III. 자원 할당과 성능분석

앞 장의 시스템 모델 및 신호 결정 원칙을 적용한 비트오류율 (BER: Bit Error Rate)은 상위경계값 (upper bound)를 이용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$P_e \leq (1 - P_{e,r})(1 - P_{e,d}) \quad (6)$$

여기서  $P_{e,r}$ 과  $P_{e,d}$ 은 각각 송신기-중계기 및 중계기-수신기 사이에서의 비트오류율 나타낸다. 일반적으로 공간 시간 코드 블록을 이용하면 코드오류율 (CER: Code Error Rate)로 오류율이 나타나는데 본 논문에서는 코드오류율을 비트오류율로 변환하여 전체 성능을 비트오류율로 나타낸다.

자원 할당은 중계기 위치 및 에너지 할당을 고려한다. 중계기 위치 할당의 경우에는 송신기와 수신기가 같은 신호 세기로 전송하고 모든 중계기가 동일한 위치에 있다고 가정하고 송신기와 수신기의 거리를 1로 고정된 상태에서 중계기의 위치를 변화시킬 때의 성능을 분석한다. 에너지 할당의 경우에는 송신기와 수

신기의 에너지가 한정된 상태에서 에너지 할당 비율을 변화시킬 때의 성능을 분석한다.

그림 2, 3은 중계기의 위치를 고려한 협력 네트워크의 성능을 나타내었는데 그림 2와 3은 송신기와 중계기 사이에서 BPSK와 DBPSK신호 전송하는 적용했을 경우를 각각 고려하였다. 중계기의 개수는 2개

에 위치해 있을 때 비트오류율을 분석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 신호대잡음비가 높으면 전반적으로 좋은 성능을 나타내고 신호대잡음비가 높아질수록 최적의 성능을 나타내는 위치가 달라짐을 확인할 수 있다. 두 경우 모두 위치에 따른 성능은 비슷한 경향을 보이지만 DBPSK 경우 최적의 성능을 나타내는 위치가 송신기 쪽으로 좀 더 치우쳐 있음을 알 수 있다.

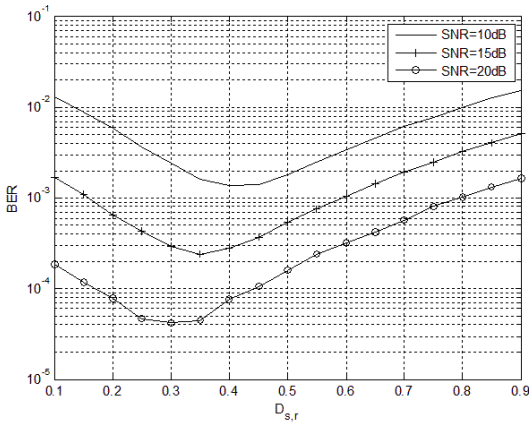


그림 2. 중계기의 위치를 고려한 비트오류율 (BPSK-DUSTC)

Fig. 2 Bit error rate depending on relay location (BPSK-DUSTC)

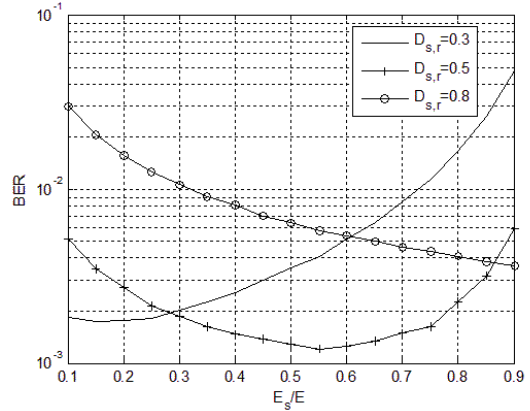


그림 4. 에너지 할당을 고려한 비트오류율 (BPSK-DUSTC)

Fig. 4 Bit error rate depending on energy allocation (BPSK-DUSTC)

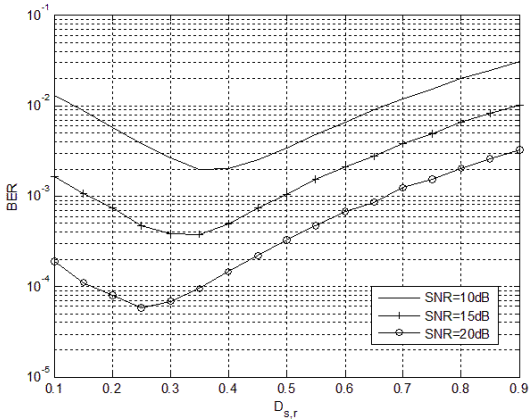


그림 3. 중계기의 위치를 고려한 비트오류율 (DBPSK-DUSTC)

