

테라헤르츠 통신에서 빔 분할과 각도 오차에 강건한 빔포밍 기법

김진영, 조혜상, 최준일*

한국과학기술원, 한국과학기술원, *한국과학기술원

2020kiji@kaist.ac.kr, nanjohn96@kaist.ac.kr, *junil@kaist.ac.kr

Robust Beamforming Under Beam Split and Angular Uncertainty
in Terahertz Communications

Kim Jinyoung, Cho Hyesang, Choi Junil*

KAIST, KAIST, *KAIST

요약

본 논문에서는 THz 주파수 대역에서 발생하는 빔 분할 현상과 각도 불확실성에 대하여 강건한 기대 합산 정보 전달을 최대화 기법을 제안한다. 실질적인 광대역 THz 시스템에서 발생하는 빔 분할 현상과 각도 불확실성의 영향을 완화하기 위해 각 부반송파에 어레이 공분산 행렬을 도입한다. 이 행렬은 주파수 의존적인 어레이 응답 벡터의 영향과 각도 오차의 통계적 영향을 고려하여, 기대 합산 정보 전달을 최적화 문제를 해석 가능한 형태로 설계한다. 이후 Riemannian conjugate gradient (RCG) 기법을 통해 해결하며, 기존 기법에 비해 높은 정보 전달율을 달성하는 것을 확인할 수 있다.

I. 서론

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 시스템의 전자기파 신호는 굉장히 심한 전파 감쇄를 겪는다.

이러한 문제에 대응하기 위해 수많은 안테나를 사용하는 거대 다중 안테나 기술을 사용한다. 다만, 각 안테나에 하나의 radio frequency (RF) chain 을 장착하는 것은 높은 가격과 복잡도로 인해 어려우며, 주로 아날로그와 디지털 빔포머를 함께 사용하는 하이브리드 빔포머 구조를 도입한다.

기존 아날로그 빔포머는 주파수에 독립적인 phase shifter (PS)를 사용하여 중심 주파수에 대응하는 물리적 방향으로 빔을 생성한다. 이는 광대역 시스템에서 각 부반송파에 대응하는 빔의 물리적 방향이 달라지는 빔 분할 현상을 야기한다 [1]. 또한 고주파 대역은 빔의 폭이 좁고 line-of-sight (LoS) 경로가 지배적이기 때문에 각도 추정 오차에 민감하다.

따라서 본 논문에서는 빔 분할 현상과 각도 추정 오차에 강건한 아날로그 빔포밍 기법을 제안한다. 구체적으로, PS 의 상수 크기 제약 하에서 기대 합산 정보 전달율을 최대화하는 최적화 문제를 설계하고, 어레이 공분산 행렬을 도입하여 해석 가능한 형태로 변환한다. 실험을 통해 제안 기법이 기존 기법에 비하여 월등한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

II. 본론

본 논문에서는 광대역 THz 주파수를 사용하는 다중 안테나 하이브리드 구조 기지국을 고려한 다운링크 통신 시스템을 가정한다. N_t 개의 안테나와 N_{RF} 개의 RF chain 을 가진 기지국이 총 K 명의 단일 안테나를 갖는 사용자를 지원하며, $N_{RF} = K$ 임을 가정한다. 시스템은

광대역 자원을 효율적으로 활용하기 위해 전체 대역폭 B 를 M 개의 부반송파로 나누어 사용하는 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 방식을 사용한다. 이때 m 번째 부반송파의 송신 신호는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}_m = \mathbf{W}\mathbf{F}_{BB,m}\mathbf{s}_m$$

여기서 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_{N_{RF}}] \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{RF}}$ 는 PS 로 이루어진 주파수 독립적인 아날로그 빔포머, $\mathbf{F}_{BB,m} = [\mathbf{f}_{1,m}, \dots, \mathbf{f}_{K,m}] \in \mathbb{C}^{N_{RF} \times K}$ 는 주파수에 의존적인 m 번째 부반송파의 디지털 빔포머이다. 이후 k 번째 사용자의 m 번째 부반송파 수신 신호는 아래와 같다.

$$y_{k,m} = \mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{x}_m + n_{k,m} = \mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{W}\mathbf{F}_{BB,m}\mathbf{s}_m + n_{k,m}$$

여기서 $\mathbf{h}_{k,m} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 은 k 번째 사용자의 채널이며, $n_{k,m} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 는 additive white Gaussian noise (AWGN)이다. k 번째 사용자의 정보 전송률은 아래와 같다.

