

기회적 간섭 정렬의 개요

정방철, 조문제
경상대학교

요약

기회적 간섭 정렬 기술은 사용자 간섭 채널에서 탁월한 이론적 성능을 보이는 간섭 정렬 기술을 다수의 사용자와 기지국, 다수의 안테나가 존재하는 다중 셀 다중안테나 셀룰라 네트워크에 적용하는 기술 중 하나로서 각 셀의 사용자가 증가할수록 이론적인 최적 자유도를 달성하는 기술이다. 기회적 간섭 정렬 기법의 장점은 각 셀 상호 정보의 교환 없이 독립적으로 동작하고 각 사용자는 자신과 연관된 채널 정보(local channel state information, local CSI)만을 요구한다는 것이다. 셀의 크기가 감소하고 기지국 및 사용자 단말의 밀도가 크게 증가할 것으로 예상되는 5세대 이동통신 시스템에서는 각 통신링크간 간섭제어가 매우 중요할 것으로 예상된다. 따라서, 본 논문에서는 5세대 이동통신 시스템에서 핵심적인 역할을 할 것으로 예상되는 기회적 간섭 정렬 기법에 관하여 살펴본다.

I. 서론

최근 차세대 무선 통신 시스템인 5G 이동통신 시스템에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. ITU-R에서는 5G 이동통신 시스템에 사용될 주파수 및 원천기술을 검토하고 있으며 새로운 이동통신 서비스 비전에 관한 연구도 수행하고 있다[1]. 소형셀, Massive MIMO(multi-input multi-output), 다중 협력 전송(coordinated multi-point, CoMP), 이종 네트워크, 간섭 관리, in-band full-duplex 전송방식, 인지 무선 통신과 같은 다양한 기술들이 5G 이동통신 시스템에 사용될 후보 기술로 고려되고 있다[2]. 이러한 기술 중 간섭 관리는 5G 시스템의 전송률을 향상시키기 위한 가장 핵심적인 기술로 여겨지고 있다. 특히, 셀룰라 네트워크가 소형 셀과 사용자 단말기로 인해 점점 더 밀집되어 가고 있어 간섭 관리는 더욱 중요해지고 있다.

최근 사용자 간섭채널에서 간섭 문제를 효과적으로 해결하기 위해 UC Irvine의 S. A. Jafar 교수 연구팀은 새로운 간섭 관

리 기법인 간섭 정렬(interference alignment, IA) 기술을 제안하였다[3]. 간섭 정렬의 기본적인 개념은 다른 사용자들로부터의 간섭은 수신단에서 미리 정의된 공간으로 정렬시키고 각 수신단에서 복호할 데이터 신호는 간섭공간과 분리시키는 것이다. 간섭 정렬 기술을 이용하면 시변 채널에서 K 명의 사용자 간섭 채널의 최적자유도(degrees-of-freedom, DoFs)인 $K/2$ 를 얻을 수 있음이 증명되었다[3]. 간섭 정렬 기술은 이후 학계와 산업계로부터 매우 많은 관심을 받았고 MIMO 사용자 간섭 채널, 인지무선채널, X 채널 등에 응용되었다. 그러나 간섭 정렬 기술이 최적의 자유도를 달성하기 위해서는 각 사용자가 자신이 연관되지 않은 무선 채널에 대한 정보(global channel state information, global CSI)를 알아야 하고 채널의 사용 횟수가 무한대로 증가해야 하는 등의 근본적인 문제점이 존재한다.

한편, 간섭 정렬 기술은 셀룰라 네트워크에도 적용되었다[4][5]. [4]에서는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 사용자의 수가 무한대로 증가할 경우 각 셀에서 1의 자유도가 달성 가능하다는 것이 증명되었다. 이는 간섭이 전혀 없을 때 얻을 수 있는 최대 자유도를 간섭이 존재할 때도 달성 가능하다는 결과로서 매우 흥미롭다. 그러나 [4]에서 제안된 sub-space IA가 적용되기 위해서 무선 채널이 특정 조건을 만족해야 하는데, 다중안테나 채널이나 Rayleigh 페이딩 채널에서 이 조건이 일반적으로 만족되는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. [5]에서는 다중 셀 하향링크 네트워크에서 간섭 정렬 기술이 제안되었다. 하향링크는 상향링크와 달리 각 기지국에서 간섭정렬을 위한 빔포밍이 수행되어야 하고 간섭을 미치는 송신단이 고정되어 있어 간섭 정렬을 수행하기가 쉽지 않음에도 불구하고 [5]에서 제안된 직렬로 연결된 two-step 빔포밍 기법을 이용하면 간섭정렬이 가능함을 보였다. 그러나 [5]에서 제안된 기법은 셀이 2개 존재할 때만 간섭정렬이 가능하고 3개 이상의 셀이 존재할 경우 나머지 셀에서 도착하는 간섭은 잡음으로 여겨야 하는 한계가 존재한다.

최근 간섭 정렬 기법과 사용자 스케줄링 기법을 효과적으로 결합하는 기회적 간섭 정렬 기술(opportunistic interference

alignment, OIA)이 제안되었다[6]–[12]. 다중셀 상향링크에서 제안된 OIA 기술에서는 각 기지국은 간섭공간을 미리 정의하고 사용자들 중에서 발생하는 간섭이 이 공간으로 가장 잘 정렬된 사용자를 선택한다. 다중셀 하향링크 네트워크용 OIA 기술은 [5]에서 제안된 기지국용 송신단 빔포밍 기법과 간섭의 양을 최소화하는 사용자용 수신단 빔포밍 기법을 결합하고 발생하는 등가적 간섭의 양이 최소인 사용자를 선택한다. OIA 기술을 사용하면 특정한 사용자 스케일링 조건을 만족하면 최적의 자유도가 달성 가능성이 증명되었다. 초기 제안된 기하적 간섭 정렬 기술은 주로 간섭을 줄이는데 초점을 맞추었다. 그러나 실제 셀룰러 네트워크의 성능 지표가 되는 전송율, 전송 지연 시간, 사용자간 형평성 등을 높이려면 자기 신호 세기를 고려하는 것이 중요하다. 따라서 최근 전송률 향상을 위해 OIA 기술의 변형된 형태가 하향링크와 상향링크를 위해 각각 제안되었다[11][13]. 또한 셀룰러 네트워크 뿐 아니라 무선 랜 시스템과 같은 랜덤 액세스 네트워크(random access network, RAN)의 간섭 관리를 위해 OIA를 사용하는 기술이 제안되었다[14].

