

Full-Duplex 통신 기반 차세대 이동통신망

I. 서론

모바일 트래픽의 폭발적인 증가로 인해 이동통신망의 무선전송 용량을 증대시키기 위한 지속적인 노력이 요구되고 있다. Full-Duplex(FD) 통신은 무선전송 용량을 대폭 향상시킬 수 있는 획기적인 통신 방식으로 주목을 받고 있다. 현재의 이동통신시스템은 특정 시간-주파수에서 한 노드가 전송 또는 수신 중 하나의 동작만을 수행하는 Half-Duplex(HD) 통신을 가정하고 있다. <그림 1>에 도시되어 있는 것처럼, HD 통신은 (a) 다른 주파수를 사용하여 전송과 수신을 각각 수행하는 FDD (Frequency Division Duplexing) 방식과 (b) 시간 슬롯을 달리하여 전송과 수신을 수행하는 TDD(Time Division Duplexing) 방식이 대표적이다. 즉, 상향링크 전송과 하향링크 전송은 각각 별도의 무선 자원을 사용한다. 반면, FD 통신은 노드가 무선 신호를 전송하면서 동시에 동일한 주파수에서 다른 신호를 수신하는 것을 뜻한다. 동일 무선 자원을 사용해 상향링크 전송을 모두 수행하므로, FD 통신은 현재의 HD 방식 대비 무선링크의 전송 용량을 최대 2배까지 향상시킬 수 있다.

하지만, FD 통신은 노드가 수신하는 신호에 자신이 전송하는 신호가 섞여 들어와 간섭으로 작용하는 심각한 자기간섭(self-interference) 문제를 갖는다. 노드가 수신하고자 하는 신호는 멀리 떨어진 다른 노드로부터 전송되어 큰 폭의 신호 감쇄를 겪는 반면, 자기간섭 신호는 자신이 전송하는 신호이므로 수신하고자 하는 신호보다 훨씬 큰 전력 세기로 수신된다. 따라서, 수신하고자 하는 신호를 디코딩하여 이로부터 오류가 없는 데이터를 추출하는 것이 어려워진다. 이러한 자기간섭 문제로 인해 FD 통신은 오랫동안 실현이 불가능한 것으로 간주되었다.^[1] FD 통신을 실현하기 위해서는 자기

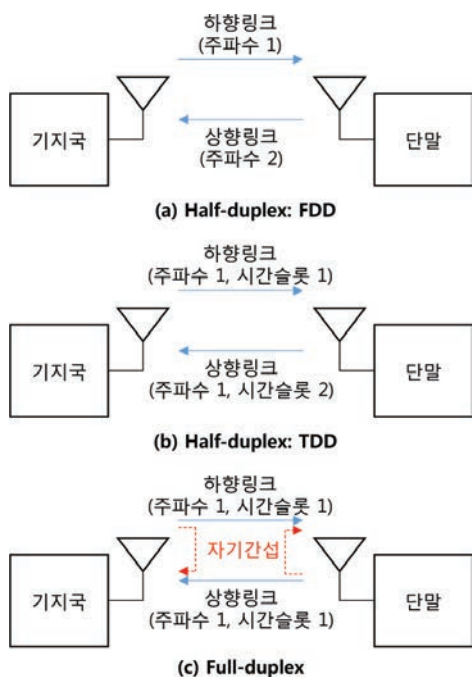


윤지훈
서울과학기술대학교
전기정보공학과

간섭을 일정 수준 이하로 제거할 수 있는 기술이 필수적이다.

자기간섭 제거에 대한 연구는 2010년대에 들어 상당한 진전을 보이기 시작해,^[2] 현재까지 60dB에서 최대 110dB에 이르는 자기간섭 제거 이득(gain)을 갖는 기법들이 발표되었다. 이러한 진전은 아날로그(RF) 도메인과 디지털 도메인 각각에서 자기간섭을 제거하는 동작을 복합적으로 수행함으로써 가능하였다. 각 도메인에서의 제거 기법 및 이들의 조합에 따라 최종 제거 이득이 달라진다.

