

광대역 무선 네트워크의 성능 향상을 위한 분산 다중 안테나 기반 전송 프로토콜의 설계 및 분석

류현석*, 강충구

고려대학교 정보통신대학 전파공학과

Design & analysis of transmission protocol for exploiting cooperative MIMO in broadband wireless networks

Hyunseok Ryu and Chung G. Kang

College of Information and Communications, Korea University

E-mail : {kor74ryu, ccgkang}@korea.ac.kr

Abstract

Cooperative diversity is a transmission technique, in which multiple terminals pool their resources to form a virtual antenna array that realizes spatial diversity gain in a distributed fashion. In this paper, we propose a new type of cooperative transmission protocol with a full rate and show that its BER performance is improved by 8dB over the existing protocol under the AF (amplify-and-forward) mode of relaying.

I. 서론

MIMO 시스템에서 공간 다이버시티 기술은 추가적인 대역폭이나 전송 시간의 낭비 없이 다이버시티 이득을 극대화할 수 있는 방법으로서 각광을 받고 있다. 그러나, 점점 소형화 되고 있는 실제 단말의 크기를 고려할 때 다수 개의 전송 안테나들을 설치하는 것은 매우 비현실적일 수 있다. 이에 따라 공간 다이버시티 이득을 얻기 위한 새로운 방법으로서 cooperative diversity 의 개념이 제안되었으며, 이는 단일 안테나를 갖는 여러 단말들이 서로의 안테나를 공유하여 가상의 MIMO 시스템을 구현하는 접근이다 [1].

[2]에서는 user cooperation 을 통하여 direct 전송 방식보다 상향링크 capacity 를 증가 시킬 수 있음을 보여주었고, [3],[4]에서는 cooperative diversity 를 위한 여러 전송 프로토콜들이 제안되었다. 특히, [3]에서는 하나의 relay 를 사용하였을 경우에 대한 전송 프로토콜들의 성능을 AF (Amplify-and-Forward)와 DF (Decode-and-Forward) 방식에서 각각 비교 분석하였다. Relay 를 1 개 사용하였을 경우, 모든 전송 프로토콜들이 적절한 전력 제어를 통하여 2 의 다이버시티 이득을 실현할 수 있음을 보여주었으며, 2 의 다이버시티 이득을 얻는 전송 프로토콜들 중에 유일하게 다중화 이득을 추가로 얻을 수 있는 프로토콜을 제안하였다. 그러나, relay 를 여러 개 사용하는 것은, relay 를 1 개

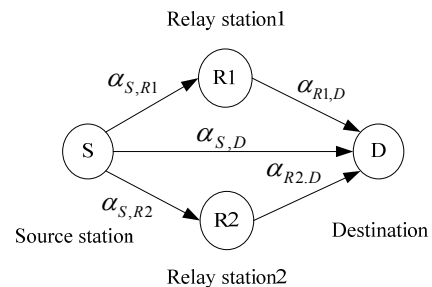


그림 1. 2 개의 릴레이를 갖는 페이딩 채널 모델

사용하였을 경우에 대한 단순 확장이라고 언급해 왔을 뿐 구체적인 프로토콜이 제시된 바는 없다 [3],[4],[5].

본 논문에서는 AF 방식에서 relay 를 2 개 이용할 경우, 제안하는 전송 프로토콜과 기존에 제안되었던 프로토콜의 BER 성능을 수학적으로 분석하고 비교한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 cooperative 전송 프로토콜 및 채널 모델을 살펴본다. 3 절에서는 각 프로토콜들의 순시 SNR 을 분석하고, 4 절에서는 각 프로토콜들의 평균 BER 을 분석 및 비교하며, 마지막 5 절에서 결론과 향후 연구 방향에 대해 알아본다.

