

빔 형성 테스트베드를 이용한 위치기반 빔 정렬 기법의 실험적 검증

홍준열*, 정현진*, 박영미**, 김선우°

Experimental Validation of Location-Aware Beam Alignment Using Beamforming Testbed

Junyeol Hong*, Hyeonjin Chung*, Youngmi Park**, Sunwoo Kim°

요 약

이 논문에서는 13.8 GHz 송수신 테스트베드를 이용한 실험을 통해 위치기반 빔 정렬 기법의 효용성을 빔 시간 단축과 정렬 신뢰도의 두 가지 측면에서 검증한다. 실험에서 사용한 테스트베드는 선형 배열안테나와 아날로그 빔 형성기 보드를 탑재하였으며 상용 실내 측위 장치를 통해 위치정보를 수집한다. 기저대역 신호의 생성과 수신은 USRP(Universal Software Radio Peripheral)를 통해 이루어지며, USRP와 빔 형성기 보드에 대한 조작은 NI LabVIEW 와 C#기반의 애플리케이션으로 이루어진다. 실험 결과는 위치 정보를 활용한 빔 정렬 기법이 탐색을 필요로 하는 빔 후보군을 대폭 줄임으로써 빔 정렬에 소요되는 시간을 줄여줄 수 있음을 보여준다. 또한 빔 정렬 소요시간이 감소하면 단위 시간당 빔 정렬 횟수가 늘어난다. 잦은 빔 정렬이 수신단이 이동하는 상황에서 이동에 따른 빔 조향 각도 변화를 더 정확하게 반영함을 실험으로 확인하였다.

Key Words : Beamforming, Beam alignment, Testbed, Location-aware, USRP

ABSTRACT

In this paper, we validate the usefulness of location-aware based beam alignment in the two aspects of reduction of beam aligning time and improvement of beam aligning reliability through experiments using 13.8 GHz transmitter and receiver testbed. Transceivers which are used in the experiment consist of the uniform linear array antenna and analog beamformer boards. Baseband signal generation and reception are performed by universal software radio peripheral (USRP). Control of the beamformer boards and USRPs is performed via NI LabVIEW and C#-based application. Two testbeds collect the location information using commercial indoor positioning modules. The experiment results show that location-aware based beam alignment can reduce the aligning time by decreasing the number of beam candidates to be searched. Additionally, the number of beam aligning per unit time increases due to the reduced beam aligning time. We experimentally confirm that frequent beam aligning reflects a change of beam steering angle driven by movement of receiver more accurately.

※ 본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, fts610@hanyang.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

° Corresponding Author : Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, remero@hanyang.ac.kr, 정교수, 중신회원

* Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, hyeonjingo@hanyang.ac.kr, 학생(박사)

** Agency for Defense Development Electronic Warfare PMO, ympark@add.re.kr, 연구원

논문번호 : 202008-186-D-RE, Received August 6, 2020; Revised September 16, 2020; Accepted October 14, 2020

I. 서론

배열 안테나와 이를 이용한 빔 형성 기술은 차세대 이동통신이나 신호처리를 통한 항 재밍 기법에서 핵심적인 기술로서 주목받고 있다^[1]. 이에 따라 빔 형성, 정렬, 널링 알고리즘들을 실험을 통해 검증하기 위한 빔 형성 테스트베드의 구현과 이를 이용한 실험적 검증이 매우 중요하다.

현재 가장 기초적이고 널리 알려진 빔 정렬 기법으로는 전역탐색이 있다. 전역탐색은 모든 방향에 대한 빔을 조향해 보고 최적의 빔을 판단하는 기법이다. 전역탐색은 항상 최적의 빔을 찾을 수 있다는 장점이 있는 반면, 빔 정렬에 소모하는 시간이 크다는 단점이 있다. 빔 정렬 시간을 단축하기 위하여 더 효율적으로 빔을 정렬하는 다양한 기법들이 제안되었는데, 그 중 계층적 빔 스위핑을 변형한 기법이나 송수신 빔 번호에 따른 수신 신호 세기 변화를 이용한 방식 등이 구현되었다^[2,3]. 이들은 공통적으로 서로 다른 빔 쌍 간의 수신신호 세기 차이를 이용하여 빔 정렬에 필요한 빔 조향 횟수를 줄이는 방식이다.

