

리드버그 원자 수신기 기반 단일 톤 신호의 도플러 추정

원종찬, 민기홍, 김한빛, 김선우
한양대학교 융합전자공학부

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

Doppler Estimation of the Single-tone Signal via Rydberg Atomic Receiver

Jongchan Won, Kihong Min, Hanvit Kim, and Sunwoo Kim
Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문은 리드버그-헤테로다인 원자 수신기를 활용한 단일 톤 신호의 도플러 추정 기법을 제안한다. 리드버그 원자 수신기는 안테나 및 RF 회로 기반 기존 수신기 구조를 리드버그 원자 기반 광 검출 시스템으로 대체한다. 이를 활용하면 정확한 전자기장 센싱이 가능하고, 나아가 기존 통신 및 센싱 기술로의 접목이 가능하다. 본 논문에서는 리드버그-헤테로다인 수신기를 활용한 도플러 추정 알고리즘을 제안하고 기존 RF 수신기와의 성능 비교를 통하여 리드버그-헤테로다인 원자 수신기의 잠재력을 입증한다.

I. 서 론

6G 핵심 기술로서 THz 대역의 통합 센싱 및 통신 시스템과 저궤도 위성 기반 비지상망이 각광받고 있으며, 고주파 대역의 고속 이동 통신 환경에서 발생하는 도플러 천이 보정을 위한 신호처리 기법들이 대두되고 있다 [1]. 반면, 고정밀 전자기장 센싱 분야에서는 리드버그 양자 수신기가 각광받고 있으며, 해당 수신기는 RF (radio frequency) 요소를 최소화하여 열잡음을 억제한다 [2]. 본 논문을 통하여 고속 이동체 및 고주파 대역의 통신 및 센싱 시스템에서 리드버그 원자 수신기를 활용한 도플러 추정 기법을 제시하고, MATLAB 시뮬레이션을 통하여 제안 기법의 추정 성능과 이론적 하한을 비교한다.

II. 리드버그-헤테로다인 원자 수신기 시스템 모델

리드버그-헤테로다인 원자 수신기는 전자기파를 수신하는 시나리오는 그림 1과 같다. 두 레이저 빔 (i.e., Probe beam, Coupling beam)들은 알칼리 금속 원자 (e.g., Rb, Cs)들로 충전된 vapor cell 내부로 교차 인가되어, 바닥 상태의 층 외각 전자들은 고분극 상태인 리드버그 상태로 전이된다 [2]. 이때, 송신 전자기파와 LO (local oscillator)에서 발생시킨 참조 신호가 수신기로 동시에 인가되고, 비트 음 (beat note)이 발생한다. 해당 비트 음은 리드버그 상태와 양자 간섭 현상을 발생시키며, probe beam을 통한 간섭현상의 PD (photodetector) 기반 광 검출로 송신 신호 성분 및 채널 파라미터를 획득할 수 있다 [3]. 기존 리드버그 원자 수신기와 달리, 리드버그-헤테로다인 수신기는 위상 모호성 문제를 해결하고, 센싱 감도를 $\mu\text{V}/\text{m}$ 에서 nV/m 수준으로 향상 가능하다 [3].

본 논문은 도플러 추정 목적의 단일 톤 송신 신호를 리드버그 양자 수신기로 검출하는 시나리오를 고려하였으며, 송신 신호의 n 번째 스냅샷 $x_{\text{Tx}}[n]$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$x_{\text{Tx}}[n] = \sqrt{P_{\text{Tx}}} \cdot s \cdot \cos(2\pi f_0 \Delta n + \phi), \quad (1)$$

여기서, P_{Tx} , f_0 , $|s|$, ϕ , Δ 는 각각 송신 전력, 송신 주파수, 복소 송신 심볼의 진폭 및 위상, $1/F_s$ 로 정의되는 시간 샘플 간격을 의미한다. 저궤도 위성의 송신 채널을 거쳐 리드버그 수신기에 도달하는 신호 $\tilde{x}_{\text{Tx}}[n]$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{x}_{\text{Tx}}[n] = \sqrt{P_{\text{Tx}}} \alpha |s| \cos[2\pi(f_0 + f_D) \Delta n + \psi], \quad (2)$$

