

전이중 셀룰라 시스템의 간섭 제어에 관한 최근 연구 동향

전 상 운

Recent Study on Interference Management for Full-Duplex Cellular Systems

Sang-Woon Jeon

요 약

본 리뷰 논문은 전이중 (Full-Duplex) 셀룰라 시스템의 간섭 제어에 관한 최근 연구동향을 소개한다. 먼저 전이중 셀룰라 시스템과 밀접한 연관이 있는 상향링크-하향링크 공존 환경에서의 간섭 제어에 대해 간략히 소개한다. 다음으로 전이중 셀룰라 시스템의 자기간섭 제어 기법과 이를 통한 전이중 셀룰라 시스템의 이론적 모델에 대해 소개한다. 전이중 셀룰라 시스템의 경우 자기간섭을 완벽히 제거하더라도 사용자간 간섭이라는 새로운 간섭현상이 존재한다. 따라서 전이중 통신을 통해 망의 용량을 획기적으로 증대하기 위해서는 이러한 사용자간 간섭을 효율적으로 제어하여야 한다. 최근 전이중 셀룰라 시스템에서 망의 최적 자유도를 달성하는 새로운 간섭 제어 기법이 제안되었다. 본 리뷰 논문은 이러한 최적 간섭 제어 기법에 대해 증점적으로 소개하고자 한다.

Key Words : Full-Duplex, Cellular Networks, Interference Management, Degrees of Freedom, Multiantenna.

ABSTRACT

This review paper introduces recent results on interference management for full-duplex cellular systems. Interference management techniques for uplink-downlink cellular networks are first introduced, which are closely related to those for full-duplex cellular systems. Self-interference suppression method for full-duplex radios and the corresponding modeling of full-duplex cellular systems are then explained. Even if self-interference is perfectly suppressed, there exists a new source of interference between full-duplex users for full-duplex cellular systems. Therefore, management of such user-to-user interference is of crucially importance to improve the capacity of full-duplex cellular systems. Recently, new interference management techniques for achieving the optimal sum degrees of freedom of full-duplex cellular systems have been proposed. In this review paper, these optimal interference management techniques are mainly introduced.

I. 서 론

최근 한정된 무선자원을 통하여 폭발적인 무선수요

를 충족시키기 위한 다양한 방안이 연구되고 있다. 전이중 (Full-Duplex) 통신 시스템은 무선노드가 송신과 수신을 동시에 수행할 수 있어, 특정시간에 송신 혹은

※ 이 논문은 2013년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임 (NRF-2013R1A1A1064955)

• First Author : Andong National University, Department of Information and Communication Engineering, swjeon@anu.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2015-06-201, Received April 7, 2015; Revised June 9, 2015; Accepted June 9, 2015

수신만을 수행하는 기존의 반이중 (Half-Duplex) 통신 시스템에 비해 무선자원의 효율을 극대화할 수 있다는 잠재력으로 인해 최근 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁷⁾. 그림 1에서 알 수 있듯이, 무선노드가 송신과 수신을 동시에 수행하게 되면 송신단에서 수신단으로 고전력의 자기간섭이 발생하게 된다. 따라서 전이중 통신 시스템을 통해 무선자원의 효율을 극대화하기 위해서는 이러한 자기간섭을 효과적으로 억제하여야 한다. 최근 RF 단과 기저대역 단에서의 효율적인 자기간섭 억제 기법이 연구되었으며 이를 통해 자기간섭을 잡음 전력의 수배정도로 억제 할 수 있다는 연구 결과들이 발표되었다. 구체적으로 다중안테나²⁾, 추가적인 송신 RF 단³⁾, 추가적인 수신 RF 단⁴⁾, 편이현상 (Polarization)^{3,4)}, 부울 회로⁵⁾ 등을 활용한 다양한 자기간섭 억제 기술이 제안되었다.

최근 연구된 획기적인 자기간섭 억제 기술을 바탕으로 본 리뷰 논문은 자기간섭이 완벽히 제거되었다고 가정한다. 자기간섭이 없는 전이중 통신 시스템의 잠재력을 보여주는 간단한 예는 그림 2와 같은 점대점 양방향 통신을 들 수 있다. 이 경우 자기간섭이 없으므로 간섭이 없는 통신채널을 두 개 확보 가능하며, 따라서 기존의 반이중 통신 시스템에 비해 채널용량을 두 배 증대시킬 수 있다. 다음으로 본 리뷰 논문

서 중점적으로 고려하고자 하는 셀룰라 시스템을 살펴보자. 많은 경우 공간적, 비용적 제약으로 인해 단말에 전이중 통신을 구현하기가 어려울 수 있다. 이러한 경우 그림 3과 같이 전이중 기저국이 상향링크 단말과 하향링크 단말을 동시에 지원하는 모델을 고려할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 전이중 기저국의 자기간섭이 완벽히 제거된다라도 상향링크 단말에서 하향링크 단말로의 간섭이 존재하며 이는 기존의 반이중 통신 시스템에서는 발생하지 않는 간섭이다. 따라서 자기간섭이 존재하지 않더라도 전이중 통신의 도입이 기존의 셀룰라 시스템의 전송용량을 두 배로 증대시킬 수 있다고 단순히 말할 수 없다. 동일한 현상이 그림 4와 같이 기저국과 단말이 모두 전이중 통신이 가능한 모델에서도 발생한다. 즉 전이중 통신을 통해 기저국과 단말이 상향링크 메시지와 하향링크 메시지를 동시에 전송하는 모델이다. 이 경우 전이중 단말간의 간섭이 발생하며 이러한 단말간 간섭으로 인하여, 앞선 예와 마찬가지로 전이중 통신의 도입이 전송용량을 두 배로 증대시킬 수 있다고 단순히 말할 수 없다.

