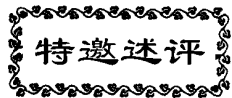


文章编号: 1000-8349(2008)04-0301-10



第三代卫星导航定位系统 星载原子钟的新发展

翟造成, 杨佩红

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 传统铷原子钟和铯原子钟已在卫星导航定位系统中作为星载原子钟获得重要应用。卫星导航定位系统的更新和新发展要求更高精度更小型的新型星载原子钟。该文介绍采用新物理原理和先进技术在下一代卫星导航定位系统有应用前景的新原子钟的产生和发展以及它们目前的进展。

关键词: 新型星载原子钟; 卫星导航定位系统; 研制进展

中图分类号: P111.44 **文献标识码:** A

1 引 言

原子钟在卫星导航定位系统中起着重要的作用, 特别是星载原子钟是该系统实现高精度定位功能的非常关键部件。目前已建成的美国 GPS 和俄罗斯的 Glonass 系统的星载原子钟, 全部采用两种传统原子钟——谱灯光抽运 Rb 原子钟和磁选态的 Cs 原子钟, 在新建卫星导航定位系统中, 如中国的“北斗”、欧盟的“Galileo”, 也都首选传统的 Rb 原子钟作为星载钟。

科学的发展与应用, 对卫星导航系统的定位功能提出更高的要求。因此, 现有 GPS 和 Glonass 系统都在实施卫星“现代化”计划和第三代卫星计划。新建系统, 如“Galileo”则站在更高起点上进行发展。毫无疑问, 这些系统对星载钟的要求更高, 如“Galileo”系统的星载钟要求满足 $3 \times 10^{-13} \tau^{-\frac{1}{2}}$ 的频率稳定度, 其最好的稳定度“平底”为 1×10^{-14} 。这样的稳定度指标, 以上所述两种传统的星载原子钟 (Rb 和 Cs) 难以全面达到。氢钟也是传统型原子钟, 由于性能指标高, “Galileo”和“Glonass”也选用被动型氢原子钟作为星载钟, 并于 2008 年随着 Galileo 第 2 颗试验卫星上天。近年来, 随着激光冷却与囚禁原子技术的发展, 以及新物理原理的应用, 新型原子钟技术的发展十分迅速, 一方面人们在探索性能更高的标准, 另一方

收稿日期: 2008-04-24; 修回日期: 2008-06-17

面努力寻求原子钟小型化的新途径。因此,为了满足高性能卫星导航定位系统的发展,与这些系统有关的国家都纷纷实施研制开发新型星载原子钟计划。我们下面将介绍这些新型原子钟的新产生和最新进展。

2 新型星载原子钟的发展

2.1 激光光抽运 Cs 原子钟^[1-3]

法国 Thales 电子设备公司、巴黎天文台和瑞士 Neuchatel 天文台在欧洲空间中心 ESA 的支持下,正在联合为“Galileo”卫星导航定位系统实施一项星载原子钟计划 OSCC(Optically Pumped Space Cs Clock)。

目前,“Galileo”选定的星载钟有两个:传统铷气泡原子钟和被动型氢原子钟。他们认为这两类钟都采用原子泡技术,对环境条件特别灵敏,限制中、长期稳定度性能。而应用原子束技术会减少这种环境效应并能达到较好的中、长期稳定度。这是因为采用原子束有两个好处:一是基本上消除原子之间的碰撞;二是其行进方向与外加探测场成垂直方向,两者在相互作用过程中避免了多普勒效应。碰撞和多普勒效应都是使原子共振信号频移和加宽的主要原因。小铷钟属于原子束型钟。但是,目前 GPS 卫星上应用的 Cs 束钟皆为磁选态型技术,不能满足起点较高的“Galileo”星载钟的要求。OSCC 是采用激光抽运技术,这种技术尽管在 20 世纪 80 年代就提出并实践,但从未实现工程化。与磁选态技术相比,光抽运技术使用更多的原子,改善信噪比,从而提高钟的频率稳定度。

图 1 为铯原子的简化能级。铯原子从铯炉出来后进入光抽运区,进行原子的制备。在光抽运区,在相应于铯原子基态 $F_g=4$ 到激发态 $F_g=4'$ 的激光频率的照射下,基态 $F_g=4$ 的原子