본 고에서는 FD 통신을 이동통신 시스템에 적용 시 해결되어야 할 문제와 새롭게 고려되어야 할 사항들을 무선자원 관리 관점에서 살펴본다. 본 고는 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. II장에서는 FD 통신을 위한 자기간섭 제거의 기본 개념과 현재까지 제안된 기법들을 알아본다. III장에서는 FD 통신을 이동통신시스템에 적용할 때 고려해야 할 사항을 정리하고, IV장에서는 새롭게 발생하는 간섭 시나리오를 설명한다. V장에서는 FD 통신이 적용된 이동통신망의 성능 결과를 제시한 후, VI장에서 결론을 맺는다.



〈그림 1〉 상하향 전송 듀플렉싱 방식 비교

II. Single-Channel Full-Duplex 통신

통신 노드가 같은 주파수에서 전송과 동시에 수신할 경우, 수신된 시그널 R 은 수신하고자 하는 데이터 시그널 S 와 자기 간섭 신호 I_{self} 의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = S + I_{self} \quad (1)$$

노드는 I_{self} 를 추정하여 이를 수신 시그널 R 에서 뺄으로써 시그널 S 를 획득할 수 있다. I_{self} 는 노드 자신이 전송한 시그널이 다시 수신되는 것이므로, 전송 전의 원본 시그널로부터 이를 추정할 수 있다. 하지만, 원본 시그널이 수신되기 전에 중간에 거치는 RF 컴포넌트, ADC 등에 의해 시그널의 변형이 생기므로 추정이 완벽하지 않을 수 있다. 이 경우, 추정된 시그널을 R 에서 빼더라도 S 이외에 노이즈가 남게 된다. 이 잔여 노이즈가 과도하면 S 를 성공적으로 디코딩할 수 없게 되고, 따라서 경우에 따라 HD 통신이 더 나은 성능을 보일 수 있다.

수신된 신호에서 자기간섭을 제거하기 위한 기법은 아날로그 도메인 기법과 디지털 도메인 기법으로 분류될 수 있다. 아날로그 도메인 기법은 아날로그 신호를 대상으로 간섭을 제거하고 디지털 도메인 기법은 디지털 신호를 대상으로 한다. 지금까지 발표된 아날로그 도메인 기법은 다음과 같다. J. I. Choi 등은 두 개의 전송 안테나 사이의 적절한 위치에 수신 안테나를 위치시켜 전송 시그널이 상쇄되도록 하는 기법을 제안하였다.^[2] 이를 통해 자기간섭이 제거된 시그널을 수신할 수 있다. MIMO 전송에서 안테나 배치 패턴에 대한 연구도 발표되었다.^[3] 자기 신호를 수신 신호에서 빼는 회로를 아날로그 단에서 구현하는 기법들도 제안되었다.^[4-6] 이 회로는 추가적으로 신호의 선형/비선형 왜곡을 감안하여 자기간섭 신호를 추정한다. 아날로그 도메인 기법의 적용 이후에도 자기간섭의 잔여 노이즈가 여전히 존재하게 된다. 디지털 도메인에서 자기간섭 제거를 추가적으로 수행함으로써 잔여 노이즈를 더 제거할 수 있음이 알려져 있다. 원본 시그널로부터 자기간섭

신호를 정확하게 추정하기 위해서는 중간에 신호가 어떻게 변형되는지를 알아야 한다. 이를 위해 파일럿 시그널을 전송해 두 버전의 상관관계를 분석할 수 있다.

양 도메인의 기법을 복합적으로 사용함으로써 최종적인 자기간섭 제거 이득을 얻게된다. 최근의 연구^[5]는 110dB의 자기간섭 제거 이득을 얻고 있다. 이는 약 20dBm 내외의 전송파워를 사용하는 무선랜 시스템에서 자기간섭 레벨을 일반 노이즈와 비슷한 -90dBm까지 줄일 수 있음을 의미한다.

Ⅲ. Full-Duplex 통신기반 이동통신망을 위한 무선자원 관리

이동통신 시스템에 FD 통신이 적용될 경우 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다.

