

간섭 다중 접속 채널에서의 기회적 간섭 관리 기술

신 원 용*, 박 도 형*

Opportunistic Interference Management for Interfering Multiple-Access Channels

Won-Yong Shin*, Dohyung Park*

요 약

본 논문에서는 시불변 채널 계수를 가지는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 세 가지 종류의 기회적 간섭 관리 기술을 소개한다. 첫째, 각 기지국에서 다른 기지국에게 최소한의 간섭을 발생시키는 사용자 집합을 기회적으로 선택하는 두 가지 기회적 간섭 관리 완화 기술을 제안하고, 자유도 측면에서 성능을 분석한다. 둘째, 각 기지국에서 두 개의 임계값을 기반으로 설계된 스케줄러로 사용자를 기회적으로 선택하는 분산 기회적 스케줄링을 제안하고, 용량 스케일링 측면에서 성능을 분석한다. 마지막으로, 모의실험을 통해 제안하는 기술을 검증한다.

Key Words : Degrees-of-freedom (DoF), opportunistic interference alignment (OIA), opportunistic interference nulling (OIN), distributed opportunistic scheduling (DOS), multiuser diversity (MUD)

ABSTRACT

In this paper, we introduce three types of opportunistic interference management strategies in multi-cell uplink networks with time-invariant channel coefficients. First, we propose two types of opportunistic interference mitigation techniques, where each base station (BS) opportunistically selects a set of users who generate the minimum interference to the other BSs, and then their performance is analyzed in terms of degrees-of-freedom (DoF). Second, we propose a distributed opportunistic scheduling, where each BS opportunistically select a user using a scheduler designed based on two threshold, and then its performance is analyzed in terms of throughput scaling law. Finally, numerical evaluation is performed to verify our result.

I. 서 론

무선 링크 간 간섭은 통신에서 심각한 문제로 고려되어 왔다. 셀룰라 네트워크에서 셀 내부 간섭 및 셀 간 간섭을 고려하고 잘 처리하기 위해, 와이너 (Wyner) 모델로 불리는 간단한 무한히 큰 셀룰라 다중 접속 채널 모델이 소개되었고 이 때 용량 성능이 분석되었다^[1,2]. 와이너 모델에서의 연구^[1,2]가

복잡하고 분석적으로 다루기 힘든 실제적인 셀룰라 환경에 대한 주목할 만한 직관을 제공했음에도 불구하고, 고려하는 모델은 여전히 실제적이지는 않다. 최근에 샤논 (Shannon) 이론 한계치를 보이기 위한 대안이 Cadambe와 Jafar에 의해 소개되었는데, 간섭 정렬 (IA: Interference Alignment) 기술이 다수 개의 통신 쌍이 존재하는 간섭 문제를 근본적으로 풀기 위해 제안되었다^[3]. 간섭 정렬 기술은 시변 채널

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A1044151)

♦ 주저자 겸 교신저자 : 단국대학교 국제학부 모바일시스템공학전공, wyshin@dankook.ac.kr, 정회원

* Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin, dhpark@utexas.edu

논문번호 : KICS2012-09-411, 접수일자 : 2012년 9월 1일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 22일

널 계수를 갖는 K 개의 송수신 쌍이 존재하는 간섭 채널에서 $K/2$ 로 주어지는 최적의 자유도 (DoF: degrees-of-freedom)를 취득할 수 있음 보였다. 초기 간섭 정렬 기술 연구^[3]는 이후 다양한 무선 네트워크 환경으로의 확장 연구를 이끌었는데, 다중입력 다중출력 (MIMO: Multiple-Input Multiple-Output) 간섭 네트워크^[4,5], X 네트워크^[6], 상향링크 셀룰라 네트워크^[7-10]에서의 연구가 이를 포함한다.

본 연구에서는 K 개의 셀이 존재하는 실제적인 상향링크 네트워크인 간섭 다중 접속 채널 (IMAC: Interfering multiple-access channel)을 고려하도록 한다. 이 때 각 셀은 하나의 기지국과 N 개의 단말을 가지고 있다고 가정한다. 그러한 상향링크 K -셀 네트워크에서의 간섭 정렬 기술이 제안이 되었으나^[7], 이 방법은 최적의 자유도 취득을 위해 차원 확장을 포함하는 실제적인 구현 측면에서의 어려움을 가진다.

현재까지 단일 셀 브로드캐스트 채널에서 페이딩의 유용함을 활용하는 많은 연구가 진행되어 왔는데, 이 때 다중사용자 다이버시티 이득 (MUD: Multiuser Diversity)을 취득함으로써 용량 향상이 있음을 보였다. 대표적인 기술은 기회적 스케줄링^[11], 기회적 빔형성^[12], 랜덤 빔형성^[13,14]을 포함한다. 단일 셀 하향링크 시스템에서 송신 단에서의 부분적인 채널 정보의 영향이 역시 연구되었는데, 이 때 다중사용자 다이버시티 이득은 제한된 궤환 (feedback) 정보에 기반한 기회적 스케줄링 기법을 통해 얻을 수 있음을 보였다^[15,16]. 게다가, 협력 네트워크에서 기회적 두 홉 중계 프로토콜^[17]과 기회적 라우팅^[18]을 적용함으로써 다중사용자 다이버시티 이득을 얻는 시나리오가 연구되었다. 인지 라디오 (Cognitive Radio) 네트워크에서 기회적 스케줄링^[19]을 사용한 방법도 소개되었다. 그러한 기회적인 통신을 통한 이득은 랜덤 빔형성 기술^[13]의 간단한 확장을 통해 하향링크 다중 셀 네트워크에서도 취득될 수 있다.

