

양자 무선 센싱을 위한 CNN 기반 위상 복구 알고리즘

민기홍, 김한빛, 박현우, 김선우

한양대학교 융합전자공학과

{khmin705, dante0813, stark95, remero}@hanyang.ac.kr

CNN based Phase Retrieval Algorithm for Quantum Wireless Sensing

Kihong Min, Hanvit Kim, Hyunwoo Park and Sunwoo Kim

Dept. Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 다중 단말을 고려한 통신 환경에서 리드버그 양자 수신기를 활용한 CNN (Convolutional Neural Network) 기반 위상 복구 알고리즘을 제안한다. 리드버그 양자 수신기는 수신 신호의 진폭 값만을 측정할 수 있어 위상 정보를 손실하며 이를 해결하기 위한 biased GS (Gerchberg-Saxton) 알고리즘은 높은 계산 복잡도를 수반한다는 한계가 존재한다. 제안하는 알고리즘은 지도학습을 기반으로 기존 알고리즘이 가지는 반복적인 위상 복구 절차를 생략하고 더 높은 위상 복구 성능을 달성하며 이를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

I. 서론

차세대 통신 시나리오에서 초정밀, 초고신뢰 통신 기술을 요구함으로써 양자 무선 센싱 기술이 고안되었다 [1]. 리드버그 양자 수신기는 진폭 값만을 측정할 수 있어 신호의 위상 정보를 손실한다. 이러한 비선형 위상 복구 문제를 해결하기 위하여 대표적으로 biased GS (Gerchberg-Saxton) 알고리즘이 존재한다 [2]. 그러나 biased GS 알고리즘은 수신 신호의 분포를 고려하지 않아 성능 개선에 한계가 존재한다. 또한 초기값 설정과 반복적인 파라미터 업데이트로 인하여 높은 계산 복잡도를 수반한다 [3]. 본 논문에서는 지도학습을 기반으로 반복적인 위상 복구 절차를 생략하여 낮은 계산 복잡도를 달성하고 기존 알고리즘 대비 우수한 성능을 보이는 CNN (Convolutional Neural Network) 기반 위상 복구 알고리즘을 제안한다. 또한 이를 시뮬레이션을 통하여 기존 알고리즘의 성능과 비교 및 분석한다.

II. 리드버그 양자 수신기 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 N 개의 vapor cell로 이루어진 uniform linear array 구조의 리드버그 양자 수신기와 K 개의 단말, 혼 안테나 기반의 LO(local oscillator)를 고려한다. Vapor cell 각각에 PD(Photon Detector)가 연결되어 있으며 모든 단말은 동일한 carrier frequency의 신호를 송신한다.

A. 리드버그 양자 수신기 개요

양자 무선 센싱에서는 vapor cell 내부의 리드버그 원자가 기존 무선 통신 시스템의 RF (Radio Frequency) 신호를 수신하는 안테나 역할을 한다. 따라서 기존의 아날로그 소자(e.g., mixer, 증폭기)로 인한 thermal noise로부터 자유롭다는 이점이 있다. 양자 수신기는 EIT (Electromagnetically Induced Transparency) 및 AT(Autler-Townes) splitting[4] 현상을 통하여 측정된 Rabi frequency를 기반으로 수신 신호를 분석한다. 이 때, Rabi frequency에는 k 번째 단말의 송신 심볼 s_k 가 인코딩 되어 있으며 n 번째 양자 수신기에서 측정된 Rabi frequency $\Omega_{R,n}$ 는 다음과 같이 정의된다[1].

$$\Omega_{R,n} = \left| \sum_{k=1}^K \frac{1}{\hbar} \mu_{eg}^H \epsilon_{n,k} \sqrt{P} \rho_{n,k} |s_k| e^{j(\varphi_{n,k} + \gamma_k)} \right|, \quad (1)$$

여기서 μ_{eg} 는 전이 쌍극자 모멘트[4], \hbar 는 축소된 플랑크 상수, P 는 송신 신호의 파워를 뜻한다. $\epsilon_{n,k}$, $\rho_{n,k}$, s_k , $\varphi_{n,k}$ 는 각각 n 번째 양자 수신기로

