

# 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭 정렬

서종필\*, 김재영\*, 김현수\*, 정재학<sup>o</sup>,

## Opportunistic Interference Alignment Based on Dynamic Cell Selection

Jongpil Seo\*, Jaeyoung Kim\*, Hyeonsu Kim\*, Jaehak Chung<sup>o</sup>

### 요약

본 논문에서는 동적 셀 선택 기반의 기회적 간섭 정렬 기법을 제안한다. 제안된 방법은 각 사용자의 수신 신호 공간과 간섭 공간을 선택함으로써 기존의 기회적 간섭 정렬 기법을 통해 얻을 수 있는 다중 사용자 다이버시티 이득에 추가적인 선택적 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 제안된 방법의 합용량 성능 검증을 위해 확률 모델을 사용하여 전체 시스템의 합용량 성능을 수학적으로 유도하였다. 전산모의실험을 통해 제안된 방법이 기존의 방법에 비해 성능이 향상됨을 검증하였고 분석한 성능과 실험 결과의 일치함을 보였다.

**Key Words** : Interference alignment, opportunistic scheduling, dynamic cell selection

### ABSTRACT

An opportunistic interference alignment based on dynamic cell selection is proposed. Since the proposed method can switch the desired signal space and the interference space of received signals, an additional selective diversity gain increases. The performance analysis using probabilistic models provides a mathematical expression for the sum-rate capacity. Simulation examples show that the proposed method achieves the higher sum-rate capacity than that of the conventional opportunistic interference alignment.

### I. 서론

고속 무선 통신 서비스에 대한 요구가 증가함에 따라 무선 통신 시스템에서의 간섭 관리 기술에 대한 중요성이 점차 부각되고 있다. 간섭 문제는 셀룰러 시스템의 셀 경계 지역에서 주로 발생하며 전체 시스템의 성능을 저하시키는 주 요인으로 작용한다. 이러한 간섭을 제어하기 위한 기술로 시간, 주파수 또는 부호의 직교화 방법, 주파수 재사용, 반복적 전력 할당과 같은 간섭 관리 기술이 제안되었다<sup>1-3)</sup>.

그러나 이러한 기술들은 각 사용자의 관점에서 최선의 방법을 취하는 접근 방법으로써 전체 시스템 측면에서 최적의 성능을 보장하지 않는 단점이 있다. 따라서 보다 향상된 주파수 효율을 달성하기 위해 다양한 간섭 관리 기술에 대한 연구가 진행되어 왔다.

최근 간섭 관리 기술 중 하나인 간섭 정렬 (Interference alignment: IA) 기법이 활발히 연구되고 있다<sup>4-10)</sup>. Jafar에 의해 제안된 간섭 정렬은 3쌍 이상의 송수신기 쌍으로 구성된 간섭 채널에서 고

\* 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2009-0075145)

※ 본 연구는 인하대학교의 지원을 받아 수행된 연구임

◆ 주저자: 인하대학교 전자공학과 무선이동통신연구실, slavik@nate.com, 정희원

◦ 교신저자: 인하대학교 전자공학과 무선이동통신연구실, jchung@inha.ac.kr, 중신희원

\* 인하대학교 전자공학과 무선이동통신연구실, kimjaeyoyo@naver.com, dancingscv@nate.com.

논문번호: KICS2012-08-371, 접수일자: 2012년 8월 22일, 최종논문접수일자: 2012년 10월 22일

려되는 기술로 각 수신기에서 모든 간섭 신호가 정렬되도록 송신기를 설계하는 방법이다<sup>[4]</sup>. 이 방법은  $K$ 명으로 구성된 간섭 채널에서 기존의 직교화 방법은 1의 다중화 이득을 얻는 반면 간섭 정렬은  $K/2$ 의 다중화 이득을 얻을 수 있다. [4]에서 제안된 간섭 정렬 기법은 무한한 차원을 갖는 신호 공간을 가정한다. 그러나 간섭 정렬 기법을 실제 시스템에 구현하기 위해 무한한 차원의 신호 공간을 사용하는 것은 불가능하다. 따라서 유한한 차원의 신호 공간에서의 간섭 정렬을 위해  $K$ -사용자 MIMO 간섭 채널에서 반복적인 간섭 정렬 알고리즘이 제안되었다<sup>[5,7]</sup>. [5]에서는 상수 MIMO 채널에서 간섭 정렬을 구현 시, 유한 차원 내에서 간섭 정렬의 제한 조건(feasibility condition)을 제시하였고 이를 바탕으로 간섭누출량 최소화(leakage minimization) 알고리즘을 제안하였다. [6]에서는 연산 복잡도를 감소시키기 위한 방법으로 최소 자승법(least squares)을 이용한 고속 간섭 정렬 알고리즘을 제안하였고, [7]에서는 최소제곱오차(minimum mean squared error) 및 최대 신호 대 간섭 잡음비(max SINR) 알고리즘을 제안하였다. 그리고 [8]에서는 반복적인 간섭 정렬 알고리즘에 대해서 송수신 안테나 및 사용자 수의 제한 조건(feasibility condition)을 제시하였다.

