셀룰라 시스템에서의 반복적 간섭 정렬

신원용
단국대학교

요 약

본 논문에서는 실제적인 다중 셀 하향링크 네트워크 중 하나인 간섭 브로드캐스트 채널에서 유망한 간섭 정렬 기술인 반복적 간섭 정렬 기술을 소개한다. 또한, 가정하는 네트워크에서 상향링크/하향링크 채널 사이의 채널 상호성을 활용함으로써 다중안테나(MIMO: multiple-input multiple-output) 다중 셀 하향링크 네트워크를 위한 개선된 반복적 간섭 정렬 기술을 제안한다. 구체적으로, 제안한 기술은 다중사용자 MIMO 기반 반복적 간섭 정렬 알고리즘을 설계하기 위해 반복적 빔형성과 하향링크 간섭 정렬 이슈를 지능적으로 결합한다. 각 기지국에서는 전처리기를 설계하기 위해 두 개의 순차적인 빔형성 행렬을 사용하는데, 이는 간섭 누수로 불리는 타 셀 기지국으로부터 생성된 셀 간 간섭을 효율적으로 줄일 뿐만 아니라 같은 셀 안에서의 셀 내 간섭을 완벽히 제거가 가능하다. 송신 및 수신 빔형성 행렬은 수렴할 때까지 반복적으로 업데이트된다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안하는 간섭 정렬 기술이 기존 두 가지 반복적 간섭 정렬 기술과 비교하여 더 높은 합 용량을 나타냄을 보인다.

Ⅰ. 서 론

간섭 관리는 다수의 사용자가 동일한 자원을 공유하는 통신 시스템에서 중요한 문제로 인식되어 왔다. 자유도(degrees of freedom) 또는 멀티플랙싱 이득으로 알려진 간단한 개념을 사용하여 간섭 채널의 점근적 용량을 분석하는 방대한 양의 연구가 수행되어 왔다. 최근에는 두 개의 통신 쌍이 존재할 때 간섭 문제를 근본적으로 해결하기 위해 간섭 정렬(IA: interference alignment) 기술이 제안되었다[1]. [2]에서는 간섭 정렬 기술이 시변 채널 계수를 갖는 K -사용자 간섭 채널에서 최적의 자유도를 취득할 수 있고 자유도는 $K/2$ 로 주어짐을 보였다. 게다가, [2]에서 보인 간섭 정렬의 근본적인 아이디어는 다중안테나(MIMO: multiple-input multiple-output) 간섭 네트워크 [3]-[5], X 네트워크 [6]-[8], 셀룰라 네트워크 [9]-[16]와 같은 다양한 무선 네트워크 환경에 폭넓게 적용되었다.

기존 간섭 정렬 기술 [2], [4]은 타 통신 링크의 채널 상태 정보(CSI: channel state information)를 포함하는 전역 채널 상태 정보에 기반하여 동작한다. 뿐만 아니라, 최적의 자유도 [2], [4], [6]-[9]를 취득하기 위해 시간/주파수 확장에 기초한 거대한 양의 차원을 필요로 한다. 이러한 제약들은 실제적인 시스템에 간섭 정렬을 적용하기 위해 완화될 필요가 있다. [5]에서는 시 불변 계수를 갖는 K -사용자 MIMO 간섭 채널에서의 분산 간섭 정렬 기술이 소개되었다. 분산 간섭 정렬 기술은 데이터 송신 이전에 설계된 송/수신 빔형성(beamforming) 벡터가 수렴할 때까지 수많은 빔형성 반복 업데이트를 수행하는데, 이 경우 지엽적 채널 상태 정보 및 단일 시간 또는 주파수 자원만을 필요로 한다. [14]-[17]에서는 실제적인 시스템에 간섭 정렬을 적용한 또 다른 접근 방식으로써 기회적 간섭 정렬(OIA: opportunistic IA) 프로토콜이 소개되었다. 기회적 간섭 정렬은 시 불변 계수를 갖는 다중 셀 상향링크 네트워크에 대해 적용이 가능한데, 셀 간 간섭이 사전에 정의된 간섭 공간에 잘 정렬되는 측면에서 셀 당 단말(mobile station)을 기회적으로 선택하는 기술이다. 즉, 사용자 스케줄링이 기존 간섭 정렬 프레임워크에 잘 통합된 기술이라 할 수 있다. 순방향/역방향 채널 사이의 채널 상호성을 가정[5]하여, [14]-[17]에서의 간섭 정렬 기술들은 각 노드에서 파일럿 신호를 통해 모든 수신 채널 링크로부터 획득할 수 있는 지엽적 채널 상태 정보만을 요구한다. 따라서 전역 채널 상태 정보를 필요로하는 기존 간섭 정렬 기술 [2]보다 더 쉽게 구현이 가능하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 실제적인 다중 셀 하향링크 네트워크 중 하나인 간섭 브로드캐스트 채널(interfering broadcast channel) [10], [18]에서 시 불변 채널 계수 (또는 동일하게 느린 페이딩 채널 계수)를 가정할 때, 널리 알려진 간섭 완화 기술 중 하나인 반복적 간섭 정렬 프레임워크를 소개한다. 먼저, 가정하는 네트워크에서 두 가지 다른 반복적 간섭 정렬 기술 [5], [10]에 대해 소개한다. 또한, 새로운 반복적 간섭 정렬 기술을 제안하는데,

