

피드백 오류 채널에서 코드북 기반 MISO 시스템의 최적에 빔포밍 벡터 인덱싱 기법

정회원 이진희*, 종신회원 고영채**

Optimum Beamforming Vector Indexing Scheme for Codebook based MISO System over Feedback Error Channel

Jinhee Lee* *Regular Member*, Young-Chai Ko** *Lifelong Member*

요약

전송 빔포밍은 다수의 송수신 안테나 기법에서 다이버시티 이득을 최대로 얻을 수 있는 간단한 방법으로 널리 알려져 있다. 그러나 이와 같은 다이버시티 이득을 얻기 위해서는 송신단과 수신단 모두 채널 상태에 관한 정보를 완벽하게 알고 있어야 하고 이는 피드백이 한정되어 있는 실제 시스템에서 비현실적이다. 이와 같은 이유로 현실적인 시스템에서는 송수신단이 모두 알고 있는 코드북(codebook)에서 수신단 출력에서의 신호 대 잡음비(SNR)가 최댓값을 갖는 전송 빔포밍 벡터를 선택하여 이의 인덱스만 수신단에서 송신단으로 피드백 해주는 코드북을 기반으로 하는 피드백 기법을 사용한다. 본 논문에서 우리는 코드북 기반의 피드백을 사용하는 다중 송신 안테나 시스템(MISO)에서 피드백 채널에 에러가 존재하였을 경우에 대한 성능을 평균 비트 에러(BER) 측면에서 수식적으로 분석하였으며, 이 수식을 이용하여 주어진 코드북에 대하여 최적의 빔포밍 벡터 인덱싱 기법을 제안하였다.

Key Words : Transmit Beamforming, Multi-input Single-output, Feedback Error Channel, Codebook, Indexing

ABSTRACT

Transmit beamforming is simple method to achieve the full diversity gain that is available in multiple antenna (MIMO) wireless systems. Unfortunately, the prior condition to achieve this gain requires perfect channel knowledge at both transmitter and receiver, which is impractical on account of limited feedback link. Therefore, for the practical system, codebook based feedback scheme is often employed, where the beamforming vector is selected from the codebook to maximize the output signal-to-noise ratio (SNR) at receiver, and the receiver only sends back the index of the best beamforming vector to the transmitter. In this paper we derive analytical expression of average bit error rate (BER) for the codebook based transmit beamforming MISO system over the feedback error channel. Using this analytical result, we present optimum codebook indexing scheme to improve the performance of this system. From some selected numerical examples we show that our proposed codebook indexing scheme can provide nonnegligible performance improvements in terms of average BER over the severe feedback error channel.

I. 서론

송수신 다중 안테나(MIMO) 시스템에서 전송 빔

※ This research was supported by the Seoul R&BD program (WR080951)

* 고려대학교 전자컴퓨터학과 (locojini@korea.ac.kr), ** 고려대학교 전기전자학과 (koyc@korea.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-08-354, 접수일자 : 2009년 8월 17일, 최종논문접수일자 : 2009년 11월 16일

포밍은 페이딩 채널 환경 하에 효율적인 성능을 얻을 수 있는 방법으로 알려져 있다. 전송 빔포밍 MIMO 시스템은 수신단에서 자신의 채널 상태에 관한 정보(CSI)를 송신단으로 피드백 해주며 이 정보를 바탕으로 송신단에서 수신 SNR 값이 최대가 되는 전송 가중치 벡터(transmit weight vector)를 구하여 각 안테나에 가중치(weight)만큼의 전력을 할당하여 송신 신호를 전송하고, 수신단에서는 수신 SNR 값이 최대가 되도록 하는 수신 가중치 벡터를 구하여 수신 신호에 곱해준다^{[1],[2]}.

비록 전송 빔포밍 방법을 통해 수신 SNR의 최댓값을 얻을 수 있지만, 이와 같은 결과를 얻기 위해선 우선적으로 송수신 단이 채널에 관한 정보를 완벽하게 알고 있어야 한다. 그러나, 현실적인 시스템에서 피드백 비트 수는 제한이 있으므로 송신단에서 완벽한 CSI를 안다는 것은 현실적이지 않다. 이러한 이유로 현실적인 시스템에서는 송수신단이 모두 알고 있는 코드북을 바탕으로 수신단에서 수신 SNR 값을 최대로 만드는 가중치 벡터를 코드북에서 찾아 이 벡터의 인덱스만을 송신단으로 피드백 해주는 코드북 기반의 피드백 기법을 널리 사용한다^[3]. [3]에서는 피드백 채널이 노이즈와 지연(delay)가 없다고 가정하였다.