1. 잔여 노이즈로 인한 성능 저하

자기간섭 제거가 불완전한 경우, 즉 자기간섭 제거 이득이 충분히 높지 않은 경우, 이로 인해 과도한 잔여 노이즈가 발생할 수 있다. 이러한 잔여 노이즈 문제는 상대적으로 높은 전송파워를 사용하는 이동통신 시스템에서 보다 심각하게 나타날 수 있다. 자기간섭 신호의 수신 세기와 관계없이 제거 이득이 일정한 경우를 가정하면 신호 세기가 커질수록 잔여 노이즈도 비례하여 커지게 된다. 이 경우, 낮은 전송파워가 사용되면 자기간섭을 충분히 작게 만들 수 있다. 하지만, 보다 높은 전송파워를 사용하는 피코/매크로셀 급에서는 자기간섭이 완전히 제거되지 못하고 상당한 정도의 잔여 노이즈가 남아 성능 저하를 일으킬 수 있다.

예를 들어, 낮은 전송파워를 사용하는 무선랜/무선 PAN 또는 펌토셀급의 시스템에서는 110dB의 자기간섭 제거 이득은 충분할 수 있지만, 전송파워가 40dBm으로 높아지면 잔여 노이즈가 -70dBm이 되므로 이는 여전히 높은 간섭으로 작용할 수 있다. 이러한 잔여 노이즈의 레벨에 따라, HD 통신 대비 FD 통신의 이득이 달라지고, 경우에 따라 기존 HD 통신이 수율 상 더 큰 이득을 가질 수도 있다.

뿐만 아니라, 기존 HD기반 이동통신망의 무선자원 관리는 하향링크와 상향링크를 분리하여 독립적으로 이루어지는 경우가 많지만, FD기반 이동통신망에서는 자기간섭 제거가 불완전할 경우 하향링크 전송의 잔여 노이즈가 상향링크 전송 성능에 영향을 미치고, 그 반대도 마찬가지이다. 따라서, 하향링크와 상향링크를 동시에 고려하여 통합적으로 무선자원을 관리하는 기법에 대한 연구가 필요하다.

2. FD 지원 단말과 미지원 단말의 혼재

현재까지 제안된 많은 기법들은 자기간섭 제거를 위해 수신신호에서 추정된 간섭 신호를 반복적으로 제거하는 동작을 수행함으로써 높은 프로세싱 파워를 요구한다. 아날로그 도메인 기법들은 소형화/집적화가 어려운 아날로그 RF 소자를 추가적으로 사용할 수 있다. 송수신 안테나의 배치를 이용한 방법도 소형화에 제약이 있을 수 있다. 이러한 이유로 사용자 단말에 적용될 수 있는 자기간섭 제거 기법에는 한계가 있을 수 있다. 이로 인해, 사용자 단말은 기지국 대비 낮은 FD 성능을 갖거나, HD 통신만을 지원할 수도 있다. 따라서, 망에 다양한 FD 능력을 갖는 사용자 단말들이 혼재되어 있을 수 있다. FD 이동통신시스템과 이를 위한 무선자원 관리 기법은 이러한 상황을 고려하여 설계되어야 한다.

Ⅳ. Full-Duplex 이동통신망의 간섭 시나리오

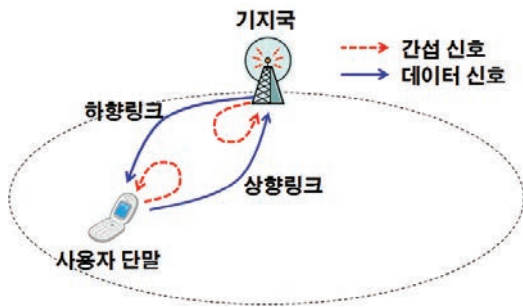
본 장에서는 FD기반 이동통신망에서 발생하게 되는 간섭 시나리오를 셀 내와 셀 간의 경우로 나누어 설명한다.

