

## 기회적 간섭 정렬의 실현 가능성 연구: 전력 제어를 통한 에너지 효율성 개선

신원용<sup>1\*</sup> · 윤장호<sup>2</sup>

### A Feasibility Study on Opportunistic Interference Alignment: Improved Energy Efficiency via Power Control

Won-Yong Shin<sup>1\*</sup> · Jangho Yoon<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Department of Computer Science and Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

#### 요 약

본 논문에서는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 합 용량을 크게 개선할 수 있는 에너지 효율적 기회적 간섭 정렬 기술을 소개한다. 각 사용자는 요구되는 신호 질을 만족하면서 타 셀 기지국에게 발생하는 간섭량을 최소화하는 측면에서 최적의 송신 벡터 설계 및 전력 제어를 수행한다. 주요 결과로써, 줄어든 간섭 레벨로 인하여 제안하는 기회적 간섭 정렬 기술은 전력 제어가 없는 기존 기회적 간섭 정렬보다 대부분의 신호 대 잡음 비 영역에서 더욱 높은 합 용량을 취득할 수 있음을 보인다. 뿐만 아니라, 제안하는 기회적 간섭 정렬 기술과 함께 수신 단에서 zero-forcing 검파 및 minimum mean square error (MMSE) 검파기를 사용할 경우 둘 사이 성능 비교를 수행하고, MMSE 검파 기반 기회적 간섭 정렬 기술이 우수한 성능을 취득할 수 있음을 보인다.

#### ABSTRACT

In this paper, we introduce an energy-efficient opportunistic interference alignment (OIA) scheme that greatly improves the sum-rates in multi-cell uplink networks. Each user employs optimal transmit vector design and power control in the sense of minimizing the amount of generated interference to other-cell base stations while satisfying a required signal quality. As our main result, it is shown that owing to the reduced interference level, the proposed OIA schemes attains larger sum-rates than those of OIA with no power control for almost all signal-to-noise ratio regions. In addition, when both zero-forcing and minimum mean square error (MMSE) detectors are employed at the receiver along with the OIA scheme, it is shown that the OIA scheme with MMSE detection shows superior performance.

**키워드** : 에너지 효율성, 기회적 간섭 정렬, 전력 제어, 송신 벡터 설계, 상향링크 네트워크

**Key word** : Energy efficiency, opportunistic interference alignment, power control, transmit vector design, uplink network

Received 19 March 2015, Revised 04 April 2015, Accepted 20 April 2015

\* Corresponding Author Won-Yong Shin(E-mail: wyshin@dankook.ac.kr, Tel:+82-31-8005-3253)

Department of Computer Science and Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.5.1077>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

간섭 관리는 다중 사용자 통신 시스템에서 중요한 역할을 한다. 과거에 자유도 (degrees of freedom) 또는 멀티플렉싱 이득이라는 간단한 개념을 사용하여 간섭 채널의 점근적 용량을 분석하는 방대한 양의 연구가 수행되어 왔다. 최근에 시변 채널 계수를 갖는  $K$ -사용자 간섭 채널에서 간섭 정렬 (interference alignment) 기술 [1]이 최적의 자유도 ( $K/2$ )를 취득함을 보였다. [1]에서의 기본 아이디어는 다중안테나 간섭 네트워크 [2], X 네트워크 [3], 셀룰라 네트워크 [4]와 같은 다양한 무선 네트워크 환경에서 간섭 정렬에 기반한 간섭 관리 기술의 확장 연구를 가능하게 하였다.

본 연구에서는 다중 셀 상향링크 네트워크 모델 중 하나인 간섭 다중 접속 채널 (interfering multiple-access channel)을 고려한다. 간섭 다중 접속 채널에서 최적의 자유도를 취득하는 부공간 간섭 정렬로 불리는 [4]에서의 간섭 정렬 기술 이외에, 더욱 최근에 기회적 간섭 정렬 (opportunistic interference alignment) 기술 [5]이 시불변 채널 계수를 가지는 단일 입력 다중 출력 (single-input multiple-output) 간섭 다중 접속 채널에서 소개되었다. [5]에서의 기술은 사용자의 수가 특정 스케일링 조건을 만족하면 점근적으로 최대 자유도를 취득할 수 있음을 보였다. [5]에서의 연구는 안테나 선택 기반 기회적 간섭 정렬 및 singular value decomposition (SVD) 기반 기회적 간섭 정렬과 같은 두 가지 다른 종류의 전처리 기술을 사용한 다중 입력 다중 출력 (MIMO: multiple-input multiple-output) 간섭 다중 접속 채널 모델로 확장되었다[6]. 그러나 [5, 6]에서의 연구는 무선 통신 분야에서 각광받고 있는 에너지 효율성을 고려하지 않았다. 특별히 간섭 다중 접속 채널 환경에서는 모바일 기기의 제한된 수명 때문에, 저 전력 네트워크 프로토콜 및 무선 전송 기술의 설계가 중요한 이슈로 떠오르고 있다.

