

전송률 분할을 이용한 혼합 Numerology 기반 인덱스 변조 다중 접속

이혜영, 이상훈, 신수용*

국립금오공과대학교, *국립금오공과대학교 IT융복합공학과

lhy413@kumoh.ac.kr, twosanghoon@kumoh.ac.kr, *wdragon@kumoh.ac.kr

Mixed-numerology based Index Modulation Multiple Access with Rate-splitting

Hye Yeong Lee, Sang Hoon Lee, Soo Young Shin

Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문에서는 이기종 서비스를 효율적으로 지원하기 위해 혼합 numerology 환경에 최적화된 RS(rate splitting) 기반 인덱스 다중 접속(MN-RS-IMMA) 기술을 제안한다. 서로 다른 부반송파 간격(sub carrier spacing, SCS)이 공존하는 MN 환경은 numerology 간 간섭을 유발하며, 이는 기존 NOMA 기반 방식의 수신 성능을 저해하는 주요 요인이 된다. 이를 해결하기 위해 제안하는 방식은 사용자 메시지를 공통 및 개별 스트림으로 분할하고, 좁은 SCS를 사용하는 사용자에게 인덱스 변조를 적용하여 전송 효율을 극대화하고자 한다.

I. 서론

차세대 이동통신 시스템은 급증하는 데이터 수요와 초연결 네트워크를 수용하기 위해 높은 주파수 효율을 요구한다. 자원의 활용 상태를 정보로 활용하는 인덱스 변조(index modulation, IM)는 추가적인 하드웨어 복잡도 없이 전송 용량을 증대시킬 수 있는 기술이다. 최근 이러한 기술은 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)과 NOMA(non orthogonal multiple access)를 접목한 인덱스 변조 다중 접속(index modulation multiple access, IMMA)으로 제안되었고, 다중 사용자 환경에서 성능 향상을 도모한다 [1].

그러나 5G NR(new radio)에서 도입된 혼합 numerology(mixed numerology, MN)는 기존 IMMA 시스템에 새로운 도전 과제를 제시한다 [2]. 이기종 서비스의 동시 지원을 위해 필수적인 서로 다른 부반송파 간격(subcarrier spacing, SCS)의 공존은 직교성을 파괴하고 이는 numerology 간 간섭(inter-numerology interference, INI)을 유발하여 시스템 전체의 신뢰성을 저하시키는 주요 원인이 된다. 특히, 전력 도메인 기반의 NOMA 기술은 강한 INI가 존재하는 환경에서 간섭 제거 과정인 SIC(successive interference cancellation)의 오류 전파 가능성이 높아서 성능 확보에 한계가 존재한다.

선행 연구인 [2]에서는 이러한 MN 환경에 IMMA를 접목하여 주파수 효율 개선을 시도하였다. 해당 방식은 채널 이득이 낮은 사용자에게는 좁은 SCS 기반의 IM을 할당하고, 채널 이득이 높은 사용자에게는 넓은 SCS 기반의 기존 OFDM을 할당하여 두 신호를 전력 도메인에서 중첩 전송하는 구조를 가진다. [2]를 통해 INI가 존재하는 환경에서의 시스템 용량 분석이 이루어졌으나, 여전히 NOMA 구조에 기인한 간섭 제어의 취약성이 해결해야 할 과제로 남아 있다.

본 연구에서는 이러한 MN 환경의 복잡한 간섭 문제를 효과적으로 관리하기 위해 차세대 다중 접속 기술인 RSMA(rate splitting multiple access)를 결합한 MN-RS-IMMA 방식을 제안한다. RSMA는 사용자 메시지를 공통(common) 스트림과 개별(private) 스트림으로 분할 전송함으로써, 분할율에 따라 간섭을 유연하게 관리할 수 있는 장점을 지닌다. 본

연구에서는 제안하는 시스템 모델에 최적화된 전력 할당 및 간섭 관리 방식을 적용하고 INI와 사용자 간 간섭(inter user interference, IUI) 환경에서의 시스템 성능을 검증한다.

