

상관 채널에서의 공간다중화 기법을 위한 개루프 프리코딩 기법

장 정 엽*, 김 동 호^o

Open-Loop Precoding for Spatial Multiplexing Systems in Correlated Channels

Jungyup Jang*, Dong Ho Kim^o

요 약

본 논문은 송신 상관 MIMO 채널에서 SM 시스템의 성능 열화를 극복하는 개루프 프리코딩 기법을 제안한다. 제안 기법은 성상도의 최소거리를 최대화 하는 프리코딩의 피드백 오류에 따른 성능 분석을 통해 제시하였고, 제안한 프리코딩 기법은 수신기로부터 채널 정보의 피드백 없이 성능 열화를 줄일 수 있다.

Key Words : MIMO, SM, open-loop MIMO, precoding, open-loop precoding

ABSTRACT

In this letter, an open-loop precoding is proposed to enhance the performance of SM in transmit correlated MIMO channels. The proposed method is derived by observing the effect of feedback error on the minimum distance precoder, and can mitigate the performance degradation without any feedback information.

I. 서 론

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 다중 입 출력) SM (Spatial Multiplexing, 공간 다중화) 시스템은 통신 및 방송 시스템에서 고속 데이터 전송이 가능

하다. 하지만 SM 기법은 MIMO 채널의 송신 상관에 의해 성능 열화가 급격히 발생한다. 이러한 성능 열화를 줄이기 위해 수신기로부터의 채널정보를 이용하여 프리코딩을 적용하는 기법들이 연구되었다^[1]. 하지만 방송 시스템의 경우에는 수신기로부터 채널정보를 피드백 받지 못하는 문제점을 가진다. 이에 따라, 수신기로부터 채널정보의 피드백 없이 성능 열화를 줄일 수 있는 개루프 프리코딩 기법들이 연구 되었다^[2,3], 현재 DVB-NGH 표준으로 채택이 되었다^[3]. 하지만 이러한 개루프 프리코딩의 설계 방법은 제시되지 않았다.

본 논문에서는 수신기로부터 채널 정보를 피드백 받지 못하는 방송 시스템과 같은 개루프 시스템에서 MIMO 채널의 송신 상관에 의한 SM 시스템의 성능 열화를 줄일 수 있는 개루프 프리코딩의 설계 방법을 제시하였다. 프리코딩 기법의 설계 방법은 수신기로부터 채널 정보가 피드백 가능한 성상도의 최소거리를 최대화 하는 프리코딩의 피드백 오류에 따른 성능 분석을 통해 제시하였고, 제안한 프리코딩 기법은 수신기로부터 채널 정보의 피드백 없이 성능 열화를 줄일 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N_T 개의 송신안테나와 N_R 개의 수신안테나를 가지는 MIMO SM 시스템을 고려한다. $N_R \times 1$ 수신신호 \mathbf{y} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{E_x}{N_T}} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_T^{H/2} \mathbf{F} \mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{1}$$

여기서 \mathbf{H}_w 는 zero-mean i.i.d (independent and identically distributed) 복소 가우시안 성분을 갖는 $N_R \times N_T$ 채널 행렬이고, \mathbf{R}_T 는 $N_T \times N_T$ 송신 상관 행렬이고, \mathbf{F} 는 $Tr(E\{\mathbf{F}\mathbf{F}^H\}) = N_T$ 를 갖는 $N_T \times N_T$ 프리코딩행렬이고, \mathbf{x} 는 $Tr(E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\}) = N_T$ 를 갖는 $N_T \times 1$ 송신 신호 벡터이고, \mathbf{n} 은 $E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^H\} = N_0 \mathbf{I}_{N_R}$ 를 갖는 $N_R \times 1$ 복소 가우시안 잡음신호 벡터이다. 본 논문에서는 $N_T = N_R = 2$, 송신 신호 \mathbf{x} 의 변조차수

* 본 연구는 2014년도 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, yupjung@seoultech.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, dongho.kim@seoultech.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2014-12-484, Received December 12, 2014; Revised December 29, 2014; Accepted December 29, 2014

는 QPSK로 가정한다.

채널의 송신 상관 행렬은 다음과 같다⁴⁾.

$$\mathbf{R}_T = \begin{bmatrix} 1 & \alpha e^{j\beta} \\ \alpha e^{-j\beta} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $0 \leq \alpha \leq 1$ 이고 $0 \leq \beta \leq 2\pi$ 이다. α 는 송신기 주변 산란체가 충분하지 않고 직접파 신호 성분이 클 경우 높은 값을 가지게 되고, β 는 송·수신기의 위치의 의해 결정이 된다. 본 논문에서는 $\beta = 0$ 으로 가정한다.

수신기에서 ML (Maximum Likelihood) 검출 기법을 사용하였을 때, 송신 상관 MIMO 채널에서 SM의 PEP (Pairwise error probability)는 다음과 같다.

$$P(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j | \mathbf{H}\mathbf{F}) \leq \exp\left(-\frac{\gamma d_{T,ij}^2}{4N_T}\right) \quad (3)$$

여기서, $d_{T,ij}^2 = \|\mathbf{R}_T^{H/2} \mathbf{F}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)\|^2$ 는 성상도의 유클리디안 거리이고 $\gamma = E_x/N_0$ 이다. 유클리디안 최소 거리는 SM의 성능에 직접적인 영향을 미침에 따라 최소 거리를 최대화 시켜야 한다.

