



Full Duplex System

I. 서론

최근 통신 환경의 흐름을 보면 다양한 하이엔드급 스마트기기가 증가하여 모바일 데이터 사용량이 급증하고 있다. 5세대 무선 통신의 핵심적인 목표 중 하나는 모바일 트래픽 폭증을 효과적으로 처리하는 것이다. 이러한 5세대 무선 통신을 위한 다양한 기술들이 연구되고 있으며, 전이중 통신 기술(full-duplex; FD)이 그 중 하나이다. 두 노드가 서로 데이터를 전송하는 양방향 통신에서는 반이중 통신 기술(half-duplex; HD)과 같이 시간과 주파수를 분리하여 양방향 전송 시 간섭이 발생하지 않는 기법을 사용했다.

하지만 서로 직교하도록 시간이나 주파수 자원을 분할할 경우 주파수 효율이 감소하게 된다. FD 기술은 동일한 주파수를 사

FD 기술은 동일한 주파수를 사용하여 송신과 수신을 같은 시간에 수행하여 기존의 HD 기술에 비해서 시스템의 주파수 효율을 향상시킬 수 있는 기술이다.

용하여 송신과 수신을 같은 시간에 수행하여 기존의 HD 기술에 비해서 시스템의 주파수 효율을 향상시킬 수 있는 기술이다. FD 기술을 사용하여 얻을 수 있는 장점들을 정리해보면 다음과 같다^[1].

- 시간과 주파수 자원을 분할하지 않고 사용하는 FD 기술은 HD 기술과 비교하여 이론적으로 2배의 capacity를 얻을 수 있다.
- 각종 피드백 신호를 수신과 동시에 데이터를 전송한다면 피드백 지연을 줄일 수 있다.
- FD 기술이 적용된 릴레이 노드는 송신과 수신을 동시에 수행하여 릴레이 시스템의 전체 지연 시간을 단축할 수 있다.
- 두 노드가 동시에 신호를 전송하여 신호가 섞여있는 상황은 도청을 어렵게 만들어 네트워크의 보안을 향상시킬 수 있다.



이 해 순
연세대학교 전기전자공학부



김 동 규
LG 전자



홍 대 식
연세대학교 전기전자공학부

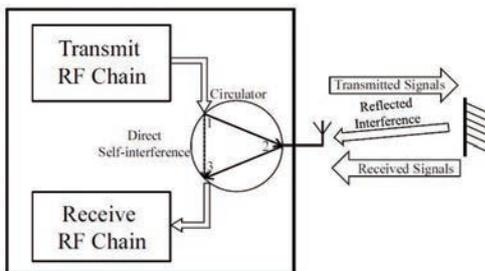
- 상향 링크와 하향 링크에 하나의 주파수 자원만 할당할 경우 주파수를 나누어 사용하는 HD 방식에 비해서 주파수 자원을 유연하게 할당할 수 있다.

이와 같은 다양한 장점들이 있지만 FD 기술로 발생하는 자기 간섭의 영향 때문에 아직까지 널리 사용되지 못하고 있다^[2]. 다른 노드에서 전송되는 데이터 신호에 비해서 같은 노드에서 전송되는 자기 간섭 신호는 전파되는 거리가 훨씬 짧아 신호의 세기가 더 강하다. 상황에 따라서는 데이터 신호에 비해서 90dB 이상 강한 자기 간섭 신호가 발생하게 되고 이 간섭을 줄여주지 못할 경우 통신이 불가능할 정도로 심각한 신호 대비 간섭 비율(SIR)의 손해가 발생하게 된다. 최근 자기 간섭을 제거하기 위한 많은 연구들이 진행되어 실제 회로의 구현을 통한 가시적인 성과를 얻고 있어 FD 기술의 구현이 점점 가까워지고 있다.

본 논문에서는 FD 기술의 연구 분야들을 차례대로 소개한다. 2장에서는 FD 기술 구조에 대해서 알아보고, 3장, 4장, 5장에서는 각각 양방향 통신, 릴레이, 셀룰러 환경에서의 FD 기술을 설명하며, 6장에서는 자기 간섭 제거에 대해서 소개한다. 마지막으로 7장에서 결론 및 연구 방향으로 끝을 맺는다.

II. FD 기술의 회로 구조

FD 기술의 사용을 위해서 각 노드는 송신과 수신을 동시에 수행할 수 있는 무선 주파수(RF) 회로가 필요하다. 이를 위해서 안테나를 공유하는 방식과 안테나를 나누어 사용하는 방식의 회로 구조가 각각 <그림 1>과 <그림 2>의 형태로 제안되었다^[2].



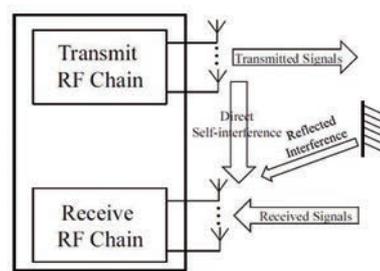
<그림 1> 안테나 공유 구조

<그림 1>은 circulator 회로를 사용하는 안테나 공유 구조를 보여주고 있다. Circulator 회로는 3개의 포트간의 신호가 한 방향으로만 흐르게 된다. 이를 통하여 1번 포트에서 들어오는 송신 신호를 안테나로 보내고 안테나에서 들어오는 수신 신호를 3번 포트에 보낼 수 있어 동일 주파수를 활용하여 동시에 송신과 수신을 수행할 수 있게 된다. 이론적으로는 1번 포트의 신호가 3번 포트에 흐를 수 없지만 실제 회로에서는 이러한 신호의 누수가 발생하여 자기 간섭으로 작용하게 된다.

