

# 셀룰러 네트워크상의 간섭정렬을 위한 반복 알고리즘

여 정 호\*, 조 준 호<sup>o</sup>

## Iterative Algorithms for Interference Alignment in Cellular Network

Jeong Ho Yeo\*, Joon Ho Cho<sup>o</sup>

요 약

본 논문에서는 셀룰러 네트워크상의 간섭정렬을 위한 송수신벡터를 구하는 반복 알고리즘들을 제안한다. 기존의 간섭채널상의 간섭정렬을 위해 고안된 반복 알고리즘을 셀룰러 네트워크에 적용하는 것이 물론 가능하지만, 높은 합용량을 달성하려면 큰 반복횟수가 필요하다. 본 논문에서 제안된 알고리즘의 핵심은 상향링크의 송신벡터 그리고 하향링크의 수신벡터를 갱신할 때 셀내간섭을 고려하지 않는다는 점이다. 모의실험은 간섭정렬을 위해 다중 안테나와 단일 반송파가 사용되었을 때, 제안된 알고리즘이 기존의 알고리즘보다 주어진 반복횟수에서 월등히 높은 합용량을 달성함을 보인다. 또한 제안된 알고리즘이 간섭정렬을 위해 단일 안테나와 다중 반송파가 사용되었을 때도 기존 간섭정렬 알고리즘보다 성능이 우수함을 보인다.

**Key Words** : interference alignment, iterative algorithm, cellular network, 간섭정렬, 반복 알고리즘, 셀룰러 네트워크

### ABSTRACT

In this paper, we propose iterative algorithms to obtain the transmit and the receive vectors for interference alignment in cellular network. Although the conventional interference alignment algorithms for interference channels can be applied to cellular network, the number of iterations required to achieve a high sum rate is very large. The key idea in the proposed algorithms is to ignore intra-cell interference in updating the transmit vector for uplink and the receive vector for downlink. Numerical results show that the proposed algorithms achieve higher sum rates than the conventional algorithms for given iteration numbers when multiple antennas and a single carrier are used for interference alignment. It is also shown that the proposed algorithms outperform the conventional algorithms when a single antenna and multiple subcarriers are used for interference alignment.

### I. 서 론

다수의 송수신기가 존재하는 채널에서 합용량(sum rate) 성능을 감소시키는 주요한 원인은 원하

지 않는 송신기로부터 수신되는 간섭이다. 원하지 않는 간섭을 완전히 회피할 수 있는 간단한 방법 중 하나는 다중 접근 채널(multiple access channel: MAC)에서의 주파수 분할 다중 접속(frequency

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(NIPA-2012-(H0301-12-1003))의 연구결과로 수행되었습니다.

※ 본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(2009-0088483)의 지원을 받아 수행되었습니다.

※ 본 연구는 LG전자의 지원을 받아 수행되었습니다.

♦ 저자: 포항공과대학교 전자전기공학과 통신 및 정보 시스템 연구실, yjh2304@postech.ac.kr, 정희원

o 교신저자: 포항공과대학교 전자전기공학과 통신 및 정보 시스템 연구실, jcho@postech.ac.kr, 조준호

논문번호: KICS2012-08-410, 접수일자: 2012년 8월 31일, 최종논문접수일자: 2012년 10월 12일

division multiple access: FDMA)이나 시분할 다중 접속(time division multiple access: TDMA)과 같이 주파수나 시간 등의 신호공간을 송신신호들이 직교하도록 나누어 사용하는 것이다.  $K$ 명의 사용자가 존재하는 간섭채널에서도 제한된 신호공간을  $K$ 명의 송신신호가 직교하도록 나누어 사용하여 간섭을 회피하는 것이 가능하다. 하지만, 이러한 방법은 간섭채널의 각 사용자에게 할당되는 신호공간을 사용자수에 반비례하게 감소시키고, 간섭채널의 최적 합용량을 달성할 수 없다.

최근 간섭채널의 다른 사용자들로부터 수신되는 간섭들이 모두 제한된 공간에 정렬되도록 송수신벡터를 설계하는 간섭정렬(interference alignment: IA)이라 불리는 송수신 방법이 제안되어  $K$ 명의 시변화 간섭채널상에서  $K/2$ 의 자유도(degrees-of-freedom: DoF)가 달성됨이 증명되었다<sup>1,2</sup>. 여기서 DoF란 높은 SNR 영역에서 합용량과  $\log(\text{SNR})$ 의 비율의 극한을 의미한다<sup>11</sup>. 즉, 간섭정렬은 모든 사용자가 전체 신호공간의 절반씩을 간섭 없이 사용할 수 있는 방법으로, 전체 신호공간을 송신신호들이 직교하도록 나누어 갖는 방식보다 일반적으로 높은 합용량을 달성할 수 있다.

간섭채널과 유사한 다중 셀룰러 네트워크 환경에서도 간섭은 송수신기간의 성능을 감소시키는 주요한 원인이 되며, 특히 셀 가장자리 사용자(cell-edge user)는 다른 셀로부터의 간섭도 받아 성능이 심하게 저하될 수 있다. 이러한 셀 가장자리 사용자들의 성능을 향상시키기 위해 셀룰러 네트워크 상향링크와 하향링크에서의 간섭정렬 기법이 제안되어 있다<sup>3,4</sup>. 먼저 2셀 상향링크에서의 간섭정렬 기법이 제안되었는데<sup>3</sup>, 핵심은 셀간간섭(inter-cell interference)들이 모두 공통된 부공간(subspace)에 정렬되어 수신되도록 송수신벡터를 설계하면 셀마다 더 높은 DoF를 확보할 수 있다는 것이다. 다음으로 제안된 하향링크에서의 간섭정렬 기법은 상향링크에서의 간섭정렬 기법처럼 셀간간섭들만 정렬되는 것이 아니라, 셀내간섭(intra-cell interference)과 셀간간섭을 공통된 부공간에 함께 정렬시킨다<sup>4</sup>. 이를 위해 한 기지국(base station: BS)은 두 개의 프리코더를 연속적으로 사용하며, 이동국(mobile station: MS)은 간섭이 정렬되는 부공간에 직교하는 벡터를 수신벡터로 사용한다. 하지만, 이러한 기법들은 보통 2셀 네트워크 모델에만 적용될 수 있으며, 더 많은 셀 모델에 적용되기 위해서는 채널이 분해가능(decomposable)하다는 특수한 조건이 필요하다<sup>4</sup>.