본 리뷰 논문은 그림 3, 4에서 간략히 소개된 전이

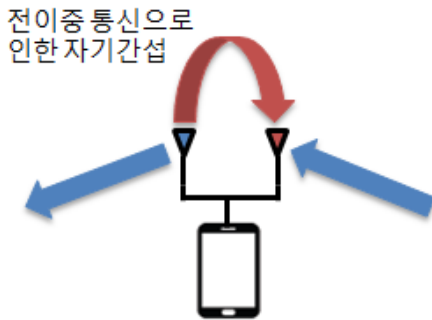


그림 1. 전이중 통신으로 인한 자기간섭 현상
Fig. 1. Self-interference in full-duplex radios

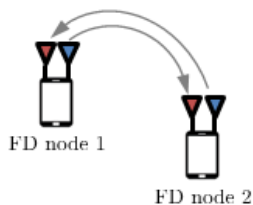


그림 2. 점대점 양방향 통신 시스템에서의 전이중 통신
Fig. 2. Full-duplex operation in two-way communication systems

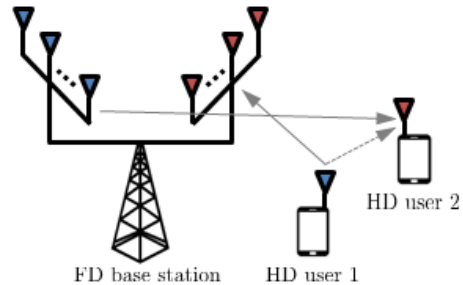


그림 3. 전이중 기저국 반이중 사용자로 구성된 셀룰라 시스템
Fig. 3. FD base station and HD user cellular systems

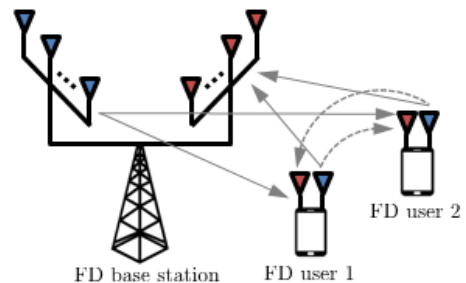


그림 4. 전이중 기저국 전이중 사용자로 구성된 셀룰라 시스템
Fig. 4. FD base station and FD user cellular systems

중 셀룰라 시스템의 최적 자유도를 달성하는 새로운 간섭제어 기법을 소개하고자 한다^{8,9)}. 이러한 기법을 통하여 단말 대 단말간 새로운 간섭이 존재하더라도 망 내의 단말수가 충분히 많은 경우 망의 자유도를 두 배까지 궁극적으로 증대시킬 수 있다. 관련 연구로써 최근 Reverse TDD, Dynamic Duplex와 같은 분야에서 활발히 연구되는 상향-하향링크 공존 셀룰라 환경에 대해서도 소개하고자 한다¹⁰⁻¹⁴⁾. 그림 3, 4에서 알 수 있듯이, 기지국이 전이중 통신이 가능한 경우 상향링크 사용자와 하향링크 사용자를 동시에 지원 가능하며 참고문헌 [13-15]에서 고려한 상향-하향링크 공존환경에서의 간섭제어 기법을 통하여 망의 용량을 크게 개선시킬 수 있다. 본 리뷰 논문은 이 두 모델에 대해 중점적으로 살펴보고자 한다.

II. 상향-하향링크 공존 셀룰라 시스템

전이중 셀룰라 시스템을 소개하기에 앞서, 본 장에서는 Reverse TDD, Dynamic Duplex와 같은 분야에서 활발히 연구되는 상향-하향링크 공존 셀룰라 환경에 대해 먼저 소개한다¹⁰⁻¹⁴⁾. 기존의 연구는 상위 계층의 유연한 무선자원 활용 및 트래픽 분산 등의 관점에서 주로 연구가 진행되었다. 하지만 최근 참고문헌 [13-15]에서 다중안테나 셀룰라 망의 경우 기존의 상향링크 혹은 하향링크로 망을 운영하는 경우보다 상향링크, 하향링크가 공존하는 환경, 즉 일부 셀은 상향링크로 동작하고 나머지 셀은 하향링크로 동작하는 경우 망의 용량을 증가시킬 수 있음이 규명되었다. 그림 5와 같이 첫 번째 셀은 단일 안테나를 가진 기지국과 두 명의 사용자로 구성되고 두 번째 셀은 두 개의 안테나를 가진 기지국과 단일 사용자로 구성된 셀룰라 시스템을 고려하자. 이 경우 두 셀이 상향링크, 혹은 하향링크로 동작할 경우 자유도가 1로 제약됨을 알 수 있다. 즉, 단일 셀 대비 이득이 없게 된다. 하지

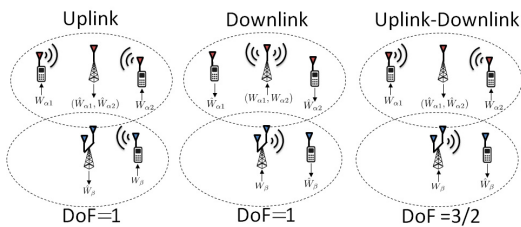


그림 5. 상향링크-하향링크 동작으로 망의 자유도를 증가시킬 수 있는 셀룰라 망 예시
Fig. 5. Cellular network example in which uplink-downlink operation increases the degrees of freedom

만 첫 번째 셀은 상향링크, 두 번째 셀은 하향링크로 동작할 경우 자유도를 3/2로 향상시킬 수 있음이^[13]에서 규명되었다.