간섭 정렬을 위한 송수신기 설계 시 모든 송신기는 전체 채널 정보를 필요로 한다. 정확한 채널 정보를 공유하기 위한 피드백은 전체 시스템의 오버헤드이고 이를 줄이기 위해 제한된 피드백(limited feedback)을 사용하는 경우 그 성능이 저하된다. 그리고 간섭 정렬은 송수신단의 수렴을 위한 반복 연산을 필요로 하기 때문에 이에 따른 연산 복잡도도 문제점으로 알려져 있다.

이러한 간섭 정렬의 피드백 문제와 연산 복잡도 문제를 해결하기 위해 기회적 간섭 정렬(Opportunistic Interference Alignment: OIA)이 제안되었다<sup>[9]</sup>. 이는 기회적 빔형성(Opportunistic beamforming: OBF) 기법[11]에 착안하여 다중 셀 간섭 채널에서 간섭 정렬의 효과를 얻는 방법이다. 기회적 간섭 정렬은 랜덤 빔을 이용하여 각 사용자의 간섭 신호 상관도(Correlation)가 가장 큰 사용자를 기회적으로 선택함으로써 간섭 정렬 효과를 얻는다. 이 방법은 각 셀 당 사용자의 수가 증가함에 따라 다중 사용자 다이버시티 이득(Multi-user diversity gain)을 얻고 적은 양의 피드백과 낮은 연

산 복잡도로도 간섭 정렬에 근접하는 성능을 얻을 수 있다. 그러나 기회적 간섭 정렬은 사용자 수가 적은 경우 간섭 정렬의 효과를 충분히 얻기 힘들다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭 정렬 기법을 제안한다. 기존의 기회적 간섭 정렬에서 각 사용자의 신호 공간이 고정되어 있는 것과 달리 제안된 방법은 동일한 환경에서 사용자 선택의 폭을 넓힘으로써 합용량 성능을 개선시킨다. 그러므로 기존의 기회적 간섭정렬을 통해 얻는 다중 사용자 다이버시티 이득에 선택적 다이버시티 이득을 추가적으로 확보함으로써 향상된 합용량 성능을 얻을 수 있다. 제안된 방법의 성능을 알아보기 위해 합용량을 이론적으로 분석한다. 그리고 이를 전산모의실험을 통해 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 시스템 모델을 설명하고 [9]에서 제안된 기회적 간섭 정렬을 기술한다. III절에서는 본 논문에서 제안된 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭 정렬에 대해 설명하고, 확률 모델을 기반한 성능 분석을 통해 제안된 방법의 합용량 성능에 대한 수학적 분석 결과를 제시한다. IV절에서 전산모의실험을 통해 본 논문에서 제안된 방법의 합용량 성능을 검증하고 V절에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델과 간섭정렬

### 2.1. 시스템 모델

본 논문에서는 다중 셀 하향링크 환경을 고려한다. 전체  $B$ 개의 셀과 기지국이 존재하고 각 셀마다  $K$ 명의 사용자가 존재하며 간섭 정렬의 효과를 보이기 위해 모두 셀의 경계 지역에 위치하도록 한다. 기지국과 사용자는 각각  $M$ 개의 송신 안테나와  $N$ 개의 수신 안테나를 갖는다. 송신기에서는 간섭 정렬을 위한 신호 공간(desired signal space) 확보를 위해 동시 전송이 가능한  $\min(M, N)$ 개의 공간 스트림 중에서 절반에 해당하는  $d = \min(M, N)/2$ 개의 공간 스트림만 전송한다.

송신 시 각 기지국  $j$ 에서 생성하는 랜덤 유니타리 빔형성 행렬(random unitary precoding matrix)을  $\mathbf{V}_j \in C^{M \times d}$ 라 정의하며  $\mathbf{V}_j^H \mathbf{V}_j = \mathbf{I}_d$ 를 만족한다. 이 경우 셀  $b$ 의 사용자  $k$ 의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{k(b)} = \sum_{j=1}^B \mathbf{H}_{k(b),j} \mathbf{V}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_{k(b)}, \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{H}_{k(b),j} \in C^{N \times M}$ 는 기지국  $j$ 와 셀  $b$ 의 사용자  $k$ 사이의 채널 행렬이고 각 행렬 요소는 평균이 0이고 단위 공분산 행렬을 갖는 독립적이고 동일한 복소 가우시안 분포(i.i.d. complex Gaussian)를 따른다.  $\mathbf{x}_j \in C^{d \times 1}$ 은 기지국  $j$ 에서의 송신 신호이며  $E\{\|\mathbf{x}_j\|^2\} = P$ 이다. 그리고  $\mathbf{n}_{k(b)} \in C^{N \times 1}$ 은 부가 가우시안 잡음을 의미하며 평균이 영벡터이고 공분산 행렬은  $\sigma^2 \mathbf{I}_N$ 이다. 그리고 모든 사용자는 수신된 유효 채널  $\mathbf{H}_{k(b),j} \mathbf{V}_j$ 를 알고 있다고 가정한다. 본 논문에서는 모든 사용자가 셀 경계 지역에 위치한다고 가정했기 때문에 신호 대 잡음비(SNR)와 간섭 대 잡음비(INR)는 동일하다고 가정한다. 각 기지국은 주어진 기준에 따라 사용자를 각각 1명씩 선택하고 선택된 사용자  $k^*(b)$ 는 간섭 억제 행렬  $\mathbf{U}_{k^*(b)} \in C^{N \times d}$ 를 이용하여 다른 셀로부터 전송된 간섭 신호를 제거한다. 선택된 사용자  $k^*(b)$ 에서 후처리(post-processing)된 최종 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{k^*(b)}^H \mathbf{y}_{k^*(b)} &= \mathbf{U}_{k^*(b)}^H \mathbf{H}_{k^*(b),b} \mathbf{V}_b \mathbf{x}_b \\ &+ \mathbf{U}_{k^*(b)}^H \sum_{j \neq b} \mathbf{H}_{k^*(b),j} \mathbf{V}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{U}_{k^*(b)}^H \mathbf{n}_{k^*(b)}. \end{aligned} \quad (2)$$