하지만, 분산적인 측면에서 상향링크 다중 셀 네트워크에서 자유도 및 다중사용자 다이버시티 이득을 취득할 수 있는 구체적인 알고리즘을 설계하는 방법에 대해서는 아직 알려져 있지 않다. 이유는 상향링크에 대해서 각 단말에서 발생하는 간섭의 양과 다수 개의 단말로부터 각 기지국에 수신되는 간섭의 양 사이에 불일치 (mismatch)가 존재하기 때문이다. 따라서 상향링크 다중 셀 네트워크는 하향링크 다중 셀 네트워크와 분산적인 스케줄링을 수

행하는 측면에서 근본적으로 다르다 할 수 있고, 상향링크에서는 사용자 스케줄링 설계에 어려움이 있다.

본 논문에서는 시분할 채널 계수를 가지는 K -셀 상향링크 네트워크 (즉, 간섭 다중 접속 채널)에서 세 가지 종류의 기회적 간섭 관리 기술을 소개한다. 제안하는 기술 모두 기회적인 사용자 스케줄링 방안을 사용하는데, 이 때 시분할 이중채널 (TDD: Time Division Duplex) 환경에서의 상/하향링크 간 채널 상호성 (channel reciprocity)을 활용하게 된다. 첫째, 제안하는 두 가지 기회적 간섭 완화 (OIM: Opportunistic Interference Mitigation) 기술에서는, M 개의 안테나를 가지는 각 기지국이 다른 기지국에게 최소한의 간섭을 발생시키는 그러한 사용자 집합을 기회적으로 선택한다. 반면, 기존의 기회적 알고리즘^[11-13]에서는 해당 기지국에서 최대 신호 크기를 가지는 사용자가 데이터 통신을 위해 선택된다. 구체적으로 셀 당 동시에 전송하는 사용자 수 S 에 따라 두 가지 종류의 기회적 간섭 완화 프로토콜인 기회적 간섭 널링 (OIN, Opportunistic Interference Nulling) 및 기회적 간섭 정렬 (OIA: Opportunistic Interference Alignment) 기술을 제안한다. 기회적 간섭 정렬 기술에서는 각 기지국이 사전에 정의된 간섭 방향 (예를 들면 직교 랜덤 벡터 집합)을 다른 셀 안의 모든 단말들에게 브로드캐스트한다. 반면, 기회적 간섭 정렬 기술은 각 기지국에서 어느 브로드캐스트도 이루어지지 않는다. 각 단말은 다른 기지국에게 영향을 미치는 발생 간섭의 총 양을 계산하고 해당 기지국에게 그 궤환 정보를 올리게 된다. 두 가지 기술들의 성능은 자유도 측면에서 분석된다. 첫 번째 주요 결과로써, 셀 당 $S \in \{1, \dots, M\}$ 명을 선택하는 경우 셀 당 사용자 수 N 이 높은 신호 대 잡음 비 (SNR: signal-to-noise ratio) 영역에서 $SNR^{(K-1)S}$ 보다 빠르게 스케일하면 자유도 KS 가 취득 가능함을 보인다. 결과로부터 S 를 변화시킴으로 인해 취득 가능한 자유도와 셀 당 요구되는 최소한의 사용자 수 사이에 근본적인 trade-off가 존재함을 확인할 수 있다. 또한 $S=M$ 일 때 취득 가능한 자유도는 최적임을 확인한다. 둘째, 단일 안테나를 사용하는 각 기지국을 가정할 때 다중사용자 다이버시티 이득을 추가로 얻기 위한 분산 기회적 스케줄링 (DOS: Distributed Opportunistic Scheduling) 기술을 소개한다. 제안하는 기술에서는, 각 기지국이 두 개의 사전 정의된 임계값에 기반하

여 다른 기지국에게 충분히 작은 간섭을 야기하는 단말들 집합 사이에서 자기 자신 채널 링크 큰 신호 세기를 갖는 한 단말을 기회적으로 선택하는 방안을 따른다. 분산 기회적 스케줄링의 성능은 용량 스케일링 측면에서 분석된다. 두 번째 주요 결과로써, 사용자 수 N 이 $SNR^{1-\epsilon}$ ($\epsilon \in (0,1)$)보다 빠르게 스케일되면 취득 가능한 총 용량은 $K \log SNR (\log N)$ 로 스케일함을 보인다. 이 결과는 상향링크 다중 셀 환경에서도 자유도 뿐만 아니라 다중사용자 다이버시티 이득을 취득할 수 있음을 확인할 수 있다. 마지막으로, 모의실험을 통해 셀 당 용량을 측정하고 기존 기술 대비 제안한 기술의 성능 우수성을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 시스템 및 채널 모델을 설명한다. III장에서는 두 가지 기회적 간섭 완화 기술을 언급하고 이 때의 자유도 분석을 수행한다. IV장에서는 분산 기회적 스케줄링을 언급하고 이 때의 용량 스케일링 분석을 수행한다. V장에서는 모의실험 결과를 보인다. VI장에서는 결론과 함께 본 논문을 요약한다.

II. 시스템 및 채널 모델

본 논문에서 고려하는 무선 통신 채널인 간섭 다중 접속 채널^[7]은 다음과 같다. K 개의 셀이 존재하는 환경으로, 각 셀 내에는 N 개의 단일 안테나 단말과 M 개의 안테나를 가진 하나의 기지국이 존재한다. 각 단말은 해당 셀 내의 기지국으로 신호를 전달하고자 하며, 각 기지국은 해당 셀 내 단말의 신호만 전달받으려 한다.