본 장에서 소개하는 상향-하향링크 공존 셀룰라 시스템은 3장에서 소개하고자 하는 전이중 셀룰라 시스템과 밀접한 연관이 있다. 전이중 셀룰라 시스템의 경우 기지국이 전이중 통신을 통하여 상향링크 사용자와 하향링크 사용자를 동시에 지원할 수 있다. 따라서 이 경우 그림 6에서와 같이 상향링크-하향링크 공존 환경과 유사하게 되며 상향-하향링크 공존 셀룰라 시스템에서 제안된 간섭제어 기법을 활용할 수 있다.

2.1 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템의 최적 자유도

최근 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템의 최적 자유도가 규명되었다^[13]. 본 절에서는 이를 간략히 소개하고 또한 최적 자유도를 달성하기 위한 핵심 요소기술을 설명하고자 한다.

그림 6으로 표현되는 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템을 고려하자. 첫 번째 셀은 N_1 명의 하향링크 사용자와 M_1 개의 수신안테나를 가진 기지국으로 구성되며, 두 번째 셀은 N_2 명의 상향링크 사용자와 M_2 개의 송신안테나를 가진 기지국으로 구성된다. 이 경우 첫 번째 기지국의 수신신호 $y_\alpha(t) \in R^{M_1 \times 1}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_\alpha(t) = \sum_{i=1}^{N_1} h_{\alpha i}(t)x_{\alpha i}(t) + G_\alpha(t)x_\beta(t) + z_\alpha(t) \tag{1}$$

또한 j 번째 하향링크 사용자의 수신신호 $y_{\beta j}(t) \in R$ 는 다음과 같이 표현된다.

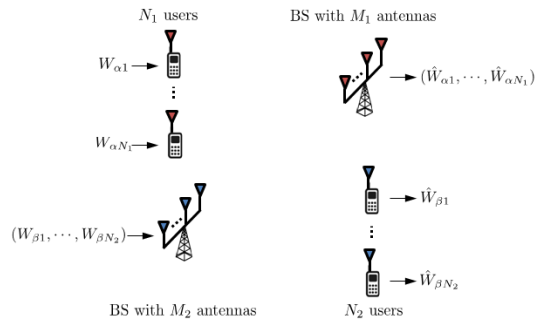


그림 6. 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템
Fig. 6. Uplink-downlink cellular systems

$$y_{\beta j}(t) = h_{\beta j}(t)x_{\beta}(t) + \sum_{i=1}^{N_1} g_{\beta ji}(t)x_{\alpha i}(t) + z_{\beta j}(t) \quad (2)$$

여기서 $x_{\alpha i}(t) \in R$, $x_{\beta}(t) \in R^{M_2 \times 1}$ 는 각각 i 번째 상향링크 사용자의 송신신호와 두 번째 기지국의 송신신호 벡터이며, $h_{\alpha i}(t) \in R^{M_1 \times 1}$, $G_{\alpha}(t) \in R^{M_1 \times M_2}$, $h_{\beta j}(t) \in R^{1 \times M_2}$, $g_{\beta ji}(t) \in R$ 는 각각 i 번째 상향링크 사용자에서 첫 번째 기지국으로의 채널 벡터, 두 번째 기지국에서 첫 번째 기지국으로의 채널 행렬, 두 번째 기지국에서 j 번째 하향링크 사용자로의 채널 벡터, i 번째 상향링크 사용자에서 j 번째 하향링크 사용자로의 채널이며, $z_{\alpha}(t) \in R^{M_1 \times 1}$, $z_{\beta i}(t) \in R$ 는 각각 첫 번째 기지국의 부가잡음 벡터, i 번째 하향링크 사용자의 부가잡음이다. 위와 같은 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템의 최적 자유도가 참고문헌 [13]에서 최근 규명되었으며 다음과 같다.

$$d_{\Sigma} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{N_1 N_2 + L_1 + L_2}{\max(N_1, N_2)}, \\ M_1 + N_2, N_1 + M_2, \\ \max(M_1, M_2), \max(N_1, N_2) \end{array} \right\} \quad (3)$$

여기서 $L_1 = \min(M_1, N_1)(N_1 - N_2)^+$, $L_2 = \min(M_2, N_2)(N_2 - N_1)^+$, $a^+ = \max(a, 0)$ 을 의미한다.

2.2 기존의 상향링크, 하향링크 시스템과의 비교
기존의 상향링크, 하향링크 시스템과의 비교를 위해 $M_1 = N_2 = M$, $M_2 = N_1 = N$ 인 환경을 고려하자. 이 경우 수식 (3)에 의하여 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템의 최적 자유도는 다음과 같다.

$$d_{\Sigma} = \begin{cases} \frac{M(2N - M)}{N} & \text{if } M \leq N \\ \frac{N(2M - N)}{M} & \text{if } M > N \end{cases} \quad (4)$$

그림 7은 수식 (4)를 $N = 5$ 인 경우, M 에 따라 도시하였다. 비교를 위해 두 셀이 완벽히 협력하는 경우의 자유도 상한값과 두 셀 중 한 셀만 활성화된 경우

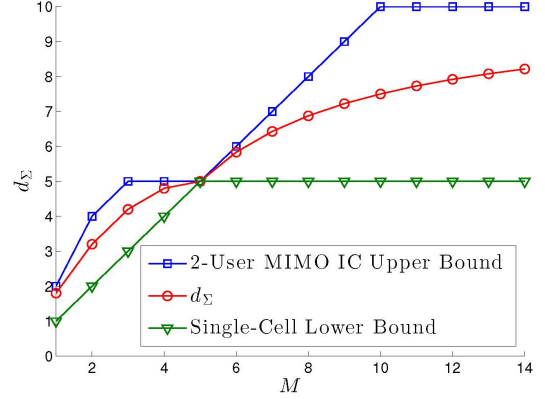


그림 7. $N=5$ 인 경우 M 에 따른 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템의 자유도
Fig. 7. Degrees of freedom of uplink-downlink cellular systems when $N=5$