이 논문에서 검증하고자 하는 위치기반 빔 정렬 기법은 위치기반 무선통신 시나리오 하에 가지 (line-of-sight) 상황에서 빔 후보군을 대폭 줄일 수 있는 기법이다^[4]. 위치기반 빔 정렬 기법은 배열안테나를 탑재한 송수신단이 서로의 위치 정보를 알고 있는 상황에서 위치 정보를 이용하여 계산한 상대적인 각도 정보를 빔 정렬에 활용하는 방법이다. 이 논문에서는 위치기반 빔 정렬 기법과 전역탐색 기법의 빔 정렬 소요 시간을 비교한다. 이후 움직이는 수신단에 대한 실시간 빔 정렬을 실험한다. 수신단의 이동 속도에 따른 위치기반 빔 정렬의 오차를 관찰하고 수신단의 이동 속도와 빔 정렬 오차에 대한 고찰을 제시한다.

II. 테스트베드

2.1 하드웨어 구성

이 연구는 [5]의 후속 연구로서 동일한 테스트베드를 사용하였다. 테스트베드는 그림 1과 같이 13.8 GHz의 주파수에서 단방향 통신을 지원하며 각각이 1x8 선형배열안테나를 탑재한 빔 형성 테스트베드이다. 송신단 테스트베드 구성을 그림 2에 나타내었고, 수신단도 이와 같이 구성하였다. 각 테스트베드의 저대역에는 소프트웨어 라디오 범용 하드웨어인 USRP(Universal Software Radio Peripheral)를 이용하였다. USRP는 각 송수신단에서 난수 비트를

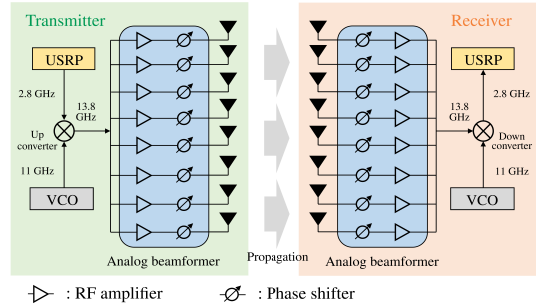


그림 1. 테스트베드 구성 모식도
Fig. 1. A diagram for testbed configuration.

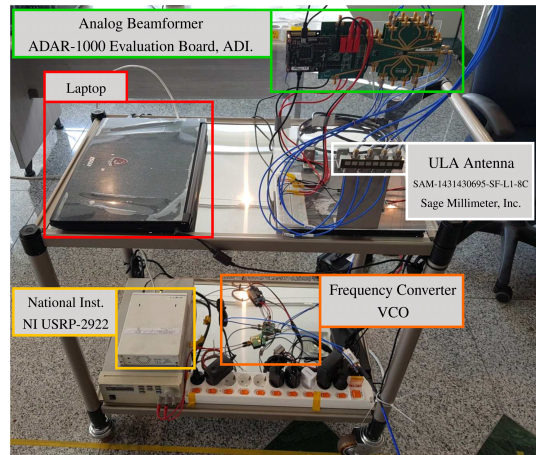


그림 2. 송신단 테스트베드 사진.
Fig. 2. A picture of a testbed for transmitter.

OFDM/QAM 방식으로 변복조한다. 빔 부호책은 각 테스트베드의 전방을 0°로 하여 좌우로 -30° 방향부터 +30° 방향까지 5° 단위로 구성하였고, 송수신 빔 형성 벡터는 지연-합 빔 형성을 이용하여 총 13개의 빔 부호책을 만들었다^[6,7].

