

다중안테나 시스템을 위한 연관정 후 전송 프로토콜의 비트 오류

*송경영⁰, *노종선, **정하봉

*서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소

**홍익대학교 전자전기공학부

{yjdong, sky6174}@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, habchung@hongik.ac.kr

BER of Orthogonal Soft-Decision-and-Forward Protocol With Multiple Antennas

*Kyoung-Young Song⁰, *Jong-Seon No, and **Habong Chung

*Department of EECS, INMC, Seoul National University

**School of Electronics and Electrical Engineering, Hongik University,

{yjdong, sky6174}@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, habchung@hongik.ac.kr

요약

이 논문에서는 협력통신을 위한 연관정 후 전송 (soft-decision-and-forward: SDF) 프로토콜의 쌍 오류 확률을 분석한다. 가우시안 Q 함수의 근사화를 이용하여 거의 정확한 쌍 오류 확률을 유도한다. 이를 이용하여 비트오율을 구하고, 모의실험 결과와 비교를 통해 유도된 결과가 일치함을 확인하였다.

1. 개요

Cover와 El Gamal은 소스 (source: S), 릴레이 (relay: R), 그리고 데스티네이션 (destination: D) 노드의 세 가지 노드로 이루어진 relay 채널의 용량에 관하여 연구하였다 [1]. 협력 통신을 위한 기법으로는 증폭 후 전송 (amplify-and-forward: AF)과 복호 후 전송 (decode-and-forward: DF) 프로토콜 등 여러 가지가 있다. AF 프로토콜은 R 이 S 로부터 수신한 신호를 증폭한 후 그것들을 다시 D 로 전송한다. 이와 달리, DF 프로토콜은 R 이 S 로부터 수신한 신호를 복호한 후, 이를 다시 부호화하여 D 로 전송한다.

[2]에서 저자들은 연관정 후 전송 (soft-decision-and-forward: SDF) 프로토콜을 제안하였다. 이 논문에서는, 직교 전송 SDF (OSDF) 프로토콜의 쌍 오류 확률 (pairwise error probability: PEP)과 비트 오류율 (bit error rate: BER)을 유도한다. OSDF 프로토콜은 R 에서 S 로부터 수신한 신호의 연관정 값을 이용하고 다음과 같이 두 협력 phase, phase 1과 phase 2로 구성된다. Phase 1에서, S 는 R 과 D 에 전송하고, phase 2에서 R 은 D 로 연관정된 신호를 다시 부호화해서 전송한다. 이 때, S 는 D 로 전송을 하지 않는다.

2장에서는 OSDF 프로토콜과 시스템 모델을 설명한다. 3장에서 OSDF 프로토콜에 대한 쌍 오류확률과 비트 오류율을 유도하고, 4장에서 모의실험 결과와 비교하고, 결론을 맺는다.

2. OSDF 프로토콜

이 논문에서는 각 노드는 두 개의 송/수신 안테나를 갖는 세 개의 노드로 이루어진 협력 통신망을 고려한다. H_0 , H_1 , 그리고 H_2 는 $S \rightarrow R$ 채널, $S \rightarrow D$ 채널, 그리고 $R \rightarrow D$ 채널의 페이딩 행렬이라 하자. 이 행렬들은 2×2 이고 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 확률변수이다. $i, j = 1, 2$ 에 대해 h_0^{ij} , h_1^{ij} , h_2^{ij} 는 각각 대응되는 채널 경로에 대한 i 번째 송신안테나와 j 번째 수신안테나 사이의 페이딩 계수를 나타낸다. 준정지 Rayleigh 페이딩을 가정하고, 수신단에서는 채널 상태를 완벽히 알고 있다고 가정한다. 즉, R 은 h_0^{ij} 를 알고, D 는 h_0^{ij} , h_1^{ij} , 그리고 h_2^{ij} 를 모두 알고 있다. 각 노드는 half duplex 방식으로 동작한다고 가정한다.

