文章编号:1002-2082(2009)04-0693-05

四频差动激光陀螺中的粒子数脉动效应

杨建强，王国臣
(国防科技大学 光电科学与工程学院，湖南 长沙 410073)

摘　要：为研究激光陀螺精细模耦合作用，考虑了增益介质中的粒子数脉动效应。从激光器物理原理出发，分析了粒子数脉动效应的产生机制，结合四频差动激光陀螺特点，得出粒子数脉动效应是一种精细模耦合效应，不同激光模式间的拍频使增益介质中粒子数布居差产生调制，进而对模耦合产生影响。数值计算了粒子数脉动在耦合效应中的大小。计算结果表明：粒子数脉动效应和其他耦合效应随腔频变化基本一致，在大多数腔频范围内数值较小，为其他耦合效应的4%以下；在某些腔频范围（如$0.37<\xi<0.46$，$0.02<\xi<0.06$，$0.86<\xi<0.88$）有较大数值，为其他耦合效应的80%以上，在激光陀螺的模耦合分析中不可忽略。

关键词：激光物理；粒子数脉动效应；四频差动激光陀螺；模耦合
中图分类号：TN248.1　　**文献标志码**：A

Population pulsation effect in four-frequency differential laser gyro

YANG Jian-qiang, WANG Guo-chen
(College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The population pulsation effect in the gain medium was considered to research the fine mode coupling effects in the laser gyro. Proceeding from the laser physics principle, the generation mechanism of population pulsation is analyzed. In association with the characteristics of four-frequency differential laser gyro, it is found that the population pulsation effect is one of the fine mode coupling effects. The level of the population pulsation effect in the coupling effects was calculated numerically. The result shows that the variation of the population pulsation effect with the cavity tuning is basically in accordance with other coupling effects, and it has small value in large cavity tuning ranges, which is less than 4% of other coupling effects; but it has relatively large value in some cavity tuning ranges ($0.37<\xi<0.46$, $0.02<\xi<0.06$, $0.86<\xi<0.88$), which is more than 80% of other coupling effects. Therefore, it can't be ignored in the mode coupling analysis of the laser gyro.

Key words: laser physics; population pulsation effect; four-frequency differential laser gyro; mode coupling

引言

四频差动激光陀螺工作时远离零点锁区，动态范围大，抗干扰能力强，从原理上比二频陀螺有更优越的性能，已成为惯性导航技术领域研究的热点[1-4]。由于四频差动陀螺腔内同时存在4个激光模，其模式间耦合效应比较复杂，而模耦合导致的光强饱和效应和频率牵引推斥效应与陀螺零漂紧密相联，是影响陀螺性能的重要因素[5-6]。

收稿日期：2008-09-24；　**修回日期**：2008-11-20
作者简介：杨建强(1982－)，男，河南新蔡人，在读博士生，主要从事新型环形激光器的理论研究工作。
E-mail：yjqyjq_yjq@163.com

激光陀螺属于弱增益激光器,腔内的模耦合效应通常用兰姆半经典理论进行分析[7-9]。为了数学上的方便,通常作速率方程近似,认为在时间 $1/\gamma$ 内 $(\rho_{aa}-\rho_{bb})$ 变化很小,忽略了粒子数脉动效应[10],这对于模耦合效应的分析是精确的。粒子数脉动通过模耦合作用影响激光频率,对于以频率为测量值的激光陀螺是不可忽略的误差因素。本文分析了粒子数脉动效应的物理机制,结合四频差动陀螺,数值计算了粒子数脉动效应的大小。

1　物理机制

激光器中上下能级激发态粒子数布居差提供激光工作增益,增益介质同时作用于激光强度和频率而产生线性及非线性效应。多模运转时,若不同频率激光模由相同上下能级间粒子数布居差产生,则不同模式会由于增益介质非线性效应相互耦合,产生频率为不同模式间拍频整数倍的激光信号。这一信号反过来作用于增益介质,使上下能级间粒子数布居差产生调制,调制频率等于不同模式间拍频频率整数倍,这种调制称为粒子数脉动效应。这一脉动作用非常像在外加信号上产生边带的调制器,和喇曼效应类似。粒子数脉动效应是模耦合作用的一部分,对于多模激光器的锁模、锁频等有重要影响。