본 논문에서는 OIA 기술의 기본 동작 원리들과 응용 기술들을 개략적으로 소개한다. 본 논문에서 각 사용자와 기지국은 다중 안테나를 가진다고 가정하고 다중 셀 환경을 가정한다. 상향링크 기하적 간섭 정렬 기술에서는 시분할 이중통신(time division duplex, TDD)을 가정하고 하향링크 기하적 간섭 정렬 기술에서는 주파수 분할 이중통신과 시분할 이중통신 모두 적용이 가능하다. 랜덤액세스 네트워크에 적용된 기하적 간섭 정렬 기술에서는 상향링크만을 고려한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장과 제 3장에서는 각각 상향링크용 OIA 기술과 하향링크용 OIA 기술을 소개한다. 제 4장은 OIA 기술의 전송률 향상 기법들에 대해 소개하고 제 5장은 랜덤 액세스 네트워크에 적용된 OIA 기술 대해 소개한다. 제 6장에서 결론을 맺는다.

II. 상향링크 기하적 간섭 정렬

본 장에서는 K 개의 셀로 구성된 다중안테나 기반 상향링크 네트워크를 모사하는 다중입출력 간섭 다중접속채널(interfering multiple access channel, IMAC)에 적용된 OIA 기술에 대해 살펴본다.

(그림 1)은 셀 2개($k = 2$), 기지국 안테나 3개($M = 3$), 사용자 안테나 3개($L = 3$), 각 기지국에서 간섭공간의 차원은 1, 신호 공간의 차원은 2($S = 2$)일 때 상향링크 기하적 간섭 정렬 모델을 나타낸다.

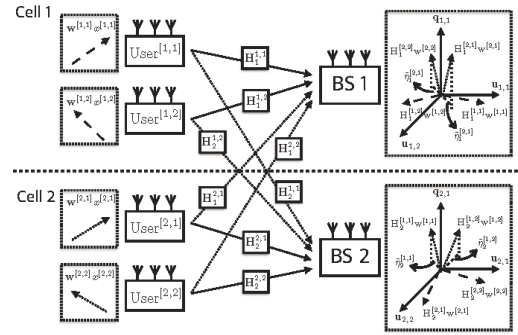


그림 1. 상향링크 OIA 기법의 기하학적 모형

가. 상향링크 OIA 기술의 전체적인 절차

1. 기준 신호 전송

먼저 각 기지국은 간섭 정렬을 위한 간섭 공간을 $\mathbf{Q}_k = [\mathbf{q}_{k,1}, \dots, \mathbf{q}_{k,M-S}]$ 로 정의한다. 여기서 $\mathbf{q}_{k,m} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 정규화된 직교 벡터이고, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 이고 $m = 1, \dots, M - S$ 이다. k 번째 기지국은 독립적으로 $\mathbf{q}_{k,m}$ 를 생성한다. 또한, 주어진 \mathbf{Q}_k 에 대해 k 번째 기지국은 \mathbf{Q}_k 에 대한 직교 공간을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{U}_k = [\mathbf{u}_{k,1}, \dots, \mathbf{u}_{k,S}] \triangleq \text{null}(\mathbf{Q}_k), \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{u}_{k,i} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 도 정규화된 직교 벡터이고 이것은 모든 셀에 존재하는 사용자에게 전송된다.

2. 송신 빔포밍 벡터 생성 및 스케줄링 매트릭스 피드백

본 절에서는 $i \in \kappa$ 번째 셀에 존재하는 $j \in \mathbb{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 번째 사용자의 송신 빔포밍을 위한 weight 벡터 $\mathbf{w}^{[i,j]}$ 를 정의한다. 여기서 $\|\mathbf{w}^{[i,j]}\| = 1$ 이다. $\mathbf{w}^{[i,j]}$ 설계에 대해 특이값 분해 방법 (singular value decomposition, SVD)을 사용한다. 각 셀에서 생성된 신호 공간인 \mathbf{U}_k 와 각 사용자의 무선 채널 매트릭스 $\mathbf{H}_k^{[i,j]} \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 를 이용하여 i 번째 셀의 j 번째 사용자의 k 에 셀에 미치는 LIF(leakage of interference)는 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} \eta_{k,UL}^{[i,j]} &= \left\| \text{Proj}_{\perp \mathbf{Q}_k} \left(\mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{w}^{[i,j]} \right) \right\|^2 \\ &= \left\| \mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{w}^{[i,j]} \right\|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $i \in \kappa$, $j \in \mathbb{N}$ 이고 $k \in \kappa \setminus i = \{1, \dots, i-1, i+1, \dots, K\}$ 이다. 채널행렬 $\mathbf{H}_k^{[i,j]}$ 는 i 번째 셀의 j 번째 사용자와 k 번째 기지국 사이의 채널을 가리키고 TDD 의 채널 호환성 특성을 이용하여 k 번째 기지국에서 주기적으로 전송하는 파일럿 신호를 이용하여 각 사용자가 획득한다고 가정한다. i 번째 셀에 j 번째 사용자의 스케줄링 매트릭스는 인접 셀들로 가는 LIF 값들

의 합으로 정의되고 $\mathbf{h}^{[i,j]}$ 로 나타낸다. 이것은 인접 셀의 간섭 공간으로 정렬되지 않고 신호공간으로 수신되는 간섭의 총합을 의미한다.

$$\eta_{UL}^{[i,j]} = \sum_{k=1, k \neq i}^K \eta_{k,UL}^{[i,j]} \quad (3)$$

각 사용자는 (3)을 최소화하는 송신 빔포밍 벡터를 특이값 분해 기법을 이용하여 생성한다.

$$\mathbf{w}^{[i,j]} = \arg \min_{\mathbf{w}} \eta_{UL}^{[i,j]} = \arg \min_{\mathbf{w}} \sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| \mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{w} \right\|^2 \quad (4)$$

각 사용자는 (4)에서 계산된 빔포밍 벡터를 사용했을 때 계산된 (3)을 자신이 속한 기지국으로 전송한다.

