

大型激光陀螺仪的研究进展

翟二江^{1,2}, 郭文阁^{1,2}, 徐学东¹, 全秋叶¹, 张立松², 刘师彤^{1,2}, 魏明明^{1,2}

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国科学院国家授时中心时频基准实验室, 陕西 西安 710600)

摘要:基于 Sagnac 效应的大型激光陀螺仪是测量地球参数的核心设备。与小型的惯性导航陀螺仪相比,大型激光陀螺将转速测量的灵敏度和稳定性提高了 6 个数量级,性能提升使大型激光陀螺仪在地球物理、大地测量和地震学领域的全新应用成为可能。本文介绍的大型激光陀螺仪是目前用于研究地球参数(Earth Orientation Parameter, EOP)测量的重要技术手段,可直接通过测量地球自转旋转角速度解算世界时(Universal time 1, UT1)。相比较于国外大型激光陀螺仪的大量成功应用,国内还需要不断提高大型激光陀螺的研制应用水平,以满足高精度测量地球旋转角速度解算 UT1 的需求。

关键词:激光陀螺仪; UT1; Sagnac 效应; 传感器

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.003

Research progress of large laser gyroscope

ZHAI Er-jiang^{1,2}, GUO Wen-ge^{1,2}, XU Xue-dong¹, QUAN Qiu-ye¹, ZHAI Li-song²,
LIU Shi-tong^{1,2}, WEI Ming-ming^{1,2}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710600, China; 2. Quantum Frequency Standard Laboratory, National Time Service Centre; Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: The large laser gyroscope based on Sagnac effect is the core equipment for measuring earth parameters. Compared with the small inertial navigation gyro, the large laser gyro improves the sensitivity and stability of speed measurement by 6 orders of magnitude, and the performance improvement makes it possible for the new applications of the large laser gyro in the fields of geophysics, geodesy and seismology. The large laser gyroscope introduced in this paper is an important technical means to study the measurement of earth orientation parameters (EOP) at present. Compared with the large number of successful applications of large laser gyros abroad, the development and application level of large laser gyros in China still needs to be improved constantly to meet the demand of high precision measurement of earth rotation angular velocity and calculation of universal time (UT1).

Keywords: laser gyroscope; UT1; Sagnac effect; sensor

1 引言

大型激光陀螺仪是精确监测地球自转角度速度的传感器^[1]。相比于惯性导航的激光陀螺仪通常的面积小于 0.02 m², 对应的周长小于 0.3 m, 最佳灵敏度约为 5.7×10^{-7} rad/(s · Hz^{1/2}), 性能水平足以满足惯性导航要求, 但对大多数地球物理应用来说, 还差几个数量级。大型的光纤陀螺仪也可以作

为测量角速度的仪器, 美国的霍尼韦尔公司生产的光纤陀螺仪在恒温条件下, 利用闭锁控制技术, 使用光纤长度为 3 km 的光纤陀螺测量精度达到 1×10^{-9} rad/s, 在进行温度补偿可以达到 10^{-10} rad/s, 需要考虑温度梯度效应的影响, 使用环境苛刻, 同时测量精度也不足以满足超高精度测量的需求^[2]。由于标度因子和灵敏度随两束反向传播的激光束所包

基金项目: 超稳激光精密测量应用研究项目 (No. Y817R4101); 中国科学院国际合作计划国际杰出学者项目 (No. Y954HZ11) 资助。

作者简介: 翟二江 (1995 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子学。E-mail: 504256626@qq.com

通讯作者: 郭文阁 (1967 -), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子学。E-mail: wguo@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2020-07-18; **修订日期:** 2020-08-18

