

밀리미터파 확산 경로 채널에서 CNN 기반 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정

박현우, 김효원, 김선우
한양대학교 융합전자공학부
{stark95, khw870511, remer0}@hanyang.ac.kr

CNN-based Joint Angular and Delay Spread Function Estimation of mmWave Diffuse Path Channel

Hyunwoo Park, Hyowon Kim, and Sunwoo Kim
Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 밀리미터파 통신 SIMO(single-input multiple-output) 확산 경로 채널에서 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN) 기반 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정 알고리즘을 제안한다. 밀리미터파 통신은 원활한 통신을 위한 신호의 도래각 및 시간지연 확산 추정이 필수적이다. 기존의 도래각 스펙트럼 추정 알고리즘은 신호의 도래각 및 시간지연의 스펙트럼을 동시에 추정하는 것이 불가능하다. 제안하는 알고리즘은 주어진 입력에서 특성 획득에 유리한 CNN을 이용하여 다중안테나로 수신한 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 신호에서 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정이 가능하다. 시뮬레이션을 통해 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정을 확인하고 성능을 분석한다.

I. 서론

채널 추정 기술은 다중 안테나를 사용하는 5G 밀리미터파 통신에서 원활한 통신 링크 유지를 위해 필수적으로 필요한 기술이다[1]. 장애물에 의해 LoS(line of sight)가 존재하지 않는 환경에서 신호는 여러 반사면에 산란이 되어 확산 경로로 수신된다[2]. 반사면에 존재하는 각 산란점에 의해 각 경로는 도래각과 시간지연의 정도가 달라지며, 원활한 통신을 위해 확산 경로의 도래각과 시간지연을 동시에 추정하는 방법이 필요하다[3]. 기존의 확산 경로 채널 추정 알고리즘은 single carrier를 사용하여 도래각의 확산 추정만 가능하며 시간지연 확산을 동시에 추정하는 것이 불가능하다[4]. 본 논문에서는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 수신신호와 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN)을 사용하여 확산 경로의 도래각과 시간지연 스펙트럼을 추정하는 알고리즘을 제안하며, 성능을 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 3차원 공간에서 2개의 반사면에 의한 확산 경로로 송수신기가 OFDM으로 통신하는 환경을 고려한다. 2개의 반사면은 평면으로 이루어져 있으며 반사면에 의한 산란점은 반사면의 거친 정도와 위치 및 송수신기와 상대적 각도에 의해 결정된다[2]. 수신기는 1개의 안테나, 송수신기는 M 개의 선형 배열 안테나를 가지며 N 개의 서브캐리어를 가지는 OFDM 수신신호의 s 번째 스냅샷 $\mathbf{r}[s] \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{r}[s] = \mathbf{h}[s]\mathbf{t}[s] + \mathbf{n}[s], \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{t}[s]$ 는 송신신호, $\mathbf{n}[s] \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ 은 잡음이며 채널 $\mathbf{h}[s] \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{h}[s] = \sum_{k=1}^K w_k[s] \mathbf{a}(\theta_k) \otimes \mathbf{b}(d_k), \quad (2)$$

위 식에서 K 는 확산 경로를 생성하는 총 산란점의 개수, $w_k[s] \sim \mathcal{CN}(0, d_k^2)$ 는 각 산란 경로의 경로 손실이며, 도래각 θ_k 에 의한 어레이 벡터 $\mathbf{a}(\theta_k)$ 와 시간지연 d_k 에 의한 OFDM 서브캐리어 벡터 $\mathbf{b}(d_k)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{a}(\theta_k) = \frac{1}{\sqrt{M}} [1, e^{j\pi \cos \theta_k}, \dots, e^{j\pi (M-1) \cos \theta_k}]^T, \quad (3)$$