피드백의 제한이 있는 전송 빔포밍 기법은 최초 [4]에서 양자화된(quantized) 전송 빔포밍과 [5]에서 양자화된 동일 이득 전송 빔포밍으로 제안되었다. [6]과 [7]에서는 그라스마니안 라인 패킹(Grassmanian line packing)을 이용하여 전송 빔포밍 벡터들 사이의 상관관계(correlation)의 최댓값을 최소화시킴으로써 피드백 제한이 있는 전송 빔포밍에 전송불능(outage) 확률의 보편적인 하한(universal lower bound) 값을 얻을 수 있는 코드북을 만드는 기법을 소개하였다. 반면에 [8]과 [9]에서는 랜덤 벡터 양자화(random vector quantization)를 이용하여 간단한 코드북 디자인 기법을 제안하였다. Au-Yeung 등은 [10]에서 고정된 코드북 기반의 다중 전송 단일 수신(MISO) 시스템에서 전송 안테나의 채널들 사이에 상관관계가 있을 때, 평균 BER, 전송 불능 확률, 에르고드적(ergodic) 캐패시티(capacity)를 수식적으로 분석하였다. [10]에서 크기가 N 인 코드북을 기반으로 하는 전송 빔포밍 시스템의 수신 SNR은 N 개의 상관(correlate)된 다이버시티(diversity) 경로의 출력 SNR 중 가장 큰 값을 고르는 것과 같다는 것을 간단한 변환을 통하여 보여주었다.

비록 좋은 성능을 보이는 다양한 코드북 디자인

기법이 존재하지만 모든 기법들이 피드백 에러가 없다는 가정 하에 연구되었고, 이로 인해 피드백 에러가 존재할 경우 기존의 기법들의 성능이 에러 확률에 따라 떨어진다. 본 논문에서는 코드북 기반의 전송 빔포밍 MISO 시스템에서 피드백 에러가 존재할 경우 코드북의 빔포밍 벡터의 인덱싱(indexing)에 따른 평균 BER 성능을 [10]에 주어진 결과를 이용하여 분석하였고 분석 결과를 이용하여 최적의 인덱싱 기법을 제안하였다.

본 논문은 서론에 이어 2절에서 각 채널이 레일리(Rayleigh) 페이딩인 전송 빔포밍 MISO 시스템의 채널 모델에 대해서 기술하였고, 제 3절에서는 시스템의 피드백 채널에 에러가 있을 경우에 평균 BER 성능을 수식적으로 분석하였다. 제 4절에서는 성능 분석 결과를 이용하여 주어진 코드북에 대한 최적의 빔포밍 벡터 인덱싱 기법에 대하여 기술하였고 이 기법에 따른 시뮬레이션 결과를 보였으며, 제 5절에서 결론은 맺었다.

II. 시스템 모델 및 표기법

본 논문에서는 그림 1과 같이 전송 안테나가 N_t 개이고 수신 안테나가 1개인 MISO 시스템을 고려하였다. 이와 같은 경우 수신 안테나에서 수신된 채널 출력 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r = \sqrt{P_t} \mathbf{h} \mathbf{w}_{t,i} s + n, \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{w}_{t,i}$ 는 전송단에서 피드백 정보를 바탕으로 길이가 N 인 코드북 행렬 $\mathbf{W}_t = [\mathbf{w}_{t,1}, \mathbf{w}_{t,2}, \dots, \mathbf{w}_{t,N}]$ 에서 선택한 $N_t \times 1$ 빔포밍 벡터이고, s 는 전송 심

