

양자 무선 센싱을 위한 MLP 초기화 기반 채널 추정 기법

민기홍, 원종찬, 김한빛, 김선우

한양대학교 융합전자공학과

{khmin705, wonjc71, dante0813, remero}@hanyang.ac.kr

MLP Initialization-based Channel Estimation Method for Quantum Wireless Sensing

Kihong Min, Jongchan Won, Hanvit Kim, and Sunwoo Kim

Dept. Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 MLP (Multi-Layer Perceptron) 기반 초기화 기법을 활용한 리드버그 원자 수신기 시스템에서의 채널 추정 기법을 제안한다. 리드버그 원자 수신기를 통하여 채널을 추정하기 위해서는 비볼록 최적화 문제를 해결해야 하며 이는 초기값에 따라 성능이 상이하다. 제안하는 기법은 기존 초기화 기법을 사용한 채널 추정 알고리즘 대비 더 정확한 채널 추정 성능을 달성하며 이를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

I. 서론

mmWave/THz 대역 전자기 신호를 감지하기 위한 초고감도 센서로 리드버그 원자 수신기가 주목받고 있다 [1]. 다만 리드버그 원자 수신기는 광-전류 신호 변환 과정 중에 위상 정보를 잃기 때문에 측정값의 위상 복원 문제로부터 전역 최적해를 찾아야만 채널을 추정할 수 있게 된다. 이때, 위상 복원을 위한 비볼록 최적화 문제는 초기값에 따라 전역 최적해로의 수렴 가능성이 결정된다 [2]. 그러나 기존의 초기값을 추정하기 위한 spectral method는 성능은 측정 샘플 개수에 의존적이고 추가적인 계산 비용을 수반한다는 단점이 존재한다 [3]. 본 논문에서는 전역 최적해로의 수렴 안정성을 높이고 계산 복잡도를 줄인 MLP (Multi-Layer Perceptron) 기반 초기화 기법을 통한 채널 추정 알고리즘을 제안한다. 이후 시뮬레이션을 통하여 제안 기법과 spectral method 기반 채널 추정 성능을 비교하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 상향링크 채널 추정 시나리오를 그림 1에 나타내었다. N 개의 vapor cell은 등 간격 선형 배열 형태로 구성되며 각 vapor cell은 RF (Radio Frequency) 신호를 수신하는 안테나 역할을 한다. K 개의 단말으로부터 송신된 RF 신호는 vapor cell 내부 알칼리 원자의 최외각 전자의 상태를 전이시키고, PD(PhotoDetector)를 통하여 광검출된다. 리드버그 원자 수신기의 상세한 신호 검출 과정은 [4]에 기술되어 있다.

리드버그 원자 수신기를 활용한 채널 추정을 위하여 K 개의 단말은 사전에 정의된 파일럿 신호 $\mathbf{s}_p = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 를 P 개의 스냅샷에 걸쳐 송신한다. 이에 따라 n 번째 vapor cell에서의 수신 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{y}_n = |\mathbf{S}^H \mathbf{a}_n + \mathbf{b}_n + \mathbf{w}_n| \in \mathbb{R}^{P \times 1}, \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_P] \in \mathbb{C}^{K \times P}$, $\mathbf{a}_n = [a_{n,1}, a_{n,2}, \dots, a_{n,K}]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 는 파일럿 행렬, 리드버그 원자 수신기의 n 번째 채널 벡터를 의미한다. 이때, 채널 벡터의 각 요소는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{n,k} = \sum_{l=1}^L \frac{1}{\hbar} (\boldsymbol{\mu}_{eg}^T \boldsymbol{\epsilon}_{n,k}) \alpha_{k,l} e^{-j(n-1)\varphi_{k,l}}, \quad (2)$$

여기서 L 은 신호 경로의 수, \hbar 는 축소된 플랑크 상수, $\boldsymbol{\mu}_{eg}$ 는 전이 쌍극자 모멘트를 의미한다. $\boldsymbol{\epsilon}_{n,k}$ 는 n 번째 vapor cell로 입사한 k 번째 단말 송신 신호의 편파이다. $\alpha_{k,l}$ 와 $\varphi_{k,l}$ 는 각각 k 번째 단말을 통한 l