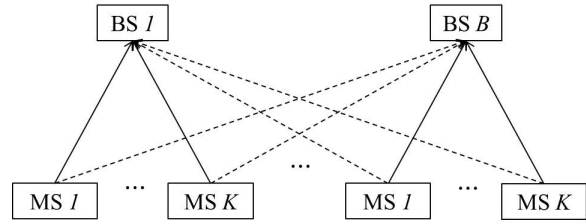


그림 1.  $B$ 셀과 셀당  $K$ 명의 사용자가 있는 상향링크 셀룰러 네트워크의 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of uplink cellular network with  $B$  cells and  $K$  users per cell

간섭채널과 3셀 이상의 셀룰러 네트워크에서 간섭정렬을 위한 송수신벡터가 닫힌형태로 구해지지 않거나 구해지더라도 모든 채널 정보를 필요로 하는 문제점을 해결하기 위해 반복 알고리즘들이 제안되었다<sup>5-12</sup>. 간섭채널상의 간섭정렬을 위한 반복 알고리즘으로 max-SINR (maximum signal-to-interference-plus-noise ratio) 알고리즘<sup>5,6</sup>과 MMSE-IA (minimum mean square error interference alignment) 알고리즘<sup>7</sup>이 대표적이며 이와 유사한 반복 알고리즘들이 제안되어 있다<sup>8-10</sup>. 이러한 알고리즘은 자신과 연결된 링크는 채널 정보를 알고, 나머지 링크는 채널의 통계만 알면 동작한다는 점에서 분산 알고리즘(distributed algorithm)으로도 불리며, 시분할 이중화(time-division duplexing: TDD)를 사용하는 환경에서 일반적으로 성립하는 채널의 대칭성(reciprocity)을 기반으로 한다. 채널의 대칭성을 이용하여 SINR을 최대화하거나 MSE를 최소화하도록 송신벡터와 수신벡터를 번갈아가며 갱신하는 것이 이러한 반복 알고리즘들의 핵심이다. 최근에는 간섭채널상의 반복 알고리즘을 셀룰러 네트워크에 적용하여, 간섭정렬을 위한 송수신벡터를 찾는 알고리즘이 제안되어 있다<sup>11,12</sup>.

본 논문에서는 간섭채널상의 max-SINR 알고리즘과 MMSE-IA 알고리즘을 셀룰러 네트워크에 적용할 때 셀룰러 네트워크의 특징을 이용하여 수렴속도를 향상시킨 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘의 핵심은 송신벡터와 수신벡터를 갱신할 때, 셀내간섭은 고려하지 않고 셀간간섭만 고려한다는 점인데, 이러한 방법은 간단히 언급되었지만<sup>11</sup>, 셀내간섭을 고려한 수렴속도 분석이나 모의실험 등이 이루어지지 않았고, MMSE-IA을 기반으로 하는 알고리즘도 고려되지 않았다. 기존에 제안된 셀룰러 네트워크상의 max-SINR 알고리즘<sup>11</sup>은 상향링크에서 송신벡터와 하향링크에서 수신벡터를 갱신할 때

자신 신호 성분과 셀내간섭을 고려하지 않음으로써 수렴속도를 향상시킬 수 있었다. 이는 송수신벡터를 갱신할 때 셀간간섭을 중복하여 고려하는 상황을 피함으로써 얻는 이득이다. 여기서의 max-SINR 알고리즘이 수렴 속도를 향상시키기 위해 상향링크에서의 송신벡터와 하향링크에서의 수신벡터를 갱신할 때 셀내간섭과 자신의 신호 성분을 무시하는 것과는 달리, MMSE-IA 알고리즘을 셀룰러 네트워크상에 적용하여 본 논문에서 제안된 알고리즘은 자신 신호를 무시하지 않는다는 큰 차이점을 갖는다. 모의실험은 제안된 알고리즘이 간섭채널상의 알고리즘들보다 빠르게 수렴하고, 주어진 반복횟수에서 높은 합용량을 확보하는 것을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장은 다중 셀룰러 네트워크의 시스템 모델을 제시하고, 간섭채널상의 간섭정렬을 위한 기존의 반복 알고리즘을 간략히 정리한다. III장은 셀룰러 네트워크상의 간섭정렬을 위한 수렴속도가 빠른 반복 알고리즘을 제안한다. IV장은 제안된 알고리즘과 기존의 알고리즘의 성능을 비교하며, 마지막으로 V장은 결론을 맺는다.

## II. 다중 셀룰러 네트워크 시스템 모델과 간섭채널상의 반복 간섭정렬 알고리즘 리뷰

본 장에서는 다중 셀룰러 네트워크의 시스템 모델을 제시한다. 또한, 셀룰러 네트워크에서의 간섭정렬을 알아보기 전에, 기존 간섭채널상의 반복 간섭정렬 알고리즘인 max-SINR 알고리즘<sup>5,6)</sup>과 MMSE-IA 알고리즘<sup>7)</sup>에 관한 리뷰를 제공한다.

