

논문 2009-5-2

성능향상을 위한 네트워크 부호화 기반 양방향 중계기 통신에서의 릴레이 선택 기법

Relay Selection Schemes in Network-Coding based Two-Way Relay Communication to Improve Performance

이진희*, 공형윤**

Jin-Hee Lee, Hyung-Yun Kong

요 약 본 논문에서는 다수의 릴레이(Relay)가 존재하는 환경에서 네트워크 부호화 기반 양방향 중계기 통신의 릴레이 선택 기법을 제안한다. 양방향 중계기 통신은 두 사용자가 릴레이의 도움을 받아 서로의 데이터를 교환하는 통신 방법이다. 네트워크 부호화 기반 양방향 중계기 통신은 기존의 양방향 통신에 비해 데이터 전송에 필요한 시간을 줄임으로써 더 높은 전송량을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 다수의 릴레이가 존재하는 환경을 고려하며, 순시 신호 대 잡음비를 기준으로 최대의 성능을 가지는 릴레이를 선택하는 방법을 제안한다. 모의실험을 통하여 제안한 릴레이 선택 기법이 릴레이 개수에 따른 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 보인다.

Abstract In This Paper, we propose relay schemes for network-coding based two-way relay communication in multi relay channel. Two-way relay channel communication is a bi-directional communication that two users exchange their data with the help of a relay. Network-coding based Two-way relay communication can achieve more throughput compared to conventional two-way relay communication. In this paper, we propose relay selection schemes to provide maximum performance considering instantaneous signal-to-noise in multi-relay channel. Simulation results show that the proposed relay selection schemes can provide diversity order according to the number of relays.

Key Words : Relay Selection, Network Coding, Two-way relay channel, Cooperative Communication

I. 서 론

릴레이를 이용한 시스템은 송신단의 데이터를 전송받아 수신단으로 재전송함으로써 시스템의 전송 범위를 증대시키며, 데이터 전송의 신뢰성을 높일 수 있는 장점이 있다.^{[1][2]}

또한 다수의 릴레이가 존재할 경우에는, 하나 이상의 릴레이들이 송신단의 데이터를 수신단으로 릴레이 수만큼의 경로를 통해 데이터를 전송하기에 다중 경로 페이

딩 채널 환경에 뛰어난 다이버시티 이득(diversity gain)을 얻을 수 있다. 이러한 장점을 가지고 있는 릴레이 시스템은 최대 전송 키버리지를 넘어 위치해있는 두 사용자의 데이터 교환에도 이용되고 있으며, 이를 양방향 중계기 채널 통신(Two-way relay channel communication)이라 부른다.

양방향 중계기 채널 통신(Two-way relay channel)에서는 두 사용자 사이에 릴레이가 존재하여, 각 사용자의 데이터를 전송받아 상대 사용자에게 재전송한다.

최근 양방향 중계기 채널 통신에서 데이터의 전송률과 신뢰성을 증대시키기 위한 연구들이 진행되고 있으며,

*준회원, 울산대학교 전기전자정보시스템공학부

**정회원, 울산대학교 전기전자정보시스템공학부

접수일자 2009.8.21, 수정일자 2009.9.25

릴레이에서 두 사용자의 신호를 네트워크 부호화하여 두 사용자에게 송신하는 네트워크 부호화(Network Coding) 기반의 양방향 중계기 채널 통신이 주목받고 있다.

네트워크 부호화(Network Coding) 기술은 최초 유선 네트워크 환경에서 제안된 기술로써, 패킷 레벨(packet level)에서의 부호화를 통해 네트워크의 주파수 효율과 전송률을 증대시키는 효과적인 기술이다.^[3]

그림 1.(a)는 기존의 양방향 중계기 통신을 나타내며 네 단계를 걸쳐 이루어진다. 반면에 그림 1.(b)는 네트워크 부호화 기술을 이용한 것으로써 세 번째 단계에서 릴레이에서 양 신호를 네트워크 부호화 방법으로 결합하여 한꺼번에 전송함으로써 데이터 전송시간을 줄일 수 있으며, 그에 따라 전송률(throughput)과 주파수 효율(spectral efficiency)을 높일 수 있는 장점이 있다.

