

# 正交偏振探测技术型脉冲光抽运原子钟研究进展

林锦达 邓见辽\* 马易升 何慧娟 王育竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 介绍了本课题组新概念小型化星载原子钟的研究进展。利用已有的脉冲光抽运技术和独立提出的正交偏振探测技术,将原子钟的钟跃迁信号的对比度从一般吸收法的 30% 提高到将近 100%。该方法主要探测的是光的振幅和相位的总变化,因而能有效提高探测灵敏度和信噪比,从而提高频率稳定度。实验结果表明,正交偏振探测技术原子钟的原子频率稳定度比相同条件下吸收法原子钟的原子频率稳定度提高一个量级;而且在实验的基础上,物理系统的温度稳定度、磁场电流稳定度和激光光强稳定度都能够提高一个量级,正交偏振探测技术原子钟的秒稳能达到  $1 \times 10^{-13}$ ,天稳能优于  $1 \times 10^{-15}$ ,将来可能进一步发展并取代氢钟。

**关键词** 原子钟; 脉冲光抽运; 正交偏振探测; 阿兰方差

**中图分类号** TM935.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080012

## Progress of Orthogonal Polarization Detection Technology in Pulsed Optically Pumped Atomic Clock

Lin Jinda Deng Jianliao Ma Yisheng He Huijuan Wang Yuzhu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The progress of new concept small-size satellite atomic clock in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, is introduced. Base on the pulsed optically pumping (POP) and the orthogonal polarization detection technology, the contrast of the transition signal of atomic clock is improved from 30% in absorption detection to about 100%. The detected result reflects the variation of amplitude and phase of incident light. Therefore, the detection sensitivity and the signal-to-noise ratio are improved effectively, which leads to the improvement of the frequency stability of the atomic clock. Under the same experimental condition, POP atomic clock with orthogonal polarization detection technology has a frequency stability about an order of magnitude higher than the result of POP atomic clock using absorption detection. Above all, when the stabilities of the temperature of physics system, the current of magnetic field, and the intensity of laser are improved by about an order of magnitude, the stability of this atomic clock could reach  $1 \times 10^{-13}$  for 1s and  $1 \times 10^{-15}$  for a day, which means that this type of POP atomic clock might become a good substitute of the H-maser.

**Key words** atomic clock; pulsed optically pumped; orthogonal polarization detection; Allan deviation

**OCIS codes** 020.3690; 210.3810; 290.2558

## 1 引言

卫星导航定位系统不论是在国防,还是在国民经济的许多重要领域,例如电信、测绘、渔业、水利、森林防火、交通运输和减灾救灾等方面,都发挥着非常重要的作用。目前应用最为广泛和普遍的导航定位系统是起源于 1958 年美国军方的全球定位系统(GPS)。为了摆脱对美国 GPS 系统的依赖,世界上各主要大国和地

收稿日期: 2013-07-16; 收到修改稿日期: 2013-07-18; 网络出版日期: 2013-07-30

基金项目: 国家 973 计划(2005CB724507)、中国科学院仪器设备功能开发技术创新项目

作者简介: 林锦达(1986—),男,博士研究生,主要从事量子光学和脉冲光抽运原子钟等方面的研究。

E-mail: phyljd@gmail.com

导师简介: 王育竹(1932—),男,中国科学院院士,研究员,博士生导师,主要从事量子光学、量子信息、微波原子钟、冷原子物理和光钟等方面的研究。E-mail: yzwang@mail.shcnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: jldeng@siom.ac.cn

区都竞相开展了导航定位系统相关方面的研究,其中正在研制的导航系统主要包括俄罗斯的“格洛纳斯”(GLONASS)系统、欧洲的“伽利略”(Galileo)系统和我国的“北斗”(BDS)系统。“北斗”系统作为我国独立发展、自主运行的全球卫星导航定位系统,可广泛应用于经济和社会的各个领域。2012年12月27日起“北斗”系统向亚太大部分地区正式提供连续无源定位、导航、授时等服务。2020年左右,将建成由30余颗卫星组成的“北斗”系统,提供覆盖全球的高精度、高可靠的定位、导航和授时服务。