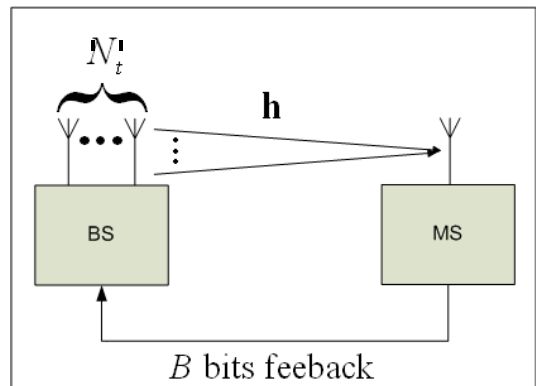


그림 1. 코드북 기반의 MISO 시스템 모델

별(symbol)을 나타내며, $w_{t,i}$ 와 s 는 단일 파워를 ($|s|^2 = w_{t,i} = 1$) 갖는다. 또한, P_t 는 총 전송 파워이고, n 은 파워가 0이고 분산(variance)이 σ_n^2 인 AWGN (additive white Gaussian noise)이며, h 는 공분산(covariance)이 Σ 인 ($E(h^H h) = \Sigma$) 복소 가우시안(Gaussian) $1 \times N_t$ 벡터이다. 여기서 $(\cdot)^H$ 는 허미시안(Hermitian) 연산자를, $E(\cdot)$ 는 평균 연산자를 나타낸다. 수신단은 채널 가간섭성(coherence) 시간에 의해 결정되는 특정 시기마다 전송단으로 원하는 빔포밍 벡터의 인덱스 i 를 $B(=\log_2 N)$ 개의 비트를 이용하여 피드백 해준다. 이와 같은 경우 출력 SNR은 다음과 같이 나타낼 수 있다^{[11],[2]}.

$$\gamma_i = \gamma_0 |h w_{t,i}|^2, \quad (2)$$

여기서 γ_0 는 전송 SNR 값이고 $\gamma_0 = P_t/\sigma_n^2$ 로 나타낼 수 있다. 수신단에서 빔포밍 벡터를 선택할 때 출력 SNR 값이 최대가 되도록 선택하므로 최적화된 출력 SNR 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_{\max} &= \max\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N\} \\ &= \gamma_0 \max_{1 \leq l \leq N} \{|h w_{t,l}|^2\} \end{aligned} \quad (3)$$

최대 출력 SNR 값의 CDF(cumulative distribution function)와 PDF(probability density function)는 다음과 같이 표현할 수 있다 [10, 식 7과 8].

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{\max}}(\gamma) &= \frac{1}{(2\pi)^N} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t_1, \dots, t_N) \\ &\quad \times \prod_{k=1}^N \left(\frac{1 - e^{-j t_k}}{j t_k} \right) dt_1, \dots, dt_N \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{\max}}(\gamma) &= \frac{1}{(2\pi)^N} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t_1, \dots, t_N) \prod_{k=1}^N (j t_k)^{-1} \\ &\quad \times \sum_{b_1 + \dots + b_N = l} (-1)^{l+1} \frac{j(b_1 t_1 + \dots + b_N t_N)}{\exp(j\gamma(b_1 t_1 + \dots + b_N t_N))} \\ &\quad dt_1, \dots, dt_N, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\phi(t_1, \dots, t_N) = \det(I - S\Gamma)$, $j = \sqrt{-1}$, I 는 단위 행렬(identity matrix), $S = \text{diag}\{j t_1, \dots, j t_N\}$ 는 대각선 행렬, $\Gamma = \gamma_0 W_t^H \Sigma_h W_t$, b_1, \dots, b_N 은 0 또는 1의 값을 갖는 이진 변수를 나타낸다.

III. 피드백 에러가 존재하는 전송 빔포밍 시스템의 평균 BER

앞선 장에서 설명한 바와 같이 수신단에서는 출력 SNR 값이 최대가 되는 빔포밍 벡터를 코드북에서 선택하여 이의 인덱스를 전송단으로 피드백 해준다. 만약 피드백 채널에 에러가 생길 경우 전송단은 잘못된 빔포밍 벡터의 인덱스를 수신하게 된다.