数学上兰姆半经典三阶微扰论可以推导出粒子数脉动效应项。从密度矩阵 $\begin{bmatrix}\rho_{22} & \rho_{ab}\\ \rho_{ba} & \rho_{bb}\end{bmatrix}$ 的运动方程出发[11],将激光电场微扰能 $V_{ab}(t)=-e\boldsymbol{E}(r,t)\cdot\boldsymbol{r}$ 零阶粒子数布居差 $N=(\rho_{aa}^{(0)}-\rho_{bb}^{(0)})$ 代入运动方程,奇次阶微扰计算可得出介质电极化作用 ρ_{ab},偶次阶微扰计算可得出粒子数布居差 $(\rho_{aa}-\rho_{bb})$,一般只进行到三阶微扰。$\rho_{ab}^{(1)}$、$\rho_{ab}^{(3)}$ 表征了介质的线性和非线性效应,$(\rho_{aa}^{(0)}-\rho_{bb}^{(0)})$、$(\rho_{aa}^{(2)}-\rho_{bb}^{(2)})$ 则表征了激光与介质相互作用过程中的粒子数布居差,而 $(\rho_{aa}^{(2)}-\rho_{bb}^{(2)})$ 中包含了粒子数脉动效应,从而在最终的兰姆系数中产生形式繁琐的粒子数脉动项。而粒子数脉动效应的数学推导相当复杂,绝大多数文献没有进行,笔者在文献[12]中给出了包含粒子数脉动项的四频差动激光陀螺兰姆系数解析表达式。

2　四频差动激光陀螺原理

四频差动陀螺腔内同时运行左右旋对模,分别位于增益曲线峰值两侧,如图1所示。其中横、纵轴分别代表频率 ν 和增益 G,ν_m 为中心峰值增益对应的频率,I_1 和 I_2 分别为顺、逆时针传播的左旋模,I_3 和 I_4 分别为逆、顺时针传播的右旋模,相应频率为 ν_1、ν_2、ν_3、ν_4。

在四频差动陀螺中,左右旋模间隔由旋光晶体或空间旋光效应产生,模间频率分裂由法拉第磁致旋光恒定偏频量和Sagnac效应产生。通过检测左右旋模对间拍频差来敏感反映陀螺腔体的转动角速度。若不考虑增益介质对频率的修正作用,左右旋对模间拍频差和腔体角速度之间有很好的线性关系,且左右旋模不必如图1所示关于增益曲线中心对称,理论上可以不用稳定陀螺工作频率就能达到极高精度。但实际中增益介质的存在使激光模式间产生复杂的模耦合,由此导致的频率漂移成为重要的误差源。如 I_1 和 I_2 之间属于同旋模耦合,I_1 和 I_4 之间属于同传播方向模耦合,而 I_1 和 I_2、I_3、I_4 的耦合又都属于同增益模耦合,不同类型模耦合在数学上有不同的表达式[12],其中的粒子数脉动效应各有不同。

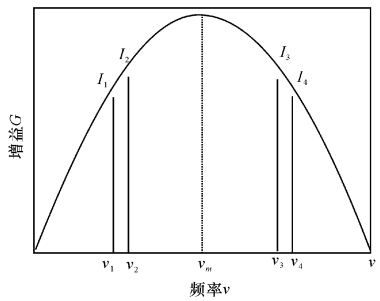

图1　四频差动激光陀螺工作原理图

Fig. 1　Working principle of four frequency differential laser gyro

3　数值计算

粒子数脉动效应数学形式很繁琐,在各种模耦合系数中均有对应项,为简化起见,以 C_{ij} 表示第 i 模和第 j 模之间耦合系数,则 $C_{ij}=A_{ij}+B_{ij}$,其中 A_{ij} 为普遍烧孔效应项,B_{ij} 为粒子数脉动效应项,具体数学表达式见文献[12]。以往的文献有的将左右旋对模看成近独立的双陀螺,忽略左右旋模间的耦合,只考虑同旋模对间耦合;有的只考虑多普勒极限近似条件下的模耦合,忽略了非多普勒极限普遍情形[5-7];有的忽略了辐射捕获效应,只用粗略的兰姆系数来计算等,这些处理方法对四频陀螺的模耦