围的区域增加,优化标度因子是激光陀螺仪传感器进行改进的合理途径。事实证明,研究大型激光陀螺仪设计方案是可行的。

目前国内外研究用于测量地球参数的技术主要利用甚长基线干涉测量法(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、卫星定轨测距法、月球激光测距法、多普勒轨道法等空间大地测量技术对 EOP 进行监测^[3]。这些测量技术都与地球旋转轴没有直接联系,VLBI 技术通过构建模型与地球旋转轴相连,最终精度尚不清楚。大型激光陀螺仪安装在地球表面,是直接参照地球旋转轴的空间大地测量装置。大型激光陀螺仪的测量精度和稳定性能够测量地球旋转轴发生的微小变化量,目前国内外设计的大型激光陀螺仪光学腔的面积从 0.748 m² 到 367.5 m²,测量灵敏度从 7.2 × 10⁻¹⁰ rad/s 到 4.7 × 10⁻¹² rad/s^[4]。本文主要对国内外的大型激光陀螺仪发展和应用状况进行简要介绍,以及影响大型激光陀螺仪精度的原因和改进方法。

2 大型激光陀螺仪设计方案

2.1 基本原理

大型激光陀螺的基本工作原理是依托于 Sagnac 效应的^[5]。如图 1 所示,在闭合的光学环路中,将两束相向传播的光波从该环路中任意一点出发,各自环形一周。令闭合光路相对于惯性坐标系沿某一方向转动,则两束光会出现干涉现象。由于光速的不变性,两束光到达新的光源位置所用的时间不同。

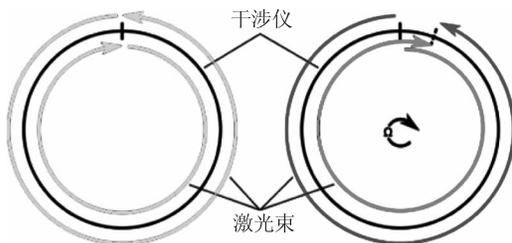


图 1 Sagnac 效应的基本原理

Fig. 1 Principle of Sagnac effect

光束在顺时针和逆时针方向传输所用的时间,同时可得时间差:

$$t_{\pm} = \frac{2\pi R}{c \pm \Omega R} \quad (1)$$

因为 $c^2 \ll (\Omega R)^2$, 故可以忽略 $(\Omega R)^2$ 的取值,得到(2)式:

$$\Delta t = \frac{4\pi\Omega R^2}{c^2 - (\Omega R)^2} \approx \frac{4\pi\Omega R^2}{c^2} \quad (2)$$

环形腔内存在频率不同的光波可以表示为 $f_{\pm} = \frac{N}{t_{\pm}}$, 环形腔的面积 $A = \pi R^2$, 周长 $P = 2\pi R$, 其频

差可以得到:

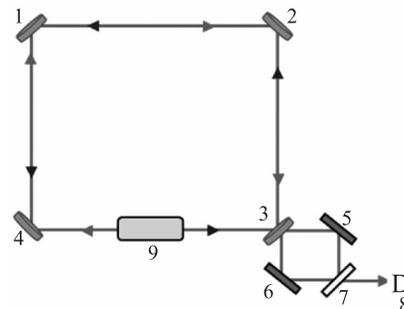
$$\begin{aligned} f_s &= N\left(\frac{1}{t_+} - \frac{1}{t_-}\right) \approx N\frac{\Delta t}{t^2} \\ &= N\frac{4\pi\Omega R^2}{c^2} \frac{c^2}{(2\pi R)^2} = N\frac{4A\Omega}{P^2} \end{aligned} \quad (3)$$

引入矢量方向后,可以考虑陀螺仪与角速度的不同方向 $\vec{A} \cdot \vec{\Omega} = A\Omega \cos\theta$

其中, $K = \frac{4A}{\lambda P}$ 为标度因数; $f_s = \frac{4\vec{A} \cdot \vec{\Omega}}{\lambda P}$ 对陀螺仪的灵敏度影响很大。

2.2 结构设计

根据大型激光陀螺仪的工作原理,目前主要设计的方案分为主动式和被动式大型激光陀螺仪^[6]。如图 2 所示,为主动式激光陀螺仪。主动式激光陀螺仪环形腔内部有增益介质,实质上是双向输出激光束的激光器,国际上采用波长为 633 nm 的 He-Ne 激光。采用四个不锈钢或者耐热玻璃制成的环形回路,四个角分别放置高反射镜,将激光束锁定在环形腔两个方向的共振模式上,最后探测输出信号。