본 논문에서는 그림 1과 같이  $B$ 개의 BS와 각 셀에  $K$ 명의 MS가 있고, MS와 MS는 각각  $N$ 개의 안테나로 신호를 송수신하는 것을 고려한다. BS와 MS의 안테나 수는 일반적으로는 다르지만 여기에서는 간단한 전개를 위해 동일하게 가정하였다. 셀  $l$ 의  $k$ 번째 MS가 송신벡터  $\mathbf{v}_{lk}$ 를 이용해  $x_{lk}$ 를 송신할 때, 셀  $b$ 의 BS에 수신되는 상향링크 신호는 아래와 같이 나타내진다.

$$\mathbf{y}^b = \sum_{l=1}^B \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{lk}^b \mathbf{v}_{lk} x_{lk} + \mathbf{w}^b \quad (1)$$

여기에서  $\mathbf{H}_{lk}^b$ 는 셀  $l$ 의  $k$ 번째 MS로부터 셀  $b$ 의 BS로  $N \times N$  채널 행렬이며, 송수신기에서 미리

알고 있다고 가정한다.  $\mathbf{w}^b$ 는 셀  $b$ 의 BS에서 수신되는 백색 가우시안 잡음 벡터이며 공분산은  $\sigma^2 \mathbf{I}_N$ 이다. 만약 간섭정렬을 위해 필요한 신호공간이 여러 개의 부반송파를 활용하여 확보되었을 경우에는 주파수 영역에서의 채널 행렬이 대각 행렬이 된다.

식 (1)과 같은 다중 셀룰러 네트워크 시스템 모델에서 반복 간섭정렬 알고리즘을 알아보기 전에, 기존에 제안된 간섭채널상의 반복 간섭정렬 알고리즘을 알아보자.

각각  $N$ 개 송수신 안테나를 사용하는  $K$ 명 사용자가 있는 간섭채널을 고려하자.  $k$ 번째 사용자가 송신벡터  $\mathbf{v}_k$ 를 이용하여  $x_k$ 를 송신할 때,  $i$ 번째 사용자에게 수신되는 신호벡터  $\mathbf{y}_i$ 는 아래와 같이 나타내진다.

$$\mathbf{y}_i = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{ki} \mathbf{v}_k x_k + \mathbf{w}_i \quad (2)$$

여기에서  $\mathbf{H}_{ki}$ 는  $k$ 번째 사용자에서  $i$ 번째 사용자로  $N \times N$  채널 행렬이고,  $\mathbf{w}_i$ 는 백색가우시안 잡음 벡터이며 공분산은  $\sigma^2 \mathbf{I}_N$ 이다. 여기에서는 한 명의 사용자가 하나의 데이터 심볼을 전송하는 경우를 가정하고 있지만, 앞으로 유도된 결과는 한 명의 사용자가 여러 개의 데이터 심볼을 전송하는 경우로 쉽게 확장될 수 있다.

각 사용자의 송신벡터가 주어졌을 때, SINR을 최대화하는  $k$ 번째 사용자의 수신벡터  $\mathbf{g}_k$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{g}_k = \alpha_k \left( \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{ik} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \mathbf{H}_{ik}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_{kk}^H \mathbf{v}_k \quad (3a)$$

반대로 각 사용자의 수신벡터가 주어졌을 때, SINR을 최대화하는  $k$ 번째 사용자의 송신벡터  $\mathbf{v}_k$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{v}_k = \beta_k \left( \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{ki}^H \mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^H \mathbf{H}_{ki} + \sigma^2 \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_{kk}^H \mathbf{g}_k \quad (3b)$$

위에서  $\alpha_k$ 와  $\beta_k$ 는 각각  $\mathbf{g}_k$ 와  $\mathbf{v}_k$ 의 크기(norm)가 1이 되도록 하기위한 상수이다.

위의 송신벡터  $\mathbf{v}_k$ 를 갱신하는 과정은 각 사용자의 송수신기의 역할이 반대로 바뀌어 SINR을 최대화하는 수신벡터를 구하는 것과 같으며, 이 때  $k$ 번째 사용자에서  $i$ 번째 사용자로의  $N \times N$  채널 행렬은  $\mathbf{H}_{ki}^H$ 로 나타내진다. 이는 채널의 대칭성을 이용한 것으로, 보통 TDD 방식을 사용할 때 대칭성이 성립한다. 이를 바탕으로 max-SINR 알고리즘은 SINR이 최대화도록 송신벡터  $\mathbf{v}_k$ 와 수신벡터  $\mathbf{g}_k$ 를 번갈아 갱신한다.

하지만 위의 max-SINR 알고리즘은 알고리즘의 수렴성이나 최적화가 증명되지 않았다. 또한, 특정 상황에서 max-SINR 알고리즘보다 합용량 측면에서 우수한 알고리즘이 존재한다는 것이 알려졌다<sup>[13]</sup>. 전체 사용자 중에서 특정한 한명 사용자가 강한 잡음 및 간섭의 영향을 받을 때, max-SINR 알고리즘은 이 사용자의 송수신벡터가 이타적으로 설계되어야함에도 불구하고 매우 이기적으로 만들기 때문에 높은 합용량을 달성하지 못한다.

다음으로 MMSE-IA 알고리즘이 제안되었는데<sup>[7]</sup>, 이 알고리즘은 각 사용자의 MSE(mean square error)의 총 합을 최소화하는 최적화 문제를 풀어 송수신벡터를 갱신한다. 먼저  $K$ 명의 사용자가 있는 간섭채널상  $k$ 번째 사용자의 MSE는 다음과 같이 쓰여진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_k &= E[|\hat{x}_k - x_k|^2] \\ &= |\mathbf{g}_k^H \mathbf{H}_{kk} \mathbf{v}_k - 1|^2 + \sum_{i \neq k} |\mathbf{g}_k^H \mathbf{H}_{ik} \mathbf{v}_k - 1|^2 + \|\mathbf{g}_k\|^2 \sigma^2 \end{aligned} \quad (4)$$