다음 절에서는 본 절에서 설명한 시스템 모델을 기반으로 [9]에서 제안된 기회적 간섭 정렬에 대해 살펴본다.

### 2.2. 기회적 간섭정렬

기회적 간섭 정렬 기법은 기존의 간섭 정렬기법의 문제점인 채널 정보 교환 문제와 반복 연산에 의한 연산 복잡도 문제를 보완하기 위해 제안되었다. 기회적 간섭 정렬에서 각 기지국에서는 랜덤 빔을 전송한다. 각 사용자는 다른 기지국으로부터 전송된 간섭 신호 사이의 상관도를 측정하고 이 상관도를 기지국으로 피드백한다. 이후 기지국에서는 사용자로부터 전달받은 상관도를 이용하여 셀 내의 전체 사용자 중에서 상관도가 가장 큰 사용자를 기회적으로 선택함으로써  $B$ -사용자 간섭채널을 구성한다. 전체 셀의 개수와 송수신 안테나 수가 [5]의

제한 조건(feasibility condition)을 만족하지 않더라도 셀 당 사용자 수가 늘어나면 간섭 정렬이 되는 사용자가 발생할 확률이 증가하므로 반복 연산 없이도 간섭 신호를 정렬하는 효과를 얻을 수 있다.

그러나 기존의 기회적 간섭 정렬은 사용자 수가 적은 경우 높은 상관도를 갖는 사용자가 존재할 확률이 낮아진다. 그리고 채널과 랜덤 빔의 형태에 따라 신호 벡터와 특정 간섭 벡터 사이의 상관도가 두 간섭 벡터 사이의 상관도 보다 큰 경우가 발생하여 전송용량 저하를 유발한다. 그러므로 본 논문에서는 사용자에게 신호 공간과 간섭 공간을 유동적으로 선택할 수 있는 기회를 제공하여 동일한 사용자 수에서 간섭이 더욱 잘 정렬된 사용자를 선택할 수 있도록 하였다. 다음 절에서는 본 논문에서 제안한 신호 및 간섭 공간의 선택을 이용한 동적 셀 선택 기반의 기회적 간섭 정렬 기법을 설명한다.

## III. 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭정렬

### 3.1. 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭정렬

본 절에서는 특정 기지국으로부터의 신호를 신호 공간으로 고정하지 않고 신호 및 간섭 공간을 사용자가 선택하도록 하는 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭 정렬을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 각 기지국으로부터 수신된 신호 벡터들의 방향성에 따라 신호 공간과 간섭 신호 공간을 선택할 수 있기 때문에 사용자 선택의 기회가  $K$ 에서  $BK$ 가지로 늘어나고 기존의 기회적 간섭 정렬을 통해 얻을 수 있는 다중 사용자 다이버시티 이득에 추가적으로 선택적 다이버시티 이득(selection diversity)을 얻을 수 있다.

최대 합용량을 갖는 스케줄링 방법으로써 모든 사용자의 SINR 또는 채널 용량 중에서 최대의 채널 용량을 갖는 사용자 조합을 찾는 전역 탐색(full-search) 방법이 있다. 이 방법은 모든 사용자에게 대해 SINR 계산을 요구하기 때문에 선택되지 않는 사용자도 수신기 설계 및 SINR 계산을 위한 추가적인 행렬 연산을 필요로 한다. 그리고  $BK P_B$ 개의 사용자 조합을 모두 비교해야 하기 때문에  $O((BK P_B) \log(BK P_B))$ 의 스케줄링 복잡도를 갖는다. 여기서  ${}_n P_r = n! / (n-r)!$ 이다. 그러므로 본 논문에서는 연산 복잡도를 줄이기 위해 기지국 별로 순차적으로 사용자를 선택하는 방법을 제안한다. 본 절에서 제안하는 순차적인 사용자 선택 방법

은  $O((BK)\log(BK))$ 의 스케줄링 복잡도를 갖는다. 그리고 3개 이상의 다중 셀에서도 적용하기 위해 간섭이 정렬된 정도의 측정치로서 상관도 대신 간섭 신호 전력을 사용한다.