위치기반 빔 정렬을 위해 송수신 테스트베드 양측이 서로의 위치 정보를 공유해야 한다. 움직이지 않는 송신단의 위치는 좌표계 상의 상수로서 수신단에 주어지고, 수신단의 좌표는 실시간으로 측정한다. 위치 측정을 위해 Pozyx 사의 실내 거리 측정 기기를 수신단 테스트베드에 탑재하여 좌표를 수집할 수 있게 하였다. Pozyx를 통해 얻은 수신단의 실내 위치 좌표는 무선지역망을 이용하여 송신단과 공유한다.

2.2 소프트웨어 구성

이 연구에서는 세 종류의 소프트웨어를 사용한다. 송신단과 수신단 컴퓨터에서 NI사의 LabVIEW와 C# 애플리케이션이 각각 USRP 제어와 빔 형성기 보드의

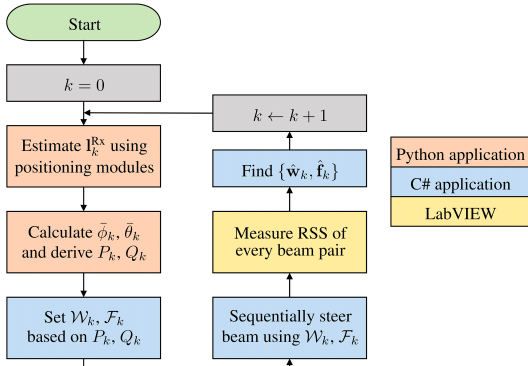


그림 3. 위치 기반 빔 정렬 흐름도
Fig. 3. A flowchart for location-aware beam alignment.

제어를 담당한다. Python 애플리케이션은 수신단 컴퓨터에서만 실행되며 실내측위 장치를 이용하여 수신단의 위치를 추정하기 위해 사용된다. 소프트웨어 실행 흐름도는 그림 3과 같으며, 각각의 구체적인 동작은 아래와 같다.

Python 애플리케이션은 수신단에 부착된 측위 기기와 실험실에 존재하는 앵커 사이의 거리 정보를 측위 기기로부터 가져온다. 이 거리정보를 토대로 삼변 측량을 이용해 수신단의 위치를 계산하고, 계산한 위치를 수신단 C# 애플리케이션에 넘겨준다.

C# 애플리케이션은 아날로그 빔 형성기 보드를 제어하여 빔을 조향하는 역할을 한다. C# 애플리케이션은 송수신부에 따라 빔을 조향하고자 하는 발사각과 입사각을 계산하여 빔 번호를 결정한다. 송수신 테스트베드 모두 최적의 빔 쌍을 다음 빔 정렬 절차가 시작되기 전까지 유지한다.

수신단에서 LabVIEW는 무작위 비트열을 생성하고 직각 위상 편이 키잉과 직교 주파수 다중화를 통해 변조 및 다중화된 파형을 생성해 USRP에 전달한다. 수신단 LabVIEW는 수신 신호를 복조하고 각 빔 쌍에 대한 수신 신호 세기를 측정한다.

III. 빔 정렬 절차

가시 환경의 다중입력 다중출력 시스템에서 k 번째 시간 슬롯의 채널 \mathbf{H}_k 는 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H}_k \approx \alpha_k \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}(\phi_k)^H, \quad (1)$$

$\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$ 이며 $\alpha_k, \theta_k, \phi_k$ 는 각각 채널 이득, 수

신단 입사각, 송신단 발사각을 의미한다. $\mathbf{a}(\theta_k)$ 와 $\mathbf{a}(\phi_k)$ 는 각각 입사각과 발사각에 해당하는 조향 벡터이다. N_R, N_T 는 각각 수신단과 송신단 배열 안테나의 소자 개수이다. 실험에서 사용한 배열 안테나는 8개의 안테나 소자로 구성된다.

