

시스템 용량 향상을 위한 비직교 다중 접속 (NOMA) 기술 동향

I. 서론

최근 스마트폰의 보편화 및 무선 인터넷 사용의 증대에 따라 모바일 네트워크 트래픽은 폭발적으로 증가하고 있다^[1]. 이러한 데이터 트래픽의 폭발적 증가 추세는 지속적으로 이어져 2020년경에는 2010년 대비 1000배 이상 증가할 것으로 예상되고 있다^[2]. 이로 인해 long term evolution - advanced (LTE-A)로 대변되는 4세대 이동 통신보다 시스템 용량을 비약적으로 향상시킬 수 있는 5세대 이동 통신 시스템 (5G)에 대한 필요성 대두 및 연구가 진행되기 시작하였다.

데이터 트래픽의 폭발적 증가에 대처하고 시스템 용량을 향상시키기 위해서 2012년 6월에 3rd generation partnership project (3GPP) workshop on release 12 and onwards가 개최되었고, 비약적인 시스템 용량 향상을 위한 여러 가지 기술적 이슈들을 다루기 시작하였다^[3]. 또한 유럽 단체 중심으로 구성된 5GNOW가 발족되어 5세대 이동 통신 시스템에 적합한 세부 기술 논의가 진행되고 있으며^[4] 국내에서도 5G포럼이라는 단체를 구성하여 향후 5세대 이동 통신 시스템 구축 및 사회화를 위한 기술적 이슈들을 논의하고 있다.

위에서 언급한 단체들의 공통된 목표는 시간과 공간의 제약 없이 언제 어디서나 개인별 Gbps급 대용량 고품질 미디어 서비스를 제공하는 것이다. 이는 현재 상용 중인 4세대 이동 통신 대비 1000배 이상의 데이터 용량 향상을 의미한다^[5]. 1000배 이상의 용량 증대를 위해서 4세대 이동 통신 시스템보다 더 넓고, 더 높은 주파수 대역을 확보하는 것과, 스몰셀 네트워크를 이용한 기지국 수 확대 그리고 주파수 효율적인 시스템을 구축하는 것이 주된 이슈로 관심을 받고 있다^[3].



임 성 목
한국교통대학교
전자공학과



홍 대 식
연세대학교
전기전자공학부



이 중에서 주파수 효율적인 시스템 구축을 위한 한 가지 방법으로서 비직교 다중 접속 기법 (non-orthogonal multiple access, NOMA)이 대두되고 있다^{[3][6][7]}. LTE-A 시스템과 같이 기존 4세대 이동 통신 시스템에서는 사용자 별로 주파수 성분을 배타적으로 할당받아 사용하는 직교 주파수 분할 다중 접속 기법 (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)을 사용하였다. 그러나 비직교 다중 접속 기법에서는 모든 사용자가 시간 자원과 주파수 자원을 공유하면서 신호를 송수신한다. 즉, 송신단에서 각 사용자별로 적절히 전송 전력을 조절하여 superposition coding을 통해 신호를 전송한다. 이를 기반으로 모든 사용자가 가용 가능한 자원을 공유하기 때문에 주파수 효율성 측면에서 기존의 OFDMA 방식보다 유리하다.

그러나 수신단에서는 사용자들의 신호가 섞여서 들어오기 때문에 사용자 간 간섭이 발생하게 되는데 이는 시스템 성능을 열화시키는 주된 요인이 된다. 따라서 사용자 간 간섭을 최소화시키고, 시스템 용량을 향상시키기 위해서 순차적 간섭 제거 방식 (successive interference cancellation, SIC)을 이용하여 원하는 사용자의 신호를 검출해야 한다. 이 때 SIC를 이용한 수신기의 구현 방법에 따라 시스템의 성능과 수신기 복잡도 간 trade-off가 발생하므로 성능을 최대한 향상시키면서 복잡도를 줄일 수 있는 SIC 기반의 수신단 디자인이 필요하다.

뿐만 아니라 SIC 성능은 송신단과 수신단 간 채널과 각 사용자에게 할당되는 전송 전력의 차이에 의존적이다. 따라서 SIC 성능을 최대한 향상시키기 위해서는 각 사용자들의 전력을 최적화시켜서 할당해주어야 한다.

본 고에서는 5세대 이동통신 시스템에서 시스템 용량을 비약적으로 향상시킬 수 있는 기법 중 하나로서 비직교 다중 접속 기법을 소개하고 이에 관한 기술적 동향을 살펴본다. 우선 비직교 다중 접속 기법의 개념과 운용 원리를 하향링크 (downlink)와 상향링크 (uplink) 관점에서 각각 설명하고, 그 때의 송신단 구조와 수신단 구조를 고찰한다. 그리고 수신단에서 SIC 성능을 향상시킬 수 있는 전력 할당 기법을 소개하고,

이를 기반으로 시스템 용량 및 셀 외곽 사용자의 용량 측면에서 비직교 다중 접속 기법의 성능을 평가한다.