동적으로 셀 선택하기 위해 II절에서 설명한 시스템 모델에 추가적으로 각 기지국 사이는 실제 채널 정보가 아닌 상관도 정보를 주고 받을 수 있는 백홀(backhaul) 망으로 연결되어있다고 가정한다. LTE-Advanced에서는 핫존 및 음영지역에서의 원활한 통신을 위해 매크로 셀 및 피코/펨토 셀 기지국이 백홀 망으로 연결되어 있기 때문에 현 시스템에서도 사용 가능하다. 다음은 제안된 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭 정렬의 자세한 과정에 대해 설명한다.

- *Step 1* : 데이터를 전송하기 전에 데이터를 전송한 사용자를 기회적으로 선택하기 위해 기지국에서 랜덤 빔을 전송한다.

간섭 정렬을 위한 신호 공간을 확보하기 위해 빔 형성 행렬  $\mathbf{V}_j$ 는  $M \times d$ 의 크기를 가지며  $\mathbf{V}_j^H \mathbf{V}_j = \mathbf{I}_d$ 를 만족한다. 각 사용자가 수신단에서 채널 추정을 할 수 있도록 송신 신호  $\mathbf{x}_j$ 는 파일럿 또는 훈련 신호를 전송한다.

- *Step 2* : 각 사용자는 기지국에서 전송한 랜덤 빔을 이용하여 간섭 신호 전력을 측정한다.

간섭 신호 전력은 간섭 신호의 공분산 행렬 (interference covariance matrix)의  $d$ 개의 최소 고유값의 합으로 구할 수 있다. 각 사용자는 추정된 채널 값을 이용하여 간섭 신호의 공분산 행렬을 계산한다. 셀  $b$ 의 사용자  $k$ 에 대해서 신호 공간이 기지국  $j$ 에 의해 형성될 때의 간섭 신호의 공분산 행렬  $\mathbf{Q}_{k(b),j}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Q}_{k(b),j} = \sum_{m=1, m \neq j}^B \mathbf{H}_{k(b),m} \mathbf{V}_m \mathbf{V}_m^H \mathbf{H}_{k(b),m}^H \quad (3)$$

이때 각 사용자의 수신단에서 발생하는 간섭 신호 전력은 고유값 분해(eigenvalue decomposition)을 통해 다음과 같이 계산한다.

$$L_{k(b),j} = \sum_{i=1}^d \lambda_i(\mathbf{Q}_{k(b),j}) \quad (4)$$

식 (4)에서  $L_{k(b),j}$ 는 셀  $b$ 의 사용자  $k$ 에 대해서 신호 공간이 기지국  $j$ 에 의해 형성될 때 간섭 신호 전력의 총합이다.  $d$ 는 간섭 정렬을 위한 자유도를 의미하여  $d = \min(M, N)/2$ 이다. 그리고  $\lambda_i(\cdot)$ 은 행렬의 고유값을 의미하며  $\lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_N$ 의 순서를 갖는다.

- *Step 3* : 기지국에서는 각 사용자가 계산한 간섭 신호 전력을 이용하여 사용자를 기회적으로 선택한다.

각 사용자는  $B$ 개의 간섭 신호 전력을 계산하여 원래 속해있는 기지국으로 피드백한다. 각 기지국은 피드백 받은 모든  $L_{k(b),j}$ 를 백홀망을 통해 인접 기지국과 공유한다. 각 기지국에서는 전체  $BK$  사용자 중 최소의  $L_{k(b),j}$ 를 갖는 사용자  $k^*(j)$ 를 선택한다.

$$k^*(j) = \operatorname{argmax}_{b,k} L_{k(b),j} \quad (5)$$

식 (5)를 이용한 사용자 선택 방법은 채널 상황에 따라 둘 이상의 기지국이 동일한 사용자를 중복 선택하는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 기지국들이 협력을 통해 사용자를 순차적으로 선택한다. 선택의 우선순위는 사용자의 데이터 요구량, QoS, 공평성 등을 이용한 스케줄링 방법을 통해 결정될 수 있다. 이러한 부분은 시스템의 특성에 따라 달라질 수 있기 때문에 본 논문에서는 우선순위 결정 방법에 대해서는 다루지 않는다.

- *Step 4* : 선택된 사용자  $k^*(j)$ 에 대해 간섭 신호를 제거하기 위한 후처리 행렬을 설계한다.

선택된 사용자  $k^*(j)$ 는 식 (4)를 통해 계산된  $d$ 개의 작은 고유값에 해당되는 고유벡터로 이루어진 간섭 억제 행렬  $\mathbf{U}_{k^*(j)}$ 을 이용하여 간섭 신호를 제거한다. 따라서  $\mathbf{U}_{k^*(j)}$ 의  $m$ 번째 열은 다음과 같다.

$$\mathbf{U}_{k^*(j)}^{[m]} = \nu_{[m]}(\mathbf{Q}_{k^*(j),j}) \quad (6)$$

여기서  $\nu_{[m]}(\mathbf{A})$ 는 행렬  $\mathbf{A}$ 의  $m$ 번째로 작은 고유값에 해당하는 고유벡터를 의미한다.