k 번째 시간 슬롯의 수신신호 \mathbf{y}_k 는 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{w}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{f}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{w}_k^H \mathbf{n}_k, \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{y}_k \in \mathbb{C}^{1 \times T}$, \mathbf{w}_k 와 \mathbf{f}_k 는 각각 수신 빔 형성 벡터와 송신 빔 형성 벡터를 의미하는 크기 $N_R \times 1$, $N_T \times 1$ 벡터이며, \mathbf{s}_k 와 \mathbf{n}_k 는 송신신호와 정규 백색 잡음을 의미하는 크기 $1 \times T$ 벡터이다. T 는 신호 표본 수를 나타낸다.

이 실험은 가시 상황에서 이루어지므로 위치 정보를 토대로 계산한 ϕ_k 와 θ_k 과 가장 가까운 조향 각도를 가지는 송신 빔과 수신 빔이 최적의 송수신 빔 쌍이다. 송수신 빔 후보책 F, W 에서 위치 정보를 이용하여 빔 후보군을 좁힌다. 여기서, 위치 정보를 이용하여 선별한 송신단 빔 후보군과 수신단 빔 후보군을 \tilde{F}_k, \tilde{W}_k 라 한다. \tilde{F}_k, \tilde{W}_k 의 크기는 위치 추정 오차에 비례한다. 따라서 위치정보가 정확할수록 ϕ_k 와 θ_k 과 가장 가까운 조향 각도를 가지는 빔 후보군만을 선별한다. 이후 \tilde{F}_k, \tilde{W}_k 중 식 (3)과 같이 수신 신호 세기를 최대화 하는 수신 빔 형성 벡터와 송신 빔 형성 벡터 $\hat{\mathbf{w}}_k, \hat{\mathbf{f}}_k$ 를 선택한다.

$$\{\hat{\mathbf{w}}_k, \hat{\mathbf{f}}_k\} = \underset{\mathbf{w}_k \in \tilde{W}_k, \mathbf{f}_k \in \tilde{F}_k}{\operatorname{argmax}} |\mathbf{y}_k^H \mathbf{y}_k|. \quad (3)$$

IV. 실험 구성 및 결과

이동성이 없는 상황에서 충분한 빔 탐색 시간을 들였을 때 두 테스트베드의 빔은 항상 오차 없이 정렬되었다. 따라서 거리변화나 이동성에 따라 다음 세 가지 실험을 구성하고 그 결과를 분석하였다.

4.1 거리에 따른 수신신호 세기

이 실험은 그림 4에 나타난 실험 환경 모식도와 같이 실내의 장애물이 전혀 없는 가시 환경에서 수행하였다. 표 1은 실험 변수를 나타낸다. F, W 각각 13개의 빔 후보군으로 구성되며 측위 장치의 위치 추정 오

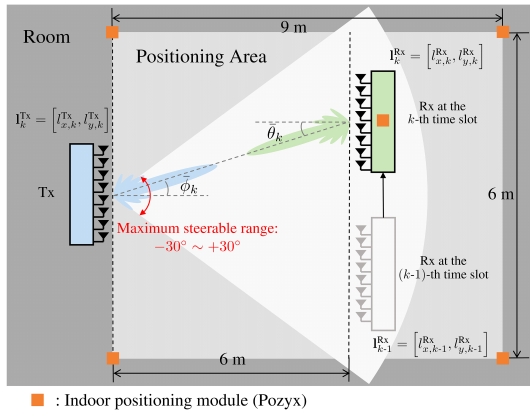


그림 4. 실험 환경 모식도
Fig. 4. Experiment environment.

