

전 이중 다중 안테나 셀룰러 네트워크의 간섭 정렬 타당성

김기연*, 양장훈*,
전상운**, 김동구°

Feasibility of Interference Alignment for Full-Duplex MIMO Cellular Networks

Kiyeon Kim*, Janghoon Yang*,
Sang-Woon Jeon**, Dong Ku Kim°

요약

본 논문은 전 이중 다중 안테나 셀룰러 네트워크에서 간섭 정렬 타당성을 다루고 있다. 간섭 정렬을 위한 필요충분조건 정립과, 달성 가능 합 자유도를 대칭 네트워크에 내에서 설명했다. 실험결과 기존 반 이중 통신의 합 자유도 보다 향상 되는 것을 확인 할 수 있다.

Key Words : Degrees of freedom, interference alignment, full-duplex.

ABSTRACT

The feasibility condition of interference alignment (IA) for full-duplex (FD) multiple-input multiple-output (MIMO) cellular networks is considered. The necessary and sufficient condition on the IA feasibility is established, characterizing the achievable sum degrees of freedom (DoF). The results demonstrate that FD operation with appropriate IA is able to improve the sum DoF on the conventional half-duplex operation.

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신 방송연구개발사업[B0126-15-1012, IoT 환경에서 촉감통신 서비스 실현을 위한 차세대 초저지연/고효율 무선접속기술 연구, 한국연구재단(5세대 계층적 이종 셀룰러 네트워크와 도시교통 네트워크를 연동시키는 테이터-운송 중계기 그린라디오 무선접속 기술개발, 과제번호:2012R1A2A2A01047554), 2013년 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임 (NRF-2013R1A1A1064955).

• First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ., dreamofky@yonsei.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ., dkkim@yonsei.ac.kr, 종신회원
* Department of Newmedia, Korean German Institute of Technology, jhyang@kgit.ac.kr, 종신회원
** Department of Information and Communication Engineering, Andong National Univ., swjeon@anu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2015-09-293, Received September 3, 2015; Revised October 29, 2015; Accepted December 7, 2015

I. 서론

최근 전 이중 통신 시스템은 전송률 향상을 위한 차세대 통신 기술로 각광을 받고 있다. 여러 연구들과 구현 작업을 통해서 완벽한 자가 간섭 제거의 가능성을 보여 주었다^[1]. 다중 안테나를 장착한 전 이중 기지의 단일 셀 모델을 통해 전 이중 통신의 이점을 타진하는 연구가 진행 되었다^[2-5]. 전 이중 통신은 자가 간섭이 확실하게 제거 되더라도, 상향 링크 사용자와 하향 링크 사용자간 간섭이 새로 발생하게 되므로 이를 해결하기 위해, 간섭 정렬 기법이 고려되었다^[3]. 최근 간섭 정렬 타당성 문제를 다룬 연구가 다양한 반 이중 네트워크 상황에서 이어졌는데, 다중 안테나 간섭 채널^[4], 다중 안테나 셀룰러 네트워크^[5]와 반 이중 사용자를 고려한 네트워크 상황에 대해서 연구되었다^[2].

본 논문에서는 다중 안테나 전 이중을 가정한 기지와 K 명의 사용자들을 가정한 단일 셀 모델에서 채널 확장이 없는, 단사 선형 간섭 정렬에 대해서 타당성을 정립했다.

II. 전 이중 다중 안테나 셀룰러 네트워크와 간섭 타당성 문제

그림 1은 본 논문에서 고려하는 전 이중 다중 안테나 셀룰러 네트워크를 보여주며, 단일 기지국은 M 개의 송수신 안테나, K 명 사용자는 모두 N 개의 송수신 안테나를 가정하며 모두 자가 간섭을 제거할 수

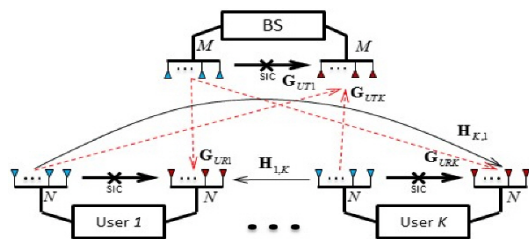


그림 1. 전 이중 다중 안테나 셀룰러 네트워크
Fig. 1. Full-Duplex MIMO Cellular Network.