3. 사용자 스케줄링

각 기지국은 사용자들로부터 스케줄링 매트릭을 수신하고 가장 작은 매트릭을 가지는 사용자를 S 명 선택한다. 스케줄링을 통해 선택된 사용자들은 기지국에서의 신호 복호를 위해 $\mathbf{w}^{[i,j]}$ 에 대한 정보를 기지국으로 전송한다.

4. 데이터 전송

i 번째 셀의 j 번째 사용자의 빔포밍된 송신 신호는 $\mathbf{w}^{[i,j]} \mathbf{x}^{[i,j]}$ 로 주어진다. 여기서 $\mathbf{x}^{[i,j]}$ 는 단위 평균 전력을 갖는 변조된 송신 심볼이다. i 번째 기지국에서 수신한 신호벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}_i = \underbrace{\sum_{j=1}^S \mathbf{H}_i^{[i,j]} \mathbf{w}^{[i,j]} \mathbf{x}^{[i,j]}}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{m=1}^S \mathbf{H}_i^{[k,m]} \mathbf{w}^{[k,m]} \mathbf{x}^{[k,m]}}_{\text{inter-cell interference}} + \mathbf{z}_i \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{z}_i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 부가 잡음벡터를 나타내고 \mathbf{z}_i 의 각 원소는 평균이 0이고 분산이 SNR^{-1} 인 독립적이고 복소 가우시안 확률변수로 모델링된다. 각 기지국에서는 수신신호 벡터를 미리 정의된 신호 공간으로 사영(projection)한 후 셀 내의 사용자들의 신호 복원을 위하여 선형 ZF (zero-forcing) 알고리즘을 적용한다.

$$\mathbf{r}_i = [r_{i,1}, \dots, r_{i,S}]^T \triangleq \mathbf{F}_i^H \mathbf{U}_i^H \mathbf{y}_i \quad (6)$$

여기서 \mathbf{U}_i 는 i 번째 기지국의 간섭 공간에 정렬된 셀 간 간섭 요소를 제거하기 위해 곱해진다. $\mathbf{F}_i \in \mathbb{C}^{S \times S}$ 는 ZF 등화기로 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{F}_i = [\mathbf{f}_{i,1}, \dots, \mathbf{f}_{i,S}] \triangleq \left(\left[\mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_i^{[i,1]} \mathbf{w}^{[i,1]}, \dots, \mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_i^{[i,S]} \mathbf{w}^{[i,S]} \right]^{-1} \right)^H \quad (7)$$

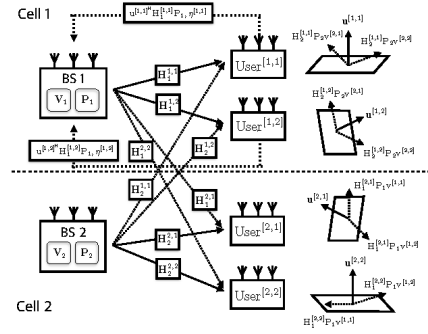


그림 2. 하향링크 OIA 기법의 기하학적 모형

나. 전송을 계산

(6)으로부터 j 번째 공간적 스트림 $r_{i,j}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$r_{i,j} = x^{[i,j]} + \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{m=1}^S \mathbf{f}_{i,j}^H \mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_i^{[k,m]} \mathbf{w}^{[k,m]} x^{[k,m]} + \mathbf{f}_{i,j}^H \mathbf{z}_i \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{z}'_i \triangleq \mathbf{U}_i^H \mathbf{z}_i$ 이다. 따라서 $R^{[i,j]}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$R^{[i,j]} = \log(1 + \text{SINR}^{[i,j]}) = \log \left(1 + \frac{\text{SNR}}{\|\mathbf{f}_{i,j}\|^2 + I_{i,j}} \right) \quad (9)$$

여기서 $\text{SINR}^{[i,j]}$ 는 i 번째 셀에 j 번째 사용자 의 신호 대 간섭 및 잡음 비를 나타내고 $I_{i,j}$ 는 간섭의 총 합으로 다음과 같이 정의된다.

$$I_{i,j} = \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{m=1}^S \left| \mathbf{f}_{i,j}^H \mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_i^{[k,m]} \mathbf{w}^{[k,m]} \right|^2 \text{SNR} \quad (10)$$

III. 하향링크 기회적 간섭 정렬

본 장에서는 K 개의 셀로 구성된 다중안테나 기반 하향링크 네트워크를 묘사하는 간섭 방송 채널 (interfering broadcast channel, IBC)에 적용된 OIA 기술에 대해 소개한다. 본 기술은 ODIA (opportunistic downlink interference alignment)로 불리며 인접 셀 기지국으로부터의 셀간 간섭의 영향과 동일 셀 내의 사용자 스트림간 간섭의 영향을 효율적으로 줄인다. 그림 2는 은 셀 2개 ($k=2$), 기지국 안테나 3개 ($M=3$), 사용자 안테나 3개 ($L=3$), 각 기지국에서 간섭공간의 차원은1, 신호 공간의 차원은 2 ($S=2$)일 때 하향링크 기회적 간섭 정렬

모델을 나타낸다.

가. 하향링크 OIA의 전체적인 절차

1. 기준 랜덤 빔포밍 행렬 전송

먼저 각 기지국에서는 사용되는 precoding 기술은 미리 결정된 기준 빔포밍 행렬 \mathbf{P}_k 와 user-specific 빔포밍 행렬 \mathbf{V}_k 로 구성된다. 먼저 $\mathbf{P}_k = [\mathbf{p}_{1,k}, \dots, \mathbf{p}_{S,k}]$ 는 k 번째 셀의 기지국에서 무작위적으로 생성된 기준 빔포밍 행렬로서 $\mathbf{p}_{s,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 $k \in \mathcal{K}$ 이고 $s = 1, \dots, S$ 인 정규화된 직교 벡터이다.

\mathbf{P}_k 가 미리 정해진 무작위적 방식으로 생성되므로 기지국은 사용자에게 이것을 알려줄 필요가 없다.