본 논문에서는 기존 기회적 간섭 정렬 프레임워크에 기반하여, MIMO 다중 셀 상향링크 네트워크, 즉 MIMO 간섭 다중 접속 채널에서의 새로운 에너지 효율적 위한 기회적 간섭 정렬 프로토콜을 제안한다. 제안한 기술은 기존 기회적 간섭 정렬 기술 [6]과 비교할 때 심지어 더 적은 송신 전력과 함께 합 용량에서의 큰 폭의 성능 개선을 가능하게 하고, 이는 곧 더 높은 에너

지 효율성을 보여준다. 본 논문의 개요는 아래와 같다.

- 유발된 간섭량 뿐만 아니라 에너지 효율성을 수량화한 척도인 간섭 누수 (LIF: leakage of interference)의 수정된 버전을 소개
- 요구되는 신호 질을 만족하면서 간섭 누수를 최소화하는 측면에서 각 사용자에서 수행되는 결합 최적 빔형성-전력 제어 기술을 제안
- 컴퓨터 모의실험을 수행함으로써, 제안하는 기술이 전력 제어를 사용하지 않은 (즉, 최대 송신 전력을 사용하는) 기존 기회적 간섭 정렬보다 거의 모든 수신대 잡음 비 (SNR: signal-to-noise ratio) 영역에서 우수한 합 용량 성능을 가짐을 확인
- 제안하는 기회적 간섭 정렬 기술과 함께 수신 단에서 zero-forcing (ZF) 및 minimum mean square error (MMSE) 검파기를 사용할 경우, 둘 사이 성능을 비교.
- 이를 통해 MMSE 검파 기반 기회적 간섭 기술이 합 용량 측면에서 더 우수한 성능을 보임을 확인

본 논문의 구성은 아래와 같다. II장에서는 시스템 모델을 설명한다. III장에서는 송신 벡터 설계 및 전력 제어를 포함하는 제안하는 에너지 효율적 기회적 간섭 정렬 기술을 보인다. IV장에서는 두 가지 검파 기법에 따른 기회적 간섭 정렬 기술 방법의 차이점을 설명한다. V장에서는 기회적 간섭 정렬 기술의 수치적인 결과를 제공한다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문을 요약 및 마무리한다. 본 논문에서는, superscript  $H$ 는 행렬의 conjugate transpose,  $I_n$ 는 크기  $n \times n$ 의 단위 행렬,  $E[\cdot]$ 는 평균,  $\|\cdot\|$ 는 벡터의  $L_2$ -norm을 나타낸다. 또한, 전체적인 가독성을 높이기 위해 핵심 theorem만 증명 없이 제공하도록 한다.

## II. 시스템 모델

실제적인 다중 안테나 셀룰라 네트워크를 고려하기 위해 MIMO 간섭 다중 접속 채널 [6, 7]을 가정한다. 네트워크에는  $K$ 개의 셀, 셀 안에는  $N$ 개의 사용자가 있다고 가정한다. 각 사용자는  $L$ 개의 송신 안테나를 가지고 각 셀은  $M$ 개의 수신 안테나를 가진 하나의 기지국이 존재한다고 가정한다. 고려하는 모델 하에서, 셀 안 각 기지국은 단지 셀 안에 있는 사용자의 트래픽 요구

에만 관심이 있다.

