

# 간섭정렬 기술동향 및 셀룰라 시스템 응용

전상운  
국립안동대학교

## 요약

본고에서는 최근 학계 및 산업계에서 활발히 연구되고 있는 간섭정렬 기술동향에 대해 소개한다. 특히 Signal Space 간섭정렬, Signal Scale 간섭정렬, Ergodic 간섭정렬의 기본 개념과 장단점 및 응용분야를 정리하였다. 또한 셀룰라 무선망에서의 간섭정렬에 대해 소개한다. 크게 단일안테나 환경과 다중안테나 환경에서의 간섭정렬로 나눌 수 있으며, 각각의 경우에 대해 기술동향 및 주요 연구결과를 정리하였다. 마지막으로 최근 Reverse TDD, 즉 상향링크와 하향링크가 공존하는 환경에서의 간섭정렬을 통해 다중안테나 셀룰라 무선망의 자유도를 획기적으로 개선 할 수 있는 연구결과를 소개한다.

## I. 서론

최근 스마트폰과 테블릿 PC의 등장으로 언제 어디서나 다양한 데이터 통신 서비스를 받고자 하는 사용자가 크게 증가하고 있다. 이러한 폭발적인 무선 트래픽을 기존 셀룰라 무선망을 통하여 제공하기 위한 다양한 전송기법들이 활발히 연구중이다. 대표적인 접근기법으로 다중안테나 기술, 스몰셀 무선망 구축 등을 통하여 무선망의 공간 자유도(Spatial Degrees of Freedom) 혹은 단위면적당 자유도(Degrees of Freedom per Area)를 증대시키는 기술이 논의되고 있다[1-6]. 또한 이와 병행하여 릴레이 협력 기술, 간섭제어 기술등과 같이 주어진 무선망의 자유도를 활용하여 최대의 전송율을 달성하고자 하는 연구 또한 활발히 진행중이다[7-11].

본고에서는 최근 활발히 연구중인 간섭제어 기법에 대해 소개하고자 한다. 기존의 간섭제어 기법은 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 직교화를 통한 간섭 회피
- 간섭을 잡음 취급

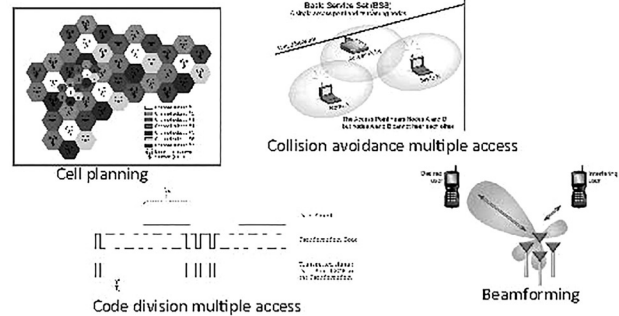
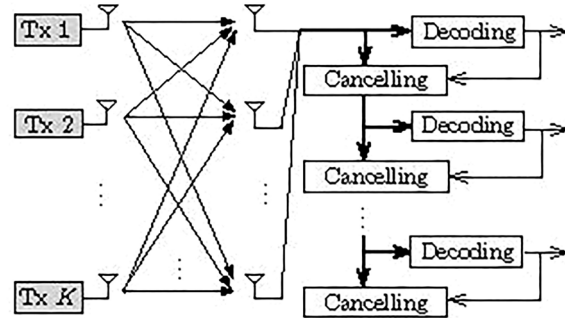


그림 1. 간섭 회피 및 잡음 취급하는 기법의 예

〈그림 1〉에서 확인할 수 있듯이 셀룰라 망의 셀 설계, CSMA, 다중안테나를 활용한 Zero-Forcing 빔성형 등이 이러한 기존 간섭제어 기법에 속한다.

또한 최근 간섭 메시지를 복조한 다음 이를 통해 간섭신호를 제거하는 간섭 디코딩 기술이 다양한 통신 환경에서 최적에 근접한 망의 용량을 달성할 수 있음이 밝혀졌다.



Successive interference cancellation for V-BLAST

그림 2. V-BLAST에서의 순차적 간섭 제거

〈그림 2〉에서 확인할 수 있듯이 셀룰라 하향링크에서 기지국이 다중안테나를 설치한 경우, 각 사용자의 메시지를 복조한 다음 이를 통해 간섭신호를 제거 후 다음 사용자의 메시지를 복조하는 순차적 간섭제어 기법을 통해 망의 최적의 용량을 달성할 수 있다.

