

DOI:10.3788/JQO20232902.0501

微波信号的相位噪声对铯里德堡原子天线微波混频的影响

班小娟¹, 苏楠¹, 刘瑶¹, 牛琦琦¹, 何军^{1,2†}, 王军民^{1,2}

(1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室 山西大学光电研究所 山西 太原 030006;

2. 山西大学 极端光学协同创新中心 山西 太原 030006)

摘要: 本文理论分析和实验测量研究了微波相位噪声对里德堡原子天线微波混频信号的影响。通过研究微波混频信号的相位噪声项, 建立在信号场中加入相位噪声后微波混频信号强度变化的理论模型。实验基于室温铯原子气室中里德堡原子电磁感应透明光谱, 实现里德堡原子 $|64S_{1/2}\rangle \rightarrow |64P_{1/2}\rangle$ 态的电偶极跃迁, 得到频率 13.806 057 GHz 与 13.806 GHz 的微波场混频信号。同时, 对混频信号强度的参数依赖关系进行研究。实验发现, 基于里德堡原子天线微波混频信号强度与参考场的功率有关, 优化功率参数条件下, 参考场可以实现约 20 dB 的混频信号增强; 当参考场调控里德堡原子达到微波混频效率最大时, 在信号场中加入相位噪声, 会导致混频信号强度的显著降低。

关键词: 里德堡原子天线; 相位噪声; 微波混频信号; 电磁感应透明

中图分类号: O433.1 文献标识码: A

Investigation on the Influences of the Microwave Field Phase Noise upon Microwave Mixing Signals with Cesium Rydberg Atomic Antenna

BAN Xiao-juan¹, SU Nan¹, LIU Yao¹, NIU Qi-qi¹, HE Jun^{1,2†}, WANG Jun-min^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: It is significant to study the influence of microwave phase noise on the microwave mixing signals with cesium Rydberg atomic antenna. In this paper, the influence of microwave phase noise on the microwave mixing signals based on Rydberg atom is studied theoretically and experimentally. Theoretically, the function of the change of the microwave mixing signal intensity after adding phase noise to the signal field is obtained by summarizing the phase noise term detected by the transmission of the probe laser through the medium. We perform a theoretical diagram that simulates the transmission spectrum of probe laser as a function of input phase noise. From the theoretical simulation diagram, it can be seen that the microwave mixing signal based on the Rydberg atomic antenna increases with the increase of the power of the signal field. For the same signal field strength, the microwave

收稿日期: 2022-02-15; 接受日期: 2022-03-07

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFA1402002); 国家自然科学基金项目(61875111); 山西省1331工程重点项目资助课题

作者简介: 班小娟(1996-), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要研究方向为量子光学、原子物理。

†通信作者: 何军, E-mail: hejun@sxu.edu.cn

mixing signal gradually decreases with the phase noise added increasing. Experimentally, we build an atomic antenna based on the Rydberg atom, which modulates the Rydberg atom through a reference field, and the Rydberg atom transmits the frequency of microwave mixing signal directly to the probe laser. Microwave field frequency of 13.806 057 GHz and 13.806 GHz are mixed based on the Rydberg atomic electric dipole transition of $|64S_{1/2}\rangle \rightarrow |64P_{1/2}\rangle$ under electromagnetically induced transparency (EIT) spectroscopy of Rydberg atoms in a cesium atomic gas chamber at room temperature. The parameter dependence of the microwave mixing signal intensity was studied by using the Rydberg-EIT spectroscopy. The experimental results show that the microwave mixing signal intensity based on the Rydberg atomic antenna is related to the power of the reference field, the microwave mixing signals enhancement of about 20 dB can be achieved in the reference field under the condition of optimizing the power parameters. When the reference field regulates the Rydberg atoms to the maximum microwave mixing efficiency, phase noise is added to the signal field. It has been found that when phase noise is introduced into the signal field, it leads to a significant decrease in the intensity of the microwave mixing signal. The experimental results the influences of the microwave field phase noise upon the microwave mixing signal with cesium Rydberg atomic antenna are the same as the theoretical analysis. This shows that the construction of atomic antennas based on Rydberg atoms to achieve microwave mixing signal opens up the application of different approaches such as communication applications, near-field antenna measurements and radar, and also opens up a wider application of Rydberg atomic sensors in current technology.