표 1. 실험 변수
Table 1. Experiment parameters

빔 정렬 기법	전역 탐색	위치 기반
변수		
빔 유지 시간	10 (ms)	
빔 스위핑 부호책 크기	13	3
빔 정렬 주기	3750~3900 (ms)	250~300 (ms)
평균 위치 오차		15 (cm)

차를 고려하여 \tilde{F}_k, \tilde{W}_k 를 구성하는 빔 후보군의 개수는 각각 3으로 설정하였다. 총 3번의 실험을 진행하였으며, 첫 번째 실험에서는 송수신단의 두 테스트베드가 서로 마주 볼 때 거리에 따른 수신신호 세기를 측정하였다. 이 때 각 거리마다 빔 정렬 여부에 따른 수신신호 세기의 변화를 확인하였다. 그림 5는 첫 번째 실험 결과를 나타내며 빔 정렬이 완벽할 때의 수신신호 세기에 비해 빔 정렬이 어긋날 때 수신신호 세기가 더 낮음을 보여준다. 이 때, 수신신호 세기는 빔 오정렬이 심할수록, 곧 빔 번호의 차이가 클수록 낮아지는 경향을 보인다. 특히 최적의 빔 쌍에 대하여 3의 빔 번호 차이를 보일 때 수신신호 세기가 약 10 dB 정도 감소한다. 그림 5의 결과를 통해 가지 상황에서는 송수신단이 서로 마주보는 방향에서 벗어난 빔 후보군을 탐색할 필요가 없음을 알 수 있다. 따라서 위치 정보가 주어졌을 때, 위치 정보의 추정 오차 범위 이내에 해당하는 빔 후보군만을 탐색하는 것이 타당하다.

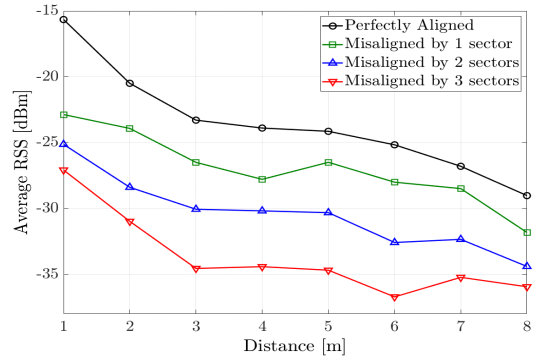


그림 5. 거리와 빔 정렬 여부에 따른 평균 수신신호 세기.
Fig. 5. Average RSS depending on the whether the beam is aligned or not.

4.2 빔 정렬 시간 및 빔 정렬 오차

두 번째 실험에서는 수신단 테스트베드가 송신단 테스트베드로부터 6 m 떨어진 직선 위를 3 km/h의 속도로 움직일 때 실시간 빔 정렬을 수행하였다. 이 때, 전역탐색 기법과 위치기반 빔 정렬 기법을 동일한 상황에서 수행하고 빔 정렬 시간 및 빔 정렬 오차를 비교하였다. 그림 6의 실험 결과에서 전역 탐색을 이용한 빔 정렬 시간은 약 3.8초이며, 위치기반 빔 정렬을 이용한 빔 정렬 시간은 약 0.3초이다. 빔 정렬 시간의 차이는 그림 6에서 나타난다. 그림 6은 위치기반 빔 정렬 기법과 전역탐색 기법을 이용해 얻은 빔 번호를 그래프로 나타내어 최적 빔 번호와 비교한 그래프이다. 그림 6에서 위치기반 빔 정렬 기법으로 얻은 빔 번호 그래프는 전역탐색 기법으로 얻은 빔 번호 그래프에 비해 최적 빔에 더 근접함을 확인할 수 있다. 이는 위치기반 빔 정렬 기법이 더 빠르게 빔 번호를 갱신함으로써 실시간 빔 정렬에 더 적합함을 의미한다.

