

비대칭 지연-도플러 그리드를 사용한 OTFS-NOMA의 도메인별 중첩 코딩

이혜영, 이만희, 신수용*

국립금오공과대학교, *국립금오공과대학교 IT융복합공학과

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

Domain-Wise Superposition Coding for OTFS-NOMA with Asymmetric Delay-Doppler Grids

Hye Yeong Lee, Man Hee Lee, Soo Young Shin*

Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문에서는 OTFS(Orthogonal Time Frequency Space)-NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access) 시스템에서 사용자 간 서로 다른 지연-도플러 그리드를 활용한 도메인별 중첩 코딩 방식을 제안한다. 각 사용자는 서로 다른 수의 지연 및 도플러 빈(bins)을 점유할 수 있으며, 이러한 비대칭적인 지연-도플러 그리드 구성에 따라 유연한 자원 할당이 가능하다. 전력 도메인에서 신호를 중첩하기 위해, 지연 도메인 기준 중첩 방식과 도플러 도메인 기준 중첩 방식의 두 가지 방안을 제안한다. 모의실험을 통해 각 도메인 기반 중첩 방식이 시스템의 비트 오류율 성능을 비교 분석하고자 한다.

I. 서론

차세대 무선 통신은 고속 차량과 위성 시나리오 및 높은 위상 잡음 지원을 요구한다. 이러한 고속 이동성 환경에서는 지연과 도플러 확산에 따른 간섭이 발생하고, 그 결과 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing)의 성능 저하를 일으킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 방식 중 하나가 OTFS (orthogonal time frequency space) 방식이다 [1]. OTFS는 지연-도플러 (delay Doppler, DD) 도메인을 활용한 2D 변조 방식으로, DD 영역에서 변조된 각 정보 심볼을 전체 시간-주파수 (time-frequency, TF) 영역으로 확산시켜 전체 채널 다이버시티를 활용하여 오류 성능을 향상시킬 수 있다.

통신 전송 효율을 위해 OTFS와 NOMA (non-orthogonal multiple access)를 결합한 기술이 제안되었다 [2,3]. [2]에서는 고속 이동성을 가진 사용자에게만 DD 도메인에서 OTFS를, 나머지 저속 이동성을 가진 사용자들에게는 TF 도메인에서 OFDM-NOMA를 이용한 중첩 코딩 방식을 제안하였다. [3]에서는 모든 사용자들이 고속 이동성을 가진 사용자라고 가정하고, DD 도메인 영역에서 전력 할당을 통한 중첩 코딩 방식을 제안하였다. 그러나 기존 방식은 모든 사용자가 같은 자원 블록을 사용하는 시나리오만 고려하였다.

본 논문에서는 각 사용자의 지연-도플러 그리드 수가 다를 경우, 즉 자원 블록의 비대칭을 이룰 때 OTFS-NOMA의 중첩 코딩 방식을 제안한다. 지연 도메인 기준 중첩 코딩 (DeSC) 방식과 도플러 도메인 기준 중첩 코딩 (DoSC) 방식으로 두 가지 도메인별 중첩 코딩 방식을 제안하고, 모의 실험을 통한 성능 비교를 수행하고자 한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 제안하는 OTFS-NOMA의 (a) 도메인별 중첩 코딩 방법과 (b) 송수신기 모델을 나타낸다. 일반적으로, OTFS 시스템은 총 MN 개의 심볼을 고려하며, 이는 M 개의 지연 빈(bins)과 N 개의 도플러 빈으로 구성된 2차원 DD 그리드 상에 매핑된다. 본 논문에서는 두 가지 사용자

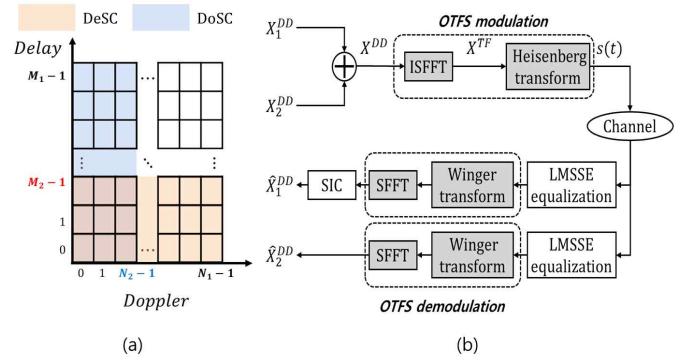


그림 1 제안하는 시스템 (a) 도메인별 중첩 코딩 방법 (b) OTFS-NOMA의 송수신기

($K=2$)에 대한 하향링크 OTFS-NOMA 시스템을 구성하며, 각 사용자(user, U_k)는 (M_k, N_k) 의 지연-도플러 빈을 가진다고 가정한다. 여기서 사용자의 채널 이득은 $|h_1|^2 > |h_2|^2$ 으로, U_1 이 기지국에서 상대적으로 거리가 가까운 사용자로, U_2 가 기지국에서 상대적으로 거리가 먼 사용자로 고려하였다. 이 때, 거리가 가까운 사용자에게 더 많은 자원 블록을 할당한다고 가정한다($M_1N_1 > M_2N_2$). 그림1(a)는 도메인별 중첩 코딩을 나타내며, 본 논문에서는 도메인별 중첩 코딩 비교를 위해 하나의 자원 블록 개수만 다르다고 가정하였다. 따라서 DeSC는 $M_1 > M_2$ 인 경우 중첩 코딩 방식이고, DoSC는 $N_1 > N_2$ 일 때 중첩 코딩 방식을 의미한다. 그림 1(b)는 OTFS-NOMA의 송수신기 시스템을 나타낸다. 두 사용자는 [3]과 같이 DD 도메인에서 중첩 코딩을 수행한다.