앞서 소개한 직교화를 통한 간섭 회피, 간섭을 잡음 취급, 간섭 디코딩 기술로는 일반적인 다중 사용자 환경에서 최적의 자유도 혹은 전송율을 달성하는데 한계가 있다. 최근 이 같은 한계를 극복하는 간섭제어의 새로운 패러다임이 제시되었다 [7-11]. 간섭정렬이라고 불리는 간섭제어 기법으로써 다수의 간섭 신호를 특정 신호 영역에 정렬 시킨 후 각각을 독립적으로 복조하지 않고 원하는 메시지를 복조하는 방식이다. 이는 앞서 소개한 간섭제어 방법과는 완전히 다른 접근방식으로, 다양한 통신 환경 및 응용 분야에서 무한한 가능성을 인정받고 있다.

본고에서는 간섭정렬의 개념 및 방법과 최근 연구동향에 대해 소개하고자 한다. 특히 학계 및 산업계에서 가장 활발히 연구되는 셀룰라 무선망에서의 간섭정렬 기법에 초점을 맞추어 최근 연구 동향을 소개한다.

## II. 간섭정렬 기술동향

다중안테나 기술이 활발히 연구되면서 무선망의 자유도가 중요한 성능 지표로 최근 인식되고 있다. 먼저 다음과 같은  $K \times K$  다중안테나 채널을 고려하자.

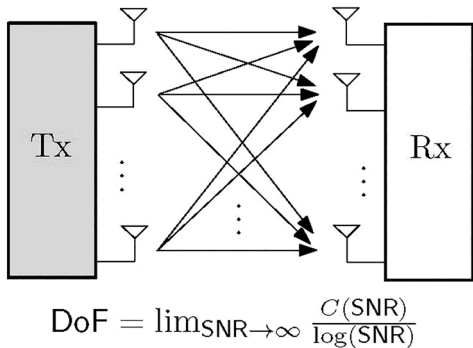


그림 3.  $K \times K$  다중안테나 채널의 자유도

이 경우 자유도는 <그림 3>과 같이 정의되며, 신호대잡음비 (SNR)가 큰 영역에서 단일 안테나 대비 다중안테나를 사용할 경우 몇 배의 전송율 이득이 있는지를 나타낸다[1-6]. 송수신단에 각각  $K$ 개의 안테나를 설치할 경우 최적 자유도는  $K$ 에 선형적으로 비례하게 된다. 이러한 연구결과는 단일셀 셀룰라 무선망의 용량을 획기적으로 개선시킬 수 있음을 의미한다[1-6].

다음으로 다음과 같은  $K$ -사용자 간섭채널을 고려하자. <그림 4>와 같이 자유도 합이 정의되며 단일 사용자 대비 다중 사용자 환경에서 몇 배의 전송률 이득이 있는지를 나타내는 지표이다. 많은 전문가들이 사용자간 간섭으로 인하여 최적 자유도가 1이라고 예상하였지만, 최근 제안된 간섭정렬이란 기술을

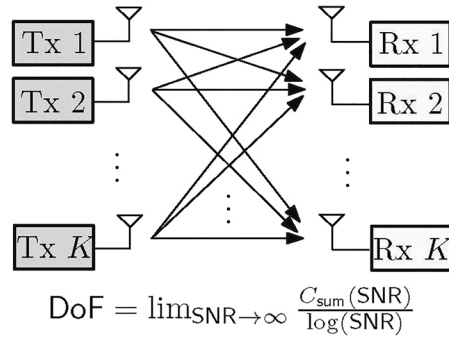


그림 4.  $K$ -사용자 간섭채널의 자유도

통하여 최적의 자유도  $K/2$ 를 달성할 수 있음이 최근 증명되었다 [7]. 따라서 간섭정렬은 다중셀 셀룰라 무선망의 용량을 획기적으로 개선시킬 수 있는 핵심 기술이다. 본 장에서는 최근 제안된 다양한 종류의 간섭 정렬 기법을 소개한다.

### 1. Signal Space 간섭정렬

먼저 가장 활발히 연구되고 있는 Signal Space 간섭정렬에 대해 소개한다. 간섭정렬이 처음 제안된 참고논문 [7]에서 Signal Space 간섭정렬을 통해  $K$ -사용자 간섭채널의 최적 자유도가  $K/2$ 임을 증명하였다. Signal Space 간섭정렬의 기본 개념 설명을 위해 본 절에서는 3-사용자 환경에서 자유도 4/3을 달성하는 예를 소개한다.

