

文章编号: 1001-3806(2002)04-0300-03

## 铯原子钟速度分布的计算机模型

吴文国

(温州师范学院计算机系, 温州, 325003)

摘要: 基于已建立的小型铯原子钟计算机模型系统, 研究了铯束原子速度为双峰分布和三峰分布对原子钟微波频谱的影响。分析了在此条件下的钟跃迁微波频谱的主要变化特征, 并与文献报道的 NBS-4 磁选态铯原子钟情形和北京大学的小型光抽运铯原子钟的实验结果作了比较和分析, 证实束原子速度为双峰分布时微波谱所表现的特征。

关键词: 铯原子钟; 微波频谱; 计算机模型

中图分类号: O562 文献标识码: A

### Numerical model of cesium atomic clock velocity distribution

Wu Wenguo

(Department of Computer, Wenzhou Normal College, Wenzhou, 325003)

**Abstract** Based on a numerical model cesium atomic clock designed before, the influence of atomic velocity distribution consisting of two peaks and three peaks has been studied respectively. The main characteristics of the microwave spectra under this circumstance has been analyzed and compared with the reported phenomenon in NBS-4 magnetic state selection cesium clock and the recent experimental result of an optically pumped small cesium clock in Peking University. The characteristic of the microwave spectra in the case of atomic velocity distribution consisting of two peaks has been verified.

**Key words:** cesium atomic clock; microwave spectrum; numerical model

### 引言

近年来, 在迅猛发展的原子频率标准的理论和实验研究中, 铯原子钟以其自身的优越性, 得到了最为成熟的发展, 被广泛应用在许多科学和技术领域。高准确度高精度的时间频率标准在卫星、导弹的发射, 各种现代化武器装备的同步、数字通信等现代国防和现代科技中发挥着重要的作用。我国目前基本上是靠进口美国的小型铯原子钟或使用 GPS。为摆脱在时间频率计量上对美国的长期依赖, 保证我国时间的独立性, 北京大学铯束频标实验室 10 多年来在光抽运的新型小铯钟研究方面, 已做了许多创造性的工作, 使北京大学小铯钟的研究处于世界先进水平, 但目前其背景激光噪声和微波相关频移较大。存在于铯原子钟的各种频移很小, 即使对于小型的原子钟, 相对频移量一般在  $10^{-12}$  数量级以

下, 因此, 在实验研究的过程中, 每次测量一组数据需要几天至几周的时间, 甚至更长。例如测量腔相差引起的频移, 需要多次将原子束倒转, 在高真空系统上做这样的工作是非常繁琐而花时间的。所以, 如果有可以快速给出数值或仿真结果的原子钟计算机模型系统, 对于分析研究铯原子钟存在的各种频移和具体的小型原子钟的设计将有很重要的意义。通过数值仿真, 避免了巨大的实验消耗和需要的长时间测量, 可以快速分析铯原子钟存在的各种频移等现象。国外对磁选态铯原子钟和汽室铷原子钟做过建模和仿真工作。笔者也曾结合北京大学的激光抽运小型铯原子钟结构<sup>[1,2]</sup>, 初步建立了光抽运小型铯原子钟计算机模型系统<sup>[3]</sup>。利用该计算机模型系统, 已对光抽运小型铯原子钟在一些极端条件下情形进行了研究, 如在抽运激光功率偏低, 有效原子的速度分布特别窄, 微波功率远大于最佳微波功率等条件下, 得到了一些有意义的结果<sup>[3]</sup>。

### 1 铯原子钟微波频谱的数学模型

所建立的光抽运铯原子钟的计算机模型系统在

作者简介: 吴文国, 男, 1964 年出生。讲师。现从事计算机教学工作。

收稿日期: 2001-07-04; 收到修改稿日期: 2001-09-25

激光技术 jgjs@sina.com

以往的文章中已经作过介绍<sup>[3]</sup>,并可参考相关的文献<sup>[1,2]</sup>。在此着重介绍的是此模型中的微波频谱数学模型。

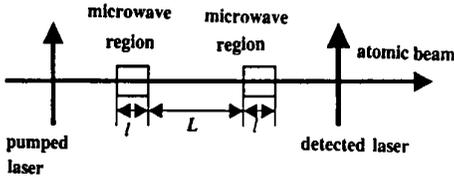


Fig. 1 Atom and Ramsey microwave separate spectrum

如图 1 所示,在根据 Ramsey 分离场的方法建立的原子钟装置中,从原子炉发射的铯原子束经光抽运后经过两次振荡场区(长度为  $l$ )和一个漂移区(长度为  $L$ ),经这两次间断的相互作用,最初处于  $m$  态的原子可跃迁到  $n$  态,其跃迁几率是:

$$\rho_{mn}(2\tau + T) = 4\sin^2\theta \sin^2\frac{1}{2}a\tau \times \left[ \cos\frac{1}{2}\lambda\tau \cos\frac{1}{2}a\tau - \cos\theta \sin\frac{1}{2}\lambda\tau \sin\frac{1}{2}a\tau \right]^2 \quad (1)$$

