

Alamouti 부호에 기반한 협력 통신을 위한 연관정 후 전송 프로토콜

*양재동⁰, *송경영, *노종선, **신동준

*서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소

**한양대학교 전자통신컴퓨터공학부

{yjdong, sky6174}@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, djshin@hanyang.ac.kr

Soft-Decision-and-Forward Protocol for Cooperative Communication Networks Based on Alamouti Code

*Jae-Dong Yang⁰, *Kyoung-Young Song, *Jong-Seon No, and **Dong-Joon Shin

*Department of EECS, INMC, Seoul National University

**Department of ECE, Hanyang University,

{yjdong, sky6174}@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, djshin@hanyang.ac.kr

요약

이 논문에서는 협력통신을 위한 연관정 후 전송 (soft-decision-and-forward: SDF) 프로토콜이 제안된다. 이러한 SDF 프로토콜은 릴레이에서 수신한 신호들의 연관정 값을 이용한다. 채널의 직교성을 위해 Alamouti 부호가 이용되고, 비직교 전송을 위해서는 분산 시공간 부호가 설계된다. 또한 증폭후 전송 (amplify-and-forward: AF)과 연관정 후 전송을 위한 낮은 복호 복잡도를 갖는 분산 시공간 부호의 최대 우도 복호기가 제안된다. 비트오율에 대한 모의실험 결과로부터, 제안된 SDF 프로토콜은 AF 프로토콜보다 성능이 우수함을 보인다.

1. 개요

최근 무선 통신에서는 릴레이 노드의 협력을 통해 주파수 효율과 전송의 신뢰도 향상을 위한 협력 통신에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 협력 통신은 소스 (source: S), 릴레이 (relay: R), 그리고 데스티네이션 (destination: D) 노드의 세 가지 노드로 이루어져 있다 [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 R이 S로부터 수신한 신호를 증폭한 후 그것들을 다시 D로 전송한다. 이와 달리, DF 프로토콜은 R이 S로부터 수신한 신호를 복호한 후, 이를 다시 부호화하여 D로 전송한다. 현재까지 위의 두 가지 프로토콜들에 대한 다양한 연구가 이루어졌다 [1]-[4].

이 논문에서는, 새로운 협력 기법인 연관정 후 전송 (soft-decision-and-forward: SDF) 프로토콜이 제안된다. SDF 프로토콜은 R에서 S로부터 수신한 신호의 연관정 값을 이용하고 다음과 같이 두 협력 phase, phase 1과 phase 2로 구성된다. Phase 1에서, S는 R과 D에 전송하고, phase 2에서 R은 D로 연관정된 신호를 다시 부호화해서 전송한다. 이 때, S는 D로 전송을 할 수도 있고 하지 않을 수도 있다. Phase 2에서 S가 전송하지 않으면

직교 전송 (orthogonal transmission: OT)이라 하고 그렇지 않은 것을 비직교 전송 (non-orthogonal transmission: NT)이라 한다. 이 논문에서는 네 가지 프로토콜 OT-AF, OT-SDF, NT-AF, 그리고 NT-SDF에 대해 설명하고, 각 프로토콜에 대한 최대 우도 (maximum likelihood: ML) 복호기를 유도하고, 간단한 형태의 심볼 복호 (symbolwise decoding)나 쌍 심볼 (pairwise symbol) 복호가 가능함을 보인다.

[5]와 [6]에서의 프로토콜들은 본 논문에서 제안된 SDF 프로토콜과 유사하다. [5]의 process-and-forward (PF) 프로토콜은 R이 수신된 신호를 시공간 부호화하도록 하는 방법이다. 각 노드에서 하나의 안테나가 사용되었을 때, AF 프로토콜과 PF 프로토콜은 같은 성능을 보인다. 이 논문에서는 모든 노드에 여러 개의 안테나를 사용할 때, 제안된 SDF 프로토콜이 AF 프로토콜보다 비트오율이 우수함을 보인다. [6]에서는 이중 홉 릴레이 통신을 위한 decouple-and-forward (DCF) 프로토콜이 제안되었다. 이 기법에서 R은 수신 신호들을 분리한 후 다시 시공간 부호화 하여 D로 전송한다. [6]에서 D의 잡음은 상관 관계가 존재함에도 불구하고, 이 신호의 복호를 위해 squaring 방법이 사용되었다. 이 논문에서는, D는 S로부터 신호를 수신할 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 이러한 상황에서 D에서의 잡음이 상

관관계계를 가질 때에도 ML 복호기를 간단한 형태로 나타낼 수 있음을 보인다.

