

# Atomic MIMO 시스템 구조 분석

김한빛, 박현우, 김선우  
한양대학교 융합전자공학과

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

## Analysis of Atomic MIMO System Structure

Hanvit Kim, Hyunwoo Park, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

### 요약

본 논문은 양자 통신 기술인 Atomic MIMO (multiple-input-multiple-output) 시스템 구조를 분석한다. Atomic MIMO 시스템은 기존 MIMO 시스템의 안테나, RF (radio-frequency) 장비를 루드베리 원자를 활용하는 vapor cell, photon detector로 대체한다. 이를 활용하여 기존 MIMO 시스템보다 더 높은 통신/센싱 성능을 달성할 수 있으며 RIS, beam tracking 등의 기존 통신 기술 응용 또한 가능하다. 본 논문에서는 Atomic MIMO 시스템의 구조 및 관련 양자 역학 이론을 소개하며, Atomic MIMO를 활용한 통신 기술의 가능성을 고찰한다.

### I. 서론

최근 양자 역학 또는 양자 정보 이론을 통신에 접목하는 양자 통신 기술이 새롭게 대두되고 있다 [1]. 양자 통신 기술은 양자 정보를 활용하여 전파의 특성으로 인한 기존 통신 성능의 한계(e.g., RF 장비 잡음, pathloss)를 극복 가능하나, 아직 기술의 성숙도 및 개발 단계가 초창기에 있다. 본 논문은 기존 루드베리 원자를 활용한 Atomic receiver를 MIMO (multiple-input-multiple-output)에 접목한 Atomic MIMO 시스템 구조를 분석하며 이를 응용한 양자 통신 기술의 전망을 제시한다.

### II. Atomic receiver 시스템

Atomic receiver의 구조는 그림 1과 같다. Atomic receiver는 안테나를 활용하여 전파를 수신하는 기존 RF (radio frequency) receiver와는 달리 루드베리 원자를 활용하여 기존 RF receiver의 안테나를 대체한다 [2]. 루드베리 원자는 주양자수가 20 이상이며, 최외각 전자와 원자핵 사이의 거리가 먼 고에너지 원자를 의미한다. 루드베리 원자는 높은 전기 쌍극자 모멘트와 높은 분극성으로 인하여 외부 전기장에 매우 민감하며, 이를 활용한 Atomic receiver는 안테나 및 기존 RF 장비 (e.g., Mixer, ADC)에서 발생하는 thermal noise 영향으로부터 자유로운 특성이 있다. 이러한 특성을 활용하여 Atomic receiver는 높은 통신 및 센싱 성능 달성이 가능하다.

루드베리 원자는 vapor cell 내부의 알칼리 금속 원자 (e.g., Li, Na, K, Rb, Cs)를 활용하여 생성된다. 알칼리 금속 원자는 최외각 전자 개수가 1개인 원자를 의미하며, 높은 에너지 준위로의 변환이 다른 원자에 비하여 쉽다는 특징이 있다. 알칼리 금속 원자를 루드베리 상태로 전이시키기 위하여, 2개의 레이저 빔이 활용된다. Probe 빔은 최외각 전자를 들뜬 상태 (e.g.,  $3S_{1/2}$ 에서  $3P_{1/2}$ )로 전이시키며, coupling 빔은 들뜬 상태의 원자를 높은 에너지 레벨 (e.g.,  $3P_{1/2}$ 에서  $4D_{1/2}$ )로 전이시킨다. Probe 빔과 coupling 빔을 통하여 기존 금속 원자는 루드베리 원자로 전이된다.

RF 전자기파 신호와 루드베리 원자 사이의 상호 작용을 통하여 루드베리 원자의 양자 상태 및 에너지 준위가 변화하며, 이를 광검출기 (photon detector, PD)를 통하여 모니터링한다. 광검출기를 통하여 획득한 Atomic receiver의 출력은 신호 감지 알고리즘을 통하여 송신 양자비트를 해석하여 생성된다. 총 요약하자면, Atomic receiver 기반 통신 시스템은 기존 RF (radio frequency) 기반 송신기, 채널 및 루드베리 원자 기반 양자 receiver로 구성된다.

