

# THz Near-Field 통신을 위한 에너지 효율적 위치 기반 빔 제어 알고리즘

김재홍, 고승우  
인하대학교

kimjaehong@inha.edu, swko@inha.ac.kr

## Location-Based Beam Management for Energy-Efficient THz Near-Field Communications

Jae-Hong Kim, Seung-Woo Ko  
Inha Univ.

### 요약

본 논문은 THz Near-Field 환경에서 근접한 두 디바이스들의 위치를 알고 있을 때, 통신 성능을 보장하는 에너지 효율적 아날로그 빔 제어 기법을 제안한다. 주어진 디바이스들의 위치를 활용하여 무선 채널을 예측하고, 서로 간의 간섭을 줄이고 신호의 세기를 보장 할 수 있는 아날로그 빔 디포커싱 (Beam defocusing) 기법을 설계 및 최적화 하였다. 시뮬레이션을 통해 제안한 기법이 벤치마크 대비 전력소비를 현저하게 줄일 수 있음을 검증하였다.

### I. 서론

6G 에서 요구하는 높은 Data rate 를 달성하기 위해서는 기존의 mmWave 뿐만 아니라 THz 주파수 대역의 사용의 필요성이 대두되고 있다.[1] THz 대역의 높은 전파 손실로 인해 통신 가능 범위가 기존의 Far-field 에서 near-Field 영역으로 변환되며 각도 뿐만 아니라 거리에 따른 추가 degree of freedom 의 확보됨에 따라 근접한 단말 사이의 간섭을 최소화 하면서 동시에 서비스 할 수 있을 것이라 기대된다. 또한 non line-of-sight 패스의 신호 세기가 급감함에 따라 위치 정보를 기반으로 한 deterministic 한 채널 추정이 가능해진다.

본 논문에서는 이러한 두가지 장점을 활용하여 에너지 효율적 빔 제어 기술을 제안한다. 디바이스의 위치를 알고 있을 때, 아날로그 빔 제어 결과에 따라 수신 신호 및 간섭의 세기를 예측할 수 있다. 제안하는 빔 제어기술인 빔 디포커싱(Beam defocusing)기법은 단말의 위치가 아닌 떨어진 위치에 빔을 전송하여, 단말의 수신 신호를 유지하면서 간섭은 줄일 수 있는 기술이다. 제안한 최적의 빔 디포커싱 기술은 유저의 정확한 위치에 빔을 전송하는 기존 기술 대비하여 디바이스의 데이터를 보장하면서 기지국의 전송 전력을 최소화 할 수 있다.

### II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 기지국과 두대의 디바이스를 포함하는 시스템을 고려한다. 기지국은 안테나 간 간격이 일정한 ULA(Uniform Linear Array)구조를 가지며  $-N$  부터  $N$  까지  $2N+1$  개의 안테나로 구성되어 있다. RF 체인의 숫자는 유저의 숫자와 동일하다고 가정한다. 디바이스의 위치는 안테나 배열의 중심선상에 수직으로 나열된 상황을 가정한다. 즉, 안테나 배열의 중심으로부터 의거리 로 디바이스의 위치 및 채널을 특정할 수 있다. 예를 들어 거리  $d$  위치에 놓여있는 단말의 채널은 다음과 같이 표현이 가능하다. [2]

$$\mathbf{h}(d) = \left[ \frac{1}{r_{-N}(d)} e^{-jk(r_{-N}(d)-d)}, \dots, \frac{1}{r_N(d)} e^{-jk(r_N(d)-d)} \right]^T \quad (1)$$

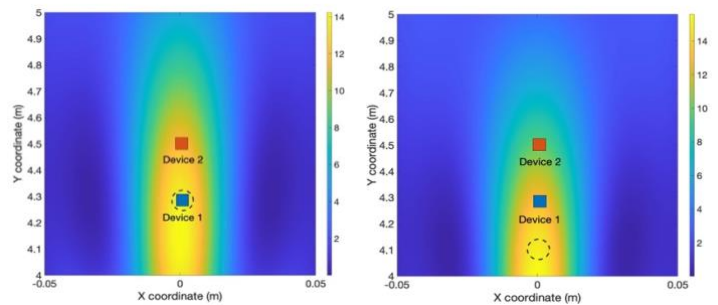
$r_n(d)$  :  $n$  번째 안테나에서 디바이스까지의 거리

NF 빔 제어를 위해 하이브리드 프리코더를 고려한다. 그 중 디지털 빔제어는 기존의 zero-forcing (ZF) 기법[3]을 사용한다. 본 논문에서는 아날로그 빔 제어 최적화에 초점을 맞춘다. NF 환경에서 특정 위치  $\hat{d}$ 로 빔을 집중시키는 빔 포커싱 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{q}(\hat{d}) = \left[ \frac{1}{\sqrt{2N+1}} e^{jk(r_{-N}(\hat{d})-\hat{d})}, \dots, \frac{1}{\sqrt{2N+1}} e^{jk(r_N(\hat{d})-\hat{d})} \right]^T \quad (2)$$

이때  $\hat{d}$  과  $d$  가 다른 경우를 빔 디포커싱이라 하며  $\hat{d} - d$ 를 빔 디포커싱 거리라고 한다.