卫星导航定位系统按测量参数的几何定位原理可以分为测角度、组合法、多普勒测速和时间测距法等系统。其中测角度法和组合法因精度较低等原因没有实际应用;多普勒测速定位是用户定位设备根据从导航卫星上接收到的信号频率与卫星上发送的信号频率之间的多普勒频移测得多普勒频移曲线,由结果和卫星轨道参数即可算出用户的位置;时间测距法<sup>[1]</sup>是用户接收设备精确测量由系统中不在同一平面的四颗卫星发来信号各自的传播时间,然后完成包括四个方程、四个未知数的运算,得到用户的位置坐标以及用户时钟与系统时间的误差的方法。精确的时间基准对定位系统的作用尤其重要。因此,原子钟是全球卫星定位系统的最核心器件之一,其性能和水平在很大程度上决定着卫星导航定位系统的定位精度和授时精度。

原子钟的频率稳定度主要取决于原子钟跃迁信号的信噪比或者说对比度。目前原子钟跃迁信号的探测,无论是吸收法探测,还是荧光法探测,主要都是从探测光强变化方面进行,属于振幅型探测,比如传统双共振铷原子钟、吸收法探测的脉冲光抽运(POP)原子钟<sup>[2]</sup>和相干布居数囚禁(CPT)原子钟<sup>[3]</sup>等,因而谱线的对比度不够高。为了提高钟跃迁信号的对比度,本课题组从2002年起致力于新概念原子钟方面的研究。最开始我们提出了基于电磁感应透明(EIT)效应<sup>[4]</sup>的相干存储(PCS)原子钟<sup>[5-6]</sup>,它通过探测原子系综相干性的变化来探测钟跃迁的信号,因而信号对比度比较高。但是,热原子由于碰撞比较剧烈,导致相干时间不够长,因此钟跃迁信号谱线比较宽,不利于提高原子钟的频率稳定度。在此基础上,本课题组对PCS原子钟进行创新,提出了基于磁光旋转效应<sup>[7]</sup>的正交偏振检测技术POP原子钟<sup>[8]</sup>。这是国际上首次将相位探测应用于POP原子钟Ramsey信号的探测,突破了目前国际上利用吸收法得到的信号对比度最高不超过30%的限制,获得了超过90%的信号对比度。正交偏振检测技术是相位探测技术,因而具有非常高的探测灵敏度。该方法可以滤除背景光强,从而有效地抑制光场幅度抖动引入探测器的噪声,使检测结果接近于量子散弹噪声极限。当利用大失谐光探测信号时,可以利用其量子无破坏测量的特性,改变阿兰方差随时间的变化关系,发展原子锁相技术原子钟<sup>[9]</sup>。本文详细介绍了正交偏振探测技术型POP原子钟的研究进展。

## 2 POP原子钟研究历史

POP原子钟脉冲光抽运的原始思想是Alley<sup>[10]</sup>在1960年提出的,将微波探测和光的作用在时间上分开,可以避免光的作用对微波作用能级的影响,因而可以有效抑制一阶光频移。Arditi等<sup>[11]</sup>在1964年首次将脉冲光抽运技术应用于原子钟的实验中。2004年开始,意大利国家电子研究所的Godone等<sup>[2,12-22]</sup>在理论和实验两方面发展了微波探测的POP原子钟,并得到了频率稳定度极高的小型化气泡式铷原子钟。本课题组于2008年首次在POP原子钟上进行光检测,由于光的频率比微波的频率大5个量级,所以光检测理论上可以比微波检测的灵敏度提高几个量级,而且光检测对微波腔的Q值要求不高,因而能够有效降低腔牵引频移的影响<sup>[23]</sup>;之后,Godone小组也进行了光检测POP原子钟的研究,其原子钟的秒稳达到 $1.7 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ ,目前处于国际领先水平;2012年,本课题组发明了正交偏振检测技术POP原子钟,得到了超高信号对比度的钟跃迁信号。POP原子钟由于结构简单、体积小、性能好而受到越来越多的关注,比如中国科学院国家授时中心近年来也在开展微波探测POP原子钟的相关研究。

## 3 POP原子钟实验装置

POP原子钟样机原理框图和电子学系统框图如图1所示。其中图1(a)为POP原子钟整体框图,包括实验光路图、闭环锁定和频率比对。实验光路主要包括激光器饱和吸收稳频部分、物理系统部分、微波综合器部分、起偏检偏部分、声光调制器(AOM)部分等。激光器饱和吸收稳频部分把激光的频率锁定在 $|F=2\rangle$ 到 $|F'=2\rangle$ 的饱和吸收谱线上。物理系统主要是圆柱型玻璃吸收泡,吸收泡的高度为2 cm,直径为