合分析在相当程度上都是不准确的。本文精确计算了模耦合中粒子数脉动效应的大小。

以 I_1 和其他模式间的耦合为例,取四频差动陀螺典型参量,激发度 $G_m/\gamma=1.03$,腔长 $L=30$ cm,左右旋差损 $\gamma_{LR}=1\times10^{-6}$,法拉第偏频 $\nu_H=500$ kHz,双同位素配比 $Ne^{20}:Ne^{22}=53:47$,均匀展宽与多普勒展宽的比值 $\eta=0.2$,令激光工作频率参量 $\xi=(\nu-\nu_{20})/ku$,ν_{20} 为 N^{20} 中心频率,ku 为多普勒展宽,可得到如图2所示各种模耦合系数中相应的粒子数脉动效应大小的失谐曲线。

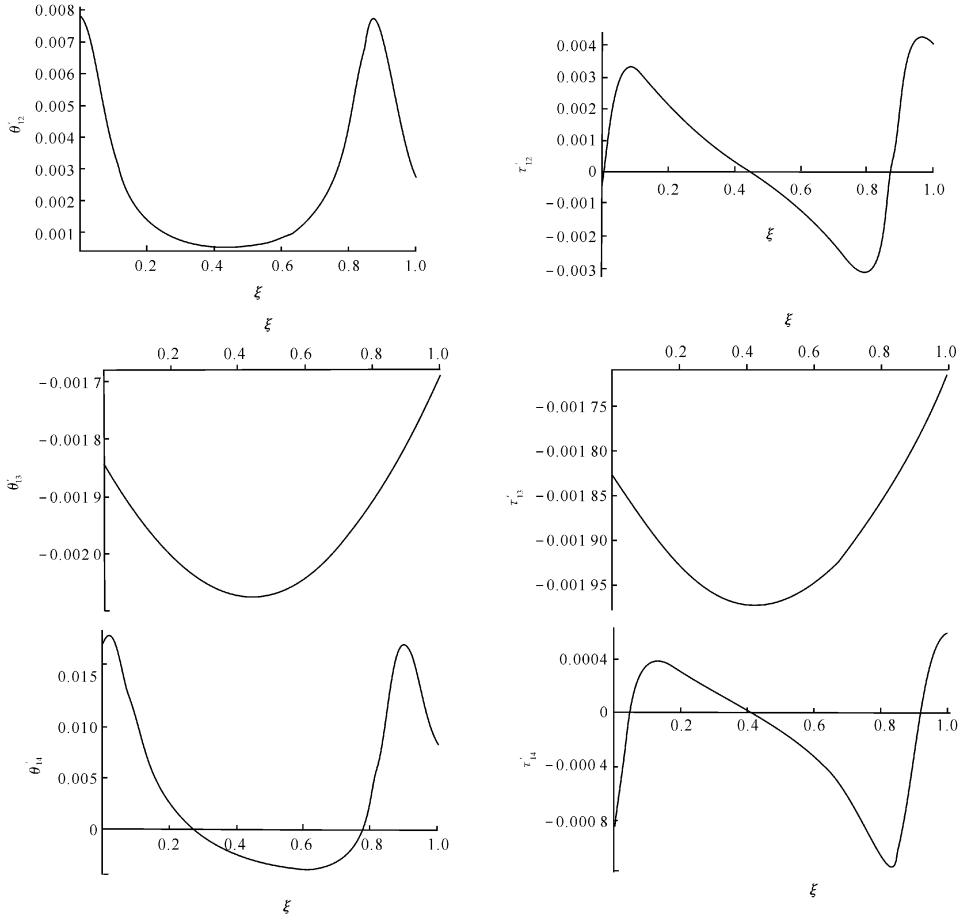

图2　粒子数脉动耦合作用随ξ变化曲线

Fig. 2　Curves of population pulsation coupling effect versus ξ

由图2可看出,对于光强互饱和效应,θ'_{12} 随 ξ 增加先减小后增大,在 $\xi=0.44$ 处达到最小值;θ'_{13} 随 ξ 增加先增大后减小,在 $\xi=0.44$ 处达到最大值;θ'_{14} 随 ξ 增加先减小,过零点后先增大后减小,第二次过零点后又一直增大。而对于频率互推斥效应,τ'_{12} 和一般的频率反常色散效应趋势相同,在 $\xi=0.44$ 处过零点;τ'_{14} 相比 τ'_{12} 的对称性差了许多,但也仍在 $\xi=0.44$ 处过零点,而 τ'_{13} 则与一般的频率反常色散效应趋势完全不同,和 θ'_{13} 的变化趋势类似,在 $\xi=0.44$ 处达到最大值。