

분할된 선형배열안테나를 위한 채널 환경에 적응하는 MIMO 코드북 최적화

Adaptive Optimization of MIMO Codebook to Channel Conditions for Split Linear Array

문 철*, 정창규*, 곽윤식**

Cheol Mun*, Chang-Kyoo Jung* and Yun-Sik Kwak**

요 약

본 논문은 분할된 선형배열안테나를 사용하는 다중 사용자 MIMO 기술에서 코드북(codebook)을 운용 환경에 따라 최적화 하는 기술을 제안한다. 제안하는 기술은 공간상관도가 없는 MIMO 채널을 가정하여 디자인된 코드북을 각 순방향 링크의 송신 공간상관행렬을 이용하여 컬러링(coloring)하는 기술이며, 이를 위해 필요한 각 링크의 송신 상관행렬을 제한된 양의 long-term 피드백을 통해 피드백하는 기술을 제안한다. Zero-forcing maximum eigenmode transmission 기술을 사용하는 다중 사용자 MIMO 시스템에서, 제안하는 코드북 최적화 기술의 성능을 분석하였으며, 제안하는 기술이 적은양의 추가 피드백 정보량으로 다양한 운용 환경에 적응적으로 코드북을 최적화함을 보인다.

Abstract

In this paper, adaptive optimizations of precoder codebook to channel conditions is proposed for a multiuser multiple-input multiple-output (MIMO) system with split linear array and limited feedback. We propose adaptive method for constructing a precoder codebook by coloring the random vector quantization codebook at each link by using limited long-term feedback information on transmit correlation matrix of each link. It is shown that the proposed multiuser MIMO codebook design scheme outperforms existing multiuser MIMO codebook design schemes for various channel conditions in terms of the average sum throughput of multiuser MIMO systems using zero-forcing maximum eigenmode transmission and limited feedback.

Key words : Multiuser MIMO, SDMA, precoder codebook, limited feedback, colored RVQ codebook

1. 서 론

무선 통신 서비스에 대한 수요 증가에 따라 무선 통신 시스템의 성능과 용량을 개선시키려는 연구가

활발히 진행되어왔다. 무선 통신 시스템 용량 개선의 핵심 기술인 multiple-input multiple -output (MIMO) 다중 안테나 기술은 실제적인 구현을 위해서, 제한된 양의 피드백 정보를 사용하면서 운용 조건 및 환경에

* 충주대학교 전자통신공학전공

** 충주대학교 컴퓨터공학전공

· 제1저자 (First Author) : 문 철 · 교신저자(Corresponding Author) : 정창규

· 투고일자 : 2009년 9월 23일

· 심사(수정)일자 : 2009년 9월 24일 (수정일자 : 2009년 10월 23일)

· 게재일자 : 2009년 10월 30일

따라 다양한 형태의 송신 배열 안테나를 사용할 수 있어야 한다. 이는 운용하는 다중 안테나 기술과 환경에 따라 최적 송수신 배열 안테나 구조가 변하기 때문이다. 그러나, Grassmannian subspace packing을 기반으로 한 코드북 (codebook)은 선형 배열 안테나가 uncorrelated 채널에서 최적화되도록 디자인 되어 있다 [2]. 또한, maximum angular distance (MAD) codebook은 선형 배열 안테나를 사용하는 correlated 환경에서 최적의 성능을 제공한다 [3]. 따라서, 제한된 피드백 정보를 사용하는 SDMA 시스템을 위한 precoder 코드북은 배열 안테나 구조 및 운용하는 공간상관도에 따라 적응적으로 최적화 되어야 한다 [1]-[5].