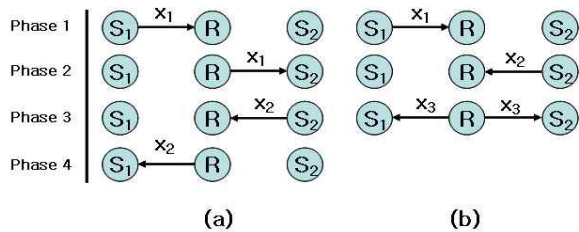


그림 1. (a) 기존 양방향 중계기 통신 (b) 네트워크 부호화를 이용한 양방향 중계기 통신
 Fig. 1. (a) Conventional two-way relay communication (b) Two-way relay communication using network-coding

최근 유선 통신 환경뿐만 아니라, 무선 통신 환경에서도 네트워크 부호화를 이용하여 전송률 및 주파수 효율의 장점을 획득하기 위한 여러 연구들이 진행되고 있다.^{[4][5]}

[4]에서는 전이중 환경에서 네트워크 부호화를 사용한 다양한 프로토콜의 가용 전송률(achievable rate)을 구했다. [5]에서는 분산 시공간 부호화 기법(Distributed space coding)을 양방향 채널에 적용함으로써, 전송률의 증대와 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 증명하였다. 하지만 다수의 릴레이가 존재하는 환경에서 다이버시티 이득을 위해 모든 릴레이가 전송에 동참하는 것은 릴레이의 불필요한 전력 소모 및 릴레이의 동기화 등 실제적인 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 두 사용자와 N개의 릴레이가 존재하는 환경에서 릴레이를 선택하는 기법을 제안하며, 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 보인다. 릴레이 선택

은 양 채널의 순시 신호 대 잡음비(instantaneous Signal-to-Noise) 값을 기준으로 선택한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문의 시스템 모델을 보이고, III장에서는 N개의 릴레이가 존재하는 환경에서 양방향의 순시 채널값을 기준으로 릴레이를 선택하는 기법을 제안하며, IV장에서는 양방향 통신의 오수신 확률(Outage Probability)과 전송률(Throughput)을 수식적으로 분석한다. V장에서는 모의 성능 실험을 통해 제안한 릴레이 선택 기법의 성능을 분석하며, 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 2와 같이 S_1 와 S_2 사용자와 N개의 릴레이가 있는 양방향 중계 채널을 고려한다. 첫 번째 시간슬롯에서는 사용자 S_1 이 릴레이로 신호를 전송하며, 두 번째 시간슬롯에서는 사용자 S_2 가 신호를 전송한다. 마지막 세 번째 시간슬롯에서는 릴레이가 선택되고, 수신한 신호를 복호하여 비트 단위로 XOR 연산(Exclusive OR operation)을 하여 릴레이는 사용자 S_1 과 S_2 에게 동시에 전송한다.

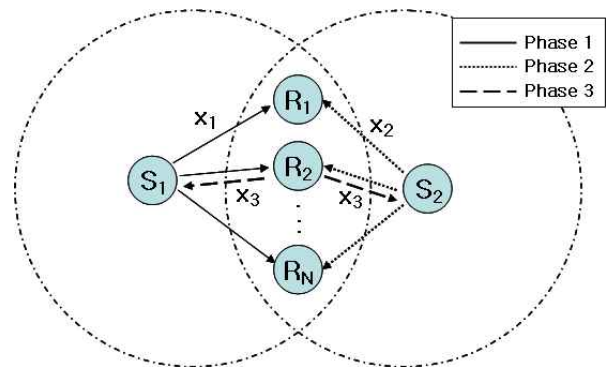


그림 2. 다수 릴레이가 존재하는 환경에서의 네트워크 부호화 기반 양방향 중계기 채널 통신
 Fig. 2. Network-coding based two-way relay channel in multi-relay channel

각 사용자 S_1, S_2 그리고 릴레이에서 수신한 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{1,r} &= h_{s1r}x_1 + n_{1,r} \\ r_{2,r} &= h_{s2r}x_2 + n_{2,r} \\ r_{3,s1} &= h_{rs1}x_3 + n_{3,s1} \\ r_{3,s2} &= h_{rs2}x_3 + n_{3,s2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $r_{1,r}$ 과 $r_{2,r}$, $r_{3,s1}$, $r_{3,s2}$ 는 각각 첫 번째 전송 단계와 두 번째 전송 단계의 릴레이에서 수신한 신호 및 세 번째 전송 단계에서 사용자 S_1 과 S_2 가 릴레이로부터 수신한 신호이다. h_{ij} 는 i 와 j 사이의 채널 계수를 의미하며, 채널은 평균이 0이고 분산이 1인 Flat Fading 채널을 가정한다. 마찬가지로 n_k 는 k 에서의 백색 가우시안 잡음(AWGN : Additive White Gaussian Noise)을 의미한다. x_1 와 x_2 는 S_1 과 S_2 에서 전송된 신호를 의미하며 x_3 는 네트워크 부호화된 신호로써, 다음과 같이 표현된다.

