

# 양 방향 중계 네트워크에서의 부호화 협력 통신

## Coded Cooperation Communication over Two-Way Relay Network

박지환 · 공형윤

Ji-Hwan Park · Hyung-Yun Kong

### 요약

네트워크 부호화를 이용한 양 방향 중계 기법은 기존의 단 방향 중계 프로토콜보다 송신 시간을 줄임으로써 전송량을 높일 수 있는 장점을 가지며, 부호화 협력 프로토콜은 물리층에서 이루어지는 부호화를 적용한 알고리즘으로 프로토콜의 신뢰성을 높일 수 있는 장점을 가진다. 본 논문에서는 이러한 두 프로토콜의 장점을 결합한 양 방향 중계 네트워크에서의 부호화 협력 프로토콜을 제안하였다. 제안하는 프로토콜이 기존의 양 방향 증폭 후 재전송 프로토콜보다 우수한 신뢰성과 전송량을 가지며, 기존의 양 방향 하이브리드 복호 후 재전송 프로토콜과 동일한 전송량을 가지면서 보다 우수한 신뢰성을 가짐을 시뮬레이션 결과를 통해 증명한다.

### Abstract

Comparing conventional one-way relaying, two-way relaying scheme with network coding can achieve high throughput by reducing the transmission time. Coded cooperation protocol, which is a algorithm that uses coding on physical layer, can achieve high reliability. In this paper, we propose coded cooperation protocol over two-way relay network. Simulation results show proposed protocol has better performance in terms of reliability and throughput compare with conventional amplify and forward protocol. Also, with same throughput, proposed protocol has better performance in terms of reliability compare with the conventional hybrid decoded and forward protocol.

Key words : Two-Way Relaying, Cooperative Transmission, Network Coding, Opportunistic Relaying, Incremental Relaying

### I. 서론

협력 통신(cooperative communication) 프로토콜은 단일 안테나를 가지는 무선 단말기들이 서로 간의 안테나를 공유하여 공간 다이버시티(spatial diversity) 이득을 얻는 기술로, 데이터를 주고 받는 소스 노드와 목적지 노드 사이에 위치한 노드들 중계 노드로 이용하여 소스 노드로부터 수신한 신호를 목적지 노드로 재전송하는 프로토콜이다<sup>[1]</sup>. 협력 통신의 기본적인 전송 방식은 중계 방식에 따라 증폭 후 재

전송(amplify and forward), 복호 후 재전송(decoded and forward), 부호화 협력 전송(coded cooperation)으로 분류할 수 있다. 이 중 부호화 협력 전송은 물리층에서 이루어지는 부호화를 적용한 알고리즘으로 프로토콜의 신뢰성을 높일 수 있는 장점을 가지며, david chase에 의해서 처음으로 소개되었다<sup>[2]</sup>. 또한, 기본적인 부호화 협력 통신 방법에서 중계 노드에 펀처링(puncturing) 기법을 적용하여 전송량을 높이는 기법이 활발히 진행 중이다<sup>[3]-[5]</sup>. 그러나 이와 같은 전송 방식은 항상 중계기를 사용하기 때문에 직

「이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0073895)」 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(Department of Electrical Engineering, Ulsan University)

· 논문 번호 : 20100924-137

· 교신저자 : 공형윤(e-mail : hkong@ulsan.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 11월 8일

접 전송에 비해 전송량이 감소하는 단점을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 참고문헌 [6]~[9]에서는 네트워크 부호화(network coding)를 이용한 양 방향 중계 프로토콜을 제안하였다. 양 방향 중계 프로토콜은 3개 시간 슬롯(time slot) 혹은 2개 시간 슬롯 동안 양 방향 통신을 할 수 있으므로 기존의 단 방향 중계 프로토콜과 같이 중계기가 단 방향으로 4개 슬롯에 걸쳐 전송해야 하는 것보다 송신 시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 참고문헌 [10]에서는 양 방향 중계 채널에서 시스템의 전송량을 향상시키기 위한 복호 후 재전송 방식과 증폭 후 재전송 방식의 중계 기법이 제안하였으며, 최근 양 방향 중계 채널에서 시스템의 높은 전송량과 다이버시티 이득 모두를 얻기 위한 연구가 활발히 진행 중이다<sup>[11],[12]</sup>.