2. 수신 빔포밍 및 스케줄링 매트릭 피드백

i 번째 셀에 j 번째 사용자는 파일럿 신호를 통해 k 번째 셀 기지국으로부터 자신에게 도착하는 무선 채널 행렬 $\mathbf{H}_k^{[i,j]}$ 를 얻게 된다. 여기서 k 는 자신이 속한 셀과 간섭을 일으키는 네트워크내의 모든 셀을 포함한다 ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$). 각 사용자는 획득한 간섭 채널 행렬과 미리 알려진 랜덤 빔포밍 행렬 \mathbf{P}_k 를 이용하여 수신 빔포밍 벡터 $\mathbf{u}^{[i,j]} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 를 설계한다. user-specific 빔포밍 행렬 \mathbf{V}_k 는 오직 셀 내 간섭을 제거하는데 이용되므로 \mathbf{V}_k 는 각 사용자의 셀 간 간섭에 영향을 미치지 않는다. 따라서 채널 매트릭스 $\mathbf{H}_k^{[i,j]}$ 와 기준 빔포밍 매트릭스 \mathbf{P}_k 그리고 사용자의 수신 빔포밍 벡터 $\mathbf{u}^{[i,j]}$ 를 이용하면 i 번째 셀에 j 번째 사용자에서 k 번째 기지국으로부터 수신된 간섭의 양을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\eta_{k,DL}^{[i,j]} = \left\| \mathbf{u}^{[i,j]H} \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{P}_k \right\|^2, \quad (11)$$

여기서 $i \in \mathcal{K}$, $j \in \mathbb{N}$ 이고 $k \in \mathcal{K} \setminus i = \{1, \dots, i-1, i+1, \dots, K\}$ 이다. (11)을 이용하여 i 번째 셀에 j 번째 사용자의 스케줄링 매트릭은 인접 셀로부터 수신된 간섭 전력의 합으로 정의되며 $\eta^{[i,j]}$ 로 나타낸다.

$$\eta_{DL}^{[i,j]} = \sum_{k=1, k \neq i}^K \eta_{k,DL}^{[i,j]}. \quad (12)$$

각 사용자는 수신간섭의 양을 최소화하는 수신 빔포밍을 수행한다.

$$\mathbf{u}^{[i,j]} = \arg \min_{\mathbf{u}} \eta_{DL}^{[i,j]} = \arg \min_{\mathbf{u}} \sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| \mathbf{u}^H \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{P}_k \right\|^2 \quad (13)$$

각 사용자는 간섭의 양을 최소화하는 수신 빔포밍 벡터를 결정 한 후 그 벡터를 사용했을 때 발생하는 간섭의 양을 자신의 홈 셀 기지국으로 피드백한다. 또한 user-specific 빔포밍 매트릭스 \mathbf{V}_k 의 설계를 위해 각 사용자는 자신의 유효 채널 벡터도

피드백한다. i 번째 셀에 j 번째 사용자의 유효 채널 벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{u}^{[i,j]H} \mathbf{H}_i^{[i,j]} \mathbf{P}_i \quad (14)$$

3. 사용자 스케줄링

각 기지국은 자신의 셀에 속한 사용자들로부터 스케줄링 매트릭을 받으면 가장 작은 스케줄링 매트릭을 가지는 사용자, 즉 가장 작은 간섭을 인접셀로부터 수신하는 사용자 S 명을 선택한다.

4. User-Specific 송신 빔포밍 및 하향링크 데이터 전송

i 번째 기지국에서 i 번째 셀에 j 번째 사용자로 송신된 신호 벡터는 $\mathbf{v}^{[i,j]} \mathbf{x}^{[i,j]}$ 로 주어진다. 여기서 $\mathbf{x}^{[i,j]}$ 는 $1/S$ 의 전력을 갖는 변조된 송신 심볼이고 S 명의 사용자에게 대한 user-specific 빔포밍 행렬은 $\mathbf{V}_k = [\mathbf{v}^{[i,1]}, \dots, \mathbf{v}^{[i,S]}]$ 로 주어진다. $\mathbf{v}^{[i,s]} \in \mathbb{C}^{S \times 1}$ 이고 $i \in \mathcal{K}$ 이다. i 번째 셀의 송신 심볼 벡터를 $\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}^{[i,1]}, \dots, \mathbf{x}^{[i,S]}]^T$ 로 나타내고, i 번째 셀에 j 번째 사용자의 수신 신호 벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{[i,j]} &= \mathbf{H}_i^{[i,j]} \mathbf{P}_i \mathbf{V}_i \mathbf{x}_i + \sum_{k=1, k \neq i}^K \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{P}_k \mathbf{V}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{z}^{[i,j]} \\ &= \underbrace{\mathbf{H}_i^{[i,j]} \mathbf{P}_i \mathbf{V}_i \mathbf{x}_i}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{s=1, s \neq j}^S \mathbf{H}_i^{[i,j]} \mathbf{P}_i \mathbf{V}_i \mathbf{v}^{[i,s]} \mathbf{x}^{[i,s]}}_{\text{intra-cell interference}} \\ &\quad + \underbrace{\sum_{k=1, k \neq i}^K \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{P}_k \mathbf{V}_k \mathbf{x}_k}_{\text{inter-cell interference}} + \mathbf{z}^{[i,j]}, \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\mathbf{z}^{[i,j]} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 는 백색 가우시안 잡음 벡터를 나타내고, 이 잡음의 각 원소는 평균이 0이고 분산이 SNR^{-1} 인 독립적 복소 가우시안 확률변수로 모델링된다. (12)에 의하여 미리 결정된 수신 빔포밍에 벡터에 의해 후처리된 i 번째 셀의 j 번째 사용자의 수신 신호 벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}}^{[i,j]} &= \mathbf{u}^{[i,j]} \mathbf{y}^{[i,j]} = \mathbf{u}^{[i,j]} \mathbf{H}_i^{[i,j]} \mathbf{P}_i \mathbf{V}_i \mathbf{v}^{[i,j]} \mathbf{x}^{[i,j]} \\ &\quad + \mathbf{u}^{[i,j]H} \mathbf{H}_i^{[i,j]} \mathbf{P}_i \sum_{s=1, s \neq j}^S \mathbf{v}^{[i,s]} \mathbf{x}^{[i,s]} \\ &\quad + \mathbf{u}^{[i,j]H} \sum_{k=1, k \neq i}^K \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{P}_k \mathbf{V}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{u}^{[i,j]H} \mathbf{z}^{[i,j]}. \end{aligned} \quad (16)$$