$$X^{DD} = \sqrt{p_1} X_1^{DD} + \sqrt{p_2} X_2^{DD}, \quad (1)$$

여기서 $\sqrt{p_k}$ 는 전력 할당 계수를 의미하여, 총 전력 할당 계수의 합은 1을

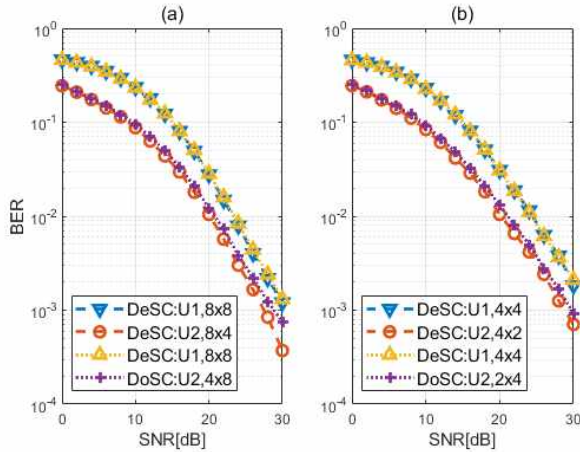


그림 2 모의 실험 결과

이루고, 가까운 사용자에서 더 작은 전력 할당 계수를 할당한다. 중첩 코딩된 신호는 ISFFT (inverse symplectic Fourier transform)을 이용해 DD 도메인의 심볼을 TF 도메인으로 확산하고, Heisenberg transform을 이용해 시간 도메인으로 변환한다. 신호는 시변 채널을 거쳐 각 사용자에게 전달되며, 각 사용자의 수신기에서는 LMMSE (linear minimum mean square error) equalizer를 이용해 채널을 추정하고 Winger transform과 SFFT를 이용해 DD 도메인으로 신호를 변환한다. U2는 높은 전력 할당 값에 따라 U1 신호를 간섭으로 취급하여 복조를 통해 원신호를 복구한다. U1은 SIC (successive interference cancellation) 방식을 도입하여 U2 신호를 검출하고 제거하여 원신호를 복구한다.

III. 모의실험 결과

제안하는 시스템의 모의실험 비교 결과는 그림 2와 같다. 모의 실험의 파라미터는 EVA [4] 채널을 고려하였으며 반송파 주파수는 4.GHz, 반송파 간격은 15kHz, 사용자 속도는 500km/h를 고려하였다. 그림 2(a)는 U1과 U2에 할당된 총 심볼이 64와 32, 그림 2(b)는 16과 8에 대한 두 가지 도메인별 중첩 코딩의 오류율 비교를 나타낸다. 두 시나리오 모두 DeSC가 DoSC보다 오류율이 개선됨을 확인할 수 있었다. 이는 채널 지연으로 인한 간섭 효과가 채널 도플러 확산으로 인한 간섭 효과보다 적기 때문이다.

IV. 결론

본 논문에서는 고속 이동성 환경의 주파수 효율 개선을 위해 OTFS-NOMA에서 도메인별 중첩 코딩 방식에 대해 제안하였다. OTFS-NOMA는 DD 도메인에서 고속 이동성을 가진 두 사용자들의 중첩 코딩을 이용하였으며, 두 사용자의 총 자원 블록의 수가 다를 때 지연/도플러 도메인 기준의 DeSC와 DoSC 방식을 제안하였다. 모의 실험을 통해 오류율을 비교하였으며, 채널의 지연과 도플러 확산으로 인한 간섭 효과에 따라 DeSC가 DoSC보다 오류율이 개선됨을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 - 학·석사연계 ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2022-00156394, 50%), 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로

수행되었음 (IITP-2025-RS-2023-00259061, 50%)

참고 문헌

- [1] Hadani, Ronny, et al. "Orthogonal time frequency space modulation." *2017 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*. IEEE, 2017.
- [2] Ding, Zhiguo, et al. "OTFS-NOMA: An efficient approach for exploiting heterogenous user mobility profiles." *IEEE Transactions on Communications*, 67.11, 7950-7965, 2019
- [3] Chatterjee, Aritra, et al. "Nonorthogonal multiple access with orthogonal time - frequency space signal transmission." *IEEE Systems Journal*, 15.1, 383-394, 2020
- [4] ITU, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMTadvanced," International Telecommunication Union, Geneva, Recommendation M2135, Dec. 2009.