특정 시간에 최적의 빔포밍 벡터를 $w_{t,i}$ 라고 가정하고 ($i = \arg \max_{l=1, \dots, N} |h w_{t,l}|^2$), 이 벡터의 인덱스가 피드백 채널의 에러로 인하여 $k(=1, \dots, B)$ 비트 에러가 났을 때 전송단에서 피드백 받을 수 있는 빔포밍 벡터의 집합을 C_i^k , C_i^k 의 l 번째 성분 벡터를 $w_{i,l}^k$ 라고 가정하자. 이와 같은 경우 C_i^k 의 성분 벡터에 수는 B 비트에서 k 개의 비트를 고르는 조합의 수와 같고 ${}_B C_k$ 로 나타낼 수 있다. 예를 들어 피드백 비트 수가 3개일 경우 그림 2과 같이 빔포밍 벡터의 인덱스는 0 ~ 7까지 주어진다. 그림 2에서 실선은 두 벡터 사이에 인덱스가 1비트 에러가 날 경우에만 그려져 있다. 이와 같은 경우 w_0 의 1비트 에러 벡터의 집합은 $C_1^1 = \{w_1, w_2, w_3\}$ 이 된다.

만약 수신단에서 선택한 최적의 빔포밍 벡터가 $w_{t,i}$ 이고 피드백 채널에서 k 비트 에러로 인해 전송단에서 $w_{i,l}^k$ 을 빔포밍 벡터로 사용하였을 경우, 이때의 출력 SNR 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

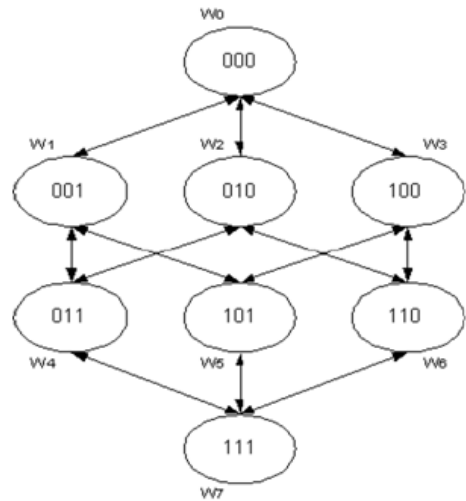


그림 2. 피드백 비트가 3개일 경우의 예시

$$\gamma = \gamma_0 |hw_{t,i}^k|^2, \quad (6)$$

피드백 채널에 오류가 존재할 경우의 출력 SNR에 PDF를 구하기가 힘들기 때문에 우리는 근사적(asymtotic)인 표현을 사용하여 PDF를 구하였다. 먼저 채널의 행벡터 h^H 를 최적의 빔포밍 벡터 $w_{t,i}$ 에 투영(project)시키면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|hw_{t,i}|w_{t,i}, \quad (7)$$

위의 벡터를 피드백 채널에 k 비트 오류로 인해 전송단에서 사용하는 빔포밍 벡터 $w_{t,i}^k$ 에 투영시키면 그림 3에서 볼 수 있듯이 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|hw_{t,i}|w_{t,i}^H w_{t,i}^k |w_{t,i}^k, \quad (8)$$

만약 N 값이 매우 크다면 최적의 빔포밍 벡터는 채널의 단위 벡터와의 상관관계가 1에 가까운 값을 가지게 되고, N 값이 계속 증가한다면 피드백 채널에 k 비트 오류가 났을 때의 출력 SNR 값은 다음과 같이 수렴하게 된다.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \gamma_0 |hw_{t,i}^k|^2 = \gamma_{\max} |w_{t,i}^H w_{t,i}^k|^2, \quad (9)$$

여기서 $\gamma_{\max} = \gamma_0 |hw_{t,i}|^2$ 이다. 주어진 SNR 값 γ 에 대한 특정 모듈레이션 기법의 오류에 조건부 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_e(\gamma) = aQ(\sqrt{2c\gamma}), \quad (10)$$

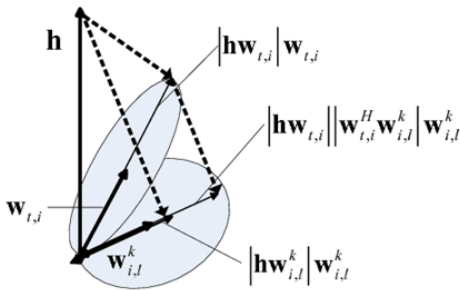


그림 3. 피드백 비트가 3개일 경우의 예시

여기서 $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 이고 a 와 c 는 모듈레이션 기법에 따라 정해지는 고정된 값이다. 위 식과 출력 SNR 값의 PDF $f_\gamma(\gamma)$ 를 이용하여 평균 BER P_e 를 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_e = \int_0^\infty P_e(\gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma = \int_0^\infty aQ(\sqrt{2c\gamma}) f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (11)$$