이때, α , f_D , $\psi = \phi - 2\pi(f_0 + f_D)\tau$ 는 각각 채널 계수, 도플러

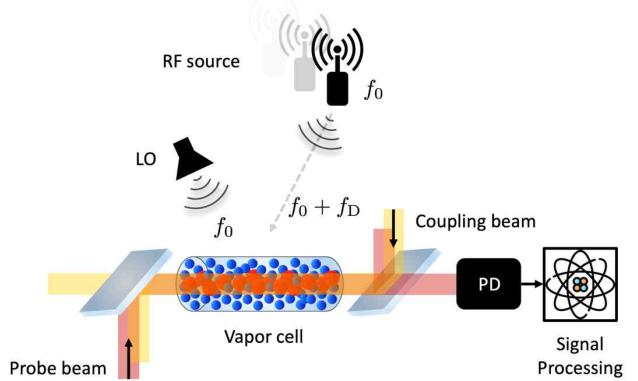


그림 1 도플러 추정을 위한 리드버그 헤테로다인 수신기의 구조도

천이, 지연 시간 τ 를 포함하는 위상 회전을 의미한다. 언급한 바와 같이 헤테로다인 구조를 활용한 신호 검출을 위하여 vapor cell 내에 $x_{\text{LO}}[n] = \sqrt{P_{\text{LO}}} \cdot \cos(2\pi f_0 \Delta n + \phi_{\text{LO}})$ 와 같이 정의되는 참조 신호를 인가하였다. 여기서, P_{LO} , ϕ_{LO} 는 각각 LO의 송신전력 및 위상 값을 의미하고, 참조신호를 포함한 vapor cell 입사 신호는 $x[n] = \tilde{x}[n] + x_{\text{LO}}[n]$ 로 정의된다.

수신 신호 $x[n]$ 은 리드버그 상태로 흡수되는 과정에서 송신 주파수 만큼의 주파수 하향변조가 발생하며, 하향 변조된 송신 신호는 다음과 같다 [3].

$$\tilde{x}_{\text{Tx}}[n] = \overline{P_{\text{LO}}} + \sqrt{P_{\text{Tx}}} \alpha |s| \cos[2\pi f_D \Delta n + \psi], \quad (3)$$

여기서, $\overline{P_{\text{LO}}} = \sqrt{P_{\text{LO}}} \cos(\phi_{\text{LO}})$ 은 참조 신호에 의한 평균 전력을 의미한다. 즉, PD 기반 광 검출 신호는 참조 신호 세기에 비례하는 평균 전력을 갖는 정현파로 정의되고, 광 검출 이후 평균 전력 $\overline{P_{\text{LO}}}$ 을 제거한 수신 신호는 다음과 같이 정의된다 [3].

$$z[n] = r[n] + w[n], \quad (4)$$

이때, $r[n] = D_G \hbar^{-1} \mu \sqrt{P_{\text{Tx}}} \alpha |s| \cos(2\pi f_D \Delta n + \psi)$ 와 $w[n]$ 은 각각 비 잡음 신호 성분과 σ^2 의 전력을 갖는 백색 가우시안 잡음을 의미하며, $r[n]$ 을 구성하는 D_G , μ , \hbar 은 각각 PD 응답세기를 포함하는 광 검출 이득, 전이 쌍극자 모먼트, 환산 플래크 상수이다. 결과적으로, N 개의 스냅샷을 수집하여 수신 신호벡터 $\mathbf{z} = [z[0], \dots, z[N-1]]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 을 구성할 수 있다.

