

직교 주파수 분할 다중화 시스템에서 비율 분할 다중 접속 기반의 서브밴드 프리코딩

문정현, 조혜상, 최준일
한국과학기술원, 한국과학기술원, 한국과학기술원

jh0908@kaist.ac.kr, nanjohn96@kaist.ac.kr, junil@kaist.ac.kr

Subband Precoding Based on Rate-Splitting Multiple Access in OFDM Systems

Moon Jeonghyun, Cho Hyesang, Choi Junil
KAIST

요 약

본 논문에서는 다중 사용자 다중 입력 단일 출력 직교 주파수 분할 다중화(multi-user multiple-input single-output orthogonal frequency division multiplexing, MU-MISO-OFDM) 하향링크 환경에서 비율 분할 다중 접속(rate-splitting multiple access, RSMA) 기반 서브밴드 프리코딩 시스템을 제안한다. 기존의 공간 분할 다중 접속(space division multiple access, SDMA) 기반 OFDM 시스템에서는 서브밴드 단위로 프리코딩을 하며, 프리코더와 서브캐리어들 간의 채널 상태 정보(channel state information, CSI) 불일치 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 서브밴드 프리코딩이 적용된 OFDM 시스템에 CSI 불확실성에 강인한 RSMA를 도입한다. 제안한 시스템에서 연속 볼록 근사(successive convex approximation, SCA) 기법을 통해 서브밴드 프리코더와 공통 전송률 비율을 공동으로 최적화하여 합산 및 최소 전송률을 최대화하는 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과, RSMA 기반 서브밴드 프리코딩이 SDMA 기반 서브밴드 프리코딩 대비 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

I. 서 론

RSMA는 SDMA 및 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access, NOMA)과 같은 기존 다중 접속 기법의 한계를 극복하기 위해 제안되었다 [1]. RSMA 시스템에서는 송신기가 각 사용자의 메시지를 공통(common) 부분과 개인(private) 부분으로 분할한다. 서로 다른 사용자들의 공통 메시지는 하나의 공통 메시지로 결합되며, 공통 메시지와 각 사용자의 개인 메시지는 각각 공통 스트림과 개인 스트림으로 인코딩(encoding)된 후 전송된다. 각 수신기는 먼저 공통 메시지를 디코딩(decoding)한 뒤, 연속 간섭 제거(successive interference cancellation, SIC)를 적용하여 개인 메시지를 디코딩한다. 이러한 과정을 통해, RSMA는 간섭의 일부를 디코딩하고 나머지를 잡음으로 처리함으로써 간섭을 능동적으로 제어할 수 있다. 이와 같은 특성으로 인해 RSMA는 SDMA와 NOMA를 특수한 경우로 포함하는 일반화된 다중 접속 기법으로서, 기존 다중 접속 기법 대비 우수한 성능을 제공하며, 불완전한 CSI에서도 강인한 특성을 갖는다.

RSMA는 SDMA와 유사하게 OFDM과 결합될 수 있다. 기존의 RSMA와 OFDM의 결합을 다룬 연구에서는 각 서브캐리어 별로 프리코딩을 적용하였다. 그러나, 3GPP 규격 [2]에 따르면, OFDM 시스템에서는 일반적으로 여러 개의 서브캐리어로 구성된 서브밴드에 대해 각각 하나의 프리코더를 적용한다. 이때, zero-forcing(ZF) 및 maximum ratio transmission(MRT)과 같은 기존의 프리코더는 각 서브밴드의 대표 CSI를 기반으로 설계된다. 각 서브캐리어는 서로 다른 CSI를 가지므로, 하나의 프리코더를 서브밴드 내의 모든 서브캐리어에

적용할 경우, 프리코더와 서브캐리어들의 실제 CSI 간의 불일치가 발생하게 된다.