$$x_3 = x_1 \oplus x_2 \quad (2)$$

여기서 \oplus 는 bitwise-XOR 연산을 의미한다.

최종적으로 사용자 S_1 과 사용자 S_2 는 x_3 신호를 수신하여 복호 후 다시 XOR연산을 이용하면 다른 사용자의 신호를 복원할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_3 \oplus x_2 \\ x_2 &= x_3 \oplus x_1 \end{aligned} \quad (3)$$

III. 릴레이 선택 기법

본 논문에서는 양방향 중계 채널 통신을 위한 릴레이 선택을 위하여 다음과 같은 두 가지 방법을 제안한다.^[6] 릴레이 선택은 그림 3과 같이 양쪽 채널을 고려한다.

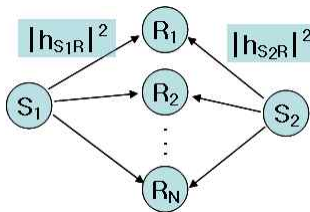


그림 3. 양방향 중계기 채널 통신에서의 릴레이 선택
Fig. 3. Relay selection in two-way relay channel communication

- Type I : 사용자 S_1 과 릴레이 간, 그리고 사용자 S_2 와 릴레이간의 채널 상태 환경을 최대최소(Maximum and Minimum)방법을 이용하여 릴레이

이를 선택하는 방법이다.

- Type II : 사용자 S_1 과 릴레이 간, 그리고 사용자 S_2 와 릴레이간의 채널 상태 환경을 조화평균(harmonic mean)을 계산하여 선택하는 방법이다.

1. Type I

첫 번째 방법은 h_{s1r_i} 와 h_{s2r_i} 의 두 채널 환경을 모두 고려하여 최대 최소 방법을 이용한다. 최대 최소 방법은 양쪽 채널의 최소 SNR 값을 기준으로 N개의 릴레이 중 최대값을 가지는 릴레이를 선택하는 것이다.

$$\begin{aligned} r_i &= \min[|h_{s1r_i}|^2, |h_{s2r_i}|^2] , \quad i = 1, 2, \dots, N \\ r_b &= \max[r_1, r_2, \dots, r_N] \end{aligned} \quad (4)$$

r_i 는 i 릴레이에서 양 채널의 최소값을 의미하며, r_b 는 r_i 를 최대로 하는 릴레이를 의미한다. h_{s1r_i} 와 h_{s2r_i} 는 각각 S_1 사용자와 i 번째 릴레이의 채널환경, S_2 사용자와 i 번째 릴레이의 채널환경을 의미한다.

2. Type II

두 번째 방법은 h_{s1r_i} 와 h_{s2r_i} 의 조화평균을 이용하는 방법으로써 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_i &= \frac{2}{\frac{1}{|h_{s1r_i}|^2} + \frac{1}{|h_{s2r_i}|^2}} \\ &= \frac{2|h_{s1r_i}|^2|h_{s2r_i}|^2}{|h_{s1r_i}|^2 + |h_{s2r_i}|^2} , \quad i = 1, 2, \dots, N \\ r_b &= \max[r_1, r_2, r_3, \dots, r_N] \end{aligned} \quad (5)$$

r_i 는 i 릴레이의 조화평균이며, r_b 는 최대 조화평균값을 가지는 릴레이를 의미한다. S_1 사용자와 릴레이, S_2 사용자와 릴레이 간의 채널환경의 조화평균을 계산하여 가장 큰 값을 가지는 릴레이를 선택하는 방법이다.