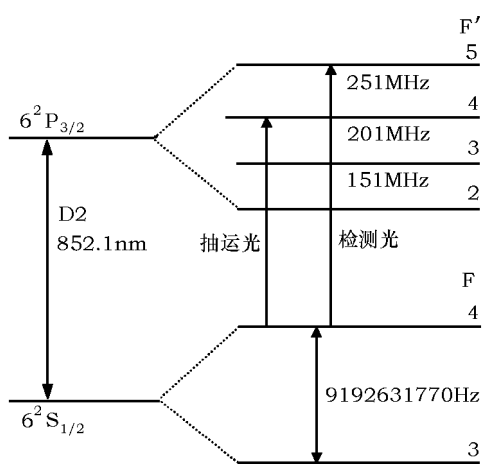


图 1 铯原子的简化能级

被抽运到 $F_g=4'$, 之后再自发辐射回落到基态的两个能态 $F_g=3$ 和 $F_g=4$ 上,经几个回合,基态 $F_g=4$ 的原子全都抽运到基态 $F_g=3$ 上。这些经制备的原子进入微波谐振腔,在探测微波场的作用下原子产生“钟”跃迁,共振吸收微波场而回到基态 $F_g=4$,并离开谐振腔进入检测区,在同一激光频率的照射下,被抽运到激发态 $F_g=4'$ 。这些 $F_g=4'$ 原子返回基态时发射的荧光由光二极管检测。荧光的强弱反映“钟”跃迁几率的大小,也是晶振经倍频-综合到“钟”跃迁频率的准确与否的反映。荧光信号的强弱作为误差信号用来控制晶振频率。

欧空局的这一计划,要求 OSCC 星载铯原子钟满足“Galileo”系统的要求:频率稳定度好于 $3 \times 10^{-12} \tau^{-\frac{1}{2}}$,最好稳定度“平底”好于 1×10^{-14} 。重量要求小于 10 kg,寿命大于 12 年。研制者认为 OSCC 钟的性能是满足“Galileo”要求的一个很好的折中。它的稳定度指标好于铷钟,而重量比被动型氢钟要轻。他们已制造了几个样机,最好的结果是 $1.5 \times 10^{-12} \tau^{-\frac{1}{2}}$,但

是在高束流情况下得到的, 这不能满足 12 年寿命的要求。目前, 他们已经分析各个样机的限制, 在这个基础上, 正在进行新束管的制造。

作为 OSCC 计划伙伴之一的瑞士天文台, 建造的另一个空间光抽运 Cs 束共振器样机 OSCAR, 已实现频率稳定度 $\sigma_y = 1.14 \times 10^{-12} \tau^{-\frac{1}{2}}$ 的高水平, 已能满足 “Galileo” 系统的要求。目前他们正在进一步改进 OSCAR, 以进行新一轮研制。

OSCC 星载钟研制小组认为: 由于激光抽运 Cs 钟采用光抽运技术、利用了全速度分布的原子以及增加一倍有用原子, 因此有好的短稳; 其长稳与被动型氢钟相当, 而且它内在设计简单, 所以它的制造和可靠性比被动氢钟将有很大改善。激光抽运 Cs 钟为将来 “Galileo” 系统的演化提供充分发挥的余地, 并将成为 GPS 和 Glonass 星载钟的潜在替代品。

美国原 Datum 公司同时也为 GPS III 开展光抽运铯原子钟 4430OPCBT 计划。他们采用调谐在 $F_g=4$ 到 $F_e=5'$ 循环跃迁激光源, 经声光调制器 (AOM) 后形成两束激光: 一束为红移 250.1 MHz, 与 $F_g=4$ 到 $F_e=4'$ 的跃迁频率符合, 作为光抽运激光, 进行原子制备; 另一束仍为循环跃迁频率, 用作产生 “钟” 跃迁的原子的激光检测。该计划下研制的 4430OPCBT 铯钟在高流量下取样时间大于 20 000 s 皆实现 10^{-15} 的稳定度。

2.2 小型冷原子钟 HORACE^[4-6]

法国巴黎天文台正在开展一个星载和空间用小型冷原子钟计划 (HORACE)。它采用激光冷却技术, 实现秒稳为 10^{-13} , 准确度在 10^{-15} 量级的标准。它的基本思想是把原子钟的所有相互作用 (原子冷却、原子制备、微波探测和检测) 都在同一地方发生, 应用时序将各个阶段的作用分开。从而该钟可以减小到几升的体积。

HORACE 钟的物理部分是由激光焊接的钛材做成, 真空室由 2L/s 的离子泵维持在 9×10^{-9} mPa。外面罩两层磁屏蔽。

为了满足冷却过程的需要, 球形紫铜腔须光学抛光到 $\lambda/14$ 的精度以便储存激光和产生各向同性的光场以供捕获和冷却原子用。同时, 这个微波腔调谐在 9.192 GHz H_{011} 模式, 用于激励 “钟” 跃迁。微波腔内有一 Cs 原子储存泡, 保持真空度在 10^{-8} 托。含泡腔的 $Q = 3000$ 。