1. 셀 내 간섭

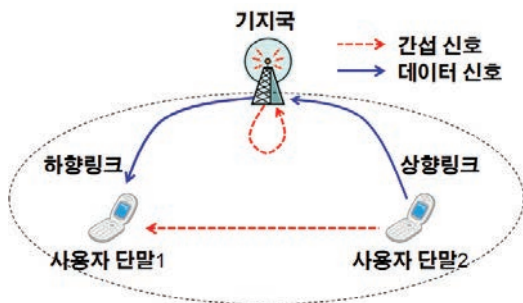
기존의 이동통신망에서 같은 셀에 연결된 사용자 단말들은 서로 다른 주파수, 시간 슬롯 등 직교하는(orthogonal) 무선자원을 사용하게 된다. 따라서, 이들 간의 간섭은 없다고 할 수 있다. 하지만, FD기반의 이동통신망에서는 셀 내에서도 사용자 단말 간에 간섭이

발생할 수 있다.

기지국과 하나의 사용자 단말 간에 FD 통신을 할 경우의 간섭 시나리오는 <그림 2>에 도시되어 있다. 사용자 단말이 연결된 기지국으로부터 하향링크 시그널을 수신할 때, 그와 동시에 동일 주파수에서 상향링크 시그널을 전송한다. 이 경우, 기지국과 사용자 단말 모두 자기간섭을 겪게 된다. 기지국과 두 개의 단말 간 각각 상향 및 하향 통신을 할 경우의 간섭 시나리오는 <그림 3>에 도시되어 있다. 이 경우, 기지국은 하향링크 신호를 전송하면서 상향링크 신호를 수신하므로 자기간섭을 겪게 된다. 반면, 사용자 단말 1은 하향링크 신호를 수신하기만 하고, 사용자 단말 2는 상향링크 신호를 전송하기만 하므로 두 단말 모두 자기간섭을 겪지 않는다. 하지만, 동일 주파수에서 사용자 단말 1의 수신과 사용자 단말 2의 전송이 이루어지므로 사용자 단말 2가 전송한 신호가 사용자 단말 1에게 간섭으로 작용한다. 두 단말이 서로 가까운 거리에 있을 경우 이 간섭은 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다.



<그림 2> 기지국과 하나의 사용자 단말 간 Full-duplex 통신 시 간섭 시나리오



<그림 3> 기지국과 두 개의 사용자 단말 간 각각 상향 및 하향 통신 시 간섭 시나리오

2. 셀 간 간섭

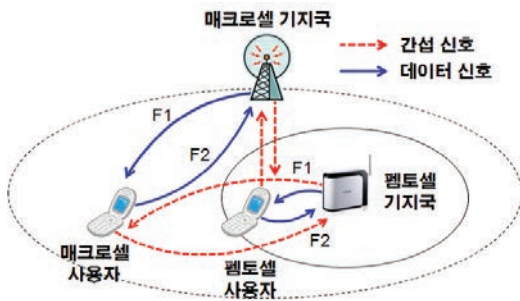
최근의 이동통신망은 다양한 종류의 셀(매크로셀, 피코셀, 펌토셀 등)이 서로 중첩되어 동작하는 이종망(Heterogeneous Network)의 형태로 구성되고, 미래에는 이러한 형태가 더욱 고도화될 것으로 예상된다.^[7] 이 종망에서는 주파수 자원의 공간적 재활용(spatial reuse)을 극대화하기 위해, 중첩된 셀들이 동일한 주파수를 사용할 수 있다. 하지만, 이 경우 셀 간 간섭 문제가 심각할 수 있고, 따라서 셀 간 간섭 코디네이션이 중요해진다.

기존 HD 기반의 이종망에서 발생하는 셀 간 간섭 시나리오는 <그림 4>에 도시되어 있다. 그림은 하향링크 전송은 주파수 F1을, 상향링크 전송은 주파수 F2를 사용하는 FDD 시스템을 예로 들고 있다. 이 경우, 하향링크와 상향링크는 서로 다른 주파수를 사용하므로 이들 간의 간섭은 발생하지 않는다. 구체적인 간섭 시나리오는 다음과 같다(그림에서 시나리오 ㉔와 ㉕는 도시되지 않음).

