

리드버그 양자 수신기를 활용한 도래각 추정

김한빛, 박현우, 김선우
한양대학교 융합전자공학과

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

Direction-of-Arrival Estimation for Rydberg Atomic Receivers

Hanvit Kim, Hyunwoo Park, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문은 리드버그 양자 수신기를 활용한 도래각 추정 알고리즘을 제안한다. 리드버그 양자 수신기는 안테나, RF (radio frequency) 장비들을 활용하여 신호처리를 하는 기존 수신기와는 달리 리드버그 원자의 에너지 준위 차이를 활용하여 전파를 수신한다. 따라서 RF 장비로부터 유발되는 열 잡음으로부터 자유로워 높은 도래각 추정 성능을 달성 가능하나, 수신 신호 측정값의 절대값 형태로 인하여 위상 정보가 존재하지 않는다. 따라서 본 논문은 이러한 리드버그 양자 수신기의 시스템 모델 및 이에 적합한 도래각 추정 알고리즘을 제안한다.

I. 서론

리드버그 양자 수신기 (Rydberg atomic receiver)는 고에너지 준위를 갖는 리드버그 원자를 활용하여 기존 안테나 기반 RF (radio frequency) 수신기 대비 고정밀 센싱 성능을 달성할 수 있다 [1]. 그러나 수신 신호의 위상 정보가 접근 가능한 기존 RF 수신기의 수신 신호 측정값과는 달리, 리드버그 양자 수신기 기반 측정값은 절대값 형태로 인하여 수신 신호의 위상 정보가 삭제된다. 따라서 본 논문은 리드버그 양자 수신기의 시스템 모델을 소개하고 이에 적합한 도래각 추정 알고리즘을 제안 후 기존 RF 수신기와 비교를 통하여 성능을 분석한다.

II. 도래각 추정을 위한 리드버그 양자 수신기 시스템 모델

리드버그 양자 수신기는 수신 신호 처리를 위한 기존 수신기의 다이폴 안테나 및 RF front-end를 리드버그 원자와 PD (photodetector)로 대체한다. 특히, PD와 양자 광학 현상인 EIT (electromagnetic-induced transparency)와 AT (Autler-Towne) splitting을 통하여 Rabi frequency를 관측한다 [2]. 여기서, Rabi frequency는 수신기로 입사하는 전파에 따라 리드버그 원자의 에너지 준위 확률이 변동하는 주파수로 정의되며, Rabi frequency 값을 관측함으로써 전자파의 신호, 채널 정보를 획득할 수 있다.

우리는 그림 1과 같이 K 개의 유저가 존재하는 다중 유저 업링크 통신 환경을 고려한다. 여기서, 리드버그 양자 수신기는 리드버그 원자로 채워진 M 개의 vapor cell과 PD로 구성되어 있으며, 채널은 LoS (line-of-sight)만 존재한다고 가정한다. 또한, 신호의 위상 정보 획득을 위하여 사전에 정의된 기준 신호를 송신하는 LO (local oscillator)를 활용한다. 이러한 환경에서, m 번째 PD에서 관측되는 Rabi frequency Ω_m 은 다음과 같이 표현된다 [3].

$$\Omega_m = \left| \sum_{k=1}^K \frac{1}{\hbar} (\mu_{eg}^H \epsilon_{m,k}) \sqrt{P_k} \rho_{m,k} s_k e^{j\varphi_{m,k}} \right|, \quad (1)$$

여기서 \hbar , μ_{eg} , $\epsilon_{m,k}$, P_k 는 k 번째 유저로부터 m 번째 안테나로 입사된 신호의 환산 플랑크 상수, 전이 쌍극자 모멘트, 편광 방향, 그리고 송신 신호의 세기를 의미한다. $\rho_{m,k}$, s_k , $\varphi_{m,k}$ 는 각각 신호 감쇄, 송신 신호, 그리고 위상 천이를 의미한다. m 번째 Rabi frequency의 측정값 $\hat{\Omega}_m$ 을 $\hat{\Omega}_m = y_m$ 과 같이 정의한다. 이후, 수신 신호 벡터 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ 는 다음과 같이 정의된다 [3].