Keywords: Rydberg atomic antenna; Phase noise; The microwave mixing signal; Electromagnetically Induced Transparency

0 引言

微波电磁场的精密测量在天线计量、遥感、雷达等诸多领域具有重要应用^[1-2]。近年来，基于里德堡原子的量子传感器受到广泛关注^[3-10]，与传统的微波传感器相比，基于里德堡原子的原子天线在传感带宽、极限灵敏度等方面具有显著的优势；基于里德堡原子天线的电场计，已实现全频段的电场强度测量，并用于射频^[11-14]或微波电磁场相位^[15-20]、极化^[11]等其它测量。

2012年，Shaffer 等人实验演示了基于里德堡原子的微波电场计可以获得 $30\mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的灵敏度。与传统天线测量相比^[21-23]，里德堡原子电场计可以直接 SI 溯源并具有自校准的优点^[11]。最近，多个研究组基于里德堡原子天线实现微波混频功能，开展了微波场的极性和相位测量。2019年，Holloway 等人基于里德堡原子构建原子天线，实现射频信号强度^[16]和相位的测量^[15]；同年，该实验小组展示了基于里德堡原子混频器在典型通信系统中使用相位调制方案可以检测和接收不同的数据^[24]；2021年，该实验小组演示了基于电磁感应透明与外差技术结合形成的里德堡原子传感器来确定不同角度入射射频波的相位差^[25]。2019年，景明勇等人拓展传统天线超外差方法，在里德堡原子中利用超外差技术实现了弱场探测^[18]。2021年，贾凤东

等人证明基于低激发态原子混频器，使用交流磁场的塞曼调制，将微波场的相位转换为拍频信号的相位和幅度^[26]；2022年，该小组提出了基于里德堡原子混频器实现全光学相位探测器。实验发现混频信号的幅值与信号射频场的相位相关，并证明基于里德堡原子的鉴相器可以实现较高的相位分辨率^[27]。2021年，赵建明实验小组演示了基于里德堡原子混频器，实现待测信号场的高灵敏探测；并对弱信号场进行编码，还原了加载到弱信号场上的基带信号，实现了弱信号场条件下的通信^[28]；2022年，该实验小组演示了基于里德堡原子混频在任意频率的高灵敏度连续可谐调射频电场测量^[29]。

在目前的原子天线混频方案中，基于里德堡原子混频信号可以通过里德堡原子电磁感应透明光谱读出，同时可以通过混频信号读出微波场的振幅和相位信息。激光束或微波场中的相位噪声在 EIT 光谱中可以发生相位噪声向强度噪声的转换，其在基于里德堡原子的微波传感中发挥重要作用。2021年，本实验小组演示了在里德堡电磁感应透明介质中，相位噪声可以通过吸收和色散效应转换为强度噪声^[30]。基于里德堡原子天线的混频器，强参考场通过调控或缀饰传感里德堡态实现传感信号场的混频，输出混频信号不但依赖参考场强度和频率，其更敏感于参考场和信号场的相对相位，特别是当存在较大的相位噪声时，混频信号强度会明显降低。

在本文中，我们基于室温里德堡原子构建原子天线，考虑 $|64S_{1/2}\rangle$ 和 $|64P_{1/2}\rangle$ 里德堡态共振跃迁，利用频率13.806 057 GHz的强微波场作为参考场调控里德堡原子，利用频率为13.806 GHz的弱微波场作为信号场，实验验证了相位噪声对基于里德堡原子天线微波混频的影响。