$$R_k = \sum_{m=0}^{M-1} R_{k,m} = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{B}{M} \log_2 \left(1 + \frac{P_t |\mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{W}\mathbf{f}_{k,m}|^2}{I_k + \sigma^2} \right)$$

여기서 $I_k = \sum_{i \neq k}^K P_t |\mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{W}\mathbf{f}_{i,m}|^2$ 는 사용자 간 간섭이고, 채널 모델은 아래와 같다.

$$\mathbf{h}_{k,m} = \sum_{l=0}^{L-1} \rho_{k,m,l} e^{-j2\pi f_m \tau_{k,l}} \mathbf{a}_m(\theta_{k,l})$$

$\mathbf{a}_m(\theta_{k,l})$ 은 m 번째 부반송파에서 k 번째 사용자의 l 번째 경로 방향으로의 어레이 응답 벡터를 나타내고, 아래와 같이 표현한다.

$$\mathbf{a}_m(\theta_{k,l}) = \left[1, \dots, \exp \left(j(N_t - 1) \frac{2\pi}{\lambda_m} d \sin(\theta_{k,l}) \right) \right]^T$$

광대역 시스템에서는 위 수식에서 볼 수 있듯이 $\lambda_m = \frac{c}{f_m}$ 의 주파수 의존성으로 인해 부반송파 별로 빔의 방향이 달라지게 되고, 이러한 현상을 빔 분할 현상이라고 한다.

다음으로, 실제 시스템에서 채널 추정 오차, 제한된 피드백, 하드웨어의 한계 등으로 인해 일어나는 각도 오차 모델은 $\theta = \hat{\theta} + \tilde{\theta}$ 로 나타낸다. 여기서 θ 는 실제

각도, $\hat{\theta}$ 은 추정 각도, 그리고 $\tilde{\theta}$ 는 더해지는 각도 오차를 의미한다.

이후 해당 시스템을 기반으로 빔 분할 현상과 각도 추정 오차를 고려하며 합산 정보 전달율을 최대화하는 문제는 아래와 같이 설계 가능하다.

$$(P1): \max_{\mathbf{W}} E_{\tilde{\theta}} \left[\sum_{k=1}^K R_k \right] \text{ s.t. } |\mathbf{W}[i, j]| = \frac{1}{\sqrt{N_t}} \quad (1-a)$$

여기서 제약 (1-a)는 아날로그 빔포머의 PS 를 고려한 제약 조건이다. THz 주파수의 LoS 지배적인 특성을 고려하면 $\mathbf{h}_{k,m} \approx \rho_{k,m} \mathbf{a}_m(\theta_k)$ 와 같이 채널을 어레이 응답 벡터로 근사할 수 있다. 여기서 $\rho_{k,m} = \rho_{k,m,0}$, $\theta_k = \theta_{k,0}$ 이다. 또한 좁은 빔 폭과 사용자에게 잘 정렬된 아날로그 빔포머를 고려하면 유효 채널을 $\mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{W} \approx [0, \dots, \rho_{k,m} \mathbf{a}_m^H(\theta_k) \mathbf{w}_k, \dots, 0]$ 와 같이 간단히 정리할 수 있다. 이러한 근사를 적용하면 원래 최적화 문제를 아래와 같이 각 사용자의 정보 전달율을 최대화하는 문제로 정리할 수 있다.

$$(P2): \max_{\mathbf{w}_k} E_{\tilde{\theta}} \left[\sum_{m=0}^{M-1} \frac{B}{M} \log_2(1 + \gamma_{k,m} |\mathbf{a}_m^H(\theta_k) \mathbf{w}_k|^2) \right] \\ \text{ s.t. } |\mathbf{w}_{k,i}| = \frac{1}{\sqrt{N_t}}, \quad i = 1, \dots, N_t \quad (2-a)$$

여기서 $\gamma_{k,m} = \frac{P_t \rho_{k,m}^2}{\sigma^2}$ 는 신호대잡음비를 나타낸다.

다음으로, 문제를 해석 가능한 형태로 변환하기 위해 쉐슨 부등식을 활용하여 아래와 같은 상한을 도출한다.

$$E_{\tilde{\theta}} \left[\sum_{m=0}^{M-1} \frac{B}{M} \log_2(1 + \gamma_{k,m} |\mathbf{a}_m^H(\theta_k) \mathbf{w}_k|^2) \right] \\ \leq \sum_{m=0}^{M-1} \frac{B}{M} \log_2(1 + \gamma_{k,m} E_{\tilde{\theta}}[|\mathbf{a}_m^H(\theta_k) \mathbf{w}_k|^2])$$