与文献[12]中的数据对比知,粒子数脉动项和不考虑粒子数脉动项的耦合系数随 ξ 的变化趋势大致相同,这从微观物理机制上说明了虽然粒子数脉动效应有其独特性,但在效果上对模耦合作用的影响和其他耦合效应基本一致。在数值大小上,粒子数脉动项与不考虑粒子数脉动效应耦合系数比值的失谐曲线如图3所示。

由图3可以看出,$\frac{\theta'_{12}}{\theta_{12}}$、$\frac{\theta'_{13}}{\theta_{13}}$ 和 $\frac{\tau'_{13}}{\tau_{13}}$ 随 ξ 变化时,数值

上最大只有4%,特别是$\frac{\theta'_{12}}{\theta_{12}}$在激光陀螺的工作点$\xi=0.44$只有1%,说明对于$\theta_{12}$、$\theta_{13}$和$\tau_{13}$这3种耦合作用粒子数脉动效应是小量,可以忽略;但其他3种耦合作用中的粒子数脉动效应随ξ变化时有较大的数值,$\frac{\theta'_{14}}{\theta_{14}}$达到20%,$\frac{\tau'_{12}}{\tau_{12}}$和$\frac{\tau'_{14}}{\tau_{14}}$则在某些$\xi$取值区域(如$0.37<\xi<0.46$, $0.02<\xi<0.06$, $0.86<\xi<0.88$)可达到80%以上,这对于模耦合有重要影响,在激光陀螺模耦合分析中不可忽略。

