

다중 안테나를 사용하는 단방향 기지국 협력 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크의 간섭 정렬 타당성

김기연*, 전상운*, 양장훈**, 김동구°

Feasibility of Interference Alignment for Reverse Duplex in MIMO Cellular Networks with One-side Base Cooperation

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

요약

본 논문에서는 상향링크와 하향링크가 공존하는 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크 상황에서 단방향 기지국 협력을 통한 단사 간섭 정렬 타당성에 대한 연구를 하였다. 일반적인 안테나 개수와 사용자수에 따른 단사 간섭 정렬의 필요조건과 충분조건을 제시하였고, 이어서 특정 조건을 만족하는 네트워크에서 간략화 된 충분조건을 제시하였다. 특히 대칭 네트워크 상황에서는 단사 간섭 정렬의 필요충분조건을 제시하였고, 각 셀 당 두 명의 사용자가 존재하는 대칭 네트워크 상황에서는 닫힌 형태의 필요충분조건을 규명하였다. 제안한 단방향 기지국협력을 통해 합 자유도를 크게 증가시킬 수 있으며, 모의실험을 통해 상용 신호 대 잡음비 영역에서 합 전송률을 획기적으로 개선할 수 있음을 확인 하였다.

Key Words : MIMO, degrees of freedom, interference alignment, full-duplex, feasibility

ABSTRACT

The feasibility conditions of interference alignment (IA) are analyzed for reverse duplex systems, in which one cell operates as downlink (DL) while the other cell operates as uplink (UL) assuming one-side base station (BS) cooperation. Under general multiple-input and multiple-output (MIMO) antenna configurations, a necessary condition and a sufficient condition for one-shot linear IA are established, i.e., linear IA without symbol or time extension. In several example networks, optimal sum degrees of freedom (DoF) is characterized by the derived necessary condition and sufficient condition. For some special class of networks, a sufficient condition is established in a more compact expression, which also yields the necessary and sufficient condition. Simulation results demonstrate that the proposed IA does not only achieve larger DoF but also significantly improves the sum rate in the practical signal-to-noise ratio (SNR) regime.

※ 본 연구는 한국연구재단(5세대 계층적 이기종 셀룰러 네트워크와 도시교통 네트워크를 연동시키는 데이터-운송 중계기 그린라디오 무선접속 기술개발, 과제번호: 2012R1A2A2A01047554)과 MOTIE/KEIT의 IT R&D 프로그램의(과제번호: 10035389, Research on high speed and low power wireless communication SoC for high resolution video information mining)의 지원으로 수행되었습니다.

• 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 Information and Communication Engineering, Andong National Univ., swjeon@anu.ac.kr, 종신회원
 ** Department of Newmedia, Korean German Institute of Technology, jhyang@kgit.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2014-11-452, Received November 4, 2014; Revised February 10, 2015; Accepted February 10, 2015

I. 서 론

최근 무선 통신을 이용한 다양한 서비스가 폭발적으로 늘고, 이에 따라 무선 데이터 용량의 수요 역시 빠르게 증가하였다. 이러한 수요를 지원하기 위해 다중안테나기술, 이종 망 (Heterogeneous network), 소형 셀, 상향 링크와 하향 링크가 동시에 서비스 되는 역 듀플렉스 (Reverse Duplex) 기술, 셀 간 협력 기술 등 많은 기술들이 개발 되어 왔다^[1]. 상향 링크 서비스와 하향 링크 서비스 요구량의 불균형 때문에 상향 링크와 하향 링크가 동시에 전송하는 역 듀플렉스 기법이 여러 연구에서 제안되었고, 대표적인 기법들은 eIMTA와 D-TDD 등이 있으며, eIMTA는 표준에서도 고려되고 있는 기술이다^[2]. 이런 역 듀플렉스 연구들은 간섭을 회피하려는 방법론을 전제하였고, 간섭양을 고려한 스케줄링 기법 혹은 전력 제어 기법들이었다^[3,4].

간섭채널에 대한 채널용량 연구는 많이 있었지만, 가장 간단한 두 사용자간 간섭 채널 용량도 정확히 알려진 바가 없을 정도로 분석이 어렵다. 하지만 최근 간섭정렬이라는 기술이 간섭문제를 해결하는 혁신적인 기술로 각광 받으며 활발히 연구되고 있다^[5-9]. Jafar와 Cadambe는 K 사용자 간섭 채널 환경에서 간섭 정렬을 통해 최적 자유도 (Degrees of freedom) $K/2$ 를 달성함을 보였다^[5]. 이어서 다중안테나와 다중 사용자를 고려한 셀룰러 환경에서의 간섭정렬 연구가 이어졌다^[7,8].

이런 간섭 정렬의 많은 연구에도 불구하고, 역 듀플렉스 네트워크 환경에서의 간섭 정렬 연구는 상대적으로 더디 이루어졌다. 특히 최근 단일 안테나를 사용하는 사용자들이 상향링크와 하향링크에 존재하는 경우에 간섭정렬로 달성 할 수 있는 합 자유도가 연구되었으며, 기존의 상향링크와 하향링크가 동기화되어 작동하는 경우보다 합 자유도를 더 달성할 수 있다는 것을 보였다^[9].

위와 같은 간섭 정렬 연구들은 채널 확장을 이용하였는데, 채널 확장을 이용하는 간섭 정렬기술은 사용자수가 늘어남에 따라 채널 확장 길이가 늘어나고, 이에 따라 송신시간 지연, 채널 정보 제한 양 증가 등의 구현상에서도 어려움이 발생한다. 이 같은 문제들을 해결하기 위해 채널확장을 하지 않고 다중 안테나의 공간 채널을 이용하는 단사 (one-shot) 간섭 정렬이 연구 되었다^[10-17]. 단사 간섭 정렬은 채널확장을 하지 않아도 된다는 장점이 있지만, 항상 간섭 정렬이 가능

하지 않기 때문에 간섭 정렬 타당성에 대한 연구가 필요하다. K 사용자 간섭 채널 네트워크에서 간섭 정렬 타당성이 연구 되었고^[10-13,16], 이어서 셀룰러 네트워크 상황에서의 연구로 이어졌다^[14,15]. 최근에는 두 셀의 역 듀플렉스 네트워크에서 기지국간 협력이 없는 경우의 간섭 정렬 타당성 연구가 이어졌다^[17].

본 연구는 역 듀플렉스 네트워크에서 기지국간 단방향 협력이 고려되는 상황에서 간섭 정렬 타당성 연구이다. 우선, 단사 간섭정렬 타당성 문제를 정리하였고, 일반적인 네트워크 상황에서 단사 간섭정렬 타당성의 필요조건과 충분조건을 제시하였다. 그리고 특정 조건 네트워크 상황에서, 간략화된 충분조건과 대칭 네트워크 상황에 대해서는 필요충분조건을 제시하였다. 특히, 상향 링크 및 하향 링크에 각 링크 당 두 사용자가 있는 대칭 네트워크 상황에 대해서는 닫힌 형태의 전 처리 및 후 처리 행렬 구성 방법을 제시하였다. 본 연구는 여러 예제를 통해서 최적 합 자유도를 달성하는 네트워크 상황을 보였고, 단방향 기지국 협력을 통해서도 기존 양방향 협력 네트워크와 같은 최적 합 자유도를 달성 할 수 있음을 보였다.

본 논문은 아래와 같이 구성 하였다. II장에서는, 단사 간섭 타당성 문제에 대해서 정리하였고 이어서 III장에서는 일반화된 역 듀플렉스 환경에서 단사 간섭정렬 타당성의 필요조건과 충분조건을 제시하였다. 그리고 IV장에서는 특정 조건 역 듀플렉스 환경에서 단사 간섭정렬 타당성의 필요충분조건을 제시하였다. V장에서는 제시한 단사 간섭정렬 타당성에 대한 증명을 하였고, 마지막 VI장에서는 모의실험을 통한 토의를 하였다.