IV. 오수신 확률(Outage Probability) 및 전송량(Throughput) 분석

일반적인 직접 전송(Direct Transmission)에서 종단과 종단(End-to-End)의 채널 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{i,j} = h_{i,j} x_{i,j} + n_{i,j} \quad (6)$$

여기서 $x_{i,j}$ 와 $y_{i,j}$ 는 전송신호 및 수신신호를 의미한다. $h_{i,j}$ 는 송신단 i 와 수신단 j 의 채널환경을 의미하며, 0의 평균값과 1의 분산값을 가지는 Complex Gaussian Random Variable이다. $n_{i,j}$ 는 $N(0, N_o/2)$ 을 따르는 백색 가우시안 잡음(AWGN)이다. 따라서 순시 신호 대 잡음비(Instantaneous Signal-to-Noise Ratio)는 $r_{i,j} = |h_{i,j}|^2 E_b / N_o$ 이며, 여기서 E_b 는 비트 당 전송 전력을 의미한다.

수신단에서의 상호 정보(Mutual Information)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{i,j} = \log_2(1 + \gamma_{i,j}) = \log_2(1 + |h_{i,j}|^2 \bar{\gamma}_{i,j}) \quad (7)$$

여기서 $\bar{\gamma}_{i,j}$ 는 i 노드와 j 노드의 평균 신호 대 잡음비를 의미한다.

1. 오수신 확률(Outage Probability)

오수신 확률(Outage Probability)은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{out} = P\{I_{i,j} < R\} \quad (8)$$

여기서 $I_{i,j}$ 는 i 노드와 j 노드의 상호 정보(Mutual Information)이며 R 은 주파수 효율(Spectral Efficiency)이다.

일반적인 채널환경인 레일리 페이딩 채널(Rayleigh fading channel)에서 $|h_{i,j}|^2$ 은 지수 분포(Exponential distributed)의 형태를 가지며, 따라서 오수신 확률은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= P\{I_{i,j} < R\} = P\{\log(1 + r_{i,j}) < R\} \quad (9) \\ &= P\{r_{i,j} < 2^R - 1\} \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{2^R - 1}{\bar{\gamma}_{i,j}}\right) \end{aligned}$$

그림 1.(a)의 기존 양방향 통신기법에서 오수신 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = 1 - (1 - P_{out}^{s1r})(1 - P_{out}^{s2r}) \quad (10)$$

여기서 P_{out}^{s1r} 과 P_{out}^{s2r} 은 S_1 사용자와 릴레이, S_2 사용자와 릴레이에서의 오수신 확률이다. 만일 양쪽 채널의 평균 신호 대 잡음비 값이 동일하다고 가정하면, 위의 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= 1 - (1 - P_{out}^D)^2 \quad (11) \\ P_{out}^D &= P_{out}^{s1r} = P_{out}^{s2r} \end{aligned}$$

그림 1.(b)의 네트워크 부호화를 이용한 양방향 통신기법에서 오수신 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[7]

$$P_{out} = 1 - (1 - P_{out}^D)[1 - 2P_{out}^D(1 - P_{out}^D)] \quad (12)$$

2. 전송량(Throughput) 분석

전송량(Throughput)은 수신단에서 올바르게 수신한 데이터의 초당 비트 수로 정의된다.

양방향 통신 기법에서의 전송량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{2}{3} R_S (1 - p_e) \quad (13)$$

여기서 R_S 는 패킷에 대한 데이터 율을 의미하며, p_e 는 패킷 오류 확률을 의미한다. 기존의 양방향 통신은 4번의 전송 시간동안 두 사용자는 각각 하나의 패킷을 전달할 수 있기에 전송량은 $\frac{1}{2} R_S (1 - p_e)$ 이며, 네트워크 부호화를 이용한 양방향 중계기 통신은 3번의 전송 시간동안 패킷을 전달하기에 식 (13)과 같고, 이는 약 25%의 전송량 이득이 있음을 의미한다.

릴레이 선택 기법에 의해서 릴레이가 선택된 후의 데이터 율과 패킷오류 확률은 다음과 같다.

$$R_S = \log\left(1 + \frac{E_b |h_{i,j}|^2}{N_0}\right) \quad (14)$$

$$p_e = 1 - (1 - P_b)^N$$

여기서 P_b 는 비트 오류 확률이며 N 은 패킷 당 비트 수를 의미한다.