1 理论分析

本实验在固定852 nm探测光和509 nm耦合光频率下，加入频率为13.806 GHz的弱微波场作为信号场，利用频率为13.806 057 GHz的强微波场作为参考场调控里德堡原子。参考场与信号场在里德堡原子处发生混频，里德堡原子可以看作一个自由空间的混频器，混频的效率取决于参考场的大小，其混频信号通过探测光的共振透射光谱读出。参考场的第一个作用是提供频率和相位参考，与信号场进行混频，来获取信号场的相位和频率信息。第二个作用是通过调节参考场Rabi频率的大小，得到基于

$$\begin{aligned} E_{\text{atoms}} &= (E_{\text{sig}} + E_{LO})^2 = E_1^2 \cos^2(\omega t + \theta) + E_2^2 \cos^2(\omega + \delta)t + 2E_1 E_2 \cos(\omega t + \theta) \cos(\omega + \delta)t \\ &= E_1^2 \cos^2(\omega t + \theta) + E_2^2 \cos^2(\omega + \delta)t + E_1 E_2 \{\cos(\delta t + \theta) + \cos[(2\omega + \delta)t + \theta]\}. \end{aligned} \quad (3)$$

$E_1 \ll E_2$ ，近共振条件下：

$$E_{\text{atoms}}(t) \approx \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2} \cos[\delta t + \theta]. \quad (4)$$

当在信号场中加入相位噪声以后，里德堡原子天线响应混频信号场，此时混频信号的相位随时间变化：

$$E_{\text{atoms}}(t) \approx \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2} \cos[\delta t + \theta(t)]. \quad (5)$$

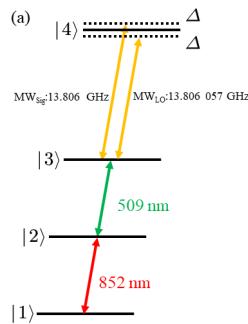


Fig. 1 (a) Energy level scheme of the ladder-type Rydberg EIT of the cesium atom; (b) Theoretical model for microwave mixing signal based on Rydberg atomic antenna by the transmission spectra of the probe laser. The parameters for the calculations is $\Delta m^2 = 1000$

图1 (a) 铯原子里德堡EIT阶梯型能级图；(b) 通过探测光透射光谱得到的基于里德堡原子天线微波混频信号的理论模型；计算参数为： $\Delta m^2 = 1000$

里德堡原子微波混频的光谱特性^[18]。

该实验系统可以简化为四能级模型，如图1(a)所示。852 nm弱探测光耦合能级 $|6S_{1/2}\rangle \leftrightarrow |6P_{3/2}\rangle$ ，509 nm强耦合光耦合能级 $|6P_{3/2}\rangle \leftrightarrow |64S_{1/2}\rangle$ ，信号场与参考场共振跃迁于铯原子里德堡态 $|64S_{1/2}\rangle \leftrightarrow |64P_{1/2}\rangle$ 。

探测光通过原子介质的透射率是：

$$T_{\text{probe}} = \exp(-k_p L \text{Im} \chi), \quad (1)$$

其中， $k_p = 2\pi/\lambda_p$ 为探测光波矢， L 是探测光在铯原子气室中传播的距离。磁化率 χ 是微波场在铯原子气室处的强度，探测光传输是与里德堡原子共振跃迁相关的函数：

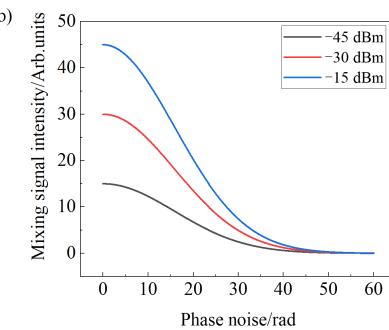
$$T_{\text{probe}} \propto E_{\text{atoms}}. \quad (2)$$

我们定义信号场的场强为 $E_{\text{Sig}} = E_1 \cos(\omega t + \theta)$ ，参考场的场强为 $E_{LO} = E_2 \cos(\omega + \delta)t$ ，我们可以推导出在没有加入相位噪声的情况下，里德堡原子响应的混频信号场^[15]：

加入相位噪声以后，混频信号相位波动随时间 τ 的变化为：

$$\frac{d\phi}{d\tau} = m(\tau) \cos(\omega_0 \tau + \phi). \quad (6)$$

在(6)式中， $\cos(\omega_0 \tau + \phi)$ 表示相位噪声源， ω_0 为噪声源振荡频率， $\omega_0 \tau + \phi$ 为其总相位，假设 $m(\tau)$ 为与输入噪声源成线性比例的随机变量。



