

빔 포머 구현 및 MIMO 채널 빔 정합 이득 검증

홍준열*, 송용민*, 정현진*,
 강정완*, 김선우*

Implementation of Beamformer and Gain Validation for Beam Alignment in MIMO

Junyeol Hong*, Yongmin Song*,
 Hyeonjin Chung*, Jungwan Kang*,
 Sunwoo Kim*

요약

본 논문에서는 USRP(universal software radio peripheral)를 이용하여 Ku-밴드 대역인 13.8 GHz의 반송 주파수에서 동작하는 아날로그 빔 포머를 구현한다. ULA(uniform linear array) 안테나를 이용하여 동일하게 구성된 두 대의 빔 포머 테스트베드를 각각 송신단과 수신단으로 이용하여 MIMO(multiple-input multiple-output) 채널 송수신 시스템을 구성한다. 송신단은 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)/QPSK(quadrature phase shift keying)로 변조된 신호를 송신하고, 수신단은 이를 복조 하면서 RSS(received signal strength)와 EVM(error vector magnitude)을 측정하여 빔 정합 여부에 따라 비교 분석한다.

Key Words : Beamformer, USRP, Testbed

ABSTRACT

This paper describes the implementation of analog

beamformer which operates on 13.8 GHz carrier frequency using USRP(universal software radio peripheral). MIMO(multiple-input multiple-output) channel transceiver system is composed of two beamformer testbeds, which use identical ULA(uniform linear array) antennas. Transmit end sends signal modulated by OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)/QPSK(quadrature phase shift keying), and receive end measures RSS(received signal strength) and EVM(error vector magnitude) during demodulation. This research compares and analyzes the RSS and EVM depending on whether beams are aligned or misaligned.

I. 서론

밀리미터파 통신은 차세대 통신의 핵심 기술 중 하나이다^{1,2}. 하지만 밀리미터파 통신에는 주파수 특성에 따른 경로손실이 심각하므로 이를 위해 배열 안테나와 빔 포밍을 이용해야 한다. 따라서 빔 포밍이나 빔 관리를 위한 다양한 알고리즘이 제안되었다³. 이러한 알고리즘을 탑재하기 위한 빔 포머 테스트베드 개발에 세계 유수의 연구그룹들이 도전하고 있다. 특히 이동성을 지닌 수신단에 대한 빔 추적 실험이 활발한데, 아직은 보행자 수준의 속도로 움직이는 수신단을 상정한 연구만이 실험 단계에 도달해 있다^{4,5}.

본 논문에서는 13.8 GHz의 반송주파수에서 동작하는 MIMO(multiple-input multiple-output) 채널 빔 포머 테스트베드를 구현한다. 본 테스트베드를 사용한 빔 포밍의 유효성은 이전 MISO 채널에서의 연구에서 이미 확인한 바 있다⁶. 본 논문은 이전 연구의 후속 연구로서, MIMO 채널로의 확장, 빔 정합의 이득에 초점을 둔다.

본 테스트베드는 USRP(universal software radio peripheral)로 생성한 기저대역의 변조 신호를 밀리미터파 대역으로 높이고, 위상 천이기로 구성된 아날로그 회로를 사용하여 빔 포밍을 수행한다. 실험 결과에

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행하였음. (UD160070BD)

• First Author : (ORCID:0000-0002-2323-450X)Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, ftsh610@hanyang.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-7055-6587)Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, remero@hanyang.ac.kr, 중신회원

* Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, dydals92@hanyang.ac.kr; hyeonjingo@hanyang.ac.kr, 학생회원; rkdwjddhks77@hanyang.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 201907-135-D-LU, Received July 18, 2019; Revised August 21, 2019; Accepted August 24, 2019

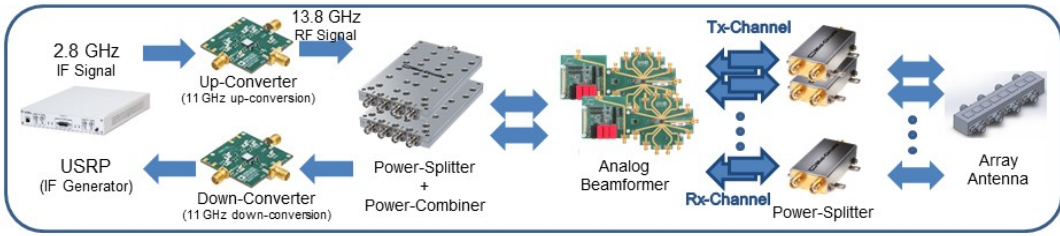


그림 1. 빔 포머 테스트베드 신호 체인
Fig. 1. Signal chains of beamformer testbed

서 테스트베드로 송수신단을 구성한 MIMO 채널에서 빔 정렬 여부에 따른 RSS(received signal strength)와 EVM(error vector magnitude)을 비교/분석한다.

