

# 제한된 채널정보를 활용한 셀룰라 하향링크 간섭제어 기법

채 성 호\*, 전 상 운°

## Interference Management for Cellular Downlink Systems with Limited Channel State Information

Sung Ho Chae\*, Sang-Woon Jeon°

### 요 약

본 논문은  $L$ -셀 다중안테나 셀룰라 하향링크 시스템의 효율적 간섭제어에 대해 연구하였다.  $M$ 개의 다중안테나가 설치된 각 기지국이  $K$ 명의 사용자를 지원하는 하향링크 환경을 고려하였으며, 각 기지국은 자신의 셀에 속한 사용자의 채널정보만을 안다고 가정하였다. 각 사용자는  $M$ 개의 수신모드 중 하나를 선택할 수 있는 Reconfigurable 안테나를 가정하였다. 제안기법은 Zero-Forcing 빔성형을 통해 셀 내의 간섭제어 후, 채널정보를 활용하지 않은 간섭정렬 빔성형을 통해 셀 사이의 간섭을 제어한다. 이를 통하여 달성 가능한 자유도를 획기적으로 개선하였다.

**Key Words** : Interference manage, Cellular systems, Multi-antenna, Beamforming, Degrees of freedom

### ABSTRACT

Interference management for  $L$ -cell multiantenna cellular downlink systems is studied. Each base station equipped with  $M$  antennas serves its  $K$  users and channel state information of its own cell is only available. Each user is equipped with a reconfigurable antenna that can choose its receiving

mode from  $M$  preset mode. The proposed scheme performs zero-forcing for managing intra-cell interference and then performs blind interference alignment for managing inter-cell interference. It is shown that the proposed scheme significantly improves the sum degrees of freedom.

## I. 서 론

최근 한정된 무선자원을 효율적으로 사용하여 다수의 사용자를 동시에 지원하기 위한 연구가 꾸준히 수행되고 있으며, 다중안테나를 활용한 간섭정렬기법이 그 대표적인 예이다<sup>1-3</sup>. 하지만 기존 간섭정렬의 경우 송신단에서 채널정보를 정확히 알아야 하지만, 대부분의 상용 통신 시스템의 경우 피드백 시간 지연 및 오버헤드로 인하여 채널정보를 획득하기 쉽지 않다. 이러한 단점을 개선하기 위하여, Reconfigurable 안테나를 활용하여 채널정보 없이 간섭정렬 하는 기법이 연구되고 있다<sup>4,5</sup>.

본 논문은 다중셀 다중안테나 셀룰라 하향링크 시스템을 고려하였다. 현실적인 셀룰라 통신환경을 반영하여 각 기지국들은 자신에게 속한 사용자들의 채널정보만을 획득할 수 있다고 가정하였으며, 이러한 제한된 채널정보를 효과적으로 활용하는 간섭제어 기법을 제안하였다.

## II. 시스템 모델

$L$ -셀 다중안테나 셀룰라 하향링크 시스템을 고려하자.  $M$ 개의 다중안테나가 설치된 각 기지국이 단일 안테나를 가진  $K$ 명의 사용자를 지원하며, 각 기지국은 자신의 셀에 속한 사용자들의 채널정보만을 안다고 가정한다. 각 사용자는  $M$ 개의 수신모드 중 하나를 선택할 수 있는 Reconfigurable 안테나를 가정하였다. 편의상  $i$ 번째 기지국에 속한  $k$ 번째 사용자를 ‘사용자  $(i, k)$ ’라고 표기한다.

사용자  $(j, k)$ 가  $m$ 번째 모드를 수신모드를 선택하였을 때, 기지국  $i$ 에서 사용자  $(j, k)$ 로의 채널 벡터를  $\mathbf{h}_{j,k,i}(m)$  이라고 하자. 이 때 각 채널 성분은 정

\* 본 논문은 2016학년도 안동대학교 연구비에 의해 연구되었음.