이 때, 송신벡터  $\mathbf{v}_k$ 의 크기가 1이 되는 조건하에서 총 MSE를 최소화하는 문제는 다음과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_{\mathbf{v}_k, \mathbf{g}_k} & \sum_{k=1}^K \epsilon_k \\ \text{s.t.} & \|\mathbf{v}_k\|^2 \leq 1, \forall k. \end{aligned} \quad (5)$$

위 문제의 해는 아래와 같이 주어지며, 이를 이용하여 송수신벡터를 번갈아가며 갱신한다.

$$\mathbf{g}_k = \left( \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{ik} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \mathbf{H}_{ik}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_{kk} \mathbf{v}_k \quad (6a)$$

$$\mathbf{v}_k = \left( \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{ki}^H \mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^H \mathbf{H}_{ki} + \lambda_k \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_{kk}^H \mathbf{g}_k \quad (6b)$$

여기에서 라그랑지안 상수  $\lambda_k$ 는 송신벡터  $\mathbf{v}_k$ 의 크기가 1이 되는 조건을 만족하도록 결정된다. Max-SINR 알고리즘은  $\lambda_k$  대신 잡음의 분산인  $\sigma^2$ 가 사용된다는 차이점이 있다. 이 과정에서 MMSE-IA 알고리즘은 최적의  $\lambda_k$ 를 찾기 위한 과정이 추가적으로 필요하다. 총 MSE가 최적으로 수렴하는 것은 증명되었고, 합용량 성능이 max-SINR 보다 우수하다는 것도 보여졌다<sup>[7]</sup>.

다음 장에서는 이와 같은 간섭채널상의 반복 알고리즘 기반으로 셀룰러 네트워크상의 특징을 이용하여 빠른 수렴속도를 갖는 알고리즘을 제안한다.

### III. 다중 셀룰러 네트워크상의 빠른 반복 간섭정렬 알고리즘

본 장에서는 식 (1)과 같은 다중 셀룰러 네트워크에서 수렴속도가 빠른 반복 간섭정렬 알고리즘을 제안한다.

앞 장에서 살펴본 간섭채널상의 간섭정렬 알고리즘 중에서 간섭채널상의 max-SINR 알고리즘을 셀룰러 네트워크에 적용한 알고리즘이 제안되었다<sup>[11,12]</sup>. 이 알고리즘에서 각 사용자의 송신벡터가 주어졌을 때, SINR을 최대화하는 셀 $b$ 의  $k$ 번째 사용자의 수신벡터  $\mathbf{g}_{bk}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{g}_{bk} = \alpha_k \left( \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{bi}^b \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \mathbf{H}_{bi}^{bH} + \mathbf{R}_{ici} + \sigma^2 \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_{bk}^b \mathbf{v}_{bk} \quad (7a)$$

여기에서  $\mathbf{R}_{ici}$ 는 셀간간섭 신호의 공분산 행렬로서 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{R}_{ici} = \sum_{l \neq bi=1}^B \sum_{l=1}^K \mathbf{H}_{li}^b \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l^H \mathbf{H}_{li}^{bH} \quad (7b)$$

반대로 각 MS에 맞는 BS의 수신벡터가 주어질 있을 때, SINR을 최대화하는 셀 $b$ 의  $k$ 번째 MS의 송신벡터  $\mathbf{v}_{bk}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{v}_{bk} = \beta_k \left( \bar{\mathbf{R}}_{ici} + \sigma^2 \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_{bk}^{bH} \mathbf{g}_{bk} \quad (7c)$$

여기에서 송신벡터를 갱신하는데 필요한  $\bar{\mathbf{R}}_{ici}$ 는 역방향에서 간섭 신호의 공분산 행렬로서 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\mathbf{R}}_{ici} = \sum_{l \neq bi}^K \sum_{bi=1}^K \mathbf{H}_{bk}^H \mathbf{g}_{li} \mathbf{g}_{li}^H \mathbf{H}_{bk} \quad (7d)$$

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 상향링크에서의 송신벡터를 구할 때 자신 신호와 셀내간섭의 공분산은 고려하지 않고 셀간간섭의 공분산만 고려하여 송신벡터  $\mathbf{v}_{bk}$ 를 구한다. 이렇게 제안된 방법이 송신벡터  $\mathbf{v}_{bk}$ 를 구할 때 자신 신호와 셀내간섭도 고려하는 방법보다 수렴속도가 빠르며, 다음 장에서 모의실험으로 알고리즘의 성능을 비교한다.

우리는 기존의 MMSE-IA 알고리즘을 셀룰러 네트워크상에 적용하여 수렴속도가 빠른 알고리즘을 제안한다. 먼저 위의 신호모델에서 각 MS의 송신벡터가 주어졌을 때, 총 MSE를 최소화하는  $k$ 번째 MS의 신호를 수신하기 위한 BS의 수신벡터  $\mathbf{g}_{bk}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{g}_{bk} = \left( \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{bi}^H \mathbf{v}_{bi} \mathbf{v}_{bi}^H \mathbf{H}_{bi}^H + \bar{\mathbf{R}}_{ici} + \sigma^2 \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_{bk}^H \mathbf{v}_{bk} \quad (8a)$$

반대로 각 MS의 신호를 수신하기 위한 BS의 수신벡터가 주어졌을 때, 총 MSE를 최소화하는  $k$ 번째 MS의 송신벡터  $\mathbf{v}_{bk}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{v}_{bk} = \left( \mathbf{H}_{bk}^H \mathbf{g}_{bk} \mathbf{g}_{bk}^H \mathbf{H}_{bk}^H + \bar{\mathbf{R}}_{ici} + \lambda_{bk} \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_{bk}^H \mathbf{g}_{bk} \quad (8b)$$

여기에서  $\lambda_{bk}$ 는 송신벡터  $\mathbf{v}_{bk}$ 의 크기가 1이 되도록 결정되는 상수이며, 기존의 MMSE-IA 알고리즘에서와 같이 선형탐색 같은 방법으로 찾을 수 있다. 위 (8a)와 (8b)식에서의 셀간간섭 신호의 공분산 행렬들인  $\mathbf{R}_{ici}$ 와  $\bar{\mathbf{R}}_{ici}$ 는 각각 (7b)와 (7d)에서 정의된 것이다.

