

# 혼합된 신호 방식을 적용한 차등 분산 변조 협력 네트워크의 성능

조웅\*

## Performance of Cooperative Networks with Differential Distributed Modulation using Mixed Signaling Scheme

Woong Cho\*

요 약

협력 네트워크는 송신기로부터 수신기로 신호를 전송할 때 여러 중계기를 이용하여 신호를 전송하고 수신기에서 이 신호를 결합하여 복조함으로써 통신성능 향상과 데이터 전송률을 높이는 장점을 제공한다. 일반적으로 송신기에서 수신기로 신호를 전송할 때 중계기가 송신기로부터 수신된 신호를 증폭/재변조 후 수신기로 보내는 반복적인 신호 전송형태가 널리 사용된다. 본 논문에서는 두 가지 신호전송 방식을 혼합하여 신호를 전송하는 협력 네트워크에서의 성능을 분석한다. 즉, 송신기와 중계기사이에서는 일반 변조방식을 사용하고, 중계기와 수신기 사이에서는 공간 시간 코드 방식을 적용한다. 변조방식은 시스템의 복잡도를 줄이기 위해 채널상태정보를 이용하지 않는 차등변조 방식을 이용한다. 다양한 개수의 중계기가 있을 경우에 대한 성능을 비트오류율을 이용하여 분석하며, 송신기와 중계기 및 중계기와 수신기 사이에서 서로 다른 세기로 신호를 보낼 때의 성능을 비교한다. 또한 다양한 신호세기 및 중계기의 개수를 동시에 고려한 성능에 대해서도 논의한다.

### ABSTRACT

Cooperative networks transmit signals from the source node to the destination node via several relay node where the combining and demodulation of relay aided signals provide the benefit of performance enhancement and data rate increment. In general, a repetitive manner transmission scheme in which the received signal from the source node is amplified/re-generated and forward to the destination node is widely used. In this paper, we analyzed the performance of cooperative networks using the mixed transmission scheme. The conventional modulation scheme is used in the source-relay links, and space-time code is applied in the relay-destination links. To reduce the complexity of the overall system, we adopt differential modulation which bypasses channel state information. We analyze bit error rate (BER) of the proposed system by considering the number of relay nodes, and the performances depending on the strength of transmission signal in the source-relays and relay-destination links are compared. In addition, we also discuss the system performance with the signal strength and the number of relay nodes simultaneously.

### 키워드

Cooperative Networks, Differential Modulation, Distributed Networks, Performance Analysis  
협력 네트워크, 차등 변조, 분산 네트워크, 성능 분석

\* 교신저자: 중원대학교 컴퓨터공학과  
• 접수일 : 2019. 10. 29  
• 수정완료일 : 2019. 11. 21  
• 게재확정일 : 2019. 12. 15

• Received : Oct. 29, 2019, Revised : Nov. 21, 2019, Accepted : Dec. 15, 2019  
• Corresponding Author : Woong Cho  
Dept. Computer Engineering, Jungwon University  
Email : wcho@jwu.ac.kr

