

# UAV-enabled Massive MIMO 시스템에서 하이브리드 빔포밍을 이용한 UKF 기반 빔 추적 알고리즘

심윤아, 신승석\*, 정윤아\* 조지훈, 문상미\*\*, 황인태\*\*\*

전남대학교 ICT 융합시스템공학과, \*전남대학교 전자컴퓨터공학과, \*\*나사렛대학교 AI 인공지능학부,

\*\*\*전남대학교 전자공학과 & ICT 융합시스템공학과

sya8325@naver.com, [ssskit7@naver.com](mailto:ssskit7@naver.com), [yuna1538@naver.com](mailto:yuna1538@naver.com), [216981@jnu.ac.kr](mailto:216981@jnu.ac.kr),  
[moonsm@kornu.ac.kr](mailto:moonsm@kornu.ac.kr), and [hit@jnu.ac.kr](mailto:hit@jnu.ac.kr)

## UKF-based Beam Tracking Algorithm using Hybrid Beamforming in UAV-enabled Massive MIMO system

Yuna Sim, Seungseok Sin\*, Yuna Jeong\*, Jihun Cho, Sangmi Moon\*\*, and Intae Hwang

Dept. of ICT Convergence System Engineering, Chonnam National Univ.,

\*Dept. of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National Univ.,

\*\*Dept. of IT Artificial Intelligence, Korea Nazarene Univ.

\*\*\*Dept. of Electronic Engineering and Department of ICT Convergence System  
Engineering, Chonnam National University

### 요약

밀리미터파 주파수는 5G 무선 통신 시스템에서 높은 데이터 속도를 지원하는 유망 기술 중 하나이지만 높은 주파수로 인한 짧은 파장은 신호의 감쇄 및 경로 손실을 일으킨다. 이러한 문제를 보완하기 위해 본 논문에서는 하이브리드 빔포밍 기술을 적용하고, 완전한 빔포밍 이득을 얻기 위해 Unscented 칼만 필터를 이용해 정확한 빔 각도를 추적하고자 한다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 알고리즘이 적당한 수준의 구현 복잡성과 함께 좋은 MSE(Mean Square Error)의 성능을 나타냄을 알 수 있다. 하지만 하이브리드 빔포밍을 적용했을 때 발생하는 계산에 대한 복잡성은 여전히 해결해야 할 문제로 남아 있다. 이에 추후 연구 과정에서, beamformer와 combiner 측면에서 Deep Neural Network를 적용한다면 낮은 수준의 복잡성으로 보다 더 높은 수준의 성능을 보일 수 있을 것이다.

### I. 서론

밀리미터파(millimeter-Wave, mmWave) 주파수 사용은 5G 무선 통신 시스템에서 높은 데이터 속도를 지원하는 유망 기술 중 하나이다 [1]. 하지만 밀리미터파의 높은 주파수로 인한 짧은 파장은 신호의 감쇄 및 경로 손실과 같은 문제점을 발생시키고, 이를 보완하기 위해 고지향성 빔포밍(Beamforming) 기술 연구에 대한 관심이 커지고 있다. 또한 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 기반의 시스템을 고려했을 때, UAV의 움직임 때문에 빔 추적은 필수적이다. 이 때 완전한 빔포밍 이득을 얻기 위해서는 정확한 빔의 각도가 필요하다. 이에 본 논문에서는 하이브리드 빔포밍(Hybrid Beamforming)을 이용한 UKF(Unscented Kalman Filter) 기반의 빔 추적 방식을 제안한다.

### II. 본론

#### 1. 시스템 및 채널 모델

본 논문에서는 하나의 UAV-BS(Unmanned Aerial Vehicle-Base Station)가 땅 위에 있는 하나의 UE(User Equipment)를 서비스하는 UAV 기반의 Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템을 고려한다. UAV-BS와 UE는 각각 균등한 평면 안테나 배열을 가지며, 각 안테나 요소는 xy-평면 상에 대칭 형태로 균등하게 배치한다.