이 기술은 다른 반복적 간섭 정렬과 마찬가지로 송수신기 설계 시 상향링크/하향링크 채널 사이 채널 상호성을 활용할 수 있는 시분할 듀플렉싱(time-division duplexing) 모드에서 동작한다고 가정한다. 다중 공간 스트림을 사용한 다중사용자 MIMO 기반 반복적 간섭 정렬 알고리즘을 설계하기 위해, 제안하는 간섭 정렬은 반복적 빔형성 기술과 하향링크 간섭 정렬 기술을 동시에 고려한다. 특별히 [10]에서의 전처리기(precoder) 설계로부터 영감을 얻음으로써, 각 기지국(base station)에서 전처리기를 설계하는데 있어 두 개의 순차적인 빔형성 행렬을 사용한다. 첫 번째 송신 빔형성 행렬은 단지 지엽적 채널 상태 정보만을 사용하여 간섭 누수(LIF: leakage of interference)라 불리는 셀 간 생성되는 간섭의 총 양을 최소화하는 측면에서 설계된다. 반면에 두 번째 송신 빔형성 행렬을 설계하기 위해, 동일 셀 안 단말(즉, 공간 스트림) 사이에 존재하는 셀 내 간섭을 완전히 제거하는 zero-forcing(ZF) 필터링을 수행한다. 수신 빔형성은 다른 셀 기지국으로 전달되는 LIF 전체 양을 최소화하는 측면에서 각 단말에서 분산적으로 설계된다. 시분할 듀플렉싱 동작에 기반하여, 송신 및 수신 빔형성 행렬(즉, 전처리기와 후처리기)은 수렴할 때까지 반복적으로 업데이트된다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 반복적 간섭 정렬 기술이 기존 두 가지 반복적 간섭 정렬 기술 [5], [10]보다 더 높은 합 용량을 보임을 검증한다. 제안한 반복적 간섭 정렬은 임의의 수의 셀과 송/수신 안테나를 갖는 셀룰라 네트워크에 적용할 수 있다는 점에서 일반화된 기술이라 할 수 있다. 또한, 기존 셀룰라 간섭 정렬 기술 [10]과는 달리 다중 셀 하향링크 네트워크의 성질을 최대로 활용하였으며, 많은 수의 단말을 요구하는 기회적 간섭 정렬 [14]-[17]과는 달리 적은 수의 단말 하에서도 잘 동작한다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. Ⅱ장에서는 반복적 간섭 정렬 관련 연구를 소개한다. Ⅲ장에서는 시스템 모델을 설명한다. Ⅳ장에서는 제안하는 반복적 하향링크 간섭 정렬 알고리즘을 소개한다. Ⅴ장에서는 모의실험 결과가 제공된다. Ⅵ장에서는 결론과 함께 본 논문을 정리한다.

본 논문에서 윗 첨자 H 는 행렬 (또는 벡터)의 켤레 트랜스포즈이다. C 는 복소수의 필드, I_n 는 크기 $n \times n$ 의 단위 행렬, $\|\cdot\|$은 벡터의 L_2 -norm이다.

Ⅱ. 관련 연구

본 장에서는 간섭 브로드캐스트 채널에서의 두 가지 기존 반복적 간섭 정렬 기술인 Gomadam-Cadambe-Jafar (GCJ) 기술 [5] 및 Suh-Tse (ST) 기술 [10]을 간략히 소개한다.

- GCJ 기술에서는 단일 사용자 MIMO 기술이 사용되고, 이때 각 셀에서 N 명의 단말 중 랜덤하게 선택된 하나에게 S 개의 공간 스트림이 제공된다. GCJ 기술은 LIF를 최소화하는 측면에서 송/수신 빔형성 행렬을 반복적으로 업데이트한다. 반면, 제안하는 구조와는 달리 GCJ 기술은 단일 사용자 MIMO를 가정하기 때문에 전처리기는 순차적인 빔형성 행렬을 사용하지 않는다. 가정하는 간섭 브로드캐스트 채널 하에서는 라운드 로빈 스케줄링을 사용하여 셀 당 N 명의 단말 중 하나만을 랜덤하게 선택한다. 즉, 채널 상태에 대한 고려 없이 N 명의 단말에게 순환적으로 기회를 제공한다.
- ST 기술에서는 우세한 셀 간 간섭을 완화하기 위해 간섭 정렬과 기회적 스케줄링을 적절히 통합한다. 또한, 셀 내 간섭을 제거하기 위해 기지국에서 ZF 필터링을 포함하는 두 개의 순차적인 빔형성 행렬을 생성한다. ST 기술에서는 각 단말에서 수신 신호 대 간섭 및 잡음비 (SINR: signal-to-interference-and-noise ratio)를 최대화하기 위해 반복적 정합 필터 (matched filter) 수신기가 사용된다. 따라서, 실제적인 수신 신호 대 잡음비 (SNR: signal-to-noise ratio) 영역의 큰 범위에서 효율적인 기술로 알려져 있다. 가정하는 간섭 브로드캐스트 채널 하에서는 특정 시간에 N 명의 단말 중 합 용량이 최대가 되는 S 명을 선택하는 기회적 스케줄러가 적용된다.