제안된 방법은 모든 기지국에 의해 형성된 신호

공간을 모두 고려함으로써 선택의 가지 수가 기존의 기회적 간섭 정렬에 비해  $K$ 에서  $BK$ 로 증가한다. 그러므로 기존의 기회적 간섭 정렬에 비해 추가적인 선택적 다이버시티 이득을 얻는다.

### 3.2. 합용량 성능 분석

소소문단의 번호(예 1), (1))는 본문과 동일하게 작성한다. 1) 경우에는 2번의 스페이스 키를 사용하고, (1)의 경우에는 3번의 스페이스 키를 사용한다.

본 절에서는 본 논문에서 제안된 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭 정렬의 합용량 성능을 점근적(asymptotic)으로 분석한다. 제안된 방법의 합용량 성능 분석은 간섭 신호 전력에 대한 간단한 수학적 표현을 위해 자유도가  $d = 1$ 인 경우에 대해 고려한다. 간섭 신호 전력과 신호 성분의 채널 이득의 확률 변수를 각각  $\lambda$ 와  $\nu$ 라고 할때, 제안된 방법의 합용량은 채널 용량의 기대값  $E[\log_2(1 + P\nu/(P\lambda + \sigma^2))]$ 을 이용하여 계산한다. 이를 위해 선택된 사용자의 간섭 신호 전력  $\lambda$ 와 채널 이득  $\nu$ 에 대한 확률 분포를 유도해야 한다. 선택된 사용자의 간섭 신호 전력에 대한 확률 분포는 각 사용자의 간섭 신호 전력의 order statistics로부터 유도가 가능하다. 자세한 합용량 성능 분석은 다음과 같이 구할 수 있다.

#### 3.2.1. 간섭 신호 공분산 행렬의 통계적 특성

간섭 신호 전력  $\lambda$ 는 식 (4)에 의해 간섭 신호 공분산 행렬  $\mathbf{Q}_{k(b),j}$ 의 고유값과 같다. 따라서  $\mathbf{Q}_{k(b),j}$ 의 통계적 특성을 먼저 살펴본다.

간섭 신호의 유효 채널 행렬  $\mathbf{H}_{k(b),j}\mathbf{V}_j$ 에서  $\mathbf{V}_j$ 는 유니터리 행렬이므로 사용자가 수신하는 유효한 채널의 분포는 변하지 않는다. 따라서 식 (1)에서  $\mathbf{H}_{k(b),j}$ 가 복소 가우시안이므로  $\mathbf{H}_{k(b),j}\mathbf{V}_j$  또한 평균이 0이고 공분산 행렬이 단위 행렬인 복소 가우시안 분포를 따른다. 그러므로 식 (3)에서 정의된  $\mathbf{Q}_{k(b),j}$ 는 uncorrelated central Wishart 행렬이 된다<sup>[12]</sup>.

#### 3.2.2. 간섭 신호 전력의 통계적 특성

$d = 1$ 인 경우 간섭 신호 전력  $\lambda$ 는  $\mathbf{Q}_{k(b),j}$ 의 최소 고유값이 된다. 그러나 일반적인 uncorrelated central Wishart 행렬에서의 최소 고유값에 대한 closed-form 표현은 알려져 있지 않기 때문에 최소

고유값 분포를 구하기 위해 모든 고유값에 대한 결합 분포를 이용한다<sup>[13]</sup>.  $\mathbf{Q}_{k(b),j}$ 의 모든 고유값에 대한 결합 확률 밀도 함수(joint probability density function: joint pdf)는 다음과 같다.

$$f_{\lambda}(\lambda) = K \prod_{i=1}^N e^{-\lambda_i} x_i^{B-N-1} \prod_{i < j} (\lambda_i - \lambda_j)^2, \quad (7)$$

$$K = \left[ \prod_{i=1}^N (B-1-i)! \prod_{i=1}^N (N-i)! \right]^{-1}. \quad (8)$$

여기서  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N]^T$ 이고  $\lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_N$ 이다.  $K$ 는 정규화 상수이다. 각 사용자의 간섭 신호 전력은 식 (4)와 같이  $\mathbf{Q}_{k(b),j}$ 의 최소 고유값과 같다. 따라서 간섭 신호 전력  $\lambda$ 의 분포는 최소 고유값 분포와 같고 식 (7)의 최소 고유값  $\lambda_1$ 에 대한 주변 확률 밀도 함수(marginal pdf)로 주어진다.

$$f_{\lambda_1}(\lambda_1) = \int_{\lambda_2}^{\infty} \int_{\lambda_3}^{\infty} \dots \int_{\lambda_{N-1}}^{\infty} f_{\lambda}(\lambda) d\lambda_{N-1} d\lambda_{N-2} \dots d\lambda_2. \quad (9)$$

만일 전체 셀의 수  $B$ 가 3이고 각 사용자의 수인 안테나 수  $N$ 이 2일 때 각 사용자의 간섭 신호 전력  $\lambda$ 는 평균이 1/2인 지수 분포(exponential distribution)를 따르며 다음과 같이 간단하게 표현된다<sup>[14]</sup>.