本实验中，我们加入高斯相位噪声，假设混频信号相偏 m 以 m_0 为中心， Δm 为均值呈高斯分布，假设其分布函数如下：

$$p(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta m} \exp\left[-\frac{(m-m_0)^2}{2\Delta m^2}\right]. \quad (7)$$

当在信号场中加入高斯相位噪声以后，里德堡原子响应的混频信号场的相偏以 m_0 为中心，呈高斯分布。改变加入相位噪声大小，即改变 m_0 大小。此时，我们可以推导出加入高斯相位噪声后里德堡原子天线响应的混频信号场：

$$\begin{aligned} E_{\text{atoms}}(t) &\approx \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2} \cos \left[\delta t + \theta + \int dm p(m) m \cos(\omega_0 \tau + \phi) \right] \\ &= \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2} \int dm p(m) m \cos[\delta t + \theta + m \cos(\omega_0 \tau + \phi)] \\ &= \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2\sqrt{2\pi}\Delta m} \int dm \exp\left[-\frac{(m-m_0)^2}{2\Delta m^2}\right] \cos[\delta t + \theta + m \cos(\omega_0 \tau + \phi)] \\ &= \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2\sqrt{2\pi}\Delta m} \int dm \exp\left(-\frac{m^2 - m_0^2 + 2mm_0}{2\Delta m^2}\right) \cos[\delta t + \theta + m \cos(\omega_0 \tau + \phi)] \\ &= \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2\sqrt{2\pi}\Delta m} \exp\left(-\frac{m_0^2}{2\Delta m^2}\right) \int dm \exp\left(-\frac{m^2}{2\Delta m^2} + \frac{mm_0}{\Delta m^2}\right) \cos[\delta t + \theta + m \cos(\omega_0 \tau + \phi)] \\ &= \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2} \exp\left(-\frac{m_0^2}{2\Delta m^2}\right) \exp\left[-\frac{\Delta m^2 \cos^2(\omega_0 \tau + \phi)}{2}\right] \cos(\delta t + \theta). \end{aligned} \quad (8)$$

在参考场 Rabi 频率小于线宽时^[31]，做傅里叶变换后，得到的混频信号随加入相位噪声大小的变化分布：

$$\begin{aligned} T_{\text{probe}}(\omega) &\propto \frac{E_2}{2} + \frac{E_1}{2} \exp\left(-\frac{m_0^2}{2\Delta m^2}\right) \\ &\propto E_2 + E_1 \exp\left(-\frac{m_0^2}{2\Delta m^2}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

我们根据以上公式得到探测光透射光谱随输入噪声的理论模拟图。从理论模拟图可以看出，基于里德堡原子天线的微波混频信号随信号场的功率增大而增大；对于同一信号场强度，混频信号随加入相位噪声的增大而逐渐变小。

2 实验方案

本实验将波长 852 nm 外腔反馈半导体激光器 (external-cavity diode laser, ECDL) 作为探测光光源；窄线宽 1018 nm 光纤激光器经过掺镱光纤放大器 (YDFA) 后输出光功率至 5 W，然后使用周期极化铌酸锂 (PPLN) 晶体倍频获得 509 nm 激光作为耦合光光源。852 nm 激光通过饱和吸收光谱锁定到 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F=5)$ 的铯原子 D2 吸收线上。 852 nm 和 509 nm 两束激光以反向共线方式穿过铯原子气室 Cs-Cell-1 实现 EIT 光谱， 509 nm 激光通过 EIT 光谱及后续的伺服系统进行频率锁定。

在另一个铯原子气室 Cs-Cell-2 实现 EIT 光谱，用于原子天线混频实验，如图 2 所示。其中，用于混频的铯原子气室长 5 cm、直径 2.5 cm；用于原子天线的探测光和耦合光光斑直径约为 300 μm ，光强分别为 268 μW 和 60 mW。两台信号源 (Agilent, Model E8257C, E8257D) 分别产生频率 13.806 GHz 与 13.806 057 GHz 的微波场，时钟同步后，分别作为信号微波场和参考微波场，其中信号微波场通过信号源加入高斯相位噪声。微波信号通过标准增益喇叭天线 (成都英联) 发出，微波极化方向与探测光和耦合光的偏振方向平行。852 nm 探测光通过带宽为 5 MHz 低噪声平衡探测器 (New Focus 2107) 收集光信号，探测器的电信号通过接入示波器 (Keysight, DSOX3024T) 或频谱分析仪 (Keysight, 9030B) 来分析。