II. 테스트베드 구성 및 채널 모델

각 테스트베드는 그림 1과 같이 USRP, 주파수 업/다운 컨버터, 전력분배기, 빔 포밍 아날로그 회로, 배열 안테나로 구성된다. 송신단에서는 USRP로 2.8 GHz의 IF(intermediate frequency)신호를 생성하고 주파수 업 컨버터는 이를 반송주파수 13.8 GHz의 RF(radio frequency)신호로 변환한다. 전력 분배기는 RF 신호를 동일하게 나누어 아날로그 회로에 인가한다. 수신단에서는 반대의 과정을 거친다. 테스트베드 전체적인 신호 흐름의 도식은 그림 1과 같다.

MIMO 시스템에서 LOS(line-of-sight) 환경을 가정하며, 무선 채널 \mathbf{H}_k 는 다음 수식으로 표현된다.

$$\mathbf{H}_k = \alpha_k \mathbf{a}_{\text{Rx}}(\theta_k) \mathbf{a}_{\text{Tx}}^H(\phi_k) \quad (1)$$

위 식에서 k 는 시간 슬롯이며 α_k 는 k 번째 채널 이득, θ_k 와 ϕ_k 는 각각 k 번째 수신신호 도래각과 송신신호 발사각이며, $\mathbf{a}_{\text{Rx}}(\theta_k)$ 와 $\mathbf{a}_{\text{Tx}}(\phi_k)$ 는 θ_k 와 ϕ_k 에 해당하는 조향 벡터를 의미한다. 이를 포함하여 수신 신호 y_k 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_k = \mathbf{w}^H(\bar{\theta}_k) \mathbf{H}_k \mathbf{f}(\bar{\phi}_k) s_k + n_k \quad (2)$$

위 식에서 $\mathbf{w}^H(\bar{\theta}_k)$ 는 $\bar{\theta}_k$ 로 조향하는 수신 빔 포밍 벡터, $\mathbf{f}(\bar{\phi}_k)$ 는 $\bar{\phi}_k$ 로 조향하는 송신 빔 포밍 벡터, s_k 는 원 신호, n_k 은 가산성 백색 가우시안 잡음을 의미한다.

아날로그 회로는 안테나 소자 별로 위상을 천이하여 빔을 조향한다. 배열 안테나의 소자 개수가 L 개이고, 안테나 소자 간 거리가 신호의 반 파장일 때, 송수

신단의 빔 포밍 벡터와 조향 벡터는 아래와 같으며, 이로써 형성한 송수신 빔을 아래 그림 2-(a)에 도식화 하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_k^H(\bar{\theta}_k) &= [1, e^{-j\pi \sin \bar{\theta}_k}, \dots, e^{-j\pi(L-1)\sin \bar{\theta}_k}]^T, \\ \mathbf{f}_k(\bar{\phi}_k) &= [1, e^{-j\pi \sin \bar{\phi}_k}, \dots, e^{-j\pi(L-1)\sin \bar{\phi}_k}]^T \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{\text{Rx}}(\theta_k) &= [1, e^{-j\pi \sin \theta_k}, \dots, e^{-j\pi(L-1)\sin \theta_k}]^T, \\ \mathbf{a}_{\text{Tx}}(\phi_k) &= [1, e^{-j\pi \sin \phi_k}, \dots, e^{-j\pi(L-1)\sin \phi_k}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

송수신 빔을 정렬하면, $\theta_k = \bar{\theta}_k$, $\phi_k = \bar{\phi}_k$ 이므로 $\mathbf{w}_k^H(\bar{\theta}_k) \mathbf{a}_{\text{Rx}}(\theta_k)$ 와 $\mathbf{a}_{\text{Tx}}(\phi_k) \mathbf{f}_k(\bar{\phi}_k)$ 가 각각 L 로 최대가 된다. 따라서 그림 2-(b)처럼 정확한 빔 정합이 이루어졌을 때 수신신호의 크기가 가장 크다.