본 논문에서는 다양한 송신 안테나 배열 구조 및 운용 환경에 따라, precoder 코드북을 최적화 하는 기술을 제안한다. 특히, 다중 사용자 MIMO 채널에서 전송 용량 증대를 위해 사용되는 zero-forcing maximum eigenmode transmission (ZF-MET) 기술을 위한 코드북 최적화 기술을 제안한다. 제안하는 기술은 공간상관도가 없는 MIMO 채널을 가정하여 디자인된 코드북을 각 하향 링크의 송신 공간상관행렬을 이용하여 컬러링 (coloring) 하는 기술이다. 또한, 이를 위해 요구되는 각 링크의 송신 상관행렬에 대한 정보를 최소한의 long-term 정보량을 이용하여 피드백하는 기술을 제안한다. 제안하는 기술의 성능을 기존 코드북 기술과 비교 분석하여, 제안하는 기술이 최소한의 피드백 정보량으로 다양한 송신 안테나 배열 및 운용 환경에 적응적으로 코드북을 최적화함으로써, MIMO 기술의 현실적인 운용을 가능하게 함을 보인다.

II. ZF-MET 전송을 사용하는 다중 사용자 MIMO 시스템

본 절에서는 ZF-MET 기술을 사용하는 다중 사용자 MIMO 시스템을 소개한다[1]. ZF-MET 기술은 송신기에서 각 수신기로의 하향 링크 채널의 최대 고유벡터로 각 하향 링크의 최대 고유모드(eigenmode) 채널을 모사하고, 동시에 전송되는 수신기들의 최대 고

유모드들 간의 간섭을 억제하도록 zero-forcing (ZF) 가중치를 이용하여 전송하는 기법이다.

2-1 송신기의 구조

송신기는 n_T 송신 안테나를, 수신기는 n_R 수신 안테나를 사용하며, 셀 내에 K 사용자가 있는 단일 셀 순방향 링크를 고려한다. $\mathbf{x} = \mathbf{W}\mathbf{s}$ 를 $n_T \times 1$ 송신 신호 벡터, \mathbf{y}_k 는 k 번째 수신기의 $n_R \times 1$ 수신 신호 벡터라고 하고 주파수 비선택적 페이딩을 가정하면 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_k = \sqrt{\frac{\gamma_k}{n_T}} \mathbf{H}_k \mathbf{W}\mathbf{s} + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

여기서 γ_k 는 k 번째 수신기의 평균 SNR을, \mathbf{H}_k 는 $n_R \times n_T$ 복소 채널 행렬을, \mathbf{n}_k 는 $n_R \times 1$ AWGN 벡터를 나타내며, \mathbf{H}_k 와 \mathbf{n}_k 의 원소는 평균이 0이고 단일 분산인 independent and identically distributed (i.i.d.) 인 복소 가우시안 랜덤 변수이다. 한 심볼 구간 동안, 송신기는 K 사용자 중에 선택된 사용자 집합 $S = \{1, 2, \dots, n_S\}$ 을 선택하고, 선택된 n_S 사용자에게 동시에 데이터를 전송한다. 동시에 전송된 심볼은 다음의 sum-power constraint를 만족해야 한다.

$$E[\text{tr}\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\}] \leq P_T \quad (2)$$

k 번째 수신기의 채널 \mathbf{H}_k 를 singular value decomposition (SVD)하면 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{S}_k \mathbf{V}_k \quad (3)$$

여기서, \mathbf{S}_k 는 \mathbf{H}_k 의 고유값(singular value)들로 이루어진 대각 행렬(diagonal matrix)이며, \mathbf{U}_k 와 \mathbf{V}_k 의 컬럼 벡터들은 왼쪽부터 \mathbf{S}_k 의 큰 값을 갖는 고유값과 관련 있는 순으로 배열 되어 있다. 각 수신기들은 각 채널의 최대 고유값을 갖는 고유 벡터 (singular vector) $\mathbf{v}_{k,1}$ 을 구하고, 미리 정해진 codebook F 중에

서 $\mathbf{v}_{k,1}$ 에 가장 근접한 양자화 벡터 $\hat{\mathbf{v}}_{k,1}$ 를 다음과 같이 선택하고 이의 codebook index를 송신기에 피드백 한다.

$$\hat{\mathbf{v}}_{k,1} = \arg \max_{\mathbf{c}_m \in F} |\mathbf{v}_{k,1}^H \mathbf{c}_m| \quad (4)$$

또한, 각 수신기는 양자화 벡터 $\hat{\mathbf{v}}_{k,1}$ 를 사용하여 데이터를 전송할 경우, 수신 가능한 signal-to-interference and noise ratio (SINR)을 계산하고, 이를 channel quality information (CQI) 채널을 통해 피드백 한다.