만약 피드백 오류가 없다고 가정했을 때 평균 BER은 다음과 같이 표현할 수 있다 [10, 식 (13)].

$$P_e = \frac{a}{2(2\pi)^N} \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty \det(I - SF)^{-1} \prod_{m=1}^N (jt_m)^{-1} \times \left(1 + \sum_{m=1}^N (-1)^m \sum_{b_1 + \dots + b_N = m} \sqrt{\frac{c}{c + jb_T}} \right) dt_1 \dots dt_N, \quad (12)$$

여기서 $b_T = b_1 t_1 + \dots + b_N t_N$ 이다.

피드백 오류가 일어날 확률을 p_a 라고 하고 k 비트 오류가 일어날 확률을 $p_{\alpha,k}$ 라고 한다면 $\left(p_\alpha = \sum_{k=1}^B p_{\alpha,k} \right)$, 피드백 오류가 존재할 때 수신단에서 $\gamma (= \gamma_0 |hw_{t,i}|^2)$ 에 대하여 오류가 일어날 조건부 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_e(\gamma) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^B \sum_{l=1}^{\mathcal{C}_i^k} a p_{\alpha,k} \Pr\{w_{t,i} \rightarrow w_{t,i}^k | \mathcal{C}_i^k\} \Pr\{w_{t,i} | \gamma\} \times Q\left(\sqrt{2c\gamma_0 |hw_{t,i}^k|^2} + a(1-p_a)Q(\sqrt{2c\gamma})\right), \quad (13)$$

여기서 $\Pr\{w_{t,i} | \gamma\}$ 는 주어진 최대 출력 SNR 값에 대하여 $w_{t,i} (i=1,2,\dots,N)$ 가 빔포밍 벡터로 선택되었을 확률을 뜻하고 이 확률은 모든 빔포밍 벡터가 동일하다. 또한 $\Pr\{w_{t,i} \rightarrow w_{t,i}^k | \mathcal{C}_i^k\}$ 는 $w_{t,i}$ 가 수신단에서 선택한 빔포밍 벡터일 때 k 비트 피드백 오류로 인하여 전송단에서 $w_{t,i}^k$ 를 빔포밍 벡터로 사용할 확률을 뜻하고 이 확률 역시, k 오류 벡터 집합에 속하는 모든 빔포밍 벡터가 동일하다. 만약 N 값이 매우 크다면 (13)식은 아래와 같은 표현할 수 있다.

$$P_e(\gamma) \approx \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^B \sum_{l=1}^{C_k} a p_{a,k} \frac{1}{N_B C_k} Q\left(\sqrt{2c\gamma} |\mathbf{w}_{i,l}^H \mathbf{w}_{i,l}^k|^2\right) + a(1-p_a) Q(\sqrt{2c\gamma}) = P_{e,a}(\gamma), \quad (14)$$

(14) 식을 (11) 식에 넣으면 평균 BER은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_e = \int_0^\infty P_{e,a}(\gamma) f_{\gamma_{\max}}(\gamma) d\gamma = P_{e,1} + P_{e,2}, \quad (15)$$

여기서

$$P_{e,1}(\gamma) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^B \sum_{l=1}^{C_k} a p_{a,k} \frac{1}{N_B C_k} = \int_0^\infty Q\left(\sqrt{2c\gamma} |\mathbf{w}_{i,l}^H \mathbf{w}_{i,l}^k|^2\right) f_{\gamma_{\max}}(\gamma) d\gamma, \quad (16)$$

이고

$$P_{e,2} = (1-p_a) \int_0^\infty a Q(\sqrt{2c\gamma}) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma = \frac{a(1-p_a)}{2(2\pi)^N} \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty \det(I-ST)^{-1} \prod_{m=1}^N (j t_m)^{-1} \times \left(1 + \sum_{m=1}^N (-1)^m \sum_{b_1+\dots+b_N=m} \sqrt{\frac{c}{c+jb_T}}\right) dt_1 \dots dt_N, \quad (17)$$

이다.