III. 실험 환경 및 검증 방법

송신단은 랜덤하게 생성된 이진 비트 스트림을 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)/QPSK(quadrature phase shift keying) 방식을 통해 변조해 전송하며, 수신단은 이를 받아 RSS와 EVM을 계산한다.

$$\text{RSS} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |y_k|^2 \right) \text{ (dB)} \quad (5)$$

$$\text{EVM} = 10 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{P}_{\text{error}}}{\mathbf{P}_{\text{ref}}} \right) \text{ (dB)} \quad (6)$$

RSS는 수신 신호 세기를 의미하며 잡음을 포함한 신호의 전력을 디지털 영역에서 계산한 결과이다. EVM은 디지털 영역 I-Q (in-phase quadrature-phase) 평면의 성장도에서 기준 심볼에 대한 오차 벡터의 비율을 계산한 결과이다. 여기서 오차 벡터는 기준 심볼 벡터와 수신 심볼 벡터 간의 차이를 의미한다. 위 식에서 K 는 하나의 시간 슬롯에 해당하는 수신 신호 샘플

플의 개수이다. P_{ref} 는 기준 심볼 벡터의 RMS(root mean square) 전력이며, P_{error} 는 오차 벡터의 RMS 전력이다.

그림 2-(c)의 배치와 같이, 두 종단 안테나 사이에 일정한 거리를 두고 $\theta = \phi$ 를 유지하며 수신단의 위치를 RSS와 EVM을 측정하는 실험을 진행하였다. 실험군으로 $\bar{\theta} = \bar{\phi}$ 일 때의 RSS와 EVM을 측정하였고, 대조군으로 $\bar{\theta} = 0, \bar{\phi} = 0$ 일 때의 RSS와 EVM을 측정하였다. 수신단은 입사각 θ 가 0° 인 지점부터 30° 인 지점까지 10° 단위로 위치를 바꾸어 실험하였으며, 대조군과 비교하여 실험군에 나타난 RSS의 이득과 EVM 개선을 통해 빔 포밍과 빔 정합 여부에 따른 이득을 분석하였다.

수신단에 별도의 자동 이득 제어 회로는 없으며, 아

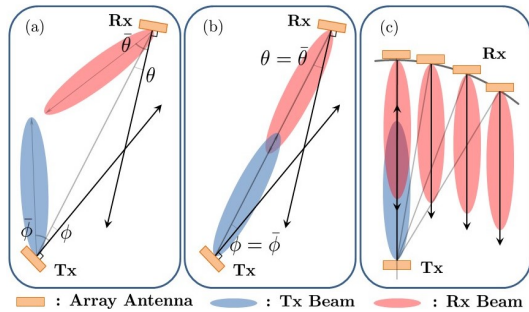


그림 2. 송수신 빔 패턴. (a) $\theta \neq \bar{\theta}, \phi \neq \bar{\phi}$ 일 때, (b) $\theta = \bar{\theta}, \phi = \bar{\phi}$ 일 때, (c) 실험 안테나 배치
Fig. 2. Beam pattern of transceiver. (a) when $\theta \neq \bar{\theta}, \phi \neq \bar{\phi}$ (b) when $\theta = \bar{\theta}, \phi = \bar{\phi}$ (c) position of antennas

표 1. 실험 환경
Table 1. Experiment environment

Item	Value
USRP	NI Co, USRP - 2922
Antenna	1x8 ULA
S/W	NI Co, LabVIEW 2017 Spring
	Custom GUI, C#
Modulation Scheme	OFDM/QPSK
Data Subcarrier	125
Reference Subcarrier	25
Zero Padding	106
Total Subcarrier	256
Cyclic Prefix	64
IQ Sampling Rate	1 (MHz)
Signal Bandwidth	600 (kHz)

날로그 빔 포머의 벡터 변조기 이외의 이득은 실험을 수행하는 동안 일정하게 유지하였다. 수신하는 모든 신호 샘플을 이용하여 RSS를 계산하고 네 자리 이상 수렴하면 이를 넷째 자리에서 반올림하여 이용하였다.