<그림 2>는 물리적으로 각기 다른 안테나를 사용하여 송신 신호와 수신 신호를 분리하는 방식을 보여주고 있다. 각 노드가 2개 이상의 안테나를 장착하고 있는 경우에 안테나 분할 방식으로 FD 기술의 구현이 가능하다. 공유 안테나 구조와는 다르게 다중 안테나를 송신용과 수신용으로 나누어 사용한다. 이러한 방식은 다중 안테나의 공간 자원을 분할하여 사용한다는 접근으로 동일한 안테나 개수를 사용하는 HD 기술과 비교하여 안테나 간 상관성(correlation)이 심한 환경에서 성능 이득을 얻을 수 있다^[3].

III. FD 일대일 통신

일대일 통신은 두 노드가 서로 정보를 주고받는 통신 환경을 이야기한다. <그림 3>은 FD 기술이 적용된 일대일 통신을 나타내고 있다^[1]. 만약 HD 기술이 적용되었다면 각 링크에 시간 또는 주파수 자원을 분할하여 배분하여 통신을 하게 되고 이는 주파수 효율을 떨어뜨린다. 이에 비해서 FD 기술이 적용되면 두 노드가 동시에 단일 주파수를 사용하면서 서로의 정보를 교환할 수 있다.

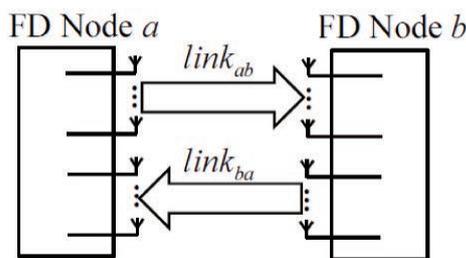


<그림 2> 안테나 분할 구조

양 노드에 N개의 안테나가 있다고 가정하고 FD 기술을 구현하기 위해서 공유 안테나 방식이 적용된 경우 $N \times N$ MIMO 채널이 동시에 2개 형성되는 효과를 얻을 수 있고 이론적으로 완벽하게 자기 간섭이 제거된 경우 2배의 주파수 효율을 얻을 수 있다^[4]. 하지만 공유 안테나 방식의 경우 N개의 안테나 각각에서 송신과 수신을 동시에 하여 N개의 자기 간섭 신호가 각 안테나 마다 발생하여 총 $N \times N$ 개의 자기 간섭 신호를 제거해야하는 어려움이 있다.

반면, 분할 안테나 방식은 각 $N/2$ 개의 안테나로 송신과 수신을 한다고 생각해보면 자기 간섭 신호가 1/4로 줄어들게 된다. 만약 안테나 사이의 상관성이 적어서 full-rank를 얻을 수 있는 환경이라면 HD 기술을 사용하는 경우 $N \times N$ MIMO 채널로부터 N개의 rank를 얻을 수 있고 분할 안테나 방식을 사용할 경우는 2개의 $(N/2) \times (N/2)$ MIMO 채널로부터 각각 $N/2$ 개의 rank를 얻을 수 있다. 따라서 이러한 상황에서는 FD 기술과 HD 기술 모두 N개의 rank를 얻을 수 있어서 성능이 비슷하게 나타난다. 하지만 안테나 사이의 상관성이 커서 MIMO 채널로부터 얻을 수 있는

rank가 1인 환경을 생각한다면 HD 기술의 경우 1개의 rank만 얻을 수 있는 반면에 분할 안테나를 사용하는 FD 기술의 경우 2개의 링크가 각각 1개의 rank를 얻어서 총 2개의 rank를 사용할 수 있고 이를 통해서 약 2배의 성능을 얻을 수 있다^[3]. 이런 관점과는 다르게 다중 주파수 환경에서 FD 기술과 HD 기술의 성능을 비교하여 sum rate 측면에서 FD 기술의 성능이 우수한 것을 확인한 연구도 있었다^[5].



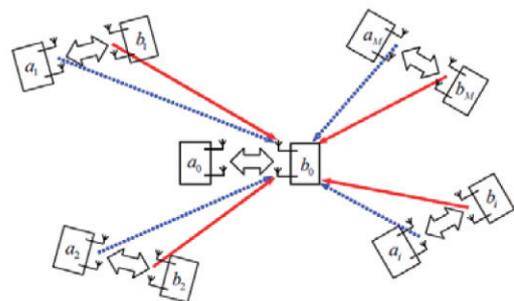
〈그림 3〉 FD 일대일 통신

한편, 주파수 효율을 향상시키기 위하여 FD 기술을 사용하면 FD 기술은 HD 기술에 비해서 낮은 신뢰도 성능을 갖는다. FD 기술을 적용하면 자기 간섭으로 인한 신호 대비 노이즈 및 간섭 비율(SINR)이 낮아져 링크의 신뢰도를 손해 보게 된다. 또한 안테나를 분할해서 사용할 경우 사용하는 안테나 수에 비례하여 얻을 수 있는 diversity 효과도 적게 얻게 되어 신뢰도의 감소가 발생한다. 하지만 시간과 주파수 자원을 모두 사용하면서 얻는 효과로 인하여 FD 기술은 symbol duration을 짧게 사용할 수 있어서 HD 기술에 비해 같은 시간에 2배 더 많은 symbol을 반복해서 전송하여 신뢰도를 올리는 방법을 사용할 수 있다. 재전송으로 얻을 수 있는 효과를 극대화하기 위해서 $(N-1)$ 개의 안테나와 1개의 안테나로 수신과 송신 안테나를 나누고 재전송시 서로 다른 안테나

를 선택해서 신호를 보내게 되면 $2(N-1)$ 의 diversity 효과를 얻을 수 있어 N의 diversity 효과를 갖는 HD 기술에 비해서 더 좋은 신뢰도를 얻을 수 있다^[6]. 결론적으로 FD 기술을 사용하면 절반의 시간으로 줄어든 symbol duration을 이용할

수 있고 새로운 정보를 더 보낸다면 주파수 효율을, 동일한 정보를 반복해서 보낸다면 신뢰도를 높일 수 있다.