송신벡터  $\mathbf{v}_{bk}$ 를 구하는 식(8b)에서 역행렬 안의 세 개의 항은 자신 신호의 공분산, 셀간간섭의 공분산, 그리고 잡음성분의 공분산이다. 셀룰러 네트워크상의 max-SINR 알고리즘<sup>[11]</sup>과 본 논문에서 제안

된 알고리즘의 공통점은 수렴속도를 향상시키기 위해 상향링크에서 송신신호를 갱신할 때 셀내간섭을 고려하지 않는다는 점이다. 기존 간섭채널상의 알고리즘과 같이 셀내간섭을 고려하여도 최적의 합용량 성능에는 수렴하지만, 그 수렴 속도가 셀내간섭을 고려하지 않았을 때보다 현저히 느린 것을 다음 장의 모의실험으로 보인다. 하지만 셀룰러 네트워크상의 max-SINR 알고리즘<sup>[11]</sup>과는 달리 본 논문에서 제안된 셀룰러 네트워크상의 MMSE-IA 알고리즘은 자신 신호는 반드시 고려하여야한다. 이것은 수렴속도를 향상시키기 위한 것이 아니라 알고리즘의 동작에 영향을 미칠 정도로 중요한 요인이다. 왜냐하면  $\lambda_{bk}$ 를 결정하는데 있어 자신 신호의 공분산 행렬이 포함되지 않을 경우 전혀 다른  $\lambda_{bk}$ 와 송신벡터  $\mathbf{v}_{bk}$ 가 결정되고, 이로 인하여 알고리즘이 수렴하지 않기 때문이다.

상향링크와 유사하게 하향링크에서도 셀내간섭의 공분산을 고려하지 않음으로써 수렴속도를 빠르게 할 수 있다. 우선 하향링크에서 셀  $l$ 의 BS에서 해당 셀  $i$ 번째 MS로 송신벡터  $\mathbf{g}_{li}$ 를 이용해  $x_{li}$ 를 전송할 때, 셀  $b$ 의  $k$ 번째 MS에 수신되는 하향링크 신호는 아래와 같이 나타내진다.

$$\mathbf{y}_{bk} = \sum_{l=1}^B \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{bk}^H \mathbf{g}_{li} x_{li} + \mathbf{w}_{bk} \quad (9)$$

여기에서 채널 행렬은 상향링크 채널과 대칭성을 이용하였고,  $\mathbf{w}_{bk}$ 는 셀  $b$ 의  $k$ 번째 MS에 수신되는 백색 가우시안 잡음 벡터이다.

앞선 상향링크에서의 경우와 유사하게 하향링크에서도 수렴속도가 빠른 max-SINR 알고리즘과 MMSE-IA 알고리즘을 적용할 수 있다. 식 (9)에서의 하향링크 신호 모델에서의 수렴속도가 빠른 max-SINR 알고리즘은 식 (7)을 이용하여 셀  $b$ 의 BS에서 해당 셀의  $k$ 번째 MS로의 송신벡터  $\mathbf{g}_{bk}$ 와 셀  $b$ 의  $k$ 번째 MS에서의 수신벡터  $\mathbf{v}_{bk}$ 를 구할 수 있다. 마찬가지로 하향링크 신호 모델에서의 수렴속도가 빠른 MMSE-IA 알고리즘은 식 (7)을 이용하여  $\mathbf{g}_{bk}$ 와  $\mathbf{v}_{bk}$ 를 구할 수 있다. 상향링크에서는  $\mathbf{g}_{bk}$ 를 수신벡터,  $\mathbf{v}_{bk}$ 를 송신벡터로 정의하였지만, 하향링크에서는 반대로  $\mathbf{g}_{bk}$ 를 송신벡터,  $\mathbf{v}_{bk}$ 를 수신벡터로 정의하는 차이점이 있다.

다음 장에서는 간섭채널상의 max-SINR 알고리즘과 MMSE-IA 알고리즘, 그리고 이 알고리즘들을 셀룰러 네트워크상에 적용하여 수렴속도가 빠르도록 제안된 알고리즘들의 합용량 성능을 알아본다.

#### IV. 실험 및 토론

앞 장에서 제안된 셀룰러 네트워크에서의 간섭정렬을 위한 알고리즘 성능을 알아보기 위해 모의실험을 수행하였다. 반복 알고리즘들은 BS와 MS가 반복적으로 송수신벡터에 관한 정보를 실제로 교환할 필요는 없는데, 미리 약속된 간섭정렬을 위한 반복 알고리즘으로 송수신벡터를 각자 계산하여 사용하면 되기 때문이다. 편의상 간섭채널상의 기존 알고리즘들을 각각 max-SINR과 MMSE-IA라 부르고, max-SINR 알고리즘을 셀룰러 네트워크에 적용한 알고리즘<sup>[11]</sup>은 fast max-SINR-C, MMSE-IA 알고리즘을 셀룰러 네트워크에 적용하여 수렴속도가 향상 되도록 본 논문에서 제안된 알고리즘은 fast MMSE-IA-C라고 부르기로 한다. B셀이 존재하는 셀룰러 네트워크상에서 셀당 K명의 사용자가 존재하고, 신호공간의 크기가 N인 시나리오를 (B, K, N)으로 표기하기로 한다. 본 장에서는 기본적으로 N개씩 송수신 안테나를 사용하여 신호공간을 확보하였다고 가정한다. 이 모의실험에서 N×N 채널 행렬의 각 성분은 평균이 0인 복소 가우시안 확률변수로 모델되었다. 본 장에서의 시뮬레이션 결과는 100개의 랜덤 채널의 성능을 평균하여 얻은 것이다.