### I. 서론

협력 네트워크는 송신기로부터 수신기로 신호를 전송할 때 여러 개의 중계기를 이용하여 신호를 전송하고 수신기에서는 여러 경로로부터 수신된 신호를 결합하여 신호를 복조함으로써 가상의 다중입력 다중출력 (MIMO: Multi-Input Multi-Output) 시스템 기능을 제공하여 신호의 성능을 향상시키고 데이터 전송률을 증가시키는 장점을 제공한다[1]. 협력 네트워크의 신호전송은 반복적인 형태로 신호를 전송하는 방식이 널리 사용된다. 즉, 송신기에서 중계기로 신호를 전송하면 중계기에서는 수신된 신호를 증폭 혹은 복조/재변조 후 수신기로 신호를 전송하는 방식이다. 이 방식은 위상천이변조 (PSK: Phase Shift Keying) 등의 일반적인 변조방식을 사용하여 신호를 전송하며 다양한 환경에서의 성능분석 및 자원할당에 따른 성능이 분석되었다[1-6]. 또 다른 방식은 공간 시간 코드 (STC: Space Time Coding) 형태의 신호를 이용하여 신호를 전송하는 방식이다. 공간 시간 코드 방식은 다중입력 다중출력 시스템에서 널리 사용되는 방식으로 각각의 안테나가 생성된 공간 시간 코드를 전송하는 방식이다[7,8]. 협력 네트워크에서 각 노드가 하나의 안테나를 가지고 있다고 가정할 때 각각의 송신기에서는 생성된 공간 시간 코드 중 하나의 신호를 해당 중계기에 각각 전송하고 수신기에서는 중계기를 거쳐 수신된 신호를 이용하여 공간 시간 코드를 복조할 수 있다[9]. 이 방식은 공간 시간 코드가 송신기에서 생성되거나 송신기에서 중계기로 전송할 때는 코드의 신호를 연속적으로 전송하고 중계기에서는 코드의 해당 신호만을 증폭/재변조하여 공간 시간 코드를 분산형태로 수신기로 전송하는 방식이다. 신호를 전송할 때 하드웨어의 복잡도를 줄이기 위해 채널상태정보 (CSI: Channel State Information)를 사용하지 않는 비동기 전송 방식을 이용한 변조방식이 협력네트워크에 널리 적용되었다[3, 8-9].

본 논문에서는 두 가지 신호 전송방식을 혼합한 방식을 협력 네트워크에 적용한 성능을 분석한다. 변조 방식은 비동기 전송방식중 하나인 차등변조 방식을 적용한다. 송신기에서 중계기로 신호를 전송할 때는 일반적인 변조 방식을 사용하고, 중계기에서 수신기로 신호를 전송할 때는 중계기에서 수신된 신호를 기반

으로 하여 공간 시간 코드를 생성하여 각 중계기가 해당 코드 중 정해진 하나의 신호만 전송하는 방식을 고려한다.

### II. 시스템모델

그림 1은  $L$ 개의 중계기를 가지는 협력 네트워크 모델을 나타낸다. 송신기(source)에서 중계기(relay)를 거쳐 수신기(destination)로 신호를 전송하는 시스템을 고려하며, 송신기는  $s$ ,  $L$ 개의 중계기는  $\{r_k\}_{k=1}^L$ , 수신기는  $d$ 로 나타낸다. 송신기-중계기 사이 (s-r links)에서는 차등변조 방식을 이용하여 생성된 신호를 전송하며 중계기에서는 수신된 신호를 이용하여 신호를 복조한다. 중계기-수신기 사이 (r-d links)에서는 중계기가 복조된 신호를 기반으로 하여 차등 단일 공간 시간 코드 (DUSTC: Differential Unitary Space Time Code)를 생성하여 신호를 전송한다. 차등 단일 시간 코드는 순환하는 구조 (Cyclic construction)를 가진 대각선(diagonal) 디자인을 이용하여 생성한다 [10]. 각각의 대각선 성분은 일반적인 위상천이변조 신호처럼 동일한 간격을 가지며 중계기의 개수가 증가할수록 전송하는 위상의 개수도 증가하는 구조를 가진다. 생성된 코드를 이용하여  $L$ 번째 중계기는  $L$ 번째 대각선 성분을 수신기로 전송하며, 수신기에서는 각 중계기로부터 수신된 신호를 이용하여 해당되는 코드를 재구성 하여 해당되는 전송된 신호를 복조한다.