있는 전 이중 통신을 가정한다. 기지국의 송신기와 수신기는 각 BT, BR 로 표시하며, BT 는 UR_1 에서 부터 UR_K 로 표시되는 사용자들의 수신기들에게 독립적 메시지를 전송한다. 반면에, BR 은 UT_1 에서 UT_K 로 표시 하는 사용자들의 송신기로부터 독립적인 메시지를 수신하게 된다. UT_k 와 BR 의 수신 신호 벡터는 각각

$$\mathbf{y}_{U_k} = \mathbf{G}_{UR_k} \mathbf{x}_{BT} + \sum_{k'=1, k' \neq k}^K \mathbf{H}_{k,k'} \mathbf{x}_{UT_{k'}} + \mathbf{z}_{UR_k}$$

와 $\mathbf{y}_{BR} = \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{UT_k} \mathbf{x}_{UT_k} + \mathbf{z}_{BR}$ 이며, 여기서,

$\mathbf{G}_{UR_k} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 는 BT 에서 UR_k 로의 채널,

$\mathbf{H}_{k,k'} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 $UT_{k'}$ 로부터 UR_k 의 채널,

$\mathbf{G}_{UT_k} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 는 UT_k 에서 BR 까지 채널을

$k, k' \in [1:K]$ 와 $\forall k \neq k'$ 에 대해서 정의한다. UR_k 와 BR 의 부가 백색 가우스 잡음 벡터는

$\mathbf{z}_{UR_k} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 와 $\mathbf{z}_{BR} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 로 표기하고

$\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ 분포를 따른다고 가정한다. 각 BT 와 각 사용자 UT_k 는 평균 전송 전력이 각각

$E(\|\mathbf{x}_{BT}\|^2) \leq P_{BT}$ 와 $E(\|\mathbf{x}_{UT_k}\|^2) \leq P_{UT_k}$ 로 제한 한다. 우리는 모든 채널 계수들은 동일, 독립적 분포를 따른다고 가정한다. 또한 편의상, 전 이중 다중 안테나 셀룰라 네트워크를 (M, N^K) 네트워크로 명명 한다.

우리는 선형 전처리기와 후처리기만을 고려하며, 모든 사용자들이 동일 자유도 d 를 요구하는 경우에 집중한다. 이 경우에, BT 는 각 사용자들에게

$\mathbf{s}_{BT_k} \in \mathbb{C}^{d \times 1}$ 의 메시지를 전처리기

$\mathbf{V}_{BT_k} \in \mathbb{C}^{M \times d}$ 를 통해서 전송하고, UT_k 는

$\mathbf{s}_{UT_k} \in \mathbb{C}^{d \times 1}$ 의 메시지를 전처리기

$\mathbf{V}_{UT_k} \in \mathbb{C}^{N \times d}$ 를 통해서 전송하며, 다음과 같이

$$\mathbf{x}_{BT} = \mathbf{V}_{BT} \mathbf{s}_{BT} = \sum_{k=1}^K \mathbf{V}_{BT_k} \mathbf{s}_{BT_k}$$

$\mathbf{x}_{UT_k} = \mathbf{V}_{UT_k} \mathbf{s}_{UT_k}$ 로 정리할 수 있다. 여기서 사용자에 대해,

$$\mathbf{V}_{BT} = [\mathbf{V}_{BT_1} \cdots \mathbf{V}_{BT_K}]$$

$\mathbf{s}_{BT} = [\mathbf{s}_{BT_1}^\dagger \cdots \mathbf{s}_{BT_K}^\dagger]^\dagger$ 로 정의한다.

UR_k 는 \mathbf{s}_{BT_k} 를 추정하기 위해서 후처리기

$\mathbf{W}_{UR_k} \in \mathbb{C}^{N \times d}$ 를 사용하고, BR 도 후처리기

$\mathbf{W}_{BR} = [\mathbf{W}_{BR_1} \cdots \mathbf{W}_{BR_K}] \in \mathbb{C}^{M \times Kd}$ 를 사용해서

$\mathbf{s}_{UT_1}, \dots, \mathbf{s}_{UT_K}$ 를 $\hat{\mathbf{s}}_{BT_k} = \mathbf{W}_{UR_k}^\dagger \mathbf{y}_{UR_k}$ 와

$[\hat{\mathbf{s}}_{UT_1}^\dagger \cdots \hat{\mathbf{s}}_{UT_K}^\dagger] = \mathbf{W}_{BR}^\dagger \mathbf{y}_{BR}$ 같이 추정한다.