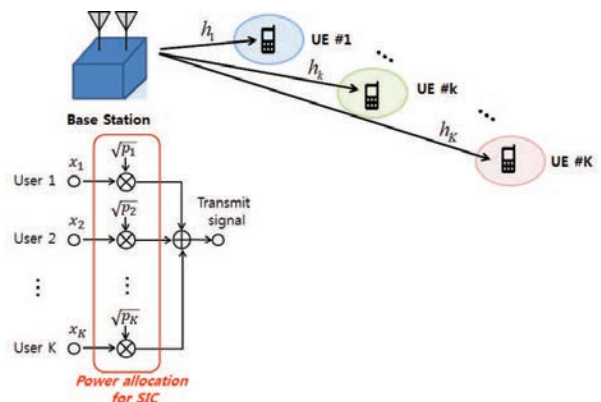
II. 비직교 다중 접속 기법의 시스템 모델

본 장에서는 비직교 다중 접속 기법의 개념 및 송수신단 구조를 포함한 시스템 모델을 살펴본다. 앞서 설명한 대로 비직교 다중 접속 기법은 송신단에서는 superposition coding 기법을, 수신단에서는 SIC 기법을 기반으로 신호를 송수신하는데 상향 링크와 하향 링크에 따라 송신단과 수신단에서의 신호 처리 방안이 달라지게 된다. 이에 따라 본 장에서는 하향링크 환경과 상향링크 환경으로 나누어 비직교 다중 접속 기법의 송수신단 구조를 설명한다.

1. 하향링크에서의 비직교 다중 접속 기법^[8-9]

가. 송신단 구조

〈그림 1〉은 하향링크 환경에서 비직교 다중 접속 기법의 시스템 모델을 나타낸다. 기지국은 전체 K 명의 사용자 신호를 superposition coding을 이용하여 전송한다. 이 때 k 번째 사용자에게 할당되는 전력은 $p_k(1 \leq k \leq K)$ 이고, 이를 이용하여 기지국으로부터 전송되는 신호 x 는 다음과 같다.



〈그림 1〉 하향링크 환경에서 비직교 다중 접속 기법의 시스템 모델



$$x = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} x_k \quad (1)$$

이 때 x_k 는 k 번째 사용자의 전송 신호를 의미한다. 비직교 다중 접속 기법은 모든 사용자가 시간 자원과 주파수 자원을 공유하므로 전송 신호 x 는 동일한 시간에 동일한 주파수 대역에서 동시에 전송되며 할당된 전력 p_k 에 따라 전송 신호의 전력 레벨이 달라지는 특성을 가진다.

나. 수신단 구조

k 번째 사용자의 수신단에서 수신되는 신호 y_k 는 다음과 같다.

$$y_k = h_k x + n_k \quad (2)$$

여기서 h_k 는 송신단과 k 번째 사용자 간 채널을 의미하고, n_k 는 k 번째 사용자의 수신단에서 발생하는 잡음을 의미한다. (2)에서 수신 신호 y_k 는 k 번째 사용자를 위한 전송 신호 x_k 와 다른 사용자들을 위한 전송 신호 $x_i (1 \leq i \leq K, i \neq k)$ 로 구성되어 있는데 사용자 간 간섭을 완화시키기 위해서 SIC 기법을 사용하여 신호를 검출해낸다.

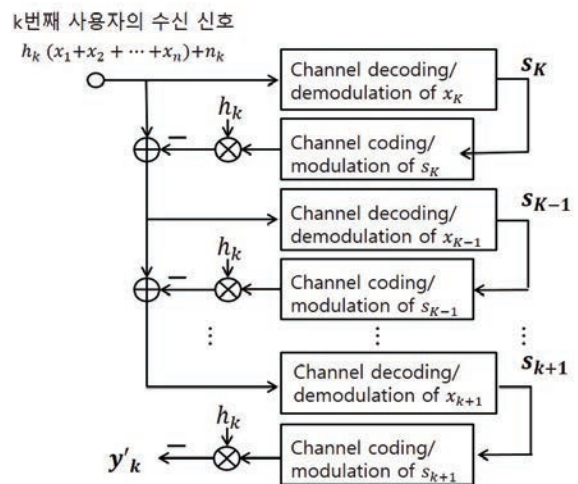
일반적으로 k 번째 사용자의 전송 신호 x_k 와 다른 사용자들의 간섭 신호 $x_i (1 \leq i \leq K, i \neq k)$ 가 혼재되어 있을 때 SIC 기법을 사용하여 신호를 검출할 경우 자신의 신호 전력보다 더 큰 전력을 가지는 간섭 신호를 먼저 검출 후 수신 신호에서 제거한 뒤 간섭이 완화된 상태에서 원래 신호 x_k 를 검출한다. 이 때 하향링크 환경에서는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 k 번째 사용자의 전송 신호 x_k 와 다른 사용자들의 간섭 신호 $x_i (1 \leq i \leq K, i \neq k)$ 가 동일한 채널 h_k 를 겪게 되는데 이는 수신 신호의 전력에 영향을 주는 채널 이득 $|h_k|^2$ 이 동일함을 의미한다. 따라서 x_k 의 전력과 다른 간섭 신호의 전력 차이는 전적으로 송신단에서 각 사용자의 신호에 할당되는 전력 $p_k (1 \leq k \leq K)$ 에 의해 결정된다.