수신 빔포밍 벡터와 사용자 스케줄링 과정을 통하여 (15)에서 인접 셀 간섭은 최소화되므로 각 송신단에서는 셀 내 간섭을 제거해야 한다. 셀 내 간섭을 제거하기 위해 user-specific 빔포밍 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_k &= [\mathbf{v}^{[i,1]}, \mathbf{v}^{[i,2]}, \dots, \mathbf{v}^{[i,S]}] \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}^{[i,1]H} \mathbf{H}_i^{[i,1]} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{u}^{[i,2]H} \mathbf{H}_i^{[i,2]} \mathbf{P}_i \\ \vdots \\ \mathbf{u}^{[i,S]H} \mathbf{H}_i^{[i,S]} \mathbf{P}_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma}^{[i,1]} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sqrt{\gamma}^{[i,2]} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sqrt{\gamma}^{[i,S]} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{S \times S}, \quad (17) \end{aligned}$$

여기서 $\sqrt{\gamma^{[i,j]}}$ 는 단위 송신 전력 조건을 만족시키기 위한 정규화 값이다. 결국 수신 신호는 다음과 같이 간소화될 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{y}}^{[i,j]} = \sqrt{\gamma^{[i,j]}} \mathbf{x}^{[i,j]} + \underbrace{\mathbf{u}^{[i,j]H} \sum_{k=1, k \neq i}^K \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{P}_k \mathbf{V}_k \mathbf{x}_k}_{\text{inter-cell interference}} + \mathbf{u}^{[i,j]H} \mathbf{z}^{[i,j]}, \quad (18)$$

(18)은 (17)에서의 송신 빔포밍에 의하여 셀 내 간섭을 포함하지 않음을 주목하라. 여기서 유효 채널의 정보, 스케줄링 매트릭스, 수신 빔포밍 벡터와 같은 정보 메시지의 교환과정에서 손실이 없다고 가정한다.

전송율 계산

(18)로부터 i 번째 셀에 j 번째 사용자의 달성 가능한 전송율은 다음과 같이 주어진다.

$$R^{[i,j]} = \log_2 \left(1 + \frac{\gamma^{[i,j]} |x^{[i,j]}|^2}{|\mathbf{u}^{[i,j]H} \mathbf{z}^{[i,j]}|^2 + \sum_{k=1, k \neq i}^K |\mathbf{u}^{[i,j]H} \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{P}_k \mathbf{V}_k \mathbf{x}_k|^2} \right) \quad (19)$$

$$= \log_2 \left(1 + \frac{\gamma^{[i,j]} \cdot \text{SNR}}{S + \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{s=1}^S |\mathbf{u}^{[i,j]H} \mathbf{H}_k^{[i,j]} \mathbf{P}_k \mathbf{v}^{[k,s]}|^2 \cdot \text{SNR}} \right)$$

IV. 기하적 간섭정렬 기술의 전송율 향상

2장과 3장에서 소개한 OIA 기술들은 인접셀 간섭을 최소화하는 기법으로 사용자의 수가 무한대로 증가할 때, 최적의 DoF를 달성하는 것이 기술들의 최종 목표이다. 그러나 실제적인 이동통신 시스템에서의 성능은 이론적인 DoF보다 데이터 전송율로 주어진다. 본 장에서는 기존에 제안된 OIA 기술을 보완하여 전송율을 향상시킨 기법들을 소개한다.

가. 상향링크 전송율 향상 기술

먼저 기존의 상향링크 OIA 기법에서는 기지국에서 사용자를 선택할 때, 사용자들이 피드백한 LIF만을 고려하여 인접셀로 미치는 간섭의 양이 가장 작은 사용자를 선택한다. 따라서 선택된 사용자들이 네트워크에 생성하는 간섭의 양은 최소화되지만 선택된 사용자들의 실제 신호 전송은 고려되지 않는다. 상향링크 OIA 기술의 전송율을 향상시키기 위해서는 사용자를 선택할 때 사용자가 생성한 간섭의 양, 즉 LIF값 뿐 아니라 사용자의 신호가 전송되는 신호 채널의 상태도 함께 고려되어야 한다. 본 논문에서는 LIF에 임계값을 설정하여 간섭 조건을 만들고 이 조건을 만족하는 사용자들 중 자기 신호 채널의 품질이 가장 좋은 S명의 사용자를 선택하는 전송율 성능이 향상된 OIA 기법을 소

개한다[13]. 이 기술은 기존의 상향링크 OIA 기법과 전체적으로 동일하게 동작한다. 그러나 사용자가 스케줄링 매트릭을 피드백할 때, 기존의 OIA 기법에서는 각 사용자가 (4)에서 정의된 LIF값만을 전송하는 반면 전송률 향상 기법에서는 (3)에서 계산된 상향링크 LIF값과 자신의 신호가 전송될 채널의 유효이득 값을 아래 식을 통해 계산해서 함께 피드백한다.

$$\text{SNR}^{[i,j]} = \|\mathbf{H}_i^{[i,j]} \mathbf{w}^{[i,j]}\|^2 \quad (20)$$

여기서 $\text{SNR}^{[i,j]}$ 는 자기 신호를 전송할 무선통신 링크의 유효이득을 나타내고 (20)의 $\mathbf{w}^{[i,j]}$ 벡터는 (4)에서 계산된 벡터와 동일하다. LIF의 임계값은 주어진 평균 SNR와 S에 대한 디자인 파라미터로서 본 논문에서는 δ 로 표기한다. 각 사용자는 스케줄링 매트릭을 아래 방식을 통해 기하적으로 피드백한다.

$\eta_{UL}^{[i,j]} \leq \delta$ 인 경우, 사용자는 해당 기지국으로 $\text{SNR}^{[i,j]}$ 를 피드백한다.

$\eta_{UL}^{[i,j]} > \delta$ 인 경우, 사용자는 피드백을 하지 않는다.

