

DMRS 신호를 사용한 28GHz MIMO 테스트베드 기반 ToA 추정 성능 분석

민기홍*, 이현수, 정현진, 김선우

*서경대학교 전자공학과, 한양대학교 융합전자공학과

*khmin705@skuniv.ac.kr, {geniusoo, hyeonjingo, remero}@hanyang.ac.kr

28GHz MIMO Testbed based TOA Estimation Performance Analysis Using DMRS Signal

Kihong Min*, Hyunsoo Lee, Hyeonjin Chung, and Sunwoo Kim

Dept. Electronic Engineering, *Seokyeong University, Dept. Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 파일럿 신호인 DMRS(demodulation reference signal)를 사용한 ToA (time of arrival) 추정 성능을 분석하기 위하여 28GHz 테스트베드를 구성하고 실험을 진행하였다. 본 논문은 ToA 추정 관련 연구에 필요한 실제적인 정보를 제공함에 목표를 둔다. 5G NR에서 사용되는 물리 계층 신호인 DMRS 신호를 수집하고 inverse discrete fourier transform를 통해 채널 임펄스 응답으로 변환한 후 ToA를 추정한다. 이어서 추정 결과의 오차를 토대로 root mean square error를 산출하고 실내 환경에서의 ToA 추정 성능을 분석하였다.

1. 서론

최근 mmWave/THz 대역에서의 통신을 위한 핵심 기술로 integrated sensing and communications와 관련된 연구가 활발히 진행 중이다[1]. 이와 같은 기술을 실현시키기 위해서는 물체의 위치를 정확하게 측정하는 것이 필수적이며 ToA(time of arrival)와 같은 물체 사이의 거리 정보가 확보되어야 한다[2]. 5G NR (new radio) downlink 통신에선 채널 정보를 포함한 PDSCH (physical downlink shared channel) DMRS(demodulation reference signal)와 같은 파일럿 신호를 통하여 ToA를 추정할 수 있다[3], [4]. 본 논문은 파일럿 신호를 사용한 ToA 추정 성능을 실험을 통하여 검증하는 과정을 제시한다. 이에 따라 28GHz MIMO (multiple input multiple output) 테스트베드를 구성하고 실내 환경에서 DMRS 신호를 사용한 ToA 추정 성능을 분석한다.

2. DMRS 신호를 사용한 ToA 추정

1. 심볼 구조

DMRS 신호는 5G NR에서 다운 링크 통신 과정 중 수신 신호 복조를 위한 물리 계층 신호이다. DMRS 신호는 PDSCH의 매핑 타입과 DMRS 타입에 따라서 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 심볼 RE(resource element)에 할당되는 패턴이 상이해진다. 따라서 수신단이 할당된 DMRS 신호 패턴을 인지하지 못하면 ToA를 추정할 수 없다. 그림 1 (a)에 본 논문의 실험에서 사용한 DMRS 신호의 RE 할당 패턴을 나타내었다. 그 외 시스템 파라미터는 표 1에 나타내었다.

표 1 시스템 파라미터

파라미터	값	단위
Center frequency	28	GHz
Bandwidth	800	MHz
Subcarrier	1200	-
Subcarrier spacing	75	kHz
FFT size	2048	-
Modulation	QPSK	-
Sampling frequency	3.072	GS/s