의 자유도 하한값을 함께 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 M 이 커질수록 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템의 최적 자유도가 두 셀이 완벽히 협력할 때 달성 가능한 자유도 상한값에 접근하는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 두 셀 중 한 셀만 활성화된 경우의 자유도 하한값은 두 셀이 모두 상향링크 혹은 하향링크로 동작할 때 얻을 수 있는 자유도와 일치한다 (그림 8 참고). 따라서 상향링크, 하향링크가 공존하도록 셀룰라 시스템을 동작시키면 기존의 상향링크, 하향링크 시스템에 비해 망의 자유도를 획기적으로 향상시킬 수 있다.

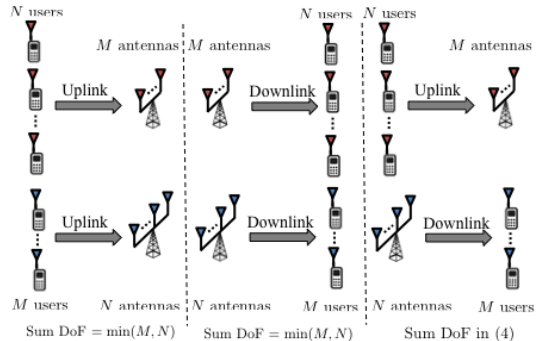


그림 8. 상향링크-하향링크 공존에 따른 자유도 이득
Fig. 8. Degrees of freedom gain from uplink-downlink operation

2.3 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템의 간섭 제어

상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템에서의 최적 자유도를 달성하는 간섭제어는 크게 그림 9와 같은 3

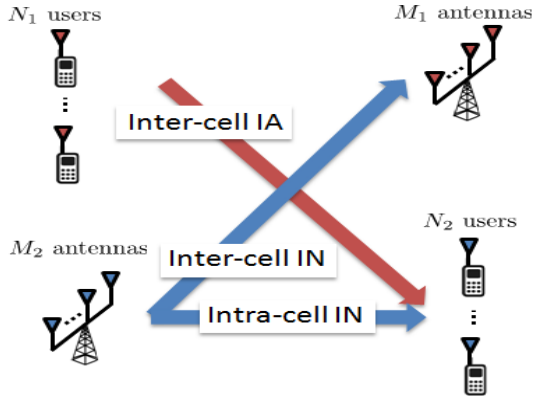


그림 9. 상향링크-하향링크 공존 셀룰러 시스템의 간섭제어
Fig. 9. Interference management for uplink-downlink cellular systems

개의 기술 요소로 구성된다^[13]. 먼저 상향링크 사용자에서 하향링크 사용자로의 간섭을 제어하기 위한 셀간 간섭정렬 기술이 적용되었다^[16-24]. 다음으로 두 번째 기지국의 송신안테나를 통한 간섭제어 방안이 적용되었다. 이 때의 간섭은 두 가지로 나뉠수 있는데 두 번째 기지국에서 첫 번째 기지국으로의 셀간 간섭과 하향링크 사용자들 간의 간섭이 있다. 셀간 간섭의 경우 선택적으로 제거하며 하향링크 사용자간 간섭은 반드시 제거하는 것이 최적의 자유도를 달성할 수 있음이 참고문헌 [13]에서 규명되었다. 3장에서 자세히 언급하겠지만, 셀간 간섭의 경우 전이중 통신시스템에서는 동일 기지국내에서 발생하는 자기간섭에 해당한다. 따라서 서론에서와 같이 전이중 통신시스템의 자기간섭이 완벽히 제거된 경우 이러한 간섭은 존재하지 않게 되며 상향링크-하향링크 공존 셀룰러 시스템의 간섭제어를 변형 적용할 수 있다.

III. 전이중 셀룰러 시스템

본 장에서는 전이중 셀룰러 시스템에 대해 간략히 소개하고자 한다. 또한 이러한 전이중 셀룰러 시스템에서 달성 가능한 최적 자유도를 통해 기존의 반이중 셀룰러 시스템과의 전송률 이득에 대해 비교하고자 한다.

3.1 기지국만이 전이중 통신이 가능한 모델

먼저 기지국만이 전이중 통신이 가능한 경우를 고려할 수 있다. 참고문헌 [9]에서는 그림 3의 예를 일반화한 모델에 대해 연구하였으며 최적의 자유도를 규명하였다.

3.1.1 전이중 기지국-반이중 사용자 셀룰러 시스템

그림 10으로 표현되는 셀룰러 시스템은 전이중 통신이 가능한 기지국이 M_1 개의 송신안테나와 M_2 개의 수신안테나를 통해 동시에 송수신을 수행하여, 각각 N_1 개의 반이중 하향링크 사용자와 N_2 개의 반이중 상향링크 사용자를 서비스하는 모델이다. 이 경우 i 번째 하향링크 사용자의 수신신호 $y_i^{[d]}(t) \in R$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i^{[d]}(t) = g_i(t)x^{[bs]}(t) + \sum_{j=1}^{N_2} h_{ij}(t)x_j^{[u]}(t) + z_i^{[d]}(t) \quad (5)$$