原子的冷却、制备、探测和检测等每个相互作用过程在同一微波腔中分时序进行。首先将频率比 Cs 循环跃迁 $F_g=4-F_e=5'$ 调低几 MHz 的冷却激光和调到 $F_g=3-F_e=4'$ 的重抽运光, 通过 6 条多模保偏光纤注入腔中, 在高反射率的球形谐振腔中, 利用漫反射的红移激光和重抽运光的双重作用把 Cs 原子冷却并囚禁在微波腔中心。此时所有原子被制备处于态 $F_g=4$ 的所有 m_F 态上。然后实施从基态 $F_g=4$ 到激发态 $F_e=4'$ 的光抽运, 最终将原子抽运到基态 $F_g=3$ 态。第三步, 应用 Ramsey 微波探测, $|F_g=3, m_F=0\rangle$ Zeeman 能级上的原子转移到 $|F_g=4, m_F=0\rangle$ 能级上。然后让调谐在 $F_e=4-F_g=5'$ 的垂直线性吸收光束通过原子样品, 以循环跃迁检测这个能级上的原子数 (N_4), 然后应用 $4-5'$ 的蓝移激光清除能级 $F_g=4$ 上的原子。而后利用 π 跃迁微波脉冲将留在能级 $|F_g=3, m_F=0\rangle$ 上的原子转移到 $F_g=4$ 能级 (一方面因为原子在腔中, 另一方面我们不能用光抽运, 因为微波探测后还有许多原子留在 $F_g=3, m_F \neq 0$ 的能态上)。最后利用同样的垂直线性吸收束检测这个能级上的原子数 (N_3)。于是, 应用已知的 N_4 和 N_3 , 我们就可得出跃迁几率:

$$P = \frac{N_4}{N_3 + N_4} .$$

利用跃迁几率的峰值信号就可鉴别微波激励信号的准确与否,从而将微波源频率锁定在原子跃迁峰值上。

研制者建立了一个 HORACE 钟的桌面系统,其短期稳定度为 $\sigma_y(\tau) = 5.5 \times 10^{-13} \tau^{-\frac{1}{2}}$, 3 000 秒的稳定度为 10^{-14} 量级。他们下一阶段准备改进中期稳定度和估价准确度。

在光学抛光的球形谐振腔中利用激光的各向同性的漫散射冷却原子的方法,首先是由中国学者王育竹^[7]于 1979 年提出的,他们称其为积分球冷却技术。在国内,中国科学院上海光机所正用他们提出的这种技术开展空间冷原子钟的研究。

2.3 激光抽运铷原子钟^[8-10]

谱灯光抽运被动型铷气泡原子钟(即通常所说的铷钟),在卫星导航定位系统中作为星载原子钟有着广泛的应用。它具有小型、低功耗、长寿命和较好的短、中期稳定度等显著的优点。但它的准确度和长期稳定度较差。目前达到的最好稳定度 $3 \times 10^{-12} \tau^{-\frac{1}{2}}$ 几乎是这种标准的极限性能,很难再提高。其原因是它采用谱灯作抽运光源,效率很低。为了进一步提高铷钟准确度和稳定度,目前,俄罗斯的 RIRT 和瑞士天文台合作,正在开展激光抽运的星载铷原子钟的工作。其目的是为将来的卫星导航定位系统研制更小体积和高性能的星载原子钟。预期稳定度指标为 $1 \times 10^{-12}/s$ 和 $1 \times 10^{-14}/10^4s$ 。采用半导体激光器代替传统的光谱灯,它的优点是光谱窄,抽运效率高,不需要像传统铷钟所需的超精细能级滤光器。这些优点可减小杂散光背景辐射和降低光检测器的散粒噪声。

激光抽运铷原子钟的典型实验安置如图 2 所示。图 3 为铷原子的简化能级。

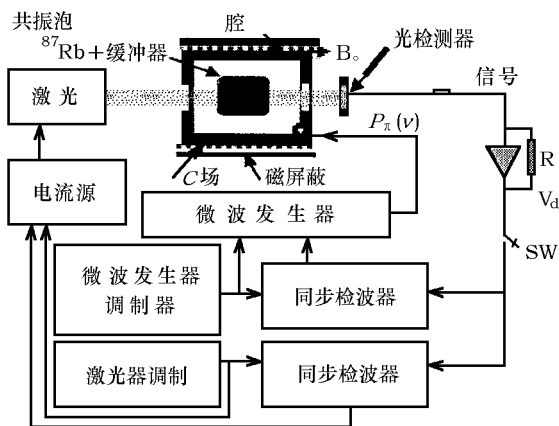


图 2 激光抽运 Rb 钟典型实验布置^[9]