III. Maximum likelihood 기반 도플러 추정기

비 잡음 신호 스냅샷 벡터 $\mathbf{r} = [r[0], \dots, r[N-1]]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 기반 조건부 확률 밀도 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$p(\mathbf{z} | f_D, \theta) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \|\mathbf{z} - \mathbf{r}\|^2\right]. \quad (5)$$

여기서, $\theta = [p, q]^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 은 $r[n]$ 의 동위상 및 직교위상 성분인 $p = D_G \hbar^{-1} \mu \sqrt{P_{\text{Tx}}} \alpha |\sin(\psi)| \cos(\psi)$, $q = D_G \hbar^{-1} \mu \sqrt{P_{\text{Tx}}} \alpha |\sin(\psi)| \sin(\psi)$ 으로 정의된다. 먼저, 수식 (5) 기반 θ 에 대한 ML (maximum-likelihood) 추정기는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [4].

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \| \mathbf{z} - \mathbf{H}(f) \theta \|^2 \quad (6)$$

이때, $\mathbf{H}(f) = [\mathbf{c}(f), \mathbf{s}(f)]^T \in \mathbb{C}^{N \times 2}$ 는 도플러 천이 f 에 대하여 $\mathbf{c}(f) = [\cos(2\pi f \Delta n)]_{n=0}^{N-1}$ 및 $\mathbf{s}(f) = [\sin(2\pi f \Delta n)]_{n=0}^{N-1}$ 으로 구성되는 행렬이다. 수식 (6)은 $\hat{\theta} = (\mathbf{H}(f)^T \mathbf{H}(f))^{-1} \mathbf{H}(f)^T \mathbf{z}$ 을 도출하며, f 에 대한 ML 추정기는 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{f}_D = \underset{f}{\operatorname{argmax}} v(f) \quad (7)$$

이때, $v(f) = \mathbf{z}^T \mathbf{P}(f) \mathbf{z}$ 는 f 에 의하여 정의되고, $\|\mathbf{z}\|^2$ 와 잔차만큼의 이격이 있다. $\mathbf{P}(f) = \mathbf{H}(f) (\mathbf{H}(f)^T \mathbf{H}(f))^{-1} \mathbf{H}(f)^T$ 는 \mathbf{z} 를 $\mathbf{H}(f)$ 로 투영시킨다. 해당 추정기는 peak 검출기로 재 정의 할 수 있으며, 벡터 $\mathbf{v} = [v(f_0), \dots, v(f_{M-1})] \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ 의 peak 검출을 통하여 도플러 추정치를 얻을 수 있다.

고정밀 도플러 추정을 위하여, peak 검출 과정을 총 K 번 반복한다. 이때, $\mathbf{P}(f)$ 를 포함하는 \mathbf{v} 를 업데이트 한다. 업데이트 전후 상태의 인덱스를 각각 k 및 $k+1$ 라고 하면, (7)에서 얻은 추정 인덱스를 기준으로 $[f_{0,k+1}, f_{M-1,k+1}] \leftarrow [f_{\hat{m}-1,k}, f_{\hat{m}+1,k}]$ 와 같이 구간을 재 설정하고, 해당 구간 내에 M 개의 도플러 천이 후보 $f_{m,k+1}$, $\forall m \in \{0, \dots, M-1\}$ 기반 $\mathbf{P}_{k+1}(f)$ 를 재 생성한다. 최종적으로, 반복 peak 검출 후 $\hat{f}_D = f_{\hat{m},K}$ 의 도플러 추정 값을 얻을 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 연구에 적용된 시뮬레이션 환경은 고속 이동체에서 송신되는 단일 톤 신호가 리드버그 원자 수신기로 인가되는 환경을 모사하였으며, 알려진 송수신단의 이격 거리와 송신 심볼에 대한 정보를 활용하여 도플러 추정을 진행하였다. 이때, 도플러 천이는 $U(0, f_{\max})$ 에 따라 랜덤하게 설정하였으며, TR