$$\mathbf{y} = |\mathbf{A}^H \mathbf{s} + \mathbf{b} + \mathbf{n}| \in \mathbb{R}^{M \times 1}, \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_M] \in \mathbb{C}^{K \times M}$, $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 는 각각 리드버그 양자 수신 신호의 채널 행렬, 기준 신호, 그리고 송신 신호 벡터를 의미한다. 채널 행렬 \mathbf{A} 의 m 번째 열벡터인 $\mathbf{a}_m = [a_{m,1}, a_{m,2}, \dots, a_{m,K}]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 은 모든 유저와

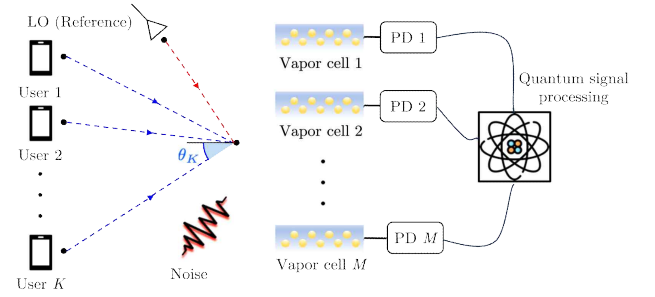


그림 1 리드버그 양자 수신기를 활용한 도래각 추정 모식도

m 번째 안테나 사이의 채널을 의미하며, $a_{m,k}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{m,k} = \frac{1}{\hbar} (\mu_{eg}^H \epsilon_{m,k}) \sqrt{P_k} \rho_{m,k} e^{j\varphi_{m,k}}. \quad (3)$$

또한 송신 신호의 위상 모호성을 제거하기 위하여 LO를 도입하며, 여기서 기준 신호는 $b_m = \frac{s_b}{\hbar} (\mu_{eg}^H \epsilon_{m,b}) \sqrt{P_b} \rho_{m,b} e^{j\varphi_{m,b}}$ 와 같이 정의된다. 마지막으로, \mathbf{n} 은 리드버그 양자 수신기의 잡음을 의미하며, 잡음의 세기는 quantum shot noise power σ_n^2 로 표현된다.

III. 리드버그 양자 수신기를 위한 도래각 추정 알고리즘

수식 (2)에서 확인할 수 있듯이, 리드버그 양자 수신기의 신호 모델은 절대값으로 표현된다. 따라서 신호의 위상 정보가 삭제되며, 이는 안테나 요소 간 위상 차이 정보를 활용하는 기존 도래각 추정 알고리즘들을 적용 불가능하게 한다. 따라서 본 논문은 (2)를 활용한 도래각 추정을 위하여 먼저 수신 신호의 위상 복원 (phase retrieval, PR)을 진행한다. P 개의 스냅샷을 갖는 송신 신호 $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_P] \in \mathbb{C}^{K \times P}$ 를 가정한다. 이 경우, m 번째 안테나의 수신 신호 $\mathbf{z}_m = [z_{m,1}, \dots, z_{m,P}]^T \in \mathbb{R}^{P \times 1}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_m = |\mathbf{S}^H \mathbf{a}_m + \mathbf{b}_m + \mathbf{n}_m|. \quad (4)$$

여기서, \mathbf{z}_m 의 위상 정보가 획득 불가능하기 때문에, 위상 정보가 살아있는 임의의 신호 $\bar{\mathbf{z}}_m = \mathbf{S}^H \mathbf{a}_m + \mathbf{b}_m + \mathbf{n}_m = [\bar{z}_{m,1}, \bar{z}_{m,2}, \dots, \bar{z}_{m,P}]^T$ 를 가정한다. 이 경우, 채널을 추정하는 것은 $\bar{\mathbf{z}}_m$ 의 위상 정보 $e^{j\angle \bar{\mathbf{z}}_m}$ 와 채널 \mathbf{a}_m 의 joint optimization problem으로 표현되며, 이는 아래와 같다.

$$\min_{\mathbf{a}_m, \angle \bar{\mathbf{z}}_m} \|\mathbf{z}_m \circ e^{j\angle \bar{\mathbf{z}}_m} - \mathbf{S}^H \mathbf{a}_m - \mathbf{b}_m\|_2^2, \quad (5)$$