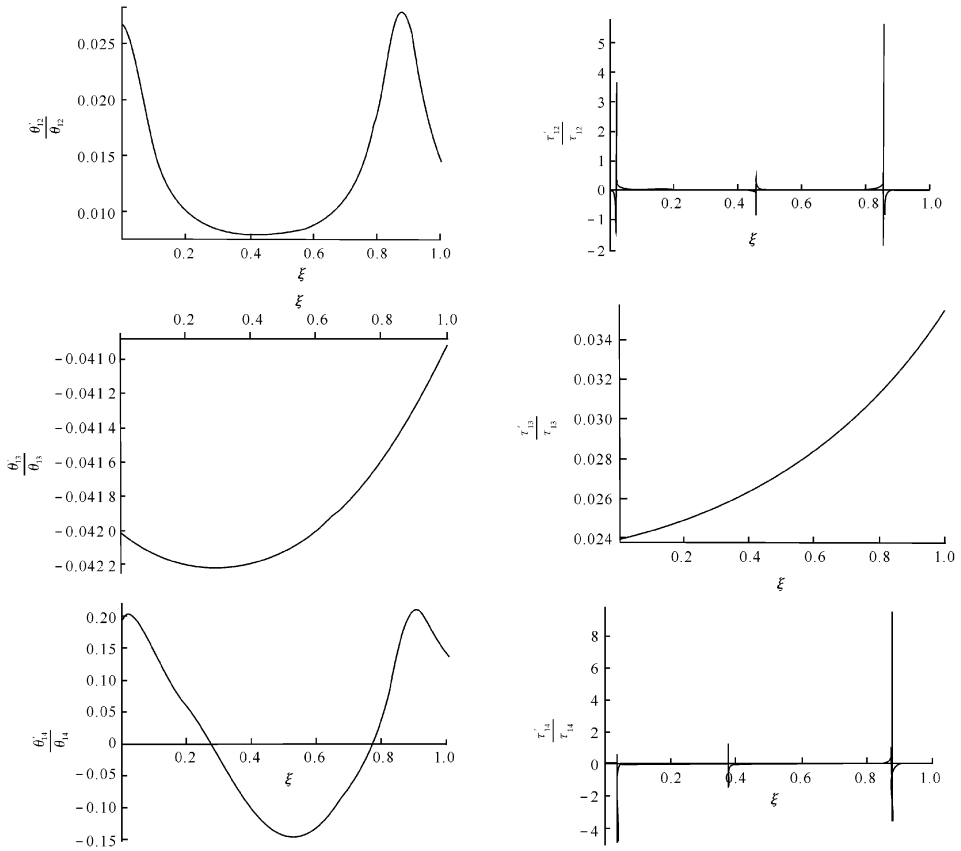

图3　粒子数脉动效应与其他耦合效应的比值随ξ变化曲线

Fig. 3　Curves of ratio of population pulsation effect to other coupling effects versus ξ

4　结束语

粒子数脉动效应是一种精细模耦合效应,不同激光模式间的拍频使增益介质中粒子数布居差产生调制,进而对模耦合产生影响。激光工作频率变化时,它和其他耦合效应作用效果基本一致,在某些频率范围(如$0.37<\xi<0.46$, $0.02<\xi<0.06$, $0.86<\xi<0.88$),数值上相当于其他耦合效应80%以上,这在激光陀螺的模耦合分析中不可忽略。

参考文献:

[1]　高伯龙,李树堂. 激光陀螺[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1984.

GAO Bo-long, LI Shu-tang. Laser gyro [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. (in Chinese)

[2]　姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京:清华大学出版社, 1985.

JIANG Ya-nan. Ring laser gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. (in Chinese)

[3]　吴国勇,顾启泰. 温度对四频激光陀螺零偏的影响[J]. 光学技术, 2002, 28(3): 198-200.

WU Guo-yong, GU Qi-tai. Temperature's effect on four frequency RLG bias[J]. Optical Technique,

2002,28(3):198-200. (in Chinese with an English abstract)

[4] 杨在富,袁晓东,张斌,等.四频差动激光陀螺中的s-p各向异性效应[J]. 光学学报,1998,18(9):1255-1260.
YANG Zai-fu, YUAN Xiao-dong, ZHANG Bin, et al. The S-P anisotropy effects in differential laser gyros [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(9): 1255-1260. (in Chinese with an English abstract)

[5] CHOW W W, HUTCHING T J, SANDERS V E, et al. Multi-oscillator laser gyro[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980,16(9):918-935.

[6] WATKINS L S, SMITH R C. Operation of a circularly polarized ring laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics,1971,7(2):59-62.

[7] O'BRYAN C L, SARGENT M. Theory of multimode laser operation[J]. Physics Review, 1973, 8(6):3071-3092.

[8] LEONEL N. MENEGOZZI W E, LAMB J R. Theory of a ring laser[J]. Physics Review A, 1973, 8(4):2103-2125.

[9] HANSON D R, SARGENT M. Theory of a Zeeman ring laser: General formalism[J]. Physics Review, 1974,9(1):466-480.

[10] 高伯龙. 四频差动激光陀螺中的第二类闭锁效应[J]. 国防科技大学学报,1982,4(1):37-57.
GAO Bo-long. The locking phenomenon of the second kind in differential laser gyro[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1982, 4(1):37-57. (in Chinese with an English abstract)

[11] LAMB W E, JR. Theory of an optical maser[J]. Physics Review, 1964,134(6A):1429-1450.

[12] 杨建强.四频环形激光器兰姆系数推导[J]. 激光技术,2008,32(4):383-386.
YANG Jian-qiang. Derivation of the lamb coefficients in four frequency ring laser[J]. Laser Technology, 2008,32(4):383-386. (in Chinese with an English abstract)