<그림 5>는 심볼시간 3을 사용하는 3-사용자 간섭채널이다. 여기서  $\mathbf{H}_{ij}$ 는 송신단  $j$ 에서 수신단  $i$ 까지의  $3 \times 3$ 채널행렬을 나타내며  $\mathbf{v}_i$ 은  $3 \times 1$  송신빔벡터를 의미한다. 그림에서 보듯이 첫번째 송신단은 두 개의 정보심볼  $s_1, s_2$ 를 각각 송신빔벡터  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 를 통해 전송한다. 마찬가지로 두번째 송신단은 정보심볼  $s_3$ 를 송신빔벡터  $\mathbf{v}_3$ 를 통해 전송하고, 세번째 송신단은 정보심볼  $s_4$ 를 송신빔벡터  $\mathbf{v}_4$ 를 통해 전송한다. 이때 다음과 같은 조건을 만족하도록 송신빔벡터들을 설정할 수 있다.

$$\mathbf{H}_{12} \mathbf{v}_3 = \mathbf{H}_{13} \mathbf{v}_4$$

$$\mathbf{H}_{21} \mathbf{v}_1 = \mathbf{H}_{23} \mathbf{v}_4$$

$$\mathbf{H}_{31} \mathbf{v}_2 = \mathbf{H}_{32} \mathbf{v}_3$$

$$span(\mathbf{H}_{11} \mathbf{v}_1, \mathbf{H}_{11} \mathbf{v}_2, \mathbf{H}_{12} \mathbf{v}_3) = C^{3 \times 3}$$

$$span(\mathbf{H}_{21} \mathbf{v}_1, \mathbf{H}_{21} \mathbf{v}_2, \mathbf{H}_{22} \mathbf{v}_3) = C^{3 \times 3}$$

$$span(\mathbf{H}_{31} \mathbf{v}_1, \mathbf{H}_{31} \mathbf{v}_2, \mathbf{H}_{33} \mathbf{v}_4) = C^{3 \times 3}$$

따라서 <그림 5>와 같이 각 수신단은 Zero-Forcing 수신기를 통해 각자의 정보심볼을 추정할 수 있다. 이 경우 3심볼시간

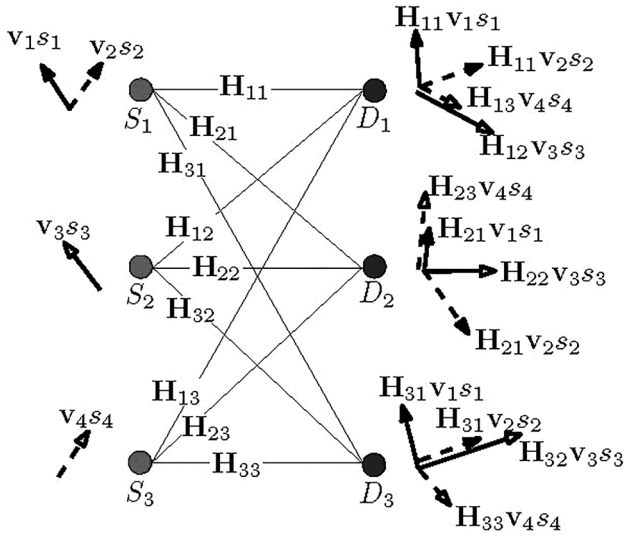


그림 5.  $K$ -사용자 간섭채널에서의 Signal Space 간섭정렬 예시

을 사용하여 총 4개의 정보심볼을 전송할 수 있으므로, 4/3의 자유도를 달성한다.

참고논문 [7]에서는 이 같은 Signal Space 간섭정렬을 임의의 긴 심볼시간을 사용하여 수행하면  $K/2$ 에 수렴하는 자유도를 획득할 수 있음을 증명하였다.

**확장 및 응용분야:** 앞서 간략히 소개한 Signal Space 간섭정렬은 간섭채널 이외에도 다양한 무선 환경에 적용되어 그 가능성을 인정받고 있다. 구체적으로 살펴보면 기존  $K$ -사용자 간섭채널에 다중안테나 환경을 고려한 연구[8], 사용자간 협력이 가능한 환경을 고려한 연구[9][10], 좀더 일반적인 메시지 집합을 고려한 연구[11] 등이 있다. 또한 Signal Space 간섭정렬을 릴레이 환경에 적용하여  $2 \times 2 \times 2$ 무선망의 최적 자유도가 2가 됨을 최초로 구명한 연구가 최근 수행되었다[12]. Signal Space 간섭정렬은 무선망 통신에만 국한되지 않고 Distributed Storage[13,14], Index Coding[15] 등에도 적용되어 획기적인 성능 개선을 달성하여 그 무한한 가능성을 인정받고 있다.

## 2. Signal Scale 간섭정렬

Signal Space 간섭정렬은 앞서 소개한 확장 및 응용분야에서 확인할 수 있듯이, 다양한 환경에 적용 가능하다. 하지만 기존기법 대비 Signal Space 간섭정렬을 통해 성능 이득을 달성하기 위해서는 채널이 시간에 따라 변하는 시변 특성을 만족하여야 한다. 즉, 무선채널이 이러한 시변 특성을 만족하지 못하거나 Coherent Time이 큰 경우 Signal Space 간섭정렬을 적용할 수 없다. 또한 Signal Space 간섭정렬은 다수의 심볼시간 동안 송신빔벡터를 형성하여 전송하여야 하기 때문에 시스템 복잡도가 증가하게 된다. 이러한 단점을 해결하기 위해 Signal

Scale 간섭정렬이 제안되었다 [40][41].