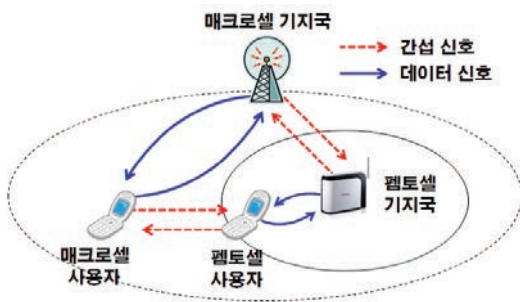
- ㉔ 펌토셀 기지국 → 매크로셀 사용자 단말 간섭(매크로셀 하향링크)
- ㉕ 매크로셀 기지국 → 펌토셀 사용자 단말 간섭(펌토셀 하향링크)
- ㉖ 펌토셀 기지국 → 인접 펌토셀 사용자 단말 간섭(펌토셀 하향링크)
- ㉗ 펌토셀 사용자 단말 → 매크로셀 기지국 간섭(매크로셀 상향링크)
- ㉘ 매크로셀 사용자 단말 → 펌토셀 기지국 간섭(펌토셀 상향링크)
- ㉙ 펌토셀 사용자 단말 → 인접 펌토셀 기지국 간섭(펌토셀 상향링크)

FD기반의 이종망에서는 위의 기존 시나리오에 추가적으로 상하향링크 전송 간의 간섭이 새롭게 발생한다. 이로 인한 신규 간섭 시나리오는 아래와 같고 이는 <그림 5>에 도시되어 있다(그림에서 시나리오 ㉚는 도시되지 않음).

- ㉚ 매크로셀 기지국 ↔ 펌토셀 기지국 간 간섭(매크



〈그림 4〉 Half-duplex기반 이종망에서 셀 간 간섭 시나리오



〈그림 5〉 Full-duplex기반 이종망의 추가적인 셀 간 간섭 시나리오

로셀/펌토셀 상향링크)

- ② 펌토셀 기지국 ↔ 인접 펌토셀 기지국 간 간섭(펌토셀 상향링크)
- ③ 매크로셀 단말 ↔ 펌토셀 사용자 단말 간 간섭(매크로셀/펌토셀 하향링크)
- ④ 펌토셀 사용자 단말 ↔ 인접 펌토셀 사용자 단말 간 간섭(펌토셀 하향링크)

기존 HD기반 이종망의 간섭 문제를 해결하기 위해 셀 간 코디네이션에 대한 많은 연구가 최근까지 진행되어 왔다.^[8-9] 하지만, FD기반 이종망에서는 통신 노드 간의 간섭 관계가 더 복잡해지고, 따라서 이들 간의 간섭을 코디네이션하는 것이 어려워진다. 뿐만 아니라, 기존의 간섭 코디네이션 기법은 대부분 하향링크와 상향링크를 분리하여 독립적으로 적용되도록 설계된 반면, FD기반 이종망에서는 인접셀 간 상하향링크가 서로 영향을 주기 때문에 상하향링크를 통합적으로 고려하는 새로운 간섭 코디네이션 기법의 연구가 필요하다.

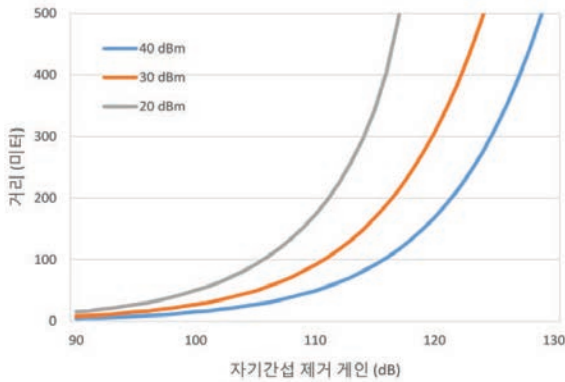
V. 성능 결과

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 FD 통신의 기본적인 성능 경향을 제시한다. 이를 위해 세 가지의 시뮬레이션 시나리오를 고려한다. 먼저, HD 통신 대비 FD 통신이 이득을 갖는 통신 범위를 분석한다. 그리고, 매크로셀에 복수 개의 사용자 단말이 연결되어 있을 때의 성능을 평가한 후, 동일 주파수를 사용하는 펌토셀이 중첩되어 설치되어 있을 때의 성능을 평가한다.