즉, 부호화 협력 전송은 협력 통신 기법 중 신뢰성이 가장 우수한 장점을 가지는 반면 직접 전송에 비해 전송량이 감소하는 단점을 가지고 있다. 또한, 네트워크 부호화를 이용한 양 방향 중계 프로토콜은 단 방향 중계 프로토콜의 전송량을 향상시킬 수 있는 장점을 가지는 반면 신뢰성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

그러므로 본 논문에서는 양 방향 중계 네트워크에서 두 프로토콜의 단점을 극복하고 장점만을 이끌어 낼 수 있는 부호화 협력을 이용한 양 방향 중계기법을 제안한다.

2절에서는 부호화 협력 통신에 대해서 간단하게 설명하고, 제안한 프로토콜의 구성 및 동작 원리에 대해서 설명한다. 3절에서는 다양한 조건에서 제안한 프로토콜의 성능을 비교·분석하고, 마지막으로 4절에서 결론을 맺는다.

## II. 양 방향 중계 네트워크에 부호화 협력 통신

### 2-1 부호화 협력 통신

부호화 협력 프로토콜은 그림 1과 같이 협력 통신에 채널 코딩을 결합한 기술로, 가장 기본적인 부호 결합 협력 통신의 동작 방법은 다음과 같다. 소스 노드는 보내고자 하는 정보 비트를 채널 부호화하여 부호화된 데이터  $N$  프레임을 가진다.  $a_n$ 은 RCPC

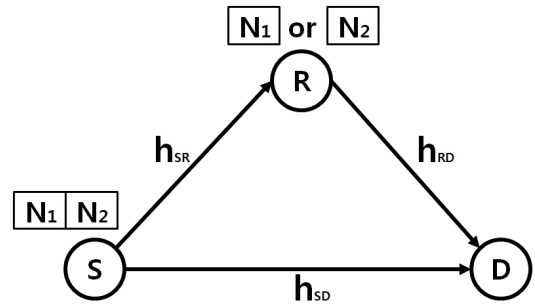


그림 1. 부호화 협력 통신

Fig. 1. Coded cooperation communication.

(Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes) 부호화된 코드워드이다.<sup>[13]</sup>

$$\begin{aligned}
 N &= [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n], \ n = 1, 2, 3 \dots \\
 N_1 &= [a_1 \ a_3 \ \dots \ a_{2n-1}] \\
 N_2 &= [a_2 \ a_4 \ \dots \ a_{2n}]
 \end{aligned} \tag{1}$$

첫 번째 시간 슬롯에서 소스 노드는  $N_1$  또는  $N_2$ 를 전송하고 목적지 노드와 중계 노드는 데이터를 수신한다. 중계 노드는 역 부호화를 통하여 원 데이터  $N$ 을 복구할 수 있으며, 복구한  $N$ 을 다시 평처리하여  $N_1, N_2$ 를 생성한다<sup>[13]</sup>. 두 번째 시간 슬롯에서 중계 노드는 평처리된 데이터  $N_1, N_2$  또는 수신한 데이터  $N$ 을 목적지 노드로 전송하게 되고, 목적지 노드에서는 소스로부터 수신한  $N$ 과 중계 노드로부터 수신한  $N, N_1$  또는  $N_2$ 를 결합한 뒤 디코딩을 수행하여 원 데이터를 복구하게 된다.

### 2-2 제안하는 프로토콜

본 논문에서는 두 명의 사용자와 한 개의 중계기가 있는 양 방향 중계 채널을 가정하며, 제안하는 프로토콜은 2-1절에서 설명한 부호화 협력 통신 방식을 기초로 한다.