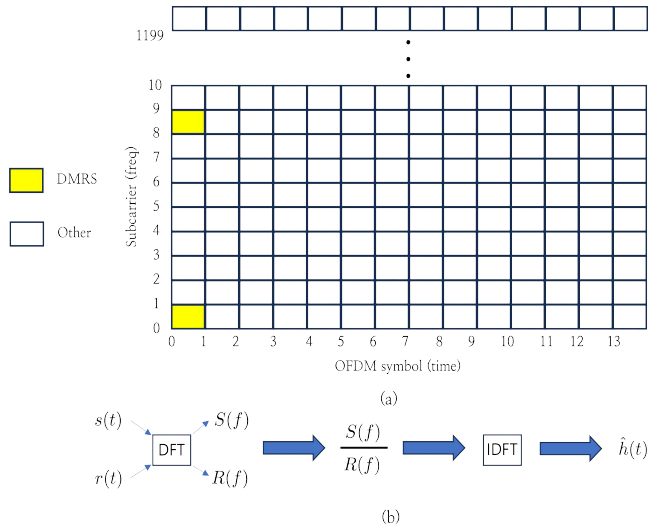


그림 1 (a) DMRS 패턴, (b) 채널 임펄스 응답 추정 모식도

2. ToA 추정 과정

본 논문에서는 수신단의 기저대역 프로세서에서 수집한 DMRS 신호를 사용하여 그림 1 (b)에 나타난 과정을 거쳐 채널 임펄스 응답 $\hat{h}(t)$ 를 추정하고 이후 ToA를 도출한다. 송신 신호 $s(t)$ 는 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{k=0}^{N-1} b_k e^{j\frac{2\pi}{T}kt}, \quad 0 \leq t \leq T + T_G, \quad (1)$$

여기서 $b = [b_0, b_1, \dots, b_{N-1}]$ 는 subcarrier에 포함된 데이터 벡터이며, N 은 subcarrier 개수이다. T 는 DFT(discrete fourier transform)/IDFT(inverse DFT) 길이, T_G 는 가드 밴드 길이이며 두 길이의 합인 $T + T_G$ 는 OFDM 심볼의 길이이다. 시간 영역에서 다중 경로 채널 임펄스 응답 $h(t)$ 는 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \sum_{k=0}^{L_p-1} a_k \delta(t - \tau_k), \quad (2)$$

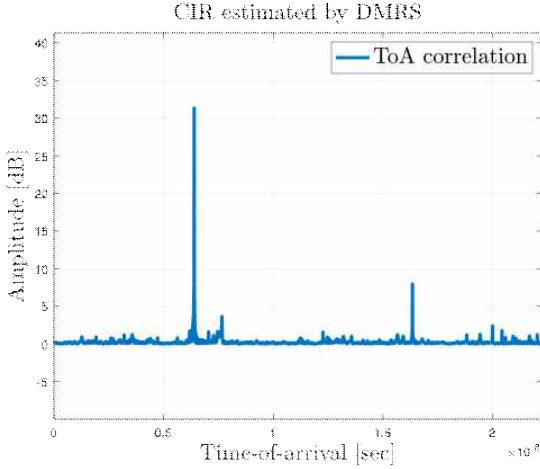


그림 2 실측 DMRS 기반 채널 임펄스 응답

여기서 L_p 는 다중 경로의 개수, a_k 는 감쇠 성분, τ_k 는 k 번째 다중 경로를 통한 전파 지연 시간이다. 또한 τ_0 는 가장 먼저 수신되는 LOS(line-of-sight)에서의 전파 지연 시간임을 유추할 수 있고 이는 구하고자 하는 ToA이다. (1)과 (2)를 통하여 수신 신호 $r(t)$ 를 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{k=0}^{N-1} b_k \left(\sum_{i=0}^{L_p-1} a_i e^{-j\frac{2\pi}{T}k\tau_i} \right) e^{j\frac{2\pi}{T}kt} + n(t) \\ &= \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{k=0}^{N-1} b_k \left(\sum_{i=0}^{L_p-1} a_i e^{-j\frac{2\pi}{T}k\tau_i} + n_k \right) e^{j\frac{2\pi}{T}kt}, \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $n(t)$ 는 잡음 성분이다. (3)을 통하여 k 번째 subcarrier의 수신 신호를 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_k &= b_k \left(\sum_{i=0}^{L_p-1} a_i e^{-j\frac{2\pi}{T}kt} \right) + n_k \\ &= b_k \left(\sum_{i=0}^{L_p-1} a_i e^{-j\frac{2\pi}{T}kt} + w_k \right), \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 n_k 는 복소 가우시안 잡음이고, w_k 는 $n_k b_k^{-1}$ 의 값이다. 이를 통하여 k 번째 subcarrier의 추정 채널 임펄스 응답은 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{H}_k = \sum_{i=0}^{L_p-1} a_i e^{-j\frac{2\pi}{T}k\tau_i} + w_k. \quad (5)$$

송신 신호와 수신 신호는 DFT 과정을 통하여 주파수 영역에서 정의된다. 이 후 송신 신호에 대하여 수신 신호를 나눠준 결과는 IDFT 과정을 통해 그림 2와 같이 $\hat{h}(t)$ 로 변환된다. 이를 토대로 τ_0 를 도출한다.