시뮬레이션을 위한 공통된 환경 설정은 다음과 같다. 단일 섹터의 매크로셀에 사용자 단말이 위치한다. 경로 감쇄 모델은 3GPP 시나리오^[10]를 따른다. 동작 주파수는 2GHz, 시스템 대역폭은 20MHz를 가정한다. 기본적으로 매크로셀 기지국은 40dBm의 전송파워를, 펌토셀 기지국과 사용자 단말은 23dBm의 전송파워를 사용한다. 수율 산출을 위해서 Shannon 채널 용량 모델을 사용한다.

1. FD 통신 이득 범위 분석

여기에서 FD 통신 이득 범위는 HD 통신 시의 채널 용량과 비교하여 FD 통신의 용량(상향+하향)이 더 커지는 통신 거리로 정의한다. 기지국과 단일 사용자 단말 간에 FD 통신을 수행하는 경우를 고려한다. HD 통신에서는 시스템 대역폭이 하향링크 전송을 위해 사용되었다고 가정한다. 〈그림 6〉은 이러한 경우의 FD 통신 범위를 보이고 있다. 자기간섭 제거 이득이 커질수록 FD 통신이 더 이득인 영역이 커진다. 이 영역을 벗어나면 FD 대비 HD 통신이 더 이득을 갖게 된다. 이는 거리가 멀어질수록 신호 감쇄가 커져 자기간섭 제거 대비 수신하고자 하는 신호의 세기가 작아지기 때문이다. 기지국이 40dBm의 전송파워를 사용할 경우 110dB의 자기간섭 제거 이득으로는 FD가 이득인 범위가 불과 49미터까지이다. 이득이 130dB로 커지는 경우 FD가 이득인 범위는 500미터보다 커져 대부분의 매크로셀 영역에서 FD를 이용하는 것이 더 이득이 된다. 기지국의 전송파워가 줄어들수록 이러한 영역은 더 늘어나게 된다. 자기간섭 제거 이득이 110dB인 경



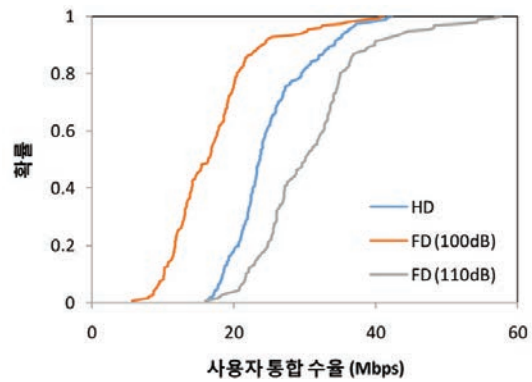
〈그림 6〉 자기간섭 제거 이득에 따른 FD 통신 이득 범위

우, 기지국의 전송파워가 30dBm으로 줄면 이득 거리가 86%, 20dBm으로 줄면 251% 늘어나게 된다. 이는 기지국이 사용자 단말의 상향링크 전송을 수신할 때 겪는 자기간섭의 세기가 줄어들기 때문이다.