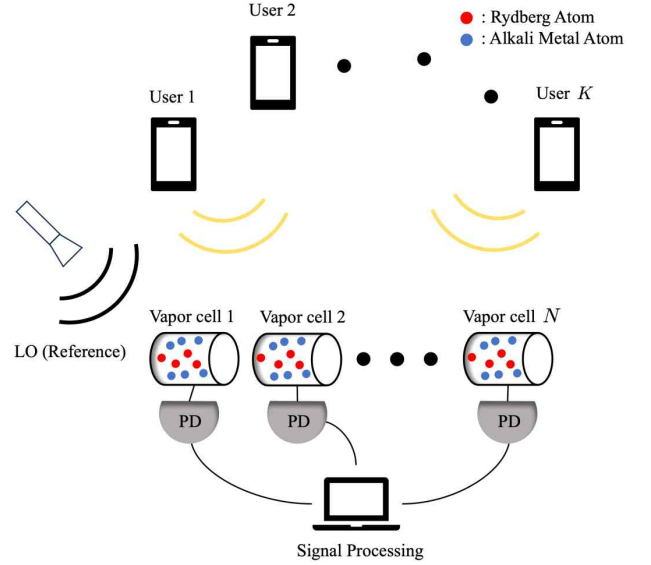


그림 1 리드버그 원자 수신기 기반 다중 단말 센싱 시나리오

입사한 k 번째 단말 송신 신호의 편파, 경로손실, 송신 신호, 위상 이동을 나타낸다.

B. 리드버그 양자 수신기 기반 수신 신호 모델링

본 논문에서는 n 번째 양자 수신기에서 측정된 $\Omega_{R,n}$ 를 z_n 으로 정의하며 이는 수신 신호와 동치이다. 이에 따라 [1]에서 고안한 양자 수신기의 수신 신호 z 는 다음과 같이 모델링된다.

$$z = |A^H s + b + w| \in \mathbb{R}^{N \times 1}, \quad (2)$$

여기서 $s = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$, $A = [a_1, a_2, \dots, a_N] \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 는 송신 신호, 양자 수신기의 무선 채널 모델이다. n 번째 채널 벡터는 $a_n = [a_{n,1}, a_{n,2}, \dots, a_{n,K}]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 와 같이 정의되며 각 구성요소는 $a_{n,k} = \frac{1}{\hbar} (\mu_{eg}^T \epsilon_{n,k}) \sqrt{P_k} \rho_{n,k} e^{-j\varphi_{n,k}}$ 로 정의된다.

양자 수신기의 수신 신호는 진폭 값만을 측정하여 신호 처리과정에서 위상 값 손실이 발생하는 비선형 위상 복구 문제로 정의된다. 본 논문에서는 위상 모호성을 해결하기 위하여 LO를 통한 heterodyne detection[1] 기법을 활용한다. 식 (2)에서 $b = [b_1, b_2, \dots, b_N]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 참조 신호를 나타내며 각 구성요소는

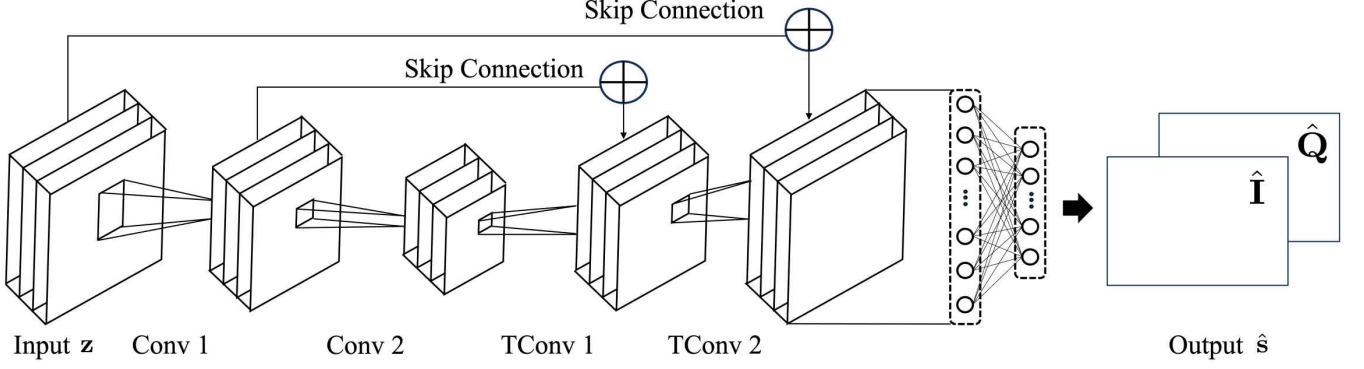


그림 2 CNN 기반 위상 복구 알고리즘의 지도학습 기반 모델 모식도

$b_n = \frac{s_b}{\hbar} (\mu_{eg}^H \epsilon_{b,n}) \sqrt{P_b} \rho_{b,n} e^{j\varphi_{b,n}}$ 로 정의된다. 여기서 s_b , $\sqrt{P_b}$, $\epsilon_{n,b}$, $\rho_{n,b}$, $\varphi_{n,b}$ 는 각각 참조 신호 및 참조 신호의 파워, 편파, 경로손실, 위상이동을 나타낸다. 양자 수신기의 잡음 \mathbf{w} 는 복소 가우시안 랜덤 벡터이며 $CN(0, \sigma_n^2 \mathbf{I})$ 의 분포를 따른다. 여기서 σ_n^2 는 quantum shot noise[4]의 파워를 나타낸다.