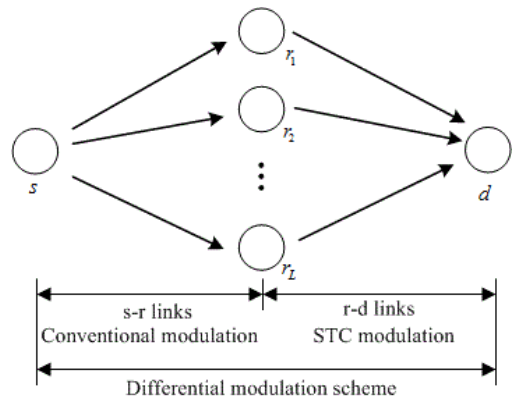


그림 1.  $L$ 개의 중계기를 가진 협력 네트워크 모델  
Fig. 1 Cooperative networks with  $L$  relays

송신기에서는 일반적인 차등변조 방식을 이용하여 생성된 신호를 중계기로 전송한다. 송신기에서 전송되는  $n$ 번째 신호  $x_n^s = x_{n-1} s_n^s$ 로 나타내며 여기서  $s_n = e^{j2\pi m/M}$ ,  $m \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 는  $n$ 번째 위상 변조된 신호이며  $M=2^L$  이며 초기값  $x_1^s = 0$ 이라고 가정한다.  $k$ 번째 중계기를  $r_k$ ,  $k \in \{1, \dots, L\}$ 로 나타내면,  $k$ 번째 중계기에서 수신된  $n$ 번째 신호는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

$k$ 번째 중계기에서는 송신기로 부터의 신호를 복조하여 차등 단일 공간 시간 코드를 생성한 후  $k$ 번째 대각선 성분을 수신기로 송신한다. 중계기에서 생성되는  $n$ 번째 차등 신호 블록은  $\mathbf{X}_n^r := \mathbf{X}_{n-1}^r \mathbf{V}^{Q_n}$  이고 초기값  $\mathbf{X}_0^r = \mathbf{I}_L$  로 나타낼 수 있다. 여기서  $\mathbf{V}^{Q_n}$  는  $Q_n \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ ,  $M=2^{2L}$  값을 가지는  $L \times L$  대각선 단위 행렬 (diagonal unitary matrix),  $\mathbf{I}_L$  은  $L \times L$  단위행렬(identity matrix)을 나타낸다. 또한,  $\eta$  는 원래 데이터 전송률을 나타내는데 본 논문에서는 1로 둔다. 행렬  $\mathbf{V}^{Q_n}$  는  $\mathbf{V}^{Q_n} = \mathbf{V}_1^{Q_n}$  로 나타낼 수 있으며  $\mathbf{V}_1$  은 아래 식 (2)와 같이 정의 된다.

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

여기서  $u_l \in \{0, \dots, M-1\}$ ,  $l = \{1, \dots, L\}$ 을 나타낸다. 그러면, 수신기에서 수신된  $n$ 번째 블록 신호는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Y}_n^d = \mathbf{E}_r^{1/2} \mathbf{H}_n^{r,d} \mathbf{X}_n^{r,d} + \mathbf{Z}_n^d \quad (3)$$

여기서 전송에너지, 채널 및 잡음을 나타내는 성분은  $\mathbf{E}_r = \text{diag}\{E_{r_1}, \dots, E_{r_L}\}$ ,  $\mathbf{H}_n^{r,d} = \text{diag}\{h_n^{r_1,d}, \dots, h_n^{r_L,d}\}$   $\mathbf{Z}_n^d = \text{diag}\{z_n^{r_1,d}, \dots, z_n^{r_L,d}\}$  를 나타낸다. 본 논문에서  $E_i, i \in \{s, r\}$ 는  $i$ 노드에서 송신되는 심볼당 에너지,

$h_n^{i,j}, i, j \in \{s, r_k, d\}$ 는  $i$ - $j$  링크에서의 페이딩계수(fading coefficient)를 나타내며 평균이 0이고 분산이  $\sigma_{i,j}^2$ 인 복소 가우시안 분포(Complex Gaussian distribution)로 가정하고,  $z_n^{i,j}, i, j \in \{s, r_k, d\}$ 은 잡음을 나타내며 평균이 0이고 분산이  $N_j$ 인 복소 가우시안 분포를 가진다고 가정한다. 또한  $\text{diag}\{a_1, \dots, a_L\}$ 는 대각선 성분이  $[a_1, \dots, a_L]$ 인 대각선 행렬을 나타낸다. 따라서  $i$ - $j$  링크사이의 순간 신호대잡음비(instantaneous signal-to-noise ratio)와 평균 신호대잡음비는 각각 식 (4) 및 (5)와 같이 정의될 수 있다.

