

다중사용자 다중입출력 시스템에서의 부분적으로 연결된 구조기반 하이브리드 빔포밍 기법

장 석 주*, 이 인 규°

Hybrid Beamforming with Partially Connected Structures for Multiuser MIMO Systems

Seokju Jang*, Inkyu Lee°

요 약

본 논문에서는 다중사용자 다중입출력 시스템에서의 하이브리드 빔포밍 기법을 소개한다. 기존에 제안된 Fully Connected Structure 기반의 하이브리드 빔포밍 기법은 하드웨어 복잡도가 크므로, 본 논문에서는 Partially Connected Structure 기반의 하이브리드 빔포밍 기법을 제안한다. 실험 결과를 통해 제안하는 기법의 성능을 확인한다.

Key Words : Multiuser MIMO, Hybrid Beamforming, Fully connected structure, Partially connected structure, Block Diagonalization

ABSTRACT

This paper introduces a new hybrid beamforming (Hy-BF) scheme for multiuser multiple-input multiple-output systems. Since the conventional Hy-BF scheme with fully connected structure has a high hardware complexity, we propose a new Hy-BF scheme with partially connected structure to reduce it. Simulation result verifies that the proposed scheme with low complexity achieves a good

performance compared to the conventional scheme.

I. 서 론

차세대 통신으로 많은 관심을 받고 있는 대규모 다중입출력 기술은 많은 안테나로 인한 전송량 증가와 채널 하드닝 효과로 인하여 신호처리가 간단해지는 장점을 바탕으로 연구되어 왔다^{1,2}. 그러나 대규모 다중입출력 기술은 안테나 수가 증가할수록 많은 수의 radio frequency (RF) 체인들이 요구되어 비용과 에너지 소비가 증가한다.

이를 해결하기 위한 방법으로 하이브리드 빔포밍 기법이 많은 각광을 받고 있다^{3,4}. 이 기법은 보다 적은 수의 RF 체인을 적용하여 아날로그 빔포밍과 디지털 빔포밍의 조합으로 빔포밍을 생성하므로 보다 효율적인 통신이 가능하다.

최근 다중사용자 다중입출력 시스템에서의 하이브리드 빔포밍 연구가 진행되었다. [3]과 [4]의 저자들은 각 RF 체인이 모든 안테나에 연결된 fully connected structure (FCS) 기반의 하이브리드 빔포밍 기법을 제안하였다. FCS는 full array gain을 성취할 수 있지만 하드웨어 복잡도가 높다. 복잡도를 낮추기 위해 [4]의 저자는 각 RF 체인이 안테나의 부분집합에 연결된 partially connected structure (PCS) 기반의 하이브리드 빔포밍 기법을 제안하였지만 성능 열화가 크다. 따라서 본 논문에서는 PCS 기반의 높은 성능을 보이는 하이브리드 빔포밍 기법을 제시한다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하향링크 다중사용자 다중입출력 시스템을 고려한다. N_t 개의 안테나와 $N_{Tr,f}$ 개의 RF 체인을 가진 기지국은 N_r 개의 안테나

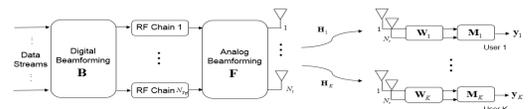


그림 1. 시스템 모델
 Fig. 1. System model

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다. (UD160070BD)

• First Author : School of Electrical Engineering, Korea University, seokju@korea.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Korea University, inkyu@korea.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2018-03-065, Received March 23, 2018; Revised March 29, 2018; Accepted March 29, 2018

와 N_{Rf} 개의 RF 체인을 가진 K 명의 유저에게 신호를 전송한다. 이 때, combining 이후의 k 번째 유저의 수신신호는 다음과 같이 나타내어진다.

$$y_k = M_k^H W_k^H H_k F B_k s_k + \sum_{i \neq k} M_k^H W_k^H H_k F B_i s_i + M_k^H W_k^H n_k \quad (1)$$

여기서 s_k 는 k 번째 유저를 위한 데이터 스트림이고 $H_k \in C^{N_r \times N_t}$ 은 k 번째 유저와 기지국의 채널이다. $F \in C^{N_t \times N_{Rf}}$ 와 $B \in C^{N_{Rf} \times N_s}$ 는 각각 기지국에서의 아날로그 빔포밍과 디지털 빔포밍을 나타낸다. 여기서 N_s 는 총 스트림 수이다. k 번째 유저의 아날로그 콤바이너와 디지털 디코더는 각각 $W_k \in C^{N_r \times N_{Rf}}$ 와 $M_k \in C^{N_{Rf} \times N_s/K}$ 로 나타내어진다. 또한, n_k 는 k 번째 유저의 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 additive white gaussian noise이다.