III. CNN 기반 위상 복구 알고리즘

본 장에서는 리드버그 양자 수신기 시스템을 활용한 CNN 기반 위상 복구 알고리즘을 제안한다. 그림 2와 같이 제안 알고리즘의 지도학습 기반 모델은 EIT-AT 현상을 통하여 측정된 \mathbf{z} 를 입력값으로 사용하며 송신 심볼 \mathbf{s} 를 추정하도록 훈련한다. 손실 함수는 추정 심볼 $\hat{\mathbf{s}}$ 와 \mathbf{s} 의 I/Q 데이터 차이에 대한 NRMSE(Normalized Root Mean Square Error)로 다음과 같이 정의한다.

$$Loss(\hat{\mathbf{s}}, \mathbf{s}) = \sqrt{\frac{|\mathbf{I} - \hat{\mathbf{I}}|^2 + |\mathbf{Q} - \hat{\mathbf{Q}}|^2}{|\mathbf{I} + j\mathbf{Q}|^2}}, \quad (3)$$

여기서 \mathbf{I} , \mathbf{Q} 는 \mathbf{s} 의 I/Q 데이터, $\hat{\mathbf{I}}$, $\hat{\mathbf{Q}}$ 는 $\hat{\mathbf{s}}$ 의 I/Q 데이터이다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문의 시뮬레이션에서 $\mu_{eg} = [0, 1785.916qa_0, 0]^T$ 이며 여기서 q 는 전하량, a_0 는 보어 반지름을 뜻한다. 이외 시뮬레이션 파라미터는 표 1에 기술하였다. 제안 알고리즘의 위상 복구 성능을 검증하기 위하여 SNR(Signal to Noise Ratio)에 따른 $\hat{\mathbf{s}}$ 의 NMSE(Normalized Mean Square Error)를 산출하였다. 그림 3에 biased GS 알고리즘과 제안 알고리즘의 NMSE 산출 결과를 나타내었다. 모든 SNR에 대하여 biased GS 알고리즘 대비 제안 알고리즘의 NMSE가 낮음을 확인할 수 있다. 또한 제안 알고리즘은 SNR -6, -4, -2 dB에서 biased GS 알고리즘 대비 NMSE가 약 30 dB 낮아 낮은 SNR에서 두드러지는 성능을 보이는 것을 확인하였다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값	단위
Carrier Frequency	5	GHz
K	3	-
N	36	-
a_0	5.292×10^{-11}	m
몬테-카를로 시행 수	2500	-

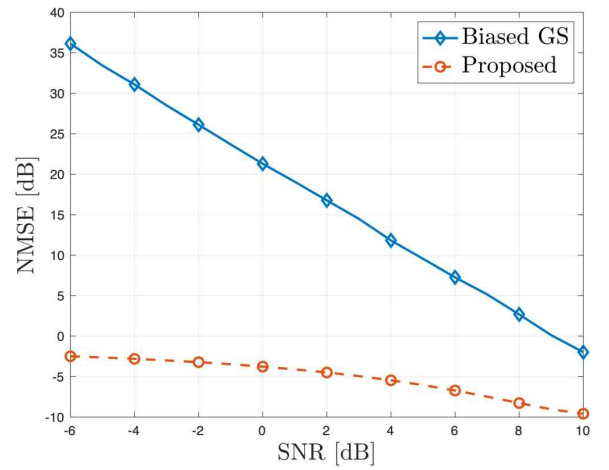


그림 3 SNR에 따른 위상 복구 알고리즘 성능 비교

V. 결론

본 논문에서는 진폭 값을 측정할 수 있는 리드버그 양자 수신기 시스템을 활용한 CNN 기반 위상 복구 알고리즘을 제안한다. 기존 biased GS 알고리즘은 반복적인 위상 복구 절차로 인하여 높은 계산 복잡도를 가진다. 이를 제한하는 알고리즘은 지도학습 기반의 모델을 통하여 해결하고 기존 알고리즘 대비 우수한 위상 복구 성능을 달성함을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] H. Kim, H. Park, and S. Kim, "Quantum-music: Multiple signal classification for quantum wireless sensing," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, Mar. 2025.
- [2] P. Netrapalli, P. Jain, and S. Sanghavi, "Phase retrieval using alternating minimization," *IEEE Trans. Signal Process.*, Sep. 2015.
- [3] D. Orsuti et al., "Deep learning-based phase retrieval scheme for minimum phase signal recovery," *J. Lightw. Technol.*, Jan. 2023.
- [4] C. T. Fancher, D. R. Scherer, M. C. S. John, and B. L. S. Marlow, "Rydberg atom electric field sensors for communications and sensing," *IEEE Trans. Quantum Eng.*, Mar. 2021.