이때 m 번째 부반송파에서의 어레이 공분산 행렬을

$$\mathbf{C}_m := E_{\tilde{\theta}}[\mathbf{a}_m(\theta_k) \mathbf{a}_m^H(\theta_k)]$$

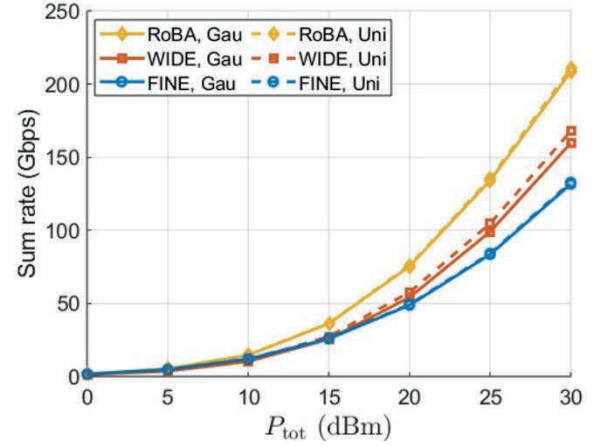
와 같이 정의한다. 1 차 테일러 전개를 적용하여 각도 오차에 대한 선형 함수로 근사 후, 각도 오차 분포에 대한 특성 함수 값을 계산하여 이 행렬을 수식적으로 정리할 수 있다. 이렇게 얻은 어레이 공분산 행렬을 활용하여 정리한 최적화 문제는 아래와 같다.

$$(P3): \max_{\mathbf{w}_k} \sum_{m=0}^{M-1} \frac{B}{M} \log_2(1 + \gamma_{k,m} \mathbf{w}_k^H \mathbf{C}_m \mathbf{w}_k) \text{ s.t. } (2-a)$$

이후 해당 문제는 Riemannian conjugate gradient (RCG) 기법으로 해결하여 local optimal 지점 해를 구할 수 있다 [2]. RCG 알고리즘을 사용하기 위해서는 목적 함수의 미분 값이 필요하며, 이를 위해 아래와 같이 미분 값을 도출할 수 있다.

$$\nabla f(\mathbf{w}_k) = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{B}{M} \cdot \frac{2}{\ln 2} \cdot \frac{\gamma_{k,m} \mathbf{C}_m \mathbf{w}_k}{1 + \gamma_{k,m} \mathbf{w}_k^H \mathbf{C}_m \mathbf{w}_k}$$

결과를 검증하기 위해 두 개의 기존 기법과 제안 기법을 비교하였다. RoBA는 제안 기법, WIDE는 빔 분할 현상을 완화하기 위해 빔 폭을 조절하는 기존 기법, FINE은 모든 부반송파에서 중심 주파수에 맞추어 빔을 형성하는 기존 기법을 사용한 결과이다. Gau는 각도 오차가 가우시안 분포를 따르는 경우를 나타내고, Uni는 각도 오차가 균일 분포를 따르는 경우를 나타낸다.



위 그림을 통해 제안 기법이 기존에 존재하는 기법에 비해 월등한 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 특히 송신 전력이 커질수록 그 차이가 커지는 것을 볼 수 있으며, WIDE가 점점 FINE의 성능을 능가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 송신 전력이 커질수록 빔 분할 현상을 완화하는 빔포밍 기법이 필수적이라는 것을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 THz 통신 시스템에서 불가피한 빔 분할과 각도 불확실성을 모두 고려한 새로운 아날로그 빔포밍 기법을 제안하여 기대 합산 정보 전달율을 최대화하였다. 각 부반송파에 어레이 공분산 행렬을 도입함으로써 주파수 의존적인 어레이 응답 벡터와 각도 오차의 통계적 영향을 반영하였다. 도출된 최적화 문제는 RCG 알고리즘을 사용하여 해를 도출하였고, 성능 비교를 통해 제안한 기법이 기존 기법에 비해 높은 성능을 달성함을 확인하였다. 이를 통해 향후 광대역 THz 통신 시스템에서 활용될 수 있는 강력한 빔포밍 기법을 제안하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2020-II201787, 기여율 50%)과 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-00269, 6세대 Tbps 급 데이터 전송율을 지원하는 sub-THz 대역 무선 전송 및 접속 요소 기술 개발, 기여율 50%)

참 고 문 헌

- [1] L. Dai, J. Tan, Z. Chen, and H. V. Poor, "Delay-Phase Precoding for Wideband THz Massive MIMO," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 21, no. 9, pp. 7271-7286, Sep. 2022.
- [2] P.-A. Absil, R. Mahony, and R. Sepulchre, Optimization Algorithms on Matrix Manifolds. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2009.