Signal Scale 간섭정렬은 보내고자 하는 정보를 전송 신호의 정수 값에만 대응하여 전송한다. 따라서 이러한 전송신호가 채널을 겪은 후 수신단에서 수신할 때 기존의 정보, 즉 정수 값을 추정할 수 있도록 한다. 이러한 구조를 통하여 단일 심볼 시간 동안 송수신이 가능하게 되어 채널의 Coherent Time과 무관하게 간섭정렬을 수행할 수 있다 [40][41]. 하지만 Signal Space 간섭정렬은 상용 통신시스템에서 보편적으로 사용하는 선형 송수신 구조가 아니기 때문에 실제 구현하는데 큰 어려움이 존재한다.

## 3. Ergodic 간섭정렬

앞서 소개한 두 간섭정렬 기법은 다양한 무선망의 최적 자유도를 달성한다. 즉, 최적 자유도란 최대 용량의  $O(\log SNR)$ 에 근접한 성능을 달성함을 의미한다. 하지만 상용통신 시스템의 경우, 시스템의 동작 영역에 따라서  $O(\log SNR)$  전송을 차이가 큰 성능열화를 가져 올 수 있다. 따라서 자유도보다 좀더 엄밀한 성능지표를 요구하는 경우가 발생한다.

최근 제안된 Ergodic 간섭정렬은 임의의 신호대잡음비 영역에서도 간섭정렬이 가능하여 자유도보다 좀더 엄밀한 성능지표를 제공해 준다. Ergodic 간섭정렬의 기본개념을 다음 2-사용자 간섭채널을 통해 설명하겠다 [18][19][20].

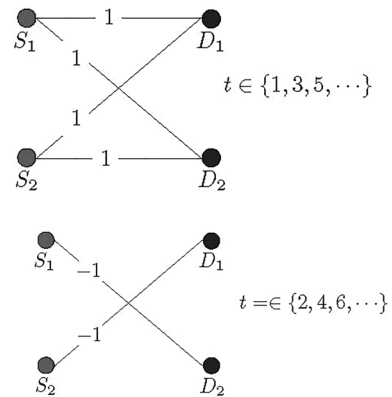


그림 6. 시변채널 특성을 갖는 2-사용자 간섭채널

<그림 6>과 같이 홀수 심볼시간과 짝수 심볼시간 동안 채널이 다음과 같이 주어진다고 가정한다.

$$\mathbf{H}[t] = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} & \text{for } t = 1, 3, 5, \dots \\ \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} & \text{for } t = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

만약 홀수 심볼시간과 짝수 심볼시간 동안 각각 코딩을 하게 될 경우 자유도는 1/2을 넘지 못한다. 하지만 두 심볼시간 동안 동일한 신호 벡터  $[x_1, x_2]$ 를 송신단에서 각각 전송하면 (즉, 첫번째 송신단은  $x_1$ 을 두번째 송신단은  $x_2$ 를 전송), 첫번째 수신단의 첫번째 심볼시간, 두번째 심볼시간의 수신신호는 각각 다음과 같다 (편의상 잡음신호는 생략).

$$y_1[1] = x_1 + x_2$$

$$y_1[2] = -x_2$$

따라서  $y_1[1] + y_2[2]$ 를 통해 자신의 정보심볼을 추정할 수 있다. 이 같은 아이디어는 Rayleigh fading 과 같은 실제 무선 환경에 그대로 적용 가능하다[18].

**Ergodic Capacity:** 최근 이러한 Ergodic 간섭정렬을 통하여 망의 최대 용량에 수비트 이내로 근접하는 성능을 달성할 수 있음이 증명되었다 [21]. 이는 무선망의 동작영역, 즉 신호대잡음비에 무관하게 달성 가능한 성능지표이므로 그 의미가 크다고 할 수 있다.

**확장 및 응용분야:**  $K$ -사용자 간섭채널에서 제안된 Ergodic 간섭정렬은, 이후 2-사용자 X 채널 및 Secrecy 분야에도 확장 적용되었다[22]. 또한 유사한 개념이 릴레이 무선망에도 확장 적용되어 채널을 통하여 간섭을 상쇄하는 기법이 제안되었다 [21][23].