2 cm。玻璃泡里面充有 $^{87}\text{Rb}$ 同位素原子和缓冲气体,缓冲气体为气压比等于1.6:1的Ar和 $\text{N}_2$ ,其作用主要是减小铷原子之间的碰撞,从而使原子长时间保持相干性。玻璃泡被固定在微波腔中心,微波腔的工作模式为 $\text{TEM}_{011}$ 模,其 $Q$ 值约为1000,腔的中心频率与钟跃迁频率共振。微波综合器产生的微波脉冲通过耦合环馈入微波腔。整个微波腔被置于三层磁屏蔽桶内,以减小外界磁场的影响。两层内层磁屏蔽桶外贴有无磁加热膜,将原子系统的温度控制在10 mK的变化范围内。起偏器和检偏器构成了正交偏振探测的基础,正交偏振探测型POP原子钟与吸收法探测的POP原子钟最大的区别在于,吸收法是直接探测光透射后的振幅变化,而正交偏振探测技术通过在初始光路中加入起偏器得到线偏振光,在光透射出原子以后加入检偏器,探测光经过磁光旋转以后在垂直偏振方向上的投影光强,其大小由光的振幅和相位一起决定。闭环锁定部分和频率比对仪将本地晶振的最终输出信号与氢钟进行比对。

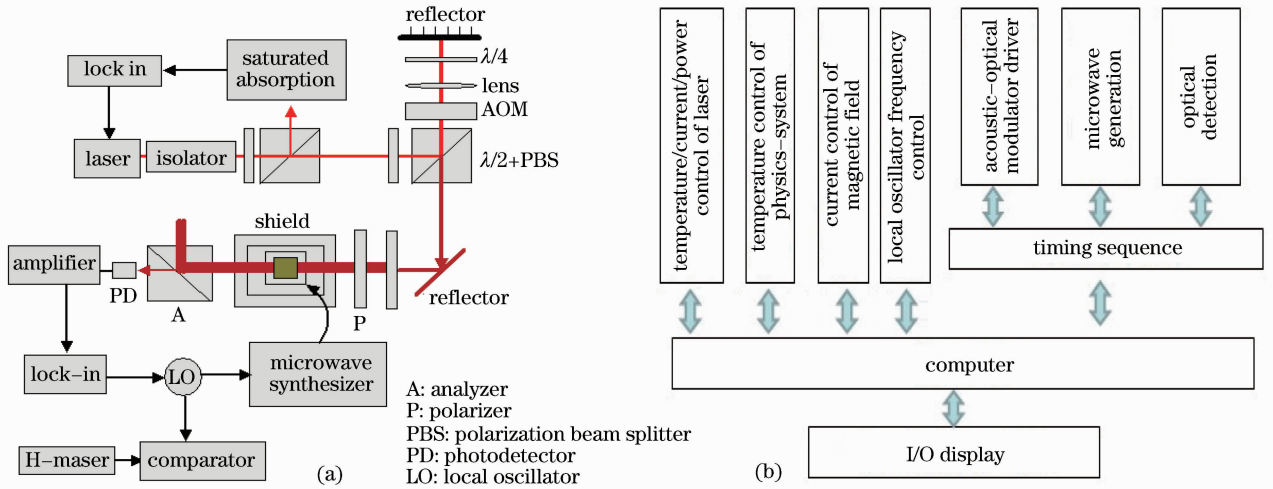


图1 (a) POP原子钟样机原理框图和(b)电子学系统框图

Fig. 1 (a) Schematic of POP atomic clock and (b) frame of the electronic system

图1(b)为POP原子钟的电子学框图,主要分为9个功能模块:POP原子钟样机操作时序控制(包括AOM驱动电路、微波倍频链、光检测电路),激光器温度控制/电流控制/频率及功率稳定,物理系统温度控制,取向磁场电流控制,晶体振荡器频率锁定电路和微处理器及输入显示模块。其中操作时序控制部分在时间上将光抽运、微波探测和光检测三个阶段分开进行。激光控制部分是为了在实验上得到稳定的光源;物理系统温控和取向磁场的稳定电路是为了使铷原子工作于稳定状态;晶体振荡器频率锁定部分实现POP原子钟样机的闭环频率锁定功能。利用几十赫兹的低频方波对6.834 GHz微波进行调制,从而实现微波频率在Ramsey条纹中心附近进行正负跳频,光检测信号经过模数(AD)转换,变为数字信号,计算正负跳频时的信号差,利用数字比例-积分-微分(PID)算法,计算出控制电压,反馈控制晶振,从而实现POP原子钟样机的闭环锁定。