따라서 전송률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \frac{2}{3}(1 - p_e)\log_2\left(1 + \frac{E_b|h_{i,j}|^2}{N_0}\right) \quad (15)$$

V. 모의 성능 결과

본 장에서는 제안한 릴레이 선택 기법의 성능을 분석한다. 모의실험은 레일리 페이딩 채널(Rayleigh Fading Channel) 환경에서 QPSK 변조를 이용하였으며 패킷 당 비트 수는 100 이다. 릴레이는 사용자 S_1 과 사용자 S_2 의 중간에 위치하며 경로손실 계수(path loss coefficient)는 3 이다.

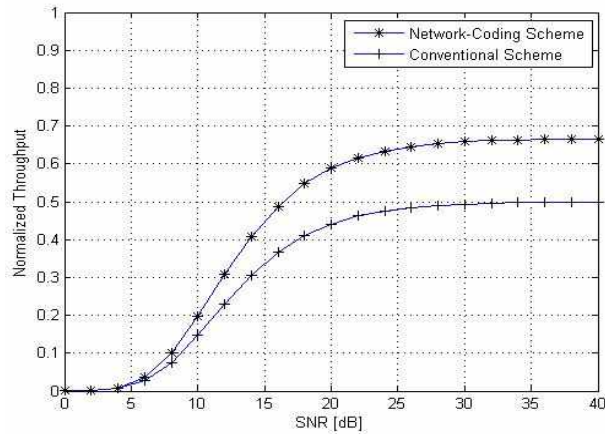


그림 4. 네트워크 부호화 양방향 중계기 통신의 전송률 분석
Fig. 4. Throughput Analysis of Two-way Relay communication using Network-coding

그림 4는 기존의 양방향 중계기 통신과 네트워크 부호화를 이용한 양방향 중계기 통신의 전송률을 비교한 것이다. 네트워크 부호화를 이용한 양방향 통신은 식(13)과 같이 기존 방법에 비해 25%의 전송률 이득이 있음을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6은 각각 Type I 과 Type II 의 릴레이 선택 방법의 성능을 분석한 것이다. 두 방법 모두 단방향

통신과 마찬가지로 릴레이 개수(N)가 증가함에 따라 그에 따른 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

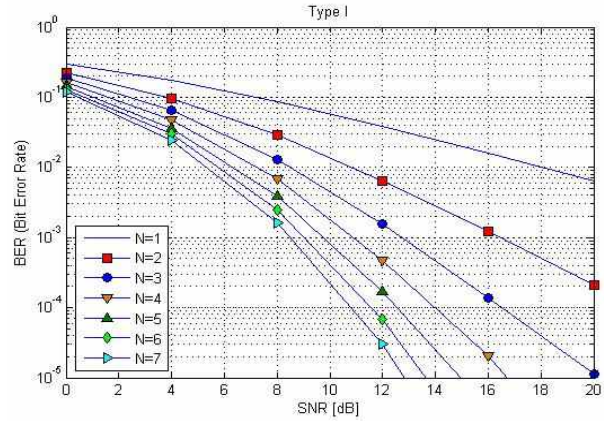


그림 5. Type I의 비트 오류 확률 분석
Fig. 5. Bit Error Probability of Type I

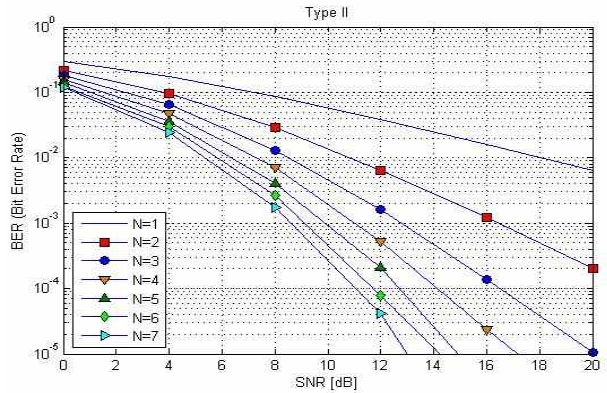


그림 6. Type II의 비트 오류 확률 분석
Fig. 6. Bit Error Probability of Type II

그림 7은 Type I 과 Type II 의 릴레이 선택 방법의 비트 오류 성능을 비교한 것이다. 두 방법은 같은 조건에서 비슷한 오류 확률 성능을 보이지만, 높은 SNR 값에서 릴레이 개수가 증가함에 따라 Type I 방법이 1 dB 이하의 더 좋은 성능을 얻음을 보여준다. 이유는 Type I 방법은 양 쪽 채널 중 최소값을 기준으로 최대값을 가지는 릴레이를 최상의 릴레이로 선택하기에 열악한 환경에서의 신호 감쇠를 최소화하여 억제하기 때문이다.