먼저 채널 환경을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\underline{y}^{(i)} = \sum_{j=1}^S h_{i,j}^{(i)} x_{i,j} + \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{l=1}^S h_{k,l}^{(i)} x_{k,l} + \underline{z}^{(i)} \quad (1)$$

$\underline{y}^{(i)}$, $x_{i,j}$ 는 각각 i 번째 셀 내 기지국이 수신하는 신호 벡터, i 번째 셀 내 j 번째 단말이 송신한 신호 스칼라 값을 의미한다. 단말이 전송한 신호는 레일리 (Rayleigh) 페이딩 채널을 거치며, i 번째 셀 내 j 번째 전송 단말과 k 번째 셀 기지국 간 채널을 $h_{i,j}^{(k)}$ 로 나타낸다. 여기에서 S 는 각 셀 당 동시에 데이터를 전송하는 단말의 수를 나타내고, $S \subseteq \{1, \dots, M\}$ 이다. 또한 채널 벡터 $h_{i,j}^{(k)}$ 의 각 값은

서로 독립적인 복소 원형 대칭 가우시안 랜덤 변수이고, 다른 채널 벡터 값들도 모두 독립적인 랜덤 변수이다. 각 기지국은 식 (1)과 보는 것과 같이 모든 셀 내 전송 단말의 신호를 수신한다. 또한 각 기지국은 각 안테나 당 N_0 의 전력 스펙트럼 밀도를 가지는 복소 원형 대칭 부가 백색 가우시안 잡음이 더해지며, 이를 $\underline{z}^{(i)}$ 로 나타낸다. 각 전송 단말이 송신하는 신호는 그 전력이 한정되며, 그 값을 $E[x_{i,j}^2] \leq P$ 로 정의한다. 이 때, 각 기지국에서의 수신 신호 대 잡음비는 $E[x_{i,j}^2] \leq P$ 와 N_0 의 함수로 표현된다.

III. 기회적 간섭 완화 기술

본 장에서는 앞서 소개한 기회적 간섭 완화 기술을 설명한다. 기회적 간섭 완화 기술은 매 타임 슬롯마다 특정 셀 내 N 개 단말 중 타 셀 기지국에 미치는 간섭의 양을 최소화하는 S 개 단말을 선택하여 신호를 전송하도록 한다. 해당 단말을 선택하는 방법은 시분할 이중채널 환경에서의 채널 상호성을 이용한다. 이 기술은 크게 기회적 간섭 널링 기술과 기회적 간섭 정렬 기술과 같이 두 가지로 분류할 수 있다. 기회적 간섭 널링 기술은 $S=M$ 의 경우로 간섭 다중 접속 채널 환경에서 최대 자유도를 얻을 수 있으며, 기회적 간섭 정렬 기술은 $S < M$ 의 경우로, 기회적 간섭 널링보다 적은 자유도를 얻지만 접근적으로 더 빠르게 해당 자유도에 가까워진다.

3.1. 기회적 간섭 널링 기술 (OIN)

기회적 간섭 널링 기술은 다음과 같이 전개된다. 모든 셀 내 기지국은 각각의 파일럿 신호를 브로드캐스트하여 모든 셀 내 단말들이 수신하도록 한다. 각 단말은 수신한 파일럿 신호를 이용해 해당 셀 기지국 간의 채널 및 타 셀 기지국 간의 채널 정보를 모두 알 수 있다. 각 단말은 자신이 송신(발생)하는 신호가 타 셀 기지국에 미치는 전체 간섭량을 계산하며, 이를 간섭 누출량이라 정의한다. i 번째 셀 내 j 번째 단말의 간섭 누출량 $L_{i,j}$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_{i,j} = \sum_{k=1, k \neq i}^K \|h_{i,j}^{(k)}\|^2 \quad (2)$$

각 단말은 자신의 간섭 누출량을 해당 셀 기지국에게 전송하고, 기지국은 해당 셀 내 단말 중 간섭

누출량이 가장 적은 M 개의 단말을 선택하여 신호를 전송하도록 명령한다. 간섭 누출량이 가장 적은 단말을 선택함으로써 본 시스템은 단말들이 일으키는 간섭이 제거된 상태를 기회적으로 이용할 수 있다. III-3절에서 우리는 N 이 특정 스케일링 법칙 (scaling law)을 만족할 경우 간섭 누출량을 충분히 제한시켜 원하는 KM 의 자유도를 얻을 수 있음을 점근적 관점에서 분석한다. 또한 앞으로 i 번째 셀에서 선택된 단말을 각각 $\pi_{i,1}, \dots, \pi_{i,M}$ 로 번호를 매기도록 한다.

전송을 명령받은 M 개의 단말은 각각 전송하고자 하는 신호를 송신하며, 나머지 단말은 신호를 송신하지 않는다. 따라서 기지국은 다음과 같은 신호를 수신한다.

$$\underline{y}^{(i)} = \sum_{j=1}^M \underline{h}_{i,\pi_{i,j}}^{(i)} x_{i,\pi_{i,j}} + \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{l=1}^M \underline{h}_{k,\pi_{k,l}}^{(i)} x_{k,l} + \underline{z}^{(i)} \quad (3)$$

각 기지국은 해당 셀 내 선택된 단말들과의 채널 정보에 기반하여 수신 데이터 복호를 위해 ZF (Zero-Forcing) 수신기를 사용한다. ZF 필터링은 본 논문의 시스템 분석 기준인 자유도를 최대화하기 충분하다. 따라서 기지국이 전달받은 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$[\hat{x}_{i,1}, \dots, \hat{x}_{i,M}]^T = [\underline{h}_{i,\pi_{i,1}}^{(i)}, \dots, \underline{h}_{i,\pi_{i,M}}^{(i)}]^\dagger \underline{y}^{(i)} \quad (4)$$

위 식에서 $[]^T$ 는 전치행렬을, $[]^\dagger$ 는 의사역행렬을 의미한다.