### III. Quantum Jump 및 EIT-AT Phenomenon

Vapor cell 내부의 루드베리 원자 집단은 전자기파 흡수에 따라 에너지 준위가 변화하는 quantum jump 현상이 발생한다. Quantum jump 현상을 활용하여 전자기파 신호의 주파수, 진폭, 위상 등의 정보를

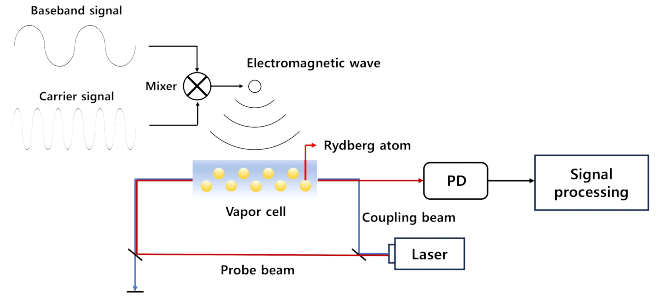


그림 1 Atomic receiver를 활용한 전자기파 수신

추정한다. 루드베리 원자는 전자기파 흡수 시 ground state 에너지  $E_g = h\omega_g$ 에서 excited state 에너지  $E_e = h\omega_e$ 로 전이된다. 여기서  $h$ ,  $\omega_g$ ,  $\omega_e$ 는 각각 Planck 상수, ground state 주파수, excited state 주파수를 의미한다. Transition frequency  $\omega_{eg}$ 는  $\omega_{eg} = \omega_e - \omega_g$ 로 정의되며, 이는 실제 흡수된 전자기파의 주파수  $\omega$ 와 근사한 값을 갖는다. Ground state, excited state는 벡터 형태로  $|g\rangle = [0, 1]^T$ ,  $|e\rangle = [1, 0]^T$ 와 같이 정의된다. 루드베리 원자의 양자 상태  $|\Psi\rangle$ 는 ground state와 excited state의 선형 조합으로 구성되며, 이는 아래와 같다.

$$|\Psi\rangle = \alpha_g |g\rangle + \alpha_e |e\rangle = [\alpha_e, \alpha_g]^T, \quad (1)$$

여기서  $\alpha_g$ ,  $\alpha_e$ 는 각각 ground state amplitude, excited state amplitude이며,  $|\alpha_g|^2 + |\alpha_e|^2 = 1$ 을 만족한다. 루드베리 원자의 양자 상태는 시간에 따라 변화하며, 시간에 따라 변화하는 루드베리 원자의 양자 상태  $|\Psi(t)\rangle = \alpha_g(t) |g\rangle + \alpha_e(t) |e\rangle$ 는 슈뢰딩거 방정식을 통하여 아래와 같이 표현된다.

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi(t)\rangle}{\partial t} = (\hat{H} + \hat{V}) |\Psi(t)\rangle, \quad (2)$$

여기서  $\hat{H}$ ,  $\hat{V}$ 는 각각 free Hamiltonian과 interaction Hamiltonian operator이며, 고립된 원자의 에너지 및 전자기파와 원자 사이의 상호작용을 의미한다. Rotating wave approximation (자세한 내용은 [3] 참조)을 적용하여 슈뢰딩거 방정식을 풀 수 있으며, 이를 통하여 얻은 excited state의 확률  $|\alpha_e(t)|^2$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$|\alpha_e(t)|^2 = \frac{\Omega_R^2}{\Omega_R^2 + \delta^2} \sin^2\left(\frac{\sqrt{\Omega_R^2 + \delta^2}}{2} t\right), \quad (3)$$