본 논문의 Massive MIMO 통신 시스템에서는 하나의 TTI(Transmission Time Interval) 내에서는 채널이 변화하지 않고, TTI와 TTI 사이에서 채널이 변화하는 채널 모델을 고려한다. 본 논문에서는 LOS(Line Of Sight) 경로만을 고려하며, 송신과 수신 측면에서 안테나 배열 응답 벡터( $\mathbf{a}(\varphi_{l,k}, \theta_{l,k})$ )를 적용하면 채널 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{h}_k = \eta_{l,k} \mathbf{a}_r^H(\varphi_{l,k}^r, \theta_{l,k}^r) \mathbf{a}_t(\varphi_{l,k}^t, \theta_{l,k}^t) \quad (1)$$

#### 2. 하이브리드 빔포밍

빔포밍 기술은 아날로그(analog) 빔포밍과 전디지털(fully digital) 빔포밍, 그리고 이 둘을 적용한 하이브리드(hybrid) 빔포밍 방식으로 나뉜다 [2]. 아날로그 빔포밍은 구현 복잡도는 상대적으로 낮으나, 임의의 빔포밍 행렬을 구현하기 어렵고 한 명의 사용자, 하나의 송수신 흐름에 제한된다는 단점이 있다. 전디지털 빔포밍의 경우 디지털 신호처리를 이용하여 임의의 빔포밍 행렬을 구현하여, 사용자 간 간섭 및 전력 제어 용이하나 구현 복잡도가 높다. 이에 빔포밍 구성을 아날로그와 전디지털 두 부분으로 나눠 두 방법의 장점을 적용한 하이브리드 빔포밍을 해당 시스템에 적용한다. 본 논문에서 적용한 하이브리드 프리코딩 구조는 그림 1과 같다.

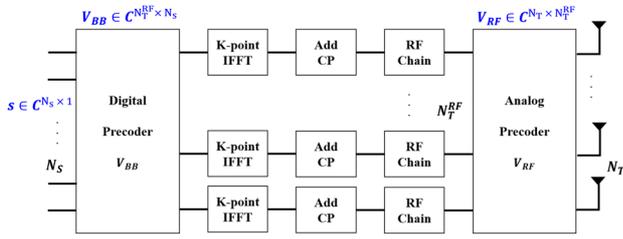


그림 1. 하이브리드 프리코딩 구조.

### 3. Unscented 칼만 필터 기반의 빔 추적

Massive MIMO 시스템에서 정확한 빔 각도를 얻는 것은 필수적이다. 이 때 본 논문에서는 sigma points 라 불리는 몇 개의 sample point 집합 간에 선형 관계를 이용해, UAV의 움직임 상태를 나타내는 비선형함수를 선형화 하는 UKF(Unscented Kalman Filter) 기반의 빔 추적 방법을 적용한다 [3].

### 4. 모의 실험 환경 및 성능 분석

본 논문에서는 하이브리드 빔포밍을 이용한 UKF 기반 빔 추적 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 먼저 빔포밍 종류에 따른 성능을 비교한다. 이후, 하이브리드 빔포밍을 적용했을 때 SNR과 채널 변동 속도( $\sigma^2$ )에 따른 MSE를 비교함으로써 제안하는 알고리즘의 성능을 분석한다.

모의 실험은 임의로 랜덤하게 만든 bit 기반의 데이터 세트를 활용해 설계하였고, 시스템 및 채널 모델은 II-1과 같다. 밀리미터 주파수는 30GHz 이고, UAV-BS는 16x16의 안테나 배열을, UE는 4x4의 안테나 배열을 갖도록 설계하였다.

그림 2는 빔포밍 종류에 따른 MSE에 대한 성능을 보여준다. 동일 SNR과 채널 변동 속도( $\sigma^2$ )를 적용했을 때, 하이브리드 빔포밍이 아날로그 빔포밍보다 더 좋은 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

그림 3은 하이브리드 빔포밍을 이용해 시스템을 설계했을 때, RF chain의 개수에 따른 성능을 비교한 그림이다. 그 결과 RF chain의 수가 16개인 경우에 성능이 더 좋음을 확인했고, 이후 실험에서는 16개의 RF chain의 수를 적용해 실험을 진행한다.