II. 프로토콜 및 모델

2.1 Cooperative 전송 프로토콜

그림 1 처럼 2 개의 relay 를 갖는 페이딩 릴레이 채널을 고려한다. 목적지(destination) 노드는 수신 안테나 2 개를 사용하는 반면, 나머지 노드들은 1 개의 수신 안테나를 갖는다고 가정한다. 그리고, 각 노드들은 송신과 수신을 동시에 할 수 없다고 가정한다. 또한, 모든 노드간의 통신은 TDMA 방식을 따른다. 기존의 전송 프로토콜과 본 논문에서 제안하는 프로토콜의 동작은 다음과 같다.

기존의 전송 프로토콜은 첫 번째 시분할 슬롯에서 source 가 relay 1 과 relay 2 그리고, destination 으로

심볼 1 을 전송하고, 두 번째 시분할 슬롯에서는 relay 1 과 relay 2 가 첫 번째 시분할 슬롯에서 받은 심볼 1 을 destination 으로 전송하는 동안 source 가 새로운 심볼 2 를 destination 으로 전송하며, 시분할 슬롯 3 에서는 시분할 슬롯 1 의 과정을, 시분할 슬롯 4 에서는 시분할 슬롯 2 의 과정을 반복한다.

제안하는 전송 프로토콜은 첫 번째 시분할 슬롯에서 source 가 relay 1 과 destination 으로 심볼 1 을 전송하고, 두 번째 시분할 슬롯에서는 relay 1 이 첫 번째 시분할 슬롯에서 받은 심볼 1 을 destination 으로 전송하는 동안 source 가 새로운 심볼 2 를 relay 2 와 destination 으로 전송한다. 세 번째 시분할 슬롯에서는 relay 2 가 두 번째 시분할 슬롯에서 받은 심볼 2 를 destination 으로 전송하는 동안 source 가 새로운 심볼 3 을 relay 1 과 destination 으로 전송하며, 다음 시분할 슬롯들에서 이 과정을 반복한다. 각 전송 프로토콜의 동작 과정 예시를 요약하면 표 1 과 같다.

표 1. 전송 프로토콜의 동작: 예시

	Protocol I	Proposed
시분할 슬롯 1	S→R1,D,R2	S→R1,D
시분할 슬롯 2	S→D & R1→D & R2→D	S→R2,D & R1→D
시분할 슬롯 3	S→R1,D,R2	S→R1,D & R2→D
시분할 슬롯 4	S→D & R1→D & R2→D	S→R2 & R1→D

2.2 채널과 신호 모델

본 논문의 분석에서는 flat block fading 채널을 가정한다. 또한, source 에서는 어떠한 채널 정보도 갖지 않는 반면, destination 에서는 완벽하게 채널 정보를 추정한다고 가정한다. Source 와 destination 사이에는 완벽하게 동기가 맞았다고 가정한다. Source 에서 4 개의 시분할 슬롯 동안 전송된 신호를 각각 $x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)$ 로 정의하고, 수신 전개의 편의를 위해 심볼당 전송을 고려하며, 시간에 관계된 색인 t 는 생략한다. 또한, 전송된 심볼의 에너지는 1 로 정규화되었다고 가정하며, Destination 에서 각 안테나 별로 심볼 검출시, 간섭에 의한 오류는 없다고 가정한다.

III. 순시 SNR 분석

3.1 기존 전송 프로토콜의 순시 SNR

첫 번째 시분할 슬롯동안 destination 에서 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$r_D^1(t) = \alpha_{S,D}x_1 + n_D^1 \quad (1)$$

여기서 r_D^1 는 첫 번째 시분할 슬롯에 destination 에서 수신된 신호를 나타낸다. $\alpha_{S,D}$ 는 source 와 destination 사이의 페이딩 크기이고, n_D^1 은 첫 번째 시분할 슬롯에 destination 에서의 AWGN (Additive White Gaussian Noise)으로 단방향 전력 스펙트럼 밀도 N_0 를 갖는다. j 번째 시분할 슬롯의 i 번째 심볼에 해당하는 SNR 을

$\{\gamma_i^j\}$ 으로 나타낸다($i, j = \{1, 2, 3, 4\}$). 첫 번째 시분할 슬롯동안 destination 에서 수신된 첫 번째 심볼의 SNR 은 다음과 같다.