하향링크 환경에서 비직교 다중 접속 기법에서는 기지국으로부터 거리가 가까운 사용자 (즉, 채널 이득 $|h_k|^2$ 이 큰 사용자)일수록 더 작은 전력을 할당해준다. <그림 1>과 같이 기지국과 각 사용자 간 채널 이득의 크기가

$|h_1|^2 > |h_2|^2 > \dots > |h_K|^2$ 와 같을 때 각 사용자의 신호에 할당되는 전력은 $p_1 < p_2 < \dots < p_K$ 이다. 채널 이득이 큰 사용자의 경우 간섭 신호의 전력이 사용자의 신호보다 더 크더라도 SIC를 정확하게 할 수 있기 때문에 SIC에 의한 성능 향상을 높일 수 있다. 반면 채널 이득이 작은 셀 외곽 사용자의 경우에는 수신 신호의 크기가 작아지기 때문에 SIC에 의한 이득을 획득하기 어렵다. 이 경우에는 사용자 신호의 전력을 가장 크게 할당하여 SIC 없이 직접 신호를 검출하는 것이 유리하다.

결과적으로 인덱스 $p_k (1 \leq k \leq K)$ 가 증가할수록 사용자의 채널 이득은 작아지고 (즉, 기지국으로부터 거리가 멀어지고) 그에 따라 할당되는 전력 값이 커진다고 할 때 k 번째 사용자의 수신단은 <그림 2>와 같이 SIC를 적용하여 자기 신호를 검출한다. 즉, 수신되는 간섭 신호 $x_i (1 \leq i \leq K, i \neq k)$ 중에서 x_k 의 전력이 가장 크기 때문에 x_k 의 신호를 먼저 검출한 후 수신 신호로부터 제거해준다. 이후 두 번째로 전력이 큰 간섭 신호 x_{k-1} 의 신호를 검출한 후 수신 신호로부터 제거해준다. 이와 같은 과정을 x_{k+1} 신호가 검출되어 수신 신호로부터 제거될 때까지 $K-k$ 번 반복해준다면 남아있는 신호는 자기 신호 x_k 와 x_k 의 전력보다 작은 간섭 신호 $x_i (1 \leq i \leq k-1)$ 로만 구성된다. 이 때 남아 있는 간섭 신호들은 잡음과 같이 간주하고 자기 신호 x_k 를 최종적으로 검출한다.

예를 들어 첫 번째 사용자 ($k=1$)의 경우 가장 작은



<그림 2> k 번째 사용자의 수신단에서 SIC 적용 방법



전력을 할당받기 때문에 SIC를 통해 모든 사용자의 신호를 검출하여 수신 신호로부터 제거한 후 최종적으로 자기 신호를 검출한다. 이 경우 사용자 간 간섭은 발생하지 않고 모두 제거된다. 반면, K 번째 사용자의 경우 자기 신호의 전력이 가장 크기 때문에 SIC를 수행하지 않고 자기 신호를 검출한다. 이 경우 모든 사용자의 신호가 사용자 간 간섭으로 발생하게 된다.

이처럼 k 번째 사용자가 SIC 후 자기 신호 x_k 를 검출하는 단계에서 발생하는 간섭은 자기 신호보다 작은 전력을 할당받은 신호들로 구성되어 있으며 이는 SIC 적용 전의 간섭보다 상당히 줄어든 값을 알 수 있다. SIC 기법을 사용함으로써 사용자 간 간섭의 상당한 크기를 완화시킨 상태에서 자기 신호를 검출하기 때문에 사용자 간 모든 자원을 공유하면서도 간섭에 의한 성능 열화를 최소화하고, 시스템 성능을 향상시킬 수 있다.