$$\gamma_{i,j} = \frac{|h_n^{i,j}|^2 E_i}{N_j}, i, j \in \{s, r_k, d\} \quad (4)$$

$$\bar{\gamma}_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j}^2 E_i}{N_j}, i, j \in \{s, r_k, d\} \quad (5)$$

### III. 복조 및 신호결정 원칙

이번 장에서는 각 링크에서의 복조 방식과 신호를 결정하는 원칙에 대해 소개한다. 중계기에서는 차등변조된 신호를 이용하여 신호를 복조하게 되는데 식 (1)에서 첨자 및 에너지부분을 생략하여 간편하게 나타내면 아래 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n = h_n x_n + z_n = h_n (x_{n-1} s_n) + z_n = y_{n-1} s_n + z_n \quad (6)$$

여기서  $z_n' = z_n - z_{n-1} s_n$ 이다. 따라서,  $y_n$ 은 평균이  $y_{n-1} s_n$ 이고 분산이  $2N_j$ 인 복소 가우시안 분포를 가진다. 따라서 식 (6)을 이용한 중계기에서 신호를 복조하는 원칙은 식 (7)과 같이 나타낼 있다.

$$\hat{s}_n^{r_k} = \arg \max_m R\left\{\left(y_n^{s,r_k}\right)^* y_n^{s,r_k} s_n\right\} \quad (7)$$

여기서  $R\{\cdot\}$ 은 실수부신호를 나타내며  $(\cdot)^*$ 는 켈레복소수(complex conjugate)를 나타낸다.

중계기와 수신기사이에서의 신호전송은 차등 공간

시간 코드를 기반으로 하기 때문에 공간 시간 차등 복조 방식을 이용하여 신호를 검출할 수 있다. 따라서 주어진 코드  $\mathbf{X}_n^r = \mathbf{X}_n^m$  에 대해 식 (8)을 이용하여 신호를 복조할 수 있다.

$$\hat{Q}_n = \arg \max_{m \in \{1, \dots, M-1\}} \|\mathbf{Y}_{n-1}^d + \mathbf{Y}_n^d \mathbf{V}_n^{mH}\| \quad (8)$$

여기서  $\|\cdot\|$ 는 프로베니우스 놈 (Frobenius norm)을 나타내며  $(\cdot)^H$ 는 켈레 트랜스포즈 (Conjugate transpose)를 나타낸다. 송신기와 중계기 사이에서의 신호 표현방식과 유사하게 에너지 부분 및 첨자부분을 생략해서 식 (3)을 표현하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_n &= \mathbf{H}_n \mathbf{X}_n + \mathbf{Z}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{X}_{n-1} \mathbf{V}_n + \mathbf{Z}_n \\ &= \mathbf{Y}_{n-1} \mathbf{V}_n + \mathbf{Z}'_n \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\mathbf{Z}'_n = \mathbf{Z}_n - \mathbf{Z}_{n-1} \mathbf{V}_n$  이고  $\mathbf{V}_n$ 은 단일 행렬이므로  $\mathbf{Z}'_n$ 는  $\mathbf{Z}_n$ 보다 두 배의 분산을 가지게 된다. 따라서 차등변조방식을 적용한 경우와 동일하게 식 (8)을 이용하여 신호를 결정할 수 있다.