IV. 실험 결과

표 1의 환경에서 실험을 진행하여 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 수신단 USRP 내부의 열잡음은 -40 dB 수준이었다. 이와 그림 3의 그래프는 $\theta = 30^\circ$ 인 지점 부근에 배열 안테나 방사 패턴의 영점이 있음을 의미한다. 여기서 EVM이 100%를 초과함을 확인하였는데, 이는 OFDM 심볼 에러가 빈번하게 발생해 원활한 복조가 이루어지지 않음을 의미한다. 반면 정확한 빔 정합이 이루어졌을 때, 약 8.5dB의 RSS 이득을 확인할 수 있으며 심볼 송수신이 가능한 수준의 EVM을 보인다. 이는 빔 정합으로 인해 OFDM 심볼의 유효한 복조가 가능해 졌음을 의미한다.

또, $\theta = 30^\circ$ 에서 빔 정합에 따른 RSS의 크기가 $\theta = 10^\circ$ 혹은 $\theta = 20^\circ$ 에서 보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로는 먼저 아날로그 빔 포머에서 사용하는 벡터 변조기 이득의 반올림 오차가 있다. θ 가 $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 등의 경우일 때에만 식 (4)의 조향 벡터에서 각 성분들의 I채널, Q채널 이득 모두 항상 정수가 됨으로써 이론적으로 구한 조향 벡터와 동일한 빔 포밍을 수행할 수 있다. 그 이외의 각도에서는 조향 벡터의 각 성분에 대한 위상 별 반올림에서 빔 포밍에

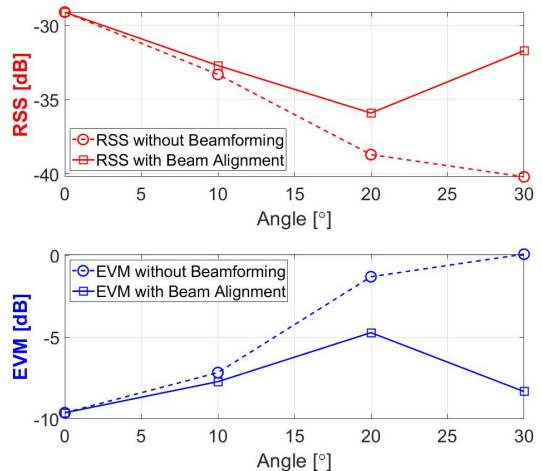


그림 3. 송수신 빔 정합에 따른 RSS 및 EVM 비교
Fig. 3. Comparison of RSS and EVM depending on whether Tx/Rx beam is aligned or not.

오차가 발생한다. 또, 안테나 소자의 현실적인 방사 패턴과, 전력 분배기 및 결합기의 포트 별 위상 불균형도 복합적인 영향을 미친 것으로 생각한다.

V. 결 론

본 연구는 아날로그 빔 포머 테스트베드의 구현 및 실험을 통해 MIMO 채널에서 빔 정합으로부터 얻는 RSS와 EVM 이득을 비교/분석하였다. 실험 결과 최대 이득을 확인한 $\theta = 30^\circ$ 지점에서는 약 8.5 dB의 RSS 이득을 얻을 수 있었고, EVM은 약 87%의 개선을 보였다. 이로써 본 연구에서 구현한 빔 포머 테스트베드가 두 종단으로서 송수신 빔 정합을 이룰 때에 얻는 이득을 검증하였다. 추후 다양한 환경에서 고속의 이동성을 가진 수신단에 대한 실시간 빔 추적 알고리즘을 연구하여 본 테스트베드에 구현할 계획이다.

References

- [1] M. Jeong, J. Kang, and S. Kim, "Trends and prospects for 5G wireless positioning technology and location-based communication technology," *J. KICS*, vol. 35, no. 3, pp. 32-40, Feb. 2018.
- [2] T. S. Rappaport, et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, May 2013.
- [3] 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.
- [4] K. Tateishi, et al., "Indoor experiment on 5G radio access using beam tracking at 15 GHz band," *IEEE 27th Annu. Int. Symp. Pers., Indoor, and Mob. Radio Commun.*, pp. 1-6, Valencia, Spain, Sep. 2016.
- [5] T. Kadur, H. Chiang, and G. Fettweis, "Experimental validation of robust beam tracking in a NLoS indoor environment," *25th ICT*, pp. 644-648, St. Malo, Jun. 2018.
- [6] J. Hong, H. Chung, J. Kang, H. Kim, and S. Kim, "Implementation of Ku-band beamformer using USRP," *2019 KIMST*, pp. 1642-1643, Jeju Isl., Jun. 2019.