

테라헤르츠 다중입출력 시스템에서 주파수-중속 프리코딩을 이용한 빔 트레이닝 기법

김 승 년*, 심 병 호^o

Frequency-Dependent Precoding Based Beam Training in Terahertz Massive MIMO Systems

Seungnyun Kim*, Byonghyo Shim^o

요 약

본 논문에서는 테라헤르츠 (terahertz, 이하 THz) 대용량 다중입출력 (THz massive MIMO) 시스템의 빔 트레이닝 (beam training) 오버헤드를 감소시키는 프리코딩 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 기법은 실시간 지연기 (real time delay)를 사용하여 주파수-중속 빔을 생성하고 각 주파수-중속 빔을 통해 단말에 대한 출발각을 추정한다. 주파수-중속 빔을 통해 한 번에 여러 각도로 트레이닝 빔을 송신 할 수 있기 때문에 빔 트레이닝 오버헤드를 획기적으로 감소시켰으며 이를 실험결과를 통해 확인하였다.

Key Words : THz, wideband, massive MIMO, frequency-dependent, beam training

ABSTRACT

In this paper, we propose a fast beam training scheme reducing the beam training overhead in terahertz massive multiple input/output (THz massive MIMO) system. The proposed technique generates a frequency-dependent beam using the real time delay (RTD) and estimates angle-of-departure (AoD) for user equipment (UE) through each frequency-dependent

beam. Since the frequency-dependent beams can be exploited to probe multiple angles at a time, we can reduce the beam training overhead significantly.

I. 서 론

THz 주파수 대역(0.1 ~ 10 THz)의 풍부한 주파수 자원을 활용 6G에 대한 증가하는 수요를 충족 할 수 있는 테라헤르츠(THz) 통신은 최근 몇 년 동안 많은 관심을 받고 있다¹⁾. THz 통신의 잘 알려진 한계는 THz 대역에서의 높은 회절 및 전파 손실로 인한 수신 신호 전력의 감쇠가 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 대용량 MIMO(Massive Multiple-Input Multiple-Output)로 구현된 빔포밍(beamforming) 기법이 널리 사용된다. 빔포밍 이득은 빔이 신호 전파 경로와 적절하게 정렬될 때 최대화되기 때문에 THz 전파 채널 경로의 정확한 출발각 (AoD)의 획득이 중요하다. 출발각 획득은 기지국 (BS)이 트레이닝 빔을 전송하고 단말 (UE)은 참조 신호의 수신 세기가 가장 큰 빔의 인덱스를 기지국 (BS)에 피드백하는 절차에 의해 수행된다. 이러한 일련의 과정을 빔 트레이닝(빔 트레이닝)이라고 한다.

수년에 걸쳐 다양한 빔 트레이닝 기법이 제안되었다. 5G NR에서는 DFT 코드북에서 최적의 빔 인덱스를 exhaustive search하는 빔 스위핑 (beam sweeping) 기법을 사용한다²⁾. 더 나아가, mmWave 채널의 회소성을 활용한 계층적 다중 레벨 코드북 기반 빔 트레이닝 기법이 제안되었다³⁾. 이 때, 안테나 수가 증가할수록 빔폭이 좁아지게 되며 정확한 출발각 획득을 위해 요구되는 트레이닝 빔의 수가 증가하는데 하나의 시간 슬롯에서 한 곳의 방향만 탐색하는 기존 기법은 THz massive MIMO 시스템에서 엄청난 빔 트레이닝 오버헤드 발생을 초래한다.

본 논문에서는 wideband THz massive MIMO 시스템의 빔 트레이닝 오버헤드를 줄이기 위한 빔 트레이닝 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 핵심 아이디어는 기지국이 실시간 지연기(real time delay)를 이용하여 부반송파 주파수 별로 다른 방향을 향하는 주파수-중속 빔을 생성한다. 실시간 지연기는 입력 신호에 조절가능한 시간 지연을 발생시켜 위상 천이를 발생시킨다. 이때 발생된 위상천이는 주파수의 함수이기

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD190033ED).

• First Author : (ORCID:0000-0001-6435-9029)Seoul National University, INMC, snkim@islab.snu.ac.kr, 정회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-5051-1763)Seoul National University, INMC, bshim@snu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202210-240-A-LU, Received October 4, 2022; Revised October 7, 2022; Accepted October 7, 2022