将 852 nm 激光频率固定在 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F=5)$ 的铯原子 D2 吸收线，509 nm 激光频率固定在 EIT 中心峰值处，参考场和信号场频率同时近共振作用于里德堡原子 $|64S_{1/2}\rangle \rightarrow |64P_{1/2}\rangle$ 态跃迁，强参考场频率为 13.806 057 GHz，弱信号场频率为 13.806 GHz；参考场强度远大于信号场强度。实验中，受限于光学读出噪声，优化参数后选择 $\delta = 57 \text{ kHz}$ 作为分析频率。图 3 为 13.806 GHz 的信号场与 13.806 057 GHz 的强参考场经原子天线混

频后输出的 57 kHz。

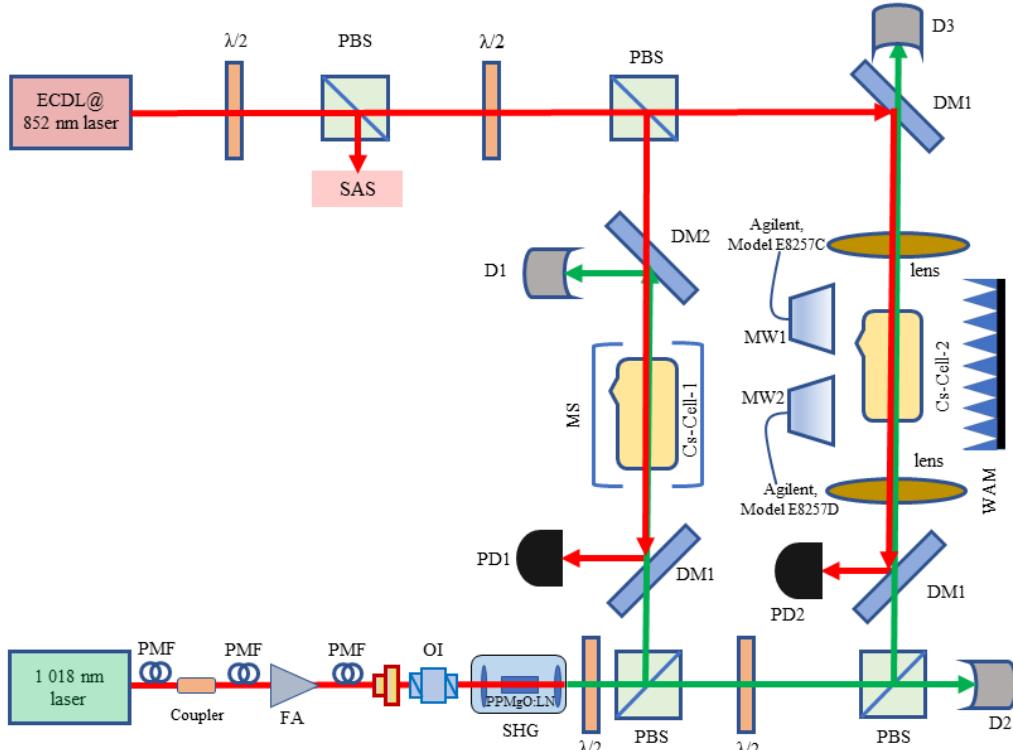


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

图 2 实验装置示意图

The SAS part is used for 852 nm laser frequency stabilization for cesium atomic saturation absorption spectroscopy. The CS-Cell-1 part is a Rydberg-EIT for 509 nm laser frequency stabilization. The CS-Cell-2 part is to build an atomic antenna using the Rydberg atom. Among them, FA, fiber amplifier; $\lambda/2$, half-wave plate; PBS, polarizing beam splitter cube; lens; PD, photoelectric detector; MS, magnetic shielding; D, optical dump; WAM, absorbing material; DM1, 852 nm high reflectivity (HR) and 509 nm high transmissivity (HT) dichroic mirror; DM2, 852 nm high transmissivity (HT) and 509 nm high reflectivity (HR) dichroic mirror.