또한 기지국의 수신신호 $y^{[bs]}(t) \in R^{M_2 \times 1}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$y^{[bs]}(t) = \sum_{j=1}^{N_2} f_j(t)x_j^{[u]}(t) + z^{[bs]}(t) \quad (6)$$

여기서 $x^{[bs]}(t) \in R^{M_1 \times 1}$, $x_j^{[u]}(t) \in R$ 는 각각 기지국 송신신호 벡터와 j 번째 상향링크 사용자의 송신신호이며, $g_i(t) \in R^{1 \times M_1}$, $h_{ij}(t) \in R$,

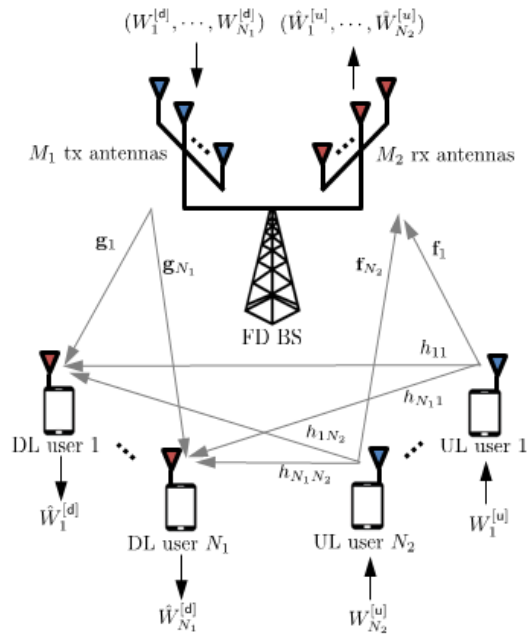


그림 10. 전이중 기지국-반이중 사용자 셀룰러 시스템
Fig. 10. FD BS-HD user cellular systems

$f_j(t) \in R^{M_2 \times 1}$ 는 각각 기지국에서 i 번째 하향링크 사용자로의 채널 벡터, j 번째 상향링크 사용자에서 i 번째 하향링크 사용자로의 채널, j 번째 상향링크 사용자에서 기지국으로의 채널 벡터이며, $z^{[bs]}(t) \in R^{M_2 \times 1}$, $z_i^{[d]}(t) \in R$ 는 각각 기지국의 부가잡음 벡터, i 번째 하향링크 사용자의 부가잡음이다. 수식 (5), (6)에서 알 수 있듯이 기지국의 전이중 통신에서 야기되는 자기간섭은 완전히 억제된다고 가정하였다.

3.1.2 전이중 기지국-반이중 사용자 셀룰라 시스템의 최적 자유도

앞서 소개한 전이중 기지국-반이중 사용자 셀룰라 시스템의 최적 자유도가 최근 [9]에서 규명되었으며 다음과 같이 표현된다.

$$d_{\Sigma,1} = \min \left\{ M_1 + M_2, \max(N_1, N_2), \max \left(M_1 + \frac{N_2(N_1 - M_1)}{N_1}, M_2 + \frac{N_1(N_2 - M_2)}{N_2} \right) \right\} \quad (7)$$

기존의 반이중 셀룰라 시스템과의 비교를 위해 $M_1 = M_2 = M$, $N_1 = N_2 = N$ 으로 주어진 경우를 고려하면 수식 (7)을 통해 최적의 자유도는 다음과 같이 주어진다.

$$d_{\Sigma,1} = \min \{2M, N\} \quad (8)$$

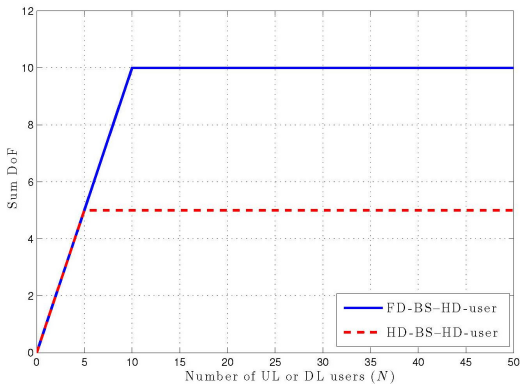


그림 11. $M=5$ 인 경우 N 에 따른 전이중 기지국-반이중 사용자 셀룰라 시스템의 자유도
Fig. 11. Degrees of freedom of FD BS-HD user cellular systems when $M=5$

반면 반이중 셀룰라 시스템의 경우 최적의 자유도는 $\min\{M, N\}$ 로 제약된다. 그림 11은 $M=5$ 인 경우 N 에 따른 최적 자유도를 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 사용자 수 N 이 증가할수록 전이중 셀룰라 시스템의 최적 자유도가 기존의 반이중 셀룰라 시스템의 최적 자유도를 두배 향상시킬 수 있다. 즉 서론에서 제기한 물음에 대한 해답으로 사용자간 간섭이 존재하더라도 전이중 통신을 통해 셀룰라 망의 용량을 궁극적으로 두배 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.2 기지국, 사용자 모두 전이중 통신이 가능한 모델

다음으로 기지국, 사용자 모두 전이중 통신이 가능한 경우를 고려할 수 있다. 참고문헌 [9]에서는 그림 4의 예를 일반화한 모델에 대해 연구하였으며 최적의 자유도를 규명하였다.