표 1. 시뮬레이션 매개변수

파라미터	값
중심 주파수 f_0	27.5 [GHz]
샘플링 주파수 f_s	61.44 [MHz]
신호 샘플 수 N	256
도플러 천이 후보 수 M	100
Peak 검출 반복 수 K	3
잡음전력 σ^2	-212.82 [dBm]
최대 도플러 천이 f_{\max}	240 [kHz]
광 검출 이득 D_G	0.3335 [nV · s/m]
전이 쌍극자 모먼트 μ	$[0, 1288.737 q a_0, 0]^T$
전자 전하 q	$-1.602 \times 10^{-19} [C]$
보어 반지름 a_0	$5.292 \times 10^{-11} [m]$

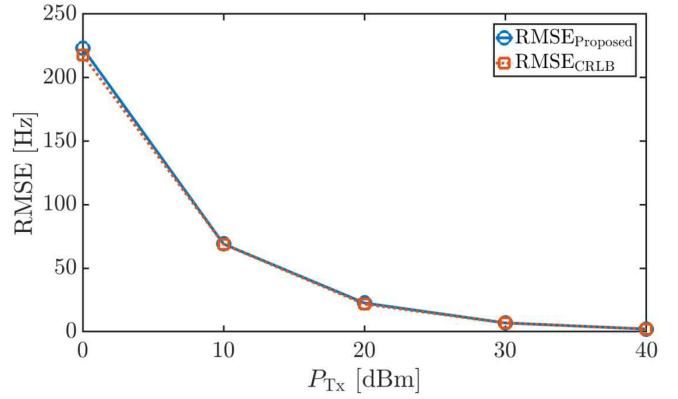


그림 2 송신 전력 세기에 따른 도플러 추정 RMSE 추이

38.901 Urban Macro 경로 손실 모델에 기반하여 채널 계수를 설정하였다 [5]. 추가적인 시뮬레이션 매개변수는 표 1에서 확인 가능하다.

그림 2는 송신 전력에 따른 제안 알고리즘의 추정 성능과 CRLB (Cràmer-Rao lower bound) 기반 이론적 하한의 RMSE (root mean square error) 성능을 나타낸다. 표 1에 명시된 바와 같이 리드버그 원자 수신기의 낮은 잡음 전력으로 인하여, 송신 전력의 증가에 따른 추정 성능은 이론적 하한으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 시뮬레이션에서 송수신단의 이격 거리를 10km로 설정하여 극심한 신호 감쇠가 발생함에도 불구하고 추정 성능이 이론적 하한에 도달한다는 점을 통하여, 리드버그-헤테로다인 원자 수신기의 고감도-저잡음 특성으로 인한 고정밀 채널 파라미터 추정 성능을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 리드버그 양자 수신기를 활용한 도플러 추정기를 제안하고 시뮬레이션을 통하여 성능을 입증하였다. 제안하는 도플러 추정 시스템은 향후 통신 시스템의 고주파 대역 및 고속 이동체 시나리오에서 폭넓게 적용 가능하며, 향후 테스트베드를 구축하여 이를 검증하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] S. Saleh, P. Zheng, X. Liu et al., "Integrated 6G TN and NTN Localization: Challenges, Opportunities, and Advancements," *IEEE Commun. Stand. Mag.*, Jun. 2025.
- [2] 김한빛, 원종찬, 민기홍, 김선우, "리드버그 원자 수신기 기반 양자 통신 및 센싱 기술 연구 동향," *한국통신학회지(정보와통신)*, Oct. 2025.
- [3] Y. Chen, X. Guo, C. Yuen et al., "Harnessing Rydberg atomic receivers: From quantum physics to wireless communications," *arXiv*, Jan. 2025.
- [4] D. Rife, R. Coorstyn, "Single-tone parameter estimation from discrete-time observations," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Sep. 1974.
- [5] 3GPP, "5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100GHz," 3GPP, Tech. Rep. TR 38.901, version 18.0.0, Release 18, May 2024.