(16)식에서 $\alpha_{i,l}^k = |\mathbf{w}_{i,l}^H \mathbf{w}_{i,l}^k|^2$ 라고 할 때 [10]에서 평균 BER을 구하기 위하여 사용한 유도 방식을 이용하여 (16)식을 풀면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{e,1}(\gamma) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^B \sum_{l=1}^{C_k} a p_{a,k} \frac{1}{N_B C_k} \frac{a}{2(2\pi)^N} \times \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty \det(I-ST)^{-1} \prod_{m=1}^N (j t_m)^{-1} \times \left(1 + \sum_{m=1}^N (-1)^m \sum_{b_1+\dots+b_N=m} \sqrt{\frac{\alpha_{i,l}^k}{\alpha_{i,l}^k + j b_T}}\right) dt_1 \dots dt_N, \quad (18)$$

그림 4은 $P_{e,1}$ 값에 대하여 Monte-Carlo 기법을 사용하여 모의실험 한 결과와 우리가 유도한 수식 분석 결과를 $N=2$ 와 $N=4$ 의 경우에 대하여 비교

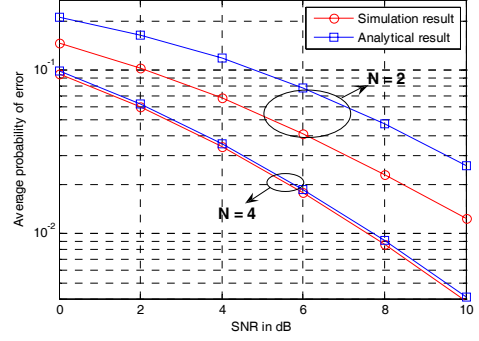


그림 4. $N = 2$ 와 $N = 4$ 의 경우에 $P_{e,1}$ 값에 대한 Monte-Carlo 모의실험 결과와 수식 분석 결과의 비교

한 결과를 보여주었다. 그림 4의 모의실험에서는 결과를 비교하기 용이하게 하기 위하여 피드백 채널이 항상 1비트 오류가 난다고 ($p_{a,1} = 1$)가정하였다.

이외에 모의실험에서 사용한 파라미터는 $N_t = 2$, 모듈레이션은 BPSK, 코드북은 $N=2$ 의 경우에

$$W_t = \begin{pmatrix} -0.2997 - 0.3717j & 0.5433 + 0.6905j \\ -0.8266 - 0.3277j & -0.2294 - 0.3958j \end{pmatrix},$$

$N=4$ 의 경우에

$$W_t = \begin{pmatrix} 1 & 0.5 + 0.5j & 0.5 - 0.5j & 0 \\ 0 & 0.5 - 0.5j & 0.5 + 0.5j & 1 \end{pmatrix} \text{로 가정하였다.}$$

그림에서 볼 수 있듯이 N 이 커지면 커질수록 우리가 유도한 근사적 평균 BER 값이 본래 평균 BER 값에 가까워지는 것을 볼 수 있다.

IV. 주어진 코드북에 대한 최적의 빔포밍 벡터 인덱싱 기법

앞 절에서 유도한 평균 BER 값에 따르면 빔포밍 벡터의 인덱싱을 어떻게 하느냐에 따라서 (15)식의 $P_{e,1}$ 값이 변하게 된다. 그러므로 피드백 오류가 존재하는 시스템은 $P_{e,1}$ 값이 최소가 되도록 빔포밍 인덱싱을 할 때 가장 높은 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 이용하여 우리가 제안하는 빔포밍 벡터 인덱싱 기법은 주어진 코드북의 빔포밍 벡터의 인덱싱을 바꿔가며 $P_{e,1}$ 을 계산하여 가장 낮은 $P_{e,1}$ 값을 갖는 인덱싱을 찾는 것이다.