그림 2는 아날로그 빔포밍의 두 가지 구조를 보여준다. 그림 2(a)는 FCS로 각 RF 체인이 모든 안테나에 연결되어 있으며 총 $N_t N_{Rf}$ 개의 이상기가 필요하며 $F = [f_1, \dots, f_{N_{Rf}}]$ 이다. 반면, 그림 2(b)는 PCS로 각 RF 체인이 안테나 부분집합에 연결되며 F 는 다음과 같이 표현된다.

$$F = [f_1, \dots, f_{N_{Rf}}] = \begin{bmatrix} \hat{f}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \hat{f}_{N_{Rf}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\hat{f}_k \in C^{M \times 1}$ 이며 $M = N_t / N_{Rf}$ 은 각 부분집합의 안테나 수를 나타낸다.

2.2 아날로그 빔포밍 설계

본 논문에서는 effective array gain (EAG)을 최대화시키는 아날로그 빔포밍을 설계하고자 한다. k 번째 유저의 EAG은 $\tilde{H}_k = W_k^H H_k F$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 EAG를 최대화시키는 문제는 다음과 같다.

$$(P1) \quad \max_{F, W_k} \sum_{k=1}^K \|W_k^H H_k F\|_F^2 \quad (3)$$

$$s.t. \quad |F(i, j)| = 1/N_t, \quad (4)$$

$$|W_k(i, j)| = 1/N_r, \quad \forall i, j, k. \quad (4)$$

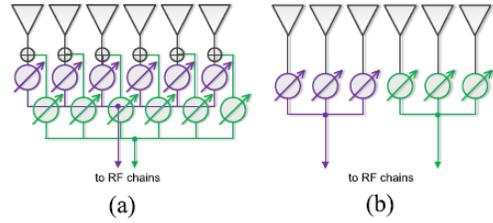


그림 2. 어레이 구조 (a) FCS 와 (b) PCS
Fig. 2. Array structure (a) FCS and (b) PCS

여기서 $\|\cdot\|$ 는 Frobenius norm을 나타내고 $A(i, j)$ 는 행렬 A 의 i 번째 행 j 번째 열의 성분을 나타낸다. 또한, (3)과 (4)는 이상기의 크기는 같고 각도만 조절 가능한 제약조건이다. 본 문제는 non-convex 문제로 직접적으로 풀기 어렵다.

본 논문에서는 (P1)을 풀기 위해 반복되는 알고리즘을 제안한다. W_k 가 주어졌을 때 EAG를 최대화시키는 F 를 구하고, F 가 주어졌을 때 EAG를 최대화시키는 W_k 를 구한다. 이 과정을 반복하여 F 와 W_k 를 업데이트 하게 된다. 먼저, W_k 가 주어졌을 때, (P1)는 다음과 같다.

$$(P2) \quad \max_F \quad \text{tr} \left(\underbrace{F^H \sum_{k=1}^K H_k^H W_k W_k^H H_k F}_P \right)$$

$$s.t. \quad |F(i, j)| = 1/N_t, \quad \forall i, j.$$

여기서 $\text{tr}(\cdot)$ 는 trace 오퍼레이션을 나타낸다. 행렬 P 를 eigenvalue decomposition (EVD)를 적용하면 $P = U_P \Sigma_P U_P^H$ 로 나타낼 수 있다. U_P 를 좀 더 자세하게 나누면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_P = \begin{bmatrix} u_{1,1} & \dots & u_{1,N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N_{Rf},1} & \dots & u_{N_{Rf},N_t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5)를 이용하면 (P2)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(P2.1) \quad \max_{\hat{f}_i} \sum_{i=1}^{N_{Rf}} \hat{f}_i^H \left(\sum_{r=1}^{r_P} \sigma_r u_{i,r} u_{i,r}^H \right) \hat{f}_i$$

$$s.t. \quad |\hat{f}_i(j)| = 1/N_t, \quad \forall i, j.$$

여기서 $\hat{\mathbf{f}}_i(j)$ 는 벡터 $\hat{\mathbf{f}}_i$ 의 j 번째 성분이고 σ_r 은 r 번째 eigenvalue이며, r_P 는 행렬 \mathbf{P} 의 rank이다. (P2.1)에서 각 RF체인 $\hat{\mathbf{f}}_i$ 은 objective 함수에 독립적이므로 (P2.1)은 다음과 같은 sub-problem으로 나누어진다.

$$(P2.2) \quad \max_{\hat{\mathbf{f}}_i} \hat{\mathbf{f}}_i^H \mathbf{Z}_i \hat{\mathbf{f}}_i$$

$$s.t. \quad |\hat{\mathbf{f}}_i(j)| = 1/N_i, \forall j.$$

여기서 $\mathbf{Z}_i = \sum_{r=1}^{r_P} \sigma_r \mathbf{u}_{i,r} \mathbf{u}_{i,r}^H$ 이다. (P2.2)는 [5]의 문제와 equivalent하므로 최적의 솔루션 $\hat{\mathbf{f}}_i^*(j)$ 은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{f}}_i^*(j) = \Psi \left(\sum_{k \neq j} \mathbf{Z}_i(j,k) \hat{\mathbf{f}}_i^*(k) \right), \forall j \quad (6)$$

여기서 $\Psi(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ x/|x|, & x \neq 0 \end{cases}$ 이다. (6)에서 $\hat{\mathbf{f}}_i^*(j)$ 는 $\hat{\mathbf{f}}_i^*(k)$, $\forall k \neq j$ 가 주어졌을 때 최적의 솔루션으로 $\hat{\mathbf{f}}_i^*$ 의 성분들은 반복적으로 업데이트되어 얻어진다.

