

# 사용자 릴레이를 이용한 협력 통신

류종열, 최 완  
한국과학기술원

## 요약

사용자 릴레이는 시스템 내의 사용자들이 협력을 통해 다른 사용자들에게 부가적인 정보를 제공함으로써 보다 안정적이고 효율적으로 정보를 전달 전달하는 기법이다. 사용자 릴레이를 이용한 협력통신은 기존의 협력통신이 갖는 여러 가지 제약조건들을 극복하고, 전송 효율을 향상시키기 위한 기술로 제시되었다. 본고에서는 사용자 릴레이를 이용한 협력통신 기법에 대한 전반적인 내용을 조망하고, 주요 기술 이슈들에 대해 알아본다. 또한 다양한 시스템에서의 사용자 릴레이 기법에 대한 활용과 현재까지의 주요 연구 동향에 대해 소개한다.

## I. 서론

무선통신 환경에서 통신 품질은 채널 페이딩(fading)과 간섭(interference)에 의해 크게 저하된다. 이와 같은 페이딩과 간섭의 영향을 줄이고 안정적인 통신 품질을 제공하기 위한 기술로 협력통신이 연구되어 왔다. 협력통신은 여러 노드(node)들 사이의 협력전송을 통해 특정 노드의 채널이 열악한 경우에도 안정적으로 정보를 전송할 수 있는 기술이다. 또한 협력통신을 통해 통신의 안정성뿐만 아니라 경제적으로 통신 커버리지(coverage)를 확대할 수 있고, 향상된 주파수 사용 효율(spectral efficiency)과 정보 전송 효율(data rate)을 제공한다. 이는 장점으로 인해 활발한 연구가 진행되고 있다.

기존의 협력통신은 크게 고정 릴레이(fixed relay) 또는 비사용자 릴레이를 이용한 협력통신과 기지국간의 협력 통신으로 분류할 수 있다. 고정 또는 비사용자 릴레이를 이용한 협력통신은 송신단의 신호가 잘 도달하지 않는 음영지역이나 셀 경계 지역에 릴레이 노드를 설치해서 송신단의 신호를 릴레이 노드를 통해 중계해주는 신호 전송방식이다. 송신단의 정보를 효과적으로 전송하는 기법으로 릴레이가 송신단의 신호를 증폭한 후 전송하는 amplify-and-forward (AF) 기법, 릴레이가 송

신단의 정보를 복원한 후 중계하는 decode-and-forward(DF) 기법 그리고 릴레이가 송신단으로부터의 신호를 받은 후 압축 전송하는 compress-and-forward(CF) 기법 등 다양한 릴레이 기법들이 제안되었고 [1][2], 제안된 릴레이 기법으로 달성 가능한 이론적인 성능의 bound 들이 연구되었다 [3]-[5].

기지국간의 협력통신은 다수의 기지국들이 서로 연결된 백홀 링크(backhaul link)를 통해 전송 정보나 채널 정보 등을 교환하여, 정보를 협력 전송하는 기법이다. 기지국간에 교환된 정보를 이용해 사용자들의 수신 신호의 세기를 강하게 해주거나, 간섭을 제거해주는 방식으로 성능을 향상시킬 수 있다. 특히 셀 경계에 위치한 사용자들은 인접 기지국으로부터의 간섭으로 인해 매우 큰 영향을 받기 때문에 기지국간의 협력 통신을 통해 성능을 크게 개선할 수 있다. 기지국간의 협력 통신은 전송 정보와 채널 정보를 모두 교환하여 협력 기지국들이 하나의 기지국처럼 동작하는 joint processing(JP) 기법 (또는 Coordinated Multicell Processing; CoMP) [6]과 기지국간의 채널/스케줄링(scheduling) 정보 교환을 통해 효과적으로 간섭을 줄여주는 cooperative beamforming/scheduling (CB/CS) 또는 intercell Interference Coordination; ICIC) 기법 [7]이 있다.

그러나 기존의 고정 릴레이 (또는 비사용자 릴레이)나 기지국을 이용한 협력통신은 여러 가지 제약 조건을 가진다. 먼저 고정 릴레이나 기지국은 이동성(mobility)에 제약을 가지기 때문에 사용자의 채널 환경에 맞도록 효과적으로 정보를 전달하는데 한계를 가진다. 이와 같은 이동성의 제약 때문에 고정 릴레이나 기지국 협력통신으로 얻을 수 있는 통신 커버리지에는 한계가 존재한다. 또한 고정 릴레이를 설치하는데 추가로 소모되는 비용이나, 기지국간의 협력에 소모되는 정보의 시간 지연(time delay) 등의 여러 가지 제약조건들이 존재한다. 이와 같은 기존 협력 통신 기법의 제약조건을 극복하기 위한 대안으로 제시된 기법이 사용자 릴레이를 통한 협력통신 기법이다. 사용자 릴레이를 이용한 통신은 이동성의 제약이 적고, 추가적인 설치 비용이 없고, 전달하고자 하는 정보의 시간 지연에 대한 제약 조건 등을 극복할 수 있다. 또한 사용자 릴레이를 이용한 통