(5)의 문제를 풀고 위상 정보를 복구하기 위하여, 본 논문에서는

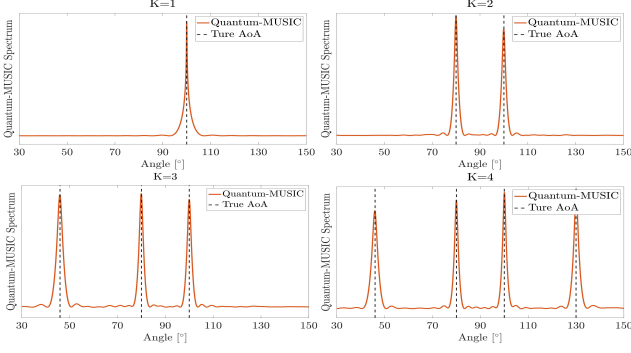


그림 2 제안 알고리즘의 공간 스펙트럼

biased Gerchberg-Saxton (GS) 알고리즘을 활용한다. 먼저 기존 송신 신호 행렬과 채널 벡터를 활용하여 확장된 신호 행렬 $\bar{\mathbf{S}} = [\mathbf{S}^H, \mathbf{b}_m]^H = [\bar{\mathbf{s}}_1, \dots, \bar{\mathbf{s}}_p] \in \mathbb{C}^{(K+1) \times P}$ 과 채널 벡터 $\bar{\mathbf{a}}_m = [\mathbf{a}_m^H, 1]^H \in \mathbb{C}^{(K+1) \times 1}$ 을 형성한다. 이 과정은 biased 모델인 (4)를 non-biased한 모델 $\mathbf{z}_m = |\mathbf{S}^H \mathbf{a}_m + \mathbf{b}_m + \mathbf{n}_m| = |\bar{\mathbf{S}}^H \bar{\mathbf{a}}_m + \mathbf{n}_m|$ 로 변경하여 기존 PR 기법을 적용가능하게 한다. 이 변경된 수신 신호를 활용하여 공분산 행렬을 형성하며, 이는 아래와 같다.

$$\bar{\mathbf{R}} = \sum_{p=1}^P \mathbf{z}_{m,p} \bar{\mathbf{s}}_p \bar{\mathbf{s}}_p^H \in \mathbb{C}^{(K+1) \times (K+1)}. \quad (6)$$

이후, $\bar{\mathbf{a}}_m$ 의 초기값 $\bar{\mathbf{a}}_m^0$ 은 $\bar{\mathbf{a}}_m^0 = \bar{r} \mathbf{v}$ 로 정의된다. 여기서, \mathbf{v} 는 공분산행렬 $\bar{\mathbf{R}}$ 의 고유벡터이며 \bar{r} 은 $\bar{\mathbf{a}}_m^0$ 의 진폭값이다. \bar{r} 의 정의는 아래와 같다.

$$\bar{r} = \frac{|\mathbf{v}^H \bar{\mathbf{S}}| \mathbf{z}_m}{\|\bar{\mathbf{S}}^H \mathbf{v}\|_2^2}. \quad (7)$$

$\bar{\mathbf{a}}_m^0$ 의 K 개 요소만 유저에 해당하는 채널 벡터인 관계로, \mathbf{a}_m^0 은 $\bar{\mathbf{a}}_m^0$ 의 K 개 요소를 취하여 $\mathbf{a}_m^0 = \bar{\mathbf{a}}_m^0(1:K)$ 로 초기화된다. 초기화 이후, N 회 반복하여 최적화 과정을 진행하며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\angle \bar{\mathbf{z}}_m^n = \angle (\mathbf{S}^H \mathbf{a}_m^{n-1} + \mathbf{b}_m), \quad (8)$$

$$\mathbf{a}_m^n = (\mathbf{S} \mathbf{S}^H)^{-1} \mathbf{S} (\mathbf{z}_m \circ e^{j\angle \bar{\mathbf{z}}_m^n} - \mathbf{b}_m). \quad (9)$$