考虑到铯原子束中原子的速率分布为:

$$I(v)dv = \frac{2I_0}{\alpha^4} v^3 e^{-v^2/\alpha^2} dv \quad (2)$$

将(1)式对原子速率分布公式(2)求积分,得到原子平均跃迁几率:

$$\langle \rho_{mn}(2\tau + T) \rangle = \frac{1}{I_0} \int_0^\infty I(v) \rho_{mn}(2\tau + T) dv \quad (3)$$

$$\langle \rho_{mn}(2\tau + T) \rangle = \int_0^\infty \frac{8v^3}{\alpha^4} e^{-v^2/\alpha^2} \sin^2\theta \sin^2\frac{1}{2}a\tau \times \left[ \cos\frac{1}{2}\lambda\tau \cos\frac{1}{2}a\tau - \cos\theta \sin\frac{1}{2}\lambda\tau \sin\frac{1}{2}a\tau \right]^2 dv \quad (4)$$

式中,  $\tau = l/v$   $\tau$  为原子经过振荡区的时间,  $v$  为原子速度。 $T = L/v$   $T$  为原子经过漂移区的时间。 $a = [(\omega_0 - \omega)^2 + (2b)^2]^{1/2}$ ,  $\sin\theta = -2b/a$ ,  $\cos\theta = (\omega_0 - \omega)/a$ 。 $\lambda = \omega_0 - \omega$  为微波频率失谐量,  $\omega_0$  为铯原子基态的钟跃迁频率。

则积分内是原子速度  $v$  和微波频率失谐量  $\lambda$  的函数,所以(4)式可以表示为:

$$\langle \rho_{mn}(2\tau + T) \rangle = \int_0^\infty F(v, \lambda) dv \quad (5)$$

上式所得到的结果就是铯原子钟的检测区测量到的铯原子微波频谱信号。

## 2 初步结果及分析

对于(5)式所表示的微波频谱信号,需要特别注意的是,由(2)式所表示的是理想的热原子束的速

率分布,而实际情形却远非如此。例如对于磁选态铯原子钟的原子速度分布,情况更加复杂,经过细致深入的实验研究以后发现原子速度分布是一种出乎意料的双峰分布。因此,利用铯原子钟的计算机模型系统来研究铯束原子速度分布对原子钟微波频谱的影响有着重要的实际意义。

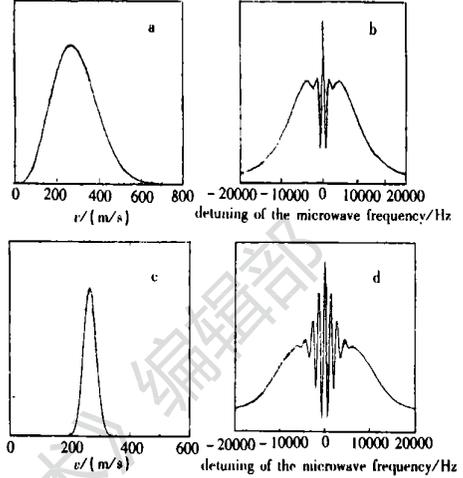


Fig. 2 The thermal atomic beam velocity distribution and Gaussian velocity distribution, and their corresponding microwave frequency spectra in atomic clock

对于光抽运铯原子钟,通常设置检测激光束与原子束方向垂直,如图 1 所示。在这样的原子钟装置中,如图 2a 所示的热原子束速度分布中的所有原子对检测到的微波频谱的信号都有贡献,其相应的微波频谱如图 2b 所示。北京大学目前研制的小型光抽运铯原子钟采用斜入射激光的检测方案,即检测激光束与原子束方向成一夹角<sup>[2]</sup>。在此条件下,对频谱信号有贡献的铯原子速度呈高斯分布,如图 2c 所示,相应的微波频谱如图 2d 所示,图 2 的条件参数见文献[1~3]说明。上述两种理想的情形已经有精确的实验数据与之相符,但在具体的原子钟系统上,往往有特殊的特征出现于微波频谱上。下面分析北京大学的小型光抽运铯原子钟的实验结果,并与文献报道的 NBS-4 磁选态铯原子钟的情况作一比较。