II. 시스템 모델

제안하는 시스템은 두 사용자가 존재하는 단일 셀 하향링크 혼합 환경을 고려한다. 사용자 1(UE1)은 좁은 SCS(Δf_1)를 사용하며, OFDM-IM을 고려한다. UE2는 넓은 SCS를 할당($\Delta f_2 = 2^\mu \Delta f_1$)하며 OFDM 방식을 따른다. RSMA의 기법에 따라 각 사용자의 메시지 W_1, W_2 는 공통 스트림과 개별 스트림으로 분할되는데, 공통 메시지 W_c 는 공통 심볼 s_c 로 인코딩되며, 개별 메시지 W_{p1}, W_{p2} 는 각각 s_1, s_2 로 인코딩된다. 이때 s_1 은 UE1의 IM 패턴에 따라 활성화된 부반송파에만 데이터 심볼이 매핑되는 구조를 갖는다. 송신 신호 x 는 각 스트림의 전력 할당 계수 P_c, P_1, P_2 에 의해 다음과 같이 중첩되어 전송된다.

$$x = \sqrt{P_c} s_c + \sqrt{P_1} s_1 + \sqrt{P_2} s_2, \quad (1)$$

수신단에서 공통스트림 s_c 를 우선적으로 검출하며, 이때 개별 스트림 s_1, s_2 와 INI는 잡음으로 간주된다. 각 사용자는 자신의 일부 메시지 s_c 를 복구한 후 SIC를 통해 수신 신호에서 s_c 를 제거한다. UE1는 활성 패턴에 따른 전체 전력 변동성을 고려하여 IM 검출기를 통해 활성 인덱스와 s_1 을 동시에 복원하며, UE2는 자신의 개별 신호인 s_2 를 복호한다.

이러한 결합 구조는 기존 OFDM-NOMA가 전력 도메인 할당에만 의존하던 다중화 방식의 한계를 IM의 인덱스 이득으로 보완하여 수신 성능을 개선한다. 또한, 기존 MN-IMMA 대비 RSMA의 유연한 공통 스트림 처리를 통해 INI를 효율적으로 관리함으로써 차세대 다중 접속 기술로서의 전송 용량 우위를 확보한다.

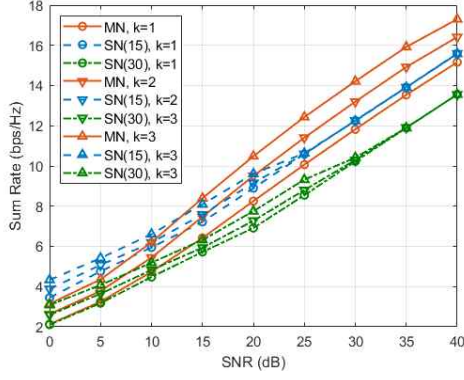


그림 1 모의실험 결과

UE1에서 OFDM-IM 구현을 위해 전체 N 개의 부반송파를 g 개의 서브블록으로 분할한다. 각 서브블록은 n 개의 부반송파로 구성되며, 이 중 k 개의 부반송파를 선택적으로 활성화하여 인덱스 정보와 심볼 정보를 동시에 전송한다. 여기서 M 은 PSK/QAM 변조 방식의 차수를 의미할 때, OFDM-IM에 따른 전송 비트는 $R_{IM} = \frac{G}{N}(\lfloor \log_2(n, k) \rfloor + k \log_2 M)$ 이다. 간섭을 적용한 공통 스트림과 개인 스트림에 대한 SINR(signal to interference and noise ratio)기반 각 사용자의 채널 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{c,k} = \log_2 \left(1 + \frac{P_c G_k}{\mathbf{1}_{active} P_1 G_k + P_2 G_k + \sigma_k^2} \right), \quad (2)$$

$$R_{p,1} = \log_2 \left(1 + \frac{P_1 G_1}{I_{2 \rightarrow 1} + \sigma_1^2} \right) + R_{IM}, \quad (3)$$

$$R_{p,2} = \log_2 \left(1 + \frac{P_2 G_2}{I_{1 \rightarrow 2} + \sigma_2^2} \right), \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{1}_{active}$ 는 인덱스 패턴에 따른 활성화 여부를 의미한다. $G_k = |h_k|^2$ 는 각 사용자의 채널 이득을 의미한다. 사용자 j 가 사용자 i 에 미치는 간섭($j \rightarrow i$)은 다음과 같다 [3].