SAS 部分为实现铯原子饱和吸收谱，用于 852 nm 激光频率稳定。Cs-Cell-1 部分为里德堡原子 EIT，用于 509 nm 激光频率稳定。Cs-Cell-2 部分为利用里德堡原子构建原子天线。其中，FA，光纤放大器； $\lambda/2$ ，半波片；PBS，偏振分光棱镜；lens，透镜；PD，光电探测器；MS，磁屏蔽筒；D，垃圾堆；WAM，吸波材料；DM1，852 nm 高反射率（HR）和 509 nm 高透射率（HT）双色镜；DM2，852 nm 高透射率（HT）和 509 nm 高反射率（HR）双色镜。

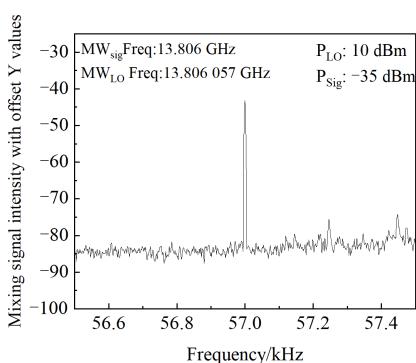


Fig. 3 A 57 kHz mixed signal with a strong reference field and signal field by an atomic antenna

图 3 强参考场与信号场经原子天线
输出的 57 kHz 混频信号

混频信号强度依赖参考场强度。固定信号场频率与功率，改变参考场的功率，记录混频信号的强度变化，如图 4 所示。信号场功率分别为 -55 dBm, -30 dBm, -15 dBm 情况下，改变参考场功率，测量得到 13.806 GHz 的信号场与 13.806 057 的强参考场经原子天线输出的 57 kHz 混频信号大小。其中，在不同的信号场功率下，混频信号随参考场变化趋势一致。由于参考场通过缓饰过程增强里德堡原子对信号场的吸收，混频信号强度随参考场功率增大至 10 dBm 时达到最大；继续增大参考场功率时，由于近共振耦合改变 EIT 暗态条件，导致混频信号减弱。在最优参考场功率 10 dBm，信号场功率 -15 dBm，混频信号强度增强约 20 dB。

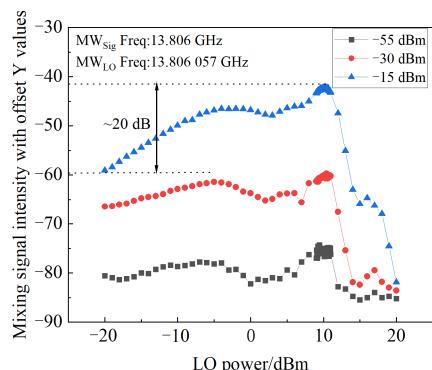


Fig. 4 The mixed signal under the microwave field power of different signals varies with the reference field power

图 4 不同信号微波场功率下混频信号随参考场功率变化

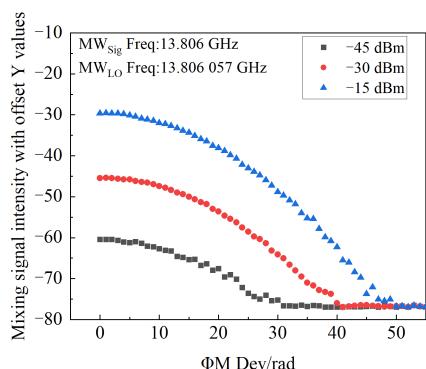


Fig. 5 At a reference field power of 10 dBm, the mixed signal varies with Gaussian phase noise under different signal field power conditions

图 5 参考场功率 10 dBm 时不同信号场功率条件下，混频信号随高斯相位噪声变化

原子天线基于里德堡原子实现参考场和信号场混频，混频信号强度敏感于两个微波场的相位起伏。

基于上述实验，参考场频率固定为 13.806 057 GHz，固定功率为 10 dBm 时，通过信号源给信号场加入高斯相位噪声，然后测量混频信号随该相位噪声的变化。其中，信号场的频率固定在 13.806 GHz，功率分别取 -45 dBm, -30 dBm, -15 dBm。如图 5 所示，在不同信号场条件下，混频信号随相位噪声变化的趋势一致。当噪声足够大时，完全破坏混频条件而探测不到。