### III. 에너지효율적 빔 디포커싱 기법



[그림 1] Focusing 한 경우와 Defocusing 한 경우 간섭 세기

[그림 1]의 왼쪽 그림은 디바이스 1 위치에 빔을 집중시켰을 때 디바이스 2 에 주는 간섭의 세기를 나타낸 것이다. 간섭이 크면 ZF 과정에서 간섭을 줄이기 위해 많은 전송 전력이 필요하다는 문제점이 존재한다. 이 문제점을 해결하기 위해 [그림 1]의 오른쪽 그림과 같이 아날로그 빔을 디바이스 1 의 위치가 아닌 적절히 떨어진 위치로 디포커싱 시켰을 때 신호의 세기는 유지하면서 디바이스 2 에 주는 간섭을 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있다.

이러한 현상에 착안하여 전력 최소화 문제를 정의할 수 있다. 디바이스 1 과 2 의 위치를  $d_1, d_2$ 으로, 각각의 디포커싱 위치를  $\hat{d}_1, \hat{d}_2$  으로 정의하자. 이때 아날로그 프리코더와 디지털 프리코더는 수식 (1)과 (2)에 따라 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{Q}(\hat{d}_1, \hat{d}_2) = [\mathbf{q}(\hat{d}_1), \mathbf{q}(\hat{d}_2)], \quad (3)$$

$$\mathbf{F}(\hat{d}_1, \hat{d}_2) = \text{inv}[\mathbf{h}(\hat{d}_1) \mathbf{h}(\hat{d}_2)]^T \mathbf{Q}(\hat{d}_1, \hat{d}_2), \quad (4)$$

기지국의 전력소비는 위 두 프리코더를 곱한 매트릭스의 Frobenius norm 으로 표현할수 있기 때문에 다음과 같은 최적화 문제를 만들수 있다:

$$\begin{aligned} & \min \|\mathbf{Q}(\hat{d}_1, \hat{d}_2) \cdot \mathbf{F}(\hat{d}_1, \hat{d}_2)\|_F \\ \text{s.t. } & \log_2 \left( 1 + \frac{S_1(\hat{d}_1, \hat{d}_2)}{I_1(\hat{d}_1, \hat{d}_2) + N} \right) \geq \eta, \log_2 \left( 1 + \frac{S_2(\hat{d}_1, \hat{d}_2)}{I_2(\hat{d}_1, \hat{d}_2) + N} \right) \geq \eta, \\ & \|\mathbf{Q}(\hat{d}_1, \hat{d}_2) \cdot \mathbf{F}(\hat{d}_1, \hat{d}_2)\|_F \leq P \end{aligned}$$

수신 신호  $S_m(\hat{d}_1, \hat{d}_2)$ , 간섭  $I_m(\hat{d}_1, \hat{d}_2)$  ( $m = 1, 2$ )은 아래 연산을 통해 구할 수 있다.

$$[S_1(\hat{d}_1, \hat{d}_2), I_1(\hat{d}_1, \hat{d}_2)] = |(\mathbf{h}(d_1)^T (\mathbf{Q}(\hat{d}_1, \hat{d}_2) \mathbf{F}(\hat{d}_1, \hat{d}_2)))|^2,$$

$$[I_2(\hat{d}_1, \hat{d}_2), S_2(\hat{d}_1, \hat{d}_2)] = |(\mathbf{h}(d_2)^T (\mathbf{Q}(\hat{d}_1, \hat{d}_2) \mathbf{F}(\hat{d}_1, \hat{d}_2)))|^2$$

두개의 constraint 에서  $\eta$  는 각각의 device 가 만족해야 하는 데이터 전송률을 의미한다. Feasible 한  $\eta$  가 주어지면 식 (5), (6) 과 같이 equality 를 만족하는 디포커싱 위치  $\hat{d}_1, \hat{d}_2$  를 찾는 linear of equation 문제로 바꿀 수 있다.

$$\frac{S_1(\hat{d}_1, \hat{d}_2)}{I_1(\hat{d}_1, \hat{d}_2) + N} + 1 - 2^\eta = 0, \quad (5)$$

$$\frac{S_2(\hat{d}_1, \hat{d}_2)}{I_2(\hat{d}_1, \hat{d}_2) + N} + 1 - 2^\eta = 0 \quad (6)$$

두 식은 두개의 변수를 갖는 비선형 방정식이기 때문에, 가우스-뉴턴법을 사용해 조건을 만족하는 Defocusing 거리인  $\hat{d}_1, \hat{d}_2$  를 찾을 수 있다.