3.2. 기회적 간섭 정렬 기술 (OIA)

기회적 간섭 정렬 기술에서는 기회적 간섭 널링 기술과 다른 단말 선택 과정이 전개된다. 우선 각 셀에서 전송을 위해 선택되는 단말의 수를 $S (< M)$ 라 가정한다. 각 기지국은 M 차원 공간에서 S 개의 서로 직교하는 단위 벡터들을 무작위로 생성한다. 앞으로 이 벡터들을 $[\underline{u}_{i,1}, \dots, \underline{u}_{i,S}]$ 이라 하자. 이 벡터들에 의해 구성되는 M 차원 공간 내 부분 공간 (subspace)은 미리 정의된 신호 부분 공간으로, 타 셀 내 단말들이 전송한 간섭 신호가 이 신호 부분 공간과 직교하는 간섭 부분 공간에 최대한 정렬되기를 원한다.

간섭 부분 공간을 정의한 뒤, 각 기지국은 생성한 S 개 단위 벡터들을 브로드캐스트한다. 각 단위

벡터와 채널 정보를 수신한 단말들은 다음과 같이 간섭 누출량을 계산한다.

$$\begin{aligned} L_{i,j} &= \sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| \sum_{l=1}^S (\underline{u}_{k,l}^H \underline{h}_{i,j}^{(k)}) \underline{u}_{k,l} \right\|^2 \\ &= \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{l=1}^S |\underline{u}_{k,l}^H \underline{h}_{i,j}^{(k)}|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

각 단말은 자신의 간섭 누출량을 해당 셀 기지국에게 전송하고, 기지국은 해당 셀 내 단말 중 간섭 누출량이 가장 적은 S 개의 단말을 선택하여 신호를 전송하도록 명령한다. 이 기술의 경우, 간섭 누출량이 가장 적은 단말을 선택함으로써 단말들이 일으키는 간섭이 간섭 부분 공간에 정렬된 상태를 기회적으로 이용할 수 있다. 역시 III-3절에서 우리는 N 이 특정 스케일링 법칙을 만족할 경우 간섭 누출량을 충분히 제한시켜 원하는 KS 의 자유도를 얻을 수 있음을 점근적 관점에서 분석한다.

선택된 단말을 $\pi_{i,1}, \dots, \pi_{i,S}$ 로 번호를 매겼을 때, 기지국이 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{y}^{(i)} = \sum_{j=1}^S \underline{h}_{i,\pi_{i,j}}^{(i)} x_{i,\pi_{i,j}} + \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{l=1}^S \underline{h}_{k,\pi_{k,l}}^{(i)} x_{k,l} + \underline{z}^{(i)} \quad (6)$$

각 기지국은 신호 부분 공간 및 해당 셀 내 선택된 단말들과의 채널 정보에 기반하여 ZF 필터링을 수행한다. ZF 필터링 과정은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &[\hat{x}_{i,1}, \dots, \hat{x}_{i,S}]^T \\ &= \left([\underline{u}_{i,1}, \dots, \underline{u}_{i,S}]^H [\underline{h}_{i,\pi_{i,1}}^{(i)}, \dots, \underline{h}_{i,\pi_{i,S}}^{(i)}] \right)^\dagger [\underline{u}_{i,1}, \dots, \underline{u}_{i,S}]^H \underline{y}^{(i)} \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서 $[]^H$ 는 켈레전치행렬을 의미한다.

3.3. 자유도 분석

본 절에서는 기회적 간섭 완화 기술이 KS 의 자유도를 점근적으로 얻을 수 있음을 보인다. 해당 자유도를 얻기 위해서는 셀 내 단말 수 N 과 기지국의 수신 신호 대 잡음비 간 특정 조건이 필요하다.

우선 시스템 총 자유도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$d_{total} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N \left(\lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{R_{i,j}(SNR)}{\log SNR} \right) \quad (8)$$

여기서 $R_{i,j}(SNR)$ 은 특정 신호 대 잡음비 SNR

에서 i 번째 셀 j 번째 단말의 전송 용량을 나타낸다. 기회적 간섭 완화 기술에서는 셀 당 $S(\leq M)$ 개의 선택된 단말만 신호를 전송하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d_{total} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^S \left(\lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{R_{i,\pi_{i,j}}(SNR)}{\log SNR} \right) \quad (9)$$

위 식에서 각 용량 $R_{i,\pi_{i,j}}(SNR)$ 이 $\log SNR$ 의 스케일링 법칙을 가질 때 KS 의 총 자유도를 얻을 수 있게 된다. 이제 다음에서 소개될 정리(Theorem)로부터 제안하는 두 가지 기회적 간섭 완화 기술을 사용했을 때 K -셀 상향링크 네트워크에 대한 자유도가 주어진다.