3 结论

本文中，我们基于里德堡原子构建原子天线，通过在信号场中引入噪声项得到探测光输出信号强度表达式，从理论上分析了相位噪声对基于里德堡原子天线微波混频信号的影响规律。实验上，基于室温铯原子气室中里德堡原子电磁感应透明光谱，利用里德堡原子 $|64S_{1/2}\rangle \rightarrow |64P_{1/2}\rangle$ 态的电偶极跃迁实现微波场混频。通过参考场调控里德堡原子，其将混频频率直接传输到光场。实验研究了参考场强度和相位参数对混频信号的影响。优化功率参数条件下，参考场可以实现约 20 dB 的混频信号增强；当信号场中引入相位噪声，其会通过破坏原子混频导致混频信号强度的显著降低。这表明我们可以通过参考场功率和相位噪声调控基于里德堡原子天线微波混频的效率。基于里德堡原子构建原子天线克服了传统的天线和电路的微波测量系统无法实现超灵敏测量，无法获得微波的频率和相位信息等缺点；极大的展示了其在通信、近场天线测量和雷达等前沿科学领域中的应用价值。

参考文献

- [1] ZHU L, SUOMALAINEN J, LIU J, et al. A review: Remote sensing sensors[J]. *Multi-purposeful Application of Geospatial Data*, 2018:19–42. DOI: 10.5772/intechopen.71049.
- [2] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2):97–105. DOI: 10.1038/nphoton.2007.3.
- [3] DEGEN C L, REINHARD F, CAPPELLARO P. Quantum sensing[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, **89**(3):035002. DOI: 10.1103/RevModPhys.89.035002.
- [4] SIMONS M T, GORDON J A, HOLLOWAY C L, et al. Using frequency detuning to improve the sensitivity of electric field measurements via electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting in Rydberg atoms[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(17):174101. DOI: 10.1063/1.4947231.
- [5] KUMAR S, FAN H, KÜBLER H, et al. Rydberg-atom based radio-frequency electrometry using frequency modulation spectroscopy in room temperature vapor cells[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(8):8625–8637. DOI: 10.1364/OE.25.008625.