신에서는 근접성(proximity) 특성으로 인한 다양한 장점들이 존재한다. 사용자 릴레이 통신은 기본적으로 근접한 위치의 사용자들 간의 통신이기 때문에 기존의 통신 기법들과 비교하여 소모되는 전력과 시간을 크게 줄일 수 있다. 게다가 사용자들 간의 통신은 기지국과의 최소한 제어신호(control signal)의 교환만을 필요로 하기 때문에, 기지국의 부담을 크게 줄여줄 수 있다. 이와 같은 장점들로 인해 차세대 무선통신의 핵심 기술인 device-to-device(D2D) 통신의 대표적인 모델로 사용자 릴레이 통신이 주목 받고 있다. 본고에서는 최근 주목 받고 있는 사용자 릴레이를 이용한 협력통신 기법에 대한 전반적인 내용을 소개하고, 주요 연구 이슈와 다양한 시스템에서의 사용자 릴레이의 활용에 대해 알아본다.

## II. 사용자 릴레이 통신의 주요 기술 이슈



그림 1. 사용자 릴레이 협력통신

사용자 릴레이를 이용한 협력 통신은 기본적으로 송신단, 사용자 릴레이, 그리고 수신단으로 구성된다. <그림 1>은 하향링크(downlink) 셀룰러 환경에서의 사용자 릴레이 통신을 보여주는 그림이다. 먼저 기지국은 두 명의 사용자 모두에게 정보를 전송한다. 일반적으로 기지국과 가까이 위치하여 채널 상태가 상대적으로 좋은 사용자가 사용자 릴레이의 역할을 수행한다. 사용자 릴레이는 기지국으로부터 자신의 정보뿐만 아니라 수신 사용자의 정보의 전부 또는 일부를 함께 수신한다. 수신 신호에서 자신의 정보를 복원한 사용자 릴레이는 수신 사용자가 신호를 복원하는 데 도움이 되는 신호를 수신 사용자에게 전달해준다. 기지국으로부터 상대적으로 먼 곳에 위치하여 채널 환경이 좋지 않은 수신 사용자는 기지국으로부터 직접 받은 신호

와 사용자 릴레이를 통해 넘겨받은 신호를 이용해서 정보를 복원한다. 일반적으로 사용자 릴레이와 수신 사용자 사이의 채널 환경은 기지국과 수신 사용자 사이의 채널 환경보다 좋기 때문에, 수신 사용자는 사용자 릴레이를 통해 보다 질 좋은 신호를 수신하게 된다. 상향링크(uplink) 환경에서는 송신단이 송신 사용자, 수신단이 기지국이 되고, 송신 사용자는 사용자 릴레이를 통해 정보를 효과적으로 기지국으로 전송한다.

사용자 릴레이를 이용한 협력통신에서 주요 연구 이슈는 크게 두 가지로 분류될 수 있다. 첫 번째는 사용자 릴레이의 정보 전달에 대한 연구이다. 기존의 고정 릴레이를 이용한 협력 통신 환경에서 널리 사용하던 DF기법과 CF 기법 등이 사용자 릴레이 협력통신에 효과적으로 적용될 수 있다. 사용자 릴레이는 기지국으로부터 수신한 수신 사용자의 신호를 복원하여 복원된 정보를 수신 사용자에게 DF 릴레이 방식으로 전달해주거나 [8][9][13], 사용자 릴레이가 자신의 정보만을 복원하되 수신 사용자의 정보는 완벽하게 복원하지 않고 릴레이 채널 환경을 고려하여 압축하여 전송하는 CF 릴레이 방식으로 전달할 수도 있다 [15][17][18]. 또한 사용자 릴레이에서 보다 효과적으로 정보를 전달하기 위해 코딩(coding) 기법이 적용될 수 있다. 가장 간단한 방법으로 사용자 릴레이는 수신 사용자의 정보를 그대로 전달(repetition)할 수도 있고 [8][9], 주어진 채널 환경을 고려한 다소 복잡한 채널 코딩(channel coding)기법을 적용하여 채널 페이딩 환경에서 효과적으로 정보를 전달할 수 있다 [10]–[12].