지금까지 일대일 통신을 하는 한쌍의 노드들에 대한 성능을 이야기했다. 이렇게 일대일 통신을 하는 쌍들이 다수가 공존하고 있는 ad-hoc 네트워크에도 FD 기술을 적용하려는 연구들이 진행되고 있다. 〈그림 4〉와 같이 ad-hoc 네트워크는 중앙 제어를 받지 않는 다수의 일대일 통



〈그림 4〉 FD 기술을 사용하는 ad-hoc 네트워크^[7]



신 노드들이 쌍을 이루고 통신 중인 노드는 다른 모든 노드들로부터 간섭을 받는 환경이다. 이때 FD 기술을 사용하게 되면 자기 간섭과 사용자 간 간섭이 발생하여 성능을 하락시킨다. 본 장에서는 사용자간 간섭의 영향을 확인하기 위해서 자기 간섭은 완전히 제거했다고 가정한다.

비록 HD 기술에 비해서 발생하는 사용자 간 간섭이 2배로 증가하지만 beamforming 기술을 사용하는 FD 기술을 적용한 경우의 성능이 achievable sum rate^[7]와 transmission capacity^[8] 관점에서 2배 빠르게 증가하는 것을 확인하였다. 특히 노드의 밀도가 낮은 환경에서 FD 기술이 HD 기술에 비해 좋은 성능을 보였다. 하지만 노드의 밀도가 높은 환경에서는 사용자 간 간섭이 2배로 증가하는 단점에 의해서 FD 기술의 성능이 떨어지게 되고 이를 보완하기 위해서 automatic repeat request (ARQ)를 사용하는 기법이 제안되었다^[9].

이러한 재전송 기법을 통해서 높은 사용자 밀도 환경에서도 FD 기술을 사용하는 경우의 성능이 HD 기술을 사용하는 것보다 향상되는 결과를 확인하였다.

지금까지 정리한 FD 기술의 이론적인 성능을 기반으로 향후 연구 분야를 예측해보면 다음과 같다. 다중 안테나 환경을 접목하는 경우 대부분의 연구들이 분할 안테나를 기준으로 하였지만 향후 기술 발전이 뒷받침 된다면 공유 안테나 형태의 다중 안테나 구현이 가능해지면서 더 좋은 성능을 얻을 수 있을 것으로 보인다. 따라서 공유 안테나를 기준으로 하는 FD 다중 안테나 환경에 대한 이론적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

IV. FD 릴레이 통신

릴레이 환경은 기본적으로 source, relay, destination의 3가지 종류의 노드로 구성된다. <그림 5>와 같이 source 노드는 destination 노드로 전송할 데이터를 갖고 있으며 relay 노드는 source로부터 수신한 데이터를 destination으로 다시 전송해주는 역할을 하게 된다.

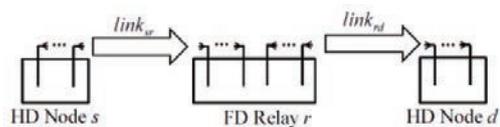
HD 기술을 사용하는 릴레이의 경우 source로부터 정

보를 받아서 destination으로 정보를 보내는 각 링크에서 서로 다른 시간이나 주파수를 할당하여 동작하게 된다. 반면 FD 기술로 동작하는 릴레이의 경우 두 링크를 동시에 같은 주파수로 사용하게 된다. 이론적으로 릴레이 노드에서 자기 간섭이 완전히 제거된다고 가정하면 FD 기술을 사용하는 릴레이 시스템은 HD 기술을 사용할 때에 비해서 end-to-end capacity가 2배 향상된다^[10]. 이론적으로 자기 간섭이 없다는 가정을 하고 성능을 고려했지만 실제 환경에서는 자기 간섭이 남게 되어 FD 기술의 성능이 감소하게 된다. 결국 릴레이 시스템에서는 FD 기술의 자기 간섭으로 인한 성능 하락과 HD 기술의 주파수 효율 손해 중에서 상황에 따라 판단하여 사용 기술을 선택할 수 있다^[11-12].

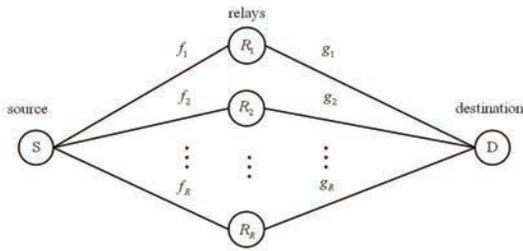
FD 기술을 쓰는 경우 자기 간섭의 세기가 성능에 중요한 영향을 주기 때문에 relay 노드의 전송 파워를 약하게 조절하여 자기 간섭을 줄여주는 방법이 연구되었다. 하지만 자기 간섭이 줄어드는 장점과 destination으로 수신되는 데이터 신호가 약해진다는 단점이 동시에 발생한다. 따라서 전체 성능 관점에서 적절하게 전송 파워를 조절하여 최대한 자기 간섭은 줄여주면서 수신단에서의 성능을 보장할 수 있는 파워 조절 기법이 필요하다^[13].

일반적으로 다중 안테나를 사용하면 채널의 페이딩 효과를 상쇄시킬 수 있지만 가격이나 크기, 파워 소모 같은 문제로 인하여 실제로 사용이 어려운 경우도 있다. 또한 안테나 사이의 상관성이 높을 경우 다중 안테나의 diversity 이득을 최대한 얻을 수 없다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 <그림 6>과 같은 다수의 릴레이들이 서로 협력하여 동작하는 다중 릴레이 방식이 사용된다. 다중 릴레이가 사용되면 다중 안테나를 사용하는 하나의 릴

결국 릴레이 시스템에서는 FD 기술의 자기 간섭으로 인한 성능 하락과 HD 기술의 주파수 효율 손해 중에서 상황에 따라 판단하여 사용 기술을 선택할 수 있다.