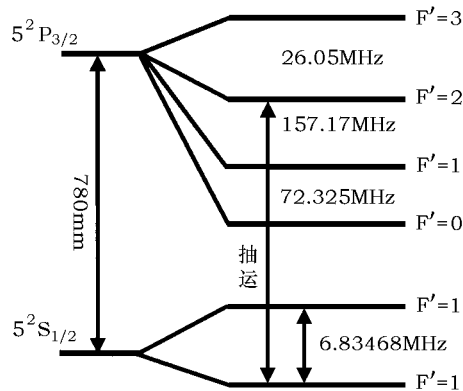


图 3 铷原子的简化能级

这个铷钟系统包括两个伺服回路,一个是激光稳定回路,用于将激光频率锁到外腔或外泡的饱和和吸收线。另一个回路是主电子学回路,用于将微波发生器频率(实质是晶振)锁到铷超精细共振线上。激光频率调谐在接近铷原子基态 $^2S_{1/2}F_g=1$ 到激发态 $^2P_{3/2}F_e=2$ 的跃迁频率。在这个激光频率的照射下,基态 $F_g=1$ 的原子被抽运到激发态,之后自发辐射回到基态 $F_g=1$ 和 $F_g=2$,最终 $F_g=1$ 的原子全部被抽运到 $F_g=2$ 态。在微波发生器(晶振倍频—综合)的微波探测场的作用下, $F_g=2, m_F=0$ 态的原子跃迁到 $F_g=1, m_F=0$ 态,又开始吸收激光而被重抽运到激发态。可见,原子在腔中的跃迁几率越大,回到 $F_g=1$ 的原子数就越多,吸收激

光就越多, 到达光检测器的光量就越小, 光检测器输出电流就越小。这种电流的变化是微波激励信号频率是否等于 σ 跃迁频率的反映。可以用来通过伺服回路控制晶振的频率。

激光抽运铷原子钟, 最近俄罗斯 RIRT 已经制成样机, 对各种影响频率稳定度的限制因素进行了详细的实验研究。在某些特定实验室条件下, 实现了 $10^{-13}/s$ 的稳定度。

2.4 小型微波汞 (Hg) 离子钟^[11]

随着人类深空探测活动的日益活跃, 深空探测器的跟踪与导航变得越来越重要。对空间原子钟提出了更高的要求, 不仅精度要高, 而且功耗和体积要小。

微波 Hg 离子钟有望满足这一要求。微波 Hg 离子钟是一种新型原子钟。通过加在特定构型电极上的静电、磁场或射频场构成离子阱的作用, Hg^+ 被约束在超高真空的甚小尺度范围内, 利用此离子跃迁所产生的鉴频信号, 将实用频标频率锁定在频率非常稳定、线 Q 值极高的离子跃迁线上。由于离子处于几乎不受干扰和外部参数十分稳定的环境下, 与探测场的作用时间很长, 因此比传统原子钟具有更高的性能。

美国 JPL 正在为深空导航研制一种小型线形 Hg 离子钟, 采用 4 极和 16 极组合射频离子阱构型。做成真空密封管。 $^{199}Hg^+$ 离子的同位素 $^{202}Hg^+$ 有一条 194 nm 的谱线波长, 非常接近 $^{199}Hg^+ 2S_{1/2}$ 基态超精细结构能级 $F_g=1$ 到激发态 $^2P_{1/2}$ 的初始态之间的跃迁频率波长。用 $^{202}Hg^+$ 作为放电灯, 以它的 194.2nm 光谱线作抽运光, 使基态 $F_g=1$ 态抽空, 此后 $^{199}Hg^+$ 从激发态 $^2P_{1/2}$ 自发辐射回到基态 $^2S_{1/2}$ 的两个能级 $F_g=1$ 和 $F_g=0$ 上, 最终离子几乎全部落到基态 $F_g=0$ 上。在实验中观察由激发态自发辐射返回基态时发出的荧光。当 $F_g=1$ 被抽空后, 此时无离子从 $F_g=1$ 到激发态的抽运, 荧光变弱。外加一个接近 $^{199}Hg^+$ 基态 $F_g=1$ 和 $F_g=0$ 之间的跃迁频率的微波场到囚禁的离子上, 离子发生共振吸收, 从 $F_g=0$ 态跃迁到 $F_g=1$ 态, 使 $F_g=1$ 态离子数增加, 重被抽运到激发态, 荧光变强。荧光强弱的变化反映探测微波场频率的准确与否, 作为误差信号锁定实用频标, 构成微波 $^{199}Hg^+$ 离子钟。

目前, 美国 JPL 已制成一个工程样机, 体积仅为 3 升, 如图 4 所示。其长期稳定度为 $1 \times 10^{-15}/10^4 s$ 量级, 短期稳定度 $(1 \sim 2) \times 10^{-13}/s$, 可与地面主动型氢钟相媲美, 而长稳比目前空间 Rb 钟好 100 倍。这种小型汞离子钟采用真空密封管形式, 从而大大减小外形尺寸, 增加可靠性。

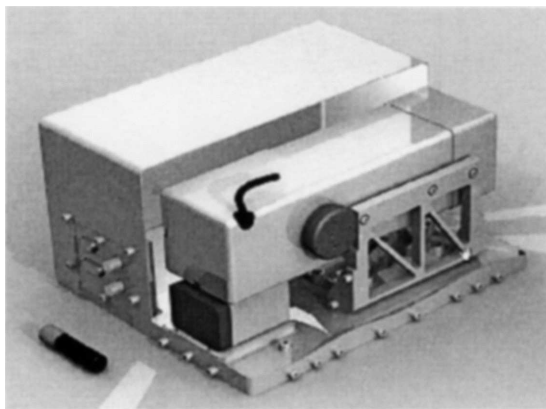


图 4 体积仅为 3 升的 Hg 离子钟^[11]

2.5 CPT-maser [12,13]

用两束相干激光照射三能级原子系统(含两个基态超精细能级和一个激发态能级),如图5所示。当两相干激光的频差等于基态超精细能级间隔时,则基态两个子能级就相干耦合起来,原子被“相干布居囚禁(coherent population trapping)”在相干叠加态上。此时无吸收产生,也无荧光发射,出现两种现象:电磁感应透明(暗线)和相干微波辐射。基于这两种现象可形成原子钟技术。

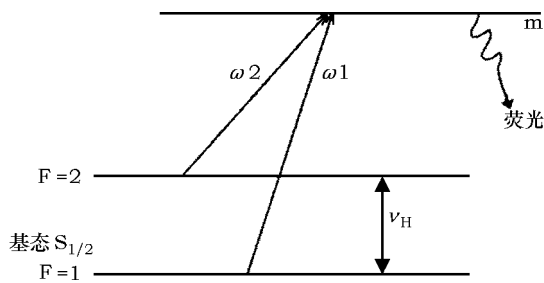


图5 三能级原子系统与相干激光场

相干囚禁在基态两个能级上的原子系统同时会产生宏观磁偶极矩,发生微波辐射,即相干微波辐射。若外面加一微波谐振腔存储此相干微波,则可实现 maser 机理,做成主动型 CPT 原子钟。这种原子钟具有星载原子钟所要求的性能潜力。引起各国原子钟领域的关注。

依托于欧洲“Galileo”计划,意大利国家电子研究所(IEN)正在开展星载 CPT-maser 钟的研究,他们预期这种标准的短期稳定度在 $10^{-12}\tau^{-1/2}$, 并且最好稳定度“平底”在 10^{-14} 。图6为这种标准的方块图。主回路将晶振(OCXO)的频率锁到 Rb 原子的 σ 跃迁 $|F=1, mF=0\rangle \rightarrow |F=2, mF=0\rangle$ 上。二极管激光器锁到 Rb 的饱和吸收信号上,通过单模保偏光纤耦合到电光调制器(EOM), EOM 的输出被扩展到 2cm 直径并被通过 $\lambda/4$ 波片送到物理部分。 $\lambda/4$ 波片的作用是将线偏振光变成圆偏振光。物理部分是 CPT-maser 的核心,如图7所示。石

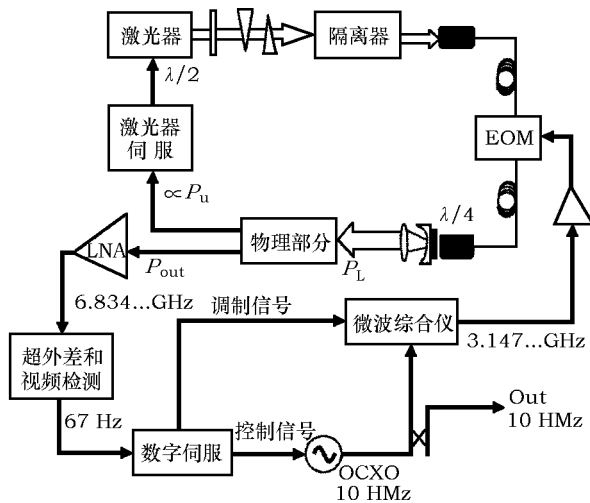


图6 CPT-maser 方块图 [13]

生,也无荧光发射,出现两种现象:电磁感应透明(暗线)和相干微波辐射。基于这两种现象可形成原子钟技术。

上述“暗线”,其线宽较窄,可以用作参考谱线做成被动型 CPT 原子钟,由于它不需要微波谐振腔及其相关部件,则体积可以做得很小,成为芯片型原子钟,但其性能较差,难于满足星载钟的要求。我们在这里不予讨论。

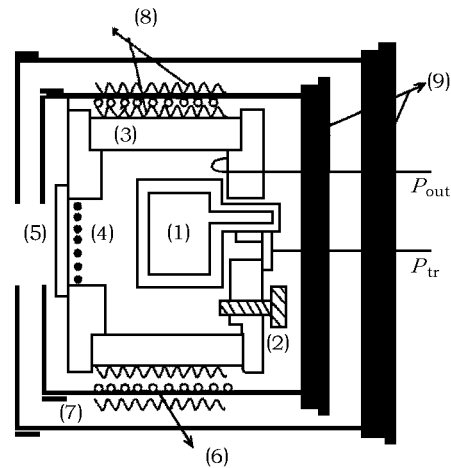


图7 物理封装结构 [13]