脉冲光抽运光检测是POP原子钟与连续光抽运钟的最大区别。AOM和微波时序控制如图2(a)所示,该时序将POP钟分为三个过程:1)光脉冲制备量子态;2)微波脉冲探测原子跃迁;3)线偏振光检测基态原子

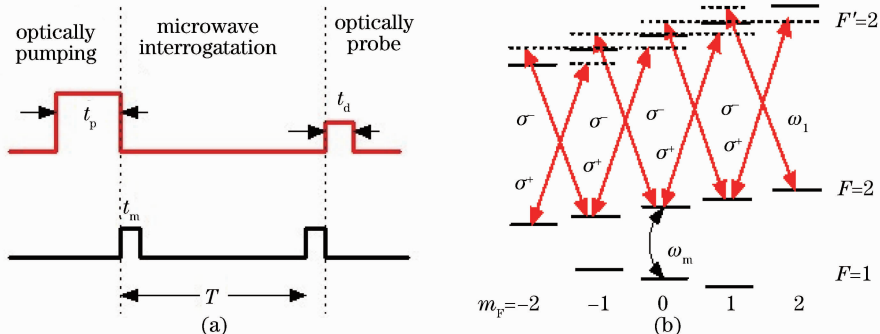


图2 (a)POP原子钟的脉冲时序图和(b)工作介质铷原子能级图

Fig. 2 (a) Timing sequence of POP atomic clock and (b) energy level diagram of  $^{87}\text{Rb}$  atom

跃迁几率随微波频率的变化。其中光作用于<sup>87</sup>Rb的 $|F=2\rangle$ 到 $|F'=2\rangle$ 的电偶极跃迁,而微波作用于 $|F=1\rangle$ 到 $|F=2\rangle$ 的磁偶极跃迁,如图2(b)所示。

#### 4 正交偏振探测型 POP 原子钟理论基础

经过光抽运和两个微波脉冲作用以后, $|F=2, m_F=0\rangle$ 能级上的粒子数布居概率满足 Ramsey 条纹分布:

$$4\left(\frac{\Omega_m}{\Omega}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\Omega t_m}{2}\right) \left[ \cos\left(\frac{\Delta T}{2}\right) \cos\left(\frac{\Omega t_m}{2}\right) - \frac{\Delta}{\Omega} \sin\left(\frac{\Delta T}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega t_m}{2}\right) \right]^2. \quad (1)$$

(1)式在中心区域附近可以简化为,

$$P = \frac{1}{2} [\cos(\Delta T) + 1]. \quad (2)$$

从(2)式可以得到条纹的半峰全宽满足

$$\Delta\nu = \frac{\Delta_{n+1} - \Delta_n}{2\pi} = \frac{1}{2T}. \quad (3)$$

当粒子数呈现(1)式变化时,在线性磁光效应下,原子对线偏振光的吸收系数和折射系数分别对应于原子极化率的虚部和实部:

$$\chi' = \frac{p^2 T_2 \Delta N}{\epsilon_0 \hbar} \frac{(\omega_a - \omega_l) T_2}{1 + (\omega_a - \omega_l)^2 T_2^2 + \Omega^2 T_2 \tau}, \quad (4)$$

$$\chi'' = \frac{p^2 T_2 \Delta N}{\epsilon_0 \hbar} \frac{T_2}{1 + (\omega_a - \omega_l)^2 T_2^2 + \Omega^2 T_2 \tau}, \quad (5)$$

式中的 $\Delta N$ 对应于电偶极跃迁上下能级数之差,因为激发态能级上的布居数几乎为零,因此 $\Delta N$ 变化基本与(1)式一致。因此,入射的线偏振光可以表示成左旋和右旋圆偏振光的叠加:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{E}_0}{2} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \right\}. \quad (6)$$