<그림 5> FD 릴레이 시스템^[1]



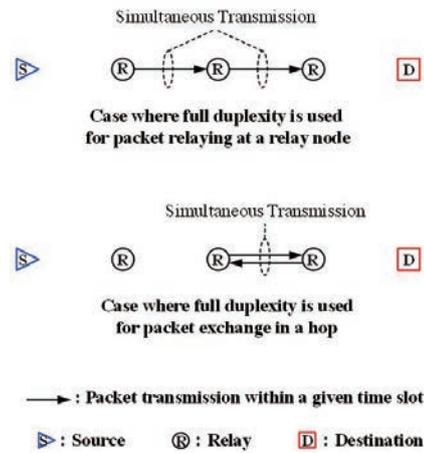
〈그림 6〉 다중 릴레이 시스템^[14]

레이에 비해서 FD 기술로 발생하는 자기 간섭의 제거가 상대적으로 쉬워서 현실적인 구현측면에서도 이득을 볼 수 있다.

다수의 릴레이들이 동시에 동작 시 문제가 될 수 있는 부분은 신호들이 겹치는 상황이다. 일반적으로 HD 기술에서는 자원을 직교하도록 분할하여 신호가 겹치는 것을 피하지만 FD 기술은 자원을 겹쳐서 사용하기 때문에 같은 방법을 적용할 수 없다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 space-time coding(STC)을 적용하여 간섭을 제어하고 공간적인 diversity를 최대로 얻을 수 있다^[14-16]. 또한 릴레이들이 지리적으로 넓게 분포할 경우 각각의 릴레이가 전송하는 신호들이 서로 다른 지연 시간이 지난 뒤 수신되게 된다. 이때 수신된 신호들은 동기가 어긋난 상태로 destination에 도착한다. 이러한 비동기 상황을 극복할 수 있는 비동기 보상 기법을 적용하여 diversity를 얻는 연구가 진행되었다^[17]. 이외는 다른 방식으로 릴레이 간 간섭들을 간섭 정렬 기법을 통해서 제어하는 연구도 발표되었다^[18]. 한편 연계하는 릴레이의 수가 많아지면 릴레이 노드들 사이의 연계를 위한 정보 공유에 많은 자원이 낭비된다. 정보 공유를 최소화하기 위해서 복잡도와 채널 정보를 최대한 줄여서 공유하는 방식이 연구되었다^[19].

다수의 릴레이를 운용하는 방법은 모든 릴레이가 동시에 동작하는 방식 외에도 여러 릴레이 중 적절한 릴레이를 선택적으로 사용하는 방법도 존재한다. HD 환경에서는 릴레이를 선택하는 방법으로 selection diversity를 얻을 수 있는데 FD 기술을 적용할 경우 자기 간섭의 영향으로 selection diversity가 감소하게 된다^[20].

지금까지는 다수의 릴레이가 source로부터 정보를 받아서 destination으로 정보를 전송하는 방식을 정리했다. 다수의 릴레이를 이용하는 다른 형태의 방법은 source로



〈그림 7〉 FD 기술이 적용된 다중 홉 릴레이 시스템^[21]

부터 정보를 받은 relay가 다른 relay에게 정보를 전달하는 방식으로 relay들 사이에서 정보를 순차적으로 전달하여 최종적으로 destination에 정보를 전달하는 다중 홉 릴레이 방식이 존재한다. 다중 홉 방식은 source와 destination 사이의 거리가 멀어서 하나의 relay로는 정보 전달을 할 수 없는 경우에 사용된다. 기존의 HD 기술을 사용하는 다중 홉 릴레이의 경우에는 각 홉에서 자원을 겹치지 않도록 사용하기 때문에 지연 시간이 증가하고 패킷 전달의 효율성이 떨어지는 단점이 있었다.

다중 홉 환경에서 FD 기술은 〈그림 7〉과 같이 2가지 방식으로 사용할 수 있다. 첫 번째 방식은 데이터를 받아서 전달하는 릴레이 과정에 FD 기술을 적용하는 방법이다. 두 번째 방식은 source와 destination에서 서로 교환할 정보가 있는 경우에 릴레이 사이에서 데이터를 교환하는 형태로 한 홉씩 진행하는 방법이 있다. 이렇게 FD 기술이 적용되면 HD 기술에 비해서 전체 시스템의 전송 지연이 절반으로 줄어들고 throughput이 향상되는 효과를 얻을 수 있다^[21]. FD 기술을 사용하는 다중 홉 시스템은 HD 기술이 적용되는 경우와는 전송 파워나 릴레이간 거리 관점에서 성능이 최적화되는 값이 바뀌게 된다. 이런 관점에서 FD 기술로 동작하는 다중 홉 릴레이 간의 거리와 전송 파워를 최적화 시키는 알고리즘이 연구되었다^[22-23].

이러한 결과들을 기반으로 향후 진행될 연구 과제들은 다음과 같이 정리할 수 있다. 릴레이 환경에서 성능을 얻

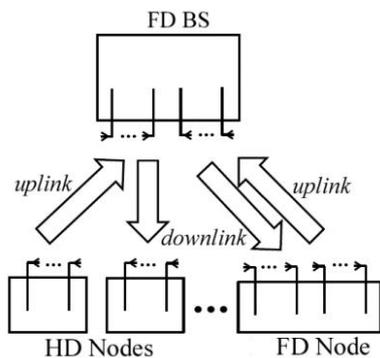
기 위해서는 MAC 프로토콜을 정립하는 것이 중요하다. 특히 다수의 릴레이가 협력하거나 다중 홉 환경의 경우 여러 릴레이들이 어떻게 동작할 것인가에 대한 약속이 필수적이다. 또한 릴레이 기술을 통해서 소형 셀의 무선 백홀을 구현할 때에도 FD 기술이 적용될 수 있을 것으로 보인다. 마지막으로 비어있는 주파수 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 인지 무선 통신 기술과 FD 기술을 함께 적용하는 연구^[24]도 깊게 진행될 것으로 보인다.

V. 셀룰러 환경의 FD 기술

셀룰러 환경은 기지국(base station)과 다수의 사용자 단말(mobile station)로 구성된다. <그림 8>과 같이 셀룰러 환경에서는 사용자 단말이 기지국으로 데이터를 전송하는 상향 링크와 기지국이 사용자 단말로 데이터를 전송하는 하향 링크의 2가지 링크가 존재한다. HD 기술로 동작하는 셀룰러 네트워크의 경우 상향 링크와 하향 링크에 시분할 방식이나 주파수 분할 방식을 적용하여 시간이나 주파수가 겹치지 않게 할당 된다.

그러나 FD 기술이 적용될 경우에는 동일 주파수 자원으로 단말과 기지국이 동시에 송수신을 진행하거나 2개의 단말을 선택하여 한 단말은 상향 링크를 사용하고 다른 단말은 하향 링크를 사용할 수 있게 된다.

기본적으로 셀룰러 환경에서 FD 기술을 평가하기 위해서 FD 기술을 사용하는 기지국과 2개의 HD 기술을 사용



<그림 8> FD 방식의 셀룰러 네트워크^[1]

이를 통해서 작은 전송 파워를 사용할 수 있는 소형 셀 환경의 경우 FD 기술을 사용하기 적합하다는 결론을 도출할 수 있다.

하는 단말이 있는 시스템을 고려할 수 있다. 이 상황에서 2가지 간섭이 발생하게 되는데 기지국에서 발생하는 자기 간섭과 하향 링크를 수신하고 있는 단말에 인접 단말의 상향 링크 신호가 들어오면서 발생하는 사용자 간 간섭이 그것이다. 자기 간섭의 경우 송신단과 수신단이 같은 노드에 있어서 간섭에 대한 정보를 기반으로 제거 기법을 적용할 수 있는 반면에 사용자 간 간섭의 경우는 일반적인 환경에서 간섭에 대한 정보가 없어서 제거하기 어렵다는 차이점이 있다. 자기 간섭의 경우 셀룰러 네트워크에서는 많은 사용자들이 기지국에 연결되어 있는데 여기서 서로 다른 방향에 있는 두 사용자를 선택할 수 있고 기지국에서 지향성 안테나를 사용해서 자기 간섭을 줄여 줄 수 있다^[25]. 기지국에서 안테나를 사용하여 자기 간섭을 줄여주는 경우 반경 100m 내에서는 FD 기술을 사용할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 최근 많은 관심을 받고 있는 소형 셀에서 FD 기술이 적용될 수 있다는 점을 보여주고 있다. 한편 사용자 간 간섭을 제거하는 방법으로 wireless side channel을 사용하여 정보를 전송하고 가우시안 코드북을 사용하여 사용자 간 간섭을 제거하는 기법이 연구됐다^[26].

실제 셀룰러 환경에서는 사용자 단말이 2명 이상 존재하게 되는데 예를 들면 소형 셀에서는 최대 16명의 사용자를 고려한다^[27]. 만약 기지국에서 다중 안테나를 사용한다면 더 많은 단말을 동시에 지원할 수 있다. 이를 위해서는 precoder 디자인, 링크별 안테나 할당 기술, 사용자 간 간섭 같은 문제들이 고려되어야 한다.

이런 문제들을 반영해서 자기 간섭과 사용자 간 간섭을 동시에 제어하여 시스템의 성능을 최대화 할 수 있는 연구들이 진행되었다. 구체적으로 minimum mean square error, zero-forcing, iteratively design 등이 사용되어 간섭을 줄일 수 있었고 HD 기술을 사용하는 다중 사용자 기법보다 향상된 성능을 얻었다^[28-29].

또한 다중 사용자를 지원하기 위해서 다중 안테나를 사용하는 기지국의 경우 송신과 수신에 안테나를 배분하는 기법이 필요하다. 연구 결과에 의하면 자기 간섭의 평균

적인 세기는 전송 안테나의 개수와 관계가 없이 항상 일정한 수치를 기록했다^[30]. 기지국의 전송 안테나 수를 증가시키면 더욱 정교한 precoder를 사용할 수 있고 사용자 단말이 수신하는 하향 링크의 성능을 향상시킬 수 있다. 현실적으로 상향 링크와 하향 링크의 데이터 트래픽은 비대칭적인 형태로 발생한다는 점과, 상향 링크 성능 향상을 위해서 전송에 많은 안테나를 할당할 경우 하향 링크의 성능이 감소하고 반대의 경우는 상향 링크의 성능이 감소한다는 상호 관계를 모두 고려하는 형태로 해결책을 설계할 때 의미 있는 기법을 도출할 수 있을 것으로 생각된다. 이런 관점에서 전체 시스템의 throughput 성능이 최대가 되는 상향 링크와 하향 링크 안테나 분배 기법이 연구 되었고 자기 간섭이 적은 환경에서는 FD 기술을 적용할 때 HD 기술을 적용한 경우보다 우수한 성능을 얻을 수 있었다^[31]. 이를 통해서 작은 전송 파워를 사용할 수 있는 소형 셀 환경의 경우 FD 기술을 사용하기 적합하다는 결론을 도출할 수 있다.

한편 다수의 사용자 단말이 동시에 FD 기술로 동작하는 경우에는 사용자 간 간섭이 심하게 발생하여 전체 시스템의 성능을 감소시킨다. 사용자 간 간섭 문제를 해결하기 위해서 사용자 간 간섭이 심하게 발생하는 것을 피하는 형태의 스케줄링 기법이 사용될 수 있다^[32]. 이 연구에서는 사용자 간 간섭의 영향을 반영한 성능 분석을 위해서 stochastic geometry 방식의 다중 셀 분석 모델을 통해서 매크로 셀과 소형 셀이 공존하는 이기종 셀룰러 네트워크의 성능을 분석하였다. 이 연구의 결과로부터 상향 링크는 하향 링크에 비해서 사용자 간 간섭으로 인한 영향에 더 민감하다는 점을 확인하였다.

지금까지 우리는 FD 기술이 적용된 소형 셀에 관하여 다루었지만 매크로 셀의 경우는 기지국과 단말기 사이의 거리가 더 멀기 때문에 FD 기술을 사용하기 힘들다. 따라서 매크로 셀에서는 FD 기술이 릴레이 형태로 사용될 것으로 예상할 수 있다. 다중 사용자 다중 안테나 시스템

에서 많이 쓰이는 block diagonalization 기법은 안테나 간 간섭이나 스트림 간 간섭을 제거할 수 있다. 이러한 block diagonalization 기법을 확장하여 FD 릴레이가 사용되는 셀룰러 환경에 적용한 연구가 있다. 이 연구에서는 block diagonalization 기반 precoder를 사용하여 자기 간섭과 다중 사용자 지원을 동시에 수행하고 있다^[33]. 더 나아가서는 zero-forcing 기법을 적용하여 FD 릴레이의 자기 간섭과 다중 사용자를 지원하는 기법도 제안되었다^[34]. 이러한 연구 결과들은 beamforming을 통해서 자기 간섭과 다중 사용자 간섭을 동시에 제어하여 다수의 사용자가 공존하는 환경에서도 FD 기술이 이득을 얻는다는 것을 보여줬다.

이러한 FD 셀룰러 시스템에 대한 결과들을 기초로 진행될 연구 분야는 다음과 같다. 소형 셀이나 Wi-Fi에 비해서 매크로 기지국의 경우 출력이 훨씬 강하다. 따라서 더 좋은 성능의 자기 간섭 제거 기술이 필요하게 된다. 지금 활발하게 연구되고 있는 massive MIMO 기술과의 접목도 예상해 볼 수 있다. 안테나의 수가 많아지면 공간 자원을 활용한 자기 간섭 제거 기술을 더욱 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 마지막으로 사용자 간 간섭을 제어할 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 스케

줄링 기법이나 자원 할당 기법을 통하여 FD 사용자 사이의 간섭을 효과적으로 줄일 수 있는 연구가 필요하다.

단말 내 송수신 안테나 사이의 거리가 두 단말 사이의 거리보다 훨씬 더 가깝기 때문에 자기 간섭은 데이터 신호보다 매우 큰 파워를 갖고, 이 때 두 신호의 크기 차이는 ADC에서 구별할 수 있는 dynamic range보다 데이터 신호의 크기가 더 작아지는 현상이 발생하여 큰 문제가 된다.

VI. 자기 간섭 제거 기법

필연적으로 FD 기술을 사용하여 송신과 수신을 함께 할 경우 송신

신호가 해당 단말의 수신단에 자기 간섭으로 작용하는 문제점이 생긴다. Wi-Fi 시스템을 예로 들면 최대 110dB 까지 자기 간섭의 크기를 줄여줘야 FD 기술의 이득을 이론적인 수준에 가깝게 얻을 수 있다^[2]. 여기서 발생하는 자기 간섭이 기존의 다른 간섭과 다르게 쉽게 제어되지 않는 근본적인 원인은 수신 단말이 송신 단말로부터 받은 데이터 신호를 quantization noise로 인식하여 analog-



to-digital converter (ADC)에서 올바른 신호를 복구하기 어렵게 만들기 때문이다^[1]. 단말 내 송수신 안테나 사이의 거리가 두 단말 사이의 거리보다 훨씬 더 가깝기 때문에 자기 간섭은 데이터 신호보다 매우 큰 파워를 갖고, 이 때 두 신호의 크기 차이로 인해 ADC에서 구별할 수 있는 dynamic range보다 데이터 신호의 크기가 더 작아지는 현상이 발생하여 큰 문제가 된다. 이러한 상황에서는 수신단에서 데이터 신호의 처리가 불가능하기 때문에 FD 기술의 사용을 위해서는 충분한 성능의 자기 간섭 제거 기술이 필수적으로 요구된다. 지금까지 연구된 자기 간섭 제거 기술은 크게 3가지 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째 단계에서 안테나 기술을 활용하여 자기 간섭을 줄여주게 되고 다음으로 아날로그 회로를 적용하는 기법이 적용된 뒤 남은 자기 간섭을 제거하기 위해서 디지털 기법이 사용된다.

안테나 자기 간섭 제거 기법은 자기 간섭 채널의 pathloss가 최대가 되도록 하는 것과 line of sight 성분을 줄여주는 것을 목적으로 한다. 따라서 성능은 안테나 간의 거리, 안테나의 방향성, 안테나가 장착되는 기기의 특성에 따라서 달라진다. 이러한 안테나 기법이 중요한 이유는 ADC 이전 단계에서 자기 간섭의 크기를 줄여주는 역할을 수행하기 때문이다. 송신 안테나와 수신 안테나의 위치를 다양하게 배치하는 방법으로 가장 자기 간섭 제거 성능이 좋은 배치를 찾을 수 있다^[35]. 만약 사용자 단말이 아닌 통신 기반 시설에 적용되는 경우는 더 넓은 공간을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 사용자 단말에서는 사용하기 힘든 전파 흡수제, 극성 안테나, 지향성 안테나 같은 기술을 적용 시킬 수 있어 더 큰 성능을 얻을 수 있다^[25]. 통신 주파수의 반 파장 거리에 하나의 송신 안테나를 더 위치 시켜 2개의 송신 안테나의 신호가 서로의 신호를 상쇄시키는 방법도 연구되어 있다^[36].