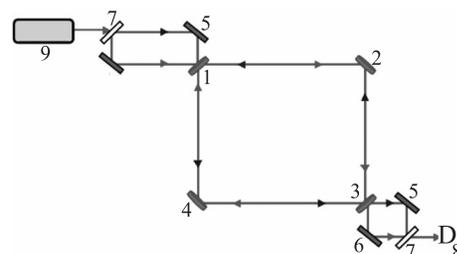


(1~4 反射镜,5~6 平面镜,7 强度分束器,8 光电探测器,9 激光增益)

图 2 主动式激光陀螺仪

Fig. 2 Active laser gyroscope

被动式陀螺仪环形腔内没有增益介质,由外部注入激光后分别锁定到环形腔传输的两个方向的共振模式上。如图 3 所示,为被动式激光陀螺仪。



(1~4 反射镜,5~6 平面镜,7 强度分束器,8 光电探测器,9 激光器)

图 3 被动式激光陀螺仪

Fig. 3 Passive laser gyroscope

主动式激光陀螺仪结构相对简单,在设计中可以避免高精度度光学腔模式以及激光反馈锁定等复杂问题,得到在具体实际应用中的设计,如在新西兰

设计建造的主动式大型激光陀螺仪 C-I、C-II、G0、UG-1、UG-2 和 UG-3 等。

但是当陀螺仪环形腔长达米量级以后,过窄的自由光谱区频率间隔远小于增益介质的增益宽带,导致激光模式出现干扰,为了避免模式干扰影响陀螺仪的测量精度,主动式大型激光陀螺仪适用于较低的光功率条件下。被动式大型激光陀螺仪不设计增益介质,可以运行在较强的光束状态下,对提升测量灵敏度的发展具有潜力,如 MIT-1977、MIT-1981、USAFA-1988、Caltech 均为被动式大型激光陀螺仪。

2.3 关键技术

2.3.1 高 Q 值 Sagnac 干涉仪

品质因数 Q 是环形腔最重要的指标之一,表示环形腔局域内部耦合光子能量的能力大小。在高 Q 值环形腔的耦合体系中,微小的谐振频差即可产生较大的可检测信号, Q 值影响着谐振腔的检测灵敏度。 Q 值的表达式为:

$$Q = w \frac{W}{P} = w \frac{W}{-dW/dt} = w\tau \quad (4)$$

其中, w 为环形腔的频率; W 是腔内存储的光能总量; P 为光子能力在单位时间内的损耗;用 dW/dt 来表示; τ 代表光子寿命,也就是环形腔内单个光子的存储时间,目前主要是从环形腔的材料、结构设计以及加工工艺上面提高环形腔的品质因数^[7]。

2.3.2 尺度因子的稳定

目前影响尺度因子稳定性的因素主要来源于多个方面,环形腔体的形变量、增益介质的波动等都会影响尺度因子的稳定性,在第 5 节提供具体的解决方案。

2.3.3 后向散射效应

散射光引起的模式间的耦合,主要干扰源来自反射镜的缺陷以及表面的微尘颗粒所影响。激光束产生散射现象,针对此次影响,在第 5 节中提供具体的处理方案。

3 大型激光陀螺仪的发展历程

20 世纪中期,国外已经开始研究大型激光陀螺 Sagnac 效应的应用范围,主要用于地球科学领域。

1993 年,德国慕尼黑大学 Schreiber 教授和新西兰的学者设计建造大型激光陀螺,用于测量地球潮汐、地轴倾斜角等。1998 年,在德国 Wettzell 天文观测站设计了一个大型激光陀螺仪—G-ring^[5],如图 4(a)所示 G-ring 大型激光陀螺仪的平面结构,环形腔的面积 16m^2 ,腔的品质因数 $Q = 3.5 \times 10^{12}$,测得地球自转灵敏度约 10^{-9} ,并且测量定日长 (Length