기지국에서는 위의 조건을 만족하는 사용자들의 스케줄링 매트릭이 수신되면 자기 신호의 유효이득 값이 가장 큰 S명을 선택한다. 따라서 이 기술을 이용하면 상향링크로 스케줄링 요청 신호를 보내는 사용자의 수가 줄어들게 되어 상향링크 제어신호의 오버헤드도 줄일 수 있다. 또한 임계값 δ 을 조정함으로써 각 셀에서 전체 네트워크로 발생하는 간섭의 양을 $S \cdot \delta$ 로 제한할 수 있다. 물론, δ 의 값은 전체 네트워크의 전송율을 최대화하도록 조절되어야 한다. 이 기술은 기존의 OIA 기법보다 훨씬 높은 전송율을 달성한다[13].

나. 하향링크 전송율 향상 기술

상향링크 OIA 기술과 비슷하게 하향링크 OIA 기술에서도 송신 빔포밍 기법은 모두 셀간 간섭과 셀내 간섭을 줄이거나 제거하는 용도로만 사용된다. 특히 사용자의 스케줄링 시 셀간 간섭의 양이 최소인 사용자를 선택하므로 선택된 사용자들의 신호채널에 대한 고려는 이루어지지 않는다. [11]에서는 하향링크 OIA 기법의 데이터 전송율을 개선하기 위하여 사용자의 선택 알고리즘을 수정한 SE-ODIA (spectrally efficient opportunistic interference alignment) 기술도 소개되었다. 또한 이 SE-ODIA는 셀내의 사용자의 수가 무한대로 증가할 경우 최적의 다중사용자 다이버시티 이득인 $\log \log N$ 을 달성한다. SE-ODIA에서는 [15]에서 제안된 SUS (semi-orthogonal user selection) 알고리즘을 ODIA 기술과 결합하여 전송율을 향상시킨다. SUS 알고리즘은 사용자를 선택할 때, 이미 선택된 사용자들과의 채널 상관도가 낮으면서 채널 이득이 높은 사용자를 선택하는 알고리즘으로서 하향링크 다중사용자 스케줄링에 적

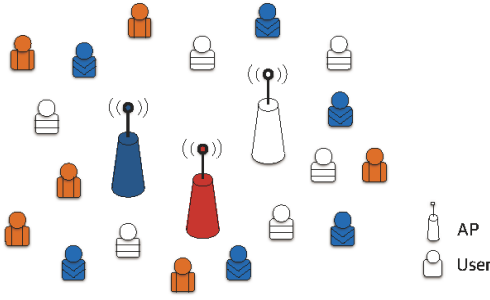


그림 3. 중첩된 랜덤 액세스 네트워크 모형

합한 알고리즘이다. SE-ODIA는 전체적으로 기존의 하향링크 OIA기술과 동일하게 동작하지만 사용자를 스케줄링할 경우 다음의 4가지 단계를 수행한다.

1) 초기화

$$\mathbb{N}_1 = \{1, \dots, N\}, \quad s = 1 \quad (21)$$

i 번째 셀의 각 사용자 $j \in \mathbb{N}_s$ 에서 주어진 $\{\mathbf{b}_1^{[i]}, \dots, \mathbf{b}_{s-1}^{[i]}\}$ 에 대한 직교 투영 벡터 $\tilde{\mathbf{b}}_s^{[i,j]}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\tilde{\mathbf{b}}_s^{[i,j]} = \mathbf{f}^{[i,j]} - \sum_{s'=0}^{s-1} \frac{\mathbf{b}_{s'}^{[i]\text{H}} \mathbf{f}^{[i,j]}}{\|\mathbf{b}_{s'}^{[i]}\|^2} \mathbf{b}_{s'}^{[i]} \quad (22)$$

여기서 주목해야 할 점은 $s = 1$ 이면 $\tilde{\mathbf{b}}_1^{[i,j]} = \mathbf{f}^{[i,j]}$ 이다. s 번째 사용자 선택에 대해서 사용자는 다음의 두 조건을 만족하는 사용자 pool \mathbb{N}_s 로부터 임의로 선택된다.

$$C_1 : \eta_{DL}^{[i,j]} \leq \eta_I, \quad C_2 : \|\tilde{\mathbf{b}}_s^{[i,j]}\| \geq \eta_D \quad (23)$$

선택된 사용자의 인덱스는 $p(s)$ 로 나타내고 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{b}_s^{[i]} = \tilde{\mathbf{b}}_s^{[i, \pi(s)]}. \quad (24)$$

$s < S$ 이라면 $(s+1)$ 번째 사용자 pool \mathbb{N}_{s+1} 을 다음과 같이 찾는다.

$$\mathbb{N}_{s+1} = \left\{ j : j \in \mathbb{N}_s, j \neq \pi(s), \frac{|\mathbf{f}^{[i,j]\text{H}} \mathbf{b}_s^{[i]}|}{\|\mathbf{f}^{[i,j]}\| \|\mathbf{b}_s^{[i]}\|} < \alpha \right\}, \quad s = s+1, \quad (25)$$

여기서 $\alpha > 0$ 는 양의 상수이다. $s = S$ 를 만족할 때까지 단계 2부터 4까지 반복한다.

SE-ODIA에서는 상향링크 전송을 향상 기법에서와 유사하게 셀간 간섭에 대한 임계값인 η_I 이 도입되고 신호에 대한 유효채널 이득값에 대한 임계값인 η_D 이 도입된다. η_I 은 상향링크에서 사용된 임계값과 유사하게 전체 네트워크에 발생하는 셀간 간섭을 제어하는 파라미터이고 η_D 는 이미 선택된 사용

자들의 신호와 직교하는 자신 신호성분의 크기에 관한 것으로서 스케줄링의 반복횟수를 줄이고 셀내 간섭을 제어하는 파라미터이다. 이 두개의 파라미터를 최적화하면 SE-ODIA의 성능은 기존의 ODIA에 비하여 훨씬 탁월해진다[11].

V. 랜덤액세스 네트워크용 기회적 간섭 정렬

최근 셀룰라 네트워크 뿐 아니라 무선랜 네트워크와 같은 랜덤액세스 네트워크에서도 동일한 주파수를 사용하는 액세스 네트워크간 간섭에 대한 간섭 관리가 주목을 받고 있다. 예를 들어, IEEE 802.11표준화 단체에서는 차세대 무선랜 표준인 IEEE 802.11ax에서 네트워크가 중첩되는 환경인 OBSS (overlapping basic service sets)에서의 성능 향상을 위하여 고급 간섭 관리의 필요성이 논의되고 있다. 이에 따라 간섭정렬 기술을 무선랜과 같은 랜덤 액세스 네트워크에 적용하려는 연구가 진행되었다. [16]에서는 사용자가 IEEE 802.11시스템의 PCF (point coordinated function)처럼 스케줄링되는 환경에서 간섭 정렬 기술을 사용하였다.

그러나 [16]에서는 우선망을 통해 중첩된 AP(access point) 간의 협력을 가정하고 사용자간의 충돌은 고려하지 않았으므로 진정한 의미에서의 랜덤액세스 네트워크를 고려했다고 보기 어렵다. [17]에서는 간섭정렬 기술을 IEEE 802.11 표준의 DCF (distributed coordinated function)처럼 완전히 분산된 랜덤 액세스 환경에 적용하였다. 특히 사용자와 AP의 송수신 안테나의 수가 충분히 많고 이미 진행중인 전송에 간섭을 미치지 않는다면 기존의 데이터 전송이 존재하더라도 새로운 데이터 전송을 허용하는 새로운 프로토콜을 제안하였다. 하지만 이 기법의 경우 사용자들이 동일하거나 유사한 안테나 수를 가지면 그 성능 향상이 제한된다.

본 장에서는 중첩된 랜덤 액세스 네트워크에서 네트워크간 간섭을 효율적으로 관리하기 위한 기회적 간섭 정렬 기술을 소개한다[14]. <그림 3>은 중첩된 랜덤액세스 네트워크의 모형을 나타낸다. 그림 3에서는 동일한 주파수를 사용하는 3개의 독립적인 랜덤 액세스 네트워크가 존재하고 각 사용자들은 자신과 동일한 색깔을 AP와 통신한다. 랜덤 액세스 네트워크용 OIA기술은 기존 셀룰라 네트워크를 위해 제안된 OIA기술과 다음과 같은 주요한 차이를 가진다.

- 기존 OIA알고리즘은 기지국이 사용자의 패킷 전송을 결정하지만, OIA 프로토콜에서는 각 사용자가 스스로 패킷 전송을 결정한다.

- 기존 OIA 알고리즘은 스케줄링 매트릭으로서 발생 간섭의 양 자체를 이용하지만 랜덤 액세스 네트워크용 OIA 기술에서는 각 사용자의 발생 간섭에 대한 CDF(cumulative distribution function) 값을 이용한다.
- 기존 OIA 알고리즘은 동시 전송 사용자의 수가 정해져 있지만 OIA 프로토콜에서는 각 랜덤 액세스 네트워크에서 동시에 AP로 데이터를 전송하는 사용자의 수가 랜덤 변수로 주어진다.

가. 물리 계층 동작

기존 상향링크 OIA 기술과 유사하게 K 개의 AP는 간섭 정렬을 위한 간섭 및 자기 신호에 대한 공간의 차원을 각각 정한다. 그리고 각 랜덤 액세스 네트워크에 있는 각 사용자의 유효 발생 간섭을 계산하고 특이값 분해 기법을 이용하여 자신의 발생 간섭의 양을 최소화시키는 송신 빔포밍 벡터를 결정한다.

이때, 각 랜덤 액세스 네트워크에서 데이터를 동시에 전송하는 사용자의 수(S)가 $\frac{L}{K}$ 보다 작은 경우($S < \frac{L}{K}$)에는 각 사용자에서의 송신 빔포밍 기술에 의하여 간섭 신호를 0으로 만든다. L 은 각 사용자의 송신 안테나 개수를 의미한다. 반면에 $S \geq \frac{L}{K}$ 경우에는 사용자들의 전송은 인접 AP에서 수신된 패킷에 간섭을 발생시킨다. 이 경우에는 송신단 빔포밍 기술에 의하여 인접 네트워크로의 발생 간섭은 최소화된다. 이 조건은 각 랜덤 액세스 네트워크에서 동시에 데이터를 전송하는 사용자들의 수가 확률적으로 변하게 되므로 그 영향도 확률적으로 고려되어야 한다.

나. MAC 계층 동작

특이값 분해 기법에 의한 사용자의 송신 빔포밍 기술은 물리 계층에서 인접 랜덤 액세스 네트워크로 미치는 간섭의 양을 감소시키지만 완벽히 제거되지 못한 간섭은 AP의 신호 공간에 존재한다. 랜덤 액세스 네트워크용 OIA 기술에서는 각 AP가 사용자를 스케줄링할 수 없으므로 기회적 랜덤 액세스를 이용하여 사용자들의 상향링크 데이터 전송을 제어한다. 셀룰러 네트워크에서 제안된 기존의 OIA 기술에서는 미리 결정된 스케줄링 정책에 따라 각 셀의 송신 사용자 수를 고정할 수 있다. 그러나 랜덤 액세스 네트워크의 경우에는 각 네트워크에서 동시에 송신하는 사용자의 수는 정해져 있지 않고 매 순간 달라진다. 랜덤 액세스 네트워크에서의 기존 기회적 랜덤 액세스 기술[18]은 사용자의 신호 세기를 최대화시키지만, [14]에서 제안된 OIA 기술에서는 각 사용자는 인접 네트워크로 발생시키는 유효 간섭을 기반의 기회적 데이터 전송을 적용한다.

각 사용자는 장시간 동안 자신의 LIF 값을 관찰하여 LIF의

CDF(Cumulative distribution function)을 얻는다. 구체적으로 각 타임 슬롯에서 각 사용자는 자신의 순간적인 LIF를 계산하고 LIF 값을 저장하여 LIF에 대한 히스토그램을 완성한다. 각 사용자에서 CDF가 결정되면 사용자는 LIF 값을 이용하여 그 값에 해당하는 CDF의 값을 얻는다. 랜덤 액세스 네트워크용 OIA 기술에서는 이 CDF 값이 특정 임계 값보다 더 작으면 각 사용자는 패킷을 전송한다. 여기서 주목해야 할 점은 CDF 값은 $[0, 1]$ 범위에서 uniform 분포를 갖는다는 것이다[19]. 따라서 임계값을 P 로 정하면 각 사용자의 전송 확률은 P 가 된다.