기지국  $k$ 와 셀  $g$  안  $s$ 번째 사용자 사이의 채널을  $H_{g,s}^k$ 라 하자. 이 때, 채널이 한 전송 블록동안 일정하고 연속한 전송 블록 사이에서 독립적으로 변하는 블록 페이딩 모델을 가정한다. 채널 행렬은 Rayleigh 분포를 가지고, 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 독립 복소 가우시언 분포를 따른다. 각 선택된 사용자는 한 번에 하나의 데이터 스트림을 전송한다고 가정한다.  $g$ 번째 셀에서 전송할 기회를 얻은 사용자들의 집합을  $\Phi_g = \{\phi_g(1), \dots, \phi_g(S)\}$ 라 하자. 이 때,  $\phi_g(s) = \{1, \dots, N\}$ ,  $i \neq j$ 에 대해  $\phi_g(i) \neq \phi_g(j)$ 이고,  $S \subseteq \{1, \dots, M\}$ 은 활성화된 사용자 수를 나타내며 모든 셀에 대하여 동일하다고 가정한다.  $S$ 개 심볼이  $g$ 번째 셀 안  $\Phi_g$ 에 속해있는 사용자들에 의해 송신 빔형성 벡터  $\{v_{g,\phi_g(1)}, \dots, v_{g,\phi_g(S)}\}$ 를 사용하여 전송된다고 할 때, 기지국  $g$ 에서의 수신 신호  $r_g$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$r_g = \sum_{s \in \Phi_g} H_{g,s}^g v_{g,s} m_{g,s} + \sum_{k=1, k \neq g}^K \sum_{s \in \Phi_k} H_{k,s}^g v_{k,s} m_{k,s} + n_g \quad (1)$$

여기에서,  $m_g$ 는 셀  $g$  안에 있는 사용자  $s$ 의 전송 메시지도고,  $n_g$ 는 독립적 균일 분포(independent and identically distributed)를 갖는 평균이 0이며 분산이 1인 복소 부가 백색 가우시언 잡음(AWGN: additive white Gaussian noise)을 나타낸다. 각 송신 빔형성 벡터는  $\|v_{g,s}\|^2 = 1$ 로 정규화되어 있고, 각 사용자는 송신 전력 제한  $p_{g,s} = E[|m_{g,s}|^2] \leq \eta$ 를 가진다고 가정한다. 또한, 검파 과정에서 타 셀로부터의 간섭은 잡음으로 간주된다고 가정한다.

### III. 에너지 효율적 기하적 간섭 정렬

본 장에서는 에너지 효율적 기하적 간섭 정렬 프로토콜을 설명하고 결합 빔형성-전력 제어 알고리즘을 구체화한다.

#### 3.1. 프로토콜 설명

MIMO 간섭 다중 접속 채널 하에서 기존 기하적 간섭 정렬 기술과 비교하여 취득할 수 있는 합 용량을 개선할 뿐 아니라 송신 전력 소비를 줄일 수 있는 에너지 효율적 기하적 간섭 정렬 기술을 설명한다. [5, 6]과 유사하게 제안하는 프로토콜의 전체적인 절차는 시분할 듀플렉싱 시스템의 채널 상호성에 기반하여 전개된다. 따라서 각 사용자는 파일럿 신호를 통해 모든 수신 채널 링크의 정확한 추정치를 획득할 수 있다고 가정한다. 각 기지국은 수신 부공간  $W_g = \{w_g(1), \dots, w_g(S)\}$ 를 브로드캐스팅하는데, 이 때  $w_g$ 는  $W_g$ 의 orthonormal한 기저 벡터이다. 그 후, 각 사용자는 자신의 신호를 타 셀 수신 부공간(즉, 간섭 부공간)에 직교하는 공간에 정렬시킨다. 하지만,  $L \leq (K-1)S$ 일 때, 제안된 차원의 수 때문에 발생하는 간섭량은  $S < M$ 인 경우 정확히 정렬되지 않을 수 있고  $S = M$ 인 경우 널링되지 않을 수 있다. 따라서, 각 사용자는 송신 전력  $p_{g,s}$ 와 함께 데이터 스트림을 전송할 때 타 셀로 발생된 간섭량을 나타내는 간섭 누수를 계산하는데, 이는 아래와 같이 정의된다.

$$LIF_{g,s}(p_{g,s}, v_{g,s}) = p_{g,s} v_{g,s}^H C_{g,s} v_{g,s} \quad (2)$$

여기에서,  $C_{g,s} = \sum_{k=1, k \neq g}^K H_{g,s}^k H_{k,s}^H W_k W_k^H H_{g,s}^k$  이고 이는 발생된 간섭의 공분산 행렬 합을 나타낸다. 이 때, 수식 (2)에서의 변수  $p_{g,s}$ 는 사용자 간 어느 협력 없이 분산적인 방법으로 결정될 수 있다.