$$\gamma_1^1 = \frac{\alpha_{S,D}^2}{N_0} \quad (2)$$

첫 번째 시분할 슬롯 동안 각 relay 에서 수신된 신호는 다음과 같다.

$$r_{R1}^1 = \alpha_{S,R1}x_1 + n_{R1}^1 \quad (3)$$

$$r_{R2}^1 = \alpha_{S,R2}x_1 + n_{R2}^1 \quad (4)$$

여기서 $\alpha_{S,R1}$ 및 $\alpha_{S,R2}$ 는 각각 source 와 relay 1, source 와 relay 2 사이 채널의 페이딩 크기를 나타내며, n_{R1}^1 및 n_{R2}^1 은 각각 relay 1 과 relay 2 에서의 단방향 전력 스펙트럼 밀도 N_0 를 갖는 AWGN 을 나타낸다. 각 relay 들은 source 로부터 수신한 신호를 각각 증폭 인자로 정규화한 후 두 번째 시분할 슬롯동안 destination 으로 재전송한다.

두 번째 시분할 슬롯 동안 destination 에서 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$r_D^2 = \alpha_{S,D}x_2 + \alpha_{R1,D}Ar_{R1}^1 + \alpha_{R2,D}Br_{R2}^1 + n_D^2 \quad (5)$$

여기서 A, B 는 각각 relay 1, relay 2 에서의 증폭 인자를 나타내며, 다음과 같이 주어진다.

$$A^2 = 1/(\alpha_{S,R1}^2 + N_0), B^2 = 1/(\alpha_{S,R2}^2 + N_0) \quad (6)$$

(3),(4),(6)식에 (5)식에 대입하여 두 번째 시분할 슬롯의 첫 번째 심볼에 대한 SNR 과 두 번째 시분할 슬롯의 두 번째 심볼에 대한 SNR 을 구하면 각각 다음과 같다.

$$\gamma_1^2 = \frac{(\sqrt{\gamma_{R1,D} \cdot \gamma_{S,R1}(\gamma_{S,R2} + 1)} + \sqrt{\gamma_{R2,D} \cdot \gamma_{S,R2}(\gamma_{S,R1} + 1)})^2}{\gamma_{R1,D}(\gamma_{S,R2} + 1) + \gamma_{R2,D}(\gamma_{S,R1} + 1) + (\gamma_{S,R1} + 1)(\gamma_{S,R2} + 1)} \quad (7)$$

$$\gamma_2^2 = \frac{\gamma_{S,D}(\gamma_{S,R1} + 1)(\gamma_{S,R2} + 1)}{\gamma_{R1,D}(\gamma_{S,R2} + 1) + \gamma_{R2,D}(\gamma_{S,R1} + 1) + (\gamma_{S,R1} + 1)(\gamma_{S,R2} + 1)} \quad (8)$$

3.2 제안하는 전송 프로토콜의 순시 SNR

첫 번째 시분할 슬롯동안 destination 과 relay 1 에서 수신된 신호는 각각 다음과 같다.

$$r_D^1 = \alpha_{S,D}x_1 + n_D^1 \quad (9)$$

$$r_{R1}^1 = \alpha_{S,R1}x_1 + n_{R1}^1 \quad (10)$$

따라서 첫 번째 시분할 슬롯동안 destination 에서 수신된 첫 번째 심볼의 SNR 은 다음과 같다.

$$\gamma_1^1 = \frac{\alpha_{S,D}^2}{N_0} \quad (11)$$

두 번째 시분할 슬롯동안 destination 과 relay 2 에서 수신된 신호는 각각 다음과 같다.

$$r_D^2 = \alpha_{S,D}x_2 + \alpha_{R1,D}Ar_{R1}^1 + n_D^2 \quad (12)$$

$$r_{R2}^2 = \alpha_{S,R2}x_2 + n_{R2}^2 \quad (13)$$

(12) 및 (13) 식에 의하여 두 번째 시분할 슬롯의 첫 번째 심볼과 두 번째 시분할 슬롯의 두 번째 심볼에 대한 SNR 을 구하면 각각 다음과 같다.