Fig. 3 Bit error rate depending on relay location (DBPSK-DUSTC)

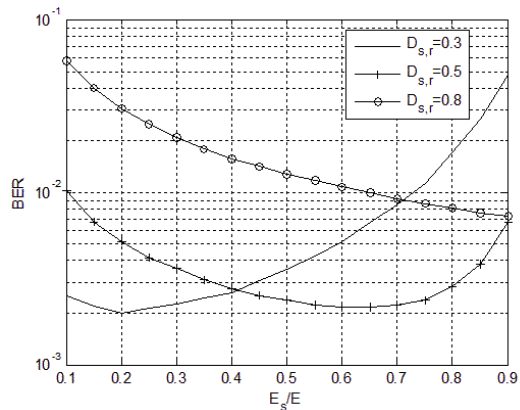


그림 5. 에너지 할당을 고려한 비트오류율 (DBPSK-DUSTC)

Fig. 5 Bit error rate depending on energy allocation (DBPSK-DUSTC)

( $L=2$ )를 고려하였으며 SNR은 각각의 송신기 및 중계기에서의 값을 나타낸다. 중계기가 0.1부터 0.9 사이

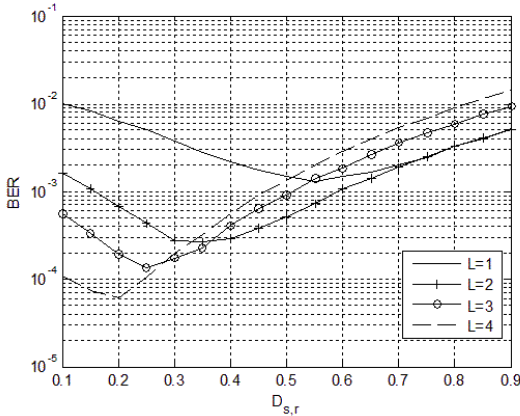


그림 6. 다양한 중계기 개수 및 중계기 위치를 고려한 비트오류율 (BPSK-DUSTC)

Fig. 6 Bit error rate depending on various number of relay and relay location (BPSK-DUSTC)

그림 4, 5는 에너지 할당에 따른 비트오류율을 나타낸다. 중계기 개수는 2개를 고려하였으며  $E_s + LE_r = 15dB$ 를 고려하였다. 중계기의 위치에 따라 최적을 성능을 나타내는 에너지 할당이 다른 것을 확인할 수 있다. 즉 중계기가 송신기에 가까이 위치해 있을 경우에는 송신기에 에너지를 적게 할당할수록 좋은 성능을 보이고, 중계기가 수신기에 가까이 위치해 있을 경우에는 송신기에 좀 더 많은 에너지를 할당할 경우 좋은 성능을 나타낸다.

그림 6과 7은 다양한 중계기의 개수를 고려했을 경우 중계기 위치 및 에너지 할당에 따른 성능을 분석하였다. BPSK와 DBPSK 두 가지 경우 모두 약간의 성능 차이는 있지만, 전반적인 성능에 대한 경향은 유사하므로 각각의 경우 한가지의 변조 방식만 고려하였다. 그림 6에서는 SNR이 15dB일 경우를 고려하였는데, 중계기의 개수가 증가할수록 최적의 성능을 나타내는 위치가 송신기 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 그림 7에서는 전체 에너지를 15dB로 고정하고 중계기의 개수 및 에너지 할당에 따른 성능을 분석하였다. 중계기가 송신기에 가까이 있는 경우에는 중계기에 많은 에너지를 할당하고 중계기의 위치가 수신기 쪽으로 이동할 시에는 송신기 더 많은 에너지를 할당함으로써 성능을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 중계기의 개수가 증가할수록 꼭 좋은 성능을 나타내지 않음을 확인할 수 있다.