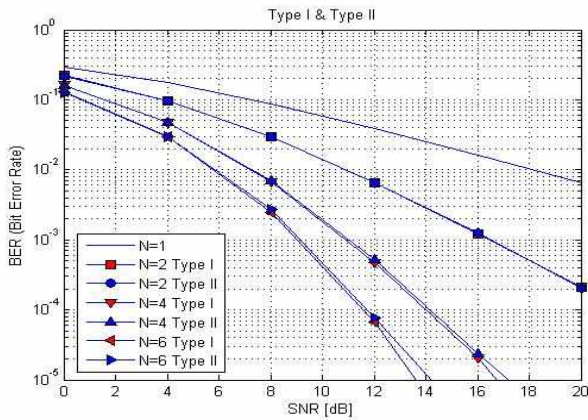


그림 7. Type I 과 Type II의 비트 오류 확률 비교
Fig. 7. Comparison of relay schemes

VI. 결 론

본 논문에서는 네트워크 부호화 기반 양방향 중계기 채널 통신에서의 릴레이 선택 기법을 제안하였다. 다수의 릴레이 중 최상의 릴레이 선택은 사용자와 릴레이간의 채널 환경을 기준으로 선택되며, 양 채널 환경은 최대 최소 방법과 조화평균 방법을 통하여 구성될 수 있다.

또한 본 논문에서는 양방향 중계기 통신의 오수신 확률과 전송률을 수식적으로 분석하였다.

모의 성능 평가 결과 릴레이 선택 기법의 두 가지 방법 모두 단방향 통신과 마찬가지로 릴레이 개수에 따라 다이버시티 이득이 증가함을 알 수 있었다. 또한 두 가지 릴레이 선택 방법의 성능 분석 비교를 통하여 최대최소 방법을 이용하는 Type I의 방법이 채널환경을 최적으로 고려하여 릴레이를 선택하는 것을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "End-to-End Performance of Transmission Systems with Relay Over Rayleigh-Fading Channels," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003.
- [2] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "Harmonic Mean and End-to-End Performance of Transmission Systems With Relays," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 52, no. 1, pp 130-135, Jan. 2004.
- [3] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y.R. Li, and R.W. Yeung, "Network information Flow," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol 46, pp.1204-1216, July 2000.
- [4] B. Rankov, A. Wittmeben, "Achievable rate regions for the two-way relay channel," *Proc. IEEE Inter. Symp. Inform. Theory (ISIT)*, Seattle, WA, U.S.A., Jul. 2006, pp. 1668-1672.
- [5] T. Cui, F. Gao, T. Ho, and A. Nallanathan, "Distributed space-time coding for two-way wireless relay networks," *Signal Processing, IEEE Transactions on*. Vol 57, no 2, pp. 658-671, Feb. 2009
- [6] A. Bletsas, A. khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659-672, Mar. 2006.
- [7] L. Lv, H. Yu, J. Yang, "Opportunistic Cooperative Network-Coding Based on Space-Time Coding for Bi-Directional Traffic Flows", *Network Coding, Theory and Applications*, 2008. NetCod 2008. Fourth Workshop on , pp.1-6, 3-4 Jan. 2008

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0073895)

저자 소개

이 진 희(준회원)



- 2009년 2월 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 학사
 - 2009년 3월~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 석사과정
- <주관심분야 : 협력통신, 양방향 통신, 멀티 홉 시스템, MIMO>

공 형 윤(정회원)



- 1989년 2월 미국 New York Institute of Technology 전자공학과 (공학사)
 - 1991년 2월 미국 Polytechnic University 전자공학과 (공학석사)
 - 1996년: 2월 미국 Polytechnic University 전자공학과 (공학박사)
- 1996년~1996년 LG전자 PCS 팀장
 - 1996년~1998년 LG전자 회장실 전략사업단
 - 1998년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- <주관심분야 : 모듈레이션, 채널 부호화, 검파 및 추정 기술, 협력통신, 센서 네트워크>