정리 1: 셀 당 동시에 전송하는 사용자 수가 S 일 경우 기회적 간섭 널링 및 정렬 방안이 간섭 다중 접속 채널에 사용되었다고 가정하자. 이 때 다음의 사용자 스케일링 조건

$$N = \omega(SNR^{(K-1)S}), S \in \{1, \dots, M\}$$

이 만족하면 높은 확률로 전체 자유도 KS 성취가 가능하다.¹⁾

간이증명: 본 논문에서는 간략화된 증명 과정을 보이도록 한다. 제안하는 기회적 간섭 완화 기술 사용 시 기지국에서의 신호 부분 공간 안에 존재하는 신호 벡터 당 간섭이 수신 신호 대 잡음비와 무관한 $\epsilon_0 > 0$ 와 같거나 작게 주어지는 확률을 P_O 라 하자. 수신기에서 존재하는 신호 벡터 당 간섭량이 ϵ_0 미만이면 신호 벡터 당 자유도는 1이 되므로, 총 자유도는 KS 가 된다. 즉, 가정하는 간섭 다중 접속 채널에서는 전체 시간의 P_O 만큼에 대해서 자유도 KS 가 성취된다. 이 때 수학적 처리를 통하여 $N = \omega(SNR^{(K-1)S})$ 일 때 P_O 가 1로 수렴함을 확인할 수 있다. 따라서, 주어진 사용자 스케일링 조건 하에서 전체 자유도 KS 성취가 가능하다.

위 결과는 전체 자유도 KS 를 얻기 위해 신호 대 잡음비가 증가함에 따라 단말 수 N 이 $SNR^{(K-1)S}$ 보다 더 빠르게 스케일해야 함을 의미한다. 위 정리로부터 단말 수 N , 신호 대 잡음비 SNR , 셀 수 K , 기지국 안테나 수 M 이 조건식 $N = \omega(SNR^{(K-1)M})$ 을 만족할 때 기회적 간섭 널링 기술을 통해 KM 의 자유도를 얻을 수 있으며, 이 값은 간섭 다중 접속 채널에서 최적의 자유도임을 알 수 있다.

IV. 분산 기회적 스케줄링 기술 (DOS)

본 장에서 설명하는 분산 기회적 스케줄링 기술은 간섭 다중 접속 채널에서 다중사용자 다이버시티 이득, 즉 $\log \log N$ 이득을 추가적으로 얻기 위한 기술이다. 본 기술 역시 기회적 간섭 완화 기술과 같이 단말-기지국 간 채널 정보를 통해 신호를 전송할 단말을 선택하는 방식은 동일하나, 선택 방법을 다르게 함으로써 자유도 이득뿐만 아니라 다중사용자 다이버시티 이득을 통한 용량 증대를 얻을 수 있다. 본 장에서는 기지국이 단일 안테나를 가진 $M=1$ 의 경우를 특별히 고려하도록 한다. 따라서 식 (1)에서 채널 정보 $h_{i,j}^{(i)}$, 기지국 수신 신호 $y^{(i)}$, 수신 잡음 $z^{(i)}$ 등 모두 스칼라 값으로 간주하도록 한다. 이 때, 각 셀 당 한 명의 단말이 선택되어 데이터를 전송하게 된다.

4.1. 스케줄링 방안

산 기회적 스케줄링 기술은 다음과 같이 전개된다. 모든 셀 기지국은 각자의 파일럿 신호를 브로드캐스트한다. 각 단말들은 수신한 파일럿 신호들을 이용해 해당 셀 기지국 간의 채널 정보 및 타 셀 기지국 간의 채널 정보를 얻을 수 있다. 채널 정보를 얻은 단말들은 케환 여부를 결정하기 위해 특정 조건을 확인한다. 구체적으로, i 번째 셀의 j 번째 단말의 경우 아래와 같은 조건을 만족할 경우 해당 셀 기지국으로 케환 정보를 보낸다.

$$|h_{i,j}^{(i)}|^2 \geq \eta_{tr} \quad (10)$$

$$\sum_{k=1, k \neq i}^K |h_{i,j}^{(k)}|^2 SNR \leq \eta_I \quad (11)$$

여기서 η_{tr} 과 η_I 은 미리 정해진 임계값이다. 즉,

1) 다음 기호를 사용한다. i) $f(x) = o(g(x))$ 는 $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = 0$ 을 의미한다. ii) $g(x) = o(f(x))$ 이면 $f(x) = \omega(g(x))$ 이다.

셀 내 단말들 중 해당 셀 기지국과의 채널 세기가 특정 임계값 이상이고, 타 셀 기지국에 미치는 간섭 채널 세기의 합이 특정 임계값 이하인 단말들이 피드백을 보낸다.

기지국은 피드백을 보낸 단말 중 하나의 단말을 선택하여 신호를 전송하도록 명령한다. 만일 해당 기지국에 피드백을 보낸 단말이 하나 이상일 경우 기지국에서는 랜덤하게 하나의 단말을 선택하는 과정을 따른다. 피드백을 보낸 단말이 존재하지 않을 경우, 그 타임 슬롯에서는 어떠한 단말도 신호를 전송하지 못한다.

4.2. 용량 스케일링 분석

본 절에서는 앞에서 설명한 분산 기회적 스케줄링 기술을 사용할 경우 얻을 수 있는 다중사용자 다이버시티 이득과 이에 따른 채널 용량 스케일링을 분석한다. 우선 모든 셀에서 적어도 하나의 단말이 선택되는 것을 가정할 경우 얻을 수 있는 전체 용량은 다음과 같다.

$$R \geq \sum_{i=1}^K \log \left(1 + \frac{|h_{i,u_i}^{(i)}|^2 P}{N_0 + \sum_{k \neq i} |h_{k,u_k}^{(i)}|^2 P} \right) \geq K \log \left(\frac{\eta_{tr} SNR}{1 + \eta_I} \right) \tag{12}$$

위 식에서 u_i 는 i 번째 셀에서 선택된 단말을 가리킨다. 선택된 단말은 임계 조건식 (10)과 (11)를 만족하므로 위 식의 부등호 관계를 만족한다. 이제 다음에서 소개될 정리로부터 제안하는 분산 기회적 스케줄링 기술을 사용했을 때 K -셀 상향링크 네트워크에 대한 용량 스케일링 결과가 주어진다.