이어서, 기존 연구들과 같이 간섭정렬 타당성 문제를 정의할 수 있다.

정의 1: (M, N^K) 네트워크의 $k \neq k'$ 인 모든 k 에 대해서 전처리 후처리 행렬이 다음 조건을 만족하면, 선형 간섭 정렬이 타당하다고 정의한다.

$$\mathbf{W}_{UR_k}^\dagger \mathbf{H}_{k,k'} \mathbf{V}_{UT_{k'}} = 0, \tag{1}$$

$$\mathbf{W}_{UR_k}^\dagger \mathbf{G}_{UR_k} \mathbf{V}_{BT_k} = 0, \tag{2}$$

$$\mathbf{W}_{BR_k}^\dagger \mathbf{G}_{UT_k} \mathbf{V}_{UT_k} = 0, \tag{3}$$

$$\text{rank}(\mathbf{W}_{UR_k}^\dagger \mathbf{G}_{UR_k} \mathbf{V}_{BT_k}) = d, \tag{4}$$

$$\text{rank}(\mathbf{W}_{BR_k}^\dagger \mathbf{G}_{UT_k} \mathbf{V}_{UT_k}) = d \tag{5}$$

여기서 (1)-(3)은 각각 $UT_{k'}$ 으로부터 UR_k 로의 단말 간 간섭 정렬, $BT_{k'}$ 에서 UR_k 로부터의 하향링크 스트림 간 간섭 정렬, $UT_{k'}$ 로부터 BR_k 의 상향링크 스트림 간 간섭 정렬이다.* ◇

III. 전 이중 네트워크 간섭 정렬 필요충분조건

이 단원에서는 전 이중 네트워크에서 간섭 정렬을 위한 필요충분조건을 유도하고, 증명한다.

정리 1: (M, N^K) 네트워크에 사용자가 2명 이상인 경우, 확률 1로 간섭 정렬이 타당할 필요충분조건은 $d \leq \min(M/K, 2N/(K+1))$ 이다. ◇

증명: 필요조건은 [2]와 같은 방식으로 쉽게 구할 수 있으므로 충분조건 증명에 초점을 맞춘다.

일반적인 전처리기와 후처리기는 다음 두 단계로 구할 수 있다. 첫 단계, (1)을 만족하는

$\{\mathbf{W}_{UR_k}, \mathbf{V}_{UT_k}\}_{k=1}^K$ 를 먼저 구하고, 이어서 (2), (3)

을 만족하는 $\{\mathbf{W}_{BR_k}, \mathbf{V}_{BT_k}\}_{k=1}^K$ 를 구한다.

첫 단계를 증명하기 위해서, [4]의 결과를 이용할

* 본 논문은 기지국과 사용자가 모두 전 이중 통신을 하는 네트워크를 고려하기 때문에, 전 이중 통신 기지국과 반 이중 통신 사용자 간 통신을 고려하는 [2]와는 간섭 조건의 형태가 다르며, [2]의 단순 결과 확장 역시 불가하다.

수 있다. 송수신 안테나가 모두 N 개인 K 사용자 간섭 채널에서 만약, $d \leq 2N/(K+1)$ 을 만족하면, 자유도 d 의 간섭 정렬이 타당한 전처리기와 후 처리기를 확률 1로 구할 수 있다^[4]. 송수신 안테나가 모두 N 개인 K 사용자 간섭 채널에서 각 사용자간 자유도 d 의 간섭 정렬 조건은 (1)과 일대일 대응이 되므로^[4], [4]의 간섭 정렬이 타당한 전처리기와 후처리기를 (M, N^K) 네트워크에서도 (1)을 만족하는 $\{W_{UR_k}, V_{UT_k}\}_{k=1}^K$ 로 사용가능하다. 이어서, 첫 단계에서 $\{W_{UR_k}, V_{UT_k}\}_{k=1}^K$ 가 주어진 상황에서, $\{W_{BR_k}, V_{BT_k}\}_{k=1}^K$ 를 구해야 하며 (2)와 (3)의 상향 링크간 간섭과 하향링크 간섭만이 존재하는 경우이다. 이때, $d \leq M/K$ 를 만족하는 경우, (2)를 만족하기 위해서 단일 셀의 다중 사용자를 위한 제로포싱 전처리기를 고려할 수 있고, (3)을 만족하기 위해서 단일 셀 다중 사용자를 위한 기지국의 제로포싱 후처리기가 고려 가능하다. 마지막으로 (4)와 (5)는 모든 전처리기와 후 처리기가 G_{UR_k} 와 G_{UT_k} 의 함수가 아니기 때문에 확률 1로 만족하게 된다. ■