Ⅲ. 시스템 모델

실제적인 다중 셀 하향링크 네트워크 중 하나인 MIMO K -셀 간섭 브로드캐스트 채널을 고려한다. 각 셀은 M 개의 안테나를 갖는 하나의 기지국과 각각 L 개의 안테나를 갖는 N 개의 단말로 구성된다. 하향링크 신호를 수신하는 셀 당 동시에 활성화되는 단말 수는 S ($\leq M$)로 주어진다. 그리고, S 개의 단말

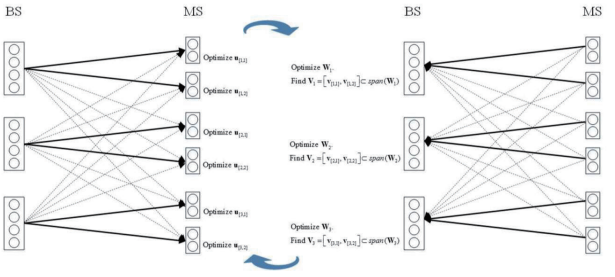


그림 1. 반복적 다중사용자 MIMO 알고리즘. 실선 및 점선은 각각 원하는 신호 및 간섭 링크를 나타낸다. $K = 3$, $M = 4$, $S = 2$, $L = 2$, $N = 2$ 인 MIMO 간섭 브로드캐스트 채널을 보여준다.

일 공간 스트림을 수신한다고 가정한다. 가정하는 모델 하에서, 셀 안의 각 단말은 자신의 셀 안 기지국의 트래픽 요구에만 단지 관심이 있다고 가정한다. 수신기에서 간단한 선형 복호기 사용만으로도 최대 자유도를 취득할 수 있는 경우를 배제하기 위해, $L < (K-1)S+1$ 및 $M < KS$를 가정한다. 그렇지 않으면 모든 셀 간 간섭은 수신기에서 완전히 제거될 수 있기 때문이다.

k 번째 기지국으로부터 i 번째 셀 안 n 번째 단말로의 채널 행렬은 $H_k^{[i,n]} \in C^{L\times M}$ 으로 주어지고, 이 때 $i,k \in \{1,\cdots,K\}$ 및 $n \in \{1,\cdots,N\}$이다. $H_k^{[i,n]}$의 각 원소는 독립적이고 동일하게 분포 (i.i.d.: independent and identically distributed)되고, 평균 0 및 단위 분산을 갖는다고 가정한다. 추가로, 주파수 비선택적 블록 페이딩 모델을 가정하는데, 이는 채널 계수가 한 송신 블록 안에서 일정하고 새 송신 블록에서 새로운 독립적인 값으로 변화함을 의미한다. 시분할 듀플렉싱 동작은 반복적 빔형성기 업데이트를 수행하는데 있어 중요한 역할을 하는데, 그렇지 않으면 (즉, 주파수분할 듀플렉싱과 같은 다른 듀플렉싱 방법 하에서) 순방향 채널 $H_k^{[i,n]}$은 역방향 채널과 동일할 수 없기 때문이다.

시분할 듀플렉싱 시스템의 채널 상호성을 활용함으로써, i 번째 셀 안 n 번째 단말은 모든 기지국으로부터 전송된 파일럿 신호를 사용하여 채널 ($k \in \{1,\cdots,K\}$)을 추정할 수 있다. 즉, 각 노드에서 지엽적 채널 상태 정보 추정이 가능하다. 〈그림 1〉은 $K=3$, $M=4$, $S=2$, $L=2$, $N=2$ 일 때 MIMO 간섭 브로드캐스트 채널 모델의 예를 보여준다. 그림에 대한 상세한 설명은 다음 장에서 보일 예정이다.

위에서의 채널 모델에 따라, 수신 빔형성 행렬에 의해 후처리되기 전 i 번째 셀 안 n 번째 단말에서의 수신 신호 벡터 $y_{[i,n]} \in C^{L\times 1}$은 다음과 같이 주어진다.

$$y_{[i,n]} = \sum_{k=1}^{K} H_k^{[i,n]} x_k + z_{[i,n]} \quad (1)$$

여기에서, $x_k \in C^{M\times 1}$은 두 개의 연속하는 빔형성 행렬에 의해 후처리된 k 번째 기지국의 송신 신호 벡터이다. 수신기에서는 독립적이고 동일하게 분포된 복소 부가 백색 가우시언 잡음 (AWGN: additive white Gaussian noise) 벡터 $z_{[i,n]} \in C^{L\times 1}$이 더해진다. 이 때, 벡터 $z_{[i,n]}$의 원소는 평균 0 및 분산 N_0를 갖는다. 각 수신기 (즉, 단말)는 타 셀로부터의 간섭이 잡음으로 간주되는 단일 사용자 복호기를 사용한다고 가정한다.