제안하는 통신의 동작 모델은 그림 2와 같으며, TDMA(Time Division Multiplexing Access) 방식으로 동작하며, 순방향 에러 정정 코드(FEC)로서 많이 이용되는 컨볼루션 부호화(Convolution coding) 시스템을 고려한다.

첫 번째 시간 슬롯에서 사용자 A는 부호율  $k/n$ 으로 컨볼루션 부호화된 데이터 프레임( $N$ )을 생성한다. 이후 데이터 프레임을 평처리하여 부호율  $2k/n$ 인 프

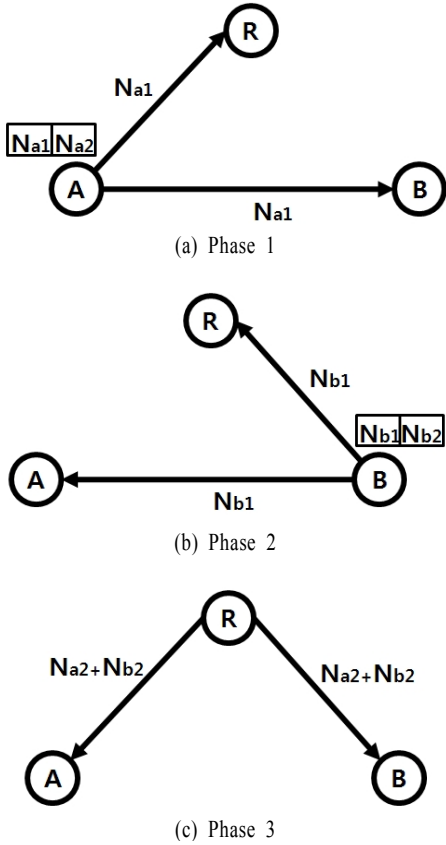


그림 2. 양 방향 중계 네트워크에서 부호화 협력  
Fig. 2. Coded cooperation over two-way relay network.

레이프  $N_{a1}$ ,  $N_{a2}$ 를 각각 생성하고,  $N_{a1}$ 을 중계 노드와 사용자 B로 전송한다. 중계 노드와 사용자 B는 이를 수신하고, 중계 노드는 CRC를 이용하여 수신 데이터의 오류 여부를 확인한다. 사용자 A로부터 수신 데이터에 오류가 없을 경우 역부호화를 통하여 원 데이터  $N$ 을 복구하고, 복구한 데이터  $N$ 을 펄싱하여  $2k/n$ 인 프레임  $\widehat{N}_{a1}$ ,  $\widehat{N}_{a2}$ 를 각각 생성한다.

두 번째 시간 슬롯에서 사용자 B 또한, 부호율  $k/n$ 으로 콘볼루션 부호화된 데이터 프레임( $N$ )을 생성한다. 이 후 데이터 프레임을 펄싱하여 부호율  $2k/n$ 인 프레임  $N_{b1}$ ,  $N_{b2}$ 를 각각 생성하고,  $N_{b1}$ 을 중계 노드와 사용자 A로 전송한다. 중계 노드와 사용자 A는 이를 수신하고, 중계 노드에서는 CRC를 이용하여 수신 데이터의 오류 여부를 확인한다. 사용자 B로부터 수신한 데이터에 오류가 없을 경우 역부호화를 통하여 원 데이터  $N$ 을 복구하고, 복구한 데

이터  $N$ 을 펄싱하여  $2k/n$ 인 프레임  $\widehat{N}_{b1}$ ,  $\widehat{N}_{b2}$ 를 각각 생성한다.