$$\gamma_1^2 = \frac{\gamma_{R1,D} \cdot \gamma_{S,R1}}{\gamma_{R1,D} + \gamma_{S,R1} + 1} \quad (14)$$

$$\gamma_2^2 = \frac{\gamma_{S,D}(\gamma_{S,R1} + 1)}{\gamma_{R1,D} + \gamma_{S,R1} + 1} \quad (15)$$

IV. 평균 BER 성능 분석

본 절에서는 앞에서 구한 순시 SNR 에 따른 평균 BER 을 구한다. 평균 BER 을 구하기 위해 필요한 각 심볼의 순시 SNR 에 대한 확률 밀도 함수를 구하는 과정은 지면 관계상 생략한다. 단, 각 시분할 슬롯 별 순시 SNR 의 형태가 복잡하므로, 분석의 용이함을 위하여 relay 들이 source 보다 destination 에 가까운 곳에 위치한다고 가정한다. 이는 상위 layer 에 의해 destination 과 LOS (Line-of-Sight)의 상태에 있는 relay 들이 선택되었다는 의미이며, relay 1 과 destination, relay 2 와 destination 사이의 채널 환경은 AWGN 에 해당한다. 따라서, $\gamma_{R1,D}$ 및 $\gamma_{R2,D}$ 는 deterministic 한 값으로 볼 수 있고, 각 relay 들과 destination 사이의 채널 상태가 동일하다고 가정한다(즉, $\gamma_{R1,D} = \gamma_{R2,D} = k$). 또한, 전개를 간략히 하기 위해 $\gamma_{S,R1}$, $\gamma_{S,R2}$, $\gamma_{S,D}$ 는 각각 γ_1 , γ_2 , γ_3 라 표기한다. 이들 랜덤 변수들은 각각 파라미터로 $\beta_1 = \frac{1}{\gamma_1}$, $\beta_2 = \frac{1}{\gamma_2}$, $\beta_3 = \frac{1}{\gamma_3}$ 를 갖고 independent 한 exponential 분포를 가지며, 변조방식은 binary DPSK 를 가정한다.

4.1 기존 전송 프로토콜의 심볼별 평균 BER

Combiner 출력 단에서의 등가 순시 SNR 은 2 개의 시분할 슬롯에 걸쳐 들어오는 심볼들 각각의 순시 SNR 의 합이므로 평균 BER 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_b = & \frac{2(\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2)\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2}{15(\bar{\gamma}_3 + 1)\zeta^3} e^{\frac{1}{\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{\bar{\gamma}_2}} \left\{ 20 \times F\left(3, \frac{3}{2}; \frac{5}{2}; \frac{\rho}{\zeta}\right) \right. \\ & + \frac{5\zeta}{\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2} F\left(2, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{\rho}{\zeta}\right) + \frac{5\bar{\gamma}_3}{\bar{\gamma}_3 + 1} F\left(3, \frac{3}{2}; \frac{5}{2}; \frac{\rho}{\zeta}\right) \\ & + \frac{5\bar{\gamma}_3\zeta}{4(\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2)(\bar{\gamma}_3 + 1)} F\left(2, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{\rho}{\zeta}\right) + \frac{6\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2}{\zeta} F\left(4, \frac{3}{2}; \frac{7}{2}; \frac{\rho}{\zeta}\right) \\ & \left. + \frac{3\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2}{2(\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2)} F\left(3, \frac{1}{2}; \frac{7}{2}; \frac{\rho}{\zeta}\right) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $F(a, b; c; z)$ 는 [6]에서 정의된 Gauss Hypergeometric function 이고, $\zeta = \bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2 + \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2 + 2\sqrt{\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2}$,

$$\rho = \bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2 + \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2 - 2\sqrt{\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2} \text{ 이다.}$$