III. 개루프 프리코딩

본 장에서는 제안기법의 설명을 위해 수신기로부터 채널 정보가 피드백 가능한 최소거리를 최대화 하는 프리코딩의 피드백 오류에 따른 성능 분석을 하고, 개루프 프리코딩 설계 방법을 제시한다.

3.1 Minimum distance precoder

송신 심볼 \mathbf{x}_i 와 \mathbf{x}_j 의 최소 유클리디안 거리는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$d_{T,\min}^2 = \min_{i \neq j} \|\hat{\mathbf{R}}_T^{H/2} \mathbf{F} \mathbf{e}_{ij}\|^2 \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{e}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$ 는 전송 가능한 모든 전송 심볼의 코드워드 차이 벡터이고, $\hat{\mathbf{R}}_T$ 는 수신기로부터 피드백 받은 상관 채널 행렬이다. 수신기에서 프리코딩 행렬은 다음과 같이 최소거리를 최대화함으로써 도출할 수 있다¹¹⁾.

$$\hat{\mathbf{F}} = \operatorname{argmax}_{\mathbf{F}} d_{T,\min}^2 \quad (5)$$

이 때, 프리코딩 행렬은 rotational 행렬을 고려하였다.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

최소거리를 최대화 하는 최적의 $\hat{\theta}$ 는 다음과 같다¹¹⁾.

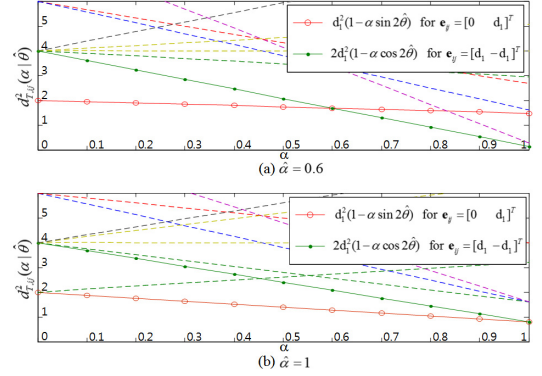


그림 1. 모든 코드워드 차이 벡터에 대한 $d_{T,ij}^2(\alpha; \hat{\theta})$
Fig. 1. $d_{T,ij}^2(\alpha; \hat{\theta})$ for all possible difference vectors

$$\hat{\theta} = \begin{cases} \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{2 + \sqrt{5\hat{\alpha}^2 - 1}}{5\hat{\alpha}} \right), & \text{for } \alpha \geq 0.5 \\ 0, & \text{for } \alpha < 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 피드백 오류에 의한 성능 및 open-loop precoding

기존 기법은 수신기로부터 채널 정보를 피드백 받을 수 있다고 가정하였다. 하지만 방송 시스템의 경우 채널 정보를 피드백 받을 수 없고, 고속 이동통신의 경우 피드백 오류가 발생할 수 있다. 이러한 피드백 오류는 시스템 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

피드백 송신 상관 계수 $\hat{\alpha}$ 에 상응하는 $\hat{\theta}$ 가 주어졌을 때, 실제 채널의 송신 상관 계수 α 에 따른 최소 거리는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$d_{T,\min}^2 = \min_{i \neq j} d_{T,ij}^2(\alpha; \hat{\theta}) = \min_{i \neq j} \|\mathbf{R}_T^{H/2}(\alpha) \mathbf{F}(\hat{\theta}) \mathbf{e}_{ij}\|^2 \quad (8)$$

피드백 오류가 없는 경우 $\alpha = \hat{\alpha}$, 최소거리는 $\hat{\alpha}$ 에 상응하는 $\hat{\theta}$ 에 의해 최대화가 되고 일정한 값을 가진다. 하지만 피드백 오류가 있는 경우 $\alpha \neq \hat{\alpha}$, 최소 거리는 α 에 의해 변하게 되며 성능에 영향을 주게 된다. 그림 1은 $\hat{\alpha} = 0.6$ 그리고 $\hat{\alpha} = 1$ 일 때, 모든 송신 심볼 코드워드 차이 벡터 \mathbf{e}_{ij} 의 대한 $d_{T,ij}^2(\alpha; \hat{\theta})$ 를 나타내며 실선은 최소거리 가지는 유클리디안 거리를 나타낸다. 최소거리는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{cases} d_1^2(1 - \alpha \sin 2\hat{\theta}), & \text{if } \alpha \leq \hat{\alpha} \\ 2d_1^2(1 - \alpha \cos 2\hat{\theta}), & \text{if } \alpha \geq \hat{\alpha}. \end{cases} \quad (9)$$

여기서 d_1 은 QPSK 성상도의 최소거리이다. 두 식 모두 α 에 대한 감소함수임 알 수 있다. $\alpha \geq \hat{\alpha}$ 일 때,