$$f_{\lambda}(\lambda) = 2e^{-2\lambda}, \quad \lambda \geq 0, \quad (10)$$

$$F_{\lambda}(\lambda) = 1 - e^{-2\lambda}, \quad \lambda \geq 0. \quad (11)$$

그리고 각 사용자의 신호 공간에 대한 채널 이득  $\nu$ 는 평균이 1인 지수 분포를 따른다.

$$f_{\nu}(\nu) = e^{-\nu}, \quad \nu \geq 0. \quad (12)$$

#### 3.2.3. 선택된 사용자에 대한 간섭 신호 전력의 통계적 특성

각 기지국은 식 (5)에 의해 최소의  $L_{k(b),j}$ 를 갖는 사용자를 선택한다. 사용자를 중복하여 선택하지 않기 때문에 선택 가능한 사용자의 수는 사용자가 선택될 때 마다 점차 줄어든다. 따라서 기지국의 선

택 우선 순위가  $i$  라고 하면, 선택된 사용자에게 대한 간섭 신호 전력의 확률 밀도 함수는 식 (10)에 대한  $BK-i+1$ 개의 i.i.d. 확률 변수의 최소 order statistic으로 구할 수 있다.

$$f_i(\lambda) = \frac{1}{B(1, BK-i+1)}(1 - F_\lambda(\lambda))^{BK-i} f_\lambda(\lambda) = \frac{2}{B(1, BK-i+1)} e^{-2(BK-i+1)\lambda}. \quad (13)$$

여기서  $B(x, y)$ 는 베타 함수(beta function)[15]를 의미하며  $B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1}(1-t)^{y-1} dt$ 이다. 제안된 방법의 선택된 사용자의 신호 공간에 대한 채널 이득 또한 식 (12)를 따른다.

### 3.2.4. 제안된 방법의 합용량 성능

최종적으로  $B$ 개의 셀과 각 셀 마다  $K$ 사용자가 존재할 때 전체 시스템의 합용량 성능은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_{sum} = \sum_{i=1}^B \left[ \int_0^\infty \int_0^\infty \log_2 \left( 1 + \frac{P\nu}{P\lambda + \sigma^2} \right) f_i(\lambda) f_\nu(\nu) d\lambda d\nu \right] \quad (14)$$

여기에 식 (13)의 간섭 신호 전력  $\lambda$ 와 식 (12)의 채널 이득  $\nu$ 를 이용하여 다음과 같이 구체적인 합용량  $C_{sum}$ 을 구할 수 있다.

$$C_{sum} = \sum_{i=1}^B \int_0^\infty \int_0^\infty \log_2 \left( 1 + \frac{P \cdot \nu}{P \cdot \lambda + \sigma^2} \right) \times \frac{1}{B(1, BK-i+1)} e^{-2(BK-i+1)\lambda - \nu} d\lambda d\nu. \quad (15)$$

식 (15)는 전체 시스템의 합용량 성능과 거의 근접한 결과로서 수학적 표현을 유도하였다.

## IV. 전산모의실험

본 절에서는 전산모의실험을 통해 제안된 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭 정렬의 합용량 성능을 검증하고 IV절에서의 성능 분석 결과와 비교를 위해 전산모의실험을 수행하였다.

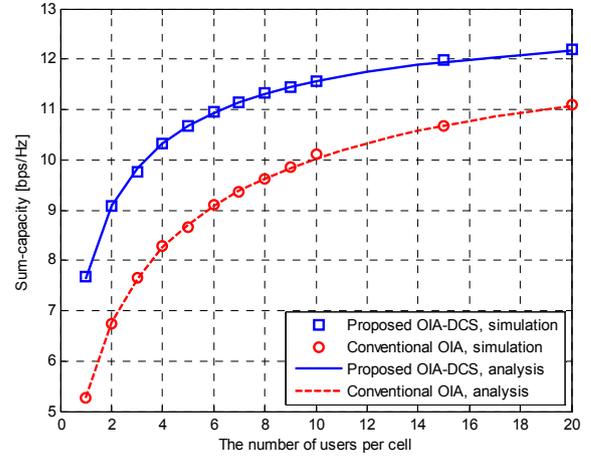


그림 1. SNR=INR=15dB일 때 셀 당 사용자 수에 따른 합용량 성능  
Fig. 1. Comparison of sum capacity performance of the proposed method and the conventional OIA with SNR=INR=15dB.

전체 3개의 셀을 갖는 다중 셀 환경을 가정하며 각 기지국의 송신 안테나와 사용자의 수신 안테나 수는 각각 4개 와 2개를 사용하였다 ( $B=3, M=4, N=2$ ). II. A절에서 모든 사용자는 셀 경계 지역에 위치한다고 가정했기 때문에 모든 채널에 대한 경로 손실은 0dB로 설정하고  $SNR = INR = P/\sigma^2$ 로 주어진다. 결과를 얻기 위해 각 지점별로 1000번의 랜덤 채널을 생성하여 실험을 수행하였다.