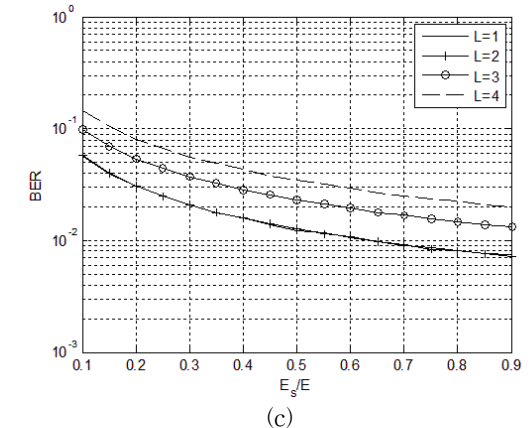
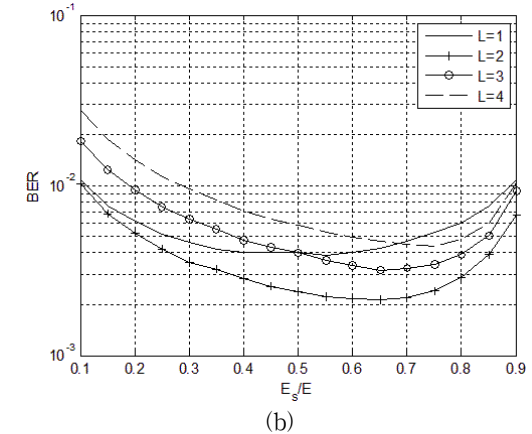
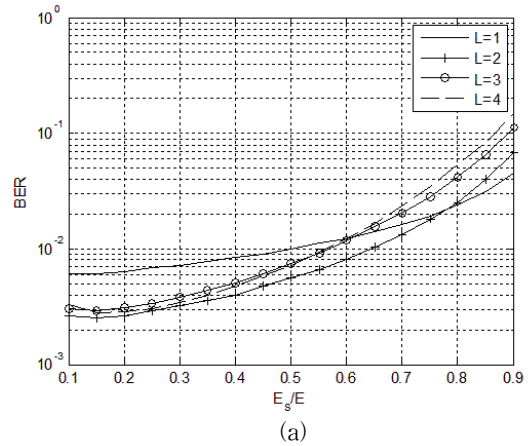


그림 7. 다양한 중계기 개수 및 에너지 할당을 고려한 비트오류율 (DBPSK-DUSTC) (a)  $D_{s,r} = 0.25$  (b)

$$D_{s,r} = 0.5 \text{ (a) } D_{s,r} = 0.8$$

Fig. 7 Bit error rate depending on various number of relay and energy allocation (DBPSK-DUSTC) (a)

$$D_{s,r} = 0.25 \text{ (b) } D_{s,r} = 0.5 \text{ (a) } D_{s,r} = 0.8$$

#### IV. 결 론

본 논문에서는 혼합된 신호 전송방식을 사용하는 협력 네트워크에서 중계기 위치 및 에너지 할당이 전체 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 중계기의 위치에 따른 성능에 있어서는 중계기의 개수가 증가하고 전체 신호의 세기가 증가할수록 최적의 성능을 나타내는 위치가 송신기 방향으로 이동함을 확인할 수 있었다. 에너지 할당에 있어서는 정해진 중계기의 위치에 따라 최적의 성능을 나타내는 에너지 할당 값이 달라짐을 확인할 수 있다. 본 논문에서 분석한 자원 할당 영향은 협력 네트워크 적용 시나리오가 제한적일 수 있다. 실제 시스템을 구현하기 위해서는 수많은 중계기가 존재할 때 최적의 성능을 나타내는 중계기를 능동적으로 선택하는 방안에 관한 연구가 필요하다.

#### References

[1] 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.

[2] 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.

[3] Y. Jing and H. Jafarhani, "Distributed space-time coding for wireless relay network," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 56, no. 7, July 2008, pp. 1092-1100.

[4] G. Wang, Y. Yao, and G. B. Giannakis, "Non-coherent distributed space-time processing for multiuser cooperative transmission," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 5, no. 12, Dec. 2006, pp. 3339-3343.

[5] W. Cho, "Performance of amplify-and-forward cooperative networks with differential unitary space time coding," *Wireless Networks*, vol. 17, no. 3, Apr. 2011, pp. 621-627.

[6] W. Cho, "Performance of cooperative networks with differential distributed modulation using

mixed signaling scheme," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 6, Dec. 2019, pp. 1061-1067.

[7] W. Cho, "Performance comparisons of differential distributed cooperative networks with modulation scheme and relay location," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 3, June 2020, pp. 445-450.

[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, "Effect of energy allocation in dual-hop communication systems with DF protocol," *IET Electronics Letters*, vol. 54, no. 11, 2018, pp. 726-728.

[10] B. M. Hochwald, "Differential unitary space-time modulation," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 48, no. 12, Dec. 2000, pp. 2041-2052.

#### 저자 소개

#### 조 응(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~2020년 2월 중원대학교 컴퓨터공학과 교수

2020년 3월~현재 대구가톨릭대학교 자동차ICT융합공학과 교수

※ 관심분야 : 무선통신, 협력통신, 차량통신, IoT 통신, ITS