### III. 셀룰라 간섭정렬

셀룰라 무선망은 학계 및 산업계에서 가장 중요하게 조명받는 통신시스템이다. 간섭정렬이  $K$ -사용자 간섭채널의 자유도를 획기적으로 개선한다는 연구결과가 발표된 이래, 많은 연구자들이 이를 셀룰라 망에 적용하기 위해 노력하고 있다. 본 장에서는 이에 대한 연구동향을 집중적으로 다루고자 한다. 먼저 단일안테나 셀룰라 무선망 간섭기술을 다루고, 이후 최근 활발히 연구 중인 다중안테나 셀룰라 무선망에서의 간섭 정렬을 소개한다.

#### 1. 단일안테나 셀룰라 무선망

단일안테나 셀룰라 무선망에서의 간섭정렬은 참고문헌 [42] [43]에서 상향링크, 하향링크 상황을 고려하여 제안되었다. 상향링크 Duality가 성립하므로 편의상 하향링크를 기준으로 기술동향을 소개한다.

<그림 7>과 같이 이중셀 환경을 고려하며, 각 셀에 2명의 사용자가 존재함을 가정하자. 이 경우 참고문헌 [43]의 제안기법은 다음과 같다. 각 기지국은 3 심볼시간 동안 사용자에게 정보 심볼 1개를 송신빔벡터를 통해 전송한다. 이때 그림 7과 같이 두단계를 통과하는 빔성형을 통하여 각 사용자에서 간섭신호 3개가 총 2개의 신호영역에만 존재하도록 송신빔벡터를 만들 수 있다. 즉, 3 심볼시간 동안 총 4개의 정보심볼을 전송하므로 4/3 자유도를 달성할 수 있다. 참고문헌 [43]은 이를 일반적인  $K$  사용자가 존재할 경우 다음과 같은 자유도를 달성할 수 있음을 규명하였다.

$$\frac{2K}{K+1}$$

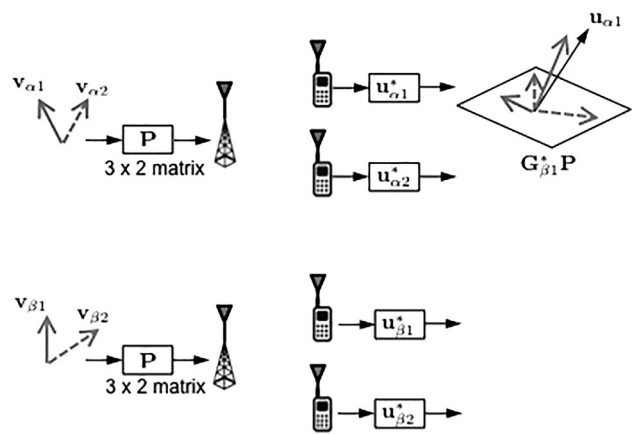


그림 7. 셀룰라 하향링크 간섭정렬

즉, 각 셀의 사용자 수  $K$ 가 증가할수록 자유도는 2에 수렴하게 된다. 따라서 사용자수가 증가할수록 간섭정렬을 통하여 셀 간의 간섭이 영으로 수렴하도록 할 수 있다.

#### 2. 다중안테나 셀룰라 무선망

앞서 서론에서 설명하였듯이, 단일셀 환경에서 자유도를 개선하는 핵심 기법인 다중안테나 기술과 다중셀 환경에서 자유도를 개선하는 핵심 기법인 간섭정렬을 융합하는 기술 개발이 최근 활발히 이루어지고 있다 [26-30]. 본 장에서는 이와 관련한 연구동향 및 결과를 소개한다.

다중셀 다중안테나 셀룰라 망의 기본인 다음 모델을 고려하자. 상향링크 Duality가 성립하므로 편의상 하향링크를 기준으로 기술동향을 소개한다. <그림 8>과 같이 일반적인 이중셀 다중안테나 셀룰라 망을 고려하자. 여기서 첫번째 셀은  $M_1$ 개의 안테나를 가진 기지국과  $N_1$ 명의 사용자로 구성되며 두번째



셀은  $M_2$ 개의 안테나를 가진 기지국과  $N_2$ 명의 사용자로 구성된다. 이러한 일반적인 환경에서 최적의 자유도는 완전히 규명되지 않았다. 크게 다음과 같이 두 영역으로 나눌 수 있다.