2. 상향링크에서의 비직교 다중 접속 기법^[10-11]

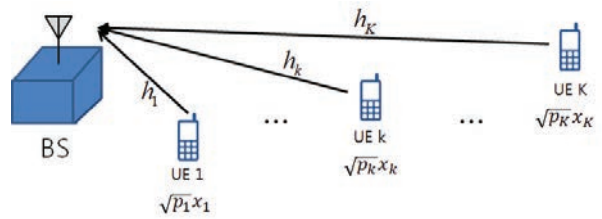
상향링크에서의 비직교 다중 접속 기법도 기본적인 개념은 하향링크에서의 비직교 다중 접속 기법과 유사하다. 즉 송신단에서 신호 전송 시 사용자 별로 다른 전력을 할당하여 전송하게 되고, 수신단에서는 SIC 기법을 적용하여 특정 사용자의 신호를 검출한다. 그러나 신호 송신 및 수신 과정에서 하향링크와는 다른 특성이 몇 가지 나타나게 된다. 본 장에서는 하향링크와의 차이점을 중심으로 상향링크에서 비직교 다중 접속 기법의 송신단 및 수신단의 구조를 설명하고자 한다.

가. 송신단 구조

〈그림 3〉은 상향링크 환경에서 비직교 다중 접속 기법의 시스템 모델을 나타낸다. k 번째 사용자는 전송하고자 하는 신호 x_k 를 기지국으로 송신하게 되는데 이때 p_k 의 전력을 할당하여 전송한다. 즉 k 번째 사용자의 송신 신호 x'_k 는 다음과 같다.

$$x'_k = \sqrt{p_k} x_k \quad (3)$$

비직교 다중 접속 기법에서 전체 K 명의 사용자는 동일한 시간에 동일한 주파수 대역을 이용하여 동시에 자



〈그림 3〉 상향링크 환경에서 비직교 다중 접속 기법의 시스템 모델

신의 신호 $x_k (1 \leq k \leq K)$ 를 전송하고 이때 전송 전력 $p_k (1 \leq k \leq K)$ 를 할당하게 된다.

나. 수신단 구조

각 사용자 별로 전송된 신호는 기지국에서 동시에 수신하게 되는데 이 때 수신 신호 y 는 다음과 같이 표현된다.

$$y = \sum_{k=1}^K h_k \sqrt{p_k} x_k + n \quad (4)$$

여기서 h_k 는 k 번째 사용자와 기지국 간 발생하는 채널을 의미하고, n 은 기지국에서 사용자들의 신호 수신 시 발생하는 잡음을 의미한다. 하향링크와 마찬가지로 (4)에서 표현된 수신 신호 y 에서 k 번째 사용자의 전송 신호 x_k 를 검출할 때 다른 사용자들의 전송 신호 $x_i (1 \leq i \leq K, i \neq k)$ 가 간섭으로 작용하게 되고 이는 x_k 의 검출 성능을 열화시키는 요인이 된다. 따라서 기지국에서 SIC 기법을 적용하여 간섭의 크기를 완화시키고 검출 성능을 향상시킬 필요가 있다.

상향링크 환경에서는 〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 k 번째 사용자의 전송 신호 x_k 는 서로 다른 채널 h_k 를 겪으면서 서로 다른 경로를 통해 기지국으로 송신된다. 이 과정에서 k 번째 사용자 신호인 x_k 는 $|h_k|^2$ 의 채널 이득을 가지는 반면 간섭 신호 $x_i (1 \leq i \leq K, i \neq k)$ 는 $|h_i|^2$ 의 채널 이득을 가지게 된다. 즉 k 번째 사용자 신호인 x_k 의 수신 전력에 영향을 주는 채널 이득과 다른 사용자들의 간섭 신호 $x_i (1 \leq i \leq K, i \neq k)$ 의 수신 전력에 영향을 주는 채널 이득이 서로 다를 수 있다. 따라서 기지국에서 SIC 순서는 송신단에서 할당되는 각 사용자 별 전력과 그 신호가 전송 중에 겪게 되는 채널

이득의 크기를 동시에 고려하여 결정되어야 한다.

상향링크 환경에서 비직교 다중 접속 기법에서는 기지국으로부터 거리가 가까운 사용자 (즉, 채널 이득 $|h_k|^2$ 이 큰 사용자)일수록 더 큰 전력을 할당해준다. <그림 3>과 같이 각 사용자와 기지국 간 채널 이득의 크기가 $|h_1|^2 > |h_2|^2 > \dots > |h_K|^2$ 와 같을 때 각 사용자의 신호에 할당되는 전력은 $p_1 < p_2 < \dots < p_K$ 이다. 이는 기지국에서 특정 사용자의 신호와 간섭 신호를 동시에 수신할 때 채널 이득이 더 큰 신호의 수신 전력을 더욱 크게 하고, 채널 이득이 더 작은 신호의 수신 전력을 더욱 작게 함으로써 SIC 성능을 더욱 향상시킬 수 있기 때문이다.