아래는 논문에서 사용한 표기법을 간단하게 정리하였다. 변수는 소문자 알파벳으로 표기하고, $[a]$ 는 a 를 넘지 않는 최대 정수를 의미한다. 열벡터는 굵은 소문자 알파벳으로 표기하며, 열벡터 \mathbf{a} 의 i 번째 원소는 $\mathbf{a}(i)$ 로 표기한다. 행렬은 굵은 대문자 알파벳으로 표기하고, 행렬 \mathbf{A} 의 (i, j) 번째 원소는 $\mathbf{A}[i, j]$ 로, i 번째 열벡터는 $\mathbf{A}[i]$ 로 표기한다. 그리고 행렬 \mathbf{A} 의 에르미트 전위 행렬은 \mathbf{A}^\dagger 로 전위 행렬은 \mathbf{A}^T 로 표기하며, 프로베니우스 노름은 $\|\mathbf{A}\|$ 계수는 $\text{rank}(\mathbf{A})$, 행렬식은 $\det(\mathbf{A})$ 로 각각 표기한다. 또한 연산자 $\text{vec}(\mathbf{A})$ 는 행렬 \mathbf{A} 의 각 행벡터를 하나의 행벡터로 쌓아올리는 것을 의미한다. $\text{diag}(\mathbf{A}_1 \cdots \mathbf{A}_n)$ 는 \mathbf{A}_1 부터 \mathbf{A}_n 로 이루어진 블록 대각 행렬을 의미한다. $\text{diag}[n](\mathbf{A})$ 는 행렬 \mathbf{A} 가 n 번 반복된 블록 대각행

렬을 뜻한다. 행렬 \mathbf{A} 의 정규화 된 고유벡터는 $\Gamma(\mathbf{A})$ 로 표기하고, 정규직교 벡터는 $\mathbf{N}_C(\mathbf{A})$ 로 표기한다. 그리고 행렬 \mathbf{A} 의 영공간은 $\perp \mathbf{A}$ 로 표기한다. 연산자 $\mathbf{A} <_n \mathbf{B}$ 는 행렬 \mathbf{A} 는 행렬 \mathbf{B} 의 열벡터들 중 임의의 n 개 로 이루어 졌다는 의미이다.

II. 간섭 타당성 문제

이 장에서는 다중 안테나를 사용하는 단 방향 기지국 협력 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크를 소개하고, 단 사 간섭 타당성 문제를 정형화 하여 제시한다.

2.1 단 방향 기지국 협력 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크

그림 1은 다중 안테나를 사용하는 단 방향 기지국 협력 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크를 나타내고 있다. 한쪽 셀은 상향 링크로 동작을 하고, 다른 한 셀은 하향 링크로 동작한다. 하향링크 기지국은 백홀을 이용하여 상향링크 기지국에게 하향링크 기지국의 전송 데이터를 단 방향 공유하고, 상향링크 기지국은 하향 링크 기지국으로부터의 간섭 채널을 추정하여, 하향링크 기지국으로부터의 간섭을 제거 할 수 있다고 가정한다.

각각 기지국은 M_U 개 안테나와 M_D 개 안테나를 갖고 있다. 상향 링크에는 K 명의 사용자가 있고, L 명의 사용자가 있으며, 각각 상향 링크 l 번째 사용자와 하향 링크 k 번째 사용자는 사용자 (U, l) 과 사용자 (D, k) 로 표기하며, 각각은 N_{Ul} 개의 안테나와 N_{Dk} 개의 안테나를 갖고 있다. 본 논문에서 고려하는 역 듀플렉스 네트워크라고 하면 그림 1과 같은 네트워크를 의미한다.

이런 단 방향 협력 기지국을 통해 하향 링크 기지국으로부터의 간섭을 상향 링크 기지국에서 제거 된 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_U = \sum_{l=1}^L \mathbf{G}_{Ul} \mathbf{x}_{Ul} + \mathbf{z}_U \quad (1)$$

그리고 사용자 (D, k) 의 수신 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{y}_{Dk} = \mathbf{G}_{Dk} \mathbf{x}_D + \sum_{l=1}^L \mathbf{H}_{kl} \mathbf{x}_{Ul} + \mathbf{z}_{Dk} \quad (2)$$

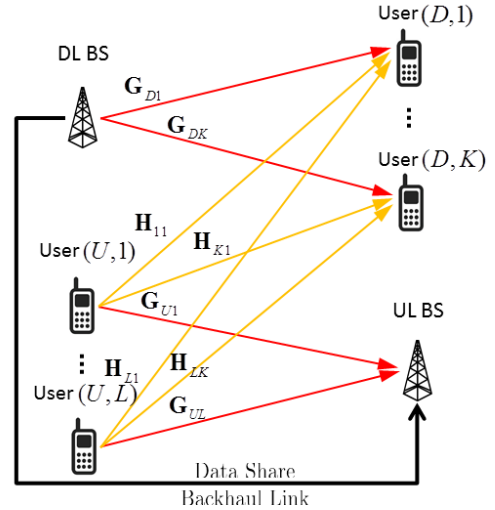


그림 1. 기지국 간 단방향 협력의 역 듀플렉스 네트워크. Fig 1. RD MIMO cellular networks with one-side BS cooperation.

여기서 사용자 (U, l) 로부터 상향 링크 기지국으로의 채널은 $\mathbf{G}_{Ul} \in \mathbb{C}^{M_U \times N_{Ul}}$ 이고, 하향 링크 기지국으로부터 사용자 (D, k) 로의 채널은 $\mathbf{G}_{Dk} \in \mathbb{C}^{N_{Dk} \times M_D}$ 이고, 사용자 (U, l) 로부터 사용자 (D, k) 로의 간섭 채널은 $\mathbf{H}_{kl} \in \mathbb{C}^{N_{Dk} \times N_{Ul}}$ 이다. 게다가, 하향 링크 기지국에서 전송하는 전송 벡터는 $\mathbf{x}_D \in \mathbb{C}^{M_D \times 1}$ 이며, 사용자 (U, l) 의 전송 벡터는 $\mathbf{x}_{Ul} \in \mathbb{C}^{N_{Ul} \times 1}$ 이다. 그리고 부가 잡음 $\mathbf{z}_U \in \mathbb{C}^{M_U \times 1}$ 와 $\mathbf{z}_{Dk} \in \mathbb{C}^{N_{Dk} \times 1}$ 는 각각 복소 표준 정규 분포 $CN(\mathbf{0}, \sigma_{Ul}^2 \mathbf{I})$ 와 $CN(\mathbf{0}, \sigma_{Dk}^2 \mathbf{I})$ 를 따른다. 그리고 송신 전력 제한을 다음과 같이 $E[\|\mathbf{x}_{Ul}\|^2] \leq P_{Ul}$ 와 $E[\|\mathbf{x}_D\|^2] \leq P_D$ 를 따른다. 그리고 각 채널 성분은 독립 항등 분포 (independently and identically distributed) 를 따름을 가정한다.