두 번째 심볼은 두 번째 시분할 슬롯에 한번만 들어오게 되어 다음과 같은 평균 BER 을 갖는다.

$$\begin{aligned} P(E) = & k^2 e^{\frac{1}{\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{\bar{\gamma}_2}} \frac{1}{\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2\bar{\gamma}_3} \int_0^\infty (\gamma_2^2)^{-3} e^{-\gamma_2^2} \\ & \times \left\{ \frac{(\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2)}{\sqrt{\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2}} \int_0^\infty e^{-\frac{k(\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2)}{\gamma} x - \frac{1}{\bar{\gamma}_3} x^{-1}} K_1\left(\frac{2k}{\gamma\sqrt{\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2}} x\right) dx \right. \\ & \left. + 2 \int_0^\infty e^{-\frac{k(\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2)}{\gamma} x - \frac{1}{\bar{\gamma}_3} x^{-1}} K_0\left(\frac{2k}{\gamma\sqrt{\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_2}} x\right) dx \right\} d\gamma_2^2 \end{aligned} \quad (17)$$

4.2 제안하는 프로토콜의 심볼별 평균 BER

제안하는 프로토콜에서 첫번째 심볼은 첫번째 시분할 슬롯과 두 번째 시분할 슬롯에 걸쳐 들어오게 되므로 첫번째 심볼에 대한 평균 BER 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(E) = & \frac{k(k+1)}{2(\bar{\gamma}+1)} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}} + \frac{1}{4(\bar{\gamma}+1)} \right) \\ & \times \int_0^\infty \frac{1}{(k-\gamma_1^2)^2} e^{-\frac{\gamma_1^2(k+1)}{\bar{\gamma}_1(k-\gamma_1^2)} - \gamma_1^2} d\gamma_1^2 \quad (\text{단, } k > \gamma_1^2) \quad (18) \\ & + \frac{k(k+1)}{8\bar{\gamma}(\bar{\gamma}+1)} \int_0^\infty \frac{\gamma_1^2}{(k-\gamma_1^2)^2} e^{-\frac{\gamma_1^2(k+1)}{\bar{\gamma}(k-\gamma_1^2)} - \gamma_1^2} d\gamma_1^2 \end{aligned}$$

두 번째 심볼은 두 번째 시분할 슬롯과 세 번째 시분할 슬롯에 걸쳐 들어오게 되므로 두 번째 심볼에 대한 평균 BER 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(E) = & \frac{k}{4\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_3} e^{\frac{1}{\bar{\gamma}_1}} \int_0^\infty \left[(4 + \gamma_2^2) e^{-\gamma_2^2} e^{-\frac{\gamma_2^2}{\bar{\gamma}_3}} \left\{ K_0\left(\frac{2\sqrt{\gamma_2^2 k}}{\bar{\gamma}_3}\right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\sqrt{\frac{\gamma_2^2}{k}}\right) K_1\left(\frac{2\sqrt{\gamma_2^2 k}}{\bar{\gamma}_3}\right) \right\} \times \int_0^\infty \frac{k(k+1)}{\bar{\gamma}_2(k-\gamma_2^2)^2} e^{-\frac{\gamma_2^2(k+1)}{\bar{\gamma}_2(k-\gamma_2^2)} - \gamma_2^2} d\gamma_2^2 \right] d\gamma_2^2 \\ & + \frac{k}{4\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_3} e^{\frac{1}{\bar{\gamma}_1}} \int_0^\infty e^{-\gamma_2^2} e^{-\frac{\gamma_2^2}{\bar{\gamma}_3}} \left\{ K_0\left(\frac{2\sqrt{\gamma_2^2 k}}{\bar{\gamma}_3}\right) + \left(\sqrt{\frac{\gamma_2^2}{k}}\right) K_1\left(\frac{2\sqrt{\gamma_2^2 k}}{\bar{\gamma}_3}\right) \right\} \\ & \times \int_0^\infty \gamma_2^3 \frac{k(k+1)}{\bar{\gamma}_2(k-\gamma_2^2)^2} e^{-\frac{\gamma_2^2(k+1)}{\bar{\gamma}_2(k-\gamma_2^2)} - \gamma_2^2} d\gamma_2^2 \end{aligned} \quad (19)$$