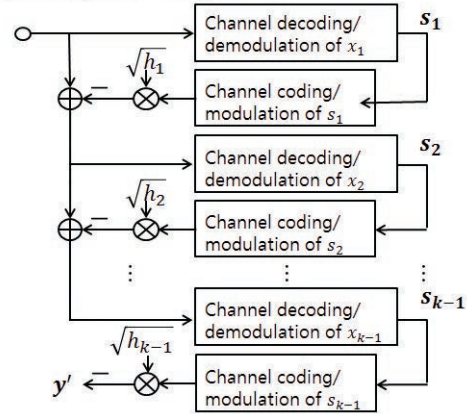
따라서 인덱스 $k(1 \leq k \leq K)$ 가 증가할수록 사용자의 채널 이득은 작아지고 (즉, 기지국으로부터 거리가 멀어지고) 그에 따라 할당되는 전력 값이 커진다고 할 때 기지국에서는 <그림 4>와 같이 SIC 순서를 적용하여 k 번째 사용자의 신호를 검출한다. 즉, 수신되는 간섭 신호 $x_i(1 \leq i \leq K, i \neq k)$ 중에서 x_1 의 전력이 가장 크기 때문에 x_1 의 신호를 먼저 검출한 후 수신 신호로부터 제거해준다. 이 때 x_1 은 채널 h_1 을 겪고 수신단으로 들어오므로 x_1 에 h_1 을 곱한 뒤에 수신 신호로부터 제거해주어야 한다. 일반적으로 기지국은 피드백 정보를 통해 모든 채널 정보를 알고 있다고 가정하기 때문에 각 사용자의 신호가 겪는 채널을 곱하는 것은 가능하다.

이후 두 번째로 전력이 큰 간섭 신호 x_2 의 신호를 검출한 후 채널 h_2 와 곱한 뒤에 수신 신호로부터 제거해준다. 이와 같은 과정을 x_{k-1} 신호가 검출되고 채널 h_{k-1} 과 곱한 뒤 수신 신호로부터 제거될 때까지 $k-1$ 번 반복해주면 남아있는 신호는 자기 신호 x_k 와 x_k 의 전력보다 작은 간섭 신호 $x_i(k+1 \leq i \leq K)$ 로만 구성된다. 이 때 남아 있는 간섭 신호들은 잡음과 같이 간주하고 자기 신호 x_k 를 최종적으로 검출한다.

예를 들어 첫 번째 사용자 ($k=1$)의 경우 가장 큰 전력을 할당받기 때문에 기지국은 SIC를 수행하지 않고 첫 번째 사용자의 신호를 검출한다. 이 경우 다른 모든 사용자들의 신호가 사용자 간 간섭으로 발생하게 된다. 반면, K 번째 사용자의 경우 자기 신호의 전력이 가장

기지국에서 수신신호

$$(h_1\sqrt{p_1}x_1 + h_2\sqrt{p_2}x_2 + \dots + h_K\sqrt{p_K}x_K) + n$$



<그림 4> 기지국에서 k 번째 사용자의 신호 검출 시 SIC 적용 방법

작기 때문에 기지국은 다른 모든 사용자의 신호를 SIC를 통해 제거한 후 잡음만 존재하는 환경에서 K 번째 사용자의 신호를 검출하게 된다. 이 경우 사용자 간 간섭은 발생하지 않고 모두 제거된다. 주의해야 할 사실은 상향링크 환경과 하향링크 환경에서 SIC 검출을 위한 송신 전력 할당이 각각 반대로 나타나기 때문에 SIC의 순서 역시 반대로 나타난다는 것이다.

이와 같이 상향링크에서의 다중 접속 기법에서도 기지국에서 수신된 신호를 검출할 때 SIC 기법을 적용함으로써 k 번째 사용자의 전송 신호 x_k 는 사용자 간 간섭을 완화시킨 상태에서 자기 신호가 검출되기 때문에 시스템 성능을 향상시킬 수 있다.

III. 비직교 다중 접속 기법의 성능 평가

본 장에서는 앞서 설명한 비직교 다중 접속 기법의 시스템 용량 및 셀 외곽 사용자의 용량 성능을 평가한다. 성능 평가는 [8]과 [9]의 내용을 기반으로 하향링크와 상향링크에서의 성능을 각각 고찰한다. 성능 평가를 위해서는 우선적으로 각 사용자 신호의 전력 할당 기법이 정의되어야 하는데 본 고에서는 [8]과 [9]에서 소개된 사용자 fairness를 고려한 전력 할당 기법을 소개하고, 이를 기반으로 성능을 고찰한다.



