

# 다중 릴레이가 존재하는 직교 복호 후 전달 프로토콜에 관한 Near-ML 복호방식의 다이버시티

\*김향란, 노종선, \*\*신동준

\*서울대학교, \*\*한양대학교

\*xianglan.jin@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, \*\*djshin@hanyang.ac.kr

## Diversity for Orthogonal Decode-and-Forward Protocol Using Near-ML Decoder for Multiple Relays

\*Xianglan Jin, Jong-Seon No, \*\*Dong-Joon Shin

\*Seoul National Univ., \*\*Hanyang Univ.

### 요약

본 논문은 논문 [1]에서 제안한 복호 후 전달 (decode-and-forward: DF) 프로토콜의 near-maximum-likelihood (near-ML) 복호방식을 다중 릴레이(relay: R) 채널로 확장하고 단일 안테나 상황 하에서 직교 복호후 전달 (orthogonal DF: ODF) 프로토콜의 쌍 오류확률 (pairwise error probability: PEP)의 상한으로부터 유도하고 또한 유도한 PEP로부터 다이버시티를 얻었다.

### I. 서론

논문 [1]에서는 복호 후 전달 (decode-and-forward: DF) 프로토콜의 near-maximum-likelihood (near-ML) 복호방식을 제안하고 쌍 오류확률 (pairwise error probability: PEP)의 상한을 유도하였다. 본 논문에서는 near-ML 복호방식을 다중 릴레이(relay: R) 채널로 확장하고 단일 안테나 상황 하에서 직교 복호후 전달 (orthogonal DF: ODF) 프로토콜의 쌍 오류확률 (pairwise error probability: PEP)의 상한을 유도하고 또한 PEP로부터 다이버시티를 유도한다.

을 연구하는데 S-R, S-D, R-D채널은 모두 주파수 평탄 (flat) 준정지 레일리 페이딩이고 반이중 (half duplex) 통신방식을 사용한다고 가정한다. 또한 R은 S-R 채널의 채널 상태 정보 (channel information state: CSI) 를, D는 S-R, S-D, R-D의 CSI 를 알고 있다고 가정한다. 첫 번째 시간슬롯에서 S는 심볼  $x$  를 R들과 D에로 전송하고 두 번째 시간슬롯에서 R들은 순서대로 서로 독립적인 채널을 통하여 복호한 신호를 D에로 보낸다. 즉 첫 번째 시간슬롯에서 R들과 D가 받은 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{SR_1} &= k_1 x + n_{SR_1} \\ &\vdots \\ y_{SR_m} &= k_m x + n_{SR_m} \\ y_{SD} &= g x + n_{SD} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $k_i \sim CN(0, \sigma_{SR}^2)$ ,  $g \sim CN(0, \sigma_{SD}^2)$ ,  $n_{SR_i} \sim CN(0, \sigma^2)$ ,  $n_{SD} \sim CN(0, \sigma^2)$ 이다. 두 번째 시간 슬롯에서 D가  $i$ 번째 시간에  $i$ 번째 R로부터 받은 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{R_1D} &= f_1 x_{R_1} + n_{R_1D} \\ &\vdots \\ y_{R_mD} &= f_m x_{R_m} + n_{R_mD} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $f_i \sim CN(0, \sigma_{RD}^2)$ ,  $n_{R_iD} \sim CN(0, \sigma^2)$ 이다.

논문 [1]의 near-ML 복호방식을  $m$  개의 R이 있는 ODF프로토콜로 확장하면 다음과 같다.

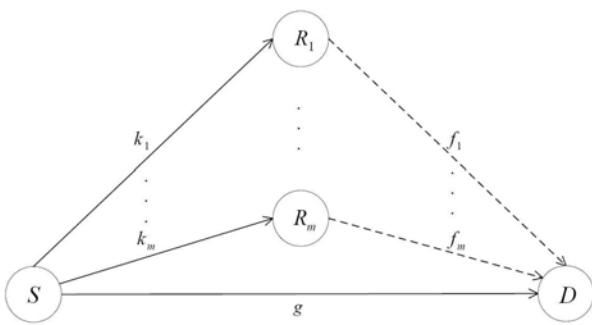


그림 1. 협력 직교 복호 후 전달 프로토콜

### II. 본론

#### II. 1 시스템 모델과 near-ML 복호방식

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 소스(source: S), 하나의 목적(destination: D)과 여러 개의 릴레이 (relay: R)가 있는 ODF 프로토콜

$$\hat{x} = \arg \min_{x \in \mathcal{A}} |y_{SD} - gx|^2 + \sum_{i=1}^m \min_{\hat{x}_{R_i} \in \mathcal{A}} [|y_{R_i D} - f_i \hat{x}_{R_i}|^2 - \sigma^2 \ln P_{SR_i}(x \rightarrow \hat{x}_{R_i})] \quad (3)$$

여기서  $\mathcal{A}$ 는  $M$ -ary 신호 constellation 위에 있는 신호 집합이고  $P_{SR_i}(x \rightarrow \hat{x}_{R_i})$ 는 S-R 채널의  $x$ 와  $\hat{x}_{R_i}$  사이의 PEP를 의미한다.