MIMO 간섭 다중 접속 채널 하에서, 최대 송신 전력과 함께 수식 (2)에서의 간섭 누수 값을 최소화하는 측면에서 각 사용자에서 eigen-beamforming을 수행하는 기존 기하적 간섭 정렬 기술 [6]과는 달리, 본 논문에서는 사전에 정의된 요구되는 신호 질을 유지하면서 더욱 간섭을 줄일 수 있는 결합 빔형성-전력 제어 기술을 고려한다 [8]. 이제 각 사용자에서 수행되는 송신 벡터 설계 및 전력 제어로 구성된 기하적 간섭 정렬 프로토콜을 구체적으로 설명한다. 프로토콜은 크게 아래와 같이 4 단계로 이루어진다.

• **1단계:** 각 기지국은 파일럿 신호와 함께  $S$ -차원 수신 공간을 랜덤하게 선택하고 브로드캐스트한다.

• **2단계:** 희망하는 신호의 요구되는 수신 전력 레벨  $\rho$ 가 각 사용자에게 사전에 알려져 있다고 가정하자. 각 사용자는 자신의 간섭 누수가 다른 사용자의 송신 전력에 관계없이 분산적으로 지엽적 채널 상태 정보 기반으로 최소화될 수 있는 그런 송신 전력 및 벡터  $\{p_{g,s}, v_{g,s}\}$ 를 찾는다. 셀  $g$ 에 속한 사용자  $s$ 에서의 최적화 문제는 제한 조건 (3b)가 없는 기존 문제 [6]와는 다르며, 아래와 같이 주어진다.

$$\{\hat{p}_{g,s}, \hat{v}_{g,s}\} = \arg \min_{p_{g,s}, v_{g,s}} LIF_{g,s}(p_{g,s}, v_{g,s}) \quad (3a)$$

subject to

$$p_{g,s} v_{g,s}^H G_{g,s} v_{g,s} = \rho \quad (3b)$$

$$\|v_{g,s}\|^2 = 1, p_{g,s} \leq \eta \quad (3c)$$

여기에서,  $G_{g,s} = H_{g,s}^H W_g W_g^H H_{g,s}$ 이다. 이 때, 제약 조건 (3b)에 대해, 기지국  $g$ 에서의 수신 SNR은  $\rho$ 와 같다.

• **3단계:** 해 집합  $\{\hat{p}_{g,s}, \hat{v}_{g,s}\}$ 를 가지는 사용자들은 계산한 간섭 누수를 그들이 속한 셀 기지국에 전송한다. 이 때, 두 가지 제약 조건 (3b) 및 (3c)를 동시에 만족하지 않는 사용자들이 존재할 수 있다. 그러한 사용자들은 간섭 누수를 전송하지 않는다.

• **4단계:** 각 기지국은  $S$ 번째까지 작은 간섭 누수 값을 생산하는 사용자들을 선택한다.

최종적으로, 각 셀에서 선택된 사용자들은 최적화된 전처리 (즉, 송신 벡터 및 전력 레벨)를 사용하여 자신의 패킷을 전송한다. 각 기지국은 수신 필터 (본 연구에서는 ZF 또는 MMSE 검파기 사용)를 사용하여 사용자들의 신호를 복호하는데, 이 때 타 셀로부터의 간섭은 잡음으로 간주한다.

### 3.2. 송신 벡터 설계 및 전력 제어 알고리즘

본 절에서는 각 사용자에서 최적의 집합  $\{\hat{v}_{g,s}, \hat{p}_{g,s}\}$ 를 찾는 방법에 대해 설명한다. 다음 theorem은 주요 결과를 보여준다.

**Theorem 1:** MIMO 간섭 다중 접속 채널에서, 제한 조건 (3b) 및 (3c)가 주어질 때, 셀  $g$ 에 속한 사용자  $s$ 에

서의 간섭 누수를 최소화하는 송신 벡터  $\hat{v}_{g,s}$ 는 아래와 같이 주어진다.

•  $\zeta(G_{g,s}) \geq \rho/\eta$ 이면  $\hat{v}_{g,s} = e_M(J_{g,s})$ 로 주어진다. 이 때,  $J_{g,s} = (C_{g,s} + \mu_{g,s} I_L)^{-1} G_{g,s}$ 이다.