첫 번째 시간 슬롯, 두 번째 시간 슬롯에서 사용자 A, B와 중계 노드가 수신한 신호는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 y_{AB} &= h_{AB}\sqrt{P_A}N_{a1} + n_{1,B} \\
 y_{AR} &= h_{AR}\sqrt{P_A}N_{a1} + n_{1,R} \\
 y_{BA} &= h_{BA}\sqrt{P_B}N_{b1} + n_{2,A} \\
 y_{BR} &= h_{BR}\sqrt{P_B}N_{b1} + n_{2,R}
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서  $y_{XY}$ 는 노드  $Y$ 가 노드  $X$ 로부터 수신한 신호 ( $X, Y \in \{A, B, R_1, R_2, \dots, R_k\}$ );  $h_{XY}$ 는 노드  $X$ 와 노드  $Y$ 간의 채널 계수;  $P_X$ 는 노드  $X$ 에서의 전송 전력;  $n_{i,j}$ 는  $j$ 번째 시간 슬롯,  $i$ 번째 노드에서의 평균이 0 이고 분산이  $\sigma_X^2$ 인 백색 가우시언 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)이다.

세 번째 시간 슬롯에서 중계 노드는 다음과 같은 동작을 한다.

### 2-2-1 두 수신 신호 모두 오류가 없는 경우

중계 노드에서는 생성한 프레임을 네트워크 부호화( $N_{ab2} = \widehat{N}_{a2} + \widehat{N}_{b2}$ )한 후 사용자 A와 B로 전송한다. 사용자 A와 사용자 B가 중계 노드로부터 수신한 신호는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 y_{RA} &= h_{RA}\sqrt{P_R}N_{ab2} + n_{3,A} \\
 &= h_{RA}\sqrt{P_R}\widehat{N}_{a2} + h_{RA}\sqrt{P_R}\widehat{N}_{b2} + n_{3,A} \\
 y_{RB} &= h_{RB}\sqrt{P_R}N_{ab2} + n_{2,B} \\
 &= h_{RB}\sqrt{P_R}\widehat{N}_{a2} + h_{RB}\sqrt{P_R}\widehat{N}_{b2} + n_{2,B}
 \end{aligned} \tag{3}$$

이때 사용자 A, B가 자신의 심벌에 대한 정보를 알고 있다고 가정하면, 식 (4)와 같이 중계 노드로부터 수신한 신호에서 상대방의 신호만을 검출할 수 있다<sup>[14]</sup>.

$$\begin{aligned}
 Y_{RA} &= h_{RA}\sqrt{P_R}\widehat{N}_{b2} + n_{3,A} \\
 Y_{RB} &= h_{RB}\sqrt{P_R}\widehat{N}_{a2} + n_{3,B}
 \end{aligned} \tag{4}$$

### 2-2-2 사용자 A의 수신 신호만 오류가 없는 경우

중계 노드에서는 사용자 A의 평처리된 프레임  $\widehat{N}_{a2}$ 를 사용자 A와 B로 전송한다. 사용자 A와 사용자 B가 중계 노드로부터 수신한 신호는 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} y_{RA} &= h_{RA} \sqrt{P_R} \widehat{N}_{a2} + n_{3,A} \\ y_{RB} &= h_{RB} \sqrt{P_R} \widehat{N}_{a2} + n_{3,B} \end{aligned} \quad (5)$$

마찬가지로 중계 노드로부터 수신한 신호에서 자신의 신호 성분을 제거하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[14]</sup>.

$$\begin{aligned} Y_{RA} &= n_{3,A} \\ Y_{RB} &= h_{RB} \sqrt{P_R} \widehat{N}_{a2} + n_{3,B} \end{aligned} \quad (6)$$

### 2-2-3 사용자 B의 수신 신호만 오류가 없는 경우

중계 노드에서는 사용자 B의 평처리된 프레임  $\widehat{N}_{b2}$ 를 사용자 A와 B로 전송한다. 사용자 A와 사용자 B가 중계 노드로부터 수신한 신호는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} y_{RA} &= h_{RA} \sqrt{P_R} \widehat{N}_{b2} + n_{3,A} \\ y_{RB} &= h_{RB} \sqrt{P_R} \widehat{N}_{b2} + n_{3,B} \end{aligned} \quad (7)$$

마찬가지로 중계 노드로부터 수신한 신호에서 자신의 신호 성분을 제거하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[14]</sup>.

$$\begin{aligned} Y_{RA} &= h_{RA} \sqrt{P_R} \widehat{N}_{b2} + n_{3,A} \\ Y_{RB} &= n_{3,B} \end{aligned} \quad (8)$$

### 2-2-4 두 사용자의 수신 신호 모두 오류가 있는 경우

중계 노드는 아무런 동작을 하지 않고 다음 신호를 기다린다.