3.2.1 전이중 기지국-전이중 사용자 셀룰라 시스템

그림 12로 표현되는 셀룰라 시스템은 전이중 통신이 가능한 기지국이 M_1 개의 송신안테나와 M_2 개의 수신안테나를 통해 동시에 송수신을 수행하여, N 개의 전이중 사용자와 상향링크, 하향링크 메시지를 동시에 주고받는 모델이다. 이 경우 i 번째 사용자의 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i(t) = g_i(t)x^{[bs]}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_2} h_{i,j}(t)x(t) + z_i(t) \quad (9)$$

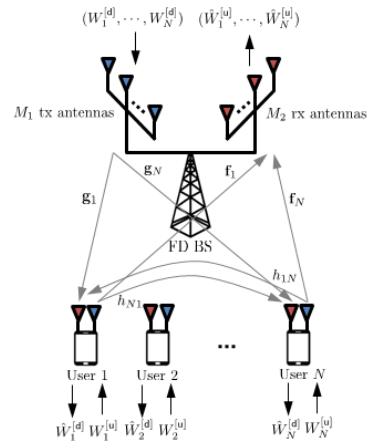


그림 12. 전이중 기지국-전이중 사용자 셀룰라 시스템
Fig. 12. FD BS-FD user cellular systems

또한 기지국의 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y^{[bs]}(t) = \sum_{j=1}^N f_j(t)x_j(t) + z^{[bs]}(t) \quad (10)$$

수식 (9), (10)에서 알 수 있듯이 기지국과 사용자 간의 전이중 통신에서 야기되는 자기간섭은 완전히 억제된다고 가정하였다.

3.2.2 전이중 기지국-전이중 사용자 셀룰라 시스템의 최적 자유도

앞서 소개한 전이중 기지국-전이중 사용자 셀룰라 시스템의 최적 자유도가 최근 [9]에서 규명되었으며 다음과 같이 표현된다.

$$d_{\Sigma,2} = \min(M_1 + M_2, N) \quad (11)$$

기존의 반이중 셀룰라 시스템과의 비교를 위해 $M_1 = M_2 = M$ 으로 주어진 경우를 고려하면 수식 (11)을 통해 최적의 자유도는 $d_{\Sigma,2} = \min\{2M, N\}$ 로 주어진다. 따라서 전이중 기지국-반이중 사용자 셀룰라 시스템과 동일하게 사용자가 충분히 큰 경우 기존의 반이중 셀룰라 시스템 대비 두 배의 자유도 향상이 있음을 확인할 수 있다.

IV. 전이중 셀룰라 시스템에서의 간섭제어

본 장에서는 3장에서 소개한 전이중 셀룰라 시스템의 최적 자유도 달성을 위해 참고문헌 [9]에서 제안된 간섭제어 기법에 대해 소개한다. 편의상 그림 10의 전이중 기지국-반이중 사용자 모델을 기반으로 설명하겠다.

4.1 하향링크 사용자가 한명인 경우의 간섭제어

이해를 돕기 위해 먼저 하향링크 사용자가 한명인 경우, 즉 $N_1 = 1$ 인 경우를 먼저 고려하자. 이 경우 수식 (7)에 의하여 최적 자유도는 다음과 같이 표현된다.

$$d_{\Sigma,1} = \begin{cases} N_2 & \text{if } M_2 \geq N_2 \\ M_2 + \frac{N_2 - M_2}{N_2} & \text{if } M_2 < N_2 \end{cases} \quad (12)$$

$M_2 \geq N_2$ 인 경우 상향링크 사용자만을 서비스함으로써 최적의 자유도를 획득 가능하다, $M_2 < N_2$ 인 경우는 단순히 상향링크 혹은 하향링크 사용자만을 서비스함으로써 최적 자유도를 달성할 수 없다. 이 경우 심볼 확장을 통한 빔성형 기법을 통하여 최적 자유도를 달성 가능하다. 참고문헌 [9]에서는 N_2 심볼 확장을 통하여 그림 13과 같은 빔성형을 제안하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 핵심 기술 요소는 상향링크 사용자 간의 빔성형을 통하여 하향링크 사용자에게 미치는 간섭을 정렬시키는 것이다. 이를 통하여 최적 자유도를 달성 가능하다.

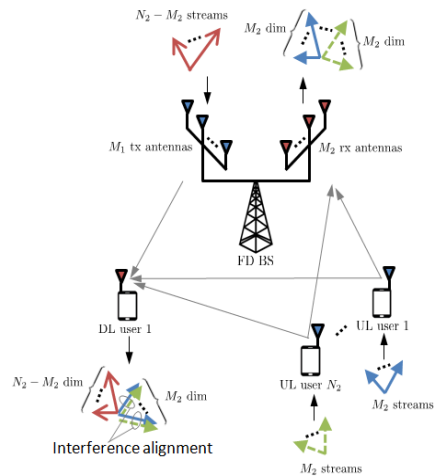


그림 13. 전이중 기지국-반이중 사용자 셀룰라 시스템의 간섭제어 ($N_1 = 1$)
 Fig. 13. Interference management for FD BS-HD user cellular systems ($N_1 = 1$)

4.2 일반적인 경우의 간섭제어

일반적인 경우는 그림 14에서 보듯이 크게 두가지 핵심 요소 기술이 적용되었다. 먼저 사용자간 간섭을 효율적으로 제어하기 위한 간섭정렬 기술을 들 수 있다. 구체적으로 기술하면 다수의 상향링크 사용자들로부터 다수의 하향링크 사용자들에게로 전송되는 간섭을 제어하기 위하여 심볼 확장을 통한 신호공간 간섭정렬 기술이 적용되었다^[16-24]. 다음으로 하향링크 사용자간 간섭 제어를 위한 기지국 송신안테나를 통한 빔성형 기법이 적용되었다. 이 두가지 요소 기술을 적용하여 망의 자유도 혹은 전송율을 개선할 수 있지만, 최적 자유도를 달성하기 위해 T 개의 심볼 확장을 통해 사용자별로 몇 개의 스트림을 할당해야 하는지를 명확히 규명하기 어렵다. 참고문헌 [9]에서는