## II. 2 PEP로부터의 다이버시티 분석

(3)식에서  $P_{SR_i}(x \rightarrow \hat{x}_{R_i})$ 는 다음과 같이 Q 함수로 표현할 수 있다.

$$P_{SR_i}(x \rightarrow \hat{x}_{R_i}) = Q\left(\sqrt{\frac{|k_i(x - \hat{x}_{R_i})|^2}{2\sigma^2}}\right)$$

여기서  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy$ 이다. Q함수는 너무 복잡하여 다음과 같이 근사를 이용할 수 있다.

$$\sigma^2 \ln Q\left(\sqrt{\frac{|k_i(x - \hat{x}_{R_i})|^2}{2\sigma^2}}\right) \approx -\frac{|k_i(x - \hat{x}_{R_i})|^2}{4}$$

위의 근사식을 이용하면 (3)의 복호를 하기 위한 매트릭은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$m(y_{SD}, y_{R_1 D}, \dots, y_{R_m D}, x | x_{R_1}, \dots, x_{R_m}) \approx |n_{SD}|^2 + \sum_{i=1}^m \min_{\hat{x}_{R_i} \in \mathcal{A}} \left[ |f_i(x_{R_i} - \hat{x}_{R_i}) + n_{R_i D}|^2 + \frac{1}{4} |k_i(x - \hat{x}_{R_i})|^2 \right]$$

$$m(y_{SD}, y_{R_1 D}, \dots, y_{R_m D}, \tilde{x} | x_{R_1}, \dots, x_{R_m}) \approx |g(x - \tilde{x}) + n_{SD}|^2 + \sum_{i=1}^m \min_{\hat{x}_{R_i} \in \mathcal{A}} \left[ |f_i(x_{R_i} - \hat{x}_{R_i}) + n_{R_i D}|^2 + \frac{1}{4} |k_i(\tilde{x} - \hat{x}_{R_i})|^2 \right]$$

근사한 매트릭을 이용하여 다음과 같은 세 가지 경우로 나누어서 PEP를 계산하면 본 논문의 주요 결과 정리 1를 얻을 수 있다.

Case 1) 모든 R에 대하여  $x_{R_i} = x$ 인 경우

Case 2) 모든 R에 대하여  $x_{R_i} \neq x$ 인 경우

Case 3) 일부 R에 대하여  $x_{R_i} = x$ , 나머지 R에 대하여  $x_{R_i} \neq x$ 인 경우

**정리 1:**  $m$ 개의 릴레이를 가지는 ODF 프로토콜에서 near-ML 복호 방식을 사용하였을 때의 평균 PEP의 상한은 다음과 같다.

$$E[P(x \rightarrow \tilde{x})] \leq \left( \frac{4\sigma^2}{|x - \tilde{x}|^2 \sigma_{SD}^2} \right) \left( \frac{8M\sigma^2}{|x - x_n|^2 \sigma_{SR}^2} \right)^m + 2 \sum_{p=1}^m \binom{m}{p} \left( \frac{8M\sigma^2}{|x - x_n|^2 \sigma_{SR}^2} \right)^{m-p} \left( \frac{4\sigma^2}{|x - x_n|^2 \sigma_{RD}^2} \right)^p \quad (4)$$

여기서  $x_n$ 는  $x$ 와 제일 가까운 심볼이다. (4)로부터 알 수 있는바와 같이 얻을 수 있는 다이버시티는  $m+1$ 이다.

**증명:** 생략 □

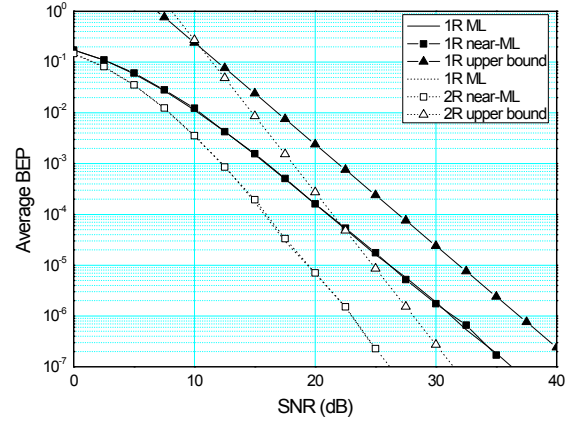


그림 2.  $\sigma_{SR}^2 = \sigma_{SD}^2 = \sigma_{RD}^2 = 1$  때의 ODF 프로토콜의 평균 BEP 비교

## II. 3 모의실험 결과

본 논문에서는 각각 하나의 R과 두개의 R이 존재하는 ODF 프로토콜에 대하여 모의실험을 진행한다. QPSK 변조방식을 사용하고 S와 R들의 평균 전송전력을 모두 1로 가정하고  $\sigma_{SR}^2 = \sigma_{SD}^2 = \sigma_{RD}^2 = 1$ 라고 가정한다. 그림 2로부터 알 수 있는바와 같이 하나의 R과 두 개의 R이 존재하는 ODF 프로토콜에 대하여 near-ML 복호방식은 모두 ML 복호방식과 거의 같은 성능을 가지고 유도한 PEP의 상한으로부터 얻은 평균 비트오류 확률 (bit error probability: BEP)의 상한은 모의실험결과와 평형함으로서 두 개의 R이 있는 ODF 프로토콜은 하나의 R이 있는 ODF 프로토콜보다 높은 다이버시티 3를 가진다.

## III. 결론

본 논문은 DF의 near-ML 복호방식을 다중 릴레이 채널로 확장하고 단일 안테나 상황 하에서 ODF 프로토콜의 PEP의 상한을 유도함으로써  $m$ 개의 R이 있는 ODF 프로토콜은 다이버시티  $m+1$ 를 가진다는 것을 증명하였다.

## 참고 문헌

- [1] 김향란, 진동섭, 노종선, 신동준. "다중안테나를 사용하는 복호 후 전달 프로토콜의 다이버시티," 제 19회 통신 정보 합동 학술대회 논문집, 제 19권, p. 133, 2009년 4월 15일-4월 17일.