가. 하향링크에서의 성능 평가^[8]

하향링크에서 비직교 다중 접속 기법의 성능 평가를 위해서는 우선적으로 각 사용자 신호의 전력 할당 기법이 정의되어야 한다. 본 고에서는 [8]에서 소개된 사용자 fairness를 고려한 전력 할당 기법을 소개하고, 이를 기반으로 시스템 용량과 셀 외곽 사용자의 용량을 직교 다중 접속 기법 (orthogonal multiple access, OMA)의 성능과 비교한다.

[8]에 의하면 비직교 다중 접속 기법의 전체 시스템 용량이 직교 다중 접속 기법의 시스템 용량과 동일하다는 전제 조건 하에서 셀 외곽 사용자의 용량을 향상시킬 수 있는 방향으로 각 사용자 신호의 전력이 할당된다.

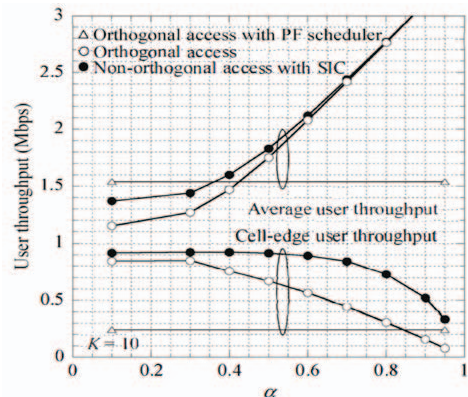
일반적으로 직교 다중 접속 기법에서 전체 시스템 용량 (전체 시스템 용량은 각 사용자의 용량을 합한 값으로 정의된다.)의 최대값은 가장 좋은 채널 이득을 가지는 사용자에게 모든 자원을 할당해줄 때 획득할 수 있다. 이 경우 셀 외곽 사용자는 전송할 수가 없다는 문제점이 발생한다. 따라서 전체 시스템 용량은 낮아지더라도 셀 외곽 사용자에게 전송할 수 있는 기회를 강제로 부여함으로써 사용자 fairness를 보장해줄 수 있다.

비직교 다중 접속 기법의 전력 할당 기법은 직교 다중 접속 기법이 사용자 fairness를 고려하여 사용자 별로 자원을 할당해줄 때 발생하는 전체 시스템 용량은 최소한 보장해주면서 셀 외곽 사용자의 용량을 최대한 향상시킬 수 있도록 각 사용자의 전력을 할당해준다.

〈그림 5〉는 위에서 설명한 전력 할당 기법을 적용했을 때 비직교 다중 접속 기법과 직교 다중 접속 기법 간 시스템 용량 및 셀 외곽 사용자의 용량을 비교한 실험 결과이다. 전체 사용자는 $K=10$ 이다. 즉, 비직교 다중 접속 기법의 경우 전체 사용자 10명이 모든 시간 자원과 주파수 자원을 공유하면서 신호를 송수신하고 있고, 직교 다중 접속 기법의 경우 주어진 대역폭을 10명의 사용자가 배타적으로 나누어 사용한다. α 는 사용자 fairness를 고려한 인자 (factor)로서 α 가 0에 가까울수록 사용자 fairness를 고려하여 셀 외곽 사용자의 용량이 향상됨을 의미한다. 반면 α 가 1에 가까울수록 사용자의 fairness보다 전체 시스템 용량 향상에 더

큰 우선 순위를 두고 자원을 할당하는 것이다. 〈그림 5〉에서 α 가 커짐에 따라 (즉, 사용자 fairness의 고려를 하지 않는 경우) 전체 시스템 용량은 증가하며, 비직교 다중 접속 기법과 직교 다중 접속 기법의 성능이 동일해짐을 알 수 있다. 반면 셀 외곽 사용자의 용량은 감소하게 되는데, 이 경우 비직교 다중 접속 기법을 사용하는 사용자의 용량이 직교 다중 접속 기법을 사용하는 사용자의 용량보다 크다. 이는 α 가 커짐에 따라 직교 다중 접속 기법에서는 채널 이득이 좋은 사용자에게 더 많은 주파수 자원을 할당해주기 때문에 셀 외곽 사용자는 전송할 기회를 얻지 못하게 되고 용량이 작아지게 된다. 그러나 비직교 다중 접속 기법에서는 α 가 커지더라도 셀 외곽 사용자들은 채널 이득이 좋은 사용자들과 자원을 공유하면서 전송할 기회를 지속적으로 가지고 있기 때문에 직교 다중 접속 기법의 셀 외곽 사용자보다 더 큰 용량을 유지할 수 있는 것이다.