아날로그 간섭 제거 기법은 아날로그 회로를 통해서 ADC 이전에 자기 간섭 신호를 최대한 작게 줄여주는 것을 목표로 한다. 주로 안테나 기법 이후에 남아있는 자기 간섭을 추정하고 그 것을 빼주는 형태로 구현된다. 실제로 아날로그 제거 기법을 구현하는 연구들은 크게 두가지 형태로 구분할 수 있다. 첫 번째는 송신 신호를 기반으로

balanced/unbalanced (Balun)회로를 이용하거나^[37] 병렬 회로에 각각 가변 딜레이와 감쇠기를 이용하여^[38] 자기 간섭 신호와 최대한 동일한 신호를 생성하여 빼주는 방식이다. 두 번째는 신호의 크기와 딜레이를 디지털 영역에서 적용한 뒤 아날로그 영역으로 변환하여 자기 간섭을 제거하는 방식이다^[35]. 일반적으로 신호의 감쇠와 딜레이를 만드는 것은 아날로그보다 디지털 과정으로 구현하는 것이 더 쉽다. 이런 아날로그 기법들은 수신 회로로 들어오는 자기 간섭을 추정하고 그것을 만드는 과정에서의 정확도에 따라서 성능이 결정된다.

마지막으로 디지털 간섭 제거 기법은 ADC 회로를 거친 뒤 남은 자기 간섭을 제거한다. 기본적으로 디지털 영역에서 남은 자기 간섭을 추정하고 이것을 수신 신호에서 빼는 형태로 동작한다^[35]. 또 다른 형태로는 minimum mean square error, zero-forcing, null space projection같은 다중 안테나 기술을 활용하는 방식도 다양하게 연구되어 있다^[39-41].

다양한 기술들을 통해서 자기 간섭 신호를 최대 110dB 까지 줄여준 결과가 있으며^[38] 이러한 결과를 통해서 자기 간섭 문제는 향후 충분히 해결 가능할 것으로 예측해볼 수 있다.

Ⅶ. 결론

우리는 다양한 환경에서 FD 기술이 적용되었을 때 어떤 효과를 얻을 수 있는지 살펴보았다. 이런 결과들을 통해서 이론적으로 FD 기술을 사용할 때 achievable sum rate, network capacity, system reliability 같은 다양한 성능 이득을 얻을 수 있다는 점을 확인할 수 있었다. 이러한 점들을 토대로 FD 기술의 특성들이 향후 통신 기술에 어떤 식으로 적용될 수 있는지에 대하여 논의하였다. 최근 연구들 중에서는 이론적인 연구를 넘어서 실제 회로를 구현하여 FD 기술의 성능을 검증하여 HD 기술보다 좋은 성능을 확인하였다. 물론 아직까지 FD 기술이 상용화되기까지는 해결해야할 문제들이 남아있다. 지속적인 연구를 통해서 문제들을 해결한다면 FD 기술이 미래 통신 환경에서 큰 잠재력을 갖게 될 것이다.

참고 문헌

- [1] D. Kim, H. Lee, D. Hong, "A Survey of In-band Full-duplex Transmission: From the Perspective of PHY and MAC Layers," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1
- [2] DUPLO Deliverable D1.1, "System Scenarios and Technical Requirements for Full-Duplex Concept," [Online] Available: <http://www.fp7-duplo.eu/index.php/deliverables>.
- [3] H. Ju, X. Shang, H. V. Poor, and D. Hong, "Bi-directional use of spatial resources and effects of spatial correlation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 10, pp. 3368-3379, 2011.
- [4] H. Ju, X. Shang, H. V. Poor, and D. Hong, "Rate improvement of beamforming systems via bi-directional use of spatial resources," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1-5, 2011.
- [5] S. Kam, D. Kim, H. Lee, D. Hong, "Bidirectional Full-Duplex Systems in a Multispectrum Environment," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.64, no.8, pp.3812-3817, Aug. 2015
- [6] D. Kim, H. Ju, S. Kim, H. Lee, and D. Hong, "Transmit antenna switched receive diversity for bi-directional beamforming in twoway communications," in *Proc. 47th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 19-23, 2013.
- [7] H. Ju, D. Kim, H. V. Poor, and D. Hong, "Bi-directional beamforming and its capacity scaling in pairwise two-way communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 1, pp. 346-357, 2012.
- [8] D. Kim, H. Ju, and D. Hong, "Transmission capacity of bi-directional beamforming in ad-hoc networks," in *Proc. 27th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, 2012.
- [9] M. Dianati, X. Ling, K. Naik, and X. Shen, "A node-cooperative ARQ scheme for wireless ad hoc networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 3, pp. 1032-1044, 2006.
- [10] H. Ju, E. Oh, and D. Hong, "Catching resource-devouring worms in next-generation wireless relay systems: Two-way relay and full-duplex relay," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 9, pp. 58-65, 2009.
- [11] T. Kwon, S. Lim, S. Choi, D. Hong, "Optimal Duplex Mode for DF Relay in Terms of the Outage Probability," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.59, no.7, pp.3628-3634, Sept. 2010
- [12] T. Kwon, Y. Kim, D. Hong, "Comparison of FDR and HDR Under Adaptive Modulation With Finite-Length Queues," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.61, no.2, pp.838-843, Feb. 2012
- [13] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, "Hybrid full-duplex/halfduplex relaying with transmit power adaptation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 9, pp. 3074-3085, 2011.
- [14] H. Jiang, X. Xing, and S. Du, "Distributed optimal cyclostatic spacetime coding for full-duplex cooperative relay networks," in *Proc. 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 1504-1508, 2013.
- [15] Y. Liu, X.-G. Xia, and H. Zhang, "Distributed space-time coding for full-duplex asynchronous cooperative communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 7, pp. 2680-2688, 2012.
- [16] H. Ju, E. Oh, D. Hong, "Improving efficiency of resource usage in two-hop full duplex relay systems based on resource sharing and interference cancellation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.8, pp.3933-3938, Aug. 2009.
- [17] J. Han, J. Baek, S. Jeon, and J. Seo, "Full-duplex multiple relays: A high data rate cooperative communications over rayleigh fading channels," in *Proc. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, pp. 1-5, 2013.
- [18] H. Maier and R. Mathar, "Cyclic interference neutralization on the $2 \times 2 \times 2$ full-duplex two-way relay-interference channel," in *Proc. IEEE Information Theory Workshop*, pp. 1-5, 2013.
- [19] V. Stankovic and P. Spalevic, "Cooperative relaying with block DFT processing and full-duplex relays," *Electron. Lett.*,