실제 시스템에서 피드백 채널에 1 비트 오류가

일어날 확률이 1 비트 이상 오류가 일어날 확률보다 상대적으로 큰 값을 가지므로 (14)식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{e,a}(\gamma) \approx \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^B p_{a,1} \frac{a}{NB} Q(\sqrt{2c\gamma\alpha_{i,l}^1}) + a(1-p_{a,1}) Q(\sqrt{2c\gamma}). \quad (19)$$

(18)식을 이용하여 $P_{e,1}$ 을 근사 값으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{e,1} \approx \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^B \frac{ap_{a,1}}{2(2\pi)^{N/2}NB} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \det(I - S\Gamma)^{-1} \times \prod_{m=1}^N (jt_m)^{-1} \left(1 + \sum_{n=1}^N (-1)^N \sum_{b_1+\dots+b_N=n} \sqrt{\frac{c\alpha_{i,l}^1}{c\alpha_{i,l}^1 + jb_T}} \right) dt_1 \dots dt_N. \quad (20)$$

우리는 식 (20)을 통하여 실제 시스템에서는 인덱스가 1 비트 다른 벡터들 사이에 상관관계 ($w_{i,t}^H w_{i,t}^1$)가 시스템의 BER 성능에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

본 절에서는 수식 분석 결과를 이용하여 $P_{e,1}$ 이 가장 높은 빔포밍 벡터 인덱싱을 사용하였을 경우 (optimum case)와 $P_{e,1}$ 이 가장 낮은 빔포밍 벡터 인덱싱을 사용하였을 경우(worst case)에 성능을 서로 비교하였다. 모의실험 파라미터는 $N_t = 2$, 모듈레이션은 QPSK, 코드북은

$$W_t = \begin{pmatrix} 1 & 0.5 + 0.5j & 0.5 - 0.5j & 0 \\ 0 & 0.5 - 0.5j & 0.5 + 0.5j & 1 \end{pmatrix}, \text{ 피드백 오류}$$

확률은 $p_{a,1} = 1$ (그림 5) 또는 $p_{a,k} = 0.1^k$ (그림 6) ($k=1 \sim B$)으로 가정하였다. 그림 5와 6을 비교해 보면 피드백 오류 확률이 증가할수록 최적의 경우와 최악의 경우에 차이가 커진다는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 피드백 오류 확률이 높은 경우 우리가 제안하는 기법에 의해 상당한 성능 향상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 5와 6을 통하여 우리가 제안하는 기법에 의해 피드백 채널의 오류에 영향을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있고 이는 곧 피드백 채널의 전송 전력을 절약할 수 있다는 것과 동일한 의미이다.

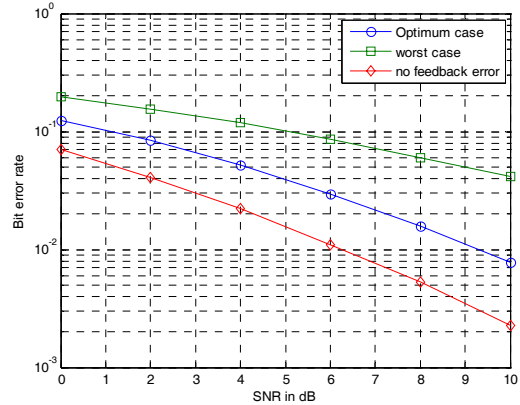


그림 5. 최적의 경우(optimum case)와 최악(worst case)의 경우에 대한 성능 비교 ($p_{a,1} = 1$)

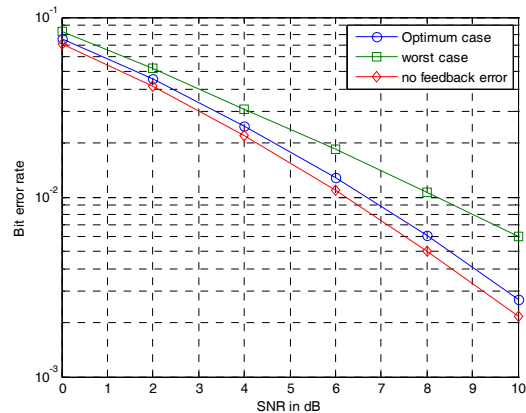


그림 6. 최적의 경우(optimum case)와 최악(worst case)의 경우에 대한 성능 비교 ($p_{a,k} = 0.1^k$)

V. 결론

본 논문에서는 MISO 레일리 채널에서 동작하는 코드북 기반의 전송 빔포밍 시스템의 피드백 채널에 오류가 존재할 경우에 대하여 평균 BER을 근사적 표현을 이용하여 수식적으로 분석하였고, 수식 분석 결과가 N 값이 증가할수록 본래 값에 가까워진다는 것을 모의실험 결과를 통하여 보여주었다. 또한 유도한 결과를 이용하여 주어진 코드북에 대하여 최적의 빔포밍 벡터 인덱싱 기법을 제안하였고 모의실험 결과를 통하여 제안한 기법을 사용할 경우 최적의 성능을 얻을 수 있음을 보여주었다.