반면에 α 값이 작아지게 되면 상대적으로 셀 외곽 사용자에게 더 많은 전송 기회가 부여되는 데 이로 인해 두 기법 모두 셀 외곽 사용자의 용량은 증가하고, 전체 시스템 용량은 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 α 값이 작은 환경에서도 전체 시스템 용량과 셀 외곽 사용자의 용량 모두에서 비직교 다중 접속 기법의 성능이 더 우수하다는 것을 알 수 있는데 이는 모든 사용자가 자원을 공유함으로써 더 많은 자원을 이용할 수 있기 때문이다. 자원 공유로 인해 발생하는 사용자 간 간섭



〈그림 5〉 α 에 따른 비직교 다중 접속 기법과 직교 다중 접속 기법의 사용자 용량 성능 비교^[8]

이 비직교 다중 접속 기법의 성능을 열화시킬 수 있지만 SIC 기법으로 간섭을 완화시키기 때문에 사용자 간 간섭에 의한 성능 열화보다 자원 공유를 함으로써 얻게 되는 성능 이득이 더 크다는 것을 알 수 있다.

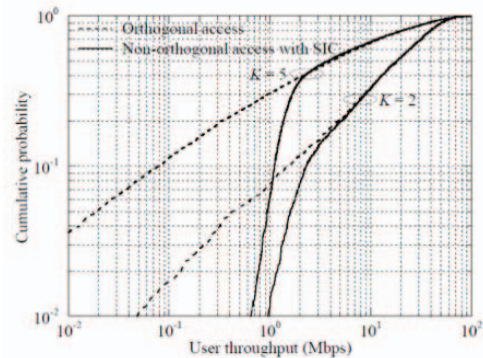
나. 상향링크에서의 성능 평가^[9]

하향링크와 마찬가지로 상향링크에서 비직교 다중 접속 기법의 성능 평가를 위해서는 각 사용자 신호의 전력 할당 기법이 먼저 정의되어야 한다. 상향링크에서의 전력 할당은 [9]에서 소개된 것처럼 비직교 다중 접속 기법의 전체 시스템 용량이 직교 다중 접속 기법의 시스템 용량과 동일하다는 전제 조건 하에서 셀 외곽 사용자의 용량을 향상시킬 수 있는 방향으로 신호의 전력이 할당된다. 이 경우도 사용자 fairness를 고려한 인자 (factor)로서 α 를 적용함으로써 α 의 값에 따라서 사용자 fairness 정도를 조절할 수 있다.

결과적으로 전체 시스템 용량은 최소한 직교 다중 기법을 사용했을 때의 시스템 용량과 동일하도록 유지하면서 가장 작은 용량을 가지는 사용자의 용량을 최대로 향상시킬 수 있도록 전력을 할당하게 된다.

<그림 6>은 위에서 설명한 것처럼 사용자 별 전력을 할당하였을 때 사용자 당 평균 용량의 CDF (cumulative distribution function)를 나타내는 결과이다. 총 사용자가 2명인 경우 하위 5%에서 비직교 다중 접속 기법의 성능이 직교 다중 접속 기법의 성능 대비 4배정도 향상되는 것을 알 수 있다. 이는 비직교 다중 접속 방식을 통해 사용자들 간 자원을 공유할 경우 상향링크의 셀 외곽 사용자들은 전 대역에 걸쳐서 신호를 송신할 수 있게 되고, 기지국에서는 SIC 기법을 통해 모든 사용자들의 간섭을 제거할 수 있기 때문이다 (상향링크 환경에서는 기지국으로부터 거리가 먼 셀 외곽 사용자의 전력이 가장 작게 할당되므로 기지국에서 신호 수신 시 SIC 기법을 통해 다른 간섭 신호의 제거가 가능하기 때문이다).

사용자 수가 5명으로 향상될 경우 하위 5%에서 비직교 다중 접속 기법의 성능은 직교 다중 접속 기법의 성능 대비 50배 가까이 향상되는 것을 알 수 있다. 비직



<그림 6> 총 사용자 수가 2와 5일 때 비직교 다중 접속 기법과 직교 다중 접속 기법에서 사용자 당 용량의 CDF^[9]

교 다중 접속 기법에서는 자원을 공유하는 사용자 수가 많아지더라도 셀 외곽 사용자 입장에서는 SIC 기법을 이용하여 간섭 제거가 가능하기 때문에 사용자 수가 작을 때 대비 성능 열화가 크지 않다. 반면 직교 다중 접속 기법의 경우 전체 사용자의 수가 많아질수록 한 사용자가 사용할 수 있는 주파수 자원의 크기가 줄어들기 때문에 셀 외곽 사용자의 성능은 심각하게 열화된다.