송신기는 각 수신기들로부터 피드백된 양자화 벡터와 CQI 정보를 이용하여, 동시에 데이터를 송신할 수신기 집합 S 를 결정한다. S 에 속하는 n_S 수신기들의 양자화된 최대 고유벡터들의 행렬 $\Lambda(S) = [\hat{\mathbf{v}}_{1,1}, \dots, \hat{\mathbf{v}}_{n_S,1}]^T$ 를 구성하고, 다음과 같이 ZF 송신 가중치 행렬 $\mathbf{W}(S)$ 을 결정한다.

$$\mathbf{W}(S) = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{n_S}] = \Lambda(S)^H (\Lambda(S) \Lambda(S)^H)^{-1} \quad (5)$$

송신기는 식 (5)에서 결정된 가중치 행렬을 이용하여 n_S 수신기에 동시에 데이터를 전송한다.

2-2 수신기의 구조

송신기에서 ZF 가중치를 사용하더라도, 동시에 전송된 심볼들간의 간섭이 아직 존재하므로, minimum mean square error (MMSE) 수신기를 사용하는 것이 바람직하다. $\tilde{\mathbf{H}}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{W}$ 라고 하면, k번째 수신기가 사용할 MMSE 수신 가중치는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{u}_k = \left(\mathbf{I} + \sum_{j \in S, j \neq k} \tilde{\mathbf{H}}_j \tilde{\mathbf{H}}_j^H \right)^{-1} \tilde{\mathbf{H}}_k \quad (6)$$

수신 신호에 식(6)의 MMSE 가중치가 곱해진 MMSE 수신기 출력 신호의 SINR은 다음과 같다.

$$\gamma_k = \tilde{\mathbf{H}}_k^H \left(\mathbf{I} + \sum_{j \in S, j \neq k} \tilde{\mathbf{H}}_j \tilde{\mathbf{H}}_j^H \right)^{-1} \tilde{\mathbf{H}}_k \quad (7)$$

식 (7)의 수신 SINR을 이용하여, ZF-MET 시스템의 하향 링크 전송 용량은 다음과 같이 구해진다.

$$R = \sum_{k \in S} \log_2(1 + \gamma_k) \quad (8)$$

III. 다중 사용자 MIMO 시스템을 위한 코드북 최적화

ZF-MET를 사용하는 다중 사용자 MIMO의 성능은 각 수신기가 하향 링크 채널의 최대 고유벡터에 대한 정보를 얼마나 정확히 송신기로 피드백 하느냐에 좌우된다. 수신기가 제한된 피드백 정보를 이용하여, 최대 고유벡터를 정확하게 송신기로 피드백하기 위해서는, 하향 링크 채널의 최대 고유벡터를 대표하는 벡터들로 구성된 다중 사용자용 MIMO 코드북을 잘 디자인해야 한다. 따라서, 최소한의 피드백 정보량만을 이용하여 다양한 송신 안테나 배열 구조에 적응적으로 다중 사용자 MIMO 코드북을 최적화하는 기술을 제안한다.