2.2 선형 간섭 정렬에 대한 타당성

본 논문에서는 선형 송수신 기법을 고려하고, 따라서 사용자 (U, l) 은 d_{Ul} 개의 독립적인 데이터 스트림 벡터 $\mathbf{s}_{Ul} \in \mathbb{C}^{d_{Ul} \times 1}$ 을 전 처리 행렬 $\mathbf{V}_{Ul} \in \mathbb{C}^{N_{Ul} \times d_{Ul}}$ 과 곱하여 $\mathbf{x}_{Ul} \in \mathbb{C}^{N_{Ul} \times 1}$ 을 생성한 후 이를 상향 링크 기지국에 전송한다. 또한, 하향 링크 기지국은 d_{Dk} 개의 독립적인 데이터 스트림 벡

터 $\mathbf{s}_{Dk} \in \mathbb{C}^{d_{Dk} \times 1}$ 를 전 처리 행렬 $\mathbf{V}_{Dk} \in \mathbb{C}^{M_d \times d_{Dk}}$ 과 곱하여 $\mathbf{x}_D \in \mathbb{C}^{M_D \times 1}$ 를 생성한 후 이를 사용자 (D, k) 에게 전송한다. 그리고 송신 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{x}_{Ul} = \mathbf{V}_{Ul} \mathbf{s}_{Ul}, \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_D = \sum_{k=1}^K \mathbf{V}_{Dk} \mathbf{s}_{Dk}. \quad (4)$$

그리고 상향 링크 기지국과 사용자 (D, k) 는 후처리 행렬 $\mathbf{W}_{Ul} \in \mathbb{C}^{M_U \times d_{Ul}}$ 와 $\mathbf{W}_{Dk} \in \mathbb{C}^{N_{Dk} \times d_{Dk}}$ 를 각각 이용하여, 다음과 같이 신호를 추정 한다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{Ul} &= \mathbf{W}_{Ul}^* \mathbf{G}_{Ul} \mathbf{x}_{Ul} + \mathbf{W}_{Ul}^* \sum_{l'=1, l' \neq l}^L \mathbf{G}_{Ul'} \mathbf{x}_{Ul'} + \mathbf{W}_{Ul}^* \mathbf{z}_{Ul}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{s}}_{Dk} = \mathbf{W}_{Dk}^* \mathbf{G}_{Dk} \mathbf{x}_D + \mathbf{W}_{Dk}^* \sum_{l=1}^L \mathbf{H}_{kl} \mathbf{x}_{Ul} + \mathbf{W}_{Dk}^* \mathbf{z}_{Dk}. \quad (6)$$

표기의 편의를 위해서 위와 같은 전 처리 및 후처리 행렬을 이용한 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크를 $M_U \prod_{l=1}^L (N_{Ul}, d_{Ul}) \times M_D \prod_{k=1}^K (N_{Dk}, d_{Dk})$ 로 표기한다. 이런 송수신 신호 처리 과정을 통해서 다음과 같이 선형 간섭 정렬에 대한 타당성을 다음과 같이 정리 할 수 있다.

정의 1 (간섭 정렬 타당성 조건).

$M_U \prod_{l=1}^L (N_{Ul}, d_{Ul}) \times M_D \prod_{k=1}^K (N_{Dk}, d_{Dk})$ 에 대해서, 다음 조건을 만족하는 전 처리 행렬과 후처리 행렬이 존재하면 선형 간섭 정렬이 타당하다.

$$\mathbf{W}_{Dk}^* \mathbf{H}_{kl} \mathbf{V}_{Ul} = \mathbf{0}, \forall k, l, \quad (7.1)$$

$$\mathbf{W}_{Ul}^* \mathbf{G}_{Ul'} \mathbf{V}_{Ul'} = \mathbf{0}, \forall l' \neq l, \quad (7.2)$$

$$\mathbf{W}_{Dk}^* \mathbf{G}_{Dk'} \mathbf{V}_{Dk'} = \mathbf{0}, \forall k' \neq k, \quad (7.3)$$

$$\text{rank}(\mathbf{W}_{Ul}^* \mathbf{G}_{Ul} \mathbf{V}_{Ul}) = d_{Ul}, \forall l, \quad (7.4)$$

$$\text{rank}(\mathbf{W}_{Dk}^* \mathbf{G}_{Dk} \mathbf{V}_{Dk}) = d_{Dk}, \forall k, \quad (7.5)$$

여기서, $k', k \in [1 : K]$ 이고, $l', l \in [1 : L]$ 이다.

조건 (7.1)은 상향링크 사용자들이 하향 링크 사용자에게 주는 간섭, 조건 (7.2)와 (7.3)은 상향 링크, 하향링크 내 간섭 조건이며, 마지막 (7.4)와 (7.5)는 원하는 상향링크 및 하향링크 데이터 스트림을 받을 수 있는 랭크 조건을 의미한다. 편의상, 본 논문에서 간섭 정렬 타당성 조건이라고 하면 정의 1에서 정의한 선형 간섭 정렬 타당성 조건을 의미한다.

그리고 정의 1을 만족하는 네트워크에서 합 자유도는 $d_\Sigma = \sum_{k=1}^K d_{Dk} + \sum_{l=1}^L d_{Ul}$ 와 같이 정의 할 수 있다. 이 논문에서, 최적 합 자유도는 선형 간섭 정렬로 얻을 수 있는 최대 합 자유도를 의미한다.

III. 일반적 네트워크 환경에 대한 간섭 정렬 타당성

이 장에서는 일반적인 역 듀플렉스 네트워크 환경에 대한 간섭 정렬 타당성에 대해 살펴 볼 것이다. 우선 간섭 정렬의 필요조건을 제시하고, 이어서 충분조건을 제시할 것이다. 또한, 여러 예제를 통해서 제안하는 간섭정렬이 최적 합 자유도를 달성 하는 것을 보인다.

정리 1 (간섭 정렬 타당성의 필요조건).

$M_U \prod_{l=1}^L (N_{Ul}, d_{Ul}) \times M_D \prod_{k=1}^K (N_{Dk}, d_{Dk})$ 가 간섭정렬이 타당하다면, 다음과 같은 조건은 꼭 만족되어야 한다.

$$\min(N_{Ul} - d_{Ul}, N_{Dk} - d_{Dk}) \geq 0, \quad (8.1)$$

$$\sum_{l=1}^L d_{Ul} \leq M_U, \quad (8.2)$$

$$\sum_{k=1}^K d_{Dk} \leq M_D, \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} \sum_{l \in \Xi_U} d_{Ul} + \sum_{k \in \Xi_D} d_{Dk} \leq \\ \max\left(\sum_{l \in \Xi_U} N_{Ul}, \sum_{k \in \Xi_D} N_{Dk}\right), \forall \Xi_U, \Xi_D' \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{l \in \Xi_U} \sum_{k \in \Xi_D} d_{Ul} d_{Dk} \leq \sum_{l \in \Xi_U} d_{Ul} (N_{Ul} - d_{Ul}) \\ + \sum_{k \in \Xi_D} d_{Dk} (N_{Dk} - d_{Dk}), \forall \Xi_U, \Xi_D' \end{aligned} \quad (8.5)$$

여기서, $\Xi_U \subseteq [1 : L]$, $\Xi_D \subseteq [1 : K]$ 이다.

증명: 증명은 V-가 절에 명시 하였다.

충분조건을 설명하기 위해서 , 간섭 채널을 다음과 같이 부 채널 행렬로 나누어서 고려한다.

$$\mathbf{H}_{kl} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{kl}^{(1)} & \mathbf{H}_{kl}^{(2)} \\ \mathbf{H}_{kl}^{(3)} & \mathbf{H}_{kl}^{(4)} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{kl}^{(1)} &\in \mathbb{C}^{d_{Dk} \times d_{Ul}}, \\ \mathbf{H}_{kl}^{(2)} &\in \mathbb{C}^{d_{Dk} \times (N_{Ul} - d_{Ul})}, \\ \mathbf{H}_{kl}^{(3)} &\in \mathbb{C}^{d_{Ul} \times (N_{Dk} - d_{Dk})}, \\ \mathbf{H}_{kl}^{(4)} &\in \mathbb{C}^{(N_{Dk} - d_{Dk}) \times (N_{Ul} - d_{Ul})}. \end{aligned}$$

이어지는 정리에서는 간섭 정렬이 타당하기 위한 충분조건을 [17, Theorem 2]로부터 제시한다. 기지국 간 협력을 고려하지 않는 역 듀플렉스 네트워크에서 간섭 정렬 타당성을 고려한 [17]로부터, 본 논문에서 고려하고 있는 간섭 정렬 충분조건을 구하기 위해서는 간섭 정렬 조건이 정의 1을 모두 포함하고 기지국 간 간섭에 대한 추가 조건이 고려되어야 한다.

