

혼합 Numerology 기반 인덱스 변조 다중 접속 기법

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

Hye Yeong Lee, Sang Hoon Lee, Soo Young Shin

Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문에서는 차세대 무선 통신의 주파수 효율 개선을 위해 혼합 numerology 기반 인덱스 변조 다중 접속 기법을 제안한다. 제안 기법은 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 기반 두 사용자 시스템에서 채널 이득이 낮은 사용자에게만 인덱스 변조를 적용하며, 두 사용자의 신호를 전력 도메인에서 중첩 코딩하여 전송한다. 본 논문은 기존의 동일한 부반송파 간격 대신 각 사용자에게 서로 다른 부반송파 간격을 할당하는 혼합 numerology를 적용한다. 이러한 혼합 numerology로 인해 발생하는 numerology 간 간섭이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하고, 주파수 효율 성능을 비교 평가한다.

I. 서론

무선 데이터 트래픽의 폭발적인 증가와 네트워크의 다양한 서비스 요구를 만족하기 위해 차세대 무선 통신은 한정된 주파수 자원의 효율적인 활용이 필수적이다. OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)과 같은 다중 접속 및 변조 기술은 높은 주파수 효율 개선을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access, NOMA)은 비직교 자원인 전력 도메인 다중화를 통해 여러 사용자가 동일 자원을 공유하며 주파수 효율을 개선한다. 또한, 인덱스 변조(index modulation, IM)는 부반송파, 안테나 등 통신 자원의 활성화 패턴으로 추가 비트를 전송하여 전체 전송 용량을 개선할 수 있다. 최근 연구에서는 이를 결합한 인덱스 변조 다중 접속(IMMA) 기술이 제안되었으며, NOMA의 장점과 IM의 추가 정보 전달을 동시에 구현하여 개선된 성능을 보였다[1]. 그 중 [2]에서는 OFDM-IM 사용자와 OFDM 사용자의 NOMA 결합을 통해 주파수 효율 개선을 이룬 연구가 진행되었다. 그러나 이러한 연구들은 두 사용자가 고정된 numerology를 도입했다는 한계를 지닌다.

5G NR(new radio)에서는 서로 다른 지연 시간과 통신 커버리지 제약이 있는 다양한 서비스 요구 사항을 동시에 지원하기 위해 서로 다른 부반송파 간격의 구성이 공존하는 혼합 numerology(mixed/multi numerology, MN)를 도입하였다[3]. 이러한 방식은 대규모 연결이 필요로 하는 이기종 서비스를 지원하는 데 매우 중요하다. 그러나 서로 다른 numerology가 공존하게 되면 부반송파 간 직교성 손실로 인해 numerology 간 간섭(inter-numerology interference, INI)을 유발하여 시스템 성능을 저하한다[4].

본 연구에서는 혼합 numerology를 도입한 인덱스 변조 다중 접속(MN-IMMA) 기술을 제안한다. [2]의 시스템 구성을 기반으로 제안하는 시스템에 혼합 numerology를 도입하고, 이로 인해 발생하는 사용자 간 간섭(inter-user interference, IUI) 및 INI가 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

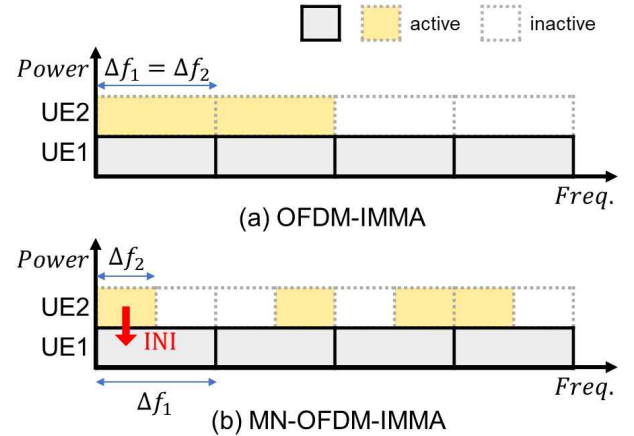


그림 1 기존 시스템과 제안하는 시스템 비교

II. 시스템 모델

그림 1은 기존 시스템과 제안하는 시스템의 비교를 나타낸다. 두 시스템은 OFDM을 사용하며, 채널 이득은 $|h_1|^2 \geq |h_2|^2$ 를 만족하는 두 사용자(UE1, UE2)를 전력 도메인으로 다중화하는 방식을 가정한다. 시스템 구성에서 UE1은 OFDM을, UE2는 OFDM-IM을 사용하며, 채널 이득이 낮은 UE2에게 높은 전력 할당값 $\alpha_1 \leq \alpha_2$ 을 적용한다. 이러한 결합 방식은 기존 OFDM-NOMA에서 모든 사용자가 전체 부반송파를 활성화하여 전력 할당값에 따른 구성 방식의 제약을 인덱스 변조의 이점으로 극복하여 다중 신호 검출 성능을 향상시킬 수 있다[2].