- vol. 49, no. 4, pp. 300–302, 2013.
- [20] X. Rui, J. Hou, and L. Zhou, “On the performance of full-duplex relaying with relay selection,” *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 25, pp. 1674–1676, 2010.
- [21] H. Ju, S. Lim, D. Kim, H. V. Poor, and D. Hong, “Full duplexity in beamforming-based multi-hop relay networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 8, pp. 1554–1565, 2012.
- [22] P. T. Hiep and R. Kohno, “Capacity bound for full-duplex multiple-hop MIMO relays system in rayleigh fading,” in *Proc. Wireless Telecommunications Symposium*, pp. 1–6, 2012.
- [23] B. Mahboobi and M. Ardebilipour, “Joint power allocation and routing in full-duplex relay network: An outage probability approach,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 8, pp. 1497–1500, 2013.
- [24] H. Kim, S. Lim, H. Wang, D. Hong, “Optimal Power Allocation and Outage Analysis for Cognitive Full Duplex Relay Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 10, pp. 3754–3765, Oct. 2012.
- [25] E. Evan, A. Sahai, and A. Sabharwal, “Passive Self-Interference Suppression for Full-Duplex Infrastructure Nodes,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 680–694, 2014.
- [26] J. Bai and A. Sabharwal, “Decode-and-cancel for interference cancellation in a three-node full-duplex network,” in *Proc. 46th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 1285–1289, 2012.
- [27] Small cell forum, [Online] Available: <http://www.smallcellforum.org/>.
- [28] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, “Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 461–471, 2004.
- [29] D. Nguyen, L.-N. Tran, P. Pirinen, and M. Latva-aho, “Precoding for full duplex multiuser MIMO systems: Spectral and energy efficiency maximization,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 16, pp. 4038–4050, 2013.
- [30] B. Yin, M. Wu, C. Studer, J. R. Cavallaro, and J. Lilleberg, “Full-duplex in large-scale wireless systems,” in *Proc. 48th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, 2013.
- [31] D. Nguyen, L.-N. Tran, P. Pirinen, and M. Latva-aho, “Transmission strategies for full duplex multiuser MIMO systems,” in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp. 6825–6829, 2012.
- [32] S. Goyal, P. Liu, S. Hua, and S. Panwar, “Analyzing a full-duplex cellular system,” in *Proc. 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, pp. 1–6, 2013.
- [33] C. Lee, J. Lee, Y. Kwak, Y. Kim, and S. Kim, “The realization of full duplex relay and sum rate analysis in multiuser MIMO relay channel,” in *Proc. IEEE 72nd Vehicular Technology Conference*, pp. 1–5, 2010.
- [34] J. Lee and O. Shin, “Full-duplex relay based on block diagonalisation in multiple-input multiple-output relay systems,” *IET Commun.*, vol. 4, no. 15, pp. 1817–1826, 2010.
- [35] M. Duarte, A. Sabharwal, V. Aggarwal, R. Jana, K. K. Ramakrishnan, C. Rice and N. K. Shankaranarayanan, “Design and Characterization of a Full-duplex Multi-antenna System for WiFi networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 3, pp. 1160–1177, 2014.
- [36] J. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, “Achieving single channel, full duplex wireless communication,” *MobiCom’10*, pages 1–12, New York, NY, USA, 2010.
- [37] M. Jain, J. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, “Practical, real-time, full duplex wireless,” in *Proc. 17th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 30–312, 2011.
- [38] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, “Full duplex radios,” in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 1–12, 2013.
- [39] D. Bliss, P. Parker, and A. Margetts, “Simultaneous transmission and reception for improved wireless network performance,” in *Proc. IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing*, pp. 478–482, 2007.
- [40] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, “Spatial loop

interference suppression in full-duplex MIMO relays,” in Proc. 43rd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, pp. 1508–1512, 2009.

- [41] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, “Residual self-interference in full-duplex MIMO relays after null-space projection and cancellation,” in Proc. Conference Record of the 45th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, pp. 653–657, 2010.



이 해 순

- 2012년 2월 연세대학교 전기전자공학 학사
- 2012년 3월 연세대학교 전기전자공학 박사과정

〈관심분야〉
전이중통신, 5G, 무선통신



김 동 규

- 2006년 2월 건국대학교 공학사 (전자공학)
- 2008년 2월 연세대학교 공학석사 (전자공학)
- 2013년 8월 연세대학교 공학박사 (전자공학)
- 2013년 9월~2014년 8월 연세대학교 BK21 BEST사업단 박사후연구원
- 2014년 8월~현재 LG전자 선임연구원

〈관심분야〉
무선통신, 신호처리, 5G



홍 대 식

- 1983년 2월 연세대학교 공학사 (전자공학)
- 1985년 2월 연세대학교 공학석사 (전자공학)
- 1990년 8월 Purdue University 공학박사 (전자공학)
- 1991년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
- 2006년~2011년 IEEE Transaction on Wireless Communications Editor
- 2006년~2011년 Journal of Communication and Networks 편집위원
- 2013년~2015년 국가과학기술심의회 정책조정전문위원회 위원
- 2010년~현재 대한전자공학회 부회장
- 2010년~2011년 국가과학기술 운영위원회 위원
- 2010년~2012년 연세대학교 연구처/산학협력단 연구처장/산학협력단장
- 2011년~현재 IEEE Wireless Communications Letters Editor

〈관심분야〉
무선통신, 신호처리, 5G