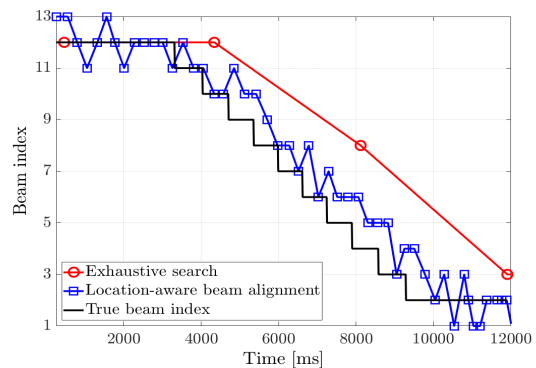


그림 6. 수신단이 이동할 때 빔 정렬 방식에 따른 수신 빔 번호.
Fig. 6. Beam indices according to beam align method when the receiver moves.

V. 결론

이 연구에서는 가시 상황에서 위치 기반 빔 정렬 기법을 통해 빔 정렬 시간을 유의미하게 줄일 수 있음을 실험으로 확인하였다. 또한 빔 정렬 시간 단축이 수신단의 움직임을 빠르게 반영함으로써 실시간 빔 정렬을 더욱 신뢰할 수 있게 함을 확인하였다. 하지만 비가시 상황에서 위치 기반 빔 정렬을 실험할 때, 장애물에 의한 성능이 떨어질 수 있다. 따라서 주변 환경 정보를 이용하여 비가시 상황에서도 적용 가능한 상황 인지 기반 빔 정렬 기법을 연구할 계획이다^[8].

References

- [1] S. A. Hamza and M. G. Amin, "Optimum sparse array receive beamforming for wideband signal model," in *Proc. 2018 52nd Asilomar Conf. Signal, Syst., Comput.*, pp. 89-93, Pacific Grove, CA, USA, 2018.
- [2] J. Zhang, Y. Huang, Q. Shi, J. Wang, and L. Yang, "Codebook design for beam alignment in millimeter wave communication systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 11, pp. 4980-4995, Nov. 2017.
- [3] T. Kadur, H. Chiang, and G. Fettweis, "Experimental validation of robust beam tracking in a NLoS indoor environment," in *Proc. 25th Int. Conf. Telecommun.*, pp. 644-648, St. Malo, France, 2018.
- [4] I. Orikumhi, J. Kang, C. Park, J. Yang, and S. Kim, "Location-aware coordinated beam alignment in mmWave communication," in *Proc. 56th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, and Comput.*, pp. 386-390, Monticello, IL, USA, 2018.
- [5] J. Hong, Y. Song, H. Chung, J. Kang, and S. Kim, "Implementation of beamformer and gain validation for beam alignment in MIMO," *J. KICS*, vol. 44, no. 10, pp. 1975-1978, Oct. 2019.
- [6] H. Krim and M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: the parametric approach," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, Jul. 1996.
- [7] D. Yang, L. Yang, and L. Hanzo, "DFT-based