사용자 릴레이 협력통신의 두 번째 이슈는 송신단의 전송 기법에 대한 연구이다. 기존 셀룰러 하향링크 통신 환경에서, 기지국은 각 사용자들이 자신의 정보만을 효과적으로 수신하도록 전송하는 것이 목적이었다면, 사용자 릴레이 협력 통신에서 기지국은 각 사용자에게 자신의 정보를 효과적으로 전송해야 할 뿐만 아니라, 사용자 릴레이에게 수신 사용자의 정보를 효과적으로 넘겨주어야 한다. 기지국에서 사용자 릴레이의 정보에 수신 사용자의 정보를 중첩코딩(superposition)을 통해 같이 실어 보낼 수 있다 [13]–[14]. 또한 dirty paper coding(DPC) 코딩을 통해 사용자 릴레이의 정보가 수신 사용자에게 간섭으로 미치지 않게 하여 정보 전달의 효율성을 높일 수도 있다 [16]. 다중 안테나 기지국을 이용한 협력 통신 환경에서는 기지국에서 빔형성(beamforming) 기법이나 프리코딩(precoding) 기법을 통해 보다 효과적으로 사용자 릴레이에 효율적인 형태로 사용자 릴레이와 수신 사용자에게 정보를 전송할 수 있다 [16].

### Ⅲ. 사용자 릴레이의 활용

사용자 릴레이를 이용한 협력통신은 여러 가지 시스템 환경에서 다양하게 활용될 수 있다. 본 장에서는 여러 가지 채널 환경에 대한 사용자 릴레이의 활용과 현재까지의 주요 연구 내용에 대해 알아본다.

#### 1. 다중 접속 채널(Multiple Access Channel, MAC)에서의 사용자 릴레이 활용

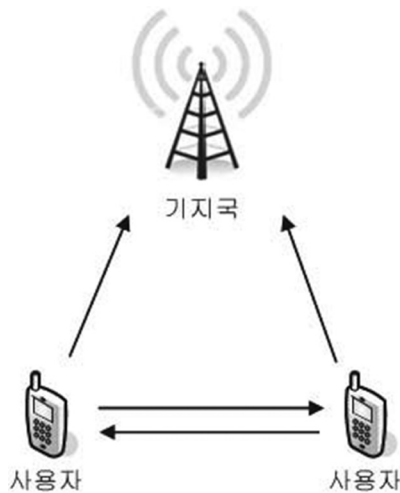


그림 2. MAC에서 사용자 릴레이 협력통신

MAC은 정보이론적 관점에서 <그림 2>와 같이 다수의 사용자가 하나의 기지국으로 정보를 전송하는 채널 환경을 의미한다. 기존의 MAC 환경에서는 기지국이 모든 사용자들의 신호를 동시에 수신하고, 동시 수신된 신호를 통해 각 사용자들의 정보를 복원한다. 따라서 특정 사용자의 채널 환경이 좋지 않은 경우에는 그 사용자는 다른 사용자들에 비해 상대적으로 낮은 정보 전송율을 나타낼 수 밖에 없다. 그러나 사용자 릴레이를 활용하면 상대적으로 채널 환경이 좋은 사용자가 그렇지 않은 사용자의 정보를 대신 기지국으로 전송해주는 방법으로 낮은 전송율을 향상시켜줄 수 있다.

MAC에서 사용자간의 협력을 통해 효과적으로 기지국으로 정보를 전달하는 기법은 참고문헌 [8]과 [9]에서 최초로 제안되었다. 참고문헌 [8]에서는 두 명의 사용자가 존재하는 MAC에서 사용자들은 서로간의 정보 교환을 통해 파트너(partner)의 정보를 대신 전달하는 기법을 제안하였다. 기존의 단일 안테나 MAC 환경에서는 다이버시티(diversity) 이득을 얻을 수 없

었는데, 제안된 사용자 협력 통신 기법에서는 각 사용자들의 정보가 두 개의 서로 다른 채널경로를 통해 전송되기 때문에, 단일 안테나 MAC 환경에서도 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 보였다. 또한 정보이론적 분석을 통해 제안된 사용자 협력 통신 기법이 기존의 MAC의 커버시티 영역(capacity region)을 넓히고, outage probability 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 참고문헌 [9]에서는 [8]에서 제안된 기법을 실제 시스템 관점에서 다루었다. 제안된 사용자 협력통신 기법을 통해 수신한 정보를 효과적으로 복원하기 위한 수신기 설계 기법들을 제안하였고, 또한 실제 CDMA 환경에 사용자 협력통신을 적용하여 성능의 향상을 보여주었다.

