

양방향 다중 중계기 채널에서의 중계기 선택 기법

*강유근 **이재홍

*서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소

*kangyoke@snu.ac.kr **jhlee@snu.ac.kr

Relay Selection Algorithm for Two-way Multiple Relay Channels

*Kang, Yookeun **Lee, Jae Hong

*Seoul National University, School of Electrical Engineering, INMC

요약

양방향 중계 채널(two-way relay channel)은 2명의 사용자가 중계기(relay)의 도움을 받아 서로 정보를 주고받는 통신 채널이다. 중계기에서는 각각의 사용자로부터 독립적으로 수신한 두 데이터 패킷에 네트워크 코딩 기법을 적용하고, 이를 통해 만든 패킷을 두 사용자에게 동시에 전송한다. 따라서 양방향 중계 채널에서는 기존의 협력 통신에 비해 보다 효율적인 자원의 사용이 가능하다. 한편, 다중 중계기 환경에서의 중계기 선택 기반 전송 방식은 시스템의 전력 제한(power constraint), 전송 패킷의 동기화(synchronization) 문제 등을 고려할 때 다중 중계기 기반 전송 방식보다 우수한 성능을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 양방향 다중 중계기 채널에서 중계기 선택 기법을 제안한다. 양방향 중계 채널에서는 수신한 두 신호의 결합을 위해 중계기에서 네트워크 코딩 기법을 적용함으로써 중계기의 부담이 보다 증가하는 특징이 있다. 또한, 중계기는 신호 전송 시 두 사용자 모두에게 전송하게 되고 이로 인해 두 수신자와의 채널 조건을 모두 고려하여야 한다. 따라서 중계기 선택은 데이터 패킷의 전송이 시작되기 전에 분산된 방식(distributed method)으로 이루어지며, 각각의 사용자와 중계기 간 일시적(instantaneous) 채널 이득을 바탕으로 사용자-사용자 간(end-to-end) 경로 조건의 최대값을 계산하는 메트릭(metric)을 중계기 선택 기준으로 사용한다. 모의실험을 통해 제안된 중계기 선택 기법이 중계기의 개수에 해당하는 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 보여준다.

1. 서론

차세대 무선통신 시스템에서는 고속의 데이터 전송을 위하여 시스템 용량(system capacity)을 증가시키고, 안정적인(reliable) 데이터 전송을 구현할 필요가 있다. 협력 다이버시티(cooperative diversity) 기법은 무선 통신 네트워크상의 단말기들이 안테나를 공유하여 공간 다이버시티(spatial diversity) 이득을 얻을 수 있다. 한 쌍의 사용자가 서로 안테나를 공유함으로써 시스템 용량을 증대시킬 수 있음이 처음 제안된 후 [1], 중계기(relay)의 협력 방식에 따른 다양한 프로토콜(protocol)과 성능이 제안되었다 [2]. 그러나 협력 다이버시티 기법을 통해 다이버시티 이득을 얻기 위해서는 자원의 추가 할당이 요구되며, 이로 인한 주파수 효율의 감소가 불가피하다는 것이 단점으로 지적되고 있다.

네트워크 코딩(network coding) 기법은 이러한 협력 다이버시티 기법의 단점을 극복할 수 있는 방법의 하나로 최근 활발한 연구가 이루어지고 있다. 네트워크 코딩 기법은 독립적으로 수신되는 신호들을 결합하여 부호화 하는 기술로서 자원을 효율적으로 이용함으로써 시스템의 주파수 효율(spectral efficiency)을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 양방향 중계 채널(two-way relay channel)은 두 개의 단말이 중계기를 통해 서로 정보를 주고받는 통신 채널로서 중계기에서 네트워크

코딩 기법을 적용함으로써 단방향 중계채널에 비해 높은 주파수 효율을 보여준다[3]. [4]에서는 한 개의 중계기를 갖는 양방향 중계 채널에서 각 복호화 재전송 방식과 증폭 재전송 방식의 전송을 통해 시스템 전송량(throughput)을 향상시킬 수 있음을 보였다.