3-1 안테나 배열 구조에 따른 다중 사용자 MIMO 코드북 최적화

다중 안테나 기술이 사용되는 운용 조건 및 환경에 따라 다양한 형태의 송신 배열 안테나가 사용될 수 있다. 하향 링크 다중 사용자 MIMO 시스템 용량을 증가시키기 위해서는 송신 배열 안테나 간격을 줄여야 하지만[4], 역방향 링크에서 다이버시 이득을 증가시키기 위해서는 수신 배열 안테나의 안테나 간격은 늘려야 한다[5]. 송신기의 안테나 설치 공간 제약 때문에, 송수신 겸용 안테나를 사용해야 하므로, 위의 두 가지 대치되는 조건을 동시에 만족시키기 위해서는, 그림 1의 splitted linear array (SLA)를 사용해야 한다. 본 논문은 그림 1에서 $d_T = 0.5\lambda$ 인 SLA를 고려한다.

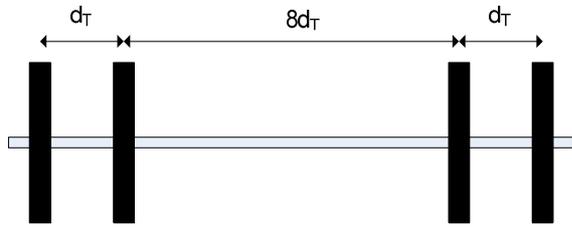


그림 1. SLA의 구조
Fig. 1. Structure of split linear array

한편, 다중 사용자 MIMO를 위한 코드북 디자인 방식으로 random vector quantization (RVQ) 방식[4]이 대표적으로 제안되었다. RVQ 방식은 코드북을 구성하는 각각의 양자화된 벡터들이 n_T 차원의 unit sphere의 균일 분포(isotropic distribution)로부터 독립적으로 선택된다[4]. RVQ 방식의 코드북은 공간상관도가 낮은 환경에서 최적의 성능을 보이지만, 공간상관도가 높은 환경에서는 성능이 열화된다[5]. 따라서, 인접하는 송신 안테나들간에는 높은 공간 상관도가 발생하고 멀리 떨어져 있는 송신 안테나들간에는 낮은 공간 상관도가 발생하는 SLA에 RVQ 코드북을 사용할 경우, 성능이 열화된다. 이와 같이 다양한 공간상관도를 발생시키는 2개의 송신 배열 안테나 구조를 하나의 codebook으로 최적화 하는 것은 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 송신 배열 안테나 구조에 따른 채널 상관도에 따라 적응적으로 다중 사용자 MIMO 코드북을 최적화하는 기술을 제안한다.

송신기와 모든 수신기들은, 공간 상관도가 없는 MIMO 채널에서 최적인 RVQ 행렬 코드북 \mathbf{G} 를 약속하고, 각 하향 링크 별로 사용하는 다중 사용자 MIMO용 코드북 $\tilde{\mathbf{G}}_k$ 을 다음과 같이 발생시킨다.

$$\tilde{\mathbf{G}}_k = \mathbf{R}_{T,k}^{1/2} \mathbf{G} \quad (9)$$

여기서, \mathbf{G} 는 RVQ 코드북의 precoding 행렬이고, $\mathbf{R}_{T,k}$ 송신기와 k번째 수신기간의 송신 상관행렬, 그리고 $\tilde{\mathbf{G}}_k$ 는 컬러링되고 컬럼 벡터별로 normalize된 precoding 행렬이다. 한편, 기존 연구 [5]에서는 공간 다중화 시스템을 위해, 공간 상관도가 없는 MIMO 채널에서 최적인 RVQ 행렬 코드북을 송신 채널 상관 행렬을 이용하여 컬러링하는 기법을 제안하였다.