표기법: 진한 대문자는 행렬을, 진한 소문자는 벡터를 나타낸다. $\Re\{\cdot\}$ 은 복소수의 실수 부분을 나타내고 $(\cdot)^*$ 와 $|\cdot|$ 은 각각 켈레 복소수와 복소수의 norm을 의미한다. $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$ 와 $\|\cdot\|$ 은 각각 행렬의 전치, 켈레 전치, 그리고 Frobenius norm을 나타낸다. \mathbf{I}_n 과 $\mathbf{0}$ 은 $n \times n$ 항등 행렬과 영행렬을 나타낸다.

2. 시스템 모델

이 논문에서는 각 노드는 두 개의 송/수신 안테나를 갖는 세 개의 노드로 이루어진 협력 통신망을 고려한다. \mathbf{G} , \mathbf{H}_1 , 그리고 \mathbf{H}_2 는 S와 R 채널, S와 D 채널, 그리고 R과 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 g_{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, R은 g_{ij} 를 알고, D는 g_{ij} , h_1^{ij} , 그리고 h_2^{ij} 를 모두 알고 있다.

각 노드는 half duplex 방식으로 동작한다고 가정한다. 즉, 모든 노드는 한 시점에 송신이나 수신 중 하나만 작동한다. 따라서 두 phase의 협력 통신을 고려한다. NT의 경우, [4]에서 제안된 source antenna switching (SAS) 방법이 적용될 수 있다. 이는 각 RF 체인은 두 개의 송신안테나를 갖고, 두 개의 RF 체인이 있는 경우, phase 1에서, S는 각 RF 체인의 하나의 안테나를 이용하고 phase 2에는 다른 안테나를 이용하여 신호를 전송한다. 이러한 SAS 기법을 DF 프로토콜에 적용하면 부가적인 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 것이 알려져 있다 [4].

협력 통신을 위한 프로토콜은 R의 운용 방식에 따라 AF, DF 등으로 구분된다. AF 프로토콜은 R이 수신한 신호를 단지 증폭만 하고 이를 D로 전송한다. 수신 신호를 증폭할 때, 잡음 성분도 동시에 커진다. 이와 달리, DF 프로토콜은 R이 수신 신호를 복호하고 이를 다시 부호화한 후 D로 전송하도록 한다. DF에서는 R이 수신 신호를 경관정하기 때문에, 정보 손실이 생긴다. 이를 보완하기 위해, R에서 수신 신호의 연관정 값을 이용하는 방법인 SDF 프로토콜을 제안한다.

3. AF와 SDF 프로토콜

이 장에서는 각 노드에서 다중안테나를 사용하는 경우에 대한 AF와 SDF 프로토콜을 OT와 NT의 경우에 대해 설명한다. 먼저, S는 Alamouti 부호를 전송한다고 가정한다 [7]. AF 프로토콜의 경우, R의 각 수신 안테나들은 안테나 별로 증폭되고 전송된다. 이와는 달리, SDF 프로토콜에서는, R이 수신한 신호를 바탕으로 연관정 후 다시 시공간 부호화 하여 D로 전송한다. 여기

서는 OT-AF, OT-SDF, NT-AF, 그리고 NT-SDF 기법에 대해 설명한다. 이를 위해 다음을 정의한다.

정의: Alamouti 연산과 복소 벡터화.

- 두 심볼 a 와 b 에 대한 Alamouti 연산은 다음과 같다.

$$\mathbf{A}(a, b) = \begin{bmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{bmatrix}$$

- 2×2 행렬 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$ 와 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 에 대

해, $\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}(b_{11}, b_{21}) \\ \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}(b_{12}, b_{22}) \end{bmatrix}$ 를 의미한다.

- $cv(\cdot)$ 는 2×2 에 대한 복소 벡터화를 나타낸다.

$$cv\left(\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}\right) = [a \ c^* \ b \ d^*]^T$$

A. OT-AF 기법

Phase 1에서, S는 Alamouti 부호 $\mathbf{X} = \mathbf{A}(x_1, x_2)$ 를 전송한다. 따라서 R과 D에서 수신된 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}_R = \sqrt{P_1} \mathbf{X} \mathbf{G} + \mathbf{W}, \quad \mathbf{Y}_{D1} = \sqrt{P_1} \mathbf{X} \mathbf{H}_1 + \mathbf{N}_1 \quad (1)$$

여기서 \mathbf{Y}_R 는 R에서 수신된 신호를, \mathbf{Y}_{D1} 는 phase 1에서 D의 수신 신호를 나타낸다. \mathbf{W} 와 \mathbf{N}_1 는 각 항의 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 확률변수인 가산성 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise: AWGN) 행렬을 의미한다. 또한 S의 각 안테나에서 전송되는 신호의 평균 전력은 P_1 이라 가정한다.