다중 중계기 채널(multiple relay channel)에서는 중계기의 수가 증가하면 전송 경로의 수가 증가되기 때문에 다이버시티 이득이 증가한다. 그러나 다수의 중계기를 사용하게 되면 각각의 중계기가 전송에 필요한 부채널(subchannel)을 할당받아야 하므로 주파수 효율이 감소한다. 또한 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 분산된 시공간 부호화 기법(distributed space-time coding)은 주파수 효율 감소 문제를 해결할 수 있으나 중계기들의 분산된 분포 특성으로 인한 부호화와 어려움, 다수 중계기 전송의 비효율적 전력 사용, 전송에 참여하는 중계기들 간 동기화의 어려움 등 실질적 한계를 보인다 [5], [6].

따라서 다수의 중계기 중 최적의 성능을 보이는 한 개의 중계기를 선택하는 중계기 선택 기법이 제안되었다 [7]. 중계기 선택 기반 전송 방식은 다수의 중계기를 사용함으로써 발생하는 단점들을 해결함과 동시에 성능과 다이버시티 이득에서 다수 중계기를 모두 사용하는 방식과 거의 동등한 결과를 얻는다. [8]에서는 단방향 중계 채널에서 복호화 재전송 방식과 증폭 재전송 방식에 대한 중계기 선택 기준을 제시하고, 그 성능을 보였다.

본 논문에서는 양방향 다중 중계기 채널에서의 중계기 선택 기법을 제안한다. 양방향으로 정보를 전송하는 환경에서는 데이터 패킷을 결합하기 위해 중계기의 부담이 증가하고, 중계기 선택 시 두 수신자와의 채널을 함께 고려해야 한다는 특징이 있다. 따라서 이를 고려하여 각 복호화 재전송 방식과 증폭 재전송 방식에서의 중계기 선택 기준을 제시한다. 모의실험에서는 제안된 기법의 성능을 비트 오류율(bit error rate)을 통해 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 시스템 모델을 보이고, 3절에서는 제안된 중계기 선택 기법에 대해 설명한다. 4절에서는 모의 실험을 통해 제안된 기법의 성능을 고찰하며 5장에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

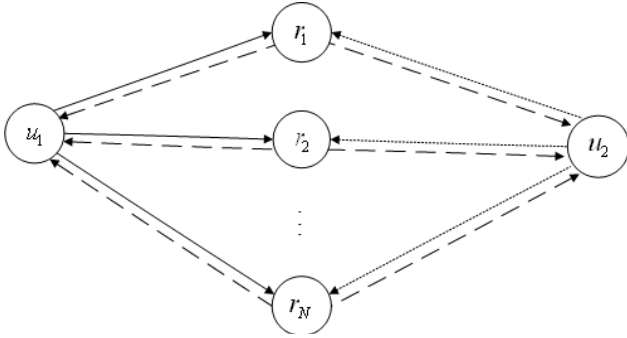


그림 1. 양방향 다중 중계기 채널

그림 1과 같이 두 명의 사용자 $u_i, i=1,2$ 와 N 개의 중계기 $r_i, i=1, \dots, N$ 가 존재하는 무선 네트워크를 고려한다. 두 명의 사용자는 서로 정보를 주고 받으며, 사용자 사이에 있는 중계기들의 도움을 받는다. 모든 사용자와 중계기들은 하나의 안테나를 가지고 있으며, 반이중(half-duplex)모드를 가정한다. 전송은 직교 시분할 방식을 통하여 이루어진다고 가정한다. 사용자 u_1 과 중계기 r_i 간 채널을 f_i , 사용자 u_2 와 중계기 r_i 간 채널을 g_i 라 한다. f_i 와 g_i 는 서로 독립적이고, 각각 평균이 0, 분산이 1인 원형 대칭 복소 가우시안 확률 변수(circular symmetric complex random variable)이다. 또한 송신단에서는 채널 정보를 알 수 없으며, 수신단에서만 알고 있다고 가정하였다.