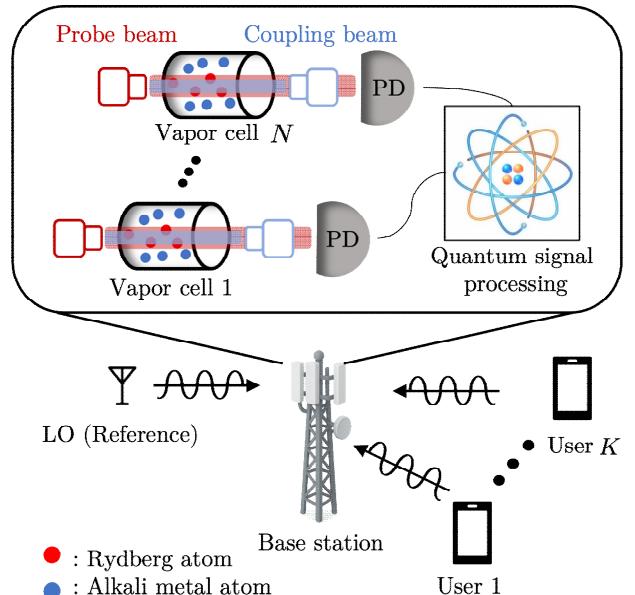


그림 1 리드버그 원자 수신기를 활용한 상향링크 채널 추정 시나리오
번체 경로의 채널 이득, 위상 천이를 의미한다.
 $\mathbf{b}_n = [b_n, b_n, \dots, b_N]^H \in \mathbb{C}^{P \times 1}$ 는 전역 위상 모호성을 제거하기 위한 LO (Local Oscillator) 참조 신호를 의미한다. 리드버그 원자 수신기의 잡음 $\mathbf{w}_n = [w_{n,1}, w_{n,2}, \dots, w_{n,P}]^H \in \mathbb{C}^{P \times 1}$ 는 복소 가우시안 랜덤 벡터이며 $CN(0, \sigma_n^2 \mathbf{I})$ 를 따른다. 여기서 σ_n^2 는 quantum shot noise의 전력을 나타낸다.

III. MLP 초기화 기반 채널 추정 알고리즘

(1)로부터 채널 벡터를 추정하기 위한 위상 복원 문제는 다음과 같이 LS(Least Square)를 활용하여 풀 수 있는 형태의 최적화 문제로 나타낼 수 있다.

$$\min_{\mathbf{a}} \| \mathbf{y} - |\mathbf{S}^H \mathbf{a} + \mathbf{b}| \|_2^2, \quad (3)$$

여기서 $\|\cdot\|_2$ 는 L2 노름을 의미한다. 이때, $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ 의 위상 정보를 $e^{j\theta} = [e^{j\angle y_1}, e^{j\angle y_2}, \dots, e^{j\angle y_N}]^T$ 라 하면 (3)은 \mathbf{a} 와 $e^{j\theta}$ 를 동시에 최적화하는 비볼록 최적화 문제로서 다음과 같이 정의된다.

$$\min_{\mathbf{a}, \theta} \| \mathbf{y} \circ e^{j\theta} - |\mathbf{S}^H \mathbf{a} + \mathbf{b}| \|_2^2. \quad (4)$$

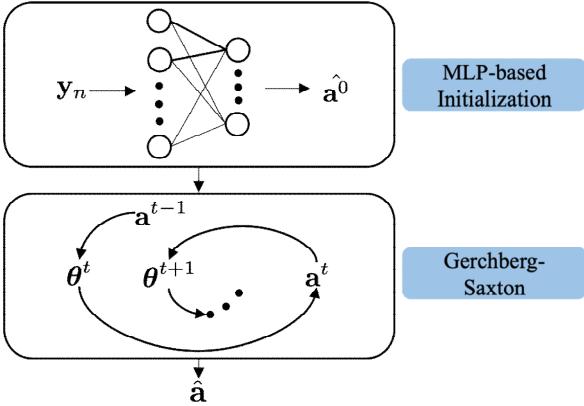


그림 2 채널 추정을 위한 제안 기법 모식도

(4)와 같은 비볼록 최적화 문제는 alternating minimization 기법을 통하여 해결할 수 있다. 이때, 최적화 문제를 풀기 위한 초기값을 적절히 찾지 못하면 최적해로의 수렴 속도는 감소하며 국소 최적해에 빠질 가능성이 커진다. 그림 2와 같이 제안 기법의 MLP 모델은 수신 신호 \mathbf{y}_n 로부터 채널 벡터 초기값 \mathbf{a}^0 을 추정하도록 훈련한다. 초기 채널 벡터의 방향과 크기를 모두 학습하기 위하여 코사인 유사도와 MSE(Mean Square Error)를 동시에 고려한 손실함수를 정의한다.

$$Loss(\hat{\mathbf{a}}, \mathbf{a}^0) = Loss_{cos} + \beta Loss_{MSE}, \quad (5)$$

여기서 β 는 두 손실함수의 가중치를 조절하기 위한 하이퍼 파라미터이다. 초기 채널 벡터의 방향을 학습하기 위한 코사인 유사도 손실 함수는 다음과 같다.

$$Loss_{cos} = 1 - \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \frac{|\langle \hat{\mathbf{a}}_i^0, \mathbf{a}_i^0 \rangle|}{\|\hat{\mathbf{a}}_i^0\|_2 \|\mathbf{a}_i^0\|_2}, \quad (6)$$

여기서 B 는 배치 사이즈이다. 초기 채널 벡터의 크기를 학습하기 위한 MSE 손실 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$Loss_{MSE} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \|\hat{\mathbf{a}}_i^0 - \mathbf{a}_i^0\|_2^2. \quad (7)$$