Ⅳ. 반복적 하향링크 간섭 정렬

본 장에서는 MIMO 간섭 브로드캐스트 채널에서 제안하는 반복적 하향링크 간섭 정렬 알고리즘[19]의 전체적인 절차를 설명한다. 절차는 6단계로 이루어지고, 구체적인 설명은 아래와 같다.

- 단계 1 (초기화): 먼저, 각 기지국은 N 개의 단말 중에 S 개의 홈 셀 단말을 랜덤하게 임의로 선택한다. 기지국 $k \in \{1,\cdots,K\}$에서의 전처리 행렬은 간섭 억압 행렬과 ZF 필터링 기반 빔형성 행렬의 곱으로 구성된다. 이 단계에서는 전처리 행렬의 초기 설계에 초점을 맞춘다. 셀 당 동시에 여러 개의 단말을 서비스하는 다중 공간 스트림 MIMO를 활용한 반복적 간섭 정렬 알고리즘을 설계하기 위해, 기지국 $k \in \{1,\cdots,K\}$는 $W_k^H W_k = I_S$가 되는 S-차원의 임의의 전처리 행렬 W_k를 독립적으로 생성하는데, 행렬 W_k는 구체적으로 아래와 같이 주어진다.

$$W_k = \left[w_{[k,1]}, \cdots, w_{[k,S]} \right]$$

여기에서, $w_{[k,s]} \in C^{M\times 1}$은 W_k의 s 번째 열 벡터이다. 각 단말은 모든 기지국에 의해 브로드캐스트되는 파일럿 신호를 사용하여 유효 채널 $H_k^{[i,n]} W_k$를 추정할 수 있다.

- 단계 2 (수신 빔형성 업데이트): 이 단계에서는 각 단말에서 어떻게 수신 빔형성 벡터를 결정하는지를 설명한다. $u_{[i,n]} \in C^{L\times 1}$을 i 번째 셀 안 n 번째 단말에서의 단위 크기 (norm) 웨이트 벡터 (즉, $\| u_{[i,n]} \|^2 = 1$)라 하자. 그러면 $H_k^{[i,n]}$와 W_k의 개념으로부터, i 번째 셀 안 n 번째 단말은 수신 빔형성 벡터 $u_{[i,n]}$를 사용하여 k 번째 기지국으로부터 수신된 간섭의 양을 계산할 수 있다. 이 때, 간섭의 양은 아래와 같이 주어진다.

$$I_k^{[i,n]} = \| u_{[i,n]}^H H_k^{[i,n]} W_k \|^2 \quad (2)$$

여기에서, $i \in \{1,\cdots,K\}$, $n \in \{1,\cdots,N\}$, $k \in \{1,\cdots,K\} \setminus i$ $(= \{1,\cdots,i-1,i+1,K\})$이다. (2)를 사용하여 $I^{[i,n]}$으로 표기되는 i 번째 셀 안 n 번째 단말에서의 LIF 값은 타 셀 기지국으로부터 생성된 간섭의 총합으로 정의된다. 즉, $I^{[i,n]}$은 아래와 같이 주어진다.

$$I^{[i,n]} = \sum_{k=1,k\neq i}^{K} I_k^{[i,n]} \quad (3)$$

이 때, 주어진 W_k에 대해 각 단말은 아래와 같이 주어지는 수신 빔형성 벡터 $u_{[i,n]}$을 설계할 수 있게 된다.

$$u_{[i,n]} = \arg\min_{\tilde{u}_{[i,n]}} \sum_{k=1,k\neq i}^{K} \| \tilde{u}_{[i,n]}^H H_k^{[i,n]} W_k \|^2 \quad (4)$$

(4)에서 LIF를 최소화하는 측면에서 최적의 수신 벡터를 찾기 위해, 먼저 아래와 같이 주어지는 셀 간 간섭 공분산 행렬 $Q_{[i,n]}^{(d)}$를 계산한다.

$$Q_{[i,n]}^{(d)} = \sum_{k=1,k\neq i}^{K} H_k^{[i,n]} W_k W_k^H H_k^{[i,n]\ H}$$

그러면 각 단말에서 최적의 수신 벡터는 공분산 행렬의 최소 고유값 (eigenvalue)에 대응하는 eigenvector로 주어진다. 즉, 아래와 같다.

$$u_{[i,n]} = \upsilon_{L\times 1}\left(Q_{[i,n]}^{(d)}\right) \tag{5}$$

여기에서, $\upsilon_{A\times B}(X)\in C^{A\times B}$는 열 벡터가 허미시안 (Hermitian) 행렬 X의 최소 B개 고유값에 대응하는 정규직교 (orthonormal) 행렬을 나타낸다. 〈그림 1〉에서 보이듯이 각 단말은 업데이트된 수신 벡터 $u_{[i,n]}$ (즉, 간섭 억제 벡터)을 모든 기지국에게 브로드캐스트할 필요가 있다.