3. 테스트베드 구성 및 실험 결과 분석

ToA 추정 실험을 위하여 그림 3과 같이 송/수신단 모두 NI (National Instruments) 社의 PXI (PCI extensions for instrumentation) 시스템, TMYTEK 社의 주파수 변환기, 4×4 UPA (uniform planar array) 아날로그 빔포머로 구성된 28GHz MIMO 테스트베드를 구축하였다. PXI 시스템은 FPGA 모듈로 이루어진 기저대역 신호처리 프로세서이며, 각 구성요소의 제어를 위하여 NI PXI 시스템은 LabVIEW, 아날로그 빔포머와 주파수 변환기는 TMLAB kit을 사용하였다.

실험은 송신단과 수신단을 2m 거리로 이격시킨 후 주변에 다수의

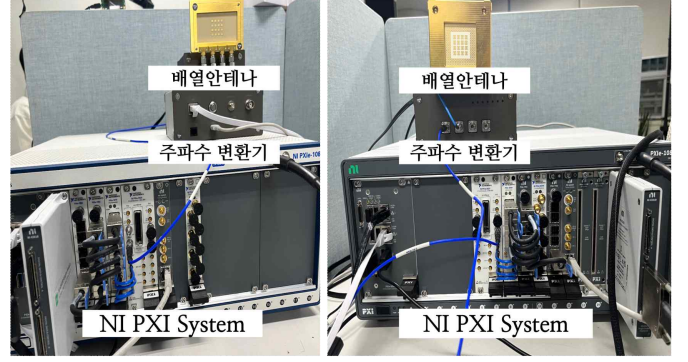


그림 3 28GHz MIMO 테스트베드, (좌) 송신단, (우) 수신단

산란체들이 존재하는 실내 환경에서 진행되었다. DMRS 신호를 활용한 ToA 추정 성능을 분석하기 위하여 RMSE(root mean square error)값을 산출하였다. 실험은 LOS 상황에서 50번 진행하였다. 전체 ToA 추정 결과의 RMSE 산출 결과 지연 시간의 평균 오차는 8.2864ns, 거리로 환산하면 2.4842m임을 확인하였다. 오차의 주된 원인으로서는 다중 경로로 인한 채널 임펄스 응답의 해상도 감소로 추정된다. 이러한 해상도 감소를 해결하는 방법으로 multiple signal classification과 같은 super-resolution 기법들이 존재한다. 그러나 이는 높은 추정 정확성을 가지는 반면 연산량이 급격하게 증가하는 trade-off 관계에 놓여있다[5].

4. 결론

본 논문은 28GHz MIMO 테스트베드를 구성하고 DMRS 신호를 활용한 ToA 추정 실험을 진행함으로써 실내 환경에서의 파일럿 신호 기반 ToA 추정 성능을 분석하였다. 수신단에서 DMRS 신호를 수집하고 IDFT를 통하여 채널 임펄스 응답을 도출하였으며 이를 토대로 지연 시간을 추정하였다. 50번의 실험 결과를 기반으로 RMSE 값을 산출한 결과, 지연 시간의 평균 오차가 8.2864ns임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2023R1A2C3002890).

참고 문헌

- [1] F. Liu *et al.*, "Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless network networks for 6G and beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Jun. 2022.
- [2] A. Liu *et al.*, "A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 2nd qtr. 2022.
- [3] Y. Liu *et al.*, "Highprecision single base station localization assisted by beamforming," *Proc. 2nd Inf. Commun. Technol. Conf. (ICTC)*, May 2021
- [4] X. Li and K. Pahlavan, "Super-resolution TOA estimation with diversity for indoor geolocation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Jan. 2004.
- [5] M. Wu and C. Hao, "Super-resolution TOA and AOA estimation for OFDM radar systems based on compressed sensing," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Dec. 2022.