정리 2: 분산 기회적 스케줄링 방안이 $M=1$ 인 단일 안테나 기지국 기반 간섭 다중 접속 채널에 사용되었다고 가정하자. 여기에서 $\eta_{tr} = \epsilon \log N$, $\epsilon \in (0,1)$ 로 정하고 η_I 를 수신 신호 대 잡음비와 무관한 특정 상수로 가정할 때, 다음의 사용자 스케일링 조건

$$N = \omega \left(SNR \frac{K-1}{1-\epsilon} \right)$$

이 만족하면, 높은 신호 대 잡음 비 영역에서 다음의 용량

$$\Theta(K \log SNR(\log N)) \tag{13}$$

이 취득 가능하다.

증명: $\eta_{tr} = \epsilon \log N$, η_I 를 특정 상수로 정했을 때, 모든 셀에서 적어도 한 개의 단말이 선택될 수 있음을 밝힌다. 즉, 위와 같이 임계값을 정할 경우 모든 셀에서 적어도 한 개의 단말이 선택될 확률이 1에 가까움을 증명한다. i 번째 셀 내 j 번째 단말이 임계 조건 식 (10)을 만족할 확률은 다음과 같다.

$$\Pr\{|h_{i,j}^{(i)}|^2 \leq \eta_{tr}\} = 1 - e^{-\eta_{tr}} \tag{14}$$

위와 같은 확률은 채널 값이 레일리 분포를 따르기 때문이다. 그리고 임계 조건 (11)를 만족할 확률은 $K-1$ 개의 독립적인 채널 전력 합의 누적 분포를 $F(x)$ 라 할 때 $F(\eta_I SNR^{-1})$ 로 표현할 수 있다. 이 누적 분포는 $2(K-1)$ 의 자유도를 가지는 카이-제곱 (chi-square) 분포를 따르므로 다음과 같다.

$$\Pr\left\{ \sum_{k=1, k \neq i}^K |h_{i,j}^{(k)}|^2 SNR \leq \eta_I \right\} = F(\eta_I SNR^{-1}) = \frac{\gamma(K-1, \eta_I SNR^{-1}/2)}{\Gamma(K-1)} \tag{15}$$

여기서 $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$ 는 감마(Gamma)

함수를, $\gamma(z, x) = \int_0^x t^{z-1} e^{-t} dt$ 는 lower 불완전 감마 (incomplete Gamma) 함수를 의미한다. 이제 식 (14) 및 (15)를 이용하여 셀 내 N 개 단말 중 두 가지 임계 조건을 만족하는 단말이 적어도 하나 존재하는 확률을 계산할 수 있고, 다음과 같다.

$$1 - \left(1 - F(\eta_I SNR^{-1}) e^{-\eta_{tr}} \right)^N \tag{16}$$

여기서 위와 같이 두 개의 임계값을 정했을 때, 주어진 사용자 스케일링 조건을 만족하면 식 (16)의 확률값이 1에 가까워지게 된다. 이에 따라 전체 시스템은 자유도 K 뿐만 아니라 $\log \log N$ 의 다중사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있게 된다.

정리하면, 분산 기회적 스케줄링 기술을 이용하면 사용자 당 자유도 1 뿐만 아니라 $\log \log N$ 의 다중사용자 다이버시티 이득을 추가로 얻을 수 있다. 이를 얻기 위한 조건으로 두 임계값이 $\eta_{tr} = \epsilon \log N$,

η_I 는 특정 상수로 정해야 하며, 셀 당 단말 수가 $N = \omega \left(SNR \frac{K-1}{1-\epsilon} \right)$ 를 만족해야 한다. 또한 각 셀 당 한 명의 단말이 선택되어 데이터를 전송하는 기준 가정 하에서 정리 2에서 주어진 식 (13)이 용량 스케일링 측면에서 최적임을 확인할 수 있다.

V. 모의실험 결과

본 장에서는 본 논문에서 제안한 기회적 간섭 완화 기술 및 분산 기회적 스케줄링 기술을 다른 기존의 기회적 전송 기술들과 모의실험을 통해 성능 비교한다. 특히 III 및 IV장에서 주로 전개된 점근적인 분석을 통해 전개된 반면, 본 장에서는 모의실험을 통해 시스템 변수인 단말 수 N 과 신호 대 잡음비 SNR 이 유한한 경우에도 제안하는 기법이 기존 기술 대비 시스템 용량 측면에서 우월함을 보임에 의미가 있다.