그림 1에서는  $SNR = INR = 15dB$ 일 때 셀 당 사용자 수에 따른 합용량 성능을 나타내었다. 제안된 방법과 기존 방법의 성능 비교를 위해 기존의 기회적 간섭 정렬 기법에서의 수신 방법은 mim-INR[5]을 사용하였다. □는 제안된 방법의 실험 결과이고 실선은 식 (15)에 의한 제안된 방법에 대한 성능분석 결과이다. ◇는 기존의 기회적 간섭 정렬의 실험 결과이고 점선은 기회적 간섭 정렬의 성능분석 결과이다. 기존 방법의 이론적 성능분석은 III-B절에서 기술한 방법과 동일하게 유도할 수 있다. 제안된 방법과 기존 방법은 모두 사용자 수가 증가할수록 다중 사용자 다이버시티(multiuser diversity) 이득을 얻기 때문에 합용량 성능 또한 증대된다. 제안된 방법은 동적으로 서비스를 제공받는 기지국을 선택하기 때문에 선택적 다이버시티(selection diversity) 이득을 얻어 기존의 기회적 간섭 정렬에 비해 더 높은 합용량 성능을 보인다. 실험 결과와 수학적 분석 결과를 비교하면, 식 (15)로

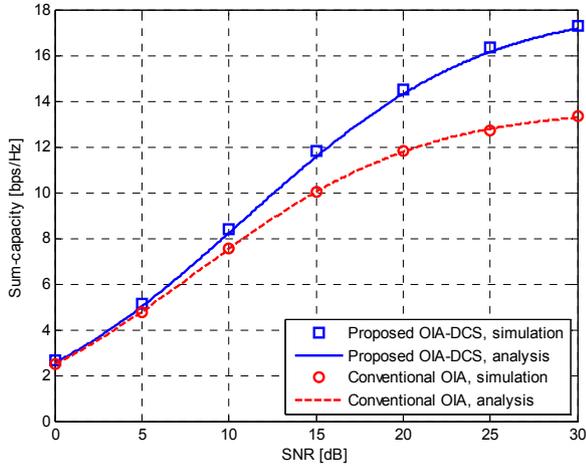


그림 2. K=10일 때 합용량 성능 비교  
Fig. 2. Comparison of sum capacity performance of the proposed method and the conventional OIA for K=10.

주어지는 제안된 방법의 수학적인 합용량 값은 제안된 방법의 전산모의실험 결과와 유사함을 보여준다. 선택된 사용자에 대한 채널 이득의 확률 밀도 함수는 식 (12)와 정확히 일치하지는 않으나 거의 유사한 분포를 갖는다. 그러므로 식 (15)의 수학적인 합용량 성능 분석이 유효함을 의미한다. 제안된 방법은 기존의 기회적 간섭 정렬 기법에 비해 다이버시티 오더가 증가함을 알 수 있다.

그림 2는 사용자 수가  $K=10$ 일 때 SNR의 변화에 따른 합용량 성능을 나타내었다. □는 제안된 방법에 대한 실험 결과이고 실선은 식 (15)에 의한 제안된 방법의 성능분석 결과이다. ◇는 기존의 기회적 간섭 정렬에 대한 실험 결과이고 점선은 기존 방법의 성능분석 결과이다. 기존의 방법은 약 15dB 근처에서 합용량의 증가율이 감소하기 시작한다. 반면 제안된 방법은 약 20dB까지 합용량 증가율이 일정하게 유지된다. 이는 20dB까지 자유도를 유지함을 의미하며 기존의 방법에 비해 간섭이 더욱 유효히 정렬됨을 보여준다.

그림 3은 사용자 수가 각각  $K=3$ 일 때 제안된 방법과 전역 탐색 방법의 합용량 성능을 나타내었다. □는 제안된 방법의 합용량이고 ▽는 사용자들의 채널 용량에 대한 모든 조합을 전역 탐색했을 때의 합용량이다. 그리고 ○는 채널 용량 대신 간섭 신호 전력만으로 전역 탐색했을 때의 합용량이다. 모든 사용자의 채널 용량을 이용한 전역 탐색 방법은 전체 시스템의 채널 용량을 최대화시키는 사용자를 찾기 때문에 채널 용량 측면에서 최적이라고

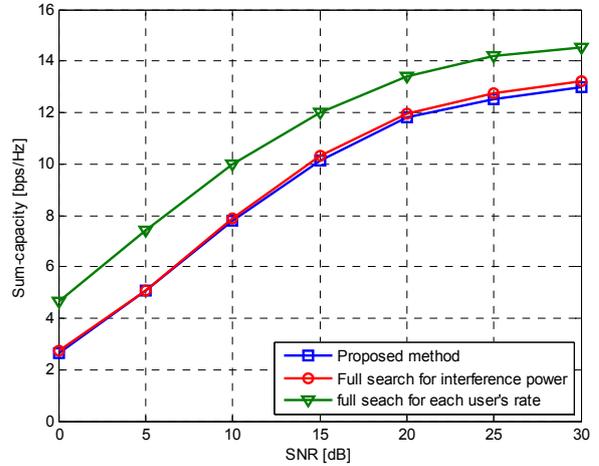


그림 3. K=3일 때 사용자 선택 방법에 따른 합용량 성능 비교  
Fig. 3. Comparison of sum capacity performance of the proposed method and the full search algorithms for K=3.