• 단계 3 (송신 빔형성 업데이트): 단계 2와 유사하게, 각 기지국은 역시 타 셀 단말에게 발생시키는 셀 간 간섭의 양을 최소화하는 송신 빔형성에 대한 부공간을 찾는다. i 번째 기지국에 의해 측정된 셀 간 간섭 공분산 행렬을 $Q_i^{(u)}$로 나타내자. 이 때, $Q_i^{(u)}$는 아래와 같이 주어진다.

$$Q_i^{(u)} = \sum_{k=1,k\neq i}^{K}\sum_{s=1}^{S} H_i^{[k,s]\ H} u_{[k,s]} u_{[k,s]}^H H_i^{[k,s]}$$

이 때, 주어진 $u_{[k,n]}$에 대해 각 기지국은 아래와 같이 주어지는 송신 빔형성 행렬 $W_i\in C^{M\times S}$를 설계할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} W_i &= \arg\min_{\tilde{W}_i} \sum_{k=1,k\neq i}^{K}\sum_{n=1}^{S} \| u_{[k,n]}^H H_i^{[k,n]} \tilde{W}_i \|^2 \\ &= \upsilon_{M\times S}\left(Q_i^{(u)}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

〈그림 1〉에서 확인할 수 있듯이, 송신 빔형성 행렬의 계산 이후에 각 기지국은 모든 타 셀 단말들에게 업데이트된 송신 빔형성 행렬을 브로드캐스트한다.

• 단계 4 (반복): 단계 2 (수신 빔형성 행렬의 업데이트 과정)와 단계 3 (송신 빔형성 행렬의 업데이트 과정)을 수렴할 때까지 반복적으로 수행한다.

• 단계 5 (순차적인 송신 빔형성): 송신 셀 간 간섭 억제 행렬 W_i의 설계 이외에도, ZF 필터링 기반 빔형성 행렬을 찾는다. 이는 각 단말에서 복호 과정 동안 셀 내 간섭을 완전히 제거하는 것을 가능하게 한다. 결과적으로, 연속된 송신 빔형성 행렬 $V_i\in C^{M\times S}$는 아래와 같이 주어진다.

$$V_i = W_i P_i \tag{7}$$

여기에서, W_i는 (6)에서 주어지고 $P_i\in C^{S\times S}$는 다음과 같다.

$$P_i = \left\lfloor p_{[i,1]} \cdots p_{[i,S]} \right\rfloor$$

여기에서, P_i는 아래 수식을 만족하는 i 번째 송신 빔형성 행렬 V_i의 ZF 기반 빔형성 행렬을 나타낸다.

$$u_{[i,a]}^H H_i^{[i,a]} W_i p_{[i,b]} = 0 \tag{8}$$

이 때, $a,b\in\{1,\cdots,S\}$, $a\neq b$이다. 또한, $p_{[i,s]}\in C^{S\times 1}$은 단위 크기 (즉, $i\in\{1,\cdots,K\}$와 $s\in\{1,\cdots,S\}$에 대하여 $\| p_{[i,s]} \|^2 = 1$)를 가지는 P_i의 s 번째 열 벡터이다. 각 기지국에서 ZF 기반 빔형성 행렬 P_i를 사용하는 것이 타 셀 안의 각 단말에 셀 간 간섭 레벨에 변화를 야기할지라도 그 것은 간섭의 전체 양을 잠재적으로 줄여주는 데에 중요한 역할을 한다.

표 1. 반복적 하향링크 간섭 정렬 알고리즘

1. 각 기지국에서 S –차원의 임의의 전처리 행렬과 함께 알고리즘을 시작한다.
   $W_k = \left[w_{[k,1]},\cdots,w_{[k,S]} \right] \in C^{M\times S}$, $W_i^H W_i = I_S$
2. 반복을 수행한다.
3. 각 단말에서 간섭 공분산 행렬을 계산한다.
   $$Q_{[i,n]}^{(d)} = \sum_{k=1,k\neq i}^{K} H_k^{[i,n]} W_k W_k^H H_k^{[i,n]\ H}$$
4. 각 단말에서 간섭 억제 벡터를 생성한다.
   $$u_{[i,n]} = \upsilon_{L\times 1}\left(Q_{[i,n]}^{(d)}\right)$$
5. 각 단말은 모든 기지국에게 업데이트된 간섭 억제 벡터 $u_{[i,n]}$을 브로드캐스트한다.
6. 각 기지국은 업데이트된 벡터에 기반하여 셀 간 간섭 공분산 행렬을 계산한다.
   $$Q_i^{(u)} = \sum_{k=1,k\neq i}^{K}\sum_{s=1}^{S} H_i^{[k,s]\ H} u_{[k,s]} u_{[k,s]}^H H_i^{[k,s]}$$
7. 각 기지국에서 셀 간 간섭을 최소화하는 S –차원 정규직교 행렬을 생성한다.
   $$W_i = \upsilon_{M\times S}\left(Q_i^{(u)}\right)$$
8. 각 기지국은 모든 타 셀 단말들에게 업데이트된 행렬 W_i를 브로드캐스트한다.
9. 수렴할 때까지 계속 수행한다.
10. 각각의 열 벡터가 W_i에 의해 스팬 (span) 될 수 있고 아래 수식을 만족하는 그러한 행렬 $V_i = W_i P_i = W_i \left\lfloor p_{[i,1]} \cdots p_{[i,S]} \right\rfloor$를 찾는다.
    $u_{[i,a]}^H H_i^{[i,a]} W_i p_{[i,b]} = 0$, $a,b\in\{1,\cdots,S\}$, $a\neq b$