다음으로, \mathbf{F} 가 주어졌을 때 \mathbf{W}_k 를 구하는 문제는 다음과 같이 나타내어진다.

$$(P3) \quad \max_{\mathbf{W}_k} \text{tr} \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{W}_k^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{F} \mathbf{F}^H \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k \right)$$

$$s.t. \quad |\mathbf{W}_k(i,j)| = 1/N_r, \forall i,j,k. \quad (7)$$

만약 제약조건 (7)이 없다면, (P3)의 최적의 솔루션 \mathbf{W}_k 는 \mathbf{Q}_k 의 N_{Rrf} 개의 큰 eigenvalue에 해당하는 eigenvector \mathbf{U}_{Q_k} 로 쉽게 얻을 수 있다. 그리고 제약조건 (7)을 맞추기 위해 본 논문에서는 간단하게 $\mathbf{W}_k = \exp(j \times \angle \mathbf{U}_{Q_k})$ 를 eigenvector \mathbf{U}_{Q_k} 의 각 도로 취한다. 따라서 아날로그 빔포밍을 설계하는 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) Initialize $\{W_k\}$.
- 2) Given W_k , obtain $\hat{\mathbf{f}}_i^*(j)$ in (6) for $\forall i,j,k$.

- 3) Given \mathbf{F} , obtain \mathbf{W}_k from \mathbf{U}_{Q_k} for $\forall k$.
- 4) If convergence, stop, otherwise, go to step 2).

2.3 디지털 빔포밍 설계

디지털 빔포밍은 기존에 널리 알려진 block diagonalization (BD) 기법을 적용한다. BD 기법은 다중사용자 다중입출력 시스템에서 유저간 간섭을 없애기 위해 적용된다. 본 논문에서는 BD 외에 다른 디지털 빔포밍 기법을 적용할 수 있다.

III. 실험 결과

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 널리 사용되는 cluster 채널 모델을 적용하였다^[3]. 또한, $N_t = 128, N_{Trf} = 8, N_r = 8, N_{Rrf} = 2$, 그리고 $K = 4$ 로 설정하였다.

그림 3은 기존의 기법 [3,4]와 제안하는 기법의 성능을 비교한 그림이다. FCS기반의 기법들은 Fully digital BD (optimal)에 근접하는 성능을 보여주지만, PCS기반의 기존 기법은 성능 열화가 크다. 제안된 PCS기반의 기법은 FCS기반의 기법들에 근접하는 성능을 보임을 확인할 수 있다.

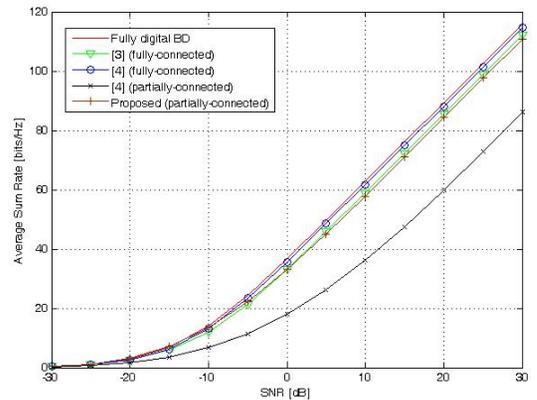


그림 3. 평균 전송률 합 성능
Fig. 3. Average sum rate performance

IV. 결론

본 논문에서는 다중사용자 다중입출력 시스템에서 PCS 기반의 하이브리드 빔포밍 기법을 제안하였다. 기존의 FCS 기반의 하이브리드 빔포밍 기법에 비해 하드웨어 복잡도를 낮추면서 성능은 FCS에 근접함을 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

References

- [1] Y. Jeon, C. Song, S.-R. Lee, S. Maeng, J. Jung, and I. Lee, "New beamforming designs for joint spatial division and multiplexing in large-scale MISO multi-user systems," *IEEE Trans. Wire., Commun.*, vol. 16, no. 5, pp. 3029-3041, May 2017.
- [2] S. Jang, H.-B. Kong, and I. Lee, "A pilot assignment algorithm in Massive MIMO Systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 8, pp. 1485-1491, Aug. 2015.
- [3] W. Ni and X. Dong, "Hybrid block diagonalization for massive multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 1, pp. 201-211, Jan. 2016.
- [4] N. Song, T. Yang, and H. Sun, "Overlapped subarray based hybrid beamforming for millimeter wave multiuser massive MIMO," *IEEE Sig. Process. Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 550-554, May 2017.
- [5] Z. Pi, "Optimal transmitter beamforming with per-antenna power constraints," *IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 3779-3784, Jun. 2012.