IV. 실험적 결과와 분석

이 장에서는 전 이중 전송으로 인한 합 자유도이득에 대해서 분석한다. 주어진 (M, N^K) 네트워크에서, 타당한 자유도 d 들의 집합을 \mathbb{D} 라고 정의한다. 그럴 경우에 최대 합 자유도는 $d_{\Sigma, FD} = \max_{d \in \mathbb{D}} 2Kd$ 이다. 전 이중 전송의 합 자유도의 이득을 분석하기 위해 반 양방향 전송의 합 자유도와 비교한다. 반 이중 전송은 하향링크 혹은 상향링크 중 순시적 채널에서 더 큰 합 자유도를 얻을 수 있는 반 이중 전송의 경우를 뜻하며, 이 경우의 합 자유도는 $d_{\Sigma, HD} = \min M, KN$ 이다. 예로, $(6, 4^3)$ 네트워크를 고려하면, 전 이중 전송의 달성 가능한 합 자유도는 정리 1에 의해서 $d_{\Sigma, FD} = 12$ 이고, 반 이중 전송의 합 자유도는 $d_{\Sigma, HD} = 6$ 으로 전 이중 전송의 달성 가능한 합 자유도가 더 크다. 또한, 사용자 K 가 무한히 커지면 $\lim_{K \rightarrow \infty} d_{\Sigma, FD} = \min 2M, 4N$ 와 $\lim_{K \rightarrow \infty} d_{\Sigma, HD} = N$ 로 전 이중 전송이 합 자유도에서 이득이 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 2는 $(6, 4^3)$ 네트워크의 평균 합 전송률이며, 가로축은 하향링크의 신호 대 잡음 비이다. 기지국 전송 전력은 사용자 전송 전력의 2배로 가정하였고,

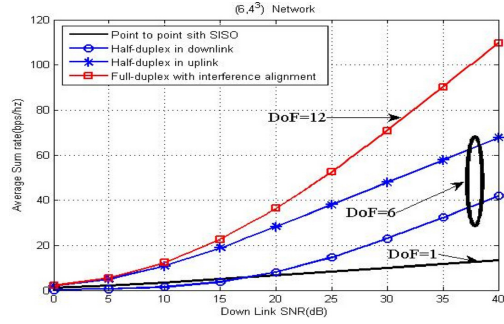


그림 2. $(6, 4^3)$ 네트워크 평균 합 전송률.
Fig. 2. Average sum rate of $(6, 4^3)$ network.

상/하향 반 이중 전송은 제로 포싱 후/전 처리기를 가정한다.

신호 대 잡음비 전 구간에서 간섭 정렬을 이용한 전 이중 전송 기법이 하향 링크 또는 상향 링크만 동작하는 반 이중 전송 기법의 평균 합 전송률 보다 높은 전송률을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

References

- [1] E. Aryafar, M. A. Khojastepour, K. Sundaresan, S. Rangarajan, and M. Chiang, "MIDU: Enabling MIMO full duplex," in *Proc. ACM Mob. Comput. Netw.*, Istanbul, Turkey, Aug. 2012.
- [2] K. Kim, S. W. Jeon, and D. K. Kim, "The feasibility of interference alignment for full-duplex MIMO cellular networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 1500-1503, Jul. 2015.
- [3] S.-W. Jeon, S. H. Chae, and S. H. Lim, "Degrees of freedom of full-duplex multiantenna cellular networks," in *IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, Jan. 2015.
- [4] G. Bresler, D. Cartwright, and D. Tse, "Feasibility of interference alignment for the MIMO interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 9, pp. 5573-5586, Sept. 2014.
- [5] T. Liu and C. Yang, "On the feasibility of linear interference alignment for MIMO interference broadcast channels with constant coefficients," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 9, pp. 2178-2191, May 2013.