먼저 AF 프로토콜을 가정한다. R은 수신한 신호들을 증폭하여 이를 D에 전송해야 한다. 따라서 phase 2에서 R에서 전송되는 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{X}_R = \mathbf{Y}_R \boldsymbol{\beta}$$

여기서 \mathbf{X}_R 은 R에서 전송되는 신호이고, $\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 \\ 0 & \beta_2 \end{bmatrix}$ 는 R에서의 증폭 행렬로서 β_1 과 β_2 는 다음을 만족한다.

$$\beta_1 = \sqrt{P_2 / (P_1 (|g_{11}|^2 + |g_{21}|^2) + 1)}$$

$$\beta_2 = \sqrt{P_2 / (P_1 (|g_{12}|^2 + |g_{22}|^2) + 1)}$$

이 증폭 계수들은 phase 2에서 R의 각 안테나에서 전송되는 신호의 평균 전력이 P_2 가 되도록 한다.

OT-AF의 경우, phase 2에서 R만 신호를 전송한다. 따라서 D에서 수신되는 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{Y}_{D2} = \mathbf{Y}_R \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_2 + \mathbf{N}_2 = \sqrt{P_1} \mathbf{X} \mathbf{F} + \mathbf{N} \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{F} = \mathbf{G} \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_2$, $\mathbf{N} = \mathbf{W} \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_2 + \mathbf{N}_2$ 이고, \mathbf{N}_2 는 각 원소의 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 확률변수인 AWGN 행렬을 나타낸다.

식 (1)과 (2), 그리고 Alamouti 부호의 성질을 이용하여, OT-AF에 대한 벡터 모델을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} cv(\mathbf{Y}_{D1}) \\ cv(\mathbf{Y}_{D2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{P_1} \mathbf{H}_1' \\ \sqrt{P_1} \mathbf{F}' \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} cv(\mathbf{N}_1) \\ cv(\mathbf{N}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T$ 이다.

B. OT-SDF 기법

SDF 프로토콜의 phase 1에서 수신 과정은 AF 프로토콜과 같으나 R에서 처리가 다르다. SDF 프로토콜에서는, R이 수신한 신호를 연관정한 후 이를 다시 부호화하고 전송한다. S는 Alamouti 부호를 전송하므로, R에서 x_1 과 x_2 에 대한 추정은 다음과 같이 이루어진다.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \gamma(\mathbf{G}')^H cv(\mathbf{Y}_R) \quad (4)$$

여기서 γ 는 릴레이에서의 전력 이득으로 R의 각 안테나의 평균 전송 전력이 P_2 가 되도록 다음과 같이 결정된다.

$$\gamma = \sqrt{P_2 / (\|\mathbf{G}\|^2(1 + P_1\|\mathbf{G}\|^2))}$$

R에서는 식 (4)의 연관정 값을 이용하여 얻은 신호를 다음과 같이 Alamouti 부호화하고, $\mathbf{X}_R = \mathbf{A}(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$, 이를 D로 전송한다.

Phase 2에서 D의 수신된 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}_{D2} = \mathbf{X}_R \mathbf{H}_2 + \mathbf{N}_2$$

식 (4)를 다음과 같은 벡터 모델로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} cv(\mathbf{Y}_{D1}) \\ cv(\mathbf{Y}_{D2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{P_1} \mathbf{H}'_1 \\ a \mathbf{H}'_2 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} cv(\mathbf{N}_1) \\ cv(\mathbf{N}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $a = \gamma \sqrt{P_1} \|\mathbf{G}\|^2$, $cv(\mathbf{N}) = \gamma \mathbf{H}'_2 (\mathbf{G}')^H cv(\mathbf{W}) + cv(\mathbf{N}_2)$ 이고 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T$ 이다.

C. NT-AF 기법

NT 기법의 경우, phase 2에서 S는 신호를 전송하기 때문에, 준직교 시공간 블록 부호 (quasi-orthogonal space-time block code: QO-STBC) [8]를 이용한 분산 시공간 부호 (distributed space-time code: DSTC)를 설계할 수 있다. 이를 위해, S는 두 개의 Alamouti 부호, $\mathbf{X}_1 = \mathbf{A}(x_1, x_2)$ 과 $\mathbf{X}_2 = \mathbf{A}(x_3, x_4)$ 를 phase 1에서 전송한다. Phase 1에서 R과 D의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}_{R1} = \sqrt{P_1} \mathbf{X}_1 \mathbf{G} + \mathbf{W}_1, \quad \mathbf{Y}_{R2} = \sqrt{P_1} \mathbf{X}_2 \mathbf{G} + \mathbf{W}_2 \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}_{D1,1} = \sqrt{P_1} \mathbf{X}_1 \mathbf{H}_1 + \mathbf{N}_{1,1}, \quad \mathbf{Y}_{D1,2} = \sqrt{P_1} \mathbf{X}_2 \mathbf{H}_1 + \mathbf{N}_{1,2}$$

여기서 \mathbf{Y}_{R1} 과 \mathbf{Y}_{R2} 는 R에서 수신된 2×2 신호 행렬을, $\mathbf{Y}_{D1,1}$ 와 $\mathbf{Y}_{D1,2}$ 는 D에서 수신된 2×2 행렬을 나타낸다. 또한 \mathbf{W}_1 , \mathbf{W}_2 , $\mathbf{N}_{1,1}$, 그리고 $\mathbf{N}_{1,2}$ 은 2×2 AWGN 행렬들이다.