V. 성능 비교 분석

본 절에서는 IV 절에서 구한 각 심볼별 평균 BER 값으로 제안 프로토콜의 성능을 비교한다. (17), (18), (19)식은 더 이상의 전개가 불가능하므로 수치해석을 통해 구하였다. 모의 실험을 위해 destination 에 있는 2 개의 안테나로 들어오는 심볼은 ML (Maximum Likelihood) 방식에 의해 검출되며, 검출시 간섭에 의한 효과는 무시한다. 각 검출된 심볼은 MRC (Maximal Ratio Combining)를 사용하여 combining 하였다. 그림 2 는 모든 채널의 평균 SNR 이 동일한 환경에서 기존의 전송 프로토콜과 제안하는 프로토콜의 수학적 분석 값과 모의 실험 결과를 비교한 것이다((a)라고 표시한 것이 분석 결과에 해당함).

제안하는 방식은 2 개의 시분할 슬롯에 걸쳐서 2 개의 심볼이 들어오게 되므로 각 심볼별 평균 BER 이 거의 같은 곡선을 갖지만, 기존의 방식에서는 첫번째 심볼이 2 개의 시분할 슬롯에 걸쳐 들어오는 반면에 두 번째 심볼은 하나의 시분할 슬롯에서만 들어오게 된다. 물론, 기존 방식의 첫번째 심볼은, 첫번째 시분할 슬롯에 source 에서 destination 채널을 통하여 들어오며 두 번째 시분할 슬롯에 relay 1 에서 destination, relay 2 에서 destination 을 통하여 들어오기 때문에 제안하는 방식보다 성능이 좋지만, 첫번째 심볼과 두 번째 심볼의 평균을 취하게 되면 그림 3 처럼 제안하는 방식이 목표 BER 10^{-3} 에서 약 8dB 가량 우수함을

보여준다.

그림 4는 모든 채널의 평균 SNR이 같은 경우, 다른 채널의 평균 SNR은 고정시킨 상태에서 각각 relay들과 destination 사이 채널의 평균 SNR을 2배(2RD), source와 relay들 사이 채널의 평균 SNR을 2배(2SR), source와 destination 사이 채널의 평균 SNR을 2배(2SD)로 증가했을 때 심볼 1과 심볼 2의 평균을 취한, 평균 SNR에 따른 평균 BER 성능을 분석한 것이다. 예상했던 바와 같이 제안하는 방식은 모든 채널의 평균 SNR이 모두 같은 경우와 특정 채널의 평균 SNR이 변화했을 경우에도 BER 성능에는 거의 영향이 없지만, 기존의 방식은 relay들과 destination 사이 채널의 평균 SNR이 source와 relay 1, source와 relay 2, source와 destination 사이 채널의 평균 SNR보다 2배 클 경우와 source와 relay 사이 채널의 평균 SNR이 다른 채널의 SNR보다 2배 클 경우보다 source와 destination 사이 채널의 평균 SNR이 다른 채널의 SNR보다 2배 클 경우에 더 좋은 성능을 갖게 된다. 이는 기존 방식의 두 번째 심볼이 두 번째 시분할 슬롯에 한번만 들어오게 되므로 두 번째 시분할 슬롯의 source와 destination 사이 채널 상태에 따라 성능에 영향을 주게 된다는 것을 입증하는 결과이다.