Regime 1:  $\max(M_1, M_2) \geq \min(N_1, N_2)$

Regime 2:  $\max(M_1, M_2) < \min(N_1, N_2)$

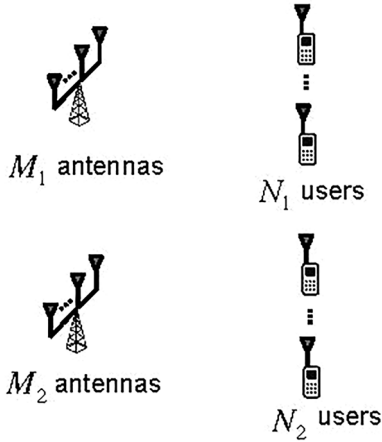


그림 8. 이중셀 다중안테나 셀룰라 망

첫번째 영역은 기지국 안테나 수가 사용자 수보다 상대적으로 많은 영역으로, 이 경우 다중안테나를 사용한 Zero-Forcing 기법이 최적의 자유도를 달성하며 다음과 같다[31].

$$\min\{N_1 + N_2, \max(M_1, N_2), \max(M_2, N_1)\}$$

두번째 영역에서 최적의 자유도는 완전히 규명되지 않았으며,  $M_1 = M_2 = M, N_1 = N_2 = N$ 을 만족하는 경우에는 X 채널에서 제안된 간섭정렬을 통해 다음과 같은 최적의 자유도를 달성할 수 있음이 규명되었다[32].

$$\frac{2MN}{M + N}$$

〈그림 9〉는  $M_1 = M_2 = M, N_1 = N_2 = N$ 을 만족할 때 (즉 이 경우 최적의 자유도가 규명됨),  $M = 10$  인 경우  $N$ 을 변화시키며 최적의 자유도를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 기지국 안테나 수와 사용자 수에 따라 최적의 기법이 달라진다. 하지만 〈그림 8〉로 표현되는 일반적인 이중셀 환경에서는 두 기법을 어떻게 융합하여 최적의 자유도를 달성할 수 있는지는 아직 규명되지 않았다.

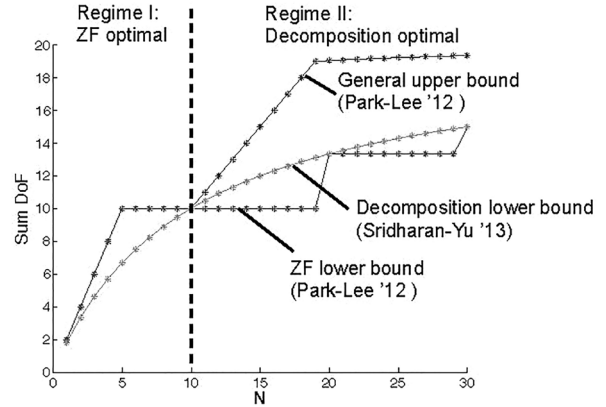


그림 9.  $M_1 = M_2 = 10, N_1 = N_2 = N$ 인 경우, 최적의 자유도

### 3. Reverse TDD 시스템

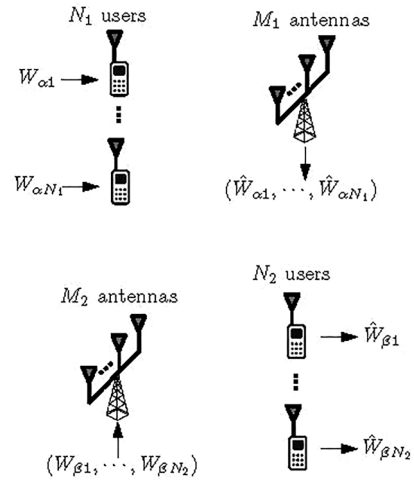


그림 10. Reverse TDD 다중안테나 셀룰라 무선망

최근 다중안테나 셀룰라 망의 최적 자유도 규명 연구와 관련하여 Reverse TDD 시스템이 조명받고 있다 [33–38]. 〈그림 10〉과 같이 이중셀 환경에서 Reverse TDD를 고려하자. 즉, 첫번째 셀은 상향링크, 두번째 셀은 하향링크로 동작한다. 이 경우 최적의 자유도는 다음과 같음이 규명되었다[39].

$$d_{\Sigma} = \min\left\{\frac{N_1 N_2 + T_1 + T_2}{\max(N_1, N_2)}, M_1 + N_2, N_1 + M_2, \max(M_1, M_2), \max(N_1, N_2)\right\}$$

여기서  $T_1, T_2$ 는 다음과 같다.

$$T_1 = \min(M_1, N_1(N_1 - N_2))^+$$

$$T_2 = \min(M_2, N_2)(N_2 - N_1)^+$$

$M_1 = N_2 = M, N_1 = M_2 = N$ 인 경우 최적의 자유도를 도시하면 <그림 11>과 같다. 이러한 환경에서 두 셀을 모두 상향링크 혹은 하향링크로 동작시키면 Single-Cell Lower Bound, 즉 두 셀 중 하나만 동작시켰을 경우의 자유도를 달성하게 된다. 따라서 다중안테나 셀룰라 망의 경우 안테나, 사용자 환경에 따라서 Reverse TDD로 동작하면 획기적인 자유도 개선이 가능하다.