최종적으로 사용자 A, B가 수신한 신호는 식 (9)와 같으며, ML 비터비 알고리즘을 사용하여 상대방 사용자의 데이터를 복구한다.

$$\begin{aligned} Y_A &= y_{BA} + Y_{RA} \\ Y_B &= y_{AB} + Y_{RB} \end{aligned} \quad (9)$$

## III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 절에서는 제안한 프로토콜의 시뮬레이션을 통

한 성능을 분석한다. 프로토콜의 성능 비교를 위해 양 방향 중계 네트워크에서 하이브리드 복호 후 재전송(Hybrid Decoded and Forward: HDF) 프로토콜, 증폭 후 재전송(Amplify and Forward: AF) 프로토콜, 부호화 협력(Coded Cooperation: CC) 프로토콜의 성능을 비교하였다. 모든 경로에 대한 채널 환경은 한 심볼 주기 동안 변하지 않고 심볼 주기에 따라 독립적으로 변하는 느린 레일리 페이딩과 거리에 따른 경로 손실의 영향을 고려한 경로 이득을 함께 고려하였으며 상호 독립적이다. 경로 손실 지수(path loss coefficient)를 3인 경우를 고려하였으며, 프레임당 BPSK 변조된 128비트의 정보를 가진다. 각 프로토콜의 공정한 비교를 위해 각 사용자가 한 번에 256비트를 전송할 수 있는 시스템을 고려하였다. HDF 프로토콜과 AF 프로토콜의 경우, 부호어 생성 함수로 부호율 1/2에 자유 거리( $d_{free}$ ) 6인  $G=[15 \ 17]$  콘볼루션 부호기를 사용하였으며, 부호화되어 한 프레임에 256비트를 전송한다. CC 프로토콜의 경우, 부호어 생성 함수로 부호율 1/4에 자유 거리 ( $d_{free}$ ) 13인  $G=[15 \ 17 \ 15 \ 17]$  콘볼루션 부호기를 사용하였으며, 콘볼루션 부호화된 데이터 프레임에 평처리하여 한 프레임에 256비트를 전송한다. 또한, 일반적인 협력 전송과 마찬가지로 사용자 A와 사용자 B 사이의 거리를  $d_{AB}=1$ 로 일반화하였으며, 사용자 A와 중계 노드 간의 거리는  $d_{AR}=1-d_{BR}$ 로 나타내었다. 비교되어지는 프로토콜들과의 공정한 비교를 위하여 모든 프로토콜의 총 전송 전력은  $P_T$ 로 하였다. 직접 전송의 각 사용자가 데이터를 주고받기 위해 두 시간 슬롯이 요구되므로 전송 전력을  $P_A=P_B=P_T/2$ 로 하였으며, 제안한 프로토콜의 경우 총 세 시간 슬롯이 요구되므로 각 사용자와 중계 노드의 전송 전력을  $P_A=P_B=P_R=P_T/3$ 으로 하였다. 그리고 CRC는 완벽하다고 가정한다.

그림 3은 직접 전송, 양 방향 AF, 양 방향 HDF, 양 방향 CC 프로토콜의 BER 성능을 나타내고 있다. 기존의 단 방향 중계 네트워크에서의 각 프로토콜의 성능은, 낮은 SNR에서 AF의 성능이 잡음 증폭으로 인해 직접 통신보다 열악하나 5~6 dB 이상의 SNR에서는 직접 통신보다 우수하다. 양 방향 중계 네트워크에서는 매우 낮은 SNR에서 AF 프로토콜의 성능이 직접 통신보다 열악하나 3 dB 이상의 SNR에서는