•  $\zeta(G_{g,s}) < \rho/\eta$ 이면  $\hat{v}_{g,s}$ 에 대한 해가 존재하지 않는다.

여기에서,  $e_M(\cdot)$ 는 행렬의 최대 eigenvalue에 대응하는 eigenvector,  $\zeta(\cdot)$ 는 행렬의 최대 eigenvalue를 나타낸다. 또한,  $C_{g,s} = \sum_{k=1, k \neq g}^K H_{g,s}^H W_k W_k^H H_{g,s}$ ,

$G_{g,s} = H_{g,s}^H W_g W_g^H H_{g,s}$ , 그리고  $\mu_{g,s}$ 는 송신 전력 제한 (3c)에 대응하는 Lagrange multiplier이다. 이 때,  $\rho(e_M(C_{g,s}^{-1} G_{g,s})^H G_{g,s} e_M(C_{g,s}^{-1} G_{g,s}))^{-1} \leq \eta$ 이면  $\mu_{g,s} = 0$ 이 된다. 그렇지 않으면,  $\mu_{g,s}$ 는 아래 수식을 만족하는 값으로 주어진다.

$$\frac{\rho}{e_M(J_{g,s})^H G_{g,s} e_M(J_{g,s})} = \eta \quad (4)$$

여기에서,  $J_{g,s} = (C_{g,s} + \mu_{g,s} I_L)^{-1} G_{g,s}$ 이다. 그리고,  $\zeta(G_{g,s}) \geq \rho/\eta$ 인 경우 최적의 송신 전력  $\hat{p}_{g,s}$ 는 아래와 같이 주어진다.

•  $\mu_{g,s} = 0$ 이면

$\hat{p}_{g,s} = \rho(e_M(C_{g,s}^{-1} G_{g,s})^H G_{g,s} e_M(C_{g,s}^{-1} G_{g,s}))^{-1}$ 로 주어진다.

•  $\mu_{g,s} \neq 0$ 이면  $\hat{p}_{g,s} = \eta$ 이다.

$\mu_{g,s} = 0$ 이 가능한 경우를 제외하고,  $\mu_{g,s}$ 에 대한 닫힌 꼴 표현을 유도하는 것은 간단하지 않다. 대신에 최적의  $\mu_{g,s}$  및  $\hat{v}_{g,s}$ 는 단계적인 알고리즘에 의해 찾아질 수 있다. 구체적으로, 주어진 threshold  $\delta_{th} > 0$ 에 대해  $\delta_\mu > \delta_{th}$ 일 때,  $\mu_{g,s}$ 에 관해 수식 (4)의 해가 가까이 근사화되기 위해 변수  $\mu_{g,s}$ 는 작은 상수  $\delta_\mu > 0$ 에 의해 반복적으로 증가된다. 구체적인 알고리즘은 그림 1에서 보여진다.

#### IV. MMSE 수신기 설계

이전 연구 [5, 6]에서는 기회적 간섭 정렬 framework가 간단한 ZF 검파기를 사용하여 설계되었는데, 이는 수신 단에서 ZF 검파는 간섭 다중 접속 채널에서 최적의 자유도를 보장하기 충분하기 때문이다. 반면, 합 용량 측면에서의 시스템 성능은 ZF 검파 대비 개선된 수신기 구조를 사용함으로써 더욱 개선될 수 있다. 따라서 본 장에서는 동일한 채널 모델 (MIMO 간섭 다중 접속 채널 모델)에서 MMSE 검파기를 사용한 에너지 효율적 기회적 간섭 정렬 기술을 소개한다[9].