- [6] DEB A B, KJÆRGAARD N. Radio-over-fiber using an optical antenna based on Rydberg states of atoms[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, **112**(21):211106. DOI: 10.1063/1.5031033.
- [7] MEYER D H, COX K C, FATEMI F K, et al. Digital communication with Rydberg atoms and amplitude-modulated microwave fields[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, **112**(21):211108. DOI: 10.1063/1.5028357.
- [8] SONG Z, LIU H, LIU X, et al. Rydberg-atom-based digital communication using a continuously tunable radio-frequency carrier[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(6):8848–8857. DOI: 10.1364/OE.27.008848.
- [9] LIAO K Y, TU H T, YANG S Z, et al. Microwave electrometry via electromagnetically induced absorption in cold Rydberg atoms[J]. *Physical Review A*, 2020, **101**(5):053432. DOI: 10.48550/arXiv.2002.00855.
- [10] JIA F D, LIU X B, MEI J, et al. Span shift and extension of quantum microwave electrometry with Rydberg atoms dressed by an auxiliary microwave field[J]. *Physical Review A*, 2021, **103**(6):063113. DOI: 10.1103/PhysRevA.103.063113.
- [11] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KÜBLER H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. *Nature Physics*, 2012, **8**(11):819–824. DOI: 10.1038/nphys2423.
- [12] FAN H, KUMAR S, SEDLACEK J, et al. Atom based RF electric field sensing[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2015, **48**(20):202001. DOI: 10.1088/0953-4075/48/20/202001.
- [13] FAN H, KUMAR S, SHENG J, et al. Effect of vapor-cell geometry on Rydberg-atom-based measurements of radio-frequency electric fields[J]. *Physical Review Applied*, 2015, **4**(4):044015. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.4.044015.
- [14] KUMAR S, FAN H, KÜBLER H, et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne read-out[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1):1–10. DOI: 10.1038/srep42981.
- [15] SIMONS M T, HADDAB A H, GORDON J A, et al. A Rydberg atom-based mixer: Measuring the phase of a radio frequency wave[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **114**(11):114101. DOI: 10.1063/1.5088821.
- [16] GORDON J A, SIMONS M T, HADDAB A H, et al. Weak electric-field detection with sub-1 Hz resolution at radio frequencies using a Rydberg atom-based mixer[J]. *AIP Advances*, 2019, **9**(4):045030. DOI: 10.1063/1.5095633.
- [17] SIMONS M T, HADDAB A H, GORDON J A, et al. Embedding a Rydberg atom-based sensor into an antenna for phase and amplitude detection of radio-frequency fields and modulated signals[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**:164975–164985. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2949017.
- [18] JING M, HU Y, MA J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. *Nat Phys*, 2020, **16**:911–915. DOI: 10.1038/s41567-020-0918-.
- [19] HAN J, VOGT T, GROSS C, et al. Coherent microwave-to-optical conversion via six-wave mixing in Rydberg atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2018, **120**(9):093201. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.093201.
- [20] ANDERSON D A, SAPIRO R E, RAITHEL G. Rydberg atoms for radio-frequency communications and sensing: Atomic receivers for pulsed RF field and phase detection[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, **35**(4):48–56. DOI: 10.1109/MAES.2019.2960922.
- [21] KANDA M, DRIVER L D. An isotropic electric-field probe with tapered resistive dipoles for broad-band use, 100 kHz to 18 GHz[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1987, **35**(2):124–130. DOI: 10.1109/TMT-T.1987.1133614.
- [22] KANDA M, ORR R. Near-field gain of a horn and an open-ended waveguide: Comparison between theory and experiment[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, **35**(1):33–40. DOI: 10.1109/TAP.1987.1143963.
- [23] KANDA M. Standard probes for electromagnetic field measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, **41**(10):1349–1364. DOI: 10.1109/8.247775.
- [24] HOLLOWAY C L, SIMONS M T, GORDON J A, et al. Detecting and receiving phase-modulated signals with a Rydberg atom-based receiver[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, **18**(9):1853–1857. DOI: 10.1109/LAW-P.2019.2931450.
- [25] ROBINSON A K, PRAJAPATI N, SENIC D, et al. Determining the angle-of-arrival of a radio-frequency source with a Rydberg atom-based sensor[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, **118**(11):114001. DOI: 10.1063/5.0045601.

- [26] JIA F D, ZHANG H Y, LIU X B, *et al.* Transfer phase of microwave to beat amplitude in a Rydberg atom-based mixer by Zeeman modulation[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2021, **54**(16):165501. DOI: 10.1088/1361-6455/ac1b66.
- [27] LIU X B, JIA F D, ZHANG H Y, *et al.* An all optical phase detector by amplitude modulation of the local field in the Rydberg atom-based mixer[J]. *Chinese Physics B*, 2022. DOI 10.1088/1674-1056/ac6dbb.
- [28] 樊佳蓓, 郝丽萍, 白景旭, 等. 基于 Rydberg 原子的高灵敏微波探测与通信 [J]. 物理学报, 2021, **70**(6):063201. DOI: 10.7498/aps.70.20201401.
FAN J B, HAO L P, BAI J X, *et al.* High-sensitive microwave sensor and communication based on Rydberg atoms[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, **70**(6):063201. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.70.20201401.
- [29] HU J, LI H, SONG R, *et al.* Continuously tunable radio frequency electrometry with Rydberg atoms[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, **121**(1):014002. DOI: 10.1063/5.0086357.
- [30] HE J, LIU Q, YANG Z, *et al.* Noise spectroscopy with a Rydberg ensemble in a hot atomic vapor cell[J]. *Physical Review A*, 2021, **104**(6):063120. DOI: 10.1103/PhysRevA.104.063120.
- [31] LAHAD O, FINKELSTEIN R, DAVIDSON O, *et al.* Recovering the homogeneous absorption of inhomogeneous media[J]. *Physical Review Letters*, 2019, **123**(17):173203. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.173203.