• First Author : (ORCID:0000-0002-6429-1324) Department of Electrical Engineering, Chosun University, shchae@chosun.ac.kr, 중신회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-0199-2254) Department of Information and Communication Engineering, Andong National University, swjeon@anu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2018-01-012, Received January 8, 2018; Revised February 23, 2018; Accepted March 13, 2018

규분포  $CN(0,1)$ 을 따른다. 시간  $t$ 에서 사용자  $(j,k)$ 의 수신모드를  $\alpha_{j,k}(t)$ 라고 하면, 시간  $t$ 에서 사용자  $(j,k)$ 의 수신신호는 다음과 같다.

$$y_{j,k}(t) = \sum_{i=1}^L \mathbf{h}_{j,k,i}(\alpha_{j,k}(t)) \mathbf{x}_i(t) + z_{j,k}(t)$$

여기서  $\mathbf{x}_i(t)$ 는 기지국  $i$ 의 전송신호이며  $z_{j,k}(t)$ 는 사용자  $(j,k)$ 의 부가잡음이다. 각 기지국은 평균 최대전송전력  $P$ , 즉  $E[\|\mathbf{x}_i(t)\|^2] \leq P$ 를 만족하여야 한다.

### III. 달성 가능한 자유도

본 장에서는 제안기법으로 달성 가능한 자유도합을 소개하고 기존기법과 비교하였다. 제안기법에 대한 상세한 설명은 4장에 기술하였다.

**Theorem:** 2장에 기술된  $L$ -셀 다중안테나 셀룰라 하향링크 시스템을 고려하자.  $M > K$ 인 경우 제안 기법을 통해 다음 자유도 합이 달성 가능하다.

$$m \in [1 : M], k \in [1 : K] \left\{ \frac{mkL}{m+k(L-1)} \right\}$$

여기서  $\Psi$ 는 자연수집합이다. ■

그림 1은  $M=8, K=4$ 일 때  $L$ 에 따른 자유도 합이다. 제안기법의 성능을 채널정보를 송신단에서 완벽히 알 경우 (Full CSIT), 채널정보를 완벽히 모를

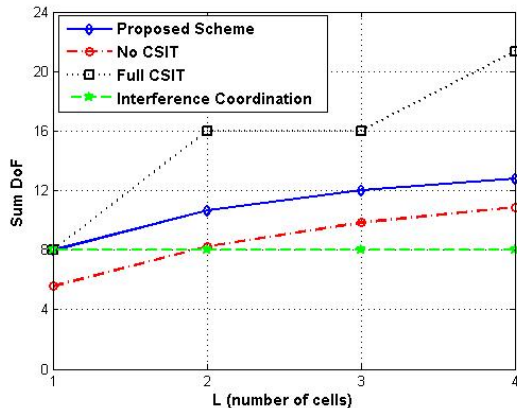


그림 1. 달성 가능한 자유도 합  
Fig. 1. Achievable sum degrees of freedom

경우(No CSIT), 셀 간 자원을 분리해서 사용하는 경우 (Interference Coordination)와 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 제안기법을 통하여 제한된 채널정보를 효과적으로 활용하여 자유도를 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

### IV. 제안기법

본 장에서는 제안기법을 소개하고 이를 통해 3장의 Theorem에서 제시한 자유도 합이 달성 가능함을 증명한다. Theorem을 증명하기 위하여,  $M > K$ ,  $M/K \in \Psi$ 를 가정한 후 자유도 합  $\frac{MKL}{M+K(L-1)}$ 이 달성 가능함을 보이고자 한다. 편의상  $n_1, n_2$ 를 다음과 같이 표기한다.

$$n_1 = \left( L + \frac{M}{K} - 1 \right) \left( \frac{M}{K} - 1 \right)^{L-1}$$

$$n_2 = \frac{M}{K} \left( \frac{M}{K} - 1 \right)^{L-1}$$

제안기법은  $n_1$  시간동안 각 기지국이  $n_2$ 개의 정보 심볼을 각  $K$ 명의 사용자들에게 전송한다.  $n_1$  시간동안 축적된 송수신 신호 관계를 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{y}}_{j,k} = \sum_{i=1}^L \bar{\mathbf{H}}_{j,k,i}(\bar{\alpha}_{j,k}) \bar{\mathbf{x}}_i + \bar{\mathbf{z}}_{j,k}$$