- (1) Rb; (2) 调节螺丝; (3) 微波腔; (4) 金属网
(5)窗; (6)C 场; (7)橡胶垫; (8)加热器; (9)磁频

英泡直径 28 mm, 长 22 mm, 含 ^{87}Rb 蒸汽和缓冲气体氩和氮的混合物, 以减小线性温度系数。腔由紫铜做成, 模式为 H_{011} , $Q_c \approx 7000$, 耦合系数 $\beta \approx 0.4$, 填充因子 $\eta \approx 0.3$, 温度灵敏度为 $-100 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 。腔有两层恒温和两层磁屏蔽, C 场为 10 mG。光二极管检测发射的激光光强度。微波信号输出送到两次转换的超外差接收机, 提供误差控制信号到数字伺服回路, 以控制晶振的频率。

主动型 CPT-maser 原子钟, 实现微波相干辐射不需要粒子数反转, 因此微波辐射信号没有阈值限制。也无须像其他原子钟那样必须有原子选态和抽运装置, 也不需真空系统, 因此, 体积和重量可大大降低。在欧洲, CPT-maser 原子钟已被指定为 “Galileo” 系统日后铷钟和氢钟的替代钟。

目前 IEN 研制的样机已获得 $3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 的稳定度, 中期稳定度达到 10^{-14} 量级。

近期, 在军方的资助下, 美国 Kernco 公司 (GPS 系统星载钟供应商之一) 和美国海军导航研究所也正在进行 CPT-maser 钟的研制。

2.6 脉冲激光抽运铷原子频标^[14]

铷原子钟作为星载原子钟有着明显的优点: 体积小、重量轻、功耗小、寿命长和可靠性高, 也符合卫星载荷的其他要求 (热、电、磁辐射和力学冲击) 的优点。所以目前正在运转以及新建卫星导航系统都首选铷原子钟作为星载钟。目前应用的星载铷钟皆为传统型谱灯抽运的铷钟。当前, 性能最好的星载铷钟当属美国 Perkin Elmer 公司和瑞士 TNT 公司研制的产品, 稳定度 $3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, $5 \times 10^{-14}/\text{d}$, 几乎已是这种传统铷钟的性能极限。

影响传统铷钟稳定度的主要问题是光频移、微波腔牵引频移和光检测噪声。其中光抽运铷钟的光频移为 10^{-10} 量级, 被认为是目前限制该标准稳定度的最主要因素之一。另外, 信号的光电检测应用抽运光作检测光, 检测到的信号为有效原子跃迁几率信号和背景光信号的叠加, 信噪比低, 影响铷钟短期稳定度。如果采用脉冲光抽运、脉冲微波 Ramsey 探测和钟跃迁检测并且这 3 个功能在时间上分时序控制进行, 则可很好地解决传统铷钟所存在的限制。脉冲光抽运 (Pulsed Optically Pumped, POP) 就是实现这种意图的一种很好的技术。这种思想首先由 Alley 在 1960 年提出^[15], 后来在 1964 年, Arditi 和 Carver 将其引入原子钟领域^[16]。原子与微波场相互作用时, 没有抽运光场存在, 原子处于一个纯的二能级系统, 于是可以消除原子钟的光频移, 提高原子钟的中、长期频率稳定度。

目前, 意大利国家计量科学研究院 (INRIM), 在欧空局 ESA 的资助下, 正在开展 POP Rb Maser 原子钟的研究, 目的是使 Galileo 系统的星载原子钟将来能更新换代, 并已获得很好的稳定度性能。其原理如图 8 所示。

锁到含 ^{87}Rb 的外泡光跃迁而被稳频的激光器输出的光束被送到声光调制器 (AOM), 它的输出送到物理部分。AOM 就像一个光开关并且由 85 MHz 的 DDS2 驱动。探测微波是由温控晶振 (OCXO) 通过直接综合链来产生。外部应用微波场的功率和频率由主 DDS1 来调节。微波腔的耦合环与一个环形耦合器连接, 能使原子和综合的微波相互作用, 并且钟跃迁信号用超外差接收机进行检测。检测的信号由含有频率控制回路的程序逻辑装置 (PLD) 识别。数字模拟转换器 (DAC) 驱动 OCXO 并且使频控回路闭环。

与喷泉原子钟操作一样, POP 原子钟是按时序控制运行的。整个时序由 PC 机同步控制完成。PLD 是 PC 机接口连接的以便设置工作参数和监视回路工作。在一个周期内, 抽运激

光脉冲结束时, $F_g=2$ 的 Rb 原子被抽到 $F_g=1$ 的 3 个子能级上。此时激光被关掉, 并且用 2 个 $\pi/2$ 微波 Ramsey 脉冲去激励原子, 钟跃迁发射信号由超外差接收机检测。10 MHz 的 OCXO 通过数字伺服回路被锁到原子共振。探测信号用频率为半周期频率的方波调制。钟工作类似原子喷泉, 但 POP 的周期更快些, 为 10 ms 量级。物理部分有一个含 Rb 气体混合物的石英泡, 放在温控谐振腔中, 腔由铝做成共振在 6.8 GHz, 模式为 H_{011} 。腔有 3 层磁屏蔽, 所需 C 场由腔外螺线管产生。