#### IV. 성능분석

송신기-중계기 사이에서의 오류확률을  $P_{e,r}$ , 중계기-수신기 사이에서의 오류확률을  $P_{e,d}$ 라고 하면 전체 오류확률  $P_e$ 는 식 (10)과 같은 상위경계값 (upper bound)으로 표현될 수 있다.

$$P_e \leq (1 - P_{e,r})(1 - P_{e,d}) \quad (10)$$

식 (10)은 심벌오류율(SER: Symbol Error Rate), 코드오류율(CER: Code Error Rate), 혹은 비트오류율(BER: Bit Error Rate)등의 특정한 오류율이 아닌 일반적인 오류율을 나타낸다. 식 (10)은 송신기와 중계기 사이에서 오류가 발생하더라도 중계기와 수신기 사이에서 또 다른 오류가 발생하여 송신기와 수신기 사이에서는 오류가 발생하지 않는 것으로 판단되는 경

우가 고려되지 않으므로 전체성능이 경계값으로 표현된다.

송신기와 중계기사이에서의 오류율  $P_{e,r}$ 을  $M$ 진 차등변조방식의 심벌에러를 고려하여 나타내면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다[11].

$$P_{e,r} = \frac{g_{PSK}}{2\pi} \int_{-2/\pi}^{2/\pi} \frac{M_\gamma(-[1 - \sqrt{1 - g_{PSK} \cos\theta}])}{1 - \sqrt{1 - g_{PSK} \cos\theta}} d\theta \quad (11)$$

$$\text{여기서 } g_{PSK} = \sin^2 \frac{\pi}{M}, \quad M_\gamma = 1/(1 - x\bar{\gamma}), \quad \forall x > 0$$

이고  $\bar{\gamma}$ 는 평균 신호대잡음비를 나타낸다. 중계기와 수신기사이의 오류율은 코드오류율을 이용하여 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P[\mathbf{V}_n \rightarrow \hat{\mathbf{V}}_n] &= Q\left(\sqrt{d^2(\mathbf{V}_n, \hat{\mathbf{V}}_n)/4N_0}\right) \\ &\leq \exp[d^2(\mathbf{V}_n, \hat{\mathbf{V}}_n)/8N_0] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $d^2(\mathbf{V}_n, \hat{\mathbf{V}}_n) = \|\mathbf{V}_n - \hat{\mathbf{V}}_n\| \mathbf{Y}_{n-1}\|^2$ 으로 나타낼 수 있는데 수신된 단일행렬과 기준 단일행렬간의 거리를 나타낸다.

시스템 전체의 성능은 식 (10)으로 주어지나, 송신기-중계기 및 중계기-수신기 사이에서의 성능은 각각 심벌오류율(식 (11))과 코드오류율(식 (12))로 다른 형태로 주어지기 때문에 전체성능을 비트오류확률로 변환하여 시뮬레이션을 통한 성능을 분석하였다. 그림 2는 다양한 중계기 개수에 따른 성능을 나타내고 있다. 그림에서 가로축은 신호대잡음비를 나타내며 세로축은 비트오류율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 중계기 개수가 증가할수록 성능이 저하됨을 알 수 있다. 송신기와 중계기에서 전송하는 심벌은  $M$ 진 차등변조 신호를 이용하여 전송하므로 중계기의 개수가 증가하면  $M$ 이 커지게 된다. 이는 송신기-중계기 및 중계기-수신기 각 링크의 오류율이 증가하여 결과적으로  $M$ 이 커지게 되면 전체 비트오류율이 증가하는 결과가 발생한다.

본 논문에서 제안하는 신호전송 방식은 송신기에서 차등변조된 신호가 중계기로 전송된 후 중계기에서는 신호를 복조 후 차등 공간 시간 코드로 재변조하여 신호를 전송하므로 전체시스템의 성능을 향상시키기

위해서는 송신기-중계기 사이의 오류율을 감소시켜서 획득할 수 있다. 송신기-중계기 사이의 오류가 없다면 중계기-송신기 사이에 공간 시간 코드를 적용하고 가상 다중입력 단일출력 (MISO: Multi-Input Single-Output) 시스템을 이용한 신호전송 형태를 구성하여 전체 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