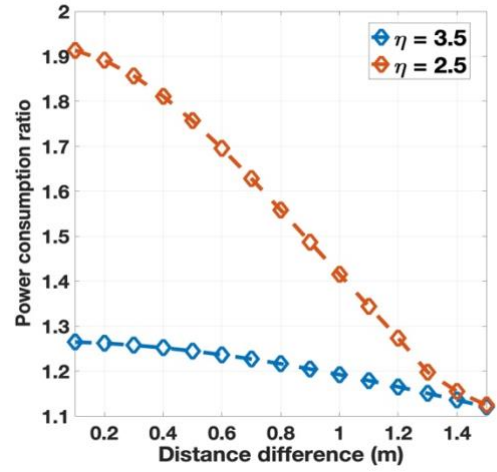
#### IV. 시뮬레이션

본 연구에서 진행한 시뮬레이션은 앞서 제안한 시스템 모델과 알고리즘에 기반하였다. BS 의 안테나 개수는 255 개, 기지국에서 디바이스 1 까지의 거리는 5m, 디바이스 2 와 디바이스 1 사이의 거리차는 증가시키며  $\eta$  가 2.5bps/Hz, 3.5bps/Hz 인 경우에 대해서 시뮬레이션을 진행하였으며, 빔을 포커싱 했을 때와 디포커싱 했을 때의 전력소비비율인 Power consumption ratio 로 제한한 기법이 벤치마크 대비 기지국의 전력 소비를 줄일 수 있음을 검증했다.

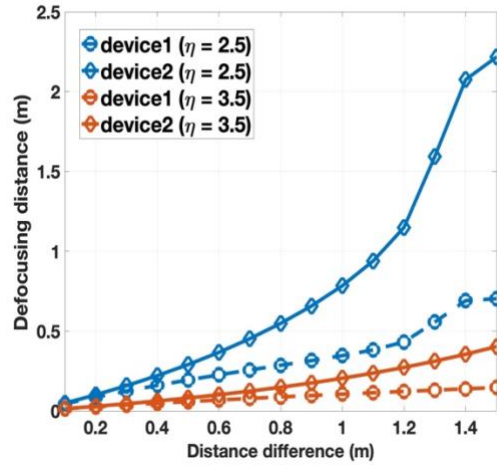
[그림 3]에서 두 디바이스간 거리가 멀어질수록 간섭의 세기가 작아 지기 때문에 빔을 포커싱, 디포커싱한 두 경우 모두 전력소비가 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 빔 디포커싱 기법을 사용하면 요구되는 전송전력이 기존의 경우보다 줄어든다. 이는 빔 디포커싱 기법을 사용하면 간섭의 세기가 작아져 ZF 시 기존의 경우보다 적은 양의 전력이 소모되기 때문이다. 또한  $\eta$  가 작을 때 Power consumption ratio 의 값이 큰 것을 확인할 수 있는데 이는 요구되는 디바이스의 데이터 전송율이 낮을수록 조건을 만족하는 전송전력이 작다는 것을 의미한다.

[그림 4]를 통해 두 디바이스간 거리가 멀어질 수록 디포커싱 거리가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 디바이스간 거리가 멀어질수록 빔을 디포커싱 했을 때 간섭의 세기의 감소폭이 신호의 세기 감소폭보다 크게 나타나기 때문이다.

디바이스 2 의 디포커싱 거리가 디바이스 1 의 디포커싱 거리보다 큰 것을 통해 더 멀리 위치한 디바이스를 더 많이 디포커싱 하는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있으며,  $\eta$  가 작을 수록 디포커싱 거리가 큰 이유는 더 높은 데이터 전송율을 달성하기 위해서는 일정 신호의 세기를 가져야 하기 때문에 이를 만족하기 위해서는 디포커싱 거리를 크게 할 수 없기 때문이다.



[그림 2] 디바이스 거리차에 따른 Power consumption ratio



[그림 3] 디바이스 거리차에 따른 Defocusing 거리

#### VI. 결론

본 연구에서는 디바이스의 데이터 전송율을 보장하는 에너지 효율적 빔 제어 알고리즘인 빔 디포커싱 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다. 향후 연구에서는 이 기법을 다수의 디바이스에 적용하고 각 디바이스별로 다양한 데이터 전송율을 보장할 수 있도록 확장할 계획이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2022R1F1A1072911)

#### 참고 문헌

- [1] H. Zhang and N. Shlezinger, "6G Wireless Communications : From Far-Field Beam Steering to Near-Field Beam Focusing" IEEE Communication Magazine., vol. 61,no.4 pp. 72 - 77, April. 2023
- [2] H. Yang and T. L. Marzetta, "Performance of Conjugate and Zero-Forcing Beamforming in Large-Scale Antenna Systems", IEEE J. Sel. Areas Commun. Vlo. 31, no. 2, pp. 172-179, Feb. 2013
- [3] Z. Wu and L. Dai, "Multiple Access for Near-Field Communications : SDMA or LDMA" IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 41, no. 6, pp. 1918 - 1935, May. 2023.