본 논문에서 제안하는 중계기 선택 기법은 사용자의 전송이 이루어지기 전에 한 개의 중계기를 선택하며 이 중계기만 전송에 참여함으로써 전송을 수행한다. 따라서 제안된 시스템에서는 다수의 중계기가 전송에 참여함으로써 발생하는 손실을 최소화 할 수 있다. 프로토콜은 중계기에서의 중계방식에 따라 크게 복호화 재전송(Decode-and-Forward) 방식 및 증폭 재전송(Amplify-and-Forward) 방식으로 나누어진다.

가. 복호화 재전송(Decode-and-Forward) 프로토콜

복호화 재전송 프로토콜에서는 총 3개의 시간 슬롯(time slot)이 필요하다. u_1 과 u_2 는 각각 첫 번째와 두 번째 시간 슬롯에서 선택된 중계기(r_i)에게 신호를 전송한다. 첫 번째 시간 슬롯과 두 번째 시간 슬롯에서 중계기에서 수신한 패킷은 각각 다음과 같다.

$$y_{1r_i} = \sqrt{P_{u_1}} f_i x_1 + n_{1r_i} \quad (1)$$

$$y_{2r_i} = \sqrt{P_{u_2}} g_i x_2 + n_{2r_i} \quad (2)$$

P_{u_1}, P_{u_2} 는 각각 사용자 u_1, u_2 의 전송 파워이며, x_1, x_2 는 전송 데이터 패킷, n_{1r_i}, n_{2r_i} 은 i 번째 중계기에서의 원형 대칭 복소 가우시안 잡음(noise)이며, σ_n^2 의 분산을 가지고 있다. 중계기에서는 이들의 정보를 복호화 한 후, 이를 네트워크 코딩 기법을 사용하여 결합하고, 세 번째 시간 슬롯에서 이를 두 사용자에게 전송한다. 따라서 u_1 과 u_2 에서 받은 패킷은 다음과 같이 표현된다.

$$y_{u_1} = \sqrt{P_r} f_i (\hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2) + n_1 \quad (3)$$

$$y_{u_2} = \sqrt{P_r} g_i (\hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2) + n_2 \quad (4)$$

여기서, P_r 은 중계기의 전송 전력이며, n_1, n_2 는 각각 u_1, u_2 에서의 잡음으로 σ_n^2 의 분산을 가지고 있다.

나. 증폭 재전송(Amplify-and-Forward) 프로토콜

증폭 재전송 프로토콜에서는 총 2개의 시간 슬롯이 필요하다. u_1 과 u_2 는 첫 번째 시간 슬롯에서 각각의 신호를 선택된 중계기(r_i)에게 동시에 전송한다. 중계기에서 수신한 패킷은 다음과 같다.

$$y_{r_i} = \sqrt{P_{u_1}} f_i x_1 + \sqrt{P_{u_2}} g_i x_2 + n_{r_i} \quad (5)$$

여기서 n_{r_i} 는 중계기에서의 잡음이며 σ_n^2 의 분산을 가지고 있다. 두 번째 시간 슬롯에서 중계기는 첫 번째 시간 슬롯에서 받은 패킷을 증폭 계수 β 를 사용하여 증폭한 후 두 사용자에게 전송한다. 따라서 u_1 과 u_2 에서 받은 패킷은 다음과 같이 표현된다.

$$y_{u_1} = \beta \sqrt{P_{r_i}} y_{r_i} + n_1 \quad (6)$$

$$y_{u_2} = \beta \sqrt{P_{r_i}} y_{r_i} + n_2 \quad (7)$$

여기서 증폭 계수 $\beta = \sqrt{\frac{P_r}{P_{u_1} f_i^2 + P_{u_2} g_i^2 + \sigma_n^2}}$ 이며, n_1, n_2 는 각각 u_1, u_2 에서의 잡음으로 σ_n^2 의 분산을 가지고 있다.

3. 전송량 증가 및 중계기 선택기법

가. 복호화 재전송(Decode-and-Forward) 프로토콜

양방향 중계 채널(two-way relay channel)의 경우, 중계기는 두 사용자로부터 받은 신호를 결합하기 위하여 네트워크 코딩 기법을 사용한다. 따라서 단방향 중계 채널에 비해 중계기의 부담이 보다 증가하는 특징이 있다. 본 논문에서는 양방향 중계 채널의 특징들을 고려하여, 데이터 패킷의 전송이 이루어지기 전에 중계기를 선택하여 중계기의 부담을 최소화 하는 방식을 제안한다.