참고문헌 [10]과 [11]에서는 채널 코딩을 통해 보다 효과적으로 사용자간 협력 전송을 수행하는 기법을 제안하였다. 참고문헌 [8]에서는 사용자들이 파트너의 정보를 복원하여 그대로 기지국으로 재전송한 반면, 참고문헌 [10]에서 제안된 기법은 coded cooperation을 통해 서로 파트너의 정보의 다른 부분을 전송함으로써 다이버시티 이득을 극대화하였다. Coded cooperation 기법은 먼저 채널 코딩을 통해 각 사용자가 자신이 전송할 정보를 두 개의 부분으로 나누고, 각 사용자가 정보의 첫 번째 부분을 기지국으로 전송한다. 이 때, 각 사용자들은 자신의 정보를 송신하는 동시에 파트너의 정보를 수신한다. 수신된 파트너의 정보를 통해, 파트너의 정보의 첫 번째 부분을 복원해내고, 복원된 첫 번째 부분을 이용해 정보의 두 번째 부분을 스스로 생성해내고, 이를 기지국으로 대신 전송해주는 기법이다. 다양한 채널 코딩 기법을 통해 보내려는 정보를 두 부분으로 나눌 수 있는데, 참고문헌 [10]에서는 space time coding 기법과 turbo coding을 통한 coded cooperation 기법을 제안하였고, 참고문헌 [11]에서는 punctured convolutional coding을 통한 coded cooperation 기법을 제안한 후, 제안된 기법을 통한 비트 오류률(bit error rate, BER)의 향상을 보여주었다.

참고문헌 [12]에서는 앞선 연구들에서 다루지 않았던 사용자간의 채널 상태에 따른 사용자 협력통신의 성능을 분석하였다. 참고문헌 [12]는 사용자간의 채널 상태가 좋은 경우에는 앞선 연구들의 결과처럼 다이버시티 이득을 최대로 얻을 수 있지만, 사용자간의 채널이 좋지 않은 경우에는 다이버시티 이득은 얻을 수 없고, 오직 코딩을 통한 이득만을 얻을 수 있다는 것을 보였다. 또한 사용자간 채널 상태를 고려하여 다이버시티 이득과 코딩을 통한 이득을 적절히 얻을 수 있는 채널 코딩 기법을 제안했다.

## 2. 브로드캐스트 채널(Broadcast channel, BC) 에서의 사용자 릴레이 활용

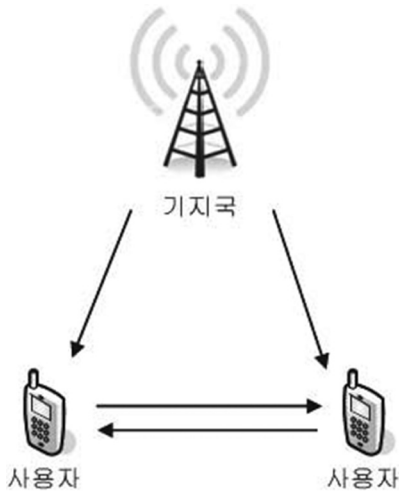


그림 3. BC에서 사용자 릴레이 협력통신

정보이론적 관점에서 BC는 기지국이 동시에 다수의 사용자들에게 각각의 정보를 전송하는 환경을 말한다 (그림 3). 기존의 BC에서 각 사용자들이 자신의 정보를 수신할 때 다른 사용자들의 정보는 간섭으로 작용하여 정보 수신 효율의 열화를 가져온다. 따라서 기지국은 각 사용자들의 정보 수신 효율을 증가시키기 위해 최대한 다른 사용자들의 정보가 간섭으로 작용하지 않도록 전송하는 것을 목표로 하였다. 그러나 BC에서 사용자 릴레이가 가능하다면, 기지국-사용자간 채널과 사용자-사용자간 채널 환경이 좋은 사용자가 자신의 원하는 정보량을 수신하기에 여유 있는 채널 환경을 활용하여 다른 사용자의 정보를 릴레이 해줌으로써, 오히려 사용자들의 정보 수신 효율을 향상시킬 수 있다. 따라서 이와 같은 사용자 릴레이 협력통신 환경에서는 기존 BC에서와 다르게, 기지국이 효과적으로 사용자 릴레이에게 자신의 정보와 수신 사용자의 정보를 전송하는 기법에 대한 연구가 중요하게 된다.

참고문헌 [13]과 [14]에서는 두 명의 사용자가 존재하는 BC에서 사용자 릴레이를 사용한 협력통신 기법을 제안하고 그에 따른 성능을 정보이론적 관점에서 분석했다. 참고문헌 [13]에서는 단일안테나 환경에서 기지국이 중첩코딩 기법을 이용해 사용자 릴레이와 수신 사용자에게 정보를 전송하고, 사용자 릴레이는 이를 복원하여 DF 릴레이 방식을 통해 수신 사용자에게 정보를 전달하는 기법을 제안하였다. 수신 사용자는 기지국으로부터 직접 수신한 신호와 사용자 릴레이를 통해 전달받은 신호