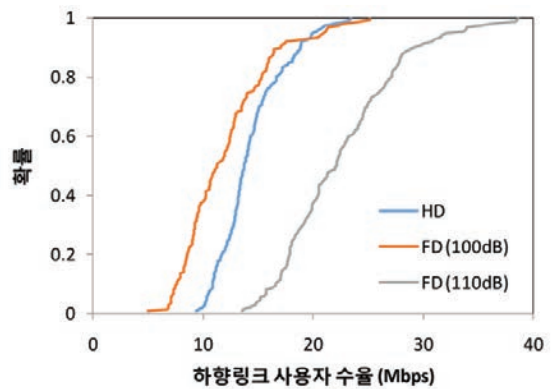
2. 복수 사용자 단말 연결 시 성능 분석

복수 개의 사용자 단말이 매크로셀에 연결되어 있는 경우의 성능을 평가하기 위해 다음과 같은 환경을 추가적으로 고려한다. 매크로셀의 반경은 200미터이고 그 안에 30개의 사용자 단말이 랜덤한 위치에 존재한다. HD 적용 시에는 하향링크 전송과 상향링크 전송을 위해 각각 20MHz의 대역폭을 사용한다. FD의 경우에는 총 40MHz의 대역폭이 사용된다. OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)가 사용되고, 각 서브밴드는 0.2MHz의 대역폭을 갖는다. 전송파워는 각 서브밴드에 균등하게 나누어지도록 사용한다고 가정한다. 트래픽 생성은 Full-buffer 케이스를 가정하고, 스케줄링은 Proportional fairness 방식을 따른다. 채널 페이딩 모델은 Rayleigh 모델을 가정한다.

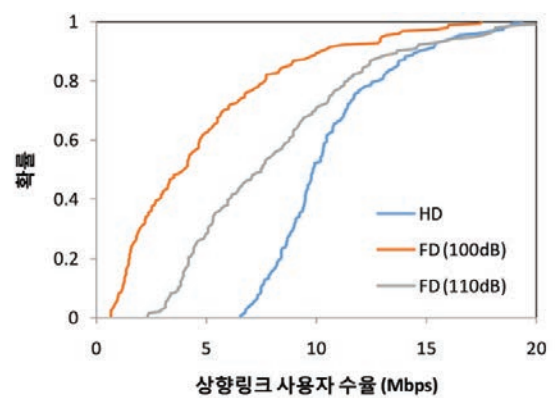
〈그림 7〉은 HD와 FD의 사용자 총 수율을 비교하고 있다. 사용자 총 수율은 사용자의 상하향링크 수율을 더한 값이다. 자기간섭 제거 이득이 100dB인 경우, 대부분의 사용자는 HD 대비 더 낮은 수율 성능을 갖는다. 이득이 110dB으로 높아지면 모든 사용자가 평균 81%의 수율 향상을 얻는다. 이는 HD 대비 평균 23% 더 높은 것이다. 〈그림 8〉과 〈그림 9〉는 HD와 FD 방



〈그림 7〉 HD와 FD의 사용자 수율 비교



〈그림 8〉 HD와 FD의 하향링크 사용자 수율 비교



〈그림 9〉 HD와 FD의 상향링크 사용자 수율 비교

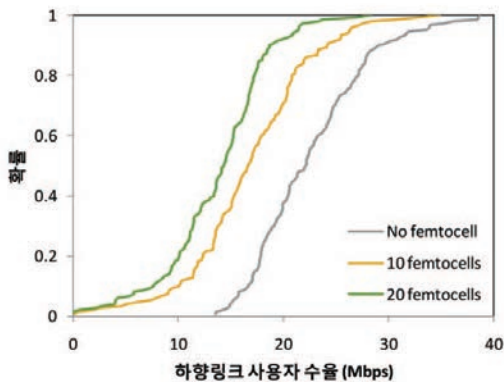
식의 하향링크 사용자 수율과 상향링크 사용자 수율의 cdf를 각각 보이고 있다. 하향링크 수율의 분포는 총 수율과 유사한 경향을 보인다. 하지만, 상향링크의 경우 110dB 이득에서도 여전히 HD보다 낮은 성능을 보이는데, 이는 상향링크 전송이 하향링크 전송 대비 더 낮은 전송파워를 사용하여 상대적으로 더 높은 자기간

섭을 겪기 때문이다.

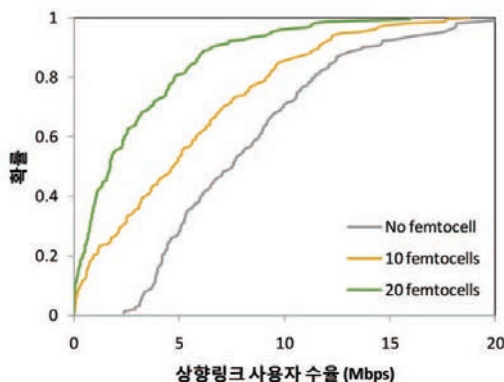
3. 펌토셀 공존 시 성능 분석

매크로셀과 동일한 주파수를 사용하는 펌토셀이 추가된 상황을 고려하기 위해 다음과 같은 환경 설정을 추가적으로 적용한다. 펌토셀 기지국은 매크로셀 내에 랜덤하게 위치된다. 각 펌토셀은 30미터의 반경을 갖고 반경 내에 하나의 연결 단말이 위치한다. 펌토셀은 매크로셀과 동일한 OFDMA 동작 및 스케줄링 기법을 사용한다.