최소거리리는 급격히 감소하게 되고 $\alpha = \hat{\alpha}$ 인 경우에 비해 성능 열화가 발생한다. 반면 $\alpha \leq \hat{\alpha}$ 일 때, 최소거리리는 α 에 따라 증가하게 되며 $\alpha = \hat{\alpha}$ 인 경우보다 성능이 우수하게 된다. 즉, 피드백 오류가 있음에도 불구하고 성능 열화가 발생하지 않는다. 그림 1에서 실제 채널의 상관계수 상관없이 $\hat{\alpha} = 1$ 로 가정을 하고 $\hat{\theta}$ 를 구한 후 고정 값으로 적용하면 모든 α 에서 $\alpha = 1$ 인 경우보다 최소 거리가 크에 따라 항상 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다. 본 논문에서 상기와 같이 실제 채널의 상관 정도와 상관없이 항상 $\hat{\alpha} = 1$ 로 가정하고 $\hat{\theta}$ 의 값을 결정하는 프리코딩 설계방법을 개루프 프리코딩 기법이라고 정의 한다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 2×2 SM시스템, QPSK, ML 수신기, flat Rayleigh fading 채널을 고려한다.

그림 2는 기존기법^[1]과 제안기법의 피드백 오류가 존재할 경우 BER을 비교하고 있다. 기존 기법의 경우 피드백 상관 계수를 $\hat{\alpha} = 0.6$ 으로 가정하고 설계하였고, 제안 기법의 경우 $\hat{\alpha} = 1$ 로 가정하고 설계하였다. 실제 채널 상관계수는 $\alpha = 0.6, 0.9$, 그리고 1로 가정하고, 두 기법 모두 채널 피드백 오류가 발생한다. 그림에서 볼 수 있듯이 기존 기법은 피드백 오류가 발생함에 따라 성능이 급격히 열화가 됨을 확인할 수 있다. 반면, 제안 기법의 경우 피드백 오류가 있음에도 불구하고 성능 열화가 발생하지 않는다.

그림 3은 기존 기법^[1]이 피드백 오류가 없는 경우와 제안 기법을 SNR=20dB로 고정하고 모든 상관 계수에 따른 성능을 비교 하였다. 제안 기법의 경우 피드백 채널 정보가 없음에도 불구하고 채널정보의 피드백이 가능한 기존 기법과 동일한 성능을 보임을 알 수 있다. 따라서 제안 기법은 채널정보가 없음에도 불구하고 모든 채널 상관계수에서 성능 열화를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 SM 시스템에서 송신채널 상관에 의한 성능 열화를 줄일 수 있는 개루프 프리코딩 기법을 제안하였다. 제안 기법은 수신기로부터 채널 정보가 요구되지 없음에도 불구하고 기존 기법과 동일한 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

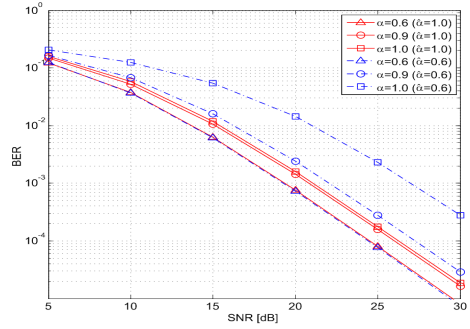


그림 2. 피드백 오류에 따른 BER 성능
Fig. 2. BER comparison for feedback error

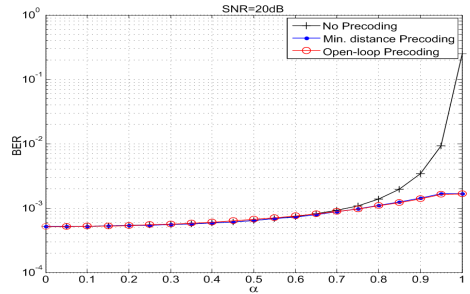


그림 3. 모든 상관계수에 따른 BER
Fig. 3. BER comparison for all correlation

References

- [1] S.-H. Moon, J.-S. Kim, and I. Lee, "Statistical precoder design for spatial multiplexing systems in correlated MIMO fading channels," in *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC)*, pp. 1-5, Taipei, Taiwan, May 2010.
- [2] Y. Hatakeyama, N. Miyazaki, and T. Suzuki, "Experimental evaluation of open-loop precoding MIMO using the testbed targeted at IMT-Advanced system," in *Proc. IEEE Int. Symp. Pers., Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 1-5, Cannes, France, Sept. 2008.
- [3] D. Vargas, D. Gozálviz, D. Gómez-Barquero, and N. Cardona, "MIMO for DVB-NGH, the next generation mobile TV broadcasting," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, pp. 130-137, Jul. 2013.
- [4] P. Kyritsi, D. C. Cox, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Correlation analysis based on MIMO channel measurements in an indoor environment," *IEEE J. Sel. Areas Commun. (JSAC)*, vol. 21, no. 5, pp. 713-720, Jun. 2003.