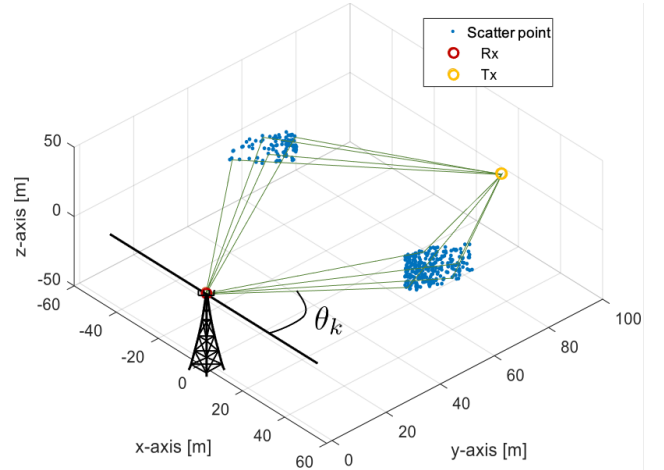


그림 1. 두 개의 반사면에 의한 확산 경로 신호가 수신기에 수신되는 시나리오

$$\mathbf{b}(d_k) = \frac{1}{\sqrt{N}} [1, e^{j2\pi \Delta_f d_k}, \dots, e^{j2\pi (N-1) \Delta_f d_k}]^T, \quad (4)$$

여기서 Δ_f 는 서브캐리어간 간격이다.

III. 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정 알고리즘

각 산란점에 대한 경로 손실은 complex Gaussian normal 분포를 가지며, 따라서 모든 산란점에 대한 도래각과 시간지연을 구하는 것은 매우 어려운 문제이다. 본 논문에서는 S 개의 수신신호 스냅샷을 측정하여 얻어진 공분산 행렬을 이용하여 각 산란점의 도래각과 시간지연에 대한 스펙트럼 히스토그램을 추정하는 것을 목표로 한다.

확산 분포 추정을 위한 신경망의 입력 값은 다음과 같다.

$$\mathbf{X} = [\text{Real}(\mathbf{X}); \text{Imag}(\mathbf{X})], \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{X}' \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 은 공분산 행렬의 첫 열을 $M \times N$ 크기로 변환한 행렬이다. 공분산 행렬 $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{MN \times MN}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{R} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \mathbf{r}[s] \mathbf{r}[s]^H, \quad (6)$$

신경망의 출력 값은 산란점 각도의 코사인 값과 시간지연의 분포를 균등간격

히스토그램으로 구성한다. 입력 값의 인접한 요소들은 도래각과 시간지연에 밀접한 관계가 있으며 도래각과 시간지연 확산을 추정하기 위해 이를 효과적으로 추출 가능한 CNN을 사용한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 2개의 반사면에 의한 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정을 확인하며 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio, SNR)에 따른 추정 평균 제곱근 오차(root mean squared error, RMSE)성능을 분석한다. 여기서 추정 RMSE는 1000개의 테스트 데이터에 대하여 실제 스펙트럼과 추정된 스펙트럼의 제곱근 오차이다.

원하는 신호의 송신 전력은 1W 때, SNR [dB]은 다음과 같다.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma_n^2} \right). \quad (7)$$

송신기의 좌표는 (0m, 0m, 0m)이며 송신기의 안테나는 x 축과 평행하게 나열한다. 수신기는 z 좌표 0m, x 좌표 [-20m, 20m], y 좌표 [60m, 100m] 범위 내 무작위 위치에서 생성한다. 2개의 반사면은 각각 방향이 x - y 평면과 수직, 중심점의 위치는 z 좌표 0m, 가로 세로 모두 [20m, 30m] 범위 내 무작위 크기를 가지며, 서로간의 확산경로를 가리지 않도록 무작위 생성한다. 각 반사면은 [2]을 따라 산란점의 개수와 위치를 생성한다. 시뮬레이션 매개변수는 표 1 과 같다.

그림 2는 SNR에 따른 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정 예시이다. OFDM 수신신호와 CNN으로 도래각과 시간지연의 스펙트럼 분포를 동시에 추정함을 확인 가능하다. SNR이 높아질수록 실제 스펙트럼과 더욱더 유사하게 추정함을 확인 가능하다. 추정 결과 실제 스펙트럼에 비해 약간의 끊긴 부분과 잡티 부분이 존재하지만 반사면의 연속적 특성을 이용하여 개선이 가능하며, 시나리오의 역 추정에 사용 가능하다. 그림 3은 추정 RMSE를 SNR에 따라 구한 것이다. SNR이 증가하면, 잡음의 영향이 줄어들어 보다 정확한 스펙트럼 예측이 가능함을 확인 가능하다.