经过吸收和色散以后,可以表示成:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{2} \left\{ \exp\left(-\frac{\alpha_+}{2} kl\right) \exp(-in_+ kl) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \exp\left(-\frac{\alpha_-}{2} kl\right) \exp(-in_- kl) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \right\}. \quad (7)$$

当光与原子的能级刚好共振,加入磁场使原子产生的能级分裂刚好相等时,(7)式可以简化为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{2} \exp\left(-\frac{\alpha}{2} kL\right) \left\{ \exp(inkl) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \exp(-inkl) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \right\} = \mathbf{E}_0 \exp\left(-\frac{\alpha}{2} kl\right) \begin{bmatrix} \cos(nkl) \\ i \sin(nkl) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

从而前向散射光光强为

$$I = |\mathbf{E}_0|^2 \exp\left(-\frac{\alpha}{2} kl\right) \sin^2(nkl). \quad (9)$$

从(9)式可以看出,探测的前向散射信号不只体现了吸收,而且更重要的是相位。当线偏振光的偏振方向发生旋转时,可以得到信号,而在大失谐时,前向散射信号为零,因而得到的信号对比度可以达到100%,优于目前吸收法探测得到的结果。

前向散射光对粒子数的依赖关系如图3所示。在粒子数比较小时,前向散射光与粒子数的关系处于线性磁光效应区,此时得到的前向散射光光强随微波频率失谐的变化关系呈现拉比振荡的形式。利用其中心区域部分也可进行 POP 原子钟的闭环锁定。

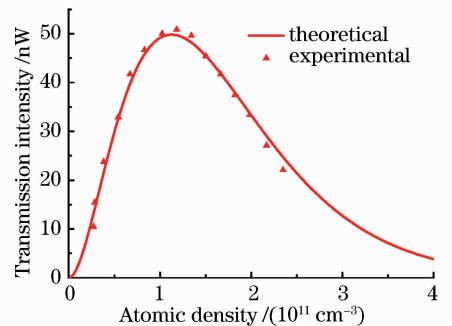


图3 前向散射光光强随粒子数变化关系

Fig. 3 Dependence of the intensity of forward scattering light on atomic population difference

#### 5 正交偏振探测型 POP 原子钟实验结果

在抽运阶段,抽运光光强为7.6 mW,抽运时间1 ms,光束直径为6 mm;在微波探测阶段,两个微波持续时间

为 0.4 ms(对应于单个微波脉冲面积  $\pi/8$ ),微波脉冲间隔为 3.6 ms;在探测阶段,探测光的光强为  $100 \mu\text{W}$ ,探测光持续时间为  $200 \mu\text{s}$ ,在微波频率一定的情况下,经过光抽运和微波探测以后,利用探测光得到的前向散射光随时间的变化关系如图 4 所示。将整个脉冲对时间积分以后得到的脉冲面积作为探测强度,不同的微波频率下探测得到的光强如图 5 的 Ramsey 条纹所示。其中图 5(a)是利用正交偏振探测得到的 Ramsey 信号,其中心条纹的对比度可以达到 93%,线宽满足  $1/(2T)$ ;作为对比,图 5(b)是利用吸收法探测得到的 Ramsey 信号,其对比度约为 20%,目前国际上最好的结果约为 30%。可以看出,利用正交偏振探测可以大大地提高信号的对比度。有了高对比度的信号,即可进行 POP 原子钟的闭环频率锁定。

利用氢钟(VCH-1003A, VREMYA-CH,其秒稳指标为  $2 \times 10^{-13}$  s,长稳指标为  $10^4$  s 内  $2 \times 10^{-15}$ )作为参考源,将氢钟的 5 MHz 输出信号与本地振荡器的信号通过相位比对仪(TSC 5110A, Timing Solutions)进行比对,通过处理  $10^5$  s 的数据得到如图 6 所示的阿兰方差,其秒稳为  $2.0 \times 10^{-12}$ ,4000 s 长稳为  $5 \times 10^{-14}$ 。在实验条件不变的情况下,利用吸收法探测得到 POP 原子钟的阿兰方差,其秒稳为  $1.7 \times 10^{-11}$ 。可以看出在相同条件下,正交偏振探测型 POP 原子钟的阿兰方差比吸收法探测的 POP 原子钟的阿兰方差提高一个量级。