N 개의 중계기들은 각각의 두 사용자로부터 송신 요구 신호(Request-to-Send)와 전송 준비 완료 신호(Clear-to-Send)를 엿듣는다(overhear). 이를 통해 중계기들은 각 사용자와 중계기 간의 채널 f_i 와 g_i 를 측정할 수 있다. 각 중계기가 얻은 채널 추정 값들은 각 사용자와 중계기 간 채널 경로의 질을 나타낸다. 중계기들은 이 값들을 통해 중계기 선택을 위한 메트릭(metric)을 계산한다. 중계기의 선택은 위에 구한 메트릭을 기준으로 이루어지며, 시스템의 부담(overhead)을

최소화하기 위해 분산된 방식(distributed method)으로 이루어진다[7].

양방향 중계 채널에서는 중계기가 두 사용자로부터 받은 신호를 결합한 후, 이를 두 사용자 모두에게 전송한다. 따라서 단방향 중계채널에서와 달리 중계기와 신호를 전달받는 사용자 사이의 두 채널 이득, f_i, g_i 를 모두 고려하여 중계기를 선택해야 한다. 따라서 최적의 중계기 r_{opt} 은 N 개의 중계기들 중 두 채널 이득 f_i, g_i 의 크기(magnitude)의 제곱 중 최소값(minimum)을 최대화하는 것으로 결정한다.

$$r_{opt}^{DF} = \arg \max_{r_i} \min\{|f_i|^2, |g_i|^2\}. \quad (8)$$

위와 같은 중계기 선택 기준에 의해 중계기가 선택되면, 선택된 중계기를 제외한 나머지 $N-1$ 개의 중계기는 전송에 참여하지 않는다. 선택된 중계기에 의해 데이터 패킷의 전송이 시작되면, 각 전송의 에러 발생을 고려한 전송 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 선택된 중계기 u_1 으로부터 데이터 패킷 x_1 을 요청한다. 수신된 패킷의 복호화가 실패할 경우, u_1 은 복호화가 성공할 때까지 x_1 을 전송한다.
- 2) x_1 의 수신에 성공한 후, 중계기는 u_2 로부터 x_2 를 요청한다. u_2 또한 중계기에서의 복호화가 성공할 때까지 패킷을 전송한다.
- 3) 중계기가 x_1 과 x_2 의 수신에 성공하면, 중계기는 네트워크 코딩 기법을 사용하여 새로운 패킷 $x_1 \oplus x_2$ 를 생성하고, 이를 u_1, u_2 에게 전송한다.

이와 같은 알고리즘을 사용하여 최대 달성 가능한 전송량(maximum achievable throughput)을 계산하면 다음과 같다 [4].

$$R_{DF} = \frac{2}{3}R_s(1 - p_{e,DF}). \quad (9)$$

여기서 R_s 는 패킷 한 개에 대한 데이터 율(data rate)이며, $p_{e,DF}$ 는 $u_i (i=1, 2)$ 와 선택된 중계기 간 채널의 패킷 오류율(packet error rate)이다.

나. 증폭 재전송(Amplify-and-Forward) 프로토콜

증폭 재전송 프로토콜에서의 중계기 선택 기법은 복호화 재전송 프로토콜에서의 중계기 선택 기법과 유사하다. 중계기들은 각각의 두 사용자로부터 송신 요구 신호와 전송 준비 완료 신호를 엿듣고, 이를 통해 채널 f_i 와 g_i 를 추정하여, 중계기 선택을 수행한다.