그림 1(a)는 [2]에서 제안된 각 사용자의 부반송파 간격이 동일한 OFDM-IMMA (혹은 SN(single numerology)-OFDM-IMMA) 시스템을 나타낸다 ($\Delta f_1 = \Delta f_2$). 그림 1(b)는 본 연구에서 제안하는 시스템으로, 각 사용자에게 서로 다른 numerology를 적용한 MN-OFDM-IMMA 방식을 보여준다. 여기서 채널 이득이 낮은 사용자에게 짧은 부반송파 간

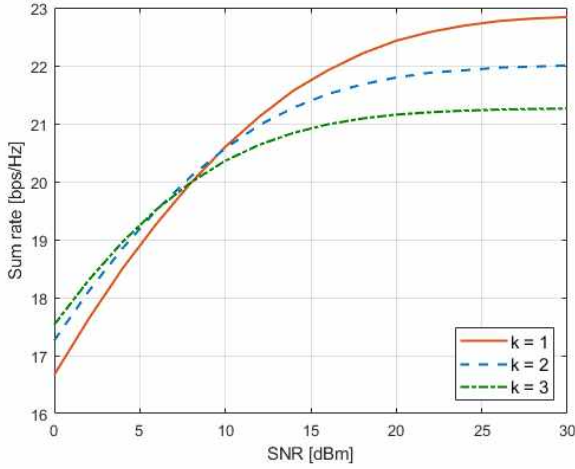


그림 2 모의실험 결과

격을 적용한다고 가정한다 ($\Delta f_1 > \Delta f_2$). 기존 시스템은 전력 도메인의 중첩코딩으로 IUI가 발생하며, 제안하는 시스템은 IUI와 다른 numerology로 인한 INI가 함께 발생한다.

UE2에서 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. OFDM-IM에 따른 전송 가능한 비트는 다음과 같다.

$$D_2 = g_2(\lfloor \log_2(C(n_2, k_2)) \rfloor + k_2 \log_2 M), \quad (1)$$

여기서 M 은 PSK/QAM 변조 방식의 차수를 의미한다. 제안하는 시스템은 기존 방식 대비 짧은 부반송파 간격을 가지므로, 같은 대역폭에서 많은 부반송파 개수를 가지게 된다 ($B = N\Delta f$). 여기서 두 시스템 모두 같은 개수의 서브블록 g 를 가진다고 가정하면, 각 서브블록에 포함된 부반송파 개수는 제안하는 방식이 많이 할당됨을 알 수 있다 ($n_2^{SN} < n_2^{MN}$). 부반송파의 개수가 많아지면 활성화할 부반송파 개수를 증가시킬 수 있고, 인덱스 변조의 추가 전송 비트가 증가한다.

간섭을 적용한 SINR(signal to interference and noise ratio) 기반 각 사용자의 채널 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_1 P |h_1|^2 |x_1|^2}{\sigma^2} \right), \quad (2)$$

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^g \frac{\alpha_2 P |h_2^i|^2 |x_2^i|^2}{\alpha_1 P |h_2^i|^2 |x_1|^2 + \gamma^{(2 \leftarrow 1)} + \sigma^2} \right), \quad (3)$$

여기서 h_2^i 는 UE2의 i 번째 서브블록에 해당하는 채널을 의미한다. $\gamma^{(2 \leftarrow 1)}$ 는 UE1이 UE2에 미치는 INI를 의미하며, 다음과 같다[4].

$$\gamma^{(2 \leftarrow 1)} = \frac{\alpha_1 P}{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} \sum_{m=1}^{N_1} |\beta(m, n)|^2 |h_2^{n, g}|^2, \quad (4)$$

여기서 $\beta(m, n) = \left| \text{sinc}\left(m - \frac{n \Delta f_1}{\Delta f_2}\right) \right|$ 를 의미한다 [5].

III. 모의실험 결과

제안하는 시스템의 모의실험 결과는 그림 2와 같다. 모의실험의 파라미터는 전체 부반송파 개수 $N_1 = 32, N_2 = 64$ 으로, $\Delta f_1 = 30\text{kHz}$, $\Delta f_2 = 15\text{kHz}$ 를 고려하였다. 두 사용자의 서브블록의 개수 $g = 16$ 로 고정하면, 각 서브블록당 부반송파 개수는 $n_1 = 2, n_2 = 4$ 개를 가지게 된다. 여기서 UE2는 OFDM-IM을 고려하면 $k = [1, 2, 3]$ 의 활성화된 부반송파를 선택할 수 있다. 모의실험에서는 전송 용량의 합 $R = R_1 + R_2$ 을 서로 다른 k 개의 따라 비교하였다. 비교 결과 낮은 SNR에서는 k 가 클수록 높은 전송 용량을 보였으나, 높은 SNR로 갈수록 k 가 낮을수록 전송 용량이 높아지는 추세를 확인할 수 있었다. 이는 활성화 부반송파의 개수에 따라 INI가 커져 성능 저하를 일으킴을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 OFDM-IMMA 기법에 혼합 numerology를 결합한 MN-OFDM-IMMA 방식을 제안하였다. 제안한 시스템은 서로 다른 부반송파 간격을 적용하여 사용자 간 자원을 유연하게 나눌 수 있으며, IUI와 INI를 고려한 전송 용량에 대해 분석하였다. 모의실험을 통해 OFDM-IM의 활성화된 부반송파 개수 변화에 따른 총 전송 용량을 비교하였고, INI가 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 향후 활성화된 부반송파 개수와 INI 간의 trade-off를 최적화하는 자원 할당 전략을 연구할 예정이다.

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(RS-2025-00553810, 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] Tusha, Armed, Seda Doğan, and Hüseyin Arslan. "A hybrid downlink NOMA with OFDM and OFDM-IM for beyond 5G wireless networks." *IEEE Signal Processing Letters*, 27, 491-495, 2020.
- [3] Zaidi, Ali A., et al. "Waveform and numerology to support 5G services and requirements." *IEEE Communications Magazine* 54.11, 90-98 2016.
- [4] Dogan Tusha, Seda, et al. "Inter numerology interference in OFDM IM systems." *IET Communications* 15.15, 1941-1949, 2021.
- [5] 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.