3-2 SLA를 위한 RVQ 코드북 컬러링 기술

$n_T = 4$ 이고 $d_T = 0.5\lambda$ 인 SLA의 k번째 수신기의 송신 상관행렬은 식(10)과 같이 근사화 된다.

$$\mathbf{R}_{T,k} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_k e^{j\theta_k} & 0 & 0 \\ \rho_k e^{-j\theta_k} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \rho_k e^{j\theta_k} \\ 0 & 0 & \rho_k e^{-j\theta_k} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이는, 인접하는 송신 안테나들간에는 높은 공간 상관도가 발생하고 멀리 떨어져 있는 송신 안테나들간에는 낮은 공간 상관도가 발생하기 때문이다.

k번째 수신기는 식 (10)의 송신 상관행렬을 추정하고, 이를 송신기로 피드백 해야 한다. 따라서, 각 수신기들은 인접하는 두 송신 안테나간의 상관도의 크기 값 ρ_k 와 위상 값 θ_k 정보를 피드백한다. ρ_k 는 모든 링크에서 $\{\rho_k\}_{k=1, \dots, K} \approx 0.97$ 정도의 높은 상관도를 가지므로, 각 링크에서 ρ_k 를 피드백 할 필요는 없다. 반면에, θ_k 는 0부터 2π 까지 균일한 분포를 가지므로, 각 수신기는 N bits로 양자화하여 피드백할 수 있다. 따라서, SLA의 경우, 각 링크 별로 수신기가 송신 상관행렬의 θ_k 를 양자화해서 피드백하고, 송신단에서는 피드백된 양자화된 θ_k 정보를 이용하여 송신 상관행렬을 재구성하여 RVQ codebook을 coloring할 수 있게 된다.

IV. 성능 분석 및 결론

그림 2와 그림 3은 송신 안테나 4개의 SLA를 사용하고, 수신기는 uncorrelated 공간 상관도를 갖는 2개의 수신 안테나를 사용하고, 섹터의 모든 수신기들의 평균 수신 SNR이 모두 5dB로 동일할 경우, codebook 간의 성능을 비교 분석한 결과를 보여준다. 그림 2와 그림 3은 송신 angular spread가 각각 10° 와 20° 일 때의 결과를 보여준다. RVQ codebook은 IEEE 802.16e의 6bits codebook을 사용한다 [2].

두 결과 그림 모두 θ_k 를 양자화하기 위한 비트 수

N이 2에서 4로 증가할수록 perfect RT 경우의 용량에 근접해 감을 확인할 수 있다. 특히, N이 3bits 이상일 경우, quantization에 의한 성능 열화가 미미함을 확인할 수 있다. 또한, 제안하는 colored RVQ codebook 기법은 correlated 환경에서 우수한 성능을 보이는 MAD codebook [3]이나 uncorrelated 환경에서 우수한 성능을 보이는 RVQ codebook[4]에 비해 상당한 용량 이득을 제공함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

ZF-MET 기술을 사용하는 다중 사용자 MIMO 시스템에서, 송신 배열 안테나 구조 및 공간 상관도에 따라 코드북을 최적화 기술을 제안하였다. 시뮬레이션을 통한 성능을 통해, 제안하는 기술이 적은양의 추가 피드백 정보량으로 다양한 송신 안테나 배열 구조 및 운용 환경에 적응적으로 코드북을 최적화함을 보였다.

감사의 글

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

참 고 문 헌

- [1] F. Boccardi, H. Huang, and M. Trivellato, "Multiuser eigenmode transmission for MIMO broadcast channels with limited feedback", *SPAWC 2007*, pp.1-5, June 2007
- [2] IEEE 802.16 "IEEE P802.16e/D6," February 2005
- [3] C. Mun, "Quantized principal component selection precoding for spatial multiplexing with limited feedback," *IEEE Trans. on Comm.*, May 2008.
- [4] W. Santipach and M. Honig, "Asymptotic capacity of beamforming with limited feedback," in *Proceedings of Int. Symp. Inform. Theory*, p.290, July 2004.
- [5] D. J. Love and R. W. Heath Jr., "Limited feedback diversity techniques for correlated channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Mar. 2006.
- [6] S. Vishwanath, N. Jindal and A. Goldsmith, "Duality, Achievable Rates and Sum-Rate Capacity of Gaussian MIMO Broadcast Channels", *IEEE Tran. on Inform. Theory*, Vol. 49, No. 10, pp. 2658-2668, Oct. 2003.
- [7] U. Erez and S. t. Brink, "A Close-to-Capacity Dirty Paper Coding Scheme", *IEEE Trans. on Inform.*