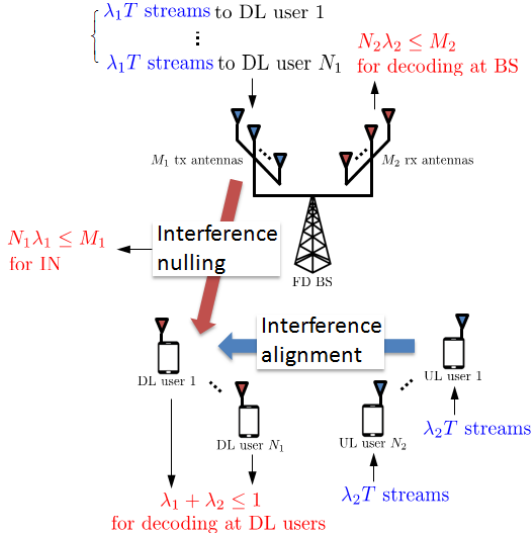


그림 14. 전이중 기지국-반이중 사용자 셀룰라 시스템의 간섭제어 (일반적인 경우)
 Fig. 14. Interference management for FD BS-HD user cellular systems (general case)

$\lambda_1, \lambda_2 \in [0, 1]$ 로 표현되는 임의의 스트림을 각 하향 링크 사용자와 상향링크 사용자를 위해 할당할 수 있는 충분한 조건을 유도하였다 (그림 14 참고). 이를 통해 다음의 자유도를 달성 가능함을 보였다.

$$\begin{aligned} & \max \{N_1 \lambda_1 + N_2 \lambda_2\} \\ & \lambda_1 + \lambda_2 \leq 1 \\ & N_1 \lambda_1 \leq M_1 \\ & N_2 \lambda_2 \leq M_2 \end{aligned} \quad (13)$$

수식 (13)를 통해 최적의 스트림 수를 규명할 수 있으며 이를 통해 수식 (7)으로 표현되는 최적의 자유도를 달성할 수 있다. 전이중 셀룰라 시스템에 적용된 간섭제어 기법은 앞서 언급한 상향링크-하향링크 공존 셀룰라 시스템에서 제한한 간섭제어 기법과 유사하다 (그림 9, 14 참고). 전이중 기지국의 자기간섭이 없는 경우 그림 9의 두 번째 셀에서 첫 번째 셀로의 셀 간 간섭이 일어나지 않는 경우에 해당하며 기지국 송신빔 성형시 이를 고려하지 않아도 된다. 따라서 더 적은 수의 송신안테나를 가지고도 동일한 자유도 혹은 안테나 수가 동일한 경우 더 높은 자유도를 획득 가능하다.

V. 결론

본 리뷰 논문에서는 최근 활발히 연구되고 있는 전이중 셀룰라 시스템의 연구 동향을 소개하였다. 셀룰라 시스템에 전이중 통신을 도입하게 되며 사용자 간 간섭이라는 반이중 통신에서 발생하지 않는 새로운 간섭원이 존재한다. 하지만 최근 연구결과들은 이러한 간섭에도 불구하고 적절한 간섭제어를 통해 셀 내에 사용자가 충분한 경우 전이중 통신을 통하여 망의 자유도를 획기적으로 향상시킬 수 있음을 규명하였다. 최근 차세대 통신 시스템에서 망 용량을 획기적으로 증대시키기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다²⁵⁻³¹. 본 논문에서 소개한 연구결과들이 차세대 통신 시스템의 핵심 기술로 자리매김하기 위해서는 다양한 이중망 및 일반적인 환경에서도 동작하는 간섭제어 기법이 연구되어야 한다. 마지막으로 본 논문에서 소개한 연구결과들은 송신단에서 채널정보를 정확히 알아야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고 다양한 상용 통신시스템에 적용하기 위해서는 채널정보가 불명확한 경우 혹은 채널정보가 없을 경우의 간섭제어 기법에 대한 연구가 수반되어야 한다³²⁻³⁵.

References

- [1] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," in *Proc. 16th Annu. Int. Conf. Mob. Comput., Netw., and Commun. (MobiCom)*, pp. 1-12, New York, NY, Aug. 2010.
- [2] E. Aryafar, M. A. Khojastepour, K. Sundaresan, S. Rangarajan, and M. Chiang, "MIDU: Enabling MIMO full duplex," in *Proc. 18th Annu. Int. Conf. Mob. Comput., Netw., and Commun. (MobiCom)*, pp. 257-268, Istanbul, Turkey, Aug. 2012.
- [3] A. K. Khandani, "Two-way (true full-duplex) wireless," in *Proc. 13th Canadian Workshop in Inf. Theory (CWIT)*, pp. 33-38, Toronto, Canada, Jun. 2013.
- [4] M. Duarte and A. Sabharwal, "Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results," in *Proc. Asilomar Conf. Signals, Syst. and Comput. (ASILOMAR)*, pp. 1558-1562, Pacific Grove,