그림 2는 (B, K, N) = (2, 4, 5)에서 max-SINR과 fast max-SINR-C의 여러 반복횟수에서 합용량 성능을 보여준다. Max-SINR으로는 100회 이상의 반복으로 최고의 DoF를 얻을 수 있었다. 반면에 MS의 송신벡터를 갱신하는 과정에서 셀내간섭을 고려하지 않도록 본 논문에서 제안된 fast max-SINR-C은 10회 정도의 반복으로 높은 합용량을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

그림 3은 그림 2의 시뮬레이션 환경과 동일한 조건인 (B, K, N) = (2, 4, 5)에서 MMSE-IA와 제안된 fast MMSE-IA-C의 여러 반복횟수에서 합용량 성능을 보여준다. Fast max-SINR-C와 마찬가지로 셀룰러 네트워크에서 수렴이 빠르도록 제안된 fast MMSE-IA-C가 간섭채널상의 MMSE-IA보다 빠른 수렴 속도를 보여준다. 반복횟수가 50회인

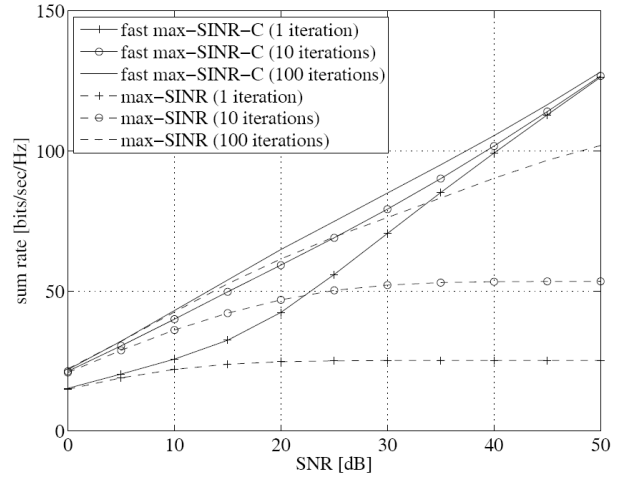


그림 2. (B, K, N) = (2, 4, 5)에서 max-SINR과 fast max-SINR-C 알고리즘의 합용량 성능 비교  
Fig. 2. Sum rate of max-SINR and fast max-SINR-C algorithms for (B, K, N) = (2, 4, 5)

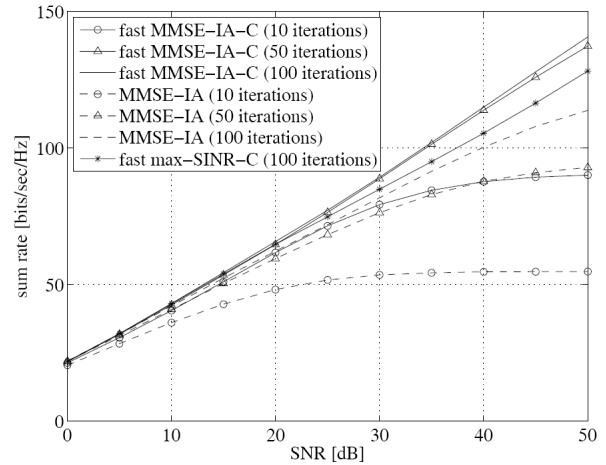


그림 3. (B, K, N) = (2, 4, 5)에서 MMSE-IA와 fast MMSE-IA-C 알고리즘의 합용량 성능 비교  
Fig. 3. Sum rate of MMSE-IA and fast MMSE-IA-C algorithms for (B, K, N) = (2, 4, 5)

MMSE-IA의 성능은 반복횟수가 10회인 fast MMSE-IA-C의 성능과 거의 같은 것을 볼 수 있고, MMSE-IA는 100번을 반복해도 DoF를 완전히 확보하지 못한다. 물론 fast MMSE-IA-C는 fast max-SINR-C보다 수렴속도가 느리지만, 그림 3에서 처럼 반복횟수가 클 때 fast MMSE-IA-C가 fast max-SINR-C보다 높은 합용량을 달성한다.

그림 4는 (B, K, N) = (2, 4, 5)에서 기존 알고리즘들과 제안된 알고리즘들의 수렴속도를 보여준다. SNR=30 dB에서의 결과를 보면 제안된 fast MMSE-IA-C와 fast max-SINR-C가 기존의 MMSE-IA와 max-SINR에 비해서 적은 반복횟수로도 높은

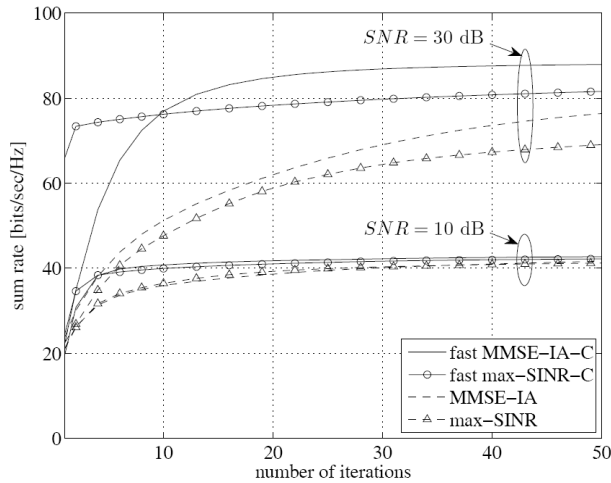


그림 4.  $(B, K, N) = (2, 4, 5)$ 에서 알고리즘들의 반복횟수에 따른 합용량 성능 비교

Fig. 4. Sum rate of the algorithms for  $(B, K, N) = (2, 4, 5)$  versus the number of iterations