정리 2 ([17, Theorem 2]간섭 정렬 타당성의 충분조건).

$$M_U \prod_{l=1}^L (N_{Ul}, d_{Ul}) \times M_D \prod_{k=1}^K (N_{Dk}, d_{Dk})$$

(8.2)와 (8.3)을 만족하고, (10)이 정칙행렬이면 확률 1로 간섭 정렬이 타당하다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}'_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{H}''_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}'_2 & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{H}''_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{H}'_K & \mathbf{H}''_K \end{bmatrix}. \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{H}'_k &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}'_{k1} \\ \mathbf{H}'_{k2} \\ \vdots \\ \mathbf{H}'_{kL} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}''_k &= \text{diag}[\mathbf{H}''_{k1} \cdots \mathbf{H}''_{kL}], \\ \mathbf{H}'_{kl} &= \text{diag}[d_{Dk}] (\mathbf{H}_{kl}^{(3)T}), \end{aligned}$$

$$\mathbf{H}''_{kl} = \begin{bmatrix} \text{diag}[d_{Ul}] (\mathbf{H}_{kl}^{(2)} [1]) \\ \text{diag}[d_{Ul}] (\mathbf{H}_{kl}^{(2)} [2]) \\ \vdots \\ \text{diag}[d_{Ul}] (\mathbf{H}_{kl}^{(2)} [d_{Dk}]) \end{bmatrix}.$$

증명: 증명은 V-나 절에 명시 하였다.

여기서, 네트워크 상황에 따라서 정리 1의 필요조건과 정리 2의 충분조건 간에는 차이가 생길 수 있다. 아래 두 가지 예제를 통해서 확인이 가능한데, 본 논문에서는 합 자유도의 하향 경계로 모든 상향 링크와 하향 링크 둘 중에 하나를 작동하는 단일 링크 작동 경우와 비교를 하였고, 이 합 자유도는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} d_{\Sigma, \text{single}} &= \max(\min(M_U, \sum_{l=1}^L N_{Ul}), \min(M_D, \sum_{k=1}^K N_{Dk})). \end{aligned}$$

예제 1 (필요조건과 충분조건이 만나는 최적 합 자유도).

3(3,1)(6,2) × 10(4,2)(6,4)(6,4)에서, 정리 1에 의해 합 자유도는 $d_{\Sigma} \leq 13$ 이고, 정리 2에 의해 간섭 정렬이 타당하므로 합 자유도 달성이 가능하다. 그리고 제안하는 간섭 정렬은 단일 링크 작동 경우에는 $d_{\Sigma, \text{single}} = 10$ 이므로, 이 비해, 더 큰 합 자유도를 제공 한다. 그리고 충분조건과 필요조건은 쌍대적 네트워크에서도 성립하는데,

$M_U \prod_{l=1}^L (N_{Ul}, d_{Ul}) \times M_D \prod_{k=1}^K (N_{Dk}, d_{Dk})$ 에서 간섭 정렬이 타당하다면, 쌍대적 네트워크인 즉, 상향 링크와 하향 링크의 전송 방향이 뒤바뀐 $M_D \prod_{k=1}^K (N_{Dk}, d_{Dk}) \times M_U \prod_{l=1}^L (N_{Ul}, d_{Ul})$ 에서도, 간섭 정렬이 타당함을 정리 2를 통해서 쉽게 알 수 있다. 예를 들어, 예제 1의 쌍대 네트워크인 10(4,2)(6,4)(6,4) × 3(3,1)(6,2)도 역시 간섭 정렬이 타당하고, 합 자유도 역시 13을 달성 할 수 있다.

예제 2 (필요조건과 충분조건이 차이 나는 합 자유도).

8(2,1)(3,2)(8,5) × 4(3,1)(7,3)가 정리 1을 만족하고 합 자유도 $d_{\Sigma} \leq 12$ 를 제공하지만, 정리 2

를 만족하지 않기 때문에 간섭 정렬이 타당하지 않다.

IV. 특정 조건 네트워크 환경에 대한 간섭 정렬 타당성

정리 2는 일반적인 역 듀플렉스 네트워크 환경에 대해서 충분조건을 제공하지만, 판별식을 통해서 충분조건을 만족하는가를 확인해야 하므로 직관적인 정보를 주기는 어렵다. 하지만 몇몇 특정 조건 네트워크 환경에서는 정리 2에서 언급한 충분조건 보다 간략화 되고, 직관적인 표현으로 충분조건을 유도할 수 있다. 이 장에서는, 특정 조건 네트워크 환경에서의 간섭 정렬 타당성에 대해서 정리 하였다. 첫 특정 조건 네트워크 환경으로 고려하는 상황은 사용자들이 대칭 자유도를 요구하는 네트워크에 대해 정리한다. 여기서 대칭 자유도를 요구하는 네트워크는, 동일 링크 사용자들은 같은 자유도를 전송하는 네트워크를 이야기 하며, 예를 들어, $d_{Ul} = d_U$ 와 $d_{Dk} = d_D$ 가 모든 사용자들에 대해서 적용되는 경우이다.

정리 3 (대칭 자유도 네트워크에서의 간섭 정렬 충분조건).

$M_U \prod_{l=1}^L (N_{Ul}, d_U) \times M_D \prod_{k=1}^K (N_{Dk}, d_D)$ 에 대해서, 다음과 같은 조건을 만족하면 확률 1로 간섭 정렬이 타당하다.

$$Ld_U \leq M_U, \tag{11.1}$$

$$Kd_D \leq M_D, \tag{11.2}$$

$$\text{mod}(N_{Ul} - d_U, d_D) = \text{mod}(N_{Dk} - d_D, d_U) = 0, \forall k, l, \tag{11.3}$$

$$|\Xi_U| |\Xi_D| d_U d_D \leq \sum_{l \in \Xi_U} d_U (N_{Ul} - d_U) + \sum_{k \in \Xi_D} d_D (N_{Dk} - d_D), \forall \Xi_U, \Xi_D. \tag{11.4}$$

여기서 $l \in [1 : L], k \in [1 : K], \Xi_U \subseteq [1 : L], \Xi_D \subseteq [1 : K]$ 이다.

증명: 증명은 V-다 항에 명시하였다.

만약 (11.3)을 만족하는

$M_U \prod_{l=1}^L (N_{Ul}, d_U) \times M_D \prod_{k=1}^K (N_{Dk}, d_D)$ 에 대해서

는 (11.1), (11.2), (11.4)이 간섭 정렬 타당성의 필요

충분조건이 된다. 다음 예제는 정리 3에 대한 예제이다.

예제 3 (정리 3에 대한 예제).

$4(6, 2)(6, 2) \times 12(6, 4)(6, 4)(8, 4)$ 는 정리 3에 의해서 간섭 정렬이 타당하고, 합 자유도는 $d_\Sigma = 16$ 이고, 반면에 $d_{\Sigma, \text{single}} = 12$ 이다.

그리고 또 다른 특정 조건 네트워크인 대칭 네트워크는 사용자 수가 $K = L$ 이고, 모든 사용자에 대해서 $M_U = M_D = M, N_{Ul} = N_{Dk} = N, d_{Ul} = d_{Dk} = d$ 인 경우로 정의하고 $M(N, d)^K$ 로 표기한다.

정리 4 (대칭 네트워크에서 간섭 정렬 필요충분조건).

$M(N, d)^K$ 에 대해서 간섭 정렬이 확률 1로 타당할 필요충분조건은 다음과 같다.

$$Kd \leq M, \tag{12.1}$$

$$d(K + 2) \leq 2N. \tag{12.2}$$

증명: 증명은 V-라 항에 명시 하였다.

이어서, 다음 예제는 정리 4에 대한 예제이다.

예제 3 (대칭 네트워크에서 간섭 정렬 필요충분

조건에 대한 예제). $6(5, 2)^3$ 에서 조건 (12.1), (12.2)에 의해서 간섭 정렬이 가능하고, 이에 따라 최적 합 자유도 $d_\Sigma = 12$ 와 같다. 그리고 $d_{\Sigma, \text{single}} = 6$ 이므로 단일 링크 작동 자유도 보다 더 큰 자유도를 달성할 수 있다.