- CA, Nov. 2010.
- [5] M. Jain, J. I. Choi, T. M. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplex wireless," in *Proc. 17th Annu. Int. Conf. Mob. Comput., Netw., and Commun. (MobiCom)*, pp. 301-312, Las Vegas, NV, Sept. 2011.
- [6] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of PHY and MAC layers," to appear in *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 2015.
- [7] M. Ching, M. S. Sim, J. Kim, D. K. Kim, and C.-B. Chae, "Prototyping real-time full duplex radios," to appear in *IEEE Commun. Mag.*, 2015.
- [8] K. Kim, S.-W. Jeon, and D. K. Kim, "The feasibility of interference alignment for full-duplex MIMO cellular networks," to appear in *IEEE Commun. Lett.*, 2015.
- [9] S.-W. Jeon, S. H. Chae, and S. H. Lim, "Degrees of freedom of full-duplex multiantenna cellular networks," submitted to *IEEE Trans. Inf. Theory*, Jan. 2015. [Online]. Available at arXiv:cs.IT/1501.02889/
- [10] 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.
- [11] *Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2013-2018*, White Paper, Cisco, Feb. 2014. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/>
- [12] *3GPP TR 36.842, Study on small cell enhancements for EUTRA and E-UTRAN*, 3GPP, Dec. 2013. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/>
- [13] S.-W. Jeon and C. Suh, "Degrees of freedom of uplink-downlink multiantenna cellular networks," in revision for *IEEE Trans. Inf. Theory*, Apr. 2014. [Online]. Available at arXiv:cs.IT/1404.6012/
- [14] 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 revision for *IEEE Trans. Signal Process.*, Aug. 2014. [Online]. Available at arXiv:cs.IT/1410.4624/
- [15] K. Kim, S.-W. Jeon, J. Yang, and D. K. Kim, "Feasibility of interference alignment for reverse duplex in MIMO cellular networks with one-side base cooperation," *J. KICS*, vol. 40, no. 2, pp. 273-284, Feb. 2015.
- [16] 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.
- [17] C. Suh and D. Tse, "Interference alignment for cellular networks," in *Proc. 46th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, and Comput.*, pp. 1037-1044, Urbana-Champaign, IL, Sept. 2008.
- [18] S.-W. Jeon and S.-Y. Chung, "Capacity of a class of linear binary field multisource relay networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6405-6420, Oct. 2013.
- [19] S.-W. Jeon, C.-Y. Wang, and M. Gastpar, "Approximate ergodic capacity of a class of fading two-user two-hop networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 2, pp. 866-880, Feb. 2014.
- [20] T. Gou, S. A. Jafar, C. Wang, S.-W. Jeon, and S.-Y. Chung, "Aligned interference neutralization and the degrees of freedom of the $2 \times 2 \times 2$ interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 7, pp. 4381-4395, Jul. 2012.
- [21] S.-W. Jeon, S.-Y. Chung, and S. A. Jafar, "Degrees of freedom region of a class of multisource Gaussian relay networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 5, pp. 3032-3044, May 2011.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] S. A. Ayoughi, M. Nasiri-Kenari, and B. H. Khalaj, “On degrees of freedom of the cognitive MIMO two-interfering multiple-access channels,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 5, pp. 2052-2068, Jun. 2013.
- [25] A. Ghosh, N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, M. C. B. Mondal, E. Visotsky, T. A. Thomas, J. G. Andrews, P. Xia, H. S. Jo, H. S. Dhillon, and T. D. Novlan, “Heterogeneous cellular networks: From theory to practice,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, pp. 54-64, Jun. 2012.
- [26] M. Kountouris and N. Pappas, “HetNets and massive MIMO: Modeling, potential gains, and performance analysis,” in *Proc. IEEE Ant. and Propag. Wirel. Commun. (APWC)*, pp. 1319-1322, Torino, Italy, Sept. 2013.
- [27] S.-W. Jeon and B. C. Jung, “Interference neutralization for small-Cell wireless networks,” *J. KICS*, vol. 38, no. 12, pp. 1117-1124, Dec. 2013.
- [28] J. Hoydis, K. Hosseini, S. ten Brink, and M. Debbah, “Making smart use of excess antennas: Massive MIMO, small cells, and TDD,” *Bell Labs Technical J.*, vol. 18, pp. 5-21, Sept. 2013.
- [29] S.-W. Jeon and W.-Y. Shin, “Dynamic Opportunistic Interference Alignment for Random-Access Small-Cell Networks,” *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 675-681, Nov. 2014.
- [30] S. H. Chae, S. H. Lim, and S.-W. Jeon, “On the Degrees of freedom of full-duplex multiantenna cellular networks (전이중 셀룰러 망의 자유도에 관한 연구),” *Information and Communications Magazine (KICS)*, vol. 32, no. 5, pp. 65-72, April 2015.
- [31] K. Hosseini, J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbah, “Massive MIMO and small cells: How to densify heterogeneous networks,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 5442-5447, Budapest, Hungary, Jun. 2013.
- [32] M. Yang, S.-W. Jeon, and D. K. Kim, “Linear degrees of freedom of MIMO broadcast channels with reconfigurable antennas in the absence of CSIT,” submitted to *IEEE Trans. Inf. Theory*, Sept. 2014. [Online]. Available at arXiv:cs.IT/14 09.5532/
- [33] M. A. Maddah-Ali and D. Tse, “Completely stale transmitter channel state information is still very useful,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, pp. 4418-4431, Jul. 2012.
- [34] C. S. Vase and M. K. Varanasi, “The degrees of freedom region and interference alignment for the MIMO interference channel with delayed CSIT,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, pp. 4396-4417, Jul. 2012.
- [35] T. Gou and S. A. Jafar, “Optimal use of current and outdated channel state information: Degrees of freedom of the MISO BC with mixed CSIT,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, pp. 1084-1087, Jul. 2012.

전 상 운 (Sang-Woon Jeon)



2003년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학부 공학사
2006년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학부 공학석사
2011년 8월 : 한국과학기술원 전
기전자공학과 공학박사
2011년 8월~2013년 2월 : EPFL
박사후연구원

2013년 3월~현재 : 국립안동대학교 정보통신공학과
조교수
<관심분야> 정보이론, 무선통신