Phase 2에서, R은 수신된 신호를 증폭하고 이를 D로 전송한다. R은 먼저 $\mathbf{R}_\theta \mathbf{Y}_{R2} \boldsymbol{\beta}$ 를 전송하고, 다음으로 $\mathbf{Y}_{R1} \boldsymbol{\beta}$ 를 전송한다. 여기서 $\mathbf{R}_\theta = \mathbf{A}(e^{j\theta}, 0)$ 는 QS-STBC에서 정상점 회전을 위한 행렬로서 θ 는 회전각을 나타낸다 [9]. 이 논문에서는, quadrature phase shift keying (QPSK) 변조가 사용되기 때문에, $\theta = \pi/4$ 로 한다. S의 전송 과정도 R과 유사하다. 먼저 \mathbf{X}_1 를 전송하고 $\mathbf{R}_\theta \mathbf{X}_2$ 를 나중에 전송한다. 이는 S와 R에서 보낸 신

호가 DSTC를 형성함을 의미한다. Phase 2에서 D의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{D2,1} &= \sqrt{P_3} \mathbf{X}_1 \mathbf{H}_1 + \mathbf{R}_\theta \mathbf{Y}_{R2} \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_2 + \mathbf{N}_{2,1} \\ &= \sqrt{P_3} \mathbf{X}_1 \mathbf{H}_1 + \sqrt{P_1} \mathbf{R}_\theta \mathbf{X}_2 \mathbf{F} + \mathbf{N}_{e1} \\ \mathbf{Y}_{D2,2} &= \sqrt{P_3} \mathbf{R}_\theta \mathbf{X}_2 \mathbf{H}_1 + \mathbf{Y}_{R1} \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_2 + \mathbf{N}_{2,2} \\ &= \sqrt{P_3} \mathbf{R}_\theta \mathbf{X}_2 \mathbf{H}_1 + \sqrt{P_1} \mathbf{X}_1 \mathbf{F} + \mathbf{N}_{e2} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 P_2 와 P_3 는 각각 R과 S의 각 안테나에서 전송되는 신호의 평균 전력을 의미한다. $\mathbf{N}_{2,1}$ 와 $\mathbf{N}_{2,2}$ 는 2×2 AWGN 행렬들이고, $\mathbf{F} = \mathbf{G} \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_2$, $\mathbf{N}_{e1} = \mathbf{R}_\theta \mathbf{W}_2 \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_2 + \mathbf{N}_{2,1}$, 그리고 $\mathbf{N}_{e2} = \mathbf{W}_1 \boldsymbol{\beta} \mathbf{H}_2 + \mathbf{N}_{2,2}$ 을 만족한다. 식 (7)로부터, 두 번째 phase에서 QO-STBC가 D로 전송됨을 확인할 수 있다.

NT-AF 프로토콜의 입출력 관계는 다음과 같은 벡터 모델로 바꿔 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} cv(\mathbf{Y}_{D1,1}) \\ cv(\mathbf{Y}_{D1,2}) \\ cv(\mathbf{Y}_{D2,1}) \\ cv(\mathbf{Y}_{D2,2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{P_1} \mathbf{H}'_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sqrt{P_1} \mathbf{H}'_1 \\ \sqrt{P_3} \mathbf{H}'_1 & \sqrt{P_1} e^{j\theta} \mathbf{F}' \\ \sqrt{P_1} \mathbf{F}' & \sqrt{P_3} e^{j\theta} \mathbf{H}'_1 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} cv(\mathbf{N}_{1,1}) \\ cv(\mathbf{N}_{1,2}) \\ cv(\mathbf{N}_{e1}) \\ cv(\mathbf{N}_{e2}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ 이다.

D. NT-SDF 기법

이 절에서는 NT-SDF에 대해 설명한다. NT-AF 프로토콜과 유사하게, phase 1에서 S는 \mathbf{X}_1 와 \mathbf{X}_2 를 전송하고, phase 2에서의 전송은 QO-STBC를 이용한다. Phase 1에서의 과정은 NT-AF와 같기 때문에 R과 D에서의 수신 신호는 식 (6)과 같다.