• 단계 6(하향링크 데이터 전송): 단계 5에서의 순차적인 송신 빔형성 행렬을 사용함으로써, i 번째 셀 안 n 번째 단말에서의 수신 신호 벡터 $y_{[i,n]}$은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$y_{[i,n]} = H_i^{[i,n]} W_i p_{[i,n]} s_{[i,n]} + \sum_{s=1, s\neq n}^{S} H_i^{[i,n]} W_i p_{[i,s]} s_{[i,s]} + \sum_{k=1, k\neq i}^{K} \sum_{s=1}^{S} H_k^{[i,n]} W_k p_{[k,s]} s_{[k,s]} + z_{[i,n]}$$

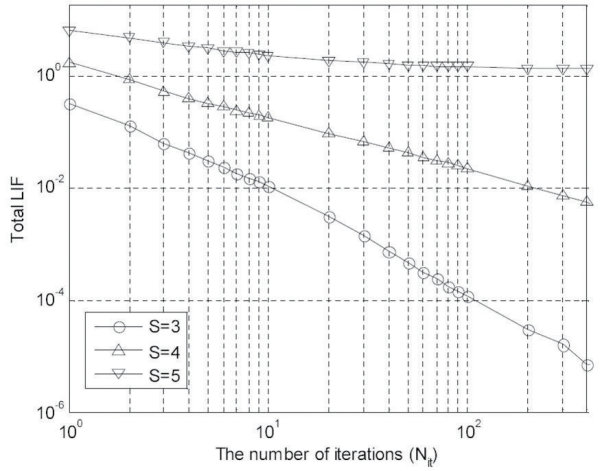


그림 2. 변수 S에 대해 반복 횟수 N_{it}에 따른 전체 LIF I_{total}. $K = 3$, $M = 6$, $L = 4$인 경우를 보여준다.

여기에서, $s_{[i,n]}$은 i 번째 셀 안 n 번째 단말에 대한 전송 심볼이다. 단계 2에서 수신 빔형성을 사용한 후에 i 번째 셀 안 n 번째 단말에서의 수신 신호 $\tilde{y}_{[i,n]}$은 최종적으로 아래와 같이 주어진다.

$$\tilde{y}_{[i,n]} = u_{[i,n]}^H H_i^{[i,n]} W_i p_{[i,n]} s_{[i,n]} + \sum_{k=1, k\neq i}^{K} \sum_{s=1}^{S} u_{[i,n]}^H H_k^{[i,n]} W_k p_{[k,s]} s_{[k,s]} + u_{[i,n]}^H z_{[i,n]}$$

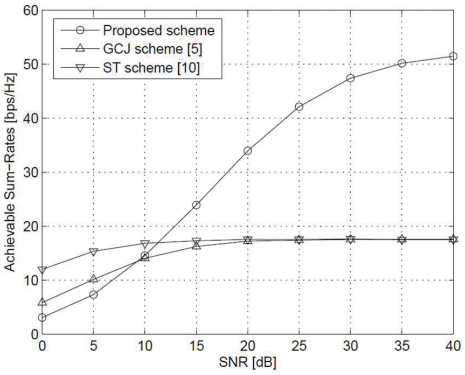
여기에서, (8)에서 보인 바와 같이 선형 ZF 빔형성기 기반 빔형성 행렬 P_i로 인하여 셀 내 간섭은 완전히 제거되었음을 확인할 수 있다.

위 반복적인 과정은 〈표 1〉에서 정리되었으며, 그림을 사용한 표현은 〈그림 1〉에서 보여진다.

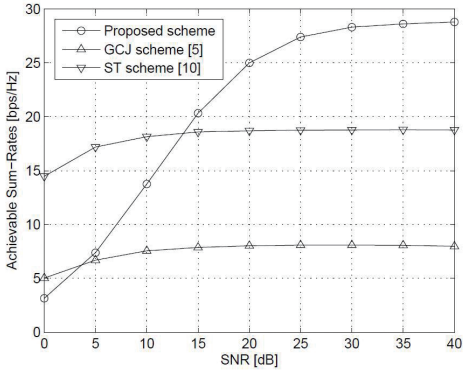
V. 모의 실험

본 장에서는 실제적인 다중 셀 하향링크 MIMO 네트워크에서 제안하는 반복적 하향링크 간섭 정렬 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 모의실험을 수행한다. 본 모의실험에서는 (1)에서의 채널 벡터가 각 시스템 변수에 대해 1×10^5번 생성되었다.