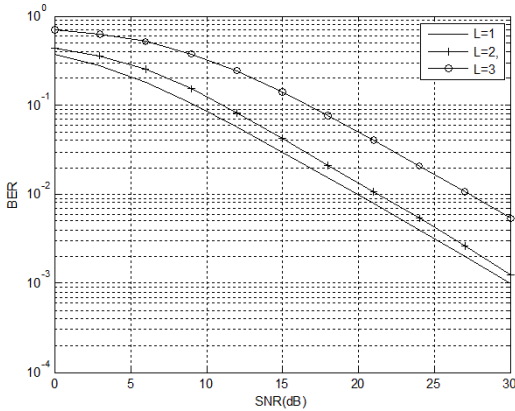


그림 2. 다양한 중계기 개수에 따른 비트오류율  
Fig. 2 Bit error rate depending on the number of relay node

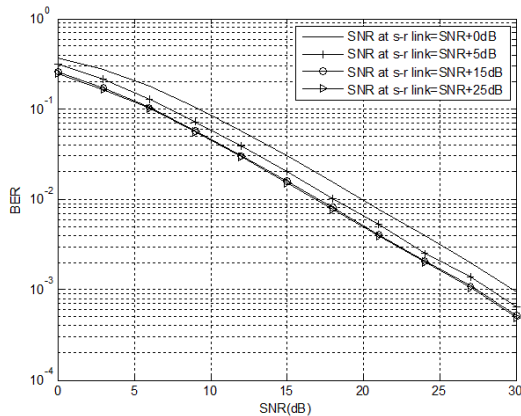


그림 3. 송신기-중계기 사이의 신호대잡음비 할당 변화에 따른 비트오류율 (L=1)  
Fig. 3 Bit error rate depending on the variation of SNR allocation in s-r link when L=1

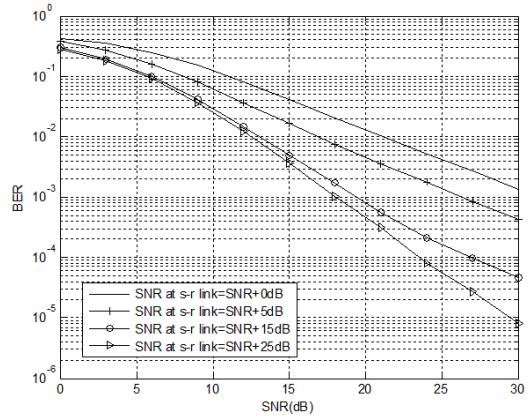


그림 4. 송신기-중계기 사이의 신호대잡음비 할당 변화에 따른 비트오류율 (L=2)  
Fig. 4 Bit error rate depending on the variation of SNR allocation in s-r link when L=2

송신기-중계기 사이의 오류율을 줄이기 위해 송신기-중계기 링크에 중계기-수신기보다 더 높은 신호대잡음비를 할당했을 경우의 비트오류율을  $L=1$ 과 2일 때를 고려하여 분석하였다. 그림 3, 4에 각각의 결과를 나타내고 있다.  $L=1$ 인 경우는 다이버시티이득이 없으므로 어느 정도의 신호대잡음비 할당 이후에는 더 이상의 성능향상이 없음을 확인할 수 있다.  $L=2$ 인 경우에는 송신기-중계기의 신호대잡음비가 증가할수록 성능이 향상됨을 확인할 수 있으며 다이버시티 이득

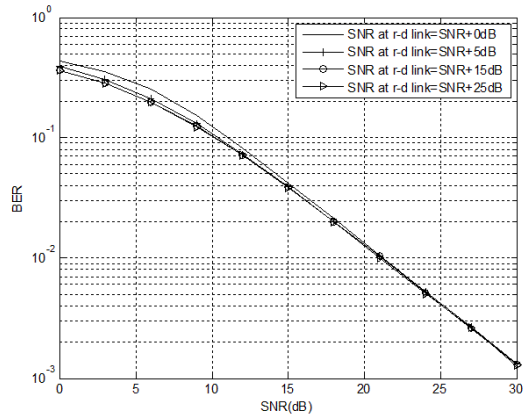


그림 5. 중계기-수신기 사이의 신호대잡음비 할당 변화에 따른 비트오류율 (L=2)  
Fig. 5 Bit error rate depending on the variation of SNR allocation in r-d link when L=2