V. 결론

본 논문에서는 밀리미터파 통신 SISO 확산 경로 채널에서 합성곱 신경망 기반 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정 알고리즘을 제안한다. 도래각과 시간지연의 스펙트럼을 추정하기 위해 본 논문에서는 시간 지연 정보를 내포하는 OFDM 수신신호를 도입한다. 수신신호 스냅샷을 관측한 이후 공분산 행렬을 연산, 특성 추출에 유리한 합성곱 신경망을 통해 도래각 및 시간지연 스펙트럼을 추정한다. 시뮬레이션을 통해 첫 번째로 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정 결과를 확인하며, 두 번째로 SNR에 따른 RMSE성능을 측정한다. 시뮬레이션 결과 OFDM 수신신호에서 CNN을 통해 도래각과 시간지연의 스펙트럼 추정이 가능함을 확인하고, SNR이 클수록 추정 성능이 향상됨을 확인한다. 추정의 결과는 확산 경로의 채널 추정이 가능함을 보이며, 추후 시나리오의 재구성에 활용 가능하다.

표 1. 시뮬레이션 매개변수

매개변수	값
반사면 거친 정도 계수	10
안테나 원소 개수 M	64
OFDM 서브캐리어 수 N	100
스냅샷 수 S	64
OFDM 서브캐리어 간격 Δ_f	960 kHz
신호 대 잡음 비 SNR	0, 5, 10, 15, 20 dB
합성곱 신경망 층 수	4
학습률	0.000003
학습 데이터 수	100,000
학습 횟수	20

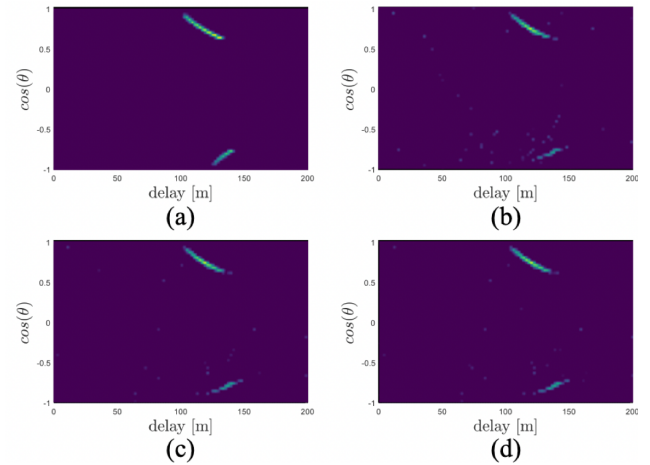


그림 2. SNR에 따른 도래각 및 시간지연 스펙트럼 (a) 실제, (b) SNR = 0 dB, (c) SNR = 10 dB, (d) SNR = 20 dB

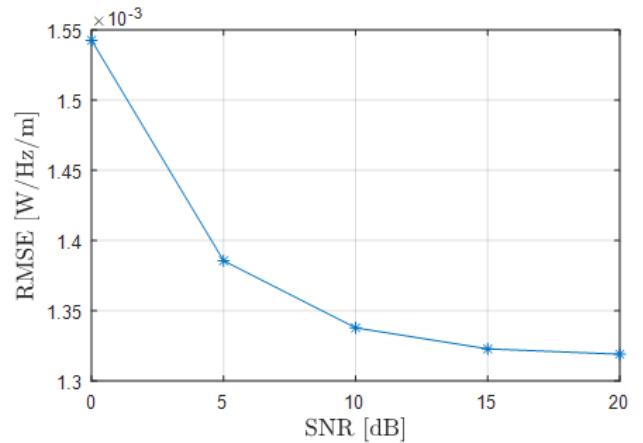


그림 3. SNR에 따른 도래각 및 시간지연 스펙트럼 추정 RMSE

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (2016-0-00208 차세대 5G V2X 서비스 실현을 위한 정밀 측위탐색 연계 고효율 다중안테나 정보전송 및 네트워크 기술 연구)

참고 문헌

- [1] A. Alkhateeb *et al.*, "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 831-846, Oct. 2014.
- [2] J. Kulmer *et al.*, "Impact of rough surface scattering on stochastic multipath component models," in *Proc. IEEE 29th Annu. Int. Symp. Pers., Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 1410-1416, Sep. 2018.
- [3] F. Wen *et al.*, "5G positioning and mapping with diffuse multipath," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 2, pp. 1164-1174, Feb. 2021.
- [4] Song, Yi *et al.*, "Machine learning for geometrically-consistent angular spread function estimation in massive MIMO," *arXiv:1910.13795*, 2019.