ZF 검파를 사용하는 기지국은 기지국 자신과 타 셀 사용자 간 채널 상태 정보를 획득할 필요가 없다. 하지만 ZF 검파를 사용하는 기술은 셀 당 사용자 수가 충분히 크지 않을 경우 성능 개선이 크지 않을 수 있다. 유한한 수의 셀 당 사용자에 대해 간섭은 완벽히 제거되지 않기 때문에, 각 수신 부공간에 남아있는 간섭량은 수신 신호 대 간섭 및 잡음비를 감소시키고, 이는 합 용량 측면에서의 성능 열화를 야기한다.

```

00: Initialize  $\mu_{g,s} = 0, \delta_\mu > 0, \delta_{th} > 0$ 
01: Compute  $C_{g,s}, G_{g,s}, \zeta(G_{g,s})$ 
02: if  $\zeta(G_{g,s}) < \rho/\eta$ 
03:   Set  $LIF_{g,s}(p_{g,s}, v_{g,s})$  to infinity
04: else
05:   Compute  $u_{g,s} = e_M(C_{g,s}^{-1} G_{g,s})$ 
06:   if  $\rho(u_{g,s}^H G_{g,s} u_{g,s})^{-1} \leq \eta$ 
07:      $\hat{v}_{g,s} = u_{g,s} \hat{p}_{g,s} = \rho(u_{g,s}^H G_{g,s} u_{g,s})^{-1}$ 
08:     Compute  $LIF_{g,s}(\hat{p}_{g,s}, \hat{v}_{g,s})$ 
09:   else
10:     while  $(\delta_\mu > \delta_{th})$ 
11:        $\mu_{g,s} = \mu_{g,s} + \delta_\mu, u_{g,s} = e_M(J_{g,s})$ 
12:       if  $\rho(u_{g,s}^H G_{g,s} u_{g,s})^{-1} \leq \eta$ 
13:          $\mu_{g,s} = \mu_{g,s} - \delta_\mu, \delta_\mu = \delta_\mu/2$ 
14:       end if
15:     end while
16:      $\hat{v}_{g,s} = u_{g,s}, \hat{p}_{g,s} = \eta$ 
17:     Compute  $LIF_{g,s}(\hat{p}_{g,s}, \hat{v}_{g,s})$ 
18:   end if
19: end if
    
```

그림 1. 에너지 효율적 기회적 간섭 정렬 알고리즘

Fig. 1 Energy-efficient opportunistic interference alignment algorithm

셀 간 간섭 (즉, 기지국과 타 셀 사용자 간 채널 링크)이 수신 단에서 알려져 있다면, 각 기지국은 홈 셀 사용자의 신호를 복호하면서 효율적으로 각 수신 부공간에 남아있는 간섭 레벨을 억제할 수 있다. MMSE와 수신 부공간 필터링은 기지국과 타 셀 사용자 간 채널 링크를 포함하는 추가적인 정보에 기반하여 설계된다. 셀  $g$ 에 속한 사용자  $\phi_g(s)$ 로부터 전송된 신호를 복호하기 위해 사용되는 기지국  $g$ 에서의 후처리 벡터를  $u_{g,\phi_g(s)}$ 라 하자.

이 때, 셀  $g$  내 사용자  $\phi_g(s)$ 로부터 전송된 신호가 복호되었다고 가정하면, MMSE 기반 수신 벡터는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$u_{g,\phi_g(s)} = e_M \left( (T_{g,\phi_g(s)})^{-1} Q_{g,\phi_g(s)} \right)$$

여기에서,

$$T_{g,\phi_g(s)} = I_M$$

$$\begin{aligned} & \sum_{a=1, a \neq s}^S p_{g,\phi_g(a)} H_{g,\phi_g(a)}^g v_{g,\phi_g(a)} (H_{g,\phi_g(a)}^g v_{g,\phi_g(a)})^H \\ & + \sum_{k=1, k \neq g}^K \sum_{a=1}^S p_{k,\phi_k(a)} H_{k,\phi_k(a)}^g v_{k,\phi_k(a)} (H_{k,\phi_k(a)}^g v_{k,\phi_k(a)})^H, \\ Q_{\phi_g(s)} &= H_{g,\phi_g(s)}^g v_{g,\phi_g(s)} (H_{g,\phi_g(s)}^g v_{g,\phi_g(s)})^H \end{aligned}$$

이다.

다중 셀 상향링크 네트워크 환경에서 ZF 및 MMSE 검파기 사용 시 각각 장단점이 존재한다. 앞서 언급한 바와 같이 ZF 기반 수신기는 단지 셀 내 채널 상태 정보에 기반하여 동작하기 때문에, 기지국에서 셀 간 간섭을 획득할 필요가 없으며, 따라서 셀 내 간섭 링크의 정보를 요구하는 MMSE 기반 수신기와 비교할 때 오버헤드를 줄일 수 있다. 반면, MMSE 검파를 사용한 기회적 간섭 정렬 기술은 거의 모든 SNR 영역에 대해 ZF 검파기를 사용한 경우보다 훨씬 더 높은 합 용량을 보장할 수 있게 된다. 이는 다음 장에서 컴퓨터 모의실험을 통해 확인할 수 있다.