3-B절의 OT-SDF 프로토콜과 유사하게 R은 S로부터 수신한 신호를 다음과 같이 연관정 한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \gamma(\mathbf{G}')^H cv(\mathbf{Y}_{R1}), \quad \begin{bmatrix} \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \end{bmatrix} = \gamma(\mathbf{G}')^H cv(\mathbf{Y}_{R2})$$

여기서 γ 은 식 (4)에서와 같은 증폭 이득이다. NT-AF와 유사하게 phase 2에서 QO-STBC를 형성하기 위해, R은 $\mathbf{R}_\theta \mathbf{A}(\hat{x}_3, \hat{x}_4)$ 과 $\mathbf{A}(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$ 를 차례로 전송한다. 마찬가지로, S는 \mathbf{X}_1 과 $\mathbf{R}_\theta \mathbf{X}_2$ 를 차례로 전송한다.

NT-SDF 프로토콜의 벡터 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} cv(\mathbf{Y}_{D1,1}) \\ cv(\mathbf{Y}_{D1,2}) \\ cv(\mathbf{Y}_{D2,1}) \\ cv(\mathbf{Y}_{D2,2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{P_1} \mathbf{H}'_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sqrt{P_1} \mathbf{H}'_1 \\ \sqrt{P_3} \mathbf{H}'_1 & a e^{j\theta} \mathbf{H}'_2 \\ a \mathbf{H}'_2 & \sqrt{P_3} e^{j\theta} \mathbf{H}'_1 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} cv(\mathbf{N}_{1,1}) \\ cv(\mathbf{N}_{1,2}) \\ cv(\mathbf{N}_{e1}) \\ cv(\mathbf{N}_{e2}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 a 는 식 (5)에서와 같고, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$, $cv(\mathbf{N}_{e1}) = \gamma e^{j\theta} \mathbf{H}'_2 (\mathbf{G}')^H cv(\mathbf{W}_2) + cv(\mathbf{N}_{2,1})$, 그리고 $cv(\mathbf{N}_{e2}) = \gamma \mathbf{H}'_2 (\mathbf{G}')^H cv(\mathbf{W}_1) + cv(\mathbf{N}_{2,2})$ 를 만족한다.

4. 최대 우도 복호기

이 장에서는 이전 절에서 제시된 각 기법들에 대한 ML 복호기를 유도한다. 이를 위해 식 (3), (5), (8), (9)는 다음과 같은 입출력 관계로 해석될 수 있다.

$$\mathbf{y}_e = \mathbf{H}_e \mathbf{x} + \mathbf{n}_e \quad (10)$$

R에서의 잡음은 D의 수신 안테나들로 모두 전송이 되기 때문에, \mathbf{n}_e 의 각 항들은 상관되어져 있다. $\mathbf{K}_{\mathbf{n}_e}$ 를 \mathbf{n}_e 의 공분산 행렬이라 하면, 식 (10)의 ML 복호기는 다음과 같이 유도된다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} [(\mathbf{y}_e - \mathbf{H}_e \mathbf{x})^H \mathbf{K}_{\mathbf{n}_e}^{-1} (\mathbf{y}_e - \mathbf{H}_e \mathbf{x})] \quad (11)$$

위 식으로부터 $\mathbf{K}_{\mathbf{n}_e}$ 를 유도하고, 각 기법에 대해 식 (11)의 각 항을 계산해야 한다. 이를 위해 다음과 같은 Alamouti 연산에 대한 성질을 살펴본다.

성질: Alamouti 연산의 성질은 다음과 같다.

- 1) $\mathbf{A}^H(a, b) = \mathbf{A}(a^*, -b)$
- 2) $\mathbf{A}(a, b) + \mathbf{A}(c, d) = \mathbf{A}(a + c, b + d)$
- 3) $\mathbf{A}(a, b) \cdot \mathbf{A}(c, d) = \mathbf{A}(ac - bd^*, ad + bc^*)$
- 4) $\mathbf{A}^H(a, b) \cdot \mathbf{A}(a, b) = \mathbf{A}(a, b) \cdot \mathbf{A}^H(a, b) = \mathbf{A}(|a|^2 + |b|^2, 0) = (|a|^2 + |b|^2) \mathbf{I}_2$. \square

먼저 OT 기법이 사용될 때의 AF와 SDF 프로토콜에 대한 $cv(\mathbf{N})$ 의 공분산을 유도한다. AF 프로토콜에 대한 식 (3)에서의 $cv(\mathbf{N})$ 의 공분산은 다음과 같이 유도된다.

$$\mathbf{K}_{cv(\mathbf{N})} = E(cv(\mathbf{N})(cv(\mathbf{N}))^H) = \begin{bmatrix} p\mathbf{I}_2 & \mathbf{A}(q, 0) \\ \mathbf{A}(q^*, 0) & r\mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 각 인자는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p &= \beta_1^2 |h_2^{11}|^2 + \beta_2^2 |h_2^{21}|^2 + 1 \\ q &= \beta_1^2 h_2^{11} (h_2^{12})^* + \beta_2^2 h_2^{21} (h_2^{22})^* \\ r &= \beta_1^2 |h_2^{12}|^2 + \beta_2^2 |h_2^{22}|^2 + 1 \end{aligned}$$