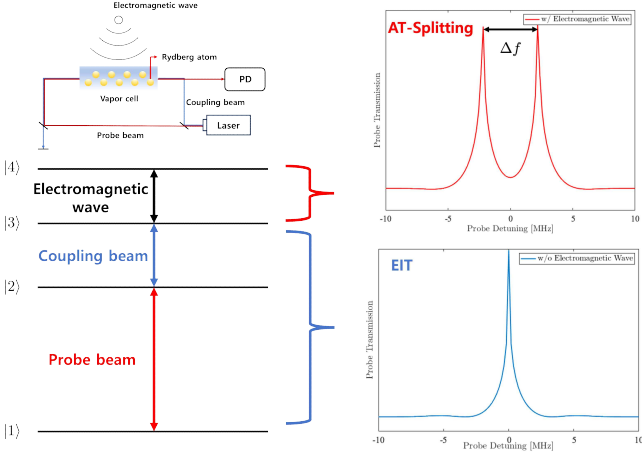


그림 2 Atomic receiver의 EIT-AT Splitting

여기서  $\delta \approx \omega_{eg} - \omega$ 는 양자 시스템의 공진 주파수와 광학 주파수 간의 차이를 의미한다.  $\Omega_R$ 은 Rabi frequency이며, 진동하는 전자기파에 반응한 두 원자 에너지 준위 확률 진폭의 변동 주파수로 정의된다.

Rabi frequency는 EIT (electromagnetically induced transparency) 및 AT (Autler-Townes) splitting을 통하여 측정된다. 그림 2는 probe beam, coupling beam, 전자기파의 입사에 따른 vapor cell 내부 원자의 양자 상태 및 EIT, AT-splitting 그래프를 나타낸다. 여기서  $|1\rangle, |2\rangle$ 는 probe, coupling beam 흡수 이전 원자의 양자 상태,  $|3\rangle, |4\rangle$ 는 리드베리 원자의 양자 상태를 나타낸다. 문단 II에서 제시한 probe beam, coupling beam은 각각 양자 상태를  $|1\rangle$ 에서  $|2\rangle$ ,  $|2\rangle$ 에서  $|3\rangle$ 으로 전이시킨다. 양자 상태가  $|1\rangle$ 에서  $|2\rangle$ 로 전이될 때, 에너지 흡수 없이 probe beam이 vapor cell을 통과하는 EIT 현상이 발생한다. 그러나 전자기파가 vapor cell로 흡수되는 경우, Rabi frequency에 의하여 2개의 양자 상태  $|3\rangle$ 과  $|4\rangle$ 가 coupling되며, 이로 인하여 probe beam spectrum의 피크가 2개로 분할되는 AT-splitting 현상이 발생한다. AT-splitting의 splitting-interval은 다음과 같다 [4].

$$\Delta f = \frac{\Omega \lambda_c}{2\pi \lambda_p}, \quad (4)$$

여기서  $\Omega$ 는 effective Rabi frequency이며  $\Omega = \sqrt{\Omega_R^2 + \delta^2}$ 로 정의된다.  $\lambda_c, \lambda_p$ 는 각각 coupling beam, probe beam의 파장을 의미한다. AT-splitting interval은 Atomic receiver의 PD를 통하여 관측하며, 이를 통하여 Rabi frequency를 측정한다.

#### IV. Atomic MIMO 시스템

Atomic MIMO 시스템은 [5]에서 최초로 제시되었으며, 그 구조는 그림 3과 같다. 그림 3의 Atomic MIMO는  $M$ 개의 vapor cell, PD로 구성되며, 리드베리 원자로 구성된 각각의 vapor cell은 기존 MIMO 시스템의 안테나 요소 역할을 수행한다.  $K$ 개의 단말이 존재하는 환경에서  $m$ 번째 vapor cell로 입사하는 수신 신호 모델  $E_m(t)$ 는 다음과 같다.

$$E_m(t) = \sum_{k=1}^K \epsilon_{m,k} \sqrt{P_k \rho_{m,k}} |s_k| \cos(\omega t + \varphi_{m,k} + \gamma_k), \quad (5)$$

