비율 분할 협력 통신을 활용한 THz 통신 시스템 커버리지 증대 기법

조혜상, 고범수, 최준일*
한국과학기술원, 한국과학기술원, *한국과학기술원

nanjohn96@kaist.ac.kr, kobs0318@kaist.ac.kr, *junil@kaist.ac.kr

Cooperative Rate-Splitting to Enhance THz Communication System Coverage

Cho Hyesang, Ko Beomsoo, Choi Junil*
KAIST, KAIST, *KAIST

요 약

본 논문에서는 THz 주파수 대역에서의 비율 분할 협력 통신 (cooperative rate-splitting, CRS) 시스템을 제안한다. 구체적으로, rate-splitting 과 유저 그룹화를 활용하여 높은 성능을 달성하는 extraction based CRS (eCRS) 통신 구조를 제안하며, 그 중 한 가지 경우에 대하여 최적화 문제를 설계 및 해결한다. 또한, 문제 설계 시 높은 주파수 신호들의 특성을 고려한 cooperative channel model 을 제안한다. 제안 기법은 rate-splitting 의 장점을 활용하며 높은 성능을 보이며, 기존 기법에 비하여 높은 정보 전달율을 달성하는 것을 확인할 수 있다.

Ⅰ. 서 론

THz 대역 통신 시스템은 넓은 대역폭을 활용하여 굉장히 높은 정보 전달율을 기대할 수 있으며, 미래 무선 통신 시스템의 주요 기술 중 하나로 각광받고 있다. 하지만, THz 통신 시스템은 굉장히 심한 전파 감쇄와 함께 차단에도 굉장히 취약하여, 낮은 커버리지를 가진다.

낮은 커버리지를 극복하기 위해, 본 논문에서는 협력 통신의 개념을 활용한다. 기존의 중계기 시스템은 중계만을 위한 기기를 사용하는 반면, 협력 통신은 정보를 전달하는 중간 매개체로 다른 단말을 사용한다. 즉 중간 매개체들은 정보를 받음과 동시에 다른 단말에 대한 정보를 전달한다. 많은 개수의 단말이 사용될 것으로 전망 받는 환경에서는 해당 협력 통신은 굉장히 효과적일 것으로 예상할 수 있다.

본 논문에서는 기존에 존재하던 협력 통신의 성능을 더욱 증가시키기 위해 rate-splitting multiple access (RSMA)의 개념을 활용한다 [1]. RSMA 란 기존에 존재하는 spatial division multiple access (SDMA)나 non-orthogonal multiple access (NOMA)를 수학적으로 포괄하는 기법으로, 이를 협력 통신에 활용하는 extraction-based cooperative rate-splitting (eCRS) 기법을 제안한다. 결과를 통해 제안 기법은 기존의 NOMA 를 활용하는 기법에 비하여 월등한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Ⅱ. 본론

본 논문에서는 N 개의 안테나를 가진 access point (AP)가 총 $K+1$ 개의 단일 안테나 단말 (user equipment, UE)을 지원하는 환경을 가정한다. 여기서 한 개의 UE 는 AP 와의 채널이 완전히 막혀 있다고 가정하며, 해당 UE 를 destination UE (dUE)로 정의한다. 이후 dUE 를 성공적으로 지원하기 위해 나머지 K 개의 UE 들이 협력 통신을 통해 dUE 에게 정보를 전달한다고 가정하며, 해당 UE 들을 medium UE (mUE)로 정의한다.

협력 통신 구조는 총 두 개의 단계로 이루어져 있으며, 첫 번째 단계에서는 AP 가 mUE 들에게 mUE 와 dUE 의 정보를 전달하며, 두 번째 단계에서는 mUE 들이 dUE 에게 정보를 전달한다. 협력 통신 과정 속 RSMA 개념을 활용하기 위해서는 dUE 의 정보를 전달하는 방식을 정해야 한다. 즉, dUE 의 정보를 모두 분할하여 각각의 mUE 들에게 다른 정보를 전달할 수 있고, 모든 mUE 들에게 dUE 의 정보를 동일하게 전달할 수도 있다. 각각의 경우에 장단점이 존재하지만, 본 논문에서는 분량의 제한으로 인해 가장 보편적인 경우인 mUE 들에게 같은 dUE 정보를 전달하는 경우를 고려하며, 이를 identical eCRS (IeCRS) 경우로 정의한다.