할 수 있다. 그러나 모든 사용자가 자신의 채널 용량 계산을 위해 수신기 설계 및 용량 계산을 위한 추가적인 연산을 필요로 하며  $BK P_B$ 개의 모든 조합에 대한 비교를 수행해야 한다. 반면 제안된 방법은 각 사용자의 채널 용량을 계산하지 않고 간섭 신호 전력을 이용하여 각 기지국이 순차적으로 선택함으로써  $O((BK P_B) \log(BK P_B))$ 에서  $O((BK) \log(BK))$ 로 줄어든 스케줄링 복잡도를 갖는다. 또한 제안된 방법은 간섭 신호 전력을 이용한 전역 탐색 방법에 비해 낮은 복잡도를 갖는 동시에 거의 유사한 합용량 성능을 갖는다.

### V. 결 론

본 논문에서는 동적 셀 선택 기반 기회적 간섭 정렬 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 각 기지국의 신호 공간과 간섭 공간을 자유로이 선택함으로써 기존의 다중 사용자 다이버시티 이득에 선택적 다이버시티 이득을 추가적으로 얻으므로 더 높은 합용량 성능을 얻는다. 제안된 방법의 합용량 성능을 수학적으로 검증하기 위해 확률 모델을 사용하여 유도하였다. 전산모의실험을 통해 제안된 방법의 향상된 합용량 성능을 보였고 수학적인 성능 분석 결과와 일치함을 확인하였다.

References

- [1] C. Rose, S. Ulukus and R. Yates, "Wireless Systems and Interference Avoidance," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.1, pp. 415-428, July. 2002.
- [2] W. Yu, W. Rhee, S. Boyd and J. M. Cioffi, "Iterative waterfilling for gaussian vector multiple-access channels," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol.50, no.1, pp.145-152, Jan. 2004.
- [3] N. Niato, F. Sirelli, A. Sala and A. Capone, "Interference mitigation strategies for WiMax networks," in *Proc. of IEEE International Symposium of Wireless Communication Systems(ISWCS '07)*, Trondheim, Norway, Oct. 2007.
- [4] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and the degrees of freedom for the K-user interference channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no.8, pp. 3424-3441, Aug. 2008.
- [5] K. Gomadam, V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 57, no, 6, Jun. 2011.
- [6] H. Yu and Y. Sung, "Least squares approach to joint beam design for interference alignment in multiuser multi-input multi-output interference channels," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, Sep. 2010.
- [7] S. Peters and R. W. Heath, Jr., "Cooperative algorithms for MIMO interference channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, Jan. 2011.
- [8] C. M. Tetis, T. Gou, S. A. Jafar and A. H. Kayran, "On feasibility of interference alignment in MIMO interference networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, Sep. 2010.
- [9] J. Lee and W. Choi, "Opportunistic interference aligned user selection in multiuser MIMO interference channels," *Proceedings of Global Telecommunication Conference 2010*, Miami, USA, Dec. 2010.
- [10] J. Seo, H. Kim, J. Ahn and J. Chung, "Orthogonal reference vector selection method of subspace interference alignment," *The Journal of Korea Information and Communications Society*, vol. 36, no. 5, pp. 457-436, May. 2011.
- [11] P. Viswanath, D. N. C. Tse and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antenna," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, no. 6, Jun. 2002.
- [12] R. J. Muirhead, *Aspects of Multivariate Statistical Theory*, John Wiley & Sons Inc., 1982.
- [13] A. Zanella, M. Ciani and M. Z. Win, "On the marginal distribution of the eigenvalues of Wishart matrices," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 4, Apr. 2009.
- [14] A. Zanella, M. Chiani and M. Z. Win, "Performance of MIMO MRC in correlated Rayleigh fading environments," *Proceedings of Vehicular Technology Conference 2005*, Stockholm, Sweden, May. 2005.
- [15] I.S Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 7th Edition, Academic Press, 2007.

서종필 (Jongpil Seo)



2009년 2월 인하대학교 전자공학과  
 2011년 2월 인하대학교 전자공학과 석사  
 2011년 3월~현재 인하대학교 전자공학과 박사과정  
 <관심분야> OFDM시스템, MIMO, Cognitive radio, LTE-Advanced

김 재 영 (Jaeyoung Kim)



2010년 2월 인하대학교 전자공  
학과  
2011년 8월~현재 인하대학교  
전자공학과 석사과정  
<관심분야> OFDM시스템,  
MIMO, Cognitive radio

김 현 수 (Hyeonsu Kim)



2008년 2월 인하대학교 전자공  
학과  
2011년 2월 인하대학교 전자공  
학과 석사  
2011년 3월~현재 인하대학교  
전자공학과 박사과정  
<관심분야> 수중 음향 통신,  
IMT-Advanced, cooperative MIMO, IPTV

정 재 학 (Jaehak Chung)



1988년 2월 연세대학교 전자공  
학과  
1990년 2월 연세대학교 전자공  
학과 석사  
2000년 University of Texas at  
Austin 전기전산 학과 박사  
2000년~2001년 post doctoral

fellow, University of Texas at Austin

2001년~2005년 수석연구원, 삼성종합기술원

2005년~현재 인하대학교 부교수

<관심분야> Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통  
신, MIMO-OFDM, UWB, Cross layer설계