OT-SDF 프로토콜에 대한 $cv(\mathbf{N})$ 의 공분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{cv(\mathbf{N})} &= E(cv(\mathbf{N})(cv(\mathbf{N}))^H) = \frac{P_2}{1 + P_1 \|\mathbf{G}\|^2} \mathbf{H}'_2 (\mathbf{H}'_2)^H + \mathbf{I}_4 \\ &= \begin{bmatrix} x\mathbf{I}_2 & \mathbf{A}(u, v) \\ \mathbf{A}(u^*, -v) & y\mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \quad (13) \end{aligned}$$

식 (11)의 $\mathbf{y}_e^H \mathbf{K}_{\mathbf{n}_e}^{-1} \mathbf{H}_e$ 는 OT와 NT에 대해 $[\eta_1 \ \eta_2]$ 와 $[\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3 \ \eta_4]$ 라 하자.

식 (3)과 (12), 그리고 Alamouti 연산의 성질들을 이용하면, 심볼간 복호가 가능한 OT-AF 프로토콜의 ML 복호기를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tilde{x}_i = \arg \min_{x_i} [(P_1 \|\mathbf{H}_1\|^2 + t_a) |x_i|^2 - 2\Re\{\eta_i x_i\}]$$

여기서 $i = 1, 2$ 에 대해 $t_a = P_1 s_a / (pr - |q|^2)$ 이고

$$\begin{aligned} s_a &= (|f_{12}|^2 + |f_{22}|^2)p + (|f_{11}|^2 + |f_{21}|^2)r \\ &\quad - 2\Re\{(f_{11}^* f_{12} + f_{21}^* f_{22})q\} \end{aligned}$$

이다. QPSK 변조는 모든 정상점에 대해 $|x_i| = 1$ 이므로 ML 복호기는 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\tilde{x}_i = \arg \max_{x_i} [\Re\{\eta_i x_i\}]$$

OT-SDF 프로토콜의 경우도 심볼간 복호가 가능한 ML 복호기는 다음과 같이 유도된다.

$$\tilde{x}_i = \arg \min_{x_i} [(P_1 \|\mathbf{H}_1\|^2 + t_s) |x_i|^2 - 2\Re\{\eta_i x_i\}]$$

여기서 $i = 1, 2$ 에 대해, $t_s = a^2 s_s / (xy - |u|^2 - |v|^2)$,

$$\begin{aligned} s_s &= (|h_2^{12}|^2 + |h_2^{22}|^2)x + (|h_2^{11}|^2 + |h_2^{21}|^2)y \\ &\quad - 2\Re\{((h_2^{11})^* h_2^{12} + (h_2^{21})^* h_2^{22})u \\ &\quad + ((h_2^{11})^* (h_2^{22})^* - (h_2^{12})^* (h_2^{21})^*)v\} \end{aligned}$$

이다. QPSK 변조에 대한 ML 복호기는 다음과 같다.

$$\tilde{x}_i = \arg \max_{x_i} [\Re\{\eta_i x_i\}]$$

NT-AF에 대한, 쌍 심볼 ML 복호기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i+2}) &= \arg \min_{x_i, x_{i+2}} [\alpha_a (|x_i|^2 + |x_{i+2}|^2) \\ &\quad + 2\Re\{\beta_a^* x_i x_{i+2}^* - \eta_i x_i - \eta_{i+2} x_{i+2}\}] \end{aligned}$$

여기서 $i = 1, 2$ 에 대해 각 인자들은 다음과 같다.

$$\alpha_a = P_1 \|\mathbf{H}_1\|^2 + (P_3 s_{a1} + P_1 s_{a2}) / (pr - |q|^2)$$

$$\beta_a = \sqrt{P_1 P_3} e^{j\theta} z_a$$

$$\begin{aligned} s_{a1} &= (|h_1^{12}|^2 + |h_1^{22}|^2)p + (|h_1^{11}|^2 + |h_1^{21}|^2)r \\ &\quad - 2\Re\{((h_1^{11})^* h_1^{12} + (h_1^{21})^* h_1^{22})q\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{a2} &= (|f_{12}|^2 + |f_{22}|^2)p + (|f_{11}|^2 + |f_{21}|^2)r \\ &\quad - 2\Re\{(f_{11}^* f_{12} + f_{21}^* f_{22})q\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_a &= \frac{2r\Re\{(h_1^{11})^* f_{11} + h_1^{21} f_{21}^*\} + 2p\Re\{(h_1^{12})^* f_{12} + h_1^{22} f_{22}^*\}}{pr - |q|^2} + \frac{2p\Re\{(h_1^{12})^* f_{12} + h_1^{22} f_{22}^*\}}{pr - |q|^2} \\ &\quad - \frac{2\Re\{((h_1^{11})^* f_{12} + (h_1^{21})^* f_{22} + h_1^{12} f_{11}^* + h_1^{22} f_{21}^*)q\}}{pr - |q|^2} \end{aligned}$$