이러한 CSI 불일치 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 CSI 불확실성에 대한 RSMA의 강인성을 활용하여 MU-MISO-OFDM 하향링크 환경에서 RSMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템을 제안한다. 제안한 RSMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템에 대해 합산 전송률 및 최소 전송률을 최대화하는 서브밴드 프리코더 문제를 설정한다. 합산 전송률 및 최소 전송률은 서브밴드 프리코더와 각 사용자의 공통 메시지에 할당되는 전송률 비율을 공동으로 최적화함으로써 최대화한다. 설정한 문제의 비볼록성을 해결하기 위해 SCA 기법을 적용한다. 시뮬레이션 결과를 통해, 제안한 RSMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템이 기존의 SDMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템 대비 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

II. 본론

본 논문에서는 기지국(base station, BS)이 N_t 개의 안테나를 통해 K 명의 단일 안테나 사용자를 지원하는 MU-MISO-OFDM 하향링크 시스템을 고려한다. 이때, 사용자 집합은 $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 로 정의한다. OFDM 시스템을 고려함에 따라, 다중 탭 시간 영역 채널은 길이 L 의 순환 접두부(cyclic prefix, CP)를 추가하고 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform, DFT)을 적용함으로써 N 개의 병렬적인 주파수 영역 채널로 변환된다. 이에 따라 N 개의 서브캐리어를 통한 직교 전송이 가능해진다. 실용적인 OFDM 시스템을 반영하기 위해, 본 논문에서는 인접한 M 개의 서브캐리어를 하나의 서브밴드로 가정하며, 전체 서브밴드의 개수는 $G = N/M$ 으로 정의한다.

제안하는 RSMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템에서는 1-layer RSMA [1]를 적용한다. g 번째 서브밴드의 m 번째 서브캐리어에서의 송신 신호는 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{x}_{g,m} = \mathbf{f}_{c,g} s_{c,g,m} + \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_{k,g} s_{k,g,m}$$

여기서 공통 스트림 $s_{c,g,m}$ 은 $\mathbf{f}_{c,g} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 에 의해 프리코딩되며, k 번째 사용자의 개인 스트림 $s_{k,g,m}$ 은 $\mathbf{f}_{k,g} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 에 의해 프리코딩된다. 서브밴드 프리코딩이 적용되므로, 프리코더에는 서브캐리어 인덱스 m 이 포함되지 않으며, 이는 동일한 서브밴드 내의 모든 서브캐리어에 동일한 프리코더가 적용됨을 의미한다.

g 번째 서브밴드의 m 번째 서브캐리어에서 k 번째 사용자가 수신하는 신호는 아래와 같다.

$$y_{k,g,m} = \mathbf{h}_{k,g,m}^H \mathbf{x}_{g,m} + z_{k,g,m}$$

여기서 $\mathbf{h}_{k,g,m}$ 는 주파수 영역 채널을 나타내며, $z_{k,g,m} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 는 복소 가산 백색 가우시안 잡음(complex additive white Gaussian noise, AWGN)이다. 수신기는 먼저 공통 스트림을 디코딩한 후, 공통 스트림의 영향을 제거하고 개인 스트림을 디코딩한다. g 번째 서브밴드의 m 번째 서브캐리어에서 k 번째 사용자의 공통 스트림 및 개인 스트림의 전송률은 각각 다음과 같다.

$$R_{k,g,m}^c = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{k,g,m}^H \mathbf{f}_{c,g}|^2}{\sum_{i=1}^K |\mathbf{h}_{k,g,m}^H \mathbf{f}_{i,g}|^2 + \sigma^2} \right),$$

$$R_{k,g,m}^p = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{k,g,m}^H \mathbf{f}_{k,g}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{h}_{k,g,m}^H \mathbf{f}_{i,g}|^2 + \sigma^2} \right)$$

모든 사용자가 공통 스트림을 디코딩할 수 있어야 하므로, 제안하는 시스템의 공통 전송률은 아래와 같이 정의된다.

$$R_c = \min_{k \in \mathcal{K}} \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M R_{k,g,m}^c$$

g 번째 서브밴드의 m 번째 서브캐리어에서 k 번째 사용자가 달성할 수 있는 전송률은 아래와 같다.