증폭 재전송 프로토콜에서는 중계기가 사용자로부터 받은 신호를 적절한 증폭 계수를 통해 증폭시켜 전달하며, 이 때 수신된 신호의 잡음이 함께 증폭된다는 특징이 있다. u_1 에서 u_2 로의 단방향 중계 채널에서 중계기 선택기준은 다음과 같다 [8].

$$W_{u_2r_i} = \frac{|f_i|^2|g_i|^2}{\frac{P_u}{P_r} \left(1 + \frac{\sigma_n^2}{P_u}\right) + |g_i|^2}. \quad (10)$$

양방향 중계 채널의 경우 중계기 선택은 중계기와 두 사용자 간 두 개의 채널을 모두 고려하여야 한다. 따라서 복호화 재전송 프로토콜에서 사용했던 max-min 방식을 적용하면 중계기 선택 기준은 다음과 같다.

$$r_{opt}^{AF} = \arg \max_{r_i} \min\{W_{u_1r_i}, W_{u_2r_i}\}. \quad (11)$$

각 전송의 에러 발생을 고려한 전송 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 홀수 번째 시간 슬롯에서는 U_1 과 U_2 가 동시에 선택된 중계기에 게 데이터 패킷을 전송한다.
- 2) 짝수 번째 시간 슬롯에서는, 중계기가 홀수 번째 시간 슬롯에서 받은 패킷을 결합하여 $x_1 + x_2$ 를 만들고 이를 증폭하여 각각 U_1, U_2 에게 재전송한다. 전송이 끝나면 두 사용자는 서로 패킷을 올바르게 수신했는지를 알려주는 승인/비승인(ACK/NACK) 패킷을 주고 받는다. 만약 비승인 패킷을 수신하면 다음 홀수 번째 시간 슬롯에 동일한 데이터 패킷을 재전송한다.

이와 같은 알고리즘을 사용하여 최대 달성 가능한 전송량을 계산하면 다음과 같다.[4]

$$R_{AF} = R_s(1 - p_{e,AF}). \quad (12)$$

여기서 R_s 는 패킷 한 개에 대한 데이터 율(data rate)이며, $p_{e,AF}$ 는 $u_i (i=1, 2)$ 와 선택된 중계기 간 채널의 패킷 오류율(packet error rate)이다.

4. 모의실험

본 모의 실험에서는 양방향 다중 중계기 채널에서의 전송량 향상에 대해 살펴보고, 제안된 중계기 선택 기법의 성능을 비트 오류율(bit error rate)을 통하여 알아본다. 각 u_1, u_2 와 중계기 간 채널은 서로 대칭(symmetric), 즉 신호 대 잡음비(SNR)가 서로 동일하다고 가정한다. 두 사용자의 전송 전력(P_{u_1}, P_{u_2})과 중계기의 전송 전력(P_r)은 모두 동일하며, 패킷 당 비트수는 100비트, 변조기법은 QPSK(quadrature phase shift keying)을 사용한다고 가정한다.

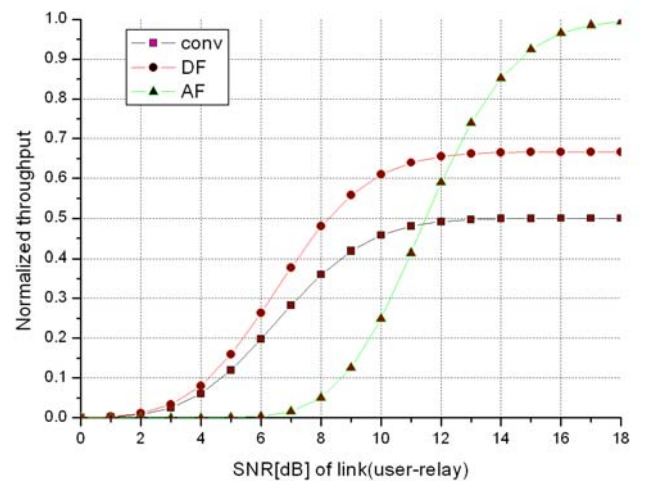


그림 2. 양방향 다중 중계기 채널에서 복호화 재전송 방식, 증폭 재전송 방식, 기존 방식의 표준화된 전송량(normalized throughput) 비교.