QPSK 변조에 대한 ML 복호기는 다음과 같다.

$$(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i+2}) = \arg \min_{x_i, x_{i+2}} [\Re\{\beta_a^* x_i x_{i+2}^* - \eta_i x_i - \eta_{i+2} x_{i+2}\}]$$

NT-AF와 유사하게, NT-SDF에 대한 ML 복호기는 다음과 같이 유도된다.

$$(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i+2}) = \arg \min_{x_i, x_{i+2}} [\alpha_s (|x_i|^2 + |x_{i+2}|^2)$$

$$+ 2\Re\{\beta_s^* x_i x_{i+2}^* - \eta_i x_i - \eta_{i+2} x_{i+2}\}]$$

여기서 $i = 1, 2$ 에 대해 각 인자들은 다음과 같다.

$$\alpha_s = P_1 \|\mathbf{H}_1\|^2 + (P_3 s_{s1} + a^2 s_{s2}) / (xy - |u|^2 - |v|^2)$$

$$\beta_s = a \sqrt{P_3} e^{j\theta} z_s$$

$$s_{s1} = (|h_1^{12}|^2 + |h_1^{22}|^2)x + (|h_1^{11}|^2 + |h_1^{21}|^2)y$$

$$\begin{aligned} &\quad - 2\Re\{((h_1^{11})^* h_1^{12} + (h_1^{21})^* h_1^{22})u + ((h_1^{11})^* (h_1^{21})^* \\ &\quad - (h_1^{12})^* (h_1^{21})^*)v\} \end{aligned}$$

$$s_{s2} = (|h_2^{12}|^2 + |h_2^{22}|^2)x + (|h_2^{11}|^2 + |h_2^{21}|^2)y$$

$$\begin{aligned} &\quad - 2\Re\{((h_2^{11})^* h_2^{12} + (h_2^{21})^* h_2^{22})u + ((h_2^{11})^* (h_2^{21})^* \\ &\quad - (h_2^{12})^* (h_2^{21})^*)v\} \end{aligned}$$

$$z_s = \frac{2y\Re\{(h_1^{11})^* h_2^{11} + h_1^{21} (h_2^{21})^*\}}{xy - |u|^2 - |v|^2}$$

$$+ \frac{2x\Re\{(h_1^{12})^* h_2^{12} + h_1^{22} (h_2^{22})^*\}}{xy - |u|^2 - |v|^2}$$

$$- \frac{2\Re\{((h_1^{11})^* h_2^{12} + (h_1^{21})^* h_2^{22})u\}}{xy - |u|^2 - |v|^2}$$

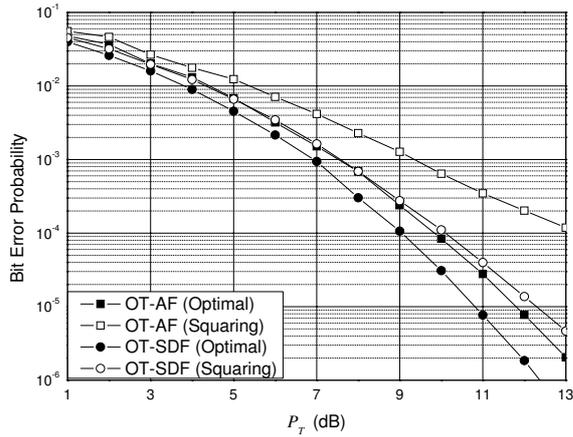


그림 1. 다양한 OT 기법에 대한 성능 비교.

$$\begin{aligned}
 & - \frac{2\Re \{ (h_1^{12}(h_2^{11})^* + h_1^{22}(h_2^{21})^*)u \}}{xy - |u|^2 - |v|^2} \\
 & + \frac{2\Re \{ ((h_1^{11})^*(h_2^{22})^* - (h_1^{21})^*(h_2^{12})^*)v \}}{xy - |u|^2 - |v|^2} \\
 & + \frac{2\Re \{ ((h_1^{22})^*(h_2^{11})^* - (h_1^{12})^*(h_2^{21})^*)v \}}{xy - |u|^2 - |v|^2}
 \end{aligned}$$

QPSK에 대한 ML 복호기는 다음과 같다.

$$(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i+2}) = \arg \min_{x_i, x_{i+2}} [\Re \{ \beta_s^* x_i x_{i+2}^* - \eta_i x_i - \eta_{i+2} x_{i+2} \}]$$

5. 모의실험 결과

모의실험에서 모든 채널은 준정지 Rayleigh 페이딩을 겪고 QPSK 변조가 사용된다고 가정한다. 또한 전송 심볼의 평균 전력은 1이라 가정한다. S와 R 사이의 전력은 동등하게 분배된다. 즉, OT의 경우, $P_1 = P_2$ 이고 $P_T = P_1 + P_2$ 이다. NT의 경우는 $P_1 = P_2 + P_3$ 와 $P_2 = P_3$ 이고, $P_T = P_1 + P_2 + P_3$ 이다. 여기서 P_T 는 전체 송신 전력을 의미한다.