를 결합하여 수신 효율을 최대화하는 방법으로 정보를 복원한다. 정보이론적 관점의 분석을 통해 일반적인 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise) 채널에서 사용자 협력을 통해 달성할 수 있는 최대 용량 영역의 outer boundary를 유도하였고, AWGN 채널의 특이 채널형태인 특정 사용자의 채널 환경이 다른 사용자의 채널보다 항상 열악한 환경인 degraded AWGN 채널 환경에서 사용자 릴레이를 통해 달성 가능한 최대 용량 영역을 도출하고 제안된 기법을 통해 용량 영역이 달성 가능하다는 것을 증명하였다. 참고문헌 [14]에서는 참고문헌 [13]에서 제시된 기법을 보완하는 기법을 제안하여 참고문헌 [13]에서 제시된 결과보다 발전된 결과들을 제시하였다. 특히, 참고문헌 [14]에서는 참고문헌 [13]과 같은 환경에서 기지국이 중첩코딩과 binning 기법을 동시에 사용하여 정보를 전송하고, 사용자 릴레이는 부분적 DF (partial DF) 기법을 통해 수신 사용자의 정보를 전달한다. 참고문헌 [14]에서는 제안된 기법을 통해 참고문헌 [13]에서 유도한 결과보다 용량 영역에 근접한 outer boundary를 유도하였다.

보다 일반적인 BC에서의 사용자 릴레이 기법이 참고문헌 [15]에서 제안되었다. 참고문헌 [15]에서는 기지국이 두 명의 사용자에게 정보를 전송할 뿐만 아니라 사용자 간에도 정보를 교환하는 BC 환경을 고려하였다. 따라서 이 환경에서 사용자 릴레이는 수신 사용자에게 기지국의 정보를 전달할 뿐만 아니라 자신의 정보를 같이 실어서 전송한다. 사용자 릴레이가 DF 릴레이 기법과 CF 릴레이 기법을 사용하는 환경에서 기지국에서 효과적으로 정보를 전송하는 채널 코딩 기법을 제안했고, 제안된 기법을 통해 얻을 수 있는 전송률 영역 (achievable rate region) 을 유도했다.

앞선 참고문헌 [13]–[15]에서는 BC 환경에서 효과적인 전송 기법들을 제안하고 분석했지만, 단일안테나를 가진 환경을 고려하였다. 참고문헌 [16]에서는 다중안테나 BC에서 사용자 릴레이를 사용한 협력통신 기법을 제안하였다. 특히, 기존 문헌들에는 사용자 릴레이가 기지국으로부터 정보를 수신하는 동시에 정보를 전달할 수 있는 이상적인 전이중 (full duplex) 릴레이 기법을 고려한 반면 참고문헌 [16]에서는 보다 현실적인 시스템에 맞게 수신과 송신을 다른 자원을 사용해서 수행하는 반이중 (half duplex) 릴레이 기법을 고려하였다. 참고문헌 [16]에서는 기존 다중안테나 BC에서 최적의 기법인 DPC 기법에 거의 근접한 성능을 나타내는 것으로 알려진 zero-forcing DPC (ZF-DPC) 빔형성 기법과 비트 연결 (bit concatenation) 기법을 결합한 새로운 전송기법을 제안하였다. 기지국에서 ZF-DPC 빔형성 기법만을 이용해 정보를 전송하면 사용자간 상호 간섭이 사라지기 때문에 사용자 릴레이에게 수신 사용자의 정

보를 전달할 수 없게 된다. 따라서 기지국에서는 정보를 인코딩(encoding)할 때, 사용자 릴레이의 정보에 수신 사용자의 정보의 일부를 연결하는 비트연결 기법을 통해 정보를 인코딩하고 이를 사용자 릴레이에게 전송한다. 사용자 릴레이는 수신한 신호로부터 정보를 복원하고, 복원된 정보에서 수신 사용자의 해당하는 정보만을 추출하여 수신 사용자에게 전달한다. 최종적으로 수신 사용자는 기지국으로부터 수신한 정보와 사용자 릴레이를 통해 전달받은 정보를 결합하여 정보 수신 효율을 향상시키게 된다. 참고문헌 [16]에서는 제안된 사용자 릴레이 기법을 통해 기존 사용자 릴레이를 사용하지 않은 BC의 전송율 영역을 크게 향상시킬 수 있음을 수학적으로 보였고, 이러한 성능 향상은 사용자간의 채널 상태가 좋을수록 증가하는 것을 보였다. 또한 최적화 기법을 통해 유도된 전송율 영역의 boundary를 달성하는 효과적인 알고리즘(algorithm)을 제시하였다.