때문에 실시간 지연기를 사용하여 주파수-중속 빔을 생성할 수 있다. 또한 생성된 주파수-중속 빔을 빔 추적에 이용하여 하나의 시간 슬롯 내에 여러 방향을 한번에 탐색하기 때문에 빔 트레이닝 오버헤드를 획기적으로 감소할 수 있다. 단일 안테나 다중 단말로 이루어진 시스템에서 제안된 주파수-중속 빔 기반 빔 트레이닝과 달리 본 논문은 MIMO 시스템에서 고려된 주파수-중속 빔 기반 빔 트레이닝 기법을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. 서론에 이어 II장에서는 시스템 모델을 설명한다. 또한 III장에서 주파수-중속 프리코딩을 소개하며 IV장에서는 실험결과를 설명한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N_t 개의 균등 배열 선형안테나 시스템을 가지는 기지국과 N_r 개의 균등 배열 선형안테나 시스템을 가지는 단말이 대역폭 B 과 반송파 f_c 그리고 N_F 개의 부반송파를 쓰는 직교 주파수 분할 다중 방식 (OFDM)를 통해 통신하는 시스템을 가정하였다. 채널 모델은 line-of-sight (LoS) 채널 모델을 사용하였으며 k 번째 부반송파에서의 기지국과 단말 사이 하향링크 채널행렬은 아래와 같이 나타낸다

$$\mathbf{H}[k] = \sqrt{N_t N_r} \beta_k \mathbf{g}_k \mathbf{a}(\phi_k) \mathbf{a}^H(\theta_k) \quad (1)$$

여기서 $g_k \sim CN(0,1)$ 는 소규모 페이딩 계수, β_k 는 대규모 페이딩 계수, 그리고 $\phi_k \in [-1,1)$ 와 $\theta_k \in [-1,1)$ 는 차례로 도래각과 출발각을 의미하며 $\mathbf{a}(\phi_k)$ 와 $\mathbf{a}(\theta_k)$ 는 각각 기지국 안테나 구조에 의해 정의되는 방향벡터를 나타낸다. 이때 단말이 수신한 신호 $y[k]$ 는 다음과 같다.

$$y[k] = \mathbf{w}^H \mathbf{H}[k] \mathbf{f}_{RF}[k] s[k] + \mathbf{w}^H n[k] \quad (2)$$

여기서 \mathbf{w} 와 $n[k] \sim CN(0, \sigma_n^2)$ 는 각각 단말의 빔포밍 벡터와 가우시안 잡음이다.

III. 주파수-중속 프리코딩 기반 빔 트레이닝 기법

본 절에서는 주파수-중속 프리코딩과 주파수-중속 프리코딩을 이용한 빔 트레이닝 기법을 소개한다. 기지국은 RF 체인과 N 개의 위상 천이기로 이루어진 아날로그 빔포머 사이에 실시간 지연기로 이루어진 Modifier와 Intensifier를 배치하여 주파수-중속 빔을

생성한다. Modifier와 Intensifier는 각각 N_m 과 N_i 개의 실시간 지연기로 이루어져 있으며 sub-connected 되어있다. 이때, k 번째 부반송파 주파수

$$f_k = f_c + \frac{B}{N_F} \left(k - 1 - \frac{N_F - 1}{2} \right)$$

에서의 빔포밍 벡터 $\mathbf{f}_{RF}[k]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{f}_{RF}[k] = \mathbf{f}_a \odot \mathbf{f}_i[k] \odot \mathbf{f}_m[k] \quad (3)$$

여기서 \mathbf{f}_a 는 analog 빔포밍 벡터, $\mathbf{f}_i[k]$ 는 intensifier 벡터 그리고 $\mathbf{f}_m[k]$ 는 modifier 벡터이며 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_a &= \frac{1}{\sqrt{N_t}} [1, \dots, e^{j\pi(N_t-1)\psi}], \\ \mathbf{f}_i[k] &= \mathbf{1}_{N_m} \otimes [1, \dots, e^{j2\pi(N_i-1)f_k\tau_i}], \\ \mathbf{f}_m[k] &= [1, \dots, e^{j2\pi(N_m-1)f_k\tau_m}] \otimes \mathbf{1}_{N_i} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ψ , τ_i , τ_m 는 차례로 아날로그 빔포머에서의 위상 천이, Intensifier와 Modifier에서의 시간 지연이다. 주파수-중속 프리코더를 사용하여 트레이닝 빔을 생성하기 위해서 먼저, 기지국은 빔 추적을 수행할 각도영역 $[\phi - \alpha, \phi + \alpha)$ 을 정의한다. 여기서 ϕ 는 각도 영역의 중심 각도이며 α 는 범위이다. 이때

$$\begin{aligned} \psi &= \phi - \alpha \left(\frac{2f_c}{B} - \frac{1}{N_F} \right), \\ \tau_m &= \frac{N_i \alpha}{B}, \\ \tau_i &= \frac{\alpha}{B} \end{aligned} \quad (5)$$