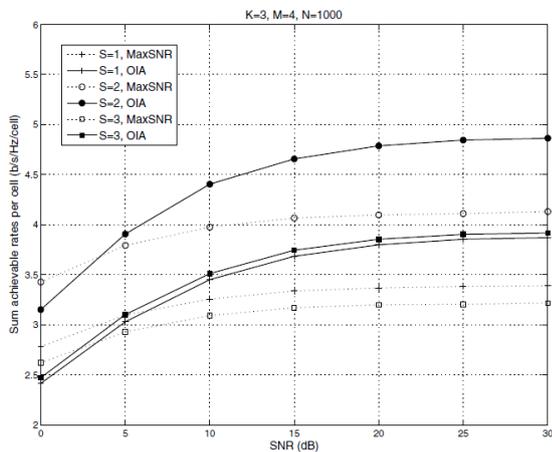


그림 1. 신호 대 잡음비 대비 셀 당 총 용량 (기회적 간섭 정렬 기술, $M=4$, $K=3$, $N=1000$)
 Fig. 1. The sum throughput per cell with respect to SNR (OIA, $M=4$, $K=3$, $N=1000$)

그림 1은 기회적 간섭 정렬 기술 사용 시 가정하는 간섭 다중 접속 채널에서의 셀 당 총 용량을 신호 대 잡음비에 따라 표시한 것이다. 총 $K=3$ 개 셀 환경에서 각 셀 내에 $N=1000$ 개의 단말이 존재하고, 기지국은 $M=4$ 개의 안테나를 가지고 있다고 가정한다. 각 셀에서 선택되는 단말의 수는 $S=1, 2, 3$ 일 때의 결과를 표시하였다. 세 가지 경우 중 $S=2$ 일 때 가장 좋은 전송률 합을 얻을 수 있다. 이 경우가 $S=1$ 보다 성능이 좋은 것은 더 많은 단말이 동시에 전송할 수 있기 때문이

라고 생각할 수 있다. 그러나 $S=3$ 일 때 성능이 더 악화되는 것은 더 많은 단말이 동시에 전송하지만 이에 따르는 단말 간 간섭이 강해지기 때문이라고 볼 수 있다. 성능을 비교하기 위해 모의실험한 기존 기회적 전송 기술은 각 셀에서 기지국과 최대 수신 SNR 크기를 가지는 단말을 선택하는 방식이다. (여기서 우리는 MaxSNR 방식으로 명명한다.) 그림 1에서 나타나는 것과 같이, 기회적 간섭 정렬 기술이 기존 MaxSNR 기술 대비 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 시스템 변수 K , M , N 의 함수로 총 용량을 최대화하는 측면에서 최적인 동시에 전송 가능한 단말 수 S 를 사전에 결정할 수 있다. 이에 대한 정량적인 결과는 본 논문에서는 생략하도록 한다.

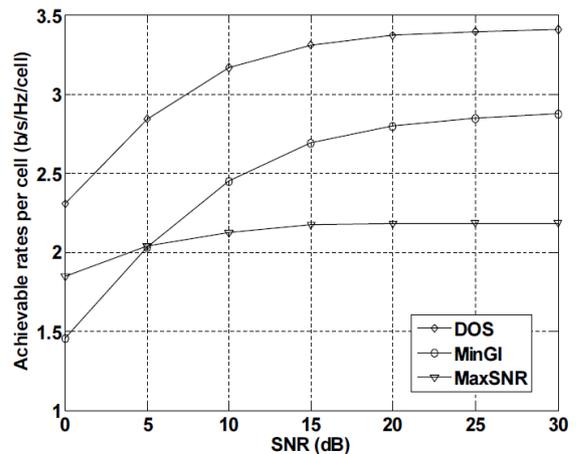


그림 2. 신호 대 잡음비 대비 셀 당 총 용량 (분산 기회적 스케줄링 기술, $K=3$, $N=1000$)
 Fig. 2. The sum throughput per cell with respect to SNR (DOS, $K=3$, $N=1000$)

그림 2는 분산 기회적 스케줄링 기술 사용 시 가정하는 간섭 다중 접속 채널에서의 셀 당 총 용량을 신호 대 잡음비에 따라 표시한 것이다. 총 $K=3$ 개 셀 환경에서 각 셀에 $N=1000$ 개의 단말이 존재하고, 기지국은 단일 안테나 (즉, $M=1$)를 가진다고 가정한다. 이 때 각 셀에서는 한 개의 단말이 선택된다. 이 때 제안하는 스케줄링 기술을 모의 실험에 적합하도록 변경하도록 한다. 구체적으로, 주어진 η_I 에 대해 임계값 (11)을 만족하는 단말들 중에 자신의 채널 링크에 대해 최대 신호 크기를 가지는 단말이 셀 당 최종 선택되는 방안을 따른다. 이 때 작은 η_I 값을 가정하면 셀 간 간섭이 감소하지만 더 작은 다중사용자 다이버시티 이득을 가져

온다. 반면, 큰 η_I 값은 증가되는 간섭량의 비용으로 다중사용자 다이버시티 이득을 증가시킨다. 따라서 시스템 용량 증대를 위해서는 η_I 를 주의깊게 잘 선택해주어야 한다. 그림 2에서 가정하는 모의실험 환경 하에서는 최적의 η_I 는 0.5로 주어진다. 또한 본 모의 실험에서는 앞에서 설명한 MaxSNR 방식과 함께, 간섭을 최소화하는 기회적 스케줄링 방식과도 비교하였다. (여기서 우리는 MinGI 방식으로 명명한다.) MinGI 방식은 각 셀에서 타 셀에 최소한의 간섭을 가하는 단말이 선택되는 방식이다. 그림 2에서 나타나는 것과 같이, 기회적 간섭 정렬 기술이 기존 MaxSNR 및 MinGI 기술 대비 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 시스템 변수 K 와 N 의 함수로 총 용량을 최대화하는 측면에서 최적인 임계값 η_I 를 사전에 결정할 수 있다. 이에 대한 정량적인 결과는 본 논문에서는 생략하도록 한다.