초기 채널 벡터 추정 후 GS (Gerchberg-Saxton) 알고리즘을 통하여 θ 와 \mathbf{a} 를 t 번의 반복 횟수만큼 추정한다. θ^t 는 이전 추정치 \mathbf{a}^{t-1} 를 활용하여 $\theta^t = \angle(\mathbf{S}^H \mathbf{a}^{t-1} + \mathbf{b})$ 와 같이 최적화된다. 해당 위상 정보를 기반으로 최적 채널 벡터는 $\mathbf{a}^t = (\mathbf{S} \mathbf{S}^H)^{-1} \mathbf{S} (\mathbf{y} \circ e^{j\theta^t} - \mathbf{b})$ 와 같이 계산한다. 해당 과정을 모든 vapor cell에 대하여 수행하면 최종 채널 행렬 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N] \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 을 복구하게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과

경로 채널 이득은 $CN(0,1)$ 을 따르며 β 는 0.1로 설정하였고 이외의 시뮬레이션 파라미터는 표 1에 기술하였다. SNR(Signal to Noise Ratio)에 따른 채널 추정 NMSE(Normalized MSE)를 그림 3에 나타내었으며 (8)과 같이 계산한다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

| 파라미터 | 값 | 단위 |
|-------------------|------|-----|
| Carrier Frequency | 5 | GHz |
| K | 3 | - |
| N | 8 | - |
| P | 50 | - |
| 몬테-카를로 시행 수 | 1000 | - |

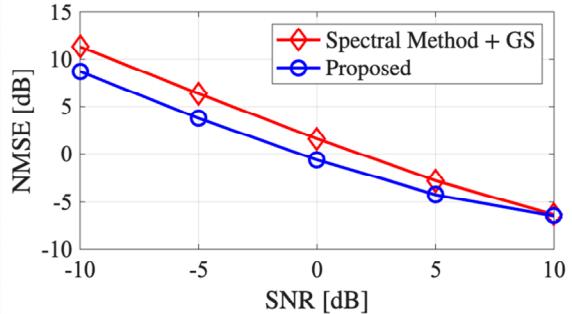


그림 3 SNR에 따른 채널 추정 NMSE 도출 결과

$$NMSE = \frac{\mathbf{E}(\|\mathbf{A} - \hat{\mathbf{A}}\|_2^2)}{\mathbf{E}(\|\mathbf{A}\|_2^2)}, \quad (8)$$

여기서 \mathbf{E} 는 기댓값 연산자를 의미한다. MLP 모델이 추정한 초기값을 통하여 채널을 추정한 결과, 기존 초기화 기법을 사용한 알고리즘 대비 채널 추정 결과가 더 정확함을 확인할 수 있다. 이는 제안 기법이 타 알고리즘에 비하여 국소 최적해에 빠지는 횟수가 평균적으로 감소했기 때문으로 보인다.

제안 기법은 MLP 모델의 병렬 계산을 활용하여 벤치마크 알고리즘 대비 낮은 평균 계산 시간을 가진다. 계산 시간을 확인하기 위하여 AMD Ryzen 9 7950x 16-core processor와 64 GB RAM을 사용하였다. 시뮬레이션 결과, spectral method는 평균 계산 시간이 4.04×10^{-4} sec, MLP 기반 초기화는 1.05×10^{-6} sec이다. Spectral method 기반 초기화 과정의 계산 복잡도는 $O(K^3)$ 이며 K 가 증가함에 따라 계산 비용이 급증함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 양자 무선 센싱 시스템에서의 MLP 기반 초기회를 활용한 채널 추정 기법을 제안한다. 제안 기법은 MLP 모델이 추정한 초기 채널 벡터를 기반으로 반복 최적화를 통하여 채널을 추정한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법을 통한 채널 추정 성능이 기존 알고리즘 대비 더 정확함을 확인하였으며, 계산에 소요되는 시간이 감소한다는 것을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00409492).

참 고 문 헌

- [1] C. L. Holloway, M. T. Simons, J. A. Gordon and D. Novotny, "Detecting and receiving phase-modulated signals with a Rydberg atom-based receiver," *IEEE Antennas and Wirel. Propag. Lett.*, Sep. 2019.
- [2] P. Netrapalli, P. Jain, and S. Sanghavi, "Phase retrieval using alternating minimization," *IEEE Trans. Signal Process.*, Sep. 2015.
- [3] J. Ma, R. Dudeja, J. Xu, A. Maleki and X. Wang, "Spectral method for phase retrieval: An expectation propagation perspective," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, Feb. 2021.
- [4] 김한빛, 원종찬, 민기홍, 김선우, "리드버그 원자 수신기 기반 양자 통신 및 센싱 기술 연구 동향," *한국통신학회지 (정보와통신)*, Oct. 2025.