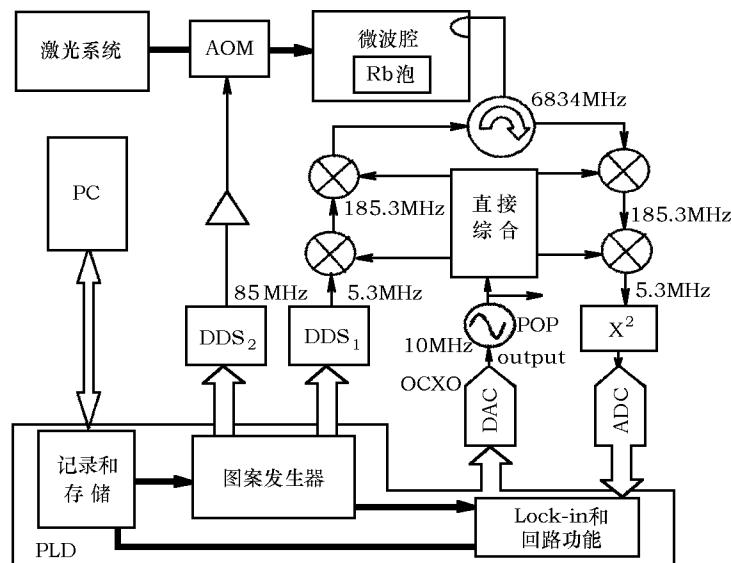


图 8 POP Rb Maser 原理方框图^[17]

INRIM 的 POP Rb Maser 原子钟已实现短稳 $1.2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, 长稳 $7 \times 10^{-15}/d$ ^[17]。再由于其体积和重量的优势, 作为星载钟有很好的潜在应用前景。

2.7 CPT 冷原子钟^[18-20]

正如上面所谈到的, 常温下 CPT-maser 原子钟尽管可以小型化, 但受原子谱线多普勒加宽的限制, 原子谱线宽度仍不够理想。即使在泡中加入缓冲气体技术, 其作用也是有限的, 而且增加了缓冲气体的压力频移, 使稳定度仍不够理想。激光冷却技术可以制备速度极低的冷原子, 与热原子相比, 冷原子的速度及其分布宽度要低几个量级。从而冷原子光谱的一级和二级 Doppler 加宽很小, 有利于原子谱线的精密测量。另外, 冷原子介质的相干时间长, 也有利于实现 CPT。如能利用冷原子介质实现 CPT 钟, 将比常温气泡 CPT 原子钟要有更高的精确度和稳定度。

法国巴黎天文台和中国科学院武汉物数所已经提出 CPT 冷原子钟的设想, 并正在实施实验研究。CPT 冷原子钟的主要问题是系统小型化问题, 因此, 设计和实现适合于 CPT 冷原子钟的小型磁光阱系统, 就变得非常关键。法国提出制备原子用光抽运技术, 冷却原子用经典光学粘胶。中国科学院武汉物数所提出单光束小型磁光阱的方案, 已实施实验研究。为了减小光学部件, 使体积更小, 结构更紧凑, 他们采用漏斗型组合反射阱来代替分立的光学元件, 用一束准直的激光束照射在组合反射阱上来实现通常的六束光对射的功能, 使体积极大减小, 实现结构紧凑的小型化磁光阱的意图。他们已设计并完成单光束小型磁光阱系统, 实验表明

可用于小型 CPT 冷原子钟。并且成功实现了中性铷原子的制备。下一步将进行冷原子 CPT 光谱实验, 并结合已完成的冷原子钟伺服控制电路, 进行闭环实验。

CPT 冷原子钟国外目前尚无做成的报道, 我国在这方面的研究水平在国际上属于先进。

3 结束语

为了满足卫星导航定位系统更新换代的需要, 人们应用新物理原理和先进的激光技术的各种新原子钟作为星载钟的研究, 正在与卫星导航定位系统有关的国家中蓬勃地开展着并取得了很好的进展。其中, 离子阱 Hg^+ 离子微波原子钟已实现主动型氢原子钟的性能指标, 而体积仅为 3 升, 与传统铷钟相当, 呈现诱人的空间应用前景。在传统物理原理的框架下, 采用先进的激光技术的光抽运铯钟和光抽运铷钟也取得了很好的进展, 成为下一代卫星导航定位系统星载原子钟的指定替代原子钟。利用新物理机理的 CPT-maser 和新的冷原子技术的积分球等冷原子钟成为原子钟家族的全新概念原子钟, 它们的表现如何, 人们正密切关注。