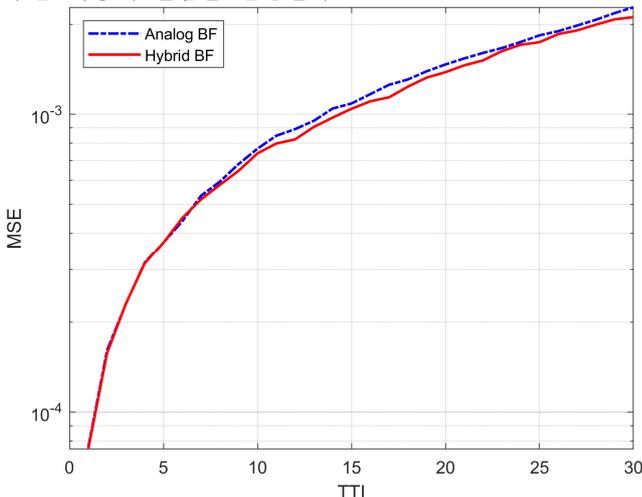


그림 2. 빔포밍 종류에 따른 UKF 기반의 빔추적 성능 비교.

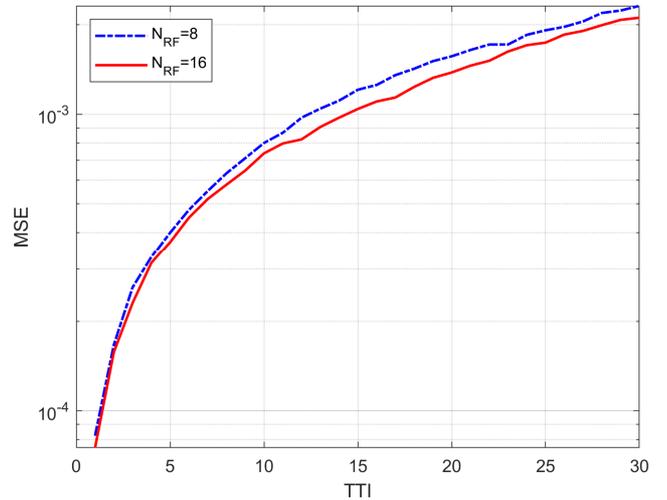


그림 3. RF chain의 개수에 따른 제안 알고리즘의 성능 비교.

### III. 결론

본 논문에서는 UAV 기반 Massive MIMO 시스템에서 하이브리드 빔포밍을 이용한 UKF 기반의 빔 추적 알고리즘을 제안하였다. UKF를 이용해 송수신 측면에서 정확한 채널 각도를 추적할 수 있음을 모의 실험을 통해 확인할 수 있었다.

하지만 여전히 하이브리드 빔포밍을 적용했을 때의 계산에 대한 복잡도의 문제는 남아있다. 이에 위 결론을 바탕으로, 하이브리드 beamformer와 combiner 측면에서 DNN(Deep Neural Network)을 적용해 DL(Deep Learning) 기반의 하이브리드 빔포밍을 활용한다면 보다 낮은 복잡도로 더 높은 성능을 구현할 수 있을 것이다 [4].

### ACKNOWLEDGMENT

“이 성과는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2020R111A1A01073948).” “이 성과는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021R1A2C1005058).” “본 논문(저서)은 교육부 및 한국연구재단의 4단계 BK21 사업(혁신인재 양성사업)으로 지원된 연구임 (관리번호 51999 91714138).” “본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획 평가원의 지역지능화혁신인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2022-RS-2022-00156287).” “본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT 혁신인재 4.0 사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2022-RS-2022-00156385).”

### 참고 문헌

[1] M. Xiao, S. Mumtaz, Y. Huang, L. Dai, Y. Li, M. Matthaiou, G. K. Kara-giannidis, E. Bjornson, K. Yang, C. I. and A. Ghosh, “Millimeter wave communications for future mobile networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 9, pp. 1909-1935, Sep. 2017.

[2] Moon S, Kim J, and Hwang I, “Hybrid pre-coding with power allocation for NR MIMO-OFDM Systems”, ICUFN IEEE, vol. 56, no. 7, Jul. 2019.

[3] Y Ge, Z Zeng, and T Zhang, “Unscented Kalman Filter Based Beam Tracking for UAV-enabled Millimeter Wave Massive MIMO Systems”, 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), pp. 260-264, 2019.

[4] H. Huang, Y. Song, J. Yang, G. Gui, and F. Adachi, “Deep-Learning-Based Millimeter-Wave Massive MIMO for Hybrid Precoding”, IEEE Trans. Veh. Technol., 68 (3), pp. 3027-3032, 2019.