수학적으로, AP 는 k 번째 mUE 에게 W_k 의 정보를 전달하며, dUE 에게는 W_d 의 정보를 전달한다. 이때 RSMA 에서는 UE 들을 위한 정보를 분할하여 성능을 높이는 작업을 진행한다. 구체적으로, RSMA 에서는 common stream 의 개념을 활용하여 UE 들에게 전달되는 잡음의 크기와 간섭의 크기를 능동적으로 조절하여 최적의 성능을 달성한다. 이를 위해서 IeCRS 에서는 k 번째 mUE 의 정보를 각각 $W_{c,k}$ 의 common part 와 $W_{p,k}$ 의 private part 로 나누며, $W_{c,k}$ 들과 W_d 를 하나의 W_c 로 합쳐 정보를 s_c 의 common stream 으로 전송한다. 그 외에 나머지 정보 $W_{p,k}$ 는 각각 s_k 의 private stream 으로 전송한다. 이에 결론적으로 총 $K+1$ 개의 데이터 스트림으로 전송하게 되며, s_c 에는 dUE 의 정보와 함께 분할한 mUE 들의 정보, s_k 에는 k 번째 mUE 를 위한 정보가 들어있다.

AP 에서는 $K+1$ 개의 데이터 스트림을 빔포밍하여 통신하기 위해 다음과 같이 신호를 송신한다.

$$x = \mathbf{f}_c s_c + \sum_{k=1}^{K} \mathbf{f}_k s_k.$$

이때 $\mathbf{f}_c$ 와 $\mathbf{f}_k$ 는 각각 common stream 을 위한 빔포머와 k 번째 private stream 을 위한 빔포머이다.

이후 k 번째 UE 기준 채널 $\mathbf{h}_k$ 를 겪어, common stream 의 경우

$$R_{c,k} = \log_2\left(1 + \frac{\left|\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_c\right|^2}{\left|\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_k\right|^2 + I_k + 1}\right)$$

의 정보 전달율을 가지며, 이때 I_k 는 다른 private stream 으로부터의 간섭이다. 또한 common stream 은 모든 단말들이 decoding 할 수 있어야 하기 때문에, 아래와 같은 수식을 만족해야 한다.

$$C_d + \sum_{i=1}^{K} C_i \le R_{c,k}, \forall k \in \mathcal{K}.$$

이 때, C_d는 common stream 속 dUE 의 정보량, C_k의 경우 common stream 속 k 번째 mUE 를 위한 정보량이다. 또한 유사하게, k 번째 private stream 의 경우

$$R_{p,k} = \log_2\left(1 + \frac{\left|\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_k\right|^2}{I_k + 1}\right)$$

의 정보 전달율을 가진다. 결론적으로 mUE 들은 common stream 과 private stream 에서의 정보들을 받아 총 $R_k = C_k + R_{p,k}$의 정보량을 얻는다.

두 번째 단계, 즉 mUE 들이 dUE 에게 정보를 전달하는 단계에서는 mUE 들은 dUE 만의 정보를 전달한다. mUE 들은 dUE 의 정보를 s_d 로 인코딩하여 전달하며, 모두 dUE 에게 해당 정보를 전달하는 것을 알 수 있다. 이때 k번째 mUE 가 전달하는 정보를 $x_{d,k} = f_{d,k}s_d$로 표현 가능하며, dUE 가 받는 신호는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$y_d[m] = \sum_{k=1}^{K} g_k x_{d,k}[m - \tau_k] + z_d[m]$$

$$= \sum_{k=1}^{K} \bar{g}_k s_d[m - \tau_k] + z_d[m].$$

여기서 g_k 는 k 번째 mUE 에서 dUE 로의 채널, z_d 는 잡음이며, $\bar{g}_k = g_k f_{d,k}$ 이다. 수식을 보면 알 수 있듯, 여기서 cooperative channel model 이 나타나게 된다. mUE 들이 dUE 에게 정보를 전달할 시, THz 대역 통신 시스템의 특성상 매우 빠른 샘플링 속도를 가져, 해당 신호들은 서로 다른 tap 에 dUE 에게 도달하게 된다. 이는 frequency-selective channel 과 매우 유사하지만, 한 가지 차별점은 각각의 mUE 로부터 오는 신호를 따로 조절할 수 있어 새로운 자유도를 가진다. 본 연구에서는 해당 문제를 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 기법으로 문제 풀이를 진행하였다.