[5]에서와 유사하게, 전체 LIF의 평균 양인 I_{total}이 반복 횟수 N_{it}이 증가함에 따라 먼저 측정된다. 〈그림 2〉에서는, N_{it}



(a) $S = 3$



(b) $S = 4$

그림 3. 수신 SNR에 따른 합 용량. $K = 3$, $M = 6$, $L = 4$, $N = 20$, $N_{it} = 15$인 시스템이 고려된다.

이 증가할 때 I_{total}과 N_{it}의 log-log plot을 보여준다. 광대한 반복 횟수를 갖는 것은 실제적이지 않음에도 불구하고, 〈그림 2〉에서의 변수 N_{it}에 대한 범위는 N_{it}에 따라 변화하는 결과 곡선의 경향을 상세하게 파악하기 위해 고려된다. 구체적으로, 변수 S가 변화할 때, $K = 3$, $M = 6$, $L = 4$인 경우가 고려되고, 이 때 S는 셀 당 동시에 활성화된 단말의 수를 나타낸다. S가 5에서 3으로 변화할 때, 전체 LIF I_{total}은 더 적은 간섭 레벨로 인해 감소함을 확인할 수 있다. 또한 〈그림 2〉에서 보여지듯이, I_{total}은 N_{it}에 따라 지속적으로 감소하는 결과를 나타내는데, 이는 제안하는 알고리즘의 수렴이 보장됨을 의미한다. 뿐만 아니라, 전체 LIF가 주어진 시스템 변수 K, M, L, S에 대해 임의의 작은 상수보다 작도록 하기 위해 얼마나 많은 반복이 요구되는지도 확인할 수 있다.

다음으로, 〈그림 3〉에서는 제안한 간섭 정렬 기술의 합 용량이 주어진 변수 S에 대해 수신 SNR에 따라 측정되고, 두 가지 기존 반복적 간섭 정렬 기술인 GCJ 기술 및 ST 기술과 비교된다. 앞서 언급한 바와 같이, 제안하는 기술 및 GCJ 기술에서는 라운드 로빈 스케줄러가 사용되고, ST 기술에서는 기회적 스케줄러가 적용된다. 모의실험 환경은 $K = 3$, $M = 6$, $L = 4$,

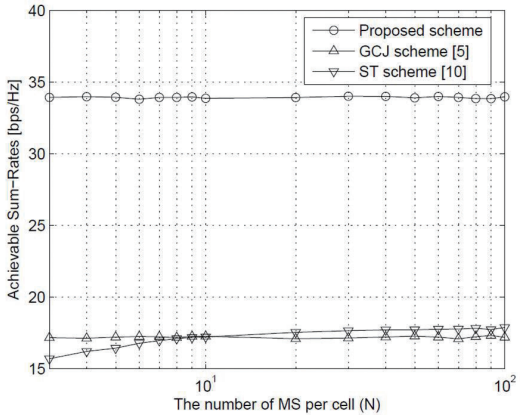


그림 4. 셀 당 단말 수 N에 따른 합 용량. $K = 3$, $M = 6$, $L = 4$, $N_{it} = 15$, $S = 3$, SNR = 20 dB인 시스템이 고려된다.

$N = 20$, $N_{it} = 15$, $S = 3,4$로 주어진다. 〈그림 3〉으로부터 제안하는 반복적 간섭 정렬 기술은 특정 SNR 레벨 (낮은 SNR 영역) 이후로 기존 두 가지 기술보다 성능 면에서 훨씬 월등함을 확인할 수 있다. 보다 구체적으로, 낮은 SNR 영역에서는 ST 기술이 다른 두 가지 기술보다 더 높은 합 용량을 보이는데, 이는 ST 기술에서 정합 필터링 사용으로 인해 전력 이득을 얻을 수 있기 때문이다. 하지만, 높은 SNR 영역에서는 제안한 반복적 알고리즘을 사용함으로써 훨씬 더 높은 간섭 정렬 이득을 취득할 수 있는데, 이는 제안한 기술이 최대로 간섭을 완화하는 측면에서 설계된 빔형성을 사용하기 때문이다.