먼저, S 는 Alamouti 부호를 전송한다고 가정한다 [3]. SDF 프로토콜은, R 이 수신한 신호를 바탕으로 연관정 후 다시 시공간 부호화 하여 D 로 전송한다. S 는 Alamouti 부호를 전송하므로, R 에서 x_1 과 x_2 에 대한 추정은 다음과 같이 이루어진다.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{x}_2 \end{bmatrix}^T = \lambda \mathbf{H}_1^H \mathbf{c}_v(\mathbf{y}_R) \quad (1)$$

여기서 λ 는 릴레이에서의 전력 이득으로 R 의 각 안테나의 평균 전송 전력이 P_2 가 되도록 다음과 같이 결정된다. R 에서는 식 (1)의 연관정 값을 이용하여 얻은 신호를 다음과 같이 Alamouti 부호화하고, $\mathbf{x}_R = \mathbf{A}(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$, 이를 D 로 전송한다.

Phase 1과 2에서 D 의 수신된 신호는 다음과 같이 쓸

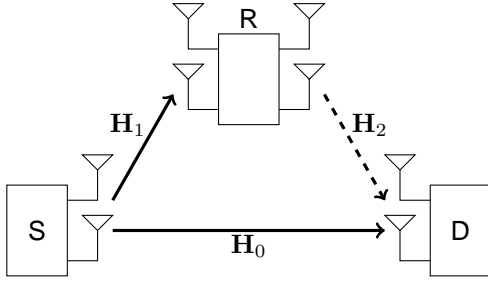


그림 1. OSDF 협력통신 시스템 모형.

수 있다.

$$\begin{bmatrix} cv(\mathbf{y}_{D1}) \\ cv(\mathbf{y}_{D2}) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{P_1}{2}} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{H}'_0 \\ \lambda \|\mathbf{H}_1\|^2 \mathbf{H}'_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \mathbf{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} cv(\mathbf{n}_{D1}) \\ cv(\mathbf{n}_D) \end{bmatrix}}_{\mathbf{n}} \quad (2)$$

R에서의 잡음은 D의 수신 안테나들로 모두 전송이 되기 때문에, \mathbf{n} 의 각 항들은 상관되어 있다. 따라서 심볼간 복호가 가능한 ML 복호기는 다음과 같이 유도된다.

$$\tilde{x}_i = \arg \min_{x_i} \left[\left(\frac{P_1}{2} \|\mathbf{H}_0\|^2 + \frac{P_1 P_2 \|\mathbf{H}_1\|^2 \|\mathbf{H}_2\|^2}{2(P_1 \|\mathbf{H}_1\|^2 + P_2 \|\mathbf{H}_2\|^2 + 2)} \right) |x_i|^2 - 2\Re\{\eta_i x_i\} \right]$$

3. 쌍 오류 확률과 비트 오율

OSDF 프로토콜의 조건부 쌍 오류 확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}|\mathbf{H}) \approx Q \left(\sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \gamma_0 + \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \right\}} \right) \quad (3)$$

여기서 $\gamma_0 = \frac{\|\mathbf{H}_0\|^2}{2} \delta_{\mathbf{x}}^2 P_1$, $\gamma_1 = \frac{\|\mathbf{H}_1\|^2}{2} \delta_{\mathbf{x}}^2 P_1$, $\gamma_2 = \frac{\|\mathbf{H}_2\|^2}{2} \delta_{\mathbf{x}}^2 P_2$ 이고, $Q(x) = \int_x^\infty e^{-u^2/2} / \sqrt{2\pi} du$ 와 $\delta_{\mathbf{x}}^2 = \|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|^2$ 이다.

[4]와 질량 생성 함수 (moment generating function: MGF)를 이용하면 거의 정확한 PEP를 구할 수 있다.