결과적으로 상향링크 환경에서는 모든 사용자들이 자원을 공유하는 비직교 다중 접속 기법이 직교 다중 접속 기법보다 시스템 용량 측면에서 우수하다는 것을 알 수 있다. 특히 셀 외곽 사용자의 용량은 비약적으로 증가하게 된다. 그리고 이러한 특성은 전체 사용자의 수가 증가할수록 현저하게 나타난다.

IV. 결론

본 고에서는 5세대 이동통신 시스템에서 비약적인 시스템 용량 향상을 위한 기법 중 하나로서 비직교 다중 접속 기법에 대한 기술 동향을 살펴보았다. 비직교 다중 접속 기법은 모든 사용자들이 시간과 주파수 자원을 공유함으로써 주파수 효율성을 높이고, 시스템 용량 향상 및 셀 외곽 사용자의 용량을 향상시킬 수 있는 기법이다. 사용자들의 자원 공유를 위해서 비직교 다중 접속 기법의 송신단에서는 superposition coding 기법을 이용하여 신호를 전송하게 되고, 수신단에서는 SIC 기법을 이용하여 특정 사용자의 신호를 검출하게 된다.



이 때 SIC 성능을 향상시키기 위해서는 송신단에서 사용자 별 전력을 달리 할당해주어야 하는데 하향링크의 경우 채널 이득이 큰 사용자일수록 전력을 작게 할당해주어야 하는 반면 상향링크의 경우 채널 이득이 큰 사용자일수록 더 높은 전력을 할당해줌으로써 SIC 성능을 향상시킬 수 있다. 결과적으로 비직교 다중 접속 기법은 상향링크와 하향링크의 환경에서 직교 다중 접속 기법보다 시스템 용량 측면에서 우수한 성능을 보인다. 특히 셀 외곽 사용자의 경우 최대 50배까지 성능 향상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

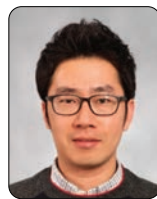
이 기고문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

참 고 문 헌

- [1] R. Andrew, "2020: The Ubiquitous Heterogeneous Network Beyond 4G," ITU Kaleidoscope, 2011.
- [2] Qualcomm Incorporated, "The 1000x Data Challenge," June 2013. Available website: <http://www.qualcomm.com/1000x/>.
- [3] RWS-120052, Report of 3GPP RAN Workshop on Release 12 and Onwards, 3GPP Workshop on Release 12 Onwards Ljubljana, Slovenia, June 11-12, 2012.
- [4] FP7-ICT-GA 318555, "5G Cellular Communications Scenarios and System Requirements," 5GNOW, D2.1, v1.0, June 2013.
- [5] M. Baker, "From LTE-Advanced to the Future," IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 2, pp.116-120, Feb. 2012.
- [6] NTT Docomo, Requirements, candidate solutions & technology roadmap for LTE12 onward, 3GPP Workshop on Rel. 12 and onwards, Ljubljana, Slovenia, June 11-12, 2012.
- [7] Sharp corporation, "Evolving RAN Towards Rel-12

and Beyond," RWS-120039 , 3GPP RAN Workshop on Release 12 Onward, Ljubljana, Slovenia, 11-12 June, 2012.

- [8] S. Tomida and K. Higuchi, "Non-orthogonal Access with SIC in Cellular Downlink for User Fairness Enhancement", International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Dec. 2011.
- [9] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Nakamura, "Evaluation of Downlink System-level Performance for Non-Orthogonal Multiple Access(NOMA)", IEICE Technical Report, RC 2012-325.
- [10] T. Takeda and K. Higuchi, "Enhanced User Fairness Using Non-Orthogonal Access with SIC in Cellular Uplink," in Proc. IEEE VTC-Fall, 2011.
- [11] N. Otao, Y. Kishiyama, and K. Higuchi, "Performance of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation," in Proc. IEEE ISWC 2012.



임 성 목

- 2005년 2월 연세대학교 전기전자공학부 학사
- 2012년 8월 연세대학교 전기전자공학부 박사
- 2012년 9월~2014년 3월
연세대학교 전기전자공학부 박사 후 연구원
(Post Doc.)
- 2014년 4월~현재 한국교통대학교 전자공학과
조교수

〈관심분야〉

NOMA, Energy Harvesting System, Multicarrier System, Cognitive Radio



홍대식

- 1983년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
- 1985년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
- 1990년 2월 Electrical Engineering, Purdue University, 박사
- 1990년 3월~1991년 2월
Electrical Engineering, Purdue University, 박사 후 연구원 (Post Doc.)
- 1991년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
- 2005년 통신학회 해동 학술상
- 2005년 3월~현재 IEEE Senior Member
- 2014년 1월~현재 대한전자공학회 부회장

〈관심분야〉

Small Cell Network, FBMC, Full Duplex System, NOMA, Cognitive Radio, Relay-based Communication, Multicarrier System