### 3. 간섭 채널 (Interference channel, IC) 에서의 사용자 릴레이 활용

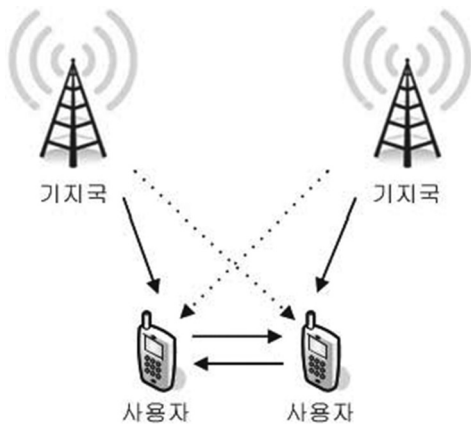


그림 4. IC에서 사용자 릴레이 협력통신

정보이론적 관점에서 IC는 두 개 이상의 기지국이 각 기지국에 해당하는 사용자에게만 자신의 정보를 전송하는 채널 환경이다. IC에서는 <그림 4>와 같이 기지국의 신호가 해당 사용자가 아닌 인접 사용자에게는 간섭으로 작용하여 정보의 수신 효율의 저하를 가져온다. 따라서 이와 같은 인접 기지국 신호로 인한 간섭을 효과적으로 제어하기 위한 방법의 하나로써 사용자간 협력 기법이 연구되고 있다.

참고문헌 [17]에서는 두 명의 사용자가 존재하는 IC에서 사용자 릴레이를 통한 협력 기법을 제안하고, 제안된 기법의 성능을 분석했다. 서로 근접한 위치에 있는 두 명의 사용자들은 각각 기지국으로부터 수신한 신호를 CF 기법으로 파트너에게 전달

하고, 전달받은 신호와 기지국으로부터 직접 수신한 신호와 결합하여 정보를 복원한다. 참고문헌 [17]에서 제안된 기법을 통해 사용자간 협력이 없는 기존 IC에서 얻을 수 있었던 두 사용자의 커패시티 합(sum capacity)이 증가되는 것을 보였다. 또한 협력 채널의 상태가 좋지 않은 경우에는 기지국간의 협력통신보다 사용자 릴레이를 통한 협력통신이 커패시티 합 측면에서 유리하다는 것을 보였다.

참고문헌 [18]에서는 IC에서 사용자 협력 통신 기법을 통해 얻을 수 있는 최대 커패시티 합을 분석하였다. 각 기지국들은 전송율 분할(rate splitting)을 통해 전체 정보를 협력 개별 정보(cooperative private message)와 협력 공용 정보(cooperative public message)로 분할 전송한다. 협력 개별 정보는 간섭 중화(interference neutralization) 기법을 통해 제거되고, 사용자들은 CF 릴레이 기법을 통해 협력 공용 정보를 교환하여 정보 수신 효율을 증가시킨다. 참고문헌 [18]에서는 제안된 기법을 통해 달성 가능한 커패시티의 upper bound와 lower bound를 유도했고, 두 bound 사이의 차이가 항상 일정한 상수 비트로 유지되는 것을 증명했다.

### 4. 그 밖의 환경에서의 사용자 릴레이 활용

앞서 살펴본 대표적인 MAC, BC 그리고 IC 환경뿐만 아니라 보다 다양한 환경에서 사용자 릴레이를 통한 협력통신이 활용되고, 연구되고 있다.

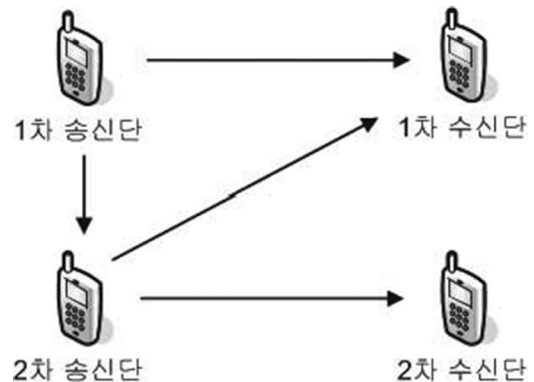


그림 5. CR에서 사용자 릴레이 협력통신

참고문헌 [19]에서는 인지 라디오(cognitive radio, CR) 환경에서 사용자 릴레이를 활용한 기법이 제시되었다. CR이란, 주파수 이용 순위가 낮은 2차 사용자가 높은 주파수 이용 우선 순위를 가지는 1차 사용자의 채널 사용에 대한 정보를 수집하고, 이를 바탕으로 1차 사용자에게 악영향을 끼치지 않는 범위 하에

서 함께 주파수를 사용하는 기법을 말한다 <그림 5>. 참고문헌 [19]에서는 2차 사용자가 1차 사용자가 주파수를 사용하지 않는 경우에만 주파수를 사용하는 overlay CR 환경에서 사용자 릴레이를 사용하는 기법을 제안했다. 2차 사용자 송신단은 1차 사용자 송신단이 정보를 전송할 때, 이를 수신하고 있다가 수신한 정보를 협력통신을 통해 1차 사용자 수신단으로 전송한다. 2차 사용자 송신단은 이와 같은 협력통신을 통해 1차 사용자 송/수신단의 정보 전송이 빠르게 끝날 수 있도록 도와주고, 1차 사용자의 정보 전송이 끝나면 2차 사용자 송/수신단의 정보 전송을 시작한다. 참고문헌 [19]에서는 제안된 기법을 통해 2차 사용자들의 정보 전송 효율이 향상될 수 있음을 보였다.