그리고 특별히 각 링크 당 사용자가 두 명인 대칭 네트워크에서는 간섭 정렬의 필요충분조건과 그 때의 전 처리 후처리 행렬의 단형 형태를 다음 주장과 같이 정리 할 수 있다.

정리 5 (두 명의 대칭 네트워크에서 간섭 정렬 필요충분조건).

$N(N, d)^2$ 의 간섭 정렬 필요충분조건은

$$2d \leq N, \tag{13}$$

이며, 간섭 정렬을 하기 위한 전처리 행렬과 후처리 행렬은 다음과 같이 구성 할 수 있다.

$$V_{U1} < {}_d\Gamma(\mathbf{H}_{21}^{-1} \mathbf{H}_{22} \mathbf{H}_{12}^{-1} \mathbf{H}_{11}), \tag{14.1}$$

$$V_{U2} = \mathbf{N}_C(\mathbf{H}_{12}^{-1} \mathbf{H}_{11} V_{U1}), \tag{14.2}$$

$$\mathbf{W}_{D1} <_{d\perp} ((\mathbf{H}_{12} \mathbf{V}_{U2})^T), \quad (14.3)$$

$$\mathbf{W}_{D2} <_{d\perp} ((\mathbf{H}_{21} \mathbf{V}_{U1})^T), \quad (14.4)$$

$$[\mathbf{W}_{U1}^T \mathbf{W}_{U2}^T] = \mathbf{N}_c((\mathbf{G}_U \mathbf{G}_U^\dagger)^{-1} \mathbf{G}_U^\dagger), \quad (14.5)$$

$$[\mathbf{V}_{D1} \mathbf{V}_{D2}] = \mathbf{N}_c(\mathbf{G}_D^\dagger (\mathbf{G}_D \mathbf{G}_D^\dagger)^{-1}), \quad (14.6)$$

여기서,

$$\mathbf{G}_U = [\mathbf{G}_{U1} \mathbf{V}_{U1} \mathbf{G}_{U2} \mathbf{V}_{U2}],$$

$$\mathbf{G}_D = [\mathbf{W}_{U1}^T \mathbf{G}_{D1} \mathbf{W}_{U2}^T \mathbf{G}_{D2}].$$

증명: 증명은 V-라 항에 명시 하였다.

주장 1로부터 N 이 짝수인 경우에는, 두 명의 대칭 네트워크에서 간섭 정렬을 통해 달성 할 수 있는 최적 합 자유도가 $d_{\Sigma} = 2N$. 또한, 이 경우에는, 단일 링크 작동 시 $d_{\Sigma, \text{single}} = N$ 이다. 따라서 간섭 정렬로 얻을 수 있는 합 자유도는 단일 링크 작동 시 합 자유도의 두 배가 된다.

예제 4 (두 명의 대칭 네트워크에서 간섭 정렬 필요충분조건 예제).

$8(8,4)^2$ 는 주장 1에 의해서 최적 합 자유도 $d_{\Sigma} = 8$ 을 달성 할 수 있다.

V. 간섭 정렬 타당성 증명

이 장에서는 이전 장에서 제시 했던 정리들에 대한 증명을 한다. 우선 일반적 네트워크 환경에 대한 간섭 정렬 타당성을 언급한 정리 1과 2를 증명한 후 이어서, 특정 조건 네트워크 환경에 대한 간섭 정렬 타당성 증명을 제시한다.

5.1 정리 1에 대한 증명

필요조건 (8.1)은 [13]으로부터 간단하게 유도가 가능한 조건이다. 다른 조건을 증명하기 위해서 인코딩 하기위한 출력 제한 정보와 디코딩하기 위한 부가 정보를 허용하는 MIMO Z 간섭 채널의 자유도 결과를 도입한다¹³⁾. MIMO Z 간섭 채널에서 첫 번째 송수신 짝은 M_1, N_1 안테나를 장착하고 있고, 두 번째 송수신 짝은 M_2, N_2 안테나를 장착했으며, 첫 번째 송수신 노드로부터 두 번째 수신 노드의 간섭 채널이 없는 경우를 가정한다. 그럴 경우 자유도가 타당할 필요충분조건은 다음과 같다.

$$d_1 \leq \min(M_1, N_1), \quad (15.1)$$

$$d_2 \leq \min(M_2, N_2), \quad (15.2)$$

$$d_1 + d_2 \leq \min(M_2, N_1). \quad (15.3)$$

여기서, d_1 은 첫 번째 송수신 짝의 데이터 송수신 스트림 수이고, d_2 는 두 번째 송수신 짝의 데이터 스트림 수이다. 주어진 집합 $\Xi_U \subseteq [1 : L]$ 와 $\Xi_D \subseteq [1 : K]$ 에 대해서 (15.1) 에서 (15.3) 는 다음과 같은 조건을 유도 한다.

$$\sum_{l \in \Xi_U} d_{Ul} \leq \min(M_U, \sum_{l \in \Xi_U} N_{Ul}), \quad (16.1)$$

$$\sum_{k \in \Xi_D} d_{Dk} \leq \min(M_D, \sum_{k \in \Xi_D} N_{Dk}), \quad (16.2)$$

$$\sum_{l \in \Xi_U} d_{Ul} + \sum_{l \in \Xi_D} d_{Dk} \leq \max(\sum_{l \in \Xi_U} N_{Ul}, \sum_{k \in \Xi_D} N_{Dk}). \quad (16.3)$$

여기서 각각은 Ξ_U 에 속하는 상향 링크 사용자들 간 협력과 Ξ_D 에 속하는 하향링크 사용자들 간 협력을 가정하면 유도 될 수 있는 조건이며, 간섭정렬이 타당한 경우에는 어떤 사용자들 간의 협력을 가정하더라도 만족하여야 한다. 따라서 이는 각각 (8,2)부터 (8.4)와 같다.

마지막 조건 (8.5)는 [17]과 같은 방식으로 유도가 가능하며, 이는 상향 링크 사용자들의 전 처리 행렬과 하향 링크 사용자들의 후 처리 행렬 원소 수와 간섭 정렬 타당성 조건에 따른 수식의 수를 통해 조건을 유도 할 수 있다. 간섭 정렬 조건을 만족한다면 (7.4)와 (7.5)에 따라서 상향 링크 사용자들의 전 처리 행렬과 하향 링크 사용자들의 후 처리 행렬은 모두 만계수 (full rank) 행렬이다. 따라서

$$\mathbf{V}_{Ul} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{d_{Ul}} \\ \bar{\mathbf{V}}_{Ul} \end{bmatrix} \mathbf{A}_{Ul}^{-1}, \mathbf{W}_{Dk} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{d_{Dk}} \\ \bar{\mathbf{W}}_{Dk} \end{bmatrix} \mathbf{A}_{Dk}^{-1} \quad (17)$$

와 같이 고려 할 수 있고, $\bar{\mathbf{V}}_{Ul} \in \mathbb{C}^{(N_{Ul} - d_{Ul}) \times d_{Ul}}$ 와 $\bar{\mathbf{W}}_{Dk} \in \mathbb{C}^{(N_{Dk} - d_{Dk}) \times d_{Dk}}$ 의 임의의 행렬이며, $\mathbf{A}_{Ul}^{-1} \in \mathbb{C}^{N_{Ul} \times N_{Ul}}$ 와 $\mathbf{A}_{Dk}^{-1} \in \mathbb{C}^{N_{Dk} \times N_{Dk}}$ 는 가역행렬이다. 간섭 정렬 조건 (7.1)은 (9)와 (17)에 의해서 다음과 같이 변형 된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{D_k} & \overline{\mathbf{W}}_{Dk}^\dagger \\ \mathbf{H}_{kl}^{(1)} & \mathbf{H}_{kl}^{(2)} \\ \mathbf{H}_{kl}^{(3)} & \mathbf{H}_{kl}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{d_{Ul}} \\ \overline{\mathbf{V}}_{Ul} \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \forall k, l. \quad (18)$$

따라서 $\mathcal{E}_U \subseteq [1 : L]$ 와 $\mathcal{E}_D \subseteq [1 : K]$ 가 고정되었다 가정하고, $\overline{\mathbf{V}}_{Ul}$ 와 $\overline{\mathbf{W}}_{Dk}$ 는 변수이고, (18)의 각각의 행은 하나의 다항식으로 고려 될 수 있다. 만약 (18)의 해가 존재한다면, 다항식의 수 보다 변수의 수가 많아야 하고, 모든 \mathcal{E}_U 와 \mathcal{E}_D 에 대하여 성립해야 하므로 (8.5)가 유도된다. 따라서 정리 1은 성립 한다.