그림 2는 양방향 다중 중계기 채널에서 복호화 재전송, 증폭 재전송 프로토콜이 기존의 프로토콜에 비해 향상된 전송량을 나타냄을 보여

준다. 신호 대 잡음비가 낮은 환경에서는 잡음의 증폭으로 인해 증폭 재전송 프로토콜의 성능이 복호화 재전송 프로토콜의 성능에 비해 열화되는 반면, 신호 대 잡음비가 높은 환경에서는 증폭 재전송 프로토콜이 가장 우수한 성능을 보여주는 것을 볼 수 있다.

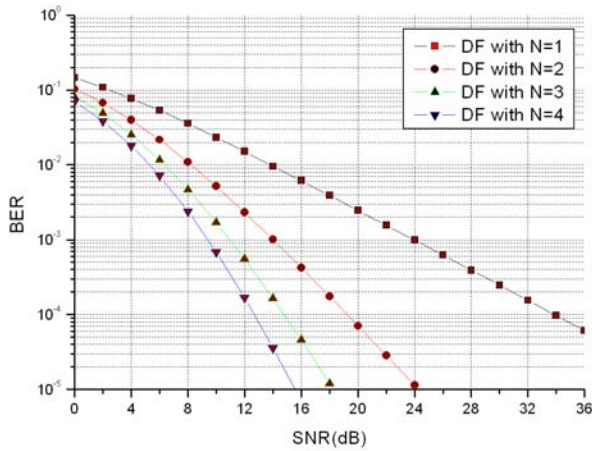


그림 3. 복호화 재전송 프로토콜에서 협력 가능한 중계기 수에 따른 제안된 기법의 비트 오류 성능.

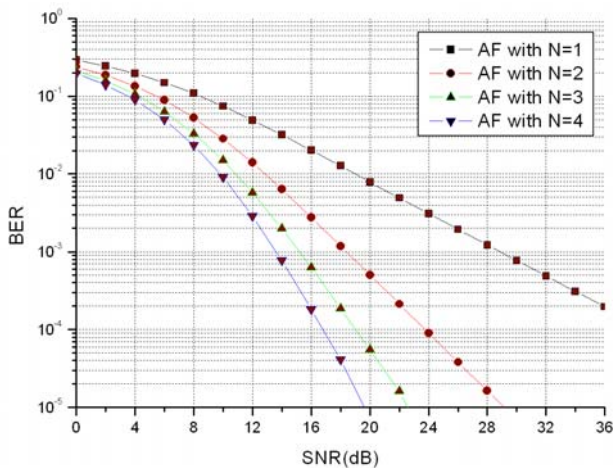


그림 4. 증폭 재전송 프로토콜에서 협력 가능한 중계기 수에 따른 제안된 기법의 비트 오류 성능.

그림 3과 그림 4는 다중 중계기 환경에서 제안된 중계기 선택 기법을 적용하였을 때 중계기 수 N 에 따른 비트 오류 성능을 나타낸다. 복호화 재전송 및 증폭 재전송 프로토콜 모두 제안된 중계기 선택 기법을 적용한 경우, 중계기의 수에 따른 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 양방향 다중 중계기 채널에서 복호화 재전송 방식과 증폭 재전송 방식에 대해 각각 중계기 선택 기법을 제안하였다. 제안된 중계기 선택 기법은 데이터 패킷의 전송이 이루어지기 전에 중계기를 선택하고, 각 사용자와 중계기 간의 두 채널을 모두 고려하여 중계기 선택하는 특징을 가지고 있다. 제안된 기법은 복호화 재전송 방식과 증폭 재전송 방식 모두 중계기가 많아질수록 중계기의 수에 따른 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 것을 보여준다.

5. 참고 문헌

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity—Part I: System description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, Nov. 2003.
- [2] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [3] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 379–389, Feb. 2007.
- [4] P. Popovski and H. Yomo, "Bi-directional amplification of throughput in a wireless multi-hop network," in *Proc. of IEEE VTC2006-spring*, Melbourne, Australia, May. 2006.
- [5] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415–2525, Oct. 2003.
- [6] T. Cui, F. Gao, T. Ho, and A. Nallanathan, "Distributed space-time coding for two-way wireless relay networks," in *Proc. of IEEE ICC 2008*, Beijing, China, May 19–23, 2008.
- [7] 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.
- [8] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 9, pp. 3450–3460, Sep. 2007.