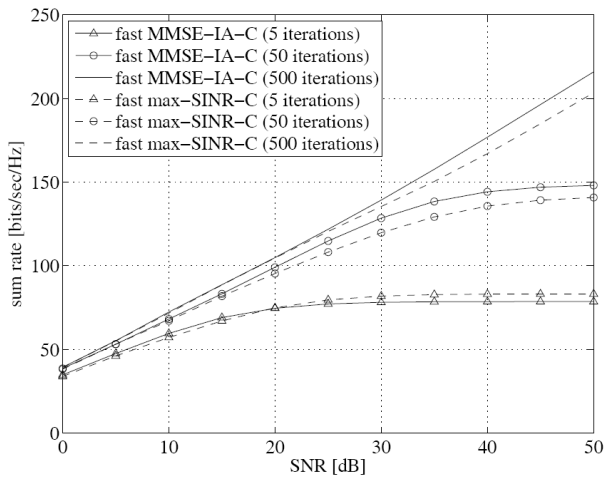


그림 5.  $(B, K, N) = (3, 4, 7)$ 에서 MMSE-IA와 fast MMSE-IA-C 알고리즘의 합용량 성능 비교

Fig. 5. Sum rate of MMSE-IA and fast MMSE-IA-C algorithms for  $(B, K, N) = (3, 4, 7)$

합용량을 달성하는 것을 확인할 수 있다. 대략적으로 fast max-SINR-C는 2번, fast MMSE-IA-C는 20번 정도의 반복으로 높은 합용량을 달성할 수 있지만, 기존의 MMSE-IA와 max-SINR는 50번 이상의 반복이 필요하다. Fast max-SINR-C가 fast MMSE-IA-C보다 수렴속도는 빠르지만, 충분히 큰 반복횟수에서는 fast MMSE-IA-C가 더 높은 합용량을 달성함도 확인할 수 있다. 또한 SNR=10 dB 일 때도 제안된 알고리즘들이 기존의 알고리즘에 비해 빠른 수렴속도를 갖는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 fast max-SINR-C와 fast MMSE-IA-C

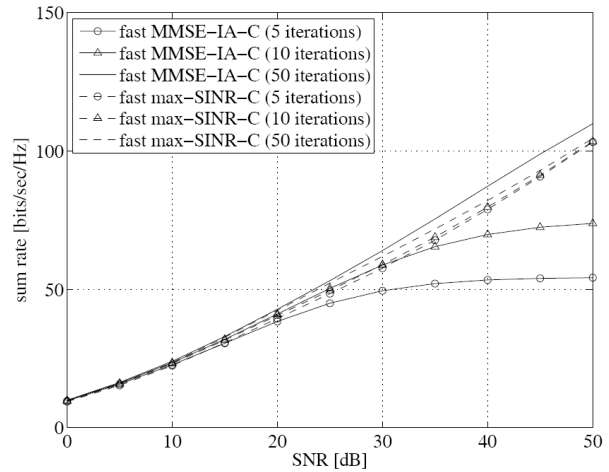


그림 6. 여러 부반송파를 이용하여 신호공간을 확보할 때,  $(B, K, N) = (2, 4, 5)$ 에서 MMSE-IA와 fast MMSE-IA-C 알고리즘의 합용량 성능 비교

Fig. 6. Sum rate of MMSE-IA and fast MMSE-IA-C algorithms for  $(B, K, N) = (2, 4, 5)$  by using multiple subcarriers

의 합용량을  $(B, K, N) = (3, 4, 7)$ 에서 비교한 결과이다. 앞선 2셀에서의 모의실험에서는 fast MMSE-IA-C가 fast max-SINR-C에 비해 합용량은 높지만, 수렴속도가 느린 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 3셀 셀룰러 네트워크에서는 fast MMSE-IA-C와 fast max-SINR-C의 수렴속도가 거의 같으며, 반복횟수가 클 때 fast MMSE-IA-C가 fast max-SINR-C보다 높은 합용량을 달성함을 확인할 수 있다.

지금까지의 모의실험에서는 다중 안테나를 사용하여 간섭정렬을 위한 신호공간을 확보하였다. 하지만 간섭정렬을 위한 신호공간을 주파수 선택적 채널에서  $N$ 개의 부반송파를 사용하여 확보할 수도 있다. 그림 6은 2셀에서 셀당 4명 MS가 있고, MS가 5개 부반송파를 사용할 때, fast MMSE-IA-C와 fast max-SINR-C의 합용량을 보여준다. 그림 3의 결과와 같이 알고리즘 수렴속도는 fast max-SINR-C가 더 빠르지만, 반복을 많이 하였을 때 fast MMSE-IA-C가 더 높은 합용량을 달성함을 볼 수 있다.

그림 7은 여러 부반송파를 사용하여 간섭정렬을 위한 신호공간을 확보하여  $(B, K, N) = (3, 8, 16)$  일 때, 하향링크 MMSE-IA와 fast MMSE-IA-C의 합용량 성능을 보여준다. 상향링크에서는 MS의 송신벡터를 갱신할 때 셀내간섭을 고려하지 않는 반면에, 하향링크에서는 MS의 수신벡터를 갱신할 때 셀내간섭을 고려하지 않으면 알고리즘의 수렴 속도