5.2 정리 2에 대한 증명

이 항에서는 정리 2에 대한 증명을 한다. 전 처리 행렬과 후 처리 행렬을 구성 하는 과정은 개괄적으로 다음과 같이 설명 할 수 있다.

단계 1: (7.1)을 만족하는 $\{\mathbf{V}_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{\mathbf{W}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 를 결정한다.

단계 2: 단계 1에서 주어진 $\{\mathbf{V}_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{\mathbf{W}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 를 이용하여, (7.2)를 만족하는 $\{\mathbf{W}_{Ul}\}_{l=1}^L$, (7.3)을 만족하는 $\{\mathbf{V}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 를 결정한다.

우선 단계 1과 같이, 상향 링크 사용자의 전 처리 행렬과 하향 링크 사용자의 후 처리 행렬을 구성하는 방법을 먼저 설명한 후, 양 기지국의 전 처리 및 후 처리 행렬을 구성하는 방법을 설명한다.

5.2.1 $\{\mathbf{V}_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{\mathbf{W}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 결정 방법

간접 정렬 조건인 (7.4)와 (7.5)를 만족하기 위해서, $\{\mathbf{V}_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{\mathbf{W}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 는 모두 만계수 행렬을 고려한다. 그러면 (7.1) 조건은 (18)과 같이 변형 될 수 있고, 여기서 좌변을 행렬식 \mathbf{F}_{kl} 로 정의 하며, 다음과 같이 정리 된다.

$$\mathbf{F}_{kl} = \mathbf{H}_{kl}^{(1)} + \mathbf{H}_{kl}^{(2)} \overline{\mathbf{V}}_{Ul} + \overline{\mathbf{W}}_{Dk}^\dagger \mathbf{H}_{kl}^{(3)} + \overline{\mathbf{W}}_{Dk}^\dagger \mathbf{H}_{kl}^{(4)} \overline{\mathbf{V}}_{Ul}. \quad (19)$$

그리고 여기서 변수를 $\{\mathbf{V}_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{\mathbf{W}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 로 고려하면 (19)의 야코비안 행렬은 $\mathbf{J} = [\delta \text{vec}(\mathbf{F}) / \delta \text{vec}(\overline{\mathbf{V}}, \overline{\mathbf{W}})]$ 와 같이 정의 하며, $\text{vec}(\mathbf{F}) = [\text{vec}(\mathbf{F}_{11})^T, \dots, \text{vec}(\mathbf{F}_{KL})^T]^T$,

$\text{vec}(\overline{\mathbf{V}}, \overline{\mathbf{W}}) = [\text{vec}(\overline{\mathbf{W}}_{D1}^\dagger)^T, \dots, \text{vec}(\overline{\mathbf{V}}_{UL})^T]^T$ 이다. 기존의 [11], [14], [17]과 같은 분석 방법을 이용하여, \mathbf{J} 가 정칙행렬이 되는 특정 채널 $\{\mathbf{H}_{kl}^{(i)*}\}_{i \in [1:4], l \in [1:L], k \in [1:K]}$ 이 존재하고, 그 때에 (7.1)을 만족하는 $\{\mathbf{V}_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{\mathbf{W}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 가 있으면, 독립 항등 분포를 따르는 채널에 대해서도 (7.1)을 만족하는 해가 존재한다.

특정 채널 $\{\mathbf{H}_{kl}^{(i)*}\}_{i \in [1:4], l \in [1:L], k \in [1:K]}$ 을 찾기 위해, 모든 k 와 l 에 대해서 $\mathbf{H}_{kl}^{(1)*} = \mathbf{0}$ 와 $\mathbf{H}_{kl}^{(4)*} = \mathbf{0}$ 로 설정한다. 따라서 이렇게 설정한 특정 채널에 대해서는 앞서 정의 한 (10)이 만계수 행렬이라면, \mathbf{J} 가 정칙행렬이 된다. 게다가, 모든 k 와 l 에 대해서 $\overline{\mathbf{V}}_{Ul} = \mathbf{0}$ 와 $\overline{\mathbf{W}}_{Dk} = \mathbf{0}$ 로 설정하면 (7.1)을 만족하게 된다. 따라서 (10)이 만계수 행렬이라면 확률 1로 (7.1)을 만족하는 $\{\mathbf{V}_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{\mathbf{W}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 가 존재하며, [16]과 비슷한 반복적 알고리즘을 통해서 구성이 가능하다.

5.2.2 $\{\mathbf{W}_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{\mathbf{V}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 결정 방법

이어서, 단계 1에서 정해진 전 처리 후 처리 행렬을 고려해서 (7.2)를 만족하는 $\{\mathbf{W}_{Ul}\}_{l=1}^L$, (7.3)을 만족하는 $\{\mathbf{V}_{Dk}\}_{k=1}^K$ 를 결정한다. 이는 다중 사용자 상향 링크에서 고려하는 자유도를 얻기 위한 충분조건을 통해서 (8.2)가 유도되며, 비슷한 방법으로 하향 링크

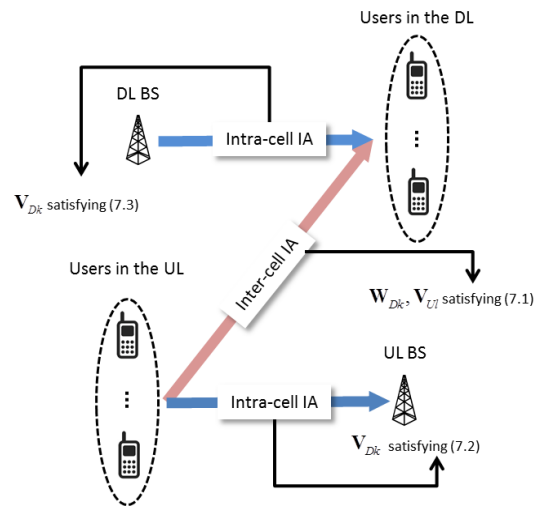


그림 2. 전 처리 후 처리 행렬 구성 방법.
Fig. 2. The method of constructing precoding and postcoding matrices.

크에서도 (8.3)이 유도 된다^[14].

위의 전 처리 행렬들과 후 처리 행렬을 결정 방법은 그림 2와 같이 정리 하였으며, 위와 같은 전 처리 후처리 행렬에 대해서 (8.4)와 (8.5)는 채널이 연속 분포를 따르는 경우에는 확률 1로 성립하므로^[7], 결국 정리 2는 유효하다.

5.3 정리 3에 대한 증명

정리 3에 대한 증명은 정리 2와 같은 두 단계로 나뉜 전 처리 행렬 및 후 처리 행렬 결정 방법을 따른다. 따라서 먼저 (7.1)을 만족하는 $\{V_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{W_{Dk}\}_{k=1}^K$ 를 결정한다. 정리 2의 증명과 같은 이유로, J 가 정칙행렬이 되는 특정 채널 행렬이 존재 하는 가를 살펴본다. 만약, (11.3)을 만족한다면, [17, Lemma 1]에 의해서 특정 채널 행렬이 치환 (Permutation) 행렬로 고려 가능 하고, 이 때 J 가 정칙행렬이 된다. 또한, 모든 k 와 l 에 대해서 $\bar{V}_{Ul} = 0$ 과 $\bar{W}_{Dk} = 0$ 으로 설정하면 (7.1)을 만족하게 된다. 따라서 (7.1)을 만족하는 $\{V_{Ul}\}_{l=1}^L$ 와 $\{W_{Dk}\}_{k=1}^K$ 이 확률 1로 존재한다. 이어서, (8.2)와 (8.3)으로부터, (11.1)과 (11.2)가 유도 되므로, 정리 2의 증명 단계 2에서와 같은 방법으로 (7.2)를 만족하는 $\{W_{Ul}\}_{l=1}^L$, (7.3)을 만족하는 $\{V_{Dk}\}_{k=1}^K$ 를 결정이 가능하다. 정리 3도 증명되었다.