OFDM 으로 변환을 진행하면 n 번째 부반송파에서의 채널은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{g}_n = \sum_{k=1}^{K} \bar{g}_k \exp\left(-\frac{j2\pi\tau_k n}{N_c}\right).$$

여기서 N_c 는 부반송파의 총 개수이다. 이후 cyclic prefix 의 길이를 무시하면, OFDM 시스템에서의 총 정보 전달율은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$R_d^{(2)} = \frac{1}{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} \log_2(1 + |\tilde{g}_n|^2).$$

이후 dUE 가 받는 정보 전달율의 양은 첫 번째 단계와 두 번째 단계에서의 최솟값만을 받을 수 있기 때문에, 최종 정보 전달율은 $R_d = \min(C_d, R_d^{(2)})$이다.

이후 해당 시스템을 기반으로 최소 정보 전달율 최대화 문제는 아래와 같이 설계 가능하다.

$$(P1): \max_{\mathbf{F},c,\tilde{\mathbf{g}}} \min\{R_1, \dots, R_K, R_d\}$$

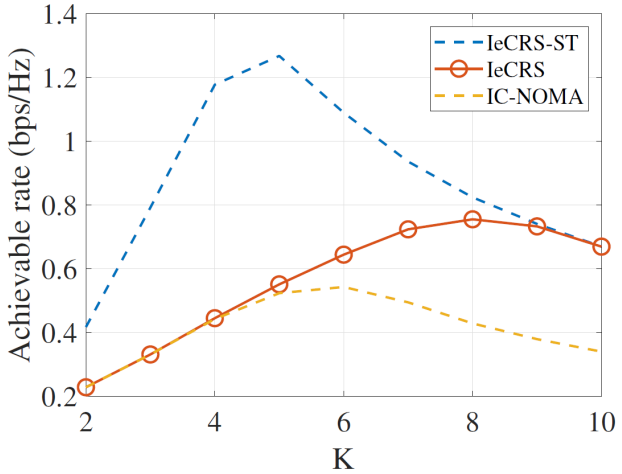
$$\text{s.t. } R_k = R_{p,k} + C_k,$$

$$C_d + \sum_{i=1}^{K} C_i \le R_{c,k}, \forall k \in \mathcal{K}.$$

$$R_d = \min(C_d, R_d^{(2)})$$

$$\text{tr}(\mathbf{F}\mathbf{F}^H) \le P_{AP}, |\bar{g}_k|^2 \le |g_k|^2 P_k$$

여기서 마지막 두 개의 제약은 AP 와 mUE 들의 최대 전력량이며, 변수들은 빔포머와 rate-splitting 비율 분할의 비율인 것을 확인할 수 있다. 이후 해당 문제는 weighted minimum mean square error (WMMSE) 기법으로 해결하여 local optimal 지점 해를 구할 수 있으며, 이는 분량의 제한으로 생략하였다.



결과를 검증하기 위해 두 개의 비교대상으로 1) Rate-splitting 의 개념을 활용하지 않는 IC-NOMA 와 2) 현실적인 cooperative channel model 을 고려하지 않고 동시에 mUE 들의 정보가 도달한다고 가정하는 IeCRS-ST 를 사용하였다. 그림 1 을 확인하면 제안 기법인 IeCRS 가 IC-NOMA 에 비해 높은 성능을 내는 것으로 제안 기법의 뛰어난 성능을 확인할 수 있다. 두 번째로 제안 기법이 IeCRS-ST 에 비하여 성능이 낮은 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 정확한 채널 모델을 통해 성능을 검증하는 것의 중요성을 알 수 있다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 THz 대역 통신 시스템의 커버리지 증대를 위하여 RSMA 의 개념을 활용하는 협력 통신 기법을 제안하였으며, 결과를 통해 제안 기법은 기존의 기법에 비하여 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 또한, THz 대역에서의 채널 모델을 제안하여 기존보다 정확한 성능 분석을 진행하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과 (IITP-2020-0-01787)와 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-00269, 6 세대 Tbps 급 데이터 전송율을 지원하는 sub-THz 대역 무선 전송 및 접속 요소 기술 개발)

참 고 문 헌

[1] Y. Mao, et al, “Rate-Splitting Multiple Access: Fundamentals, Survey, and Future Research Trends,” IEEE Commun. Surv. Tutor., vol.24, no. 4, Jul. 2022.