여기서 각각은 다음과 같다.

$$\bar{\mathbf{y}}_{j,k} = [y_{j,k}(1), \dots, y_{j,k}(n_1)]^T$$

$$\bar{\mathbf{x}}_i = [x_i(1), \dots, x_i(n_1)]^T$$

$$\bar{\mathbf{z}}_{j,k} = [z_{j,k}(1), \dots, z_{j,k}(n_1)]^T$$

$$\bar{\alpha}_{j,k} = [\alpha_{j,k}(1), \dots, \alpha_{j,k}(n_1)]^T$$

$$\bar{\mathbf{H}}_{j,k,i}(\bar{\alpha}_{j,k}) = \text{diag}(\mathbf{h}_{j,k,i}(\alpha_{j,k}(1)), \dots, \mathbf{h}_{j,k,i}(\alpha_{j,k}(n_1)))$$

기지국  $i$ 는 다음과 같은 두 단계에 걸친 빔 형성을 수행한다.

$$\bar{\mathbf{x}}_i = \sum_{k=1}^K \bar{\mathbf{U}}_{i,k} \bar{\mathbf{V}}_{i,k} \mathbf{s}_{i,k}$$

여기서  $\bar{\mathbf{U}}_{i,k} \in C^{n_1 M \times n_1 \frac{M}{K}}$  는 채널 정보를 이용해 셀 안 간섭을 제어하는 1단계 빔성형 행렬,  $\bar{\mathbf{V}}_{i,k} \in C^{n_1 \frac{M}{K} \times n_2}$  는 채널정보 없이 셀 간 간섭을 제어하는 2단계 빔성형 행렬,  $\mathbf{s}_{i,k} \in C^{n_2 \times 1}$  는 사용자  $(i,k)$ 의 정보심볼 벡터를 나타낸다.

#### 4.1 1단계 빔성형 기법

먼저  $\mathbf{H}_{i,k}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{H}_{i,k} = [\mathbf{H}_{i,1,i}, \dots, \mathbf{H}_{i,k-1,i}, \mathbf{H}_{i,k+1,i}, \dots, \mathbf{H}_{i,K,i}]^T$$

여기서  $\mathbf{H}_{i,l,i} = [h_{i,l,i}(1), \dots, h_{i,l,i}(M/K)]^T$ 이다. 이를 기반으로  $\mathbf{U}_{i,k}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{U}_{i,k} = \frac{(\mathbf{I}_M - \mathbf{H}_{i,k}^\dagger \mathbf{H}_{i,k}) \mathbf{H}_{i,k,i}^H}{\|(\mathbf{I}_M - \mathbf{H}_{i,k}^\dagger \mathbf{H}_{i,k}) \mathbf{H}_{i,k,i}^H\|}$$

여기서  $\mathbf{H}_{i,k}^\dagger = \mathbf{H}_{i,k}^H (\mathbf{H}_{i,k} \mathbf{H}_{i,k}^H)^{-1}$ 이며,  $\mathbf{H}_{i,k}$ 의 Moore-Penrose 역행렬이다. 최종적으로

$$\bar{\mathbf{U}}_{i,k} = \mathbf{I}_{n_1} \otimes \mathbf{U}_{i,k}$$

로 생성한다. 여기서  $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$ 는 행렬  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ 의 Kronecker Product이다.

앞서 정의한 1단계 빔성형 행렬  $\bar{\mathbf{U}}_{i,k}$ 를 통해 셀 내의 간섭을 완벽히 제거할 수 있으며, 1단계 빔성형 적용 후 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{y}}_{j,k} &= \bar{\mathbf{H}}_{j,k,j}(\bar{\alpha}_{j,k}) \bar{\mathbf{U}}_{j,k} \bar{\mathbf{V}}_{j,k} \mathbf{s}_{j,k} \\ &+ \sum_{i=1, i \neq j}^L \sum_{l=1}^K \bar{\mathbf{H}}_{j,k,i}(\bar{\alpha}_{j,k}) \bar{\mathbf{U}}_{i,l} \bar{\mathbf{V}}_{i,l} \mathbf{s}_{i,l} + \bar{\mathbf{z}}_{j,k} \end{aligned}$$