$$R_{k,g,m} = C_{k,g,m} + R_{k,g,m}^p$$

여기서 $C_{k,g,m}$ 은 g 번째 서브밴드의 m 번째 서브캐리어에서 k 번째 사용자에게 할당되는 공통 전송률의 비율을 의미하며, $\sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M C_{k,g,m} = R_c$ 를 만족한다. 이에 따라 k 번째 사용자의 전체 전송률은 아래와 같다.

$$R_k = \frac{1}{N+L} \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M R_{k,g,m}$$

제안하는 시스템의 합산 전송률과 최소 전송률은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K R_k, \quad R_{\min} = \min_{k \in \mathcal{K}} R_k$$

제안한 RSMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템에 대해 합산 전송률 최대화 문제와 최소 전송률 최대화 문제는 각각 아래의 (P1)과 (P2)로 설정한다.

$$(P1): \max_{\{\mathbf{F}_g\}_{g=1}^G, \mathbf{c}} R_{\text{sum}}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M C_{k,g,m} \leq R_c \quad (1a)$$

$$C_{k,g,m} \geq 0, \forall k \in \mathcal{K}, \forall g \in \mathcal{G}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (1b)$$

$$\sum_{g=1}^G \|\mathbf{F}_g\|_F^2 \leq \frac{P}{M} \quad (1c)$$

$$(P2): \max_{\{\mathbf{F}_g\}_{g=1}^G, \mathbf{c}} R_{\min}$$

$$\text{s.t.} \quad (1a) - (1c)$$

(P1)과 (P2)는 목적함수와 제약조건 (1a)로 인해 비볼록한 특성을 갖는다. 이러한 비볼록성을 해결하기 위해, 본 논문에서는 SCA 기법을 활용하여 local optimal 지점 해를 구한다. 자세한 내용은 분량 제한으로 인해 생략한다.

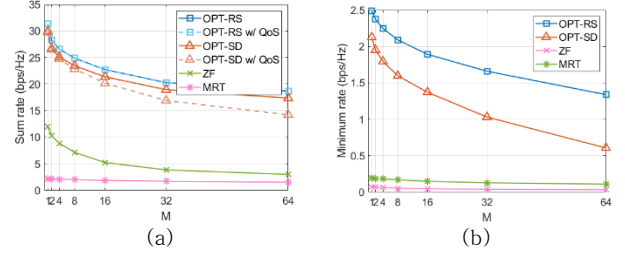


그림 1. M 에 따른 (a) 합산 전송률 과 (b) 최소 전송률

결과를 검증하기 위해 제안 기법을 1) 최적화 기법을 통한 SDMA 기반 서브밴드 프리코딩과 2) ZF 기반의 서브밴드 프리코딩, 3) MRT 기반의 서브밴드 프리코딩의 3 가지 기법과 비교한다. 그림 1 을 확인하면 제안한 RSMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템이 기존의 SDMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템 대비 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 CSI 불확실성에 대한 RSMA 의 강인성을 활용하여 MU-MISO-OFDM 시스템에서 RSMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템을 개발하였다. 제안한 시스템은 합산 전송률 및 최소 전송률을 최대화하기 위해 SCA 기법 기반의 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, 제안한 RSMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템이 기존 SDMA 기반 서브밴드 프리코딩 시스템 대비 우수한 성능을 보이는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2026-RS-2020-II201787, 20 %)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 6G·클라우드 리더십구축을 위한 교육·연구 오픈 허브 연구 결과로 수행되었음 (IITP-2026-RS-2024-00428780, 80 %)

참 고 문 헌

- [1] Y. Mao, B. Clerckx, and V. O.K. Li, "Rate-Splitting Multiple Access for Downlink Communication Systems: Bridging, Generalizing, and Outperforming SDMA and NOMA," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2018, no. 133, May 2018.
- [2] 3GPP, TS 38.214, "5G NR: Physical layer procedures for data," V17.1.0, May 2022.