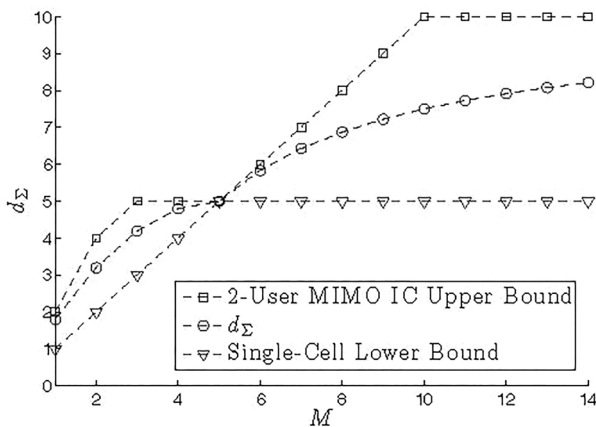


그림 11.  $M_1 = N_2 = M, N_1 = M_2 = N$ 인 경우 최적의 자유도

## IV. 결론

본고에서는 최근 활발히 연구중인 간섭정렬의 기술동향과 관련 응용분야를 소개하였다. 특히 학계 및 산업계에서 중요한 셀룰라 무선망을 중심으로 다중안테나를 활용한 간섭정렬 기술을 소개하였다.

### Acknowledgement

이 논문은 2013년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임 (NRF-2013R1A1A1064955)

## 참고 문헌

[1] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, vol. 6, pp. 311–335, Mar. 1998.

[2] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Trans. on Telecommun.*, vol. 10, pp. 585–595, Nov. 1999.

[3] G. Caire and S. Shamai (Shitz), "On the achievable throughput of a multiantenna Gaussian broadcast channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, pp. 1691–1706, Jul. 2003.

[4] S. Vishwanath, N. Jindal, and A. J. Goldsmith, "Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of Gaussian MIMO broadcast channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, pp. 2658–2668, Oct. 2003.

[5] P. Viswanath and D. N. C. Tse, "Sum capacity of the vector Gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, pp. 1912–1921, Aug. 2003.

[6] S.-W. Jeon and S.-Y. Chung, "Capacity scaling of single-source multiantenna wireless networks without CSIT," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, pp. 6405–6420, Oct. 2013.

[7] 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.

[8] T. Gou and S. A. Jafar, "Degrees of freedom of the K-user M x N MIMO interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, pp. 6040–6057, Dec. 2010.

[9] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Degrees of freedom of wireless networks with relays, feedback, cooperation and full duplex operation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, pp. 2334–2344, May. 2009.

[10] V. S. Annapureddy, A. El-Gamal, and V. V. Veeravalli, "Degrees of freedom of interference channels with CoMP transmission and reception," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, pp. 5740–5760, Sep. 2012.

[11] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and the degrees of freedom of wireless X networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, pp. 3893–3908, Sep. 2009.

[12] T. Gou, S. A. Jafar, C. Wang, S.-W. Jeon, and S.-Y. Chung, "Aligned interference neutralization and