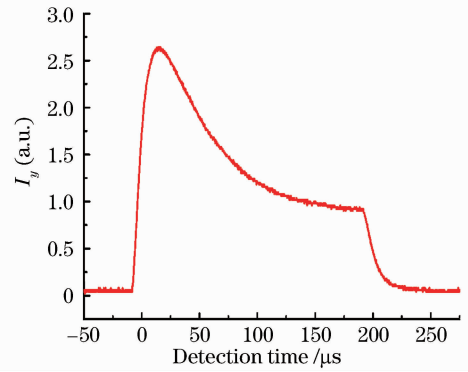


图 4 探测光测量的前向散射光随时间变化关系  
Fig. 4 Detected intensity of the forward scattering light versus the detection time

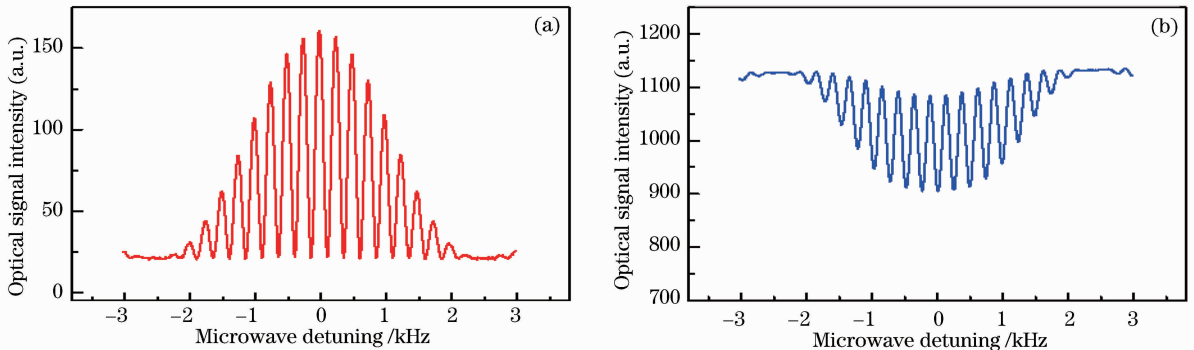


图 5 (a)正交偏振探测和(b)吸收法探测得到的 Ramsey 条纹

Fig. 5 Ramsey fringes obtained by using (a) orthogonal polarized detection and (b) absorption detection

## 6 结束语

利用正交偏振探测可以将钟跃迁信号 Ramsey 条纹中心区域的对比度提高到 90% 以上。由于正交偏振探测反应的是光相位的变化,因而利用大失谐的光探测原子依然能够得到对比度比较高的信号,而且大失谐的光对原子相当于无破坏测量,因此可以多次提取跃迁信号,从而可以发展原子锁相原子钟。在目前的实验中,我们得到 POP 原子钟的秒稳为  $2.0 \times 10^{-12}$ ,而原子钟的频率稳定度不只取决于钟跃迁信号的对比度,而且取决于探测光光强稳定度、磁场稳定度、物理系统的温度稳定度还有电子学噪声处理等。如果将目前实验系统的上述物理参数的稳定性提高一个量级,则利用正交偏振探测技术将能得到世界上稳定度最好的吸收泡式热原子钟,其秒

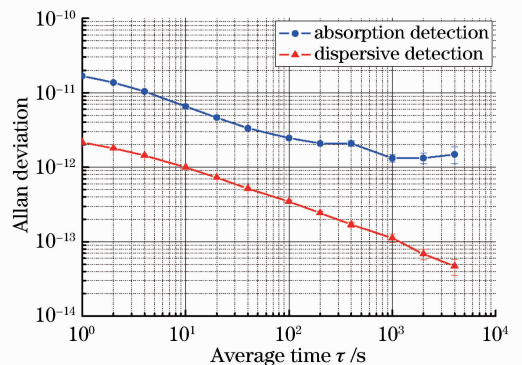


图 6 正交偏振探测和吸收法探测的 POP 原子钟的阿兰方差

Fig. 6 Allan deviation of POP atomic clock of orthogonal polarized detection and absorption detection