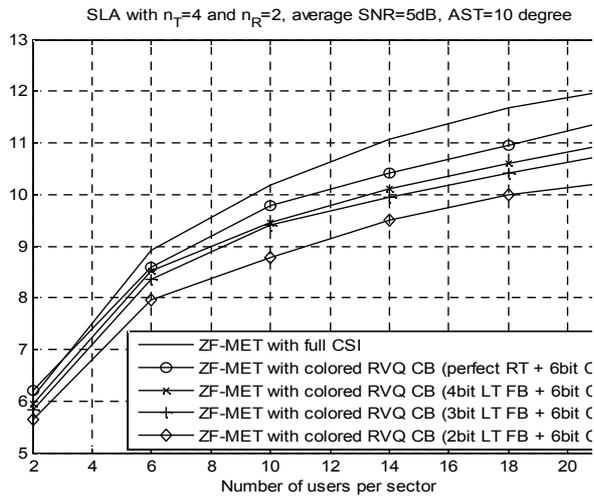


그림 2. 제안하는 colored RVQ codebook 기술의 성능 분석 (angular spread = 10°)
 Fig. 2. Performance analysis of colored RVQ codebook (angular spread = 10°)

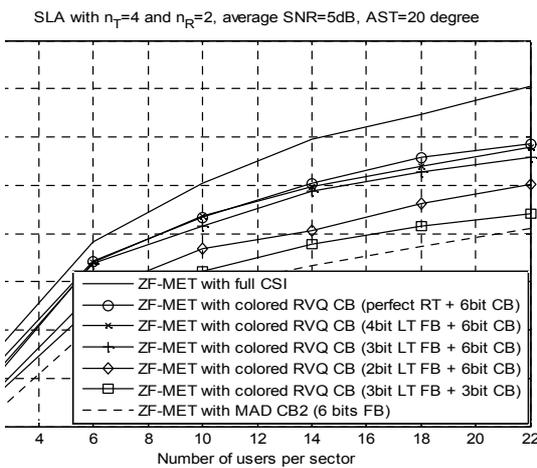


그림 3. 제안하는 colored RVQ codebook 기술의 성능 분석 (angular spread = 20°)
 Fig. 3. Performance analysis of colored RVQ codebook (angular spread = 20°)

Theory, Vol. 51, No. 10, pp. 3417-3432, Oct. 2005

[8] N. Jindal, W. Rhee, S. Vishwanath S. A. Jafar, and A. Golosmith, "Sum Power Iterative Water-Filling for Multi-Antenna Gaussian Broadcast Channels", *IEEE Tran. on Inform. Theory*, Vol. 51, No. 4, pp. 1570-1580, April 2005.

문 철



1995년 2월: 연세대학교 전자 공학
과 (공학사)

2001년 2월: 연세대학교 전자공학
과 (공학박사)

2001년 3월~2002년 2월: 삼성전자
네트워크 사업부

2003년 8월~현재: 충주대학교 전자

통신공학전공 교수
관심분야 : MIMO, OFDM, 채널모델링

정창규



1988년 2월: 연세대학교 전자공학
과 (공학사)

1995년 8월: 연세대학교 전자공학
과 (공학박사)

1995년 9월~현재 : 충주대학교 전
자통신공학전공 교수

관심분야 : MIMO, 채널모델링

곽윤식



1986년 2월: 경희대학교 전자공학과
(공학사)

1994년 2월: 경희대학교 전자공학과
(공학박사)

1991년 5월~현재 : 충주대학교 컴퓨
터공학전공 교수

관심분야: 컴퓨터 비전, 인터넷통신