## V. 모의실험 결과

본 장에서는 모의실험을 통해 기존 기회적 간섭 정렬 기술과 제안하는 에너지 효율적 기회적 간섭 정렬 기술 간 성능을 비교한다. 또한 ZF 검파 및 MMSE 검파 기반 기회적 간섭 정렬 기술 간 성능을 비교한다.

먼저 최대 송신 전력과 함께 동작하는 SVD 기반 기회적 간섭 정렬 기술 [6]과의 성능을 수치적으로 비교 분석한다. 모의실험 환경은  $K=3$ ,  $M=2$ ,  $L=2$ ,  $N=100$ 이다. 단위 잡음 분산 가정 하에서, 송신 전력 제한  $\eta$ 와 요구되는 원하는 신호에 대한 수신 전력 레벨  $\rho$ 은  $\eta = \rho = SNR$ 과 같이 설정된다.

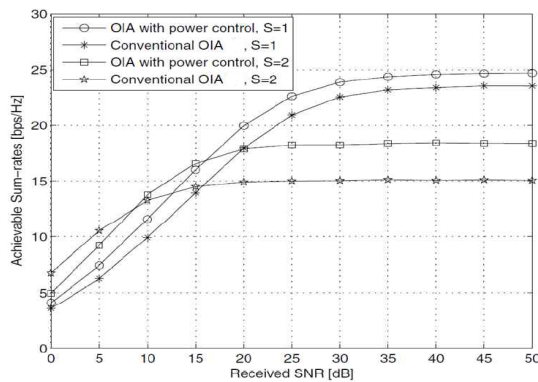


그림 2. SNR에 따른 [6]과 제안 기술 사이의 합 용량 비교  
Fig. 2 Sum-rate comparison between [6] and the proposed scheme with respect to SNR

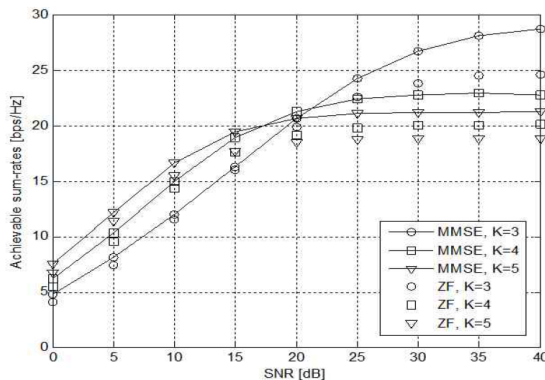


그림 3. SNR에 따른 ZF 및 MMSE 검파 기반 기술의 합 용량 비교  
Fig. 3 Sum-rate comparison between ZF- and MMSE-based detection schemes with respect to SNR

그림 2에서는 두 가지 기회적 간섭 정렬 기술의 합 용량이 수신 SNR (dB 스케일)에 따라 측정된다. 편의상 두 가지 기술 모두 수신 단에서 ZF 검파기를 사용한다. 심지어 더 작은 송신 전력과 함께 제안하는 기술은 전력 제어를 사용하지 않는 기존 기술과 비교할 때 거의 모든 SNR 영역에서 더 우수한 성능을 가짐을 확인할 수 있다. 보다 구체적으로  $S=1$ 인 경우 모든 SNR (0~50dB)에 대해 제안한 기술이 이득이 있고,  $S=2$ 인 경우 대략 8dB 이상의 SNR (8~50dB)에 대해 제안한 기술이 이득이 발생한다. 이 이득은 새로운 간섭 누수 측정에 기반하여 사용자 선택이 수행되어 발생하는데, 줄어든 송신 전력은 각 사용자가 발생하는 간섭량을 더욱 줄이는 효과를 야기하기 때문이다. 또한, 시스템 변수  $K$ ,  $M$ ,  $L$ ,  $N$ 에 의존하여  $S=1$  및 2인 경우 두 합 용량 커브 사이에 교차점이 존재함을 확인할 수 있다.