<그림 10>과 <그림 11>은 설치된 펌토셀 숫자에 따른 매크로셀 사용자의 하향링크 수율과 상향링크 수율의 분포 변화를 각각 보이고 있다. 설치된 펌토셀 숫자가 늘어날수록 상하향링크 모두 큰 폭의 수율 하락을 보인다. 펌토셀이 없는 경우와 대비하여 10개의 펌토



<그림 10> 펌토셀 설치에 따른 매크로셀 사용자의 하향링크 수율 분포



<그림 11> 펌토셀 설치에 따른 매크로셀 사용자의 상향링크 수율 분포

셀이 설치되었을 때, 평균적으로 하향링크는 26%, 상향링크는 34%의 하락을 겪는다. 20개의 펌토셀이 설치되었을 때는 하향링크는 39%, 상향링크는 65%의 매우 큰 하락을 겪는다. 이러한 수율 하락은 모든 매크로셀 사용자가 겪는다. 특히 하위 5% 사용자의 수율 하락은 더욱 심각한 것을 볼 수 있다.

VI. 결론

중요한 미래 통신기술로 주목을 받고 있는 FD 통신이 이동통신망에 적용되기 위해 해결되어야 할 이슈들을 알아보고, FD 통신의 성능과 다른 요소들과의 영향 관계를 알아보았다. FD 기반 이동통신망이 실현되기 위해서는 보다 높은 이득을 갖는 자기간섭 제거 기법의 연구가 계속되어야 한다. 이와 동시에 자기간섭 제거 성능에 따른 잔여 노이즈를 고려하고 상하향링크를 통합적으로 관리하는 무선자원 관리 기법이 요구된다. 또, FD 이종망의 복잡한 셀 간 간섭 상황을 해결할 수 있는 새로운 간섭 코디네이션 기법의 연구도 필요하다.

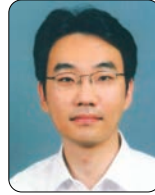
참고 문헌

- [1] A. Goldsmith, Wireless Communications. Cambridge University Press, 2005.
- [2] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," in Proc. of ACM MobiCom, 2010.
- [3] E. Aryafar, M. A. Khojastepour, K. Sundaresan, S. Rangarajan, and M. Chiang, "MIDU: enabling MIMO full duplex," in Proc. of ACM MobiCom, 2012.
- [4] M. Jain, J. I. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplex wireless," in Proc. of ACM MobiCom, 2011.
- [5] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," in Proc. of ACM SIGCOMM, 2013.
- [6] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Experiment-driven characterization of full-duplex wireless



systems,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 11, no. 12, pp. 4296–4307, 2011.

- [7] A. Ghosh, N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, B. Mondal, M. Cudak, 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 Communications Magazine, Vol. 50, no. 6, pp. 54–64, 2012.
- [8] Ji-Hoon Yun and Kang G. Shin, “Adaptive Interference Management of OFDMA Femtocells for Co-Channel Deployment,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 29, no. 6, pp. 1225–1241, June 2011.
- [9] Ji-Hoon Yun and Kang G. Shin, “ARCHoN: Adaptive Range Control of Hotzone Cells in Heterogeneous Cellular Networks,” in Proc. of IEEE SECON’12, Seoul, Korea, June 2012.
- [10] Further advancements for E-UTRA physical layer aspects, 3GPP Technical Report 36.814, Rev. 9.0.0, Mar. 2010.



윤 지 훈

- 2000년 서울대학교 전기공학부 학사
- 2002년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
- 2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2007년~2009년 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원
- 2009년~2010년 미시건대학교 박사후연구원
- 2010년~2012년 금오공과대학교 조교수
- 2012년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 조교수

〈관심분야〉

무선랜, 이동통신망, 펌토셀