VI. 결 론

세 가지 종류의 저 복잡도 기회적 통신 기술이 실제적인 상향링크 다중 셀 네트워크를 잘 모델링하는 간섭 다중 접속 채널에서 제안되었다. 소개된 기술은 전역적인 채널 상태 정보, 시간/주파수와 같이 자원 확장, 반복 (iteration)을 통한 변수 적응을 필요로 하지 않기 때문에 구현 측면에서 용이함을 확인하였다. 첫째, 기회적 간섭 완화 기술 (기회적 간섭 널링 및 기회적 간섭 정렬)은 셀 당 사용자 수 N 이 $SNR^{(K-1)S}$ ($S \in \{1, \dots, M\}$)보다 빠르게 스케일하는 경우, 자유도 KS 가 점근적으로 취득 가능함을 분석하였다. 또한 $S=M$ 일 때 기회적 간섭 널링 기술을 사용하는 것이 자유도 측면에서 최적임을 보였다. 둘째, 분산 기회적 스케줄링 기술은 N 이 $SNR^{\frac{K-1}{1-\epsilon}}$ 보다 빠르게 스케일하는 경우, 시스템 용량 $\Theta(K \log SNR(\log N))$ 이 취득 가능함을 분석하였다. 뿐만 아니라 모의실험을 통해 유한한 시스템 변수 영역에서도 제안하는 기법이 기존의 기회적 전송 기술보다 총 용량 측면에서 우수함을 검증하였다.

References

[1] O. Somekh and S. Shamai (Shitz),

"Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multi-access channel with fading," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1401-1425, July 2000.

[2] N. Levy and S. Shamai (Shitz), "Information theoretic aspects of users' activity in a Wyner-like cellular model," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 5, pp. 2241-2248, July 2010.

[3] 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.

[4] K. 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.

[5] T. Gou and S. A. Jafar, "Degrees of freedom of the K-user $M \times N$ MIMO interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 12, pp. 6040-6057, Dec. 2010.

[6] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Degrees of freedom of wireless X networks," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, Toronto, Canada, pp. 1268-1272, July 2008.

[7] C. Suh and D. Tse, "Interference alignment for cellular networks," in *Proc. 46th Annual Allerton Conf. Commun., Control, Comput.*, Monticello, IL, pp. 1037-1044, Sept. 2008.

[8] B. C. Jung and W.-Y. Shin, "Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular TDD uplink," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 148-150, Feb. 2011.

[9] B. C. Jung, D. Park, and W.-Y. Shin, "A study on the optimal degrees-of-freedom of cellular networks: Opportunistic interference mitigation," in *Proc. Asilomar Conf. Signals, Syst., Comput.*, Pacific Grove, CA, pp. 2067-2071, Nov. 2010.

[10] S.-H. Hur, B. C. Jung, and B. D. Rao, "Sum rate enhancement by maximizing

SGINR in an opportunistic interference alignment," in *Proc. Asilomar Conf. Signals, Syst., Comput.*, Pacific Grove, CA, pp. 354-358, Nov. 2011.

- [11] R. Knopp and P. Humblet, "Information capacity and power control in single cell multiuser communications," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Seattle, WA, June 1995, pp. 331-335.
- [12] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277-1294, Aug. 2002.
- [13] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 2, pp. 506-522, Feb. 2005.
- [14] J. Lee and B. C. Jung, "Performance analysis of coordinated random beamforming technique in multi-cell environments," *J. Inf. Commun. Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 393-398, Aug. 2010.
- [15] L. Li, M. Pesavento, and A. B. Gershman, "Downlink opportunistic scheduling with low-rate channel state feedback: Error rate analysis and optimization of the feedback parameters," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 10, pp. 2871-2880, Oct. 2010.
- [16] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Multi-antenna downlink channels with limited feedback and user selection," *IEEE J. Sel. Areas. Commun.*, vol. 25, no. 7, pp. 1478-1491, Sept. 2007.
- [17] S. Cui, A. M. Haimovich, O. Somekh, and H. V. Poor, "Opportunistic relaying in wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 11, pp. 5121-5137, Nov. 2009.
- [18] W.-Y. Shin, S.-Y. Chung, and Y. H. Lee, "Parallel opportunistic routing in wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, under revision for possible publication, from <http://arxiv.org/abs/0907.2455>.
- [19] T. W. Ban, W. Choi, B. C. Jung, and D. K. Sung, "Multi-ser diversity in a spectrum sharing system," *IEEE Trans. Wireless*

Commun., vol. 8, no. 1, pp. 102-106, Jan. 2009.

신 원 용 (Won-Yong Shin)



2002년 2월 연세대학교 기계 전 자공학 학사

2004년 2월 KAIST 전자전산 학과 석사

2008년 8월 KAIST 전자전산 학부 박사

2008년 2월~4월 Harvard University 방문연구원

2008년 9월~2009년 2월 KAIST BK 정보전자연구소 박사후연구원

2009년 3월~4월 KAIST 고성능집적시스템연구센터 선임급 위촉연구원

2008년 8월~2009년 4월 (주)루미콤 방문연구원

2009년 5월~2011년 10월 Harvard University Postdoctoral Fellow

2011년 10월~2012년 2월 Harvard University Research Associate

2012년 3월~현재 단국대학교 국제학부 모바일시스템공학전공 조교수

<관심분야> 정보이론, 통신이론, 신호처리, 네트워킹 이슈로의 다양한 응용

박 도 형 (Dohyung Park)



2005년 8월 KAIST 전자공학과 졸업

2008년 8월 KAIST 전자공학과 석사

2011년 8월~현재 The University of Texas at Austin 전자공학과 박사과정