다음으로, ZF 검파 및 MMSE 검파 기반 기회적 간섭 정렬 기술 간 성능을 수치적으로 비교 분석한다. 모의 실험 환경은  $M=2$ ,  $L=2$ ,  $S=1$ ,  $N=100$ 이다. 단위 잡음 분산 가정 하에서, 송신 전력 제한  $\eta$ 와 요구되는 원하는 신호에 대한 수신 전력 레벨  $\rho$ 은  $\eta = \rho = SNR$ 과 같이 설정된다. 그림 3에서는  $K=3, 4, 5$ 에 대해 두 가지 검파 방법을 사용한 경우의 합 용량이 수신 SNR (dB 스케일)에 따라 측정된다. 거의 대부분의 SNR 영역에서 MMSE 검파를 사용한 기회적 간섭 정렬 기술이 대략 25% 가량 더 우수한 합 용량 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

## VI. 결 론

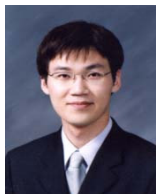
송신 전력 제어를 통한 에너지 효율적 기회적 간섭 정렬 프로토콜이 MIMO 간섭 다중 접속 채널에 대해 제안되었다. 이 기술은 추가적인 피드백/피드포워드 오버헤드 없이 분산적인 방법으로 동작할 수 있다. 보다 구체적으로, 최적의 송신 벡터 및 전력 집합을 소개하였다. 제안하는 기회적 간섭 정렬 기술은 대부분은 SNR 영역에서 전력 제어를 사용하지 않는 기존 기회적 간섭 정렬 기술보다 높은 합 용량을 취득할 수 있음을 보였다. 또한, ZF 검파 및 MMSE 검파를 사용한 에너지 효율적 기회적 간섭 정렬 기술의 성능을 비교하였고, MMSE 검파 방법이 더 높은 합 용량을 보장함을 확인하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부) 및 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A1044151, 2014R1A1A2054577).

## REFERENCES

- [1] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
- [2] T. Gou and S. A. Jafar, "Degrees of freedom of the K-user  $M \times N$  MIMO interference channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 12, pp. 6040-6057, Dec. 2010.
- [3] S. A. Jafar and S. Shamai (Shitz), "Degrees of freedom region of the MIMO X channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 1, pp. 151-170, Jan. 2008.
- [4] C. Suh and D. Tse, "Interference alignment for cellular networks," in *Proceedings of the 46th Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Urbana-Champaign, IL, pp. 1037-1044, Sept. 2008.
- [5] B. C. Jung, D. Park, and W.-Y. Shin, "Opportunistic interference mitigation achieves optimal degrees-of-freedom in wireless multi-cell uplink networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 7, pp. 1935-1944, July 2012.
- [6] H. J. Yang, W.-Y. Shin, B. C. Jung, and A. Paulraj, "Opportunistic interference alignment for MIMO interfering multiple-access channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 2180-2192, May 2013.
- [7] M.-J. Cho, T.-W. Ban, and B. C. Jung, "A threshold-based distributed user scheduling with transmit power control for uplink multi-cell networks," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no. 11, pp. 2607-2612, Nov. 2014.
- [8] J. Yoon, W.-Y. Shin, H. S. Lee, "Energy-efficient opportunistic interference alignment," *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 30-33, Jan. 2014.
- [9] W.-Y. Shin and J. Yoon, "Energy-efficient opportunistic interference alignment with MMSE receiver," *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*, vol. 3, no. 2, pp. 83-87, Apr. 2014.



신원용(Won-Yong Shin)

2002년 연세대학교 기계전자공학부 학사  
 2004년 KAIST 전자전산학과 석사  
 2008년 KAIST 전자전산학부 박사  
 2008년 2월~4월 Harvard University 방문연구원  
 2008년 9월~2009년 2월 KAIST BK 정보전자연구소 박사후연구원  
 2009년 3월~4월 KAIST 고성능집적시스템연구센터 선임급 위촉연구원  
 2009년 5월~2011년 10월 Harvard University Postdoctoral Fellow  
 2011년 10월~2012년 2월 Harvard University Research Associate  
 2012년 3월~현재 단국대학교 국제학부 모바일시스템공학전공/대학원 컴퓨터학과 조교수  
 ※관심분야: 정보이론, 통신이론, 신호처리, 모바일 컴퓨팅 빅데이터 분석

윤장호(Jangho Yoon)

2006년 KAIST 전자전산학부 전기 및 전자공학전공 학사  
 2008년 KAIST 전자전산학부 전기 및 전자공학전공 석사  
 2015년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사  
 ※관심분야: 통신이론, 신호처리, 간섭 네트워크 설계