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{576N} \sum_{n=1}^N \left(1 + \frac{(md)^2 \sigma_{SD}^2 \alpha P}{2 \sin^2 \theta_n} \right)^{-4} \left(\frac{\Omega_{\min}}{\Omega_{\max}} \right)^4 \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\Omega_{\min}}{-8 \sin^2 \theta_n} \right)^k \frac{(k+7)!(k+3)!}{k!(2k+7)!!} \times {}_2F_1 \left(k+8, k+4; 2k+8; 1 - \frac{\Omega_{\min}}{\Omega_{\max}} \right) \right\}$$

여기서 $\Omega_{\max} = 2(md)^2 P \cdot \max \{ \sigma_{SR}^2 \alpha, \sigma_{RD}^2 (1-\alpha) \}$, $\Omega_{\min} = 2(md)^2 P \cdot \min \{ \sigma_{SR}^2 \alpha, \sigma_{RD}^2 (1-\alpha) \}$, $(2n-1)!! = \prod_{k=1}^n (2k-1)$ 이다. 위 식을 $\mathcal{Q}_P(md)$ 라 하면 [5]의 방법을 사용하여 BPSK, QPSK, 16-QAM에 대해 다음과 같이 비트 오율을 유도할 수 있다.

$$P_{\text{BPSK}} = P_{\text{QPSK}} = \mathcal{Q}_P(d)$$

$$P_{16\text{-QAM}} = \frac{3}{4} \mathcal{Q}_P(d) + \frac{1}{2} \mathcal{Q}_P(3d) - \frac{1}{4} \mathcal{Q}_P(5d)$$

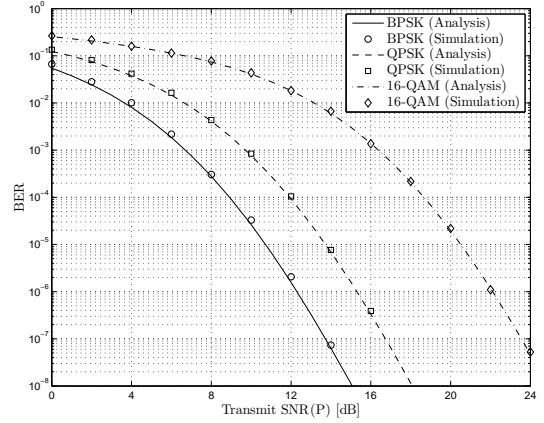


그림 2. 균등한 전력 분배를 사용한 OSDF의 비트 오율 비교 (BPSK, QPSK, 16-QAM).

4. 모의실험 결과 및 결론

모의실험에서 모든 채널은 준정지 Rayleigh 페이딩을 겪고 BPSK, QPSK, 16-QAM 변조가 사용된다고 가정한다. 또한 전송 심볼의 평균 전력은 1이라 가정한다. S와 R사이의 전력은 동등하게 분배된다. P는 전체 송신 전력을 의미한다.

그림 2는 균등한 전력 분배를 사용했을 경우의 OSDF 프로토콜의 비트 오율을 나타낸 것이다. 모의실험 결과로부터 OSDF 프로토콜의 PEP를 이용하여 구한 비트 오율은 거의 정확함을 확인하였다.

이 논문에서는 R에서 수신 신호를 연관정한 후 부호화하여 재전송하는 OSDF 프로토콜의 쌍 오류 확률을 MGF를 이용하여 유도하고 이로부터 거의 정확한 비트 오율을 유도하였다.

5. 감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원 [No. 2009-0081441]과 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음 [2008-F-007-02, 3차원 환경에서의 지능형 무선통신 시스템].

6. 참고문헌

- [1] T. M. Cover and A. A. El Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-23, no. 5, pp. 572–584, Sep. 1979.
- [2] 양재동, 송경영, 노종선, 신동준, "Alamouti 부호에 기반한 협력 통신을 위한 연관정 후 전송 프로토콜," 제 19회 통신정보융합동학술대회 (JCCI2009), 광주, 2009년 4월.
- [3] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Aug. 1998.
- [4] M. Chiani and D. Dardari, "Improved exponential bounds and approximation for the Q-function with application to average error probability computation," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, 2002, pp. 1399–1402.
- [5] S.-H. Kim, J.-D. Yang, and J.-S. No, "Exact bit error probability of orthogonal space-time block codes with quadrature amplitude modulation," *J. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 3, pp. 253–257, Sept. 2008.