卫星导航定位系统的建设和空间原子钟的研究, 已经成为衡量一个国家科技实力和经济实力的重要标志。国外先进国家在积极推进现有卫星导航定位系统升级和新建系统的同时, 大力支持和积极开发更先进更合适的空间原子钟^[21]的努力也值得我们借鉴。

参考文献:

- [1] Berthoud P, Ruffieux R, Thomann P. Proc. 19th EFTF, 2005: 581-585
- [2] Hermann V, Berthoud P, Audoin C, et al. Proc. 21st EFTF'07, 2007: 77-80
- [3] Lecomte S, Haldimann M, Thomann P, et al. Proc. 21st EFTF'07, 2007:1127-1131
- [4] Tremine S, Guerandel S, Holleville D, et al. Proc. 19th EFTF, 2005: 591-598
- [5] Esnault F X, Perrin S. Proc. 20th EFTF, 2006: 237-240
- [6] Esnault F X, Perrin S. Proc. 21st EFTF'07, 2007: 1342-1345
- [7] 王育竹. “激光冷却原子数方案”, 光频标方案论证会, 1979
- [8] Besedina A, Berezovskaya O. Proc. 20th EFTF, 2006: 261-269
- [9] Vanier J, Mandache C. Proc. 21st EFTF'07, 2007: 1346-1351
- [10] Besedina A, Berezovskaya O. Proc. 21st EFTF'07, 2007:607-612
- [11] Prestage J D, Chung S K. Proc. 21st EFTF'07, 2007:1113-1115
- [12] Levi F, Godone A. Proc. 34th PTTI meeting, 2002
- [13] Godone A, Levi F. Phys. Rev. A 70, 2004: 012508-1-11
- [14] 张首钢主编. 时间频率研究领域现状与发展建议, 天文学学科进展报告, 北京: 中国科学技术出版社, 2008: 172-176
- [15] Alley C O. Coherent pulse techniques in the optical detection of the 0-0 ground state hyperfine resonance in ^{87}Rb Quantum Electronics, Townes C W ed, New York: Columbia University press, 1960: 146-155
- [16] Arditi M, Carver T R. IEEE Trans, Instrum, Meas, 1964, 13: 146-152
- [17] Godone A, Levi F, Micalizio S, et al. IEEE Trans. Instrum. Meas, 2007, 56: 378-382
- [18] 陈曦, 徐炳明, 赵朋义, 等, “相干布居数囚禁冷原子钟的研究进展”, 2007 全国时间频率学术会议, 2007
- [19] 王谨, 詹明生. “基于相干布居数囚禁的冷原子钟”, 2005 全国时间频率学术交流会, 2005
- [20] Zanon T, Guerandel S. Proc. Frequency control symposium & 17th EFTF, 2003: 49-54
- [21] 翟造成. 天文学进展, 2007, 25(2): 161

The new Creations and Developments of on-board Atomic Clocks for the 3rd Generation of GNSS

ZHAI Zao-cheng, YANG Pei-hong

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

Abstract: In satellite navigation and positioning system, the high performance atomic clocks take an important place. In particular the on-board clocks which are key component to reach the positioning performance. Since its creation, the GPS system has already used two different technologies, Rb clocks and Cs clocks. Concerning the Galileo system, two technologies are specified for the first generation of satellite. The first one is also a Rb clock while the second is a passive H maser, which has not been spatialized before.

These two kinds of clocks (Rb and Cs) are based on the same concept of atomic vapor cell, which is particularly sensitive to the environment, limiting mid and long term stability performances. In the case of the Cs clock, the principle is different, the atoms used in an atomic beam. This characteristics allows to reduce the effects of the environment and to reach better mid and long term stability performances. However, the Cs clocks on-board GPS satellite are based on the magnetic state selection technology, the frequency stability required for space clocks of the 3rd generation of GNSS, including Galileo, can't be reached with the magnetic state selection technology. In the case of the Rb clocks, state selection uses spectrum lamp pumping with low pumping efficiency, creating big optical shift, limiting stability performances so that is also difficult to satisfy the frequency stability required for future advanced satellite navigation system.

The solution proposed for the next on-board clocks is the laser approach with following advanced technologies to overcome the disadvantages mentioned above in the traditional Cs and Rb clocks : (1) the laser optical pumping technology for state selection allows to use much more atoms and to increase pumping efficiency, improving the signal to noise ratio of the atomic resonator and consequently the frequency stability of the clocks; (2) the laser cooling and trapping technologies allow to low down the velocity and temperature of the atoms, decreasing line width and improving performances; (3) each interaction of the clocks, cooling, interrogation and detection, is performed sequentially to avoid affecting from each other.

The developments of the new creation of on-board clocks for next generation of GNSS are to take benefit from these advanced technologies to reach better performances. This paper introduces new creations and development progresses of novel atomic clocks using new physical mechanism and advanced technology, which could have application perspective for next generation of GNSS.

Key words: satellite navigation and positioning system; novel on-board atomic clock; development progress