$$I_{2 \rightarrow 1} = P_2 (\beta_{IUI} \sum_{i \in A} |h_{1,i}|^2 + \beta_{\in I} \sum_{j=1}^n |h_{2,j}|^2), \quad (5)$$

$$I_{1 \rightarrow 2} = \frac{n}{k} P_1 \beta_{\in I} \sum_{i \in A} |h_{2,i}|^2, \quad (6)$$

여기서 $\beta_{IUI} = \left| \text{sinc}(m - \frac{n \Delta f_1}{\Delta f_2}) \right|$ 를 의미한다 [4]. 전력 할당의 최적화 문제는 전송량 합계를 최대화하기 위해 다음과 같이 표현된다.

$$\max_{P_c, P_1, P_2} (R_c + R_{p,1} + R_{p,2}), \quad (7)$$

III. 모의실험 결과

제안하는 시스템의 모의실험 결과는 그림 1과 같다. 모의실험의 파라미터는 전체 부반송파 개수 $N_1 = 64$, $N_2 = 32$ 으로, $\Delta f_1 = 15\text{kHz}$, $\Delta f_2 = 30\text{kHz}$ 를 고려하였다. 두 사용자의 서브블록의 개수 $g = 16$ 로 고정하면, 각 서브블록당 부반송파 개수는 $n_1 = 4$, $n_2 = 2$ 개를 가지게 된다. 여기서 UE1은 OFDM-IM을 고려하면 n_1 개 중 활성화된 부반송파 개수를 $k = [1, 2, 3]$ 설정 가능하다. 모의실험에서는 SN(single numerology) 방식과 제안하는 MN 방식의 서로 다른 k 개 따른 전송량

합계를 비교하였다. SN 방식은 두 사용자에게 동일한 SCS를 할당하므로, 15kHz와 30kHz를 할당한 두 가지 경우(SN(15), SN(30))를 비교하였다. 비교 결과로 제안하는 시스템은 k 에 상관없이 SN(30)보다 높은 용량을 가진다. 반면 SN(15)와 비교하였을 때, 낮은 SNR에서 SN(15) 방식이 우세하지만 높은 SNR에서는 k 가 증가하면 SN 대비 MN이 우세한 경우가 있는걸 확인하였다. 이는 k 가 증가할수록 SN 방식은 IUI가 증가해 전송률 상승폭이 줄어드나 MN 방식은 간섭 분산 효과로 전송 용량 확보에 유리함을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 MN-IMMA 방식에 RSMA를 적용한 MN-RS-IMMA 기술을 제안하고, 성능을 분석하였다. RSMA 도입을 통해 MN 환경에서 발생하는 강력한 INI와 IUI를 효과적으로 제어하였다. 특히 공통 스트림을 활용하여 간섭의 일부를 공유 정보로 처리함으로써 SIC 오류 전파 문제를 줄일 수 있었다. 또한, IM의 결합을 통해 인덱스 도메인 자원을 추가로 활용하여 다중 사용자 신호 검출 시 간섭 영향을 완화하고 주파수 효율을 높일수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구성과는 2025년도 정부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2025-25436671, 50%), 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070834, 50%)

참고 문헌

- [1] Li, Jun, et al. "Index modulation multiple access for 6G communications: Principles, applications, and challenges." *IEEE network* 37.1, 52-60, 2023.
- [2] 이해영, 이상훈, 신수용. "혼합 Numerology 기반 인덱스 변조 다중 접속 기법." 한국통신학회 학술대회논문집, 36-37, 2025
- [3] Dogan Tusha, Seda, et al. "Inter numerology interference in OFDM IM systems." *IET Communications* 15.15, 1941-1949, 2021.
- [4] Mao, Juquan, et al. "Interference analysis in multi-numerology OFDM systems: A continuous-time approach." *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. 1-6, 2021.