5.4 정리 4에 대한 증명

이 항에서는 역 듀플렉스 대칭 네트워크에 대해서 정리 4를 증명 한다. 필요조건은 정리 1에 의해서 쉽게 증명이 가능하므로, 본 항에서는 간섭 정렬 타당성 충분조건에 대해서 기술한다. 또한, K 가 짝수일 경우에는 정리 3에 의해서 간단하게 간섭 정렬 타당성 충분조건이 증명이 가능하기에, K 가 홀수인 경우 충분 조건에 대해 살펴본다.

정리 2와 3과 비슷한 방법으로, J 가 정칙행렬이 되는 특정 채널 행렬이 존재 하는 가를 살펴본다. 특정 채널 $\{H_{kl}^{(i)*}\}_{i \in [1:4], l \in [1:L], k \in [1:K]}$ 을 찾기 위해, 모든 k 와 l 에 대해서 $H_{kl}^{(1)*} = 0$ 와 $H_{kl}^{(4)*} = 0$ 로 설정한다. 그리고 다음과 같이 특정 채널을 정하면, J 는 정칙 행렬이 된다.

$$H_{kk',j}^{(9)*} = I, \forall k \neq k', \begin{cases} \text{if } k \in \left[1: \frac{K-1}{2}, K\right], k' \in \left[1: \frac{K-1}{2}\right], j = k', \\ \text{if } k \in \left[\frac{K-1}{2} + 1: K\right], k' \in \left[\frac{K-1}{2} + 1: K-1\right], \\ j = k' - \frac{K-1}{2}, \end{cases}$$

$$H_{kk',j}^{(2)*} = I, \begin{cases} \text{if } k \in \left[1: \frac{K-1}{2}\right], k' \in \left[\frac{K-1}{2} + 1: K-1\right], j = k, \\ \text{if } k \in \left[\frac{K-1}{2} + 1: K-1\right], k' \in \left[1: \frac{K-1}{2}\right], \\ j = k - \frac{K-1}{2} \end{cases}$$

$$H_{kk', \frac{K-1}{2} + 1}^{(3)*} [p,p] = 1, p \in [1: \lceil d/2 \rceil], k \in [1: K],$$

$$H_{kk', \frac{K-1}{2} + 1}^{(2)*} [p,p] = 1, p \in [1: \lfloor d/2 \rfloor], k \in [1: K],$$

여기서, 나머지 원소들은 모두 0이고, $H_{kk',j}^{(i)*} \in \mathbb{C}^{d \times d}$, $H_{kk',A}^{(i)*} \in \mathbb{C}^{\text{mod}(N,d) \times d}$, $i \in [2:3]$, $j \in [1: A-1]$, $A = \lceil (N-d)/d \rceil$ 이다.

위와 같이 특정 채널을 설정하면, J 가 정칙행렬이 되고, 모든 k 와 k' 에 대해서 $\bar{V}_{Uk'} = 0$ 와 $\bar{W}_{Dk} = 0$ 으로 설정하면 (7.1)을 만족하게 된다. 이어서, 정리 2의 증명 단계 2에서와 같은 방법으로 (7.2)를 만족하는 $\{W_{Uk'}\}_{k'=1}^K$, (7.3)을 만족하는 $\{V_{Dk}\}_{k=1}^K$ 를 결정이 가능하다. 결국, 정리 4도 증명할 수 있다.

5.5 정리 5에 대한 증명

이 항에서는 역 듀플렉스 두 사용자의 대칭 네트워크 상황에서의 정리 5에 대한 증명을 한다.

간섭 정렬 타당성 조건 (13)은 정리 3에 의해서 쉽게 유도가 가능하므로, (14.1)부터 (14.6)까지 전 처리 및 후 처리 행렬 구성 방식에 대한 달성 가능성을 확인한다. (14.1)부터 (14.4)에 따라서 $\{V_{Ui}, W_{Di}\}_{i=1}^2$ 를 구성할 수 있고, $\text{span}(H_{11}V_{U1}) = \text{span}(H_{12}V_{U2})$ 와 $\text{span}(H_{21}V_{U1}) = \text{span}(H_{22}V_{U2})$ 이 성립한다. 따라서 (14.5)와 (14.6)과 같이 기지국의 전 처리 및 후 처리 행렬을 구성하면 (7.1)부터 (7.3)을 만족하게 된다. 게다가 모든 전 처리 후 처리 행렬이 만계수 행렬이라면, (7.4)와 (7.5)도 확률 1로 만족하게 되어서 주장 1이 유효하다.

VI. 모의 실험 및 토의

본 장에서는 제안하는 간섭 정렬 기술의 효과를 알아보기 위해서, 합 전송률 실험 결과를 제시하고, 이 결과로 제안하는 간섭 정렬 기술의 의의를 설명한다. 본 실험에서는 소형 셀을 가정하고, 기지국 단말기의 전송 전력이 단말의 전송 전력의 2배로 가정한다¹¹. 또한, 실험의 편의를 위해서, 기지국의 전 처리 및 후 처리 행렬은 zero-forcing로 가정한다. 하향 사용자의 간섭 대 잡음비를 기준으로 전송률을 표시하였다.

그림 3 은 한 셀은 2명의 사용자와 기지국이 안테나를 8개씩 장비하고, 또 다른 셀은 3명의 사용자와 기지국이 모두 6개 안테나를 장비한 네트워크에서 다양한 송수신 기법에 대한 합 전송률 실험 결과이다. 적색 선이 $8(8,4)^2 \times 6(6,2)^3$ 의 합 전송률이며, 이는 정리 3에 의해서 간섭 정렬이 타당하고, 합 자유도 $d_{\Sigma} = 14$ 을 달성 할 수 있으며, 정리 1에 의해서 최적 합 자유도이다. 녹색 선에 사각 무늬로 표시된 선은 두 셀이 하향 링크로 동작을 하고, 기지국 간 전송 데이터를 서로 공유하여 동시 전송 기법을 이용한 네트워크의 합 전송률 이다¹⁸⁾. 또한, 녹색 선에 원형 무늬로 표시된 선은 두 셀이 상향 링크로 동작하며, 기지국간 수신 데이터를 서로 공유하는 경우 동시 전송 기법을 이용한 네트워크 합 전송률 이다¹⁸⁾. 이 두 가지 양방향 협력 네트워크의 합 자유도는 단방향 협력을 통한 네트워크 합 자유도의 상향경계이고, 합 자유도는 14이다. 제안하는 간섭 정렬 기술은 단 방향으로의 데이터 협력만므로, 기존 양방향 협력 전송방식을 이용한 합 자유도와 동일 합 자유도를 달성 할 수 있

다. 그리고 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크의 합 자유도에 대한 하향 경계로 한쪽 링크로만 작동하는 경우와 비교를 하였다. 파란색 실선에 사각형 무늬로 표기된 합 전송률은 첫 번째 셀만 하향 링크로 작동하는 경우이며, 파란색에 원형으로 표기된 합 전송률은 두 번째 셀만 상향링크로 작동하는 경우로, 각각은 합 자유도가 8과 6 이다. 그리고 단일 안테나를 탑재한 일대일 송수신 노드 네트워크 경우는 검정색으로 표기 되었으며, 당연히 자유도는 1이다. 유한한 신호 대 잡음비에서도 제안하는 간섭 정렬 네트워크는 최적 자유도를 달성 하며, 단일 링크 사용을 하는 경우 보다 합 전송률도 향상 되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 4는 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크에서 단 방향 기지국 협력을 가정한 최대 합 자유도를 사용자 수에 따라 보여주고 있다. 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크에서 제안하는 간섭 정렬 방법을 사용하여 사용자 수가 늘어남에 따라 합 자유도역시 같이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 최대 $2M$ 까지 달성 가능함을 보이고 있다. 반면 하나의 셀만 동작하는 경우에는 합 자유도가 M 까지 달성되는 것을 확인 할 수 있으며, 제안 하는 기술이 하나의 셀만 동작하는 경우의 2배 합 자유도 달성이 가능함을 보인다.