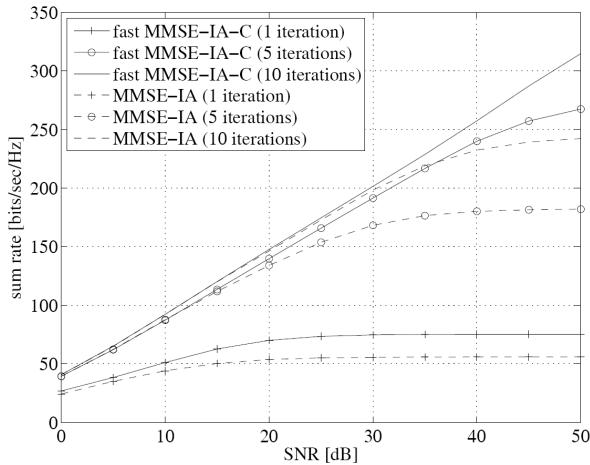


그림 7. 하향링크에서 여러 부반송파를 이용하여 신호공간을 확보할 때,  $(B, K, N) = (3, 8, 16)$ 에서 MMSE-IA와 fast MMSE-IA-C 알고리즘의 합용량 성능 비교  
 Fig. 7. Sum rate of MMSE-IA and fast MMSE-IA-C algorithms for  $(B, K, N) = (3, 8, 16)$  by using multiple subcarriers

를 향상시킬 수 있다. 즉, 제안된 알고리즘의 핵심은 상향링크와 하향링크 모두 MS의 송수신벡터 갱신과정에서 셀내간섭을 고려하지 않는 것이다. 상향링크에서의 모의실험 결과와 마찬가지로 본 논문에서 제안된 fast MMSE-IA-C가 기존의 MMSE-IA보다 주어진 반복횟수에서 훨씬 더 높은 합용량을 달성함을 볼 수 있다. 본 논문에서 제안된 fast MMSE-IA-C는 10회 반복으로 최고의 DoF를 달성하는 반면, 기존의 MMSE-IA는 10회 반복으로는 최고의 DoF를 달성하지 못하였다.

### V. 결 론

본 논문에서는 셀룰러 네트워크상의 간섭정렬을 위한 송수신벡터를 구하는 빠른 반복 알고리즘들이 제안되었다. 이 알고리즘들은 간섭채널상의 max-SINR 알고리즘과 MMSE-IA 알고리즘을 기반으로 하고 있으나, 상향링크에서 송신벡터 그리고 하향링크에서 수신벡터를 갱신하는 과정에서 셀내간섭을 고려하지 않는다는 큰 차이점을 갖는다. 모의실험은 다중 안테나를 사용하여 간섭정렬을 위한 신호공간을 확보하였을 때 기존 알고리즘보다 제안된 알고리즘들이 주어진 반복횟수에서 훨씬 높은 합용량을 달성함을 보였다. 또한 제안된 방법이 여러 부반송파를 사용하여 간섭정렬을 위한 신호공간을 확보할 때에도 높은 합용량을 달성하는 것을 보였다.

### 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, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
- [2] C. M. Yetis, T. Gou, S. A. Jafar, and A. H. Kayran, "On feasibility of interference alignment in MIMO interference networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 9, pp. 4771-4782, Sept. 2010.
- [3] C. Suh and D. Tse, "Interference alignment for cellular networks," in *Proc. 46th Allerton Conf. Commun., Contr., and Comput.*, pp. 1037-1044, Monticello, IL, Sept. 2008.
- [4] C. Suh, M. Ho and D. Tse, "Downlink interference alignment," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 9, pp. 2616-2626, Sept. 2011.
- [5] K. Gomadam, V. R. Cadambe, and S. A. Jafar, "Approaching the capacity of wireless networks through distributed interference alignment," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 1-6, New Orleans, LA, Nov. Dec. 2008.
- [6] K. S. Gomadam, V. R. Cadambe, and S. A. Jafar, "A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 6, pp. 3309-3322, June 2011.
- [7] D. A. Schmidt, C. Shi, R. A. Berry, M. L. Honig, and W. Utschick, "Minimum mean squared error interference alignment," in *Proc. 43th Asilomar Conf. Signals, Systems, and Comput.*, pp. 1106-1110, Pacific Grove, CA, Nov. 2009.
- [8] K. R. Kumar, and F. Xue, "An iterative algorithm for joint signal and interference alignment," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp. 2293-2297, Austin, TX, June 2010.
- [9] I. Santamaria and O. Gonzalez, "Maximum



sum-rate interference alignment algorithms for MIMO channels," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 1-6, Miami, FL, Dec. 2010.

- [10] S. Park, H. Park, and I. Lee, "Distributed beamforming techniques for weighted sum-rate maximization in MISO interference channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 12, pp. 1131-1133, Dec. 2010.
- [11] J. Schreck and G. Wunder, "Iterative interference alignment for cellular systems," in *Proc. IEEE Int. ITG Workshop Smart Ant. (WSA)*, pp. 1-8, Aachen, Germany, Feb. 2011.
- [12] B. Zhuang, R. A. Berry, and M. L. Honig, "Interference alignment in MIMO cellular networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 3356-3359, Prague, Czech Republic, May 2011.
- [13] Z. K. M. Ho, and D. Gesbert, "Balancing Egoism and Altruism on interference channel: The MIMO case," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.(ICC)*, pp. 1-5, Cape Town, South Africa, May 2010.

**여 정 호 (Jeong Ho Yeo)**



2006년 8월 포항공과대학교  
전자전기공학과 졸업  
2006년 9월~현재 포항공과대  
학교 전자전기공학과 통합  
과정  
<관심분야> 통신이론, 통신시  
스템, 이동통신

**조 준 호 (Joon Ho Cho)**



1995년 8월 서울대학교 전기공  
학과 졸업  
1997년 5월 Purdue Univ. 전  
기·컴퓨터공학부 석사  
2001년 5월 Purdue Univ. 전  
기·컴퓨터공학부 박사  
2001년 7월~2004년 6월 Univ.  
of Massachusetts, Amherst 조교수  
2004년 7월~2009년 2월 포항공과대학교 전자전기  
공학과 조교수  
2009년 3월~현재 포항공과대학교 전자전기공학과  
부교수  
<관심분야> 통신이론, 통신시스템, 이동·위성통신