- the degrees of freedom of the  $2 \times 2 \times 2$  interference channel,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, pp. 4381–4395, Jul. 2012.
- [13] C. Suh and K. Ramchandran, “Exact–repair MDS code construction using interference alignment,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, pp. 1425–1442, Mar. 2011.
- [14] V. R. Cadambe, S. A. Jafar, H. Maleki, K. Ramchandran, and C. Suh, “Asymptotic interference alignment for optimal repair MDS codes in distributed storage,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, pp. 2974–2987, May 2013.
- [15] H. Maleki, V. R. Cadambe, and S. A. Jafar, “Index coding—An interference alignment perspective,” in *proc. IEEE ISIT*, Cambridge, MA, Jul. 2012.
- [16] S.–W. Jeon, G. Naveen, and M. Gastpar, “Degrees of freedom of sparsely connected wireless networks,” in *Proc. IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Cambridge, MA, Jul. 2012.
- [17] S.–W. Jeon, S.–Y. Chung, and S. A. Jafar, “Degrees of freedom of multi–source relay networks,” in *Proc. Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Monticello, IL, Sep. 2009.
- [18] B. Nazer, M. Gastpar, S. A. Jafar, and S. Vishwanath, “Ergodic interference alignment,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, pp. 635–6371, Oct. 2012.
- [19] S.–W. Jeon and S.–Y. Chung, “Capacity of a class of linear binary field multisource relay networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, pp. 6405–6420, Oct. 2013.
- [20] S.–W. Jeon and M. Gastpar, “A survey on interference networks: Interference alignment and neutralization,” *Entropy*, vol. 14, pp. 1842–1863, Sep. 2012.
- [21] S.–W. Jeon, C.–Y. Wang, and M. Gastpar, “Approximate ergodic capacity of a class of fading two–user two–hop networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, pp. 866–880, Feb. 2014.
- [22] O. O. Koyluoglu, H. El Gamal, L. Lai, and H. V. Poor, “Interference alignment for secrecy,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, pp. 3323–3332, Jun. 2011.
- [23] S.–W. Jeon, S.–Y. Chung, and S. A. Jafar, “Degrees of freedom region of a class of multisource Gaussian relay networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, pp. 3032–3044, May 2011.
- [24] S.–W. Jeon and S.–Y. Chung, “Capacity of a class of multi–source relay networks,” in *Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, La Jolla, CA, Feb. 2009.
- [25] D.–W. Seo, S.–W. Jeon, S.–Y. Chung, and J. Kim, “Rate enhancement for the Gaussian Z–interference channel with transmitter cooperation,” *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 9, pp. 821–823, Sep. 2010.
- [26] T. Kim, D. J. Love, and B. Clerckx, “On the spatial degrees of freedom of multicell and multiuser MIMO channels,” in *arXiv:1111.3160*, Nov. 2011.
- [27] D. Hwang, “Interference alignment for the multi–cell multiuser interference channel,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, pp. 831–833, Jun. 2012.
- [28] W. Shin, N. Lee, J.–B. Kim, C. Shin, and K. Jang, “On the design of interference alignment scheme for two–cell MIMO interfering broadcast channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, pp. 437–442, Feb. 2011.
- [29] S. Chae, S.–W. Jeon, and S.–Y. Chung, “Cooperative relaying for the rank–deficient MIMO relay interference channel,” *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 9–11, Jan. 2012.
- [30] T. Liu and C. Yang, “Genie chain and degrees of freedom of symmetric MIMO interference broadcast channels,” in *arXiv:cs.IT/1309.6727*, Sep. 2013.
- [31] S.–H. Park and I. Lee, “Degrees of freedom for mutually interfering broadcast channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, pp. 393–402, Jan. 2012.
- [32] G. Sridharan and W. Yu, “Degrees of freedom of MIMO cellular networks: Decomposition and linear beamforming design,” in *arXiv:cs.IT/1312.2681*, 2013.
- [33] A. Ghosh, N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, M. C. B. Mondal, E. Visotsky, T. A. Thomas, J. G. Andrews, P. Xia, H. S. Jo, H. S. Dhillon, and T. D. Novlan, “Heterogeneous cellular networks: From theory to

practice,” IEEE Commun. Mag., vol. 50, pp. 54–64, Jun. 2012.

- [34] M. Kountouris and N. Pappas, “HetNets and massive MIMO: Modeling, potential gains, and performance analysis,” in Proc. IEEE Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Torino, Italy, Sep. 2013.
- [35] J. Hoydis, K. Hosseini, S. ten Brink, and M. Debbah, “Making smart use of excess antennas: Massive MIMO, small cells, and TDD,” Bell Labs Technical Journal, vol. 18, pp 5–21, Sep. 2013.
- [36] K. Hosseini, J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbah, “Massive MIMO and small cells: How to densify heterogeneous networks,” in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, Hungary, Jun. 2013.
- [37] J. G. Andrews, “Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift,” IEEE Commun. Mag., vol. 51, pp. 136–144, Mar. 2013.
- [38] A. Adhikary, E. Al Safadi, and G. Caire, “Massive MIMO and inter-tier interference coordination,” in Information Theory and Applications Workshop (ITA), San Diego, CA, Feb. 2014.
- [39] S.-W. Jeon and C. Suh, “Degrees of freedom of uplink-downlink multiantenna cellular networks,” in arXiv:cs.IT/1404.6012, Apr. 2014.
- [40] A. S. Motahari, S. O. Gharan, and A. K. Khandani, “Real interference alignment with real numbers,” in arXiv:cs.IT/0908.1208, 2009.
- [41] A. S. Motahari, S. O. Gharan, M. A. Maddah-Ali, and A. K. Khandani, “Real interference alignment: Exploiting the potential of single antenna systems,” in arXiv:cs.IT/0908.2282, 2009.
- [42] C. Suh and D. N. C. Tse, “Interference alignment for cellular networks,” in Proc. 46th Annu. Allerton Conf. Communication, Control, and Computing, Monticello, IL, Sep. 2008.
- [43] C. Suh, M. Ho, and D. N. C. Tse, “Downlink interference alignment,” IEEE Trans. Commun., vol. 59, pp. 2616–2626, Sep. 2011.

## 약 력



전 상 운

2003년 연세대학교 전기전자공학부 공학사  
 2006년 연세대학교 전기전자공학부 공학석사  
 2011년 한국과학기술원 전기전자공학과 공학박사  
 2011년~2013년 스위스 로잔연방공과대학교  
 (EPFL) 박사후연구원  
 2013년~현재 국립안동대학교 정보통신공학과  
 조교수  
 관심분야: 정보이론, 무선통신