그림 1은 OT-AF와 OT-SDF 프로토콜의 성능을 비교한 것이다. “Optimal”은 D가 4장에서 유도된 최적의 ML 복호기가 사용됨을 의미하고 “Squaring”은 D에서 [6]에서 사용된 squaring 방법이 사용된다. 모의실험 결과로부터 제안된 SDF 프로토콜이 AF 프로토콜보다 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다. 또한 유도된 ML 복호기는 squaring 복호기와 같은 복호 복잡도를 가지면서도 보다 좋은 성능을 얻을 수 있다.

NT를 위한 성능 향상 기법으로 SAS를 고려한다. [4]에서 SAS는 DF 프로토콜에 적용되었지만 AF나 SDF 프로토콜에도 적용이 가능하다. 그림 2는 NT-AF와 NT-SDF 프로토콜의 성능을 나타낸 것이다. SDF 프로토콜은 AF 프로토콜보다 우수한 성능을 보임은 물론, SAS 기법을 사용하여 협력 통신망의 다이버시티 이득 또한 향상시킬 수 있다.

6. 결론

이 논문에서는 R에서 수신 신호를 연관정한 후 부호화하여 재전송하는 SDF 프로토콜을 제안하였다. 또한

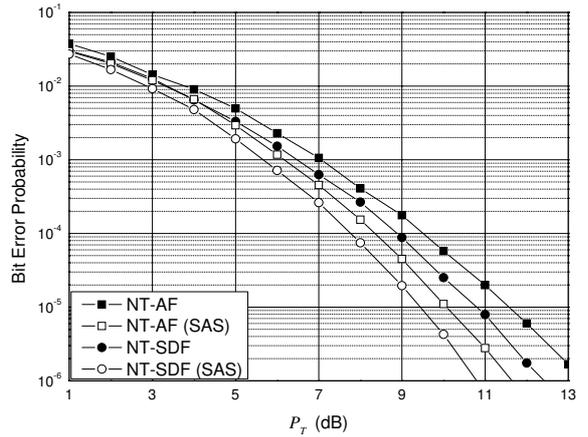


그림 2. 다양한 NT 기법에 대한 성능 비교.

S와 R 사이의 분산 시공간 부호를 설계하고, D에서 잡음 간의 상관 관계가 존재할 때, AF와 SDF 프로토콜을 사용했을 경우, 각각의 ML 복호기를 유도하였다. 또한 OT의 경우에는 심볼간 복호가 가능하고, NT의 경우, 쌍심볼간의 복호가 가능한 간단한 복호기를 유도했다. 모의실험 결과로부터 제안된 SDF 프로토콜은 AF 프로토콜보다 우수한 비트오율을 가짐을 보였다.

7. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2008-F-007-02, 3차원 환경에서의 지능형 무선 통신 시스템]

8. 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] A. Nosratinia and A. Hedayat, “Cooperative communication in wireless networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, Oct. 2004.
- [3] C. Hucher, G. R. Rekaya, and J. Belfiore, “AF and DF protocols based on Alamouti ST code,” in *Proc. IEEE Int. Symp. On Inf. Theory (ISIT 2007)*, Jun. 2007, pp. 1526–1530.
- [4] X. Jin, J.-D. Yang, J.-S. No, and D.-J. Shin, “Distributed space-time coded non-orthogonal DF protocol with source antenna switching,” submitted to *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Aug. 2008.
- [5] J. Vazifehdan and H. Shafiee, “Cooperative diversity in space-time coded wireless networks,” in *Proc. ICCS 2004*, Sep. 2004, pp. 215–219.
- [6] I.-H. Lee and D.-W. Kim, “Decouple-and-forward relaying for dual-hop Alamouti transmissions,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 2, pp. 97–99, Feb. 2008.
- [7] S. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Aug. 1998.
- [8] O. Tirkkonen, A. Boariu, and A. Hottinen, “Minimal nonorthogonality rate 1 space-time block code for 3+ Tx antennas,” in *Proc. IEEE 6th Int. Symp. On Spread-Spectrum Tech. & Appl. (ISSSTA 2000)*, Sep. 2000, pp. 429–432.
- [9] W. Su and X. Xia, “Signal constellations for quasi-orthogonal space-time block codes with full diversity,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 10, pp. 2331–2347, Oct. 2004.