N 회 반복 이후 추정된 채널 행렬 $\hat{\mathbf{A}} = [\hat{\mathbf{a}}_1, \hat{\mathbf{a}}_2, \dots, \hat{\mathbf{a}}_M]^H \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 와 다중 유저의 도래각 추정 알고리즘인 MUSIC (multiple signal classification) [4]을 활용하여 도래각을 추정한다. 먼저 공분산 행렬 $\mathbf{R} = \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{A}}^H \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 을 계산한다. 이후 공분산 행렬을 고유값 분해하여 얻은 잡음의 부분공간 \mathbf{U}_N 과 도래각 θ 에 대한 far-field 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-j2\pi d \sin \theta / \lambda}, \dots, e^{-j(M-1)2\pi d \sin \theta / \lambda}]^T$ 와의 내적을 통하여 MUSIC 알고리즘의 공간 스펙트럼 $P(\theta)$ 를 계산한다.

$$P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{a}(\theta)}. \quad (10)$$

여기서, $P(\theta)$ 의 피크값에 해당하는 위치가 추정된 도래각에 해당된다.

IV. 시뮬레이션 설정 및 결과 분석

시뮬레이션 파라미터 설정값은 다음과 같다. 중심 주파수 f_0 는 5 GHz로 설정하였으며, 32개의 안테나를 활용하였다. ARC 파이썬 패키지

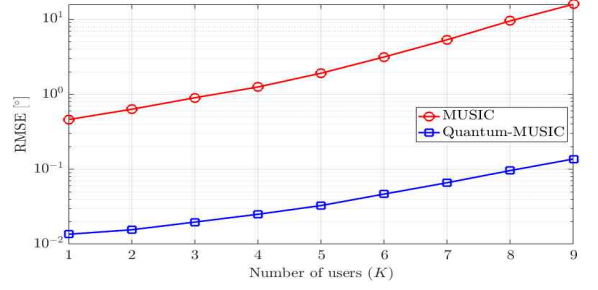


그림 3 제안 알고리즘의 유저 수에 따른 RMSE 결과

[5]를 활용하여 계산한 진이 쌍극자 모멘트 μ_{eg} 는 $[0, 1785.9qa_0, 0]^T$ 와 같으며, 여기서 $q = 1.602 \times 10^{-11}C$, $a_0 = 5.292 \times 10^{-11}m$ 는 각각 진하, 보어 반지름을 의미한다. 알고리즘 최적화를 위한 반복 횟수 N 은 50으로 설정되었다. 도래각 추정 성능 평가를 위한 RMSE의 정의는 아래와 같다. 여기서 몬테카를로 횟수 Q 는 100회로 설정하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{QK} \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K |\hat{\theta}_{q,k} - \theta_{q,k}|^2} \quad (10)$$

그림 2는 제안 알고리즘의 공간 스펙트럼을 나타낸다. 그림 2를 통하여 제안 알고리즘을 활용한 리드버그 양자 수신기 기반 다중 유저의 도래각 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

그림 3은 제안 알고리즘과 MUSIC 알고리즘의 유저 수에 따른 RMSE 결과를 의미한다. 시뮬레이션 결과를 통하여 다중 유저 환경에서 리드버그 양자 수신기의 낮은 잡음으로 인하여 제안 알고리즘이 MUSIC에 비하여 우수함을 확인하였다.

V. 결론 및 연구 방향

본 논문에서는 리드버그 양자 수신기 기반 시스템 모델 및 도래각 추정 알고리즘을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 알고리즘이 기존 RF 기반 도래각 추정 알고리즘보다 성능이 향상됨을 보였으며, 리드버그 양자 수신기를 활용한 센싱의 잠재력을 확인하였다. 차후 연구로는 단일 주파수 대역을 확장시킨 다중 주파수 대역을 고려한 도래각 추정 알고리즘 개발 및 성능 분석이 고려된다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] F. Zhang, et. al. "Quantum wireless sensing: Principle, design and implementation," in *Proc. the 29th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw.* (ACM Mobicom '23), Jun. 2023, pp. 1-15.
- [2] B. Liu, L. Zhang, Z. Liu, Z. Deng, D. Ding, B. Shi, and G. Guo, "Electric field measurement and application based on Rydberg atoms," *Electromagn. Sci.*, vol. 1, pp. 1-16, Jun. 2023.
- [3] M. Cui, Q. Zeng, and K. Huang. "Towards Atomic MIMO Receivers." *IEEE J. Sel. Area Commun.*, Jan.. 2025.
- [4] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 34, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [5] N.Sibali et. al., "Arc: An open-source library for calculating properties of alkali Rydberg atoms," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 220, pp. 319-331, Nov. 2017.