그림 6. Ad-Hoc에서 사용자 릴레이 협력통신

참고문헌 [20]과 [21]에서는 Ad-Hoc 네트워크에서 사용자 릴레이를 통해 안정적으로 정보를 전달하는 전송 기법을 제안하였다. Ad-Hoc 환경은 <그림 6>와 같이 별도의 Access point(AP)나 기지국 없이 각 사용자들끼리 네트워크에서 통신을 하는 환경을 말한다. Ad-Hoc 네트워크에서 사용자는 먼 거리의 사용자들과 통신을 하는 경우에 사용자 릴레이를 통해 정보를 전달한다. 참고문헌 [20]과 [21]에서는 Ad-Hoc 네트워크에서 효과적으로 사용자 릴레이들을 선택하고 전송하여 단일 홉(single hop) 또는 다중 홉(multi hop)을 통해 정보를 안정적으로 전달하는 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 통해 정보 전달이 실패하는 확률이 줄어들고, 그에 따른 throughput이 상승하는 것을 보였다.

#### IV. 사용자 릴레이통신의 기술적 과제

사용자 릴레이를 이용한 협력통신 기법은 다양한 시스템에서 그 장점을 극대화한 여러 가지 기법들이 제안되어왔다. 그럼에도 불구하고

도 불구하고 현재 사용자 릴레이를 통한 협력통신이 실제 시스템에 적용되어 적극적으로 활용되기 위해서는 해결해야 할 여러 가지 기술적 과제들이 존재한다.

현실적인 환경에 적합한 사용자 릴레이 기법의 연구가 필요하다. 대부분의 사용자 릴레이 통신에 대한 문헌들은 정보이론 관점에서의 성능분석이 주를 이루었고, 그에 따라 시스템이 지나치게 이상적이거나 단순화되었다. 이러한 정보이론적인 성능분석은 사용자 릴레이 통신의 성능에 대한 유용한 최대 영역을 제공하지만, 사용자 릴레이가 실제 시스템에 적용됐을 때의 성능을 보여주기에는 불완전하다. 이러한 사실에 기반하여, 일부의 문헌들에서는 보다 현실적인 반이중 릴레이 기법이 고려되었지만 [16], 대다수의 문헌들에서는 실제 시스템에서 구현하기 어려운 것으로 여겨지는 전이중 릴레이 기법을 적용한 사용자 릴레이 기법을 고려하고 있다. 또한 기존 문헌들에서 다루고 있는 단일안테나를 이용한 사용자 릴레이 통신의 성능을 보다 더 향상시킬 수 있는 방법으로, 다중안테나 시스템을 사용자 릴레이 통신에 적용할 수 있다. 기지국이나 사용자 릴레이가 다중안테나를 통해 정보를 전달한다면, 정보 전송의 효율이나 정보 전달의 안정성을 크게 향상시키는 것이 가능하다. 따라서 이러한 잠재적 이득을 실현하기 위한 다중안테나를 고려한 사용자 릴레이 통신에 대한 연구가 필요하다.

실제 시스템 설계 및 활용 관점에서도 넘어야 할 기술적 과제들이 존재한다. 사용자 릴레이 통신의 경우, 사용자 릴레이가 다른 사용자의 정보를 전달하는 과정에서 자신의 전력을 소비한다. 그러나 실제 운용환경에서 아무런 보상 없이 다른 사용자의 정보 전달을 위해 자신의 전력을 소모하는 것은 현실적이지 않다. 따라서 사용자 협력 통신으로 인한 소모 전력에 대한 보상 또는 소모 전력의 제한 등의 고려가 필요하다. 사용자 릴레이 과정에서 발생하는 정보의 보안 또한 해결해야 하는 과제이다. 참고문헌 [22]에서 정보이론 관점에서 사용자 릴레이를 통해 안전하게 얻을 수 있는 secrecy rate을 분석하였다. 그러나 아직 사용자 릴레이 환경에서 정보 보안을 다룬 문헌은 많지 않고, 참고문헌 [22]에서도 이상적인 환경에서 이론적으로 달성 가능한 최대 secrecy rate을 제시하였기 때문에 실제 시스템에서 적용 가능한 보안 기법에 대한 연구가 필요하다. 이 외에도 다중 홉 사용자 릴레이를 통해 발생하는 정보의 지연(delay)에 대한 기술적 해결, 사용자 릴레이를 위한 사용자간의 채널 정보 획득 문제, 효과적인 사용자 릴레이를 위한 사용자 pairing 및 스케줄링 (scheduling) 방법 등의 해결해야 하는 기술적인 과제들이 존재한다.