더 나아가 빔포밍 벡터의 인덱싱은 오프라인 상

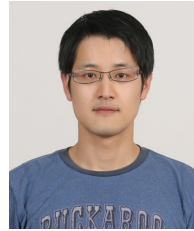
황에서 결정되므로 본 논문에서 제안하는 기법을 사용하면 시스템 복잡도 및 비용의 증가 없이 성능을 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T. K. Y. Lo, "Maximum ratio transmission," IEEE Trans. Commun., Vol.47, No.10, pp.1458-1461, 1999.
- [2] C. H. Tse, K. W. Yip, and T. S. Ng, "Performance tradeoffs between maximum ratio transmission and switched-transmit diversity," Proc. 11th IEEE Int. symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC' 2000), London, UK., pp.1485-1489, September 2000.
- [3] D. J. Love, R. W. H. Jr., W. Santipach, and M. L. Honig, "What is the value of limited feedback MIMO channels," IEEE Commun. Mag., Vol.42, pp.54-59, October 2004.
- [4] A. Narula, M. J. Lopez, M. D. Trott, and G. W. Wornell, "Efficient use of side information in multiple-antenna data transmission over fading channels," IEEE J. Sel Areas Commun., Vol.16, No.8, pp.1423-1436, October 1998.
- [5] R. W. H. Jr. and A. Paulraj, "A simple scheme for transmit diversity using partial channel feedback," in Proc. 32nd Annual Asil. Conf. on Sig. Sys. and Comp., Vol.2, pp.1073-1078, 1998.
- [6] J. D. J. Love, R.W. Heath and T. Strohmer, "Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems." IEEE Trans. Inf. Theory, Vol.49, No.10, pp.2735-2747, October 2003.
- [7] K. K. Mukkavilli, A. Sabharwal, E. Erkip, and B. Aazhang, "On beamforming with finite rate feedback in multiple-antenna systems." IEEE Trans. Inf. Theory, Vol.49, No.10, pp.2562-2579, October 2003.
- [8] W. Santipach and M. L. Honig, "Asymptotic performance of mimo wireless channels with limited feedback." in Proc. IEEE Military Communications Conference 2003, Vol.1, pp.141-146, 2003.
- [9] _____, "Asymptotic capacity of beamforming with limited feedback." in Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory, p. 290, 2004.
- [10] C. K. Au-Yeung and D. J. Love, "A performance analysis framework for limited feedback beamforming in correlated fading," IEEE Commun. Letters, Vol.10, No.5, pp.344-346, May 2006.
- [11] M. Kang and M.-S.Alouini, "Largest eigenvalue of complex whishart matrices and performance analysis of MIMO MRC system." IEEE Trans. Commun., Vol.21, No.3, pp.418-426, April 2003.
- [12] J. W. Craig, "A new, simple and exact result for calculating the probability of error for two-dimensional signal constellations," Proc. IEEE Military Communications Conference, pp.25.5.1-25.5.5., 1991

이진희 (Jinhee Lee)

정회원



2004년 8월 고려대학교 전기
전자전파공학부
2004년 8월 고려대학교 전자
컴퓨터공학과
2005년 3월~현재 고려대학교
전자전기공학과 박사과정
<관심분야> 전자공학, 통신공학

고영채 (Young-Chai Ko)

종신회원



1997년 3월 한양대학교 전자
통신공학과
1999년 5월 University of
Minnesota, Minneapolis, USA,
전자 공학과 석사
2001년 10월 University of
Minnesota, Minneapolis, USA,
전자 공학과 박사
2004년 3월 고려대학교 전자컴퓨터학과 조교수
2008년 3월~현재 고려대학교 전자컴퓨터학과 부교수
<관심분야> 전자공학, 통신공학