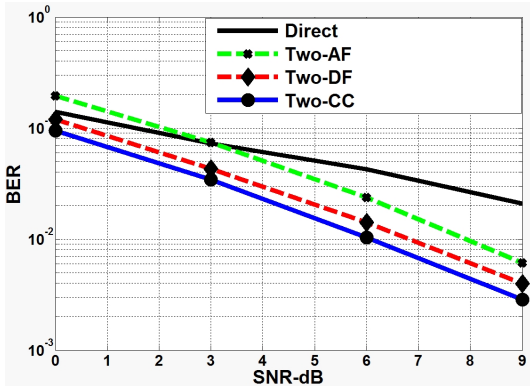


그림 3. 양 방향 중계 네트워크에서 각 프로토콜의 BER 성능  
 Fig. 3. BER performance of each protocol over two-way relay network.

직접 통신보다 우수함을 알 수 있다. 이는 단 방향 중계 네트워크에서의 총 전송 전력이 직접 통신 P, AF 프로토콜이 2P로 두 배 차이가 나는 반면, 양 방향 중계 네트워크에서의 총 전송 전력이 직접 통신이 2P, AF 프로토콜이 3P로 1.5배 차이가 나기 때문이다. 결론적으로 양 방향 중계 네트워크에서는 CC, HDF, AF, 직접 통신 순으로 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 4는 양 방향 중계 네트워크에서 HDF, CC 프로토콜의 전송량을 나타내고 있다. HDF와 CC의 경우, 중계 노드에서 수신한 신호에 오류가 없을 경우에만 데이터를 재전송하므로 중계 노드가 데이터를 전송하는 사용자 쪽에 가까울수록 높은 전송량을 가짐을 알 수 있다.

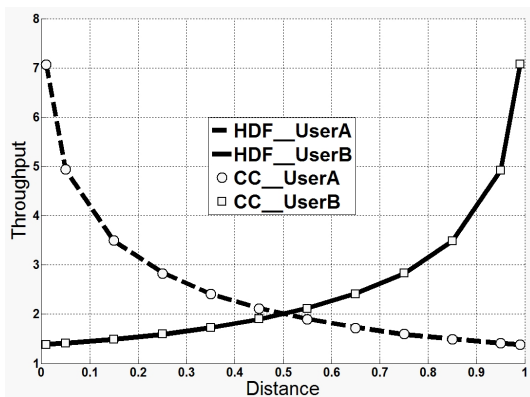


그림 4. HDF, CC 프로토콜에서 각 사용자의 전송량  
 Fig. 4. Throughput of each user using HDF, CC protocol.

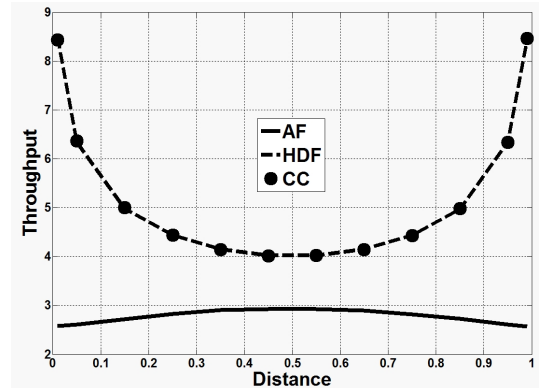


그림 5. 양 방향 중계 네트워크에서 각 프로토콜의 전송량  
 Fig. 5. Throughput of each protocol over two-way relay network.