稳将能够达到  $1.0 \times 10^{-13}$ , 天稳达到  $3.0 \times 10^{-15}$ , 从而有望取代氢钟。

### 参 考 文 献

- 1 Wikipedia. Global Positioning System[EB/OL]. [http://en.wikipedia.org/wiki/GPS#Navigation\\_equations](http://en.wikipedia.org/wiki/GPS#Navigation_equations), 2013-07-16.
- 2 Godone A, Micalizio S, Levi F. Pulsed optically pumped frequency standard[J]. *Phys Rev A*, 2004, 70(2): 023409.
- 3 Vanier J. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review[J]. *Appl Phys B*, 2005, 81(4): 421–442.
- 4 Fleischhauer M, Lukin M D. Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(22): 5094–5097.
- 5 Yan B, Ma Y S, Wang Y Z. Formation of Ramsey fringes based on pulsed coherent light storage[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(6): 063820.
- 6 Yisheng Ma, Jiaoliao Deng, Zhengfeng Hu, *et al.*. High contrast transparent Ramsey fringes using microwave pulses interaction with atomic coherent state in warm rubidium vapor[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(3): 032701.
- 7 D Budker, W Gawlik, D F Kimball, *et al.*. Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms[J]. *Rev Mod Phys*, 2002, 74(4): 1153–1201.
- 8 Jinda Lin, Jianliao Deng, Yisheng Ma, *et al.*. Detection of ultrahigh resonance contrast in vapor-cell atomic clocks[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(24): 5036–5038.
- 9 Shiga N, Takeuchi M. Locking the local oscillator phase to the atomic phase via weak measurement[J]. *New J Phys*, 2012, 14(2): 023034.
- 10 Alley C O. Coherent Pulse Techniques in the Optical Detection of the 0–0 Ground State Hyperfine Resonance in  $^{87}\text{Rb}$ . C W Townes (ed.) *Quantum Electronics*[M]. New York: Columbia University Press, 1960. 146–155.
- 11 Arditì M, Carver T R. Atomic clock using microwave pulse-coherent techniques[J]. *IEEE Trans Instrumentation and Measurement*, 1964, 13(2–3): 146–152.
- 12 Salvatore Micalizio, Claudio Calosso, Aldo Godone, *et al.*. Metrological characterization of the pulsed Rb clock with optical detection[J]. *Metrologia*, 2012, 49(4): 425–436.
- 13 Micalizio S, Godone A, Calosso C, *et al.*. Pulsed optically pumped rubidium clock with high frequency-stability performance. *IEEE Trans Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(3): 457–462.
- 14 S Micalizio, C E Calosso, A Godone, *et al.*. Pulsed optically pumped Rb clock with high frequency stability performances [C]. 2011 Joint Conference of the Ieee International Frequency Control Symposium/European Frequency and Time Forum Proceedings, 2011. 947–950.
- 15 Micalizio S, Godone A, Levi F, *et al.*. Medium-long term frequency stability of pulsed vapor cell clocks[J]. *IEEE Trans Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(7): 1524–1534.
- 16 Micalizio S, Godone A, Levi F, *et al.*. Improving short and long term stability of pulsed optically pumped vapor cell frequency standards[C]. 2009 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium, 2009, 1–2: 1001–1004.
- 17 Salvatore Micalizio, Aldo Godone, Filippo Levi, *et al.*. Pulsed optically pumped Rb-87 vapor cell frequency standard: A multilevel approach[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(1): 013403.
- 18 Salvatore Micalizio, Aldo Godone, Filippo Levi, *et al.*. The pulsed optically pumped clock: microwave and optical detection [C]. Proceedings of the 7th Symposium Frequency Standards and Metrology, 2009. 343–347.
- 19 Calosso C E, Micalizio S, Godone A, *et al.*. Electronics for the pulsed rubidium clock: design and characterization[J]. *IEEE Trans Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2007, 54(9): 1731–1740.
- 20 Godone A, Levi F, Micalizio S, *et al.*. Frequency-stability performances of the pulsed optically pumped rubidium clock: recent results and future perspectives[J]. *IEEE Trans Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(2): 378–382.
- 21 Godone Aldo, Micalizio Salvatore, Levi Filippo, *et al.*. Physics characterization and frequency stability of the pulsed rubidium maser[J]. *Phys Rev A*, 2006, 74(4): 043401.
- 22 Godone A, Micalizio S, Calosso C E, *et al.*. The pulsed rubidium clock[J]. *IEEE Trans Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2006, 53(3): 525–529.
- 23 Deng Jianliao, Hu Zhengfeng, Li Lin, *et al.*. Frequency standards and metrology[C]. Proceedings of the 7th Symposium on Frequency Standards and Metrology, 2008. 348–352.