본 논문에서는 다중 안테나를 이용하는 역 듀플렉스 셀룰러 네트워크에서 단 방향 기지국 협력을 통한 단사 간섭 정렬의 타당성을 연구하였다. 그리고 특정 조건 네트워크 구성에 대해서는 단사 간섭 정렬의 필요충분조건을 제시하고, 대칭 네트워크 환경에서 두 명의 사용자인 경우에는 전 처리 및 후 처리 행렬 구성 방법을 반복적 알고리즘이 아닌, 닫힌 형태로 제시하였다. 그리고 마지막으로 단사 간섭 정렬의 이득을

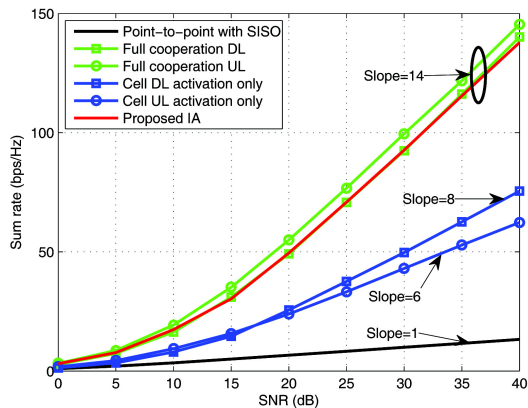


그림 3. 신호 대 잡음비에 따른 여러 네트워크 상황에서 합 전송률 및 합 자유도.
Fig. 3. Sum rate and DoF for the various networks.

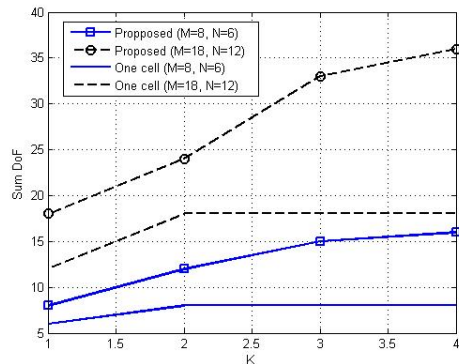


그림 4. 역 듀플렉스 대칭 네트워크에서 최대 달성 가능한 합 자유도.
Fig. 4. The maximum feasible sum DoFs for the $(M, N)^K$ RD MIMO cellular network.

실험을 통해서 알아보았으며, 특히, 양방향으로 협력을 통해 전송하는 기존의 협력 다중 셀 네트워크의 최대 합 자유도를 단 방향으로의 협력만으로도 달성 할 수 있음을 보였다.

본 연구는 앞으로 다양한 역 듀플렉스 네트워크에 대한 단사 간섭 정렬 연구에 밑바탕이 될 것으로 기대된다. 또한 다중 셀룰러 환경의 역 듀플렉스 네트워크에 대한 단사 간섭 정렬 연구에 기초가 될 것으로 전망한다.

References

- [1] D. Astely, E. Dahlman, G. Fodor, S. Parkvall, and J. Sachs, "LTE release 12 and beyond," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 7, pp. 154-160, Jul. 2013.
- [2] 3GPP TR 36.828, *Further enhancements to LTE time division duplex (TDD) for downlink-uplink (DL-UL) interference management and traffic adaptation*, 3GPP, Jun. 2012. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/>
- [3] I. Sohn, K.-B. Lee, and Y. Choi, "Comparison of decentralized time slot allocation strategies for asymmetric traffic in TDD systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 2990-3003, Jun. 2009.
- [4] H. Ji, Y. Kim, S. Choi, J. Cho, and J. Lee, "Dynamic resource adaptation in beyond LTE-A TDD heterogeneous networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Budapest, Hungary, Jun. 2013.
- [5] V. Cadambe and S. 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.
- [6] S.-W. Jeon and M. Gastpar, "A survey on interference networks: Interference alignment and neutralization," *Entropy*, vol. 14, no. 10, pp. 1842-1863, Sept. 2012.
- [7] S. Jafar and M. Fakhereddin, "Degrees of freedom for the MIMO interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 7, pp. 2637-2642, Jul. 2007.
- [8] T. Gou and S. Jafar, "Degrees of freedom of the K user M×N MIMO interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 12, pp. 6040-6057, Dec. 2010.
- [9] S.-W. Jeon and C. Suh, "Degrees of freedom of uplink-downlink multiantenna cellular networks," in *arxiv:cs.IT/1404.6012*, Apr. 2014.
- [10] C. Yetis, T. Gou, S. Jafar, and A. Kayran, "On feasibility of interference alignment in MIMO interference networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 9, pp. 4771-4782, Sept. 2010.
- [11] M. Razaviyayn, G. Lyubeznik, and Z.-Q. Luo, "On the degrees of freedom achievable through interference alignment in a MIMO interference channel," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 2, pp. 812-821, Feb. 2012.
- [12] L. Ruan, V. Lau, and M. Win, "The feasibility conditions for interference alignment in MIMO networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 8, pp. 2066-2077, Apr. 2013.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 2, pp. 437-442, Feb. 2011.
- [16] K. Gomadam, V. Cadambe, and S. 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, Jun. 2011.

- [17] K. Kim, S.-W. Jeon, J. Yang, and D. K. Kim, "The feasibility of interference alignment for reverse TDD systems in MIMO cellular networks," in *arxiv:cs.IT/1410.4624*, Aug. 2014.
- [18] M. Sawahashi, Y. Kishiyama, A. Morimoto, D. Nishikawa, and M. Tanno, "Coordinated multipoint transmission/ reception techniques for LTE-advanced [Coordinated and Distributed MIMO]," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 26-34, Jun. 2010.

김 기 연 (Kiyon Kim)



2008년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학부 공학사
 2008년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 석박사 통합 과정
 <관심분야> 무선통신, 간섭 제어, 차세대 이동통신 시스템

전 상 운 (Sang-Woon Jeon)



2003년 8월 : 연세대학교 전기 전자공학부 공학사
 2006년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학부 공학 석사
 2011년 8월 : 한국과학기술원 전기전자공학과 공학 박사
 2011년 8월~2013년 2월 : EPFL 박사후연구원

2013년 3월~현재 : 국립안동대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야> 정보이론, 무선통신

양 장 훈 (Janghoon Yang)



1996년 2월 : 연세대학교 전과 공학과 졸업

2001년 : U.S.C. Dept of Electrical Engineering 공학 석사, 박사

2001년~2006년 : 삼성전자 책임 연구원

2006년~2010년 : 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 연구 교수

2010년~현재 : 한독미디어대학원대학교 뉴미디어학부 조교수

<관심분야> OFDMA, MIMO, Relay, Cross layer optimization, 간섭 채널, 정보이론, neural signal processing

김 동 구 (Dong Ku Kim)



1983년 2월 : 한국항공대학교 통신 공학과 졸업

1985년 : U.S.C. Dept of Electrical Engineering 석사

1992년 : U.S.C. Dept of Electrical Engineering 공학 박사

1994년~현재 : 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 정교수

<관심분야> 5세대 이동통신 시스템, 협력 MIMO 기술, 무선 이동 Relay 기술, Compressive Sensing, 소형셀 네트워크 기술