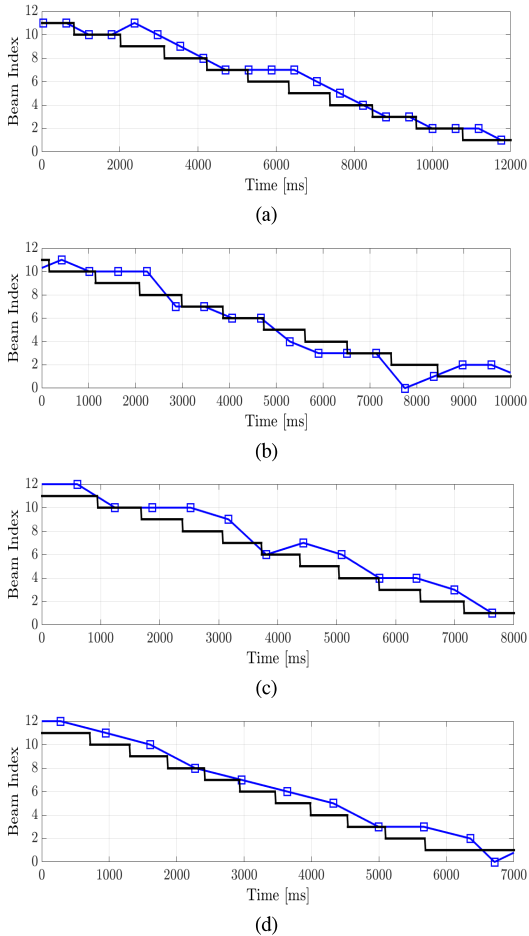


그림 7. 속도에 따른 빔 번호(파란색)와 실제 방향에 대한 빔 번호(검은색), 위에서부터 순서대로 (a) 0.5 (m/s), (b) 0.6 (m/s), (c) 0.8 (m/s), (d) 1 (m/s).
 Fig. 7. Beam index about velocity(blue) and Beam index along the real direction(black), (a) 0.5 (m/s), (b) 0.6 (m/s), (c) 0.8 (m/s), (d) 1 (m/s) in order from the top.

4.3 이동속도에 따른 빔 변화

세 번째 실험에서는 두 번째 실험 시나리오에서 수신단의 이동속도를 바꾸어 가며 위치기반 빔 정렬 기법을 실험하고 이동속도에 따른 빔 번호 변화를 관찰하였다. 그림 7은 수신단의 이동속도가 다를 때 위치 기반 빔 정렬 실험을 수행하여 얻은 빔 번호와 최적 빔 번호의 비교 그래프이다. 그림 7-(a)는 수신단 이동속도가 0.5 m/s 일 때 빔 조향 방향이 수신단의 움직임을 잘 쫓아감을 보여주는 반면, 그림 7-(b), (c), (d)을 통해 수신단의 이동속도가 커질수록 빔 조향 방향이 수신단의 움직임을 쫓아가는데 어려움을 겪는 것을 확인할 수 있다.

beamforming weight-vector codebook design for spatially correlated channels in the unitary precoding aided multiuser downlink,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 1-5, Cape Town, South Africa, 2010.

- [8] Y. Wang, M. Narasimha, and R. Heath, “MmWave beam prediction with situational awareness: a machine learning approach,” in *Proc. 2018 19th IEEE Int. Workshop Signal Process. Adv. Wireless Commun.*, pp. 1-5, Kalamata, Greece, 2018.

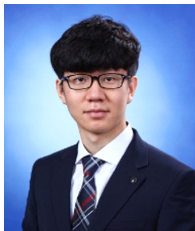
홍 준 열 (Junyeol Hong)



2019년 2월 : 한양대학교 융합
전자공학부 학사
2019년 3월~현재 : 한양대학교
융합전자공학과 석사과정
<관심분야> Beamforming,
mmWave communication,
Anti-jamming

[ORCID:0000-0002-2323-450X]

정 현 진 (Hyeonjin Chung)



2018년 2월 : 한양대학교 융합
전자공학부 학사
2018년 2월~현재 : 한양대학교
융합전자공학과 박사과정
<관심분야> mmWave
communication, DoA
estimation, MIMO

[ORCID:0000-0001-6681-6334]

박 영 미 (Youngmi Park)



1991년 : 충남대학교 전산과 학
사
2005년 : 충남대학교 컴퓨터 공
학과 석사
1991년~현재 : 국방과학연구소
선임연구원
<관심분야> Signal processing,
Communication system

김 선 우 (Sunwoo Kim)



1999년 : 한양대학교 전파공학
학사
2002년 : 미국 University of
California, Santa Barbara,
전기컴퓨터공학 석사
2005년 : 미국 University of
California, Santa Barbara,
전기컴퓨터공학 박사

2005년~현재 : 한양대학교 융합전자공학부 교수
<관심분야> Wireless positioning system, GNSS
system, 5G Communication system

[ORCID:0000-0002-7055-6587]