을 각 아날로그 빔포머에서의 위상 천이, Intensifier와 Modifier에서의 시간 지연으로 설정할 경우, 부반송파 주파수 f_k 에 대해서 생성된 $\mathbf{f}_{RF}[k]$ 가

$$\phi_k = \phi - \alpha + 2 \frac{\alpha}{N_F} (k - 1)$$

를 향하는 N_F 개의 주파수-중속 트레이닝 빔들을 얻을 수 있다. 기지국은 빔 추적할 각도영역의 α 를 줄여나가며 계층적으로 빔 트레이닝을 수행한다. 그림 1은 $N_t = 64$, $N_m = 8$, $N_i = 8$, $N_F = 16$, $f_c = 100\text{GHz}$, $B = 10\text{GHz}$, $\alpha = 1$, $\phi = 0$ 일 때 주파수-중속 프리코더를 이용하여 생성된 트레이닝 빔들의 빔 패턴을 나타낸다. 주파수-중속 프리코더를 통해 생성된 k 번째 부반송파의 빔포밍 벡터 $\mathbf{f}_{RF}[k]$ 이 빔포밍 이득의 손실 없이 $\phi_k = -1 + (k - 1)/8$ 를 향하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 주파수-중속 프리코딩 기반하여 빔 트레이닝 오버헤드를 감소시키기는 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 기존 빔 트레이닝 기법과 비교하여 훨씬 적은 시간 슬롯으로 더 좋은 성능을 보임을 실험결과를 통해 확인하였다.

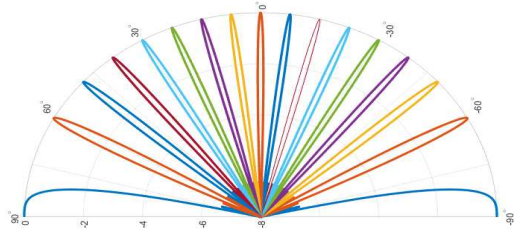


그림 1. 주파수-중속 프리코더를 이용하여 생성된 트레이닝 빔들의 빔 패턴.
Fig. 1. Beam pattern of the frequency-dependent precoder.

IV. 실험 결과

본 절에서는 제안하는 주파수-중속 프리코딩 기반 빔 트레이닝 기법의 시뮬레이션 결과를 제시한다. 비교 기법으로는 5G NR의 beam sweeping과 기존 delay-phase precoding (DPP) 기반 빔 트레이닝 기법^[5]을 사용하였다. 실험 파라미터로 $N_t = 256$, $N_r = 4$, $N_m = 16$, $N_i = 16$, $N_f = 256$, $f_c = 100\text{GHz}$, $B = 10\text{GHz}$ 을 사용하였다. 그림 2은 시간 슬롯의 변화에 따른 빔 포밍 이득에 대한 성능을 나타낸 것이다. 제안하는 주파수-중속 프리코딩 기반 빔 트레이닝 기법이 기존의 5G NR의 빔 스위핑과 DPP 기반 빔 트레이닝 기법에 비해 적은 수의 시간 슬롯만으로 빨리 1에 가까운 빔포밍 이득을 획득함을 확인할 수 있다. 구체적으로, 29번째 시간 슬롯에서 제안하는 기법은 0.83의 빔포밍 이득을 획득한 반면 기존의 5G NR의 빔 스위핑과 DPP 기반 빔 트레이닝 기법은 각각 0.43 그리고 0.09의 빔포밍 이득을 획득하였다.

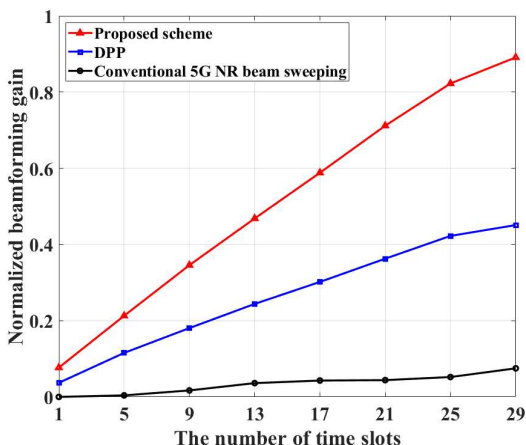


그림 2. 시간 슬롯에 따른 빔포밍 이득 결과
Fig. 2. Normalized beamforming gain vs. time slot

References

- [1] Z. Chen, X. Ma, B. Zhang, Y. Zhang, Z. Niu, N. Kuang, W. Chen, L. Li, and S. Li, "A survey on terahertz communications," *China Commun.*, vol. 16, no. 2, pp. 1-35, 2019. (<https://doi.org/10.12676/j.cc.2019.02.001>)
- [2] M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor, and M. Zorzi, "A tutorial on beam management for 3GPP NR at mmWave frequencies" *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 173-196, 2018. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2869411>)
- [3] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. W. Heath, "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems," *IEEE J. Sel. Topics Sig. Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 831-846, 2014. (<https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2334278>)
- [4] J. Park, S. Kim, J. Moon, and B. Shim, "Fast terahertz beam training via frequency-dependent precoding," in *Proc. IEEE ICC Wkshps.*, May 2022. (<https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814478>)
- [5] J. Tan and L. Dai, "Wideband beam tracking in THz massive MIMO systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 1693-1710, 2021. (<https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3071817>)