각 랜덤 액세스 네트워크에서 사용자의 수가 사용자간의 패킷 충돌을 막기 위해 전송 확률 P 를 줄여야 한다. 여기서 P 의 감소는 각 사용자가 인접 랜덤 액세스 네트워크로 발생시키는 간섭의 감소로 이어진다. 랜덤 액세스 네트워크용 OIA 기술에서 각 사용자는 각 타임 슬롯마다 자신의 순간적인 LIF 값을 계산하여 해당 CDF 값을 찾아야 한다. 이러한 과정은 매순간 채널행렬의 측정과 특이값 분해 연산을 요구하므로 사용자 단말의 복잡도가 증가할 수 있다. 그러나 랜덤 액세스 네트워크용 OIA 기술은 각 사용자가 채널 행렬이나 스케줄링 매트릭을 AP로 피드백하지 않는다. 이는 랜덤 액세스 네트워크용 OIA 기술이 각 사용자에게 계산 복잡도를 크게 증가시키지 않기 때문에 현재의 무선랜 프로토콜 등과 같은 랜덤 액세스 네트워크에 큰 변화를 요구하지 않고 쉽게 적용될 수 있다는 것을 의미한다.

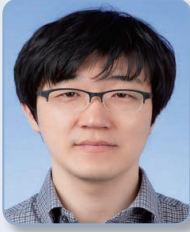
VI. 결론

본 논문에서는 차세대 이동통신 시스템의 간섭 관리 기법으로 사용될 수 있는 후보기술 중 하나로서 기회적 간섭 정렬 기술에 관하여 소개하였다. 기회적 간섭 정렬 기술은 간섭 정렬 기술과 사용자 스케줄링 기술을 결합한 기술로서 사용자와 기지국의 송수신 빔포밍 기술과 사용자 스케줄링 기법을 효과적으로 결합한다. 특히 기회적 간섭 정렬 기술은 상향링크에 각각 적용이 가능하고 각 셀이 독립적이고 분산적으로 동작하고 각 사용자와 기지국은 자신과 연관된 채널만을 이용하므로 구현이 용이하다. 기회적 간섭 정렬 기술에서 사용자를 선택할 때 간섭의 양 뿐 아니라 자신의 채널 상황까지 고려하면 데이터 전송율을 개선시킬 수 있으며 기회적 간섭정렬 기술은 간섭이 극심할 것으로 예상되는 차세대 무선랜 네트워크에도 효과적으로 적용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] ITU-R, "IMT vision—framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," ITU-R WP 5D working document, Oct. 2013.
- [2] J. G. Andrews, et al., "What will 5G be?," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
- [3] 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.
- [4] C. Suh and D. Tse, "Interference alignment for cellular networks," in Proc. 46th Annual Allerton Conference on Communications, Control, and Computing, Monticello, IL, Sep. 2008.
- [5] C. Suh, M. Ho, and D. Tse, "Downlink interference alignment," IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 9, pp. 2616–2626, Sep. 2011.
- [6] B. C. Jung, D. Park, and W. -Y. Shin, "A Study on the Optimal Degrees-of-Freedom of Uplink Cellular Network: Opportunistic Interference Management," Asiloma Conference on Signals, Systems, and Computers, pp. 2067–2071, Nov. 2010.
- [7] B. C. Jung and W. -Y. Shin, "Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular TDD uplink," IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 2, pp. 148–150, Feb. 2011.
- [8] 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, Jul. 2012.
- [9] 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 Communication, vol. 12, no. 5, pp. 2180–2192, May 2013.
- [10] H. J. Yang, B. C. Jung, W. -Y. Shin, and A. Paulraj, "Codebook-based opportunistic interference alignment," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 62, no. 11, pp. 2922–2937, Jun. 2014.
- [11] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, C. Suh, and A. Paulraj, "Opportunistic downlink interference alignment," <http://arxiv.org/pdf/1312.7198v1.pdf>, Dec. 2013.
- [12] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, and C. Suh, "Opportunistic interference alignment for interfering broadcasting channels," IEEE ICASSP, May 2014.
- [13] H. J. Yang, W. -Y. Shin, B. C. Jung, and A. Paulraj, "A Feasibility study on opportunistic interference alignment: Limited feedback and sum-rate enhancement," Asiloma Conference on Signals, Systems, and Computers, Nov. 2012.
- [14] H. Jin, S. -W. Jeon, and B. C. Jung, "Opportunistic Interference Alignment for Random Access Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Dec. 2014 (Accepted).
- [15] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multi-antenna broadcast scheduling using zero forcing beamforming," IEEE Journal on Selected Areas Communications, vol. 24, pp. 528–541, 2006.
- [16] S. Gollakota, S. D. Perli, and D. Katabi, "Interference alignment and cancellation," ACM SIGCOMM2009, pp. 159–170, 2009.
- [17] K. C. -J. Lin, S. Gollakota, and D. katabi, "Random access heterogeneous MIMO network," ACM SIGCOMM2011, pp. 146–147, 2011.
- [18] C. -S Hwang and J. M. Cioffi, "Opportunistic CSMA/CA for achieving multi-user diversity in wireless LAN," IEEE Transactions Wireless Communications, vol. 8, no. 6, pp. 2972–2982, Jun. 2009.
- [19] H. Jin, B. C. Jung, and V. C. M. Leung, "Fundamental limits of CDF-based scheduling: Throughput, fairness, and feedback overhead," IEEE Transactions on Networking, To Appear.

약 력



정 방 철

2002년 아주대학교 전자공학부 학사
2004년 KAIST 전자전산학과 석사
2008년 KAIST 전자전산학과 박사
2008년~2009년 KAIST IT 융합연구소 팀장
2009년~2010년 KAIST IT 융합연구소 연구교수
2010년~현재 경상대학교 정보통신공학과 부교수
관심분야: 무선통신, 통계적 신호처리, 압축센싱, 정보이론



조 문 제

2012년 경상대학교 정보통신공학과 학사
2012년~현재 경상대학교 정보통신공학과 석박사통합과정
관심분야: 이동통신, 신호처리, 다중안테나, 사용자 스케줄링