추가로, 〈그림 4〉에서는 합 용량이 셀 당 단말 수 N에 따라 측정된다. 모의실험 환경은 $K = 3$, $M = 6$, $L = 4$, $N_{it} = 15$, $S = 3$, SNR = 20 dB로 주어진다. 이로부터 아래와 같은 관찰 결과를 얻을 수 있다. 제안한 기술 및 GCJ 기술은 라운드 로빈 스케줄링을 사용하기 때문에 N이 증가함에 따라 성능 이득이 존재하지 않는다. 반면, ST 기술은 기회적 스케줄링을 사용하기 때문에 증가하는 N과 함께 다중사용자 다이버시티 이득으로 인해 합 용량이 소폭 개선됨을 확인할 수 있다. 하지만, 제안하는 기술은 상대적으로 큰 N ($N = 100$)에 대해서도 여전히 ST 기술보다 성능면에서 우수함을 알 수 있다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 실제적인 다중 셀 하향링크 MIMO 네트워크에 적용할 수 있는 반복적 간섭 정렬 알고리즘을 소개하였다. 두 가지 기존 반복적 간섭 정렬 알고리즘 소개와 함께 반복적인 송/수신 빔형성 및 하향링크 간섭 정렬 프레임워크를 지능적으로 결합한 새로운 반복적 간섭 정렬 알고리즘을 제안하였다. 보다 구체적으로, 제안한 간섭 정렬 기술은 셀 간 간섭의 효과가 빔형성 행렬의 반복적 업데이트를 통해 급격히 완화되고 셀 내 간섭이 완전히 제거되는 측면에서 설계되었다. 따라서, 간섭 정렬을 설계하는데 있어 셀룰라 하향링크의 성질을 최대한 활용함으로써, 제안하는 간섭 정렬 기술이 합 용량 측면에서 기존 반복적 간섭 정렬 기술보다 우수함을 검증하였다. 제안하는 기술은 상대적으로 적은 반복 횟수, 지엽적 채널 상태 정보, 단일 시간/주파수 자원, 작은 수의 단말로도 동작 가능하기 때문에 상대적으로 구현이 용이하며 실제적인 다중 셀 하향링크 MIMO 네트워크에 폭넓게 적용될 것으로 기대한다.

Acknowledgement

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2014R1A1A2054577).

참 고 문 헌

[1] M. A. Maddah-Ali, A. S. Motahari, and A. K. Khandani, "Communication over MIMO X channels: Interference alignment, decomposition, and performance analysis," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 54, no. 8, pp. 3457-3470, Aug. 2008.

[2] 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.

[3] C. M. Yetis, T. Gou, S. A. Jafar, and A. H. Kayran, "On feasibility of interference alignment in MIMO interference networks," IEEE Trans. Sig. Process., vol. 58, no. 9, pp. 4771-4782, Sept. 2010.

[4] 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.

[5] 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.

[6] C. Huang, V. R. Cadambe, and S. A. Jafar, "Interference alignment and the generalized degrees of freedom of the X channel," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 58, no. 8, pp. 5130-5150, Aug. 2012.

[7] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and the degrees of freedom of wireless X networks," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 55, no. 9, pp. 3893-3908, Sept. 2009.

[8] B. Nourani, S. A. Motahari, and A. K. Khandani, "Relay-aided interference alignment for the quasi-static X channel," in Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Seoul, Korea, June/.July 2009, pp. 1764-1768.

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

[10] C. Suh, M. Ho, and D. N. C. Tse, "Downlink interference alignment," IEEE Trans. Commun., vol. 59, no. 9, pp. 2616-2626, Sept. 2011.

[11] W. Shin, N. Lee, J.-B. Lim, 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, no. 2, pp. 437-442, Feb. 2011.

[12] Y. Ma, J. Li, and R. Chen, "On the achievability of interference alignment for three-cell constant cellular interfering networks," IEEE Commun. Lett., vol. 16, no. 9, pp. 1384-1387, Sept. 2012.

[13] A. S. Motahari, S. O. Gharan, M. A. Maddah-Ali, and A. K. Khandani, "Real interference alignment: Exploiting the potential of single antenna systems," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 60, no. 8, pp. 4799-4810, Aug. 2014.

[14] 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.

[15] B. C. Jung, D. Park, and W.-Y. Shin, "Opportunistic interference mitigation achieves optimal degrees-of-freedom in wireless multi-cell uplink networks," IEEE Trans. Commun., vol. 60, no. 7, pp. 1935-1944, July 2012.

[16] H. J. Yang, W.-Y. Shin, B. C. Jung, and A. Paulraj, "Opportunistic interference alignment for MIMO interfering multiple-access channels," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 5, pp. 2180-2192, May 2013.

[17] H. J. Yang, B. C. Jung, W.-Y. Shin, and A. Paulraj, "Codebook-based opportunistic interference alignment," IEEE Trans. Sig. Process., vol. 62, no. 11, pp. 2922-2937, June 2014.

[18] W.-Y. Shin and B. C. Jung, "Network coordinated opportunistic beamforming in downlink cellular networks," IEICE Trans. Commun., vol. E95-B, no. 4, pp. 1393-1396, Apr. 2012.

[19] W.-Y. Shin and J. Yoon, "Generic iterative downlink interference alignment," IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no.5, pp. 834-841, May. 2015.

약 력

신 원 용

2002년 연세대학교 기계전자공학부 공학사
2004년 KAIST 전자전산학과 공학석사
2008년 KAIST 전자전산학과 공학박사
2008년~4월 Harvard University 방문연구원
2008년~2009년 KAIST 정보전자연구소 박사후연구원
2009년 KAIST 고성능집적시스템연구센터 선임급 위촉연구원
2008년~2009년 ㈜루미콤 방문연구원
2009년~2011년 Harvard University, School of Engineering and Applied Sciences, Postdoctoral Fellow
2011년~2012년 Harvard University, School of Engineering and Applied Sciences, Research Associate
2012년~현재 단국대학교 국제학부 모바일시스템공학전공/대학원 컴퓨터학과 조교수
관심분야: 정보이론, 통신이론, 신호처리, 모바일 컴퓨팅, 빅데이터 분석