在北京大学最近研制的小型光抽运铯原子钟系统上,微波频谱的实验结果与理论预言的并不相符。如图 3b 所示的测量结果,随微波频率失谐加大,微波频谱作余弦弛豫振荡过程中出现了一个明显加宽的谷,这是一个与如图 2d 所示的理论结果区别的明显特征。利用小型铯原子钟计算机模型系统。仿真结果表明,这样的微波频谱特征来自原子的双峰速度分布。如图 3a 代表的双峰原子速度分布其对应

的微波频谱为图 3c 所示,与图 3b 的测量结果相符得很好。由此可以断言,这台小铯钟的有效原子呈双峰分布。据初步分析,可能是磁场屏蔽不善引起两个基态的铯原子飞行方向产生偏差,它们与斜入射检测激光束夹角不同,所以要求不同的速度以产生相同的多普勒频移满足斜入射检测。

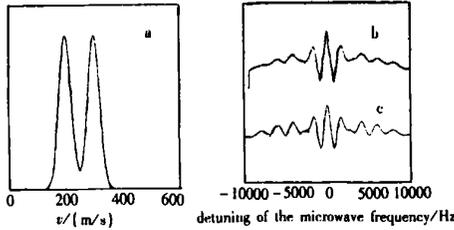


Fig. 3 The microwave frequency spectrum produced by two-peak velocity distribution of atomic beam, and the microwave frequency spectrum of small optically pumped cesium clock in Peking University

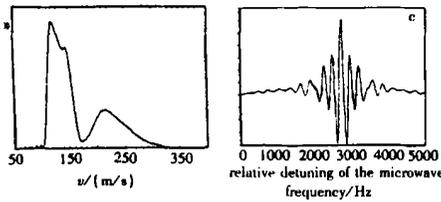


Fig. 4 The microwave frequency spectrum of the NBS-4 magnet state select atomic clock in the United States, and its effective atomic velocity two-peak distribution

对于磁选态铯原子钟,由于束光学装置有选速作用,故对微波频谱有贡献的原子的速度分布很不规则,情况就更加复杂。图 4 是 NBS-4 磁选态铯原子钟的微波频谱,其频谱中也出现了一个明显加宽的谷,其原因就是原子速度为双峰分布。将之与图 3 比较,说明上述的分析是正确的。

作为进一步认识和参考,还研究了原子速度为

三峰分布时的特殊情形,结果如图 5 所示,微波频谱呈更为复杂的变化。

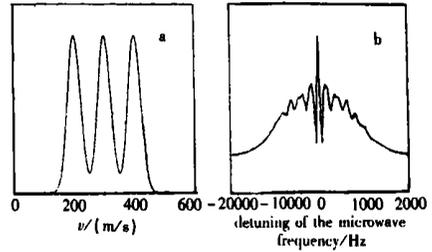


Fig. 5 The microwave frequency spectrum produced by three-peak atomic velocity distribution  
a- three-peak atomic velocity

### 3 结束语

利用小型铯原子钟的计算机模型系统,研究了铯束原子速度为双峰分布对原子钟微波频谱的影响。对北京大学的小型光抽运铯原子钟的实验结果作了分析,并与文献报道的 NBS-4 磁选态铯原子钟的相似情形作了比较,证实了束原子速度为双峰分布时所表现的特征。同时,作为进一步的认识和参考,还给出了原子速度为三峰分布时具有复杂变化的微波频谱。这些研究结果也说明铯原子钟的计算机模型系统对于分析研究铯原子钟的各种性能以及存在于铯原子钟的各种特殊物理现象都有很大的帮助。

作者感谢陈景标博士的有益讨论和建议,并提供了北京大学光抽运小型铯原子钟的最新微波频谱实验数据。

#### 参 考 文 献

[1] 陈景标,杨东海. 计量学报, 1998, 19(2): 94~ 100.  
 [2] Chen J B, Wang F Zh, Wang Y Q *et al.* IEEE Trans Ultra Ferro Freq Contr, 2000, 47(2): 457~ 460.  
 [3] 吴文国. 激光与光电子进展, 2001(4): 11~ 13.

(上接第 299 页)

[7] 廖 睿,张静娟. 激光杂志, 1999, 20(4): 38~ 39.  
 [8] 赵为党,杨李茗,虞淑环 *et al.* 红外与激光工程, 1999, 28(1): 29~ 32.  
 [9] 刘 娟,杨国桢,顾本源 *et al.* 光学学报, 1999, 19(12): 1667~

1672.

[10] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics. San Francisco: McGraw-Hill, 1968.  
 [11] Avriel M. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1976.