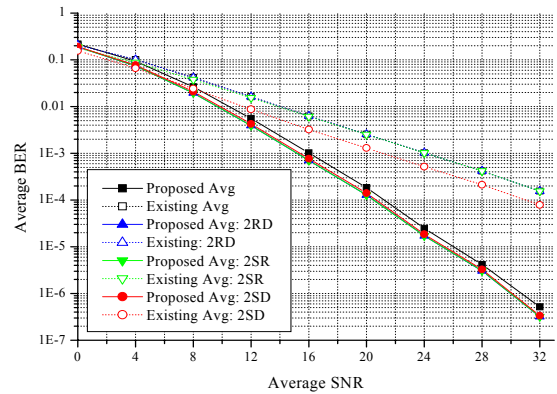


그림 4. 채널 변화에 따른 평균 BER 성능

VI. 결론

본 논문에서는 기존에 제안되었던 전송 프로토콜을 AF (Amplify-and-Forward) 방식에서 relay의 수를 2개 사용하는 경우로 확장하여, 제안하는 프로토콜과의 각 심볼 별 평균 BER 성능을 수학적 분석과 모의 실험을 통하여 살펴 보았다. 수학적 분석의 용이함을 위하여 많은 가정을 도입하고 있지만, 두 방식간의 상대적인 성능을 비교하는데 초점을 두고 있다. 향후에 좀 더 간결하고 완성된 형태의 결과를 유도하고, 간섭과 지연에 대한 고려, 그리고 전력 제어에 따른 추가적인 성능 분석들이 필요하다. 또한, 더 많은 수의 relay를 사용할 경우에 대한 전송 프로토콜들도 필요하다고 본다.

참고문헌

- [1] Aria Nosratinia, Todd E. Hunter and Ahmadreza Hedayat, "Cooperative Communication in Wireless Networks," IEEE communications Magazine, Oct. 2004, pp.74-80.
- [2] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang, "User Cooperation Diversity Part I and Part II", IEEE Trans. Commun., vol.51, no.11, Nov. 2003, pp. 1927-48.
- [3] R.U.Nabar, H. Bölcskei and F.W. Kneubühler, "Fading Relay Channels: Performance Limits and Space-Time Signal Design," IEEE JSAC, vol.22, no.6, Aug. 2004, pp.1099-109.
- [4] 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, Dec. 2004, pp. 3062-80
- [5] J. Boyer, D.D. Falconer and H. Yanikomeroglu, "Multihop Diversity in Wireless Relaying Channels," IEEE Trans. Commun., vol.52, no.10, Oct. 2004, pp.1820-30.
- [6] M. Abramowitz and I.A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. 9th ed. New York: Dover, 1970.

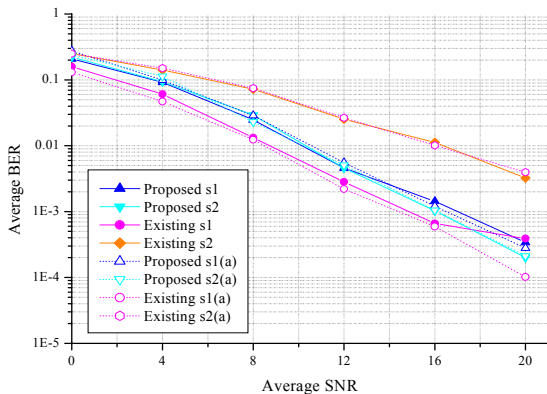


그림 2. 모의 실험과 수학적 분석의 비교

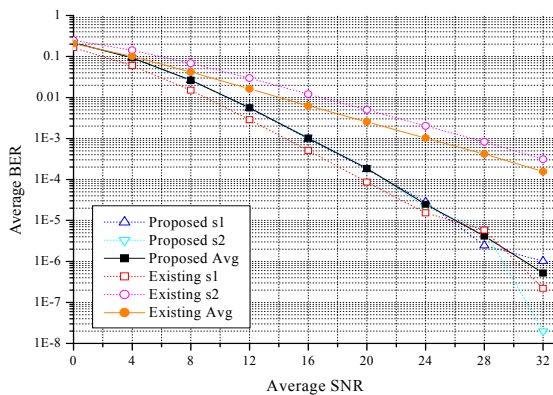


그림 3. 각 심볼들의 평균값 비교