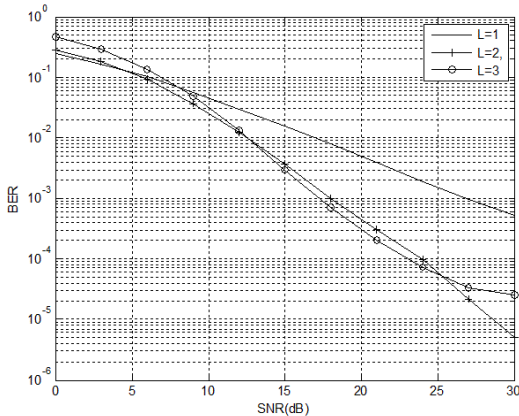


그림 6. 송신기-중계기 사이의 신호대잡음비에 25dB가 더 할당되었을 경우의 비트오류확률  
Fig. 6 Bit error rate when more than 25dB is assigned at s-r link

또한 획득할 수 있음을 확인할 수 있다. 이와는 다른 경우로  $L=2$ 일 때 중계기-수신기 사이에 송신기-중계기에 비해 더 높은 신호대잡음비를 할당할 경우의 성능을 그림 5에 나타내었다. 예상했듯이 송신기-중계기 사이에 이미 오류가 발생했으므로 중계기-송신기 사이에 높은 신호대잡음비를 할당하더라도 시스템 전체의 성능은 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 송신기-중계기 사이에 중계기-수신기 보다 25dB 높은 신호대잡음비를 할당했을 경우의 비트오류율을 다양한 중계기 개수를 고려하여 분석하였다. 그림에 나타나 있듯이 신호대잡음비가 증가할수록 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 하지만,  $L=3$ 일 경우에는 신호대잡음비가 커질 경우에도 성능이 향상되지 않는 경우가 발생한다. 이는 다이버시티 이득을 획득하기 위해서는 중계기의 개수에 송신기-중계기 사이에서 할당해주어야 하는 신호대잡음비의 기준값이 존재함을 의미한다. 즉 중계기 개수가 증가하면 변조계수가 증가하고, 동일한 신호대잡음비에서 나타내는 오류율 또한 증가하게 된다. 이에 따라 송신기-중계기 사이에서 오류를 보상하기 위해서는 더 높은 신호대잡음비가 할당되어야 한다.

## V. 결론

본 논문에서는 일반적인 변조방식과 공간 시간 코드 신호방식을 혼합해서 전송하는 협력네트워크 시스템의 성능을 차등변조방식을 적용하여 분석하였다. 중계기의 개수에 따른 성능을 분석하였으며 송신기-중계기와 중계기-수신기 사이에서 서로 다른 신호대잡음비가 할당되었을 경우에 대한 성능 또한 분석하였다. 성능분석결과 중계기를 사용하여 획득할 수 있는 다이버시티 이득을 보장하기 위해서는 송신기-중계기 사이에서 안정적인 성능확보가 필요하며 중계기 개수에 따라 일정 기준값 이상의 신호대잡음비를 공급하면 다이버시티 이득을 통한 성능을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다. 추후 연구내용으로는 송신기-중계기 사이의 성능확보를 위한 자원할당 방안 제시 및 변조방식의 변화에 따른 성능 분석이 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] 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.
- [4] W. Cho and H. Cho, "Performance of relay networks with partially differential modulation scheme depending on energy allocation in railway environments," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 1, Jan. 2016, pp. 17-22.
- [5] 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, Feb. 2017, pp. 69-74.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] B. M. Hochwald, "Differential unitary space-time modulation," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 48, no. 12, Dec. 2000, pp. 2041-2052.
- [11] M. K. Simon and M. S. Alouini, *Digital Communications over Fading Channels*. 2nd Ed. New York: Wiley, 2004, Chap. 8.2.

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~현재 중원대학교 컴퓨터공학과 교수

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