#### 4.2 2단계 빔성형 기법

2단계 빔성형 기법을 기술하기 위하여 참고문헌 [4]의 제안기법을 먼저 소개한다. [4]에서는  $L$ -사용자  $K/M \times 1$  Multiple-Input Single-Output Broadcast Channel에서 채널정보를 활용하지 않는 간섭정렬 기법을 제안하였다. 사용자  $i$ 에게 할당된 빔성형 행렬을  $\bar{\mathbf{V}}_{bc,i} \in C^{n_1 M/K \times n_2}$ , 사용자  $i$ 의 모드선택

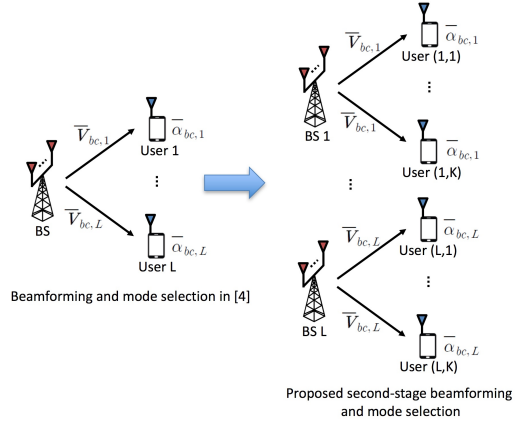


그림 2. 참고문헌 [4]의 간섭정렬을 활용한 2단계 빔성형 기법  
Fig. 2. Second-stage beamforming using interference alignment in [4]

$\bar{\alpha}_{bc,i} \in [1 : M/K]^{n_1}$ 을 라고 하자 (그림 2 참고).

제안기법은 [4]에서 제안된 빔성형을 활용하여, 모든  $k \in [1 : K]$ 에 대해  $\bar{\mathbf{V}}_{i,k} = \bar{\mathbf{V}}_{bc,i}$ ,  $\bar{\alpha}_{i,k} = \bar{\alpha}_{bc,k}$ 로 설정하였다 (그림 2 참고). 채널정보를 활용하지 않는 간섭정렬의 경우, 각 사용자의 1단계 빔성형 벡터 선택과 무관하게 항상 같은 공간에 간섭이 정렬되므로, 사용자  $(j,k)$ 의 간섭 신호가 차지하는 신호공간의 차원은  $(L-1)(M/K-1)^{L-1}$ 로 주어진다 것을 [4]로부터 알 수 있다. 즉, 제안기법은 각 셀의  $K$ 명의 사용자에게 같은 모드 선택 패턴을 적용하기 때문에 사용자 채널이 다르더라도 동일한 간섭 정렬이 발생한다.

따라서 자기 신호와 간섭 신호가 차지하는 총 신호 공간은  $n_1$ 이 된다. 결론적으로  $n_2$  시간동안 총  $KLn_1$  정보 심볼을 전송할 수 있으므로, 달성 가능한

자유도 합은  $\frac{MKL}{M+K(L-1)}$ 이 된다.

#### References

- [1] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
- [2] S.-W. Jeon and M. Gastpar, "A survey on interference networks: Interference alignment and neutralization," *Entropy*, vol. 14, no. 10,

- pp. 1842-1863, Sept. 2012.
- [3] K. Kim, J. Yang, S.-W. Jeon, and D. K. Kim, "Feasibility of interference alignment for full-duplex MIMO cellular networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 12, pp. 2389-2391, Dec. 2015.
  - [4] T. Gou, C. Wang, and S. A. Jafar, "Aiming perfectly in the dark-blind interference alignment through staggered antenna switching," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 59, pp. 2734-2744, Jun. 2011.
  - [5] M. Yang, S.-W. Jeon, and D. K. Kim, "Linear degrees of freedom of MIMO broadcast channels with reconfigurable antennas in the absence of CSIT," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 63, no. 1, pp. 320-335, Jan. 2017.