여기서  $\epsilon_{m,k}, \rho_{m,k}, \varphi_{m,k}$ 는 각각  $m$ 번째 vapor cell로 입사하는  $k$ 번째 단말 송신신호의 polarization, pathloss, phase shift를 의미하며,  $P_k, s_k$ 는 각각 송신신호의 파워, 메시지를 의미한다.  $m$ 번째 vapor cell 내부의 양자  $|\Psi(t)\rangle_m$  슈뢰딩거 방정식을 통하여 interaction Hamiltonian operator  $\hat{V}_m$ 을 얻을 수 있으며, 이는  $\hat{V}_m = q \hat{\mathbf{r}}_m^T \mathbf{E}_m(t)$ 과 같이 정의된다. 여기서  $q, \hat{\mathbf{r}}_m$ 은 각각 전자의 전하 및 quantum position operator를 의미하며, ground state  $|g\rangle$ , excited state  $|e\rangle$ 에 대한

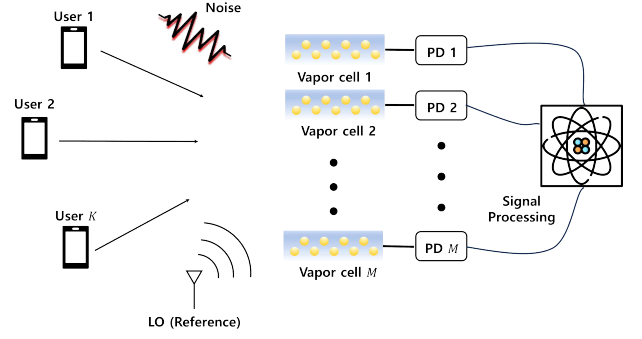


그림 3 Atomic MIMO 수신 시스템 [3]

quantum position operator는 아래와 같이 정의된다.

$$\hat{\mathbf{r}}_n = \langle e | \hat{\mathbf{r}}_n | g \rangle (|e\rangle\langle g| + |g\rangle\langle e|), \quad (6)$$

여기서  $|g\rangle\langle e|, \langle g|e\rangle$ 는 각각  $|g\rangle, |e\rangle$ 의 외적, 내적을 나타낸다. 마지막으로,  $\hat{V}_m$ 을 슈뢰딩거 방정식에 rotating wave approximation을 적용하여 얻은  $m$ 번째 vapor cell의 Rabi frequency는 다음과 같다.

$$\Omega_{R,m} = \left| \sum_{k=1}^K \frac{1}{h} (r_{eg}^T \epsilon_{m,k}) q \sqrt{P_k \rho_{m,k}} |s_k| e^{j(\varphi_{m,k} + \gamma_k)} \right|. \quad (7)$$

여기서  $r_{eg} = \langle e | \hat{\mathbf{r}}_m | g \rangle$ 이다.  $m$ 번째 안테나 요소로 입사하는 수신 신호는 Rabi frequency  $\Omega_{R,m}$ 의 측정값과 동일하며,  $\Omega_{R,m}$ 의 측정을 통하여 메시지, phase shift, 중심 주파수 등의 송신 신호 정보를 추정한다.

#### V. 결론 및 연구 방향

본 논문에서는 기존 Atomic receiver 시스템을 통신에 응용한 Atomic MIMO 시스템의 구조를 분석하였다. 안테나 및 RF 장비를 활용하는 기존 통신 시스템과는 달리, Atomic MIMO 시스템은 리드베리 원자 및 양자 현상을 기반으로 동작하며, 이를 활용한 다양한 통신/센싱 응용 기술 개발이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서 제시한 분석 결과는 차후 Atomic MIMO receiver 시스템을 활용한 RF 신호의 채널 정보 (e.g., 도래각, 주파수) 추정에 활용 예정이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2023R1A2C3002890).

#### 참고 문헌

- [1] A. S. Cacciapuoti, M. Caleffi, R. Van Meter and L. Hanzo, "When Entanglement Meets Classical Communications: Quantum Teleportation for the Quantum Internet," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 6, pp. 3808-3833, Jun. 2020.
- [2] 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.*, vol. 2, pp. 1-13, Mar. 2021.
- [3] M. Fox, *Quantum Optics: An Introduction*. Oxford University Press, 2006.
- [4] 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, no. 2, pp. 1-16, Jun. 2023.
- [5] M. Cui, Q. Zeng, and K. Huang, "Towards Atomic MIMO Receivers." *arXiv*, Apr. 2024.