## V. 결론

본고에서는 사용자 릴레이를 이용한 협력통신에 대한 전반적인 이해와 활용 방향에 대해 살펴보았다. MAC, BC 그리고 IC 등과 같은 환경에서 시스템내의 다른 사용자의 정보를 효과적으로 전달하는 사용자 릴레이 기법 및 채널 코딩 기법들이 연구되어 왔고, 사용자 릴레이 기법을 통해 기존의 채널 환경에서 얻을 수 있었던 최대 성능을 크게 향상시킬 수 있음이 입증되었다. 사용자 릴레이 협력통신이 실제 시스템에서 효과적으로 활용되기 위해서는 정보 보안, 사용자 전력 소모 등의 기술적 과제들이 해결되어야 할 것으로 여겨진다.

## 참고 문헌

- [1] T. M. Cover and A. E. Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 572–584, Sept. 1979.
- [2] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [3] M. Gastpar and M. Vetterli, "On the capacity of large Gaussian relay networks," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 51, no. 3, pp. 765–779, Mar. 2005.
- [4] A. Host-Madsen and J. Zhang, "Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 51, no. 6, pp. 2020–2040, Jun. 2005.
- [5] B. Wang, J. Zhang, and A. Host-Madsen, "On the capacity of MIMO relay channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 51, no.1, pp.29–43, Jan. 2005
- [6] J. G. Andrews, W. Choi, and R. W. Heath, Jr., "Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO cellular networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 14, no. 6, pp. 95–104, Dec. 2007.
- [7] W. Choi and J. G. Andrews, "The capacity gain from intercell scheduling in multi-antenna systems," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 7, no. 2, pp. 714–725, Feb. 2008.
- [8] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity, part I: system description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, Nov. 2003.
- [9] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity, part I: system description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, Nov. 2003.
- [10] M. Janani, A. Hedayat, T. Hunter, and A. Nosratinia, "Coded cooperation in wireless communication: space-time transmission and iterative decoding," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 362–371, Feb. 2004.
- [11] T. Hunter, and A. Nosratinia, "Diversity through coded cooperation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 283–288, Feb. 2006.
- [12] A. Stefanov and E. Erkip, "Cooperative coding for wireless networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 9, Sep. 2004.
- [13] Y. Liang and V.V. Veeravalli, "Cooperative relay broadcast channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 53, no. 3, pp. 900–928, Mar. 2007.
- [14] Y. Liang and G. Kramer, "Rate regions for relay broadcast channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3517–3535, Oct. 2007.
- [15] R. Tannious and A. Nosratinia, "Relay channel with private messages," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3777–3785, Oct. 2007.
- [16] J. Y. Ryu and W. Choi, "Bit concatenation based user relaying in MIMO broadcast channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 8, pp. 2208–2220, Aug. 2012
- [17] C. T. K. Ng, N. Jindal, A. J. Goldsmith, and U. Mitra, "Capacity gain from two-transmitter and two-receiver cooperation," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3822–3827, Oct. 2007.
- [18] V. M. Prabhakaran and P. Viswanath, "Interference channels with destination cooperation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, No. 1, pp. 187–209, Jan. 2011.
- [19] O. Simeone, Y. Bar-Ness, and U. Spagnolini, "Stable throughput of cognitive radio with and without relaying capability," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 12, Dec. 2007.
- [20] H. Wu, C. Qiao, S. De, and O. Tonguz, "Integrated

cellular and ad Hoc relaying system: iCAR,” IEEE Journal on selected areas in commun., vol. 19, no. 10, pp. 2105–2115, Oct. 2001.

[21] F. Fitzek, M. Katz, and Q. Zhang, “Cellular controlled short-range communication for cooperative P2P networking,” Wireless Pers. Commun., vol. 48, no. 1, pp. 141–155, Jan. 2008.

[22] E. Ekrem and S. Ulukus, “Secrecy in cooperative relay broadcast channels,” IEEE Trans. Info. Theory, vol. 57, no. 1, Jan. 2011

### 약 력



류 종 열

2008년 충남대학교 전자공학과 학사  
2010년 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사  
2010년~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사재학  
관심분야: 다중안테나 통신, 사용자 릴레이 통신, 빔포밍 설계, 프리코딩 설계



최 완

1996년 서울대학교 전기및컴퓨터공학부 학사  
1998년 서울대학교 전기및컴퓨터공학부 석사  
2006년 The University of Texas at Austin, Electrical and Computer engineering 박사  
2011년~현재 한국과학기술원 부교수  
2009년~2011년 한국과학기술원 조교수  
2007년~2009년 한국정보통신대학교 조교수  
1998년~2003년 KTF 과장  
2008년~현재 IEEE Trans. on Wireless Communications, Associate Editor  
2011년~현재 IEEE Trans. on Vehicular Technology, Associate Editor  
2012년~현재 IEEE Wireless Communications Letters, Associate Editor  
관심분야: 통신이론 및 정보이론