그림 5는 각 프로토콜에서 두 사용자가 얻는 전송량의 합을 나타낸 그림이다. 먼저 HDF와 CC 프로토콜이 AF 프로토콜보다 우수한 전송량을 가짐을 알 수 있다. 또한, AF 프로토콜의 경우 중계 노드에서 수신 신호의 오류 유무에 상관없이 데이터를 재전송하므로 중계 노드가 가운데 위치에 있을 때 가장 높은 전송량을 가짐을 알 수 있다. 또한, HDF와 CC의 경우 중계 노드가 사용자 쪽에 가까울수록 높은 전송량을 가짐을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 양 방향 중계 네트워크에서 하이브리드 복호 후 재전송 프로토콜, 증폭 후 재전송 프로토콜보다 높은 신뢰성을 가지는 양 방향 중계네트워크에서의 부호화 협력 프로토콜을 제안하였다. 제안하는 프로토콜은 비트 오류, 전송량 측면에서 양 방향 증폭 후 재전송 프로토콜보다 우수한 성능을 가짐을 알 수 있다. 또한, 하이브리드 복호 후 재전송 프로토콜보다 높은 BER 성능을 가지면서 동일한 전송량을 가짐을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] A. Sendonaries, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity part I and part II", *IEEE Commun.*, vol. 51, pp. 1927-1948, Nov. 2003.

- [2] David Chase, "Code-combining a maximum likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets", *IEEE Transactions on Communications*, vol. com-33, no. 5, pp. 385-393, May 1985.
- [3] M. Janani, A. Hedayat, T. E. Hunter, and A. Nosratinia, "Coded cooperation in wireless communications: space-time transmission and iterative decoding", *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 52, pp. 362-371, Feb. 2004.
- [4] Z. Yi, I. -M. Kim, "Single-symbol ML decodable distributed stbcs for cooperative networks", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 8, pp. 2977-2985, Aug. 2007.
- [5] H. Mheidat, M. Uysal, and N. Al-Dhahir, "Equalization techniques for distributed space-time block codes with amplify-and-forward relaying", *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 5, pp. 1839-1852, May 2007.
- [6] R. Ahlswede, N. Cai, S. R. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204-1216, Jul. 2000.
- [7] P. Larsson, N. Johansson, and K. E. Sunell, "Coded bi-directional relaying", in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.(VTC'06-Spring)*, Australia, pp. 851-855, May 2006.
- [8] B. Rankov, A. Wittneben, "Spectral efficiency protocols for halfduplex fading relay channels", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.
- [9] Y. Han, S. H. Ting, C. K. Ho, and W. H. Chin, "High rate two-way amplify-and-forward half-duplex relaying with OSTBC", in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.(VTC'08-Spring)*, Singapore, pp. 2426-2430, May 2008.
- [10] P. Popovski, H. Yomo, "Bi-directional amplification of throughput in a wireless multi-hop network", in *Proc. of IEEE VTC2006-spring*, Melbourne, Australia, May 2006.
- [11] Kyu-Sung Hwang, Young-Chai, and Mohamed-Slim Alouini, Ko, "Performance bounds for two-way amplify-and-forward relaying based on relay path selection", in *Proc. IEEE Int. Veh. Technol. Conf.(VTC'09-Spring)*, Barcelona, Spain, pp. 1-5, Apr. 2009.
- [12] 박지환, 공형운, "양 방향 중계 네트워크에서 다중 중계기를 이용한 협력 중계 기법", *한국전자과학회논문지*, 21(7), pp. 815-822, 2010년 7월.
- [13] J. Hagenauer, "Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes(RCPC Codes) and their applications", *IEEE Trans. on Communications*, vol. 36, no. 4, pp. 389-400, Apr. 1988.
- [14] B. Rankov, A. Wittneben, "Spectral efficiency protocols for halfduplex fading relay channels", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.

박 지 환



2009년 2월: 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 (공학사)  
 2009년 3월~현재: 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 석사과정  
 [주 관심분야] 협력 통신, 양 방향 통신, 릴레이 시스템, MIMO, 무선센서 네트워크

공 형 운



1989년 2월: New York Institute of Technology 전자공학과 (공학사)  
 1991년 2월: Polytechnic University 전자공학과 (공학석사)  
 1996년 2월: Polytechnic University 전자공학과 (공학박사)  
 1998년~현재: 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수  
 [주 관심분야] 변조, 채널 부호화, 검파 및 추정 기술, 협력 통신, 센서 네트워크