Of Day, LOD) 精度可以达到 0.13 ms 。

2005 年,在美国的 Southern California 建造的大型激光陀螺—GEOsensor^[9-10],如图 4(b)所示 GEOsensor 大型激光陀螺仪平面结构,尺寸规格为 $1.6 \times 1.6\text{m}^2$,测量灵敏度噪声 $1.08 \times 10^{-10} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$,主要用于监测地震引起的地球参数波动,并开展用于大地科学方面的研究。

2014 年,在意大利建造的大型激光陀螺仪—GP2^[8],如图 4(c)所示为 GP2 大型激光陀螺仪平面结构,环形腔的面积 2.56 m^2 ,不锈钢体结构,腔的品质因数 $Q = 4.6 \times 10^{11}$,测得拍频差 $\Delta f = 184 \text{ Hz}$,采用波长 633 nm 的 He-Ne 激光束。目前此陀螺处于调试转态,后期将应用在地球科学领域。

2014 年,意大利的研究团队设计了建造大型激光陀螺仪—GINGERino^[9],如图 4(e)GINGERino 大型激光陀螺仪模型结构,腔体为正四面体结构,环形腔的面积 12.96 m^2 ,在 400 s 的积分时间下精度可达 $3.2 \times 10^{-11} \text{ rad/s}$ 。在 2017 年,自动运行情况下,经过持续采集数天的测量数据,得到地震宽带的功率谱密度为 $10^{-10} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$,最大分辨率为 $3 \times 10^{-11} \text{ rad/s}$ 。该陀螺仪的优点是可以同时在不同方向上测量到地球自转角速度的分量,从而可以综合不同方向上的分量测量结果最终得出地球自转角速度矢量的变化。

2019 年,华中科技大学开展了大型激光陀螺仪的研究,设计 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 大型激光陀螺仪原样机^[10],如图 4(d)所示为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的大型激光陀螺仪平台搭建。该激光陀螺经过不断的调试完善,目前仪器的测量灵敏度噪声已降低至 $2.9 \times 10^{-9} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$,并在 2000 s 累计积分下,精度可达到了 $2.9 \times 10^{-9} \text{ rad/s}$ 。当前该激光陀螺仪主要用于开展地球物理效应探测等研究工作。

目前世界上设计的大型激光陀螺仪情况如表 1 所示。



(a) G-ring大型激光陀螺仪的平面结构

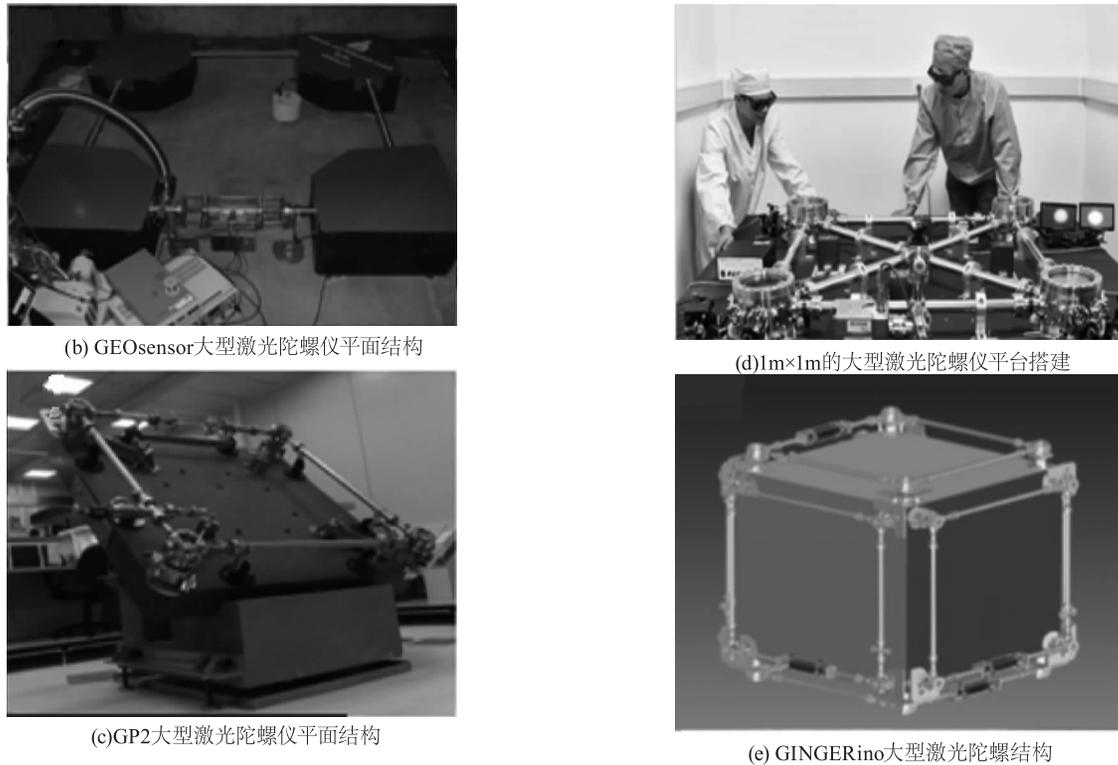


图 4 各种大型激光陀螺仪

Fig. 4 Kinds of large laser gyroscopes

表 1 世界各国大型激光陀螺仪

Tab. 1 Large laser gyroscopes around the world

名称	所在地	时间	面积/m ²	周长/m	差频/Hz	$\Omega_s / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2})$
C - I ^[1]	新西兰	1989	0.748	3.84	76.12	7.8×10^{-8}
C - II ^[1]	新西兰	1997	1	4	79.4	1.46×10^{-10}
G - 0 ^[3]	新西兰	1997	12.25	14	288.6	1.16×10^{-10}
G ^[3]	德国	2001	16	18.75	348.632	1.2×10^{-11}
G-ring	德国	2001	16	16	—	3×10^{-9}
UG - 1	新西兰	2000	367.5	77	1512.85	1.71×10^{-11}
GEOsensor	美国	2005	2.56	6.4	102.6	1.08×10^{-10}
UG - 2 ^[8]	新西兰	2005	834	121.4	2180	7.8×10^{-12}
G-pisa	意大利	2008	1.96	5.4	111	1.5×10^{-9}
GINGERino ^[9]	意大利	2014	280.4	12.96	280.4	1×10^{-10}
ROMY	德国	2017	72	36	—	3×10^{-11}
PRG ^[10]	中国	2019	1	4	100	2×10^{-9}

4 大型激光陀螺仪在测量地球参数 (EOP) 中的应用

大型激光陀螺仪通过测量地球自转产生的 Sagnac 效应,然后经过对陀螺仪测量的输出信号进行解调,即可解算出地球自转瞬时速度。利用光学陀螺仪精确测量地球自转目前已经广泛应用于地球固体潮观测、旋转地震波探测、引力磁效应等科学研究领域。

目前德国在 Wettzel 天文观测站设计建造的 4 m × 4 m 的大型激光陀螺仪—G-ring^[11],在现阶段属于稳定性最好的大型激光陀螺仪,角速度测量精

度达到 2×10^{-13} rad/s,经过解算后得到 UT1 的测量精度可以进入 0.1 ms/day 的范围。

在意大利中部的萨索国际地下实验室设计的大型激光陀螺仪—GINGERino^[12],在无人值守的情况下,连续采集数天的测量数据,得到地震带宽的功率谱密度为 10^{-10} rad/(s · Hz^{1/2}),最大分辨率为 3×10^{-11} rad/s,可分析地球转动信号和平移信号之间的相关性。

5 面临的问题以及解决办法

大型激光陀螺仪环形腔增大必然会带来一些问

题。环形腔体的几何形变对尺度因子的影响,环形腔受到外界因素(温度、应力)的影响,导致腔体出现不同程度的非线性形变。目前工程上的解决办法是控制环形腔对角线法,进而监测腔体的几何形变。在环形腔的对角线上设计 FP 谐振腔,通过检测谐振腔内光信号的频率差来判断对角线长度是否发生变化。当对角线长度发生改变时,可根据检测到的变化信号计算对角线变化的准确长度,进而判断环形腔的变化情况,从而对陀螺仪的几何形状进行调整,以稳定标度因数。

除此以外优化几何形变对尺度因子的影响常用的方法有三类:

(1) 科学设计结构、建立最优的外形结构并合理地使用热膨胀变化量少的材料,减少温度对灵敏度的影响。例如微晶玻璃和非洲花岗岩等。

(2) 通过理论模型以及实验验证分析,建立大型激光陀螺的静态温度补偿模型,进行优化补偿。

(3) 控制陀螺仪的使用环境,使陀螺仪工作在外界因素影响不明显或者无人干扰的环境中。

在理想情况下,腔内反向传播的光束是绝对独立的。由于腔镜的缺陷产生后向散射,从而导致两束光之间存在耦合,采用校正的方法也是针对高反射镜开展。

通常抑制后向散射效应对激光光束影响的常用方法有以下几种:

(1) 从工艺上考虑,采用超高反射率(99.999%)的反射镜。

(2) 采用离子束溅射(IBM)技术对反射镜进行镀膜,其中涂的高反射介质膜沉积在超抛光衬底(熔融石英)上,大幅度提高了反射能力。IBM 技术沉积工艺制备的镜面涂层附着力好,杂质少,吸收损失小。IBM 技术已成为生产高精度光学测量所需的高反射镜的涂层方法。

(3) 从操作上考虑,采用工作波长更长的激光束。理论上,当瑞利散射和激光波长存在一定相关性的条件下,后向散射振幅将大大降低。在较长波长的大型环形激光陀螺仪中,可以预期改善大型激光陀螺仪测量精度的性能。

6 总 结

目前大型激光陀螺仪成功的应用于测量 EOP,成为实现高精度测量 UTI 的重要技术手段。近几年,国内积极开展大量研究工作在光学陀螺仪的理论及应用方面,并取得很好的成果,但是满足高精度

的应用于地球科学需要加大应用研究的力度和深度。虽然到目前为止,优化几何形变、抑制后向散射效应,为提高灵敏度带来了可能性。随着科学技术的发展,大型激光陀螺仪需要进一步提高应用研究水平,以满足高精度测量地球角速度、日长变化以及月地间测量等方面涉及更多的应用。

参考文献:

- [1] Virgilio A D, Beverini N, Carelli G, et al. Analysis of ring laser gyroscopes including laser dynamics [J]. *European Physical Journal C*, 2019, 79(7): 1-8.
- [2] Liu Z, Wang L, Li K, et al. A calibration method for the errors of ring laser gyro in rate-biased mode [J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4754-4769.
- [3] 王惜康, 高玉平, 孙中苗. 用于测量世界时的大型光纤陀螺仪的噪声分析 [J]. *天文学报*, 2019, 60(6): 19-27.
- [4] Schreiber K U, Wells J P R. Invited review article: large ring lasers for rotation sensing [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4): 87-281.
- [5] Sridhar G, Agarwalla S K, Singh S, et al. Cavity ring-down technique for measurement of reflectivity of high reflectivity mirrors with high accuracy [J]. *Pramana*, 2010, 75(6): 1233-1239.
- [6] Schreiber K U, Gebauer A, Wells J P R. Closed-loop locking of an optical frequency comb to a large ring laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18): 3574-3577.
- [7] 晋玉剑, 薛晨阳, 丑修建, 等. 高 Q 值环形波导微谐振腔研究进展 [J]. *材料导报*, 2011, 25(13): 65-69.
- [8] Belfi J, Beverini N, Cuccato D, et al. Interferometric length metrology for the dimensional control of ultra-stable ring laser gyroscopes [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2014, 31(22).
- [9] Belfi J, Beverini N, Bosi F, et al. Deep underground rotation measurements: GINGERino ring laser gyroscope in Gran Sasso [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(3): 034502-034508.
- [10] Liu K, Zhang F L, Li Z, et al. Large-scale passive laser gyroscope for earth rotation sensing [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2732-2735.
- [11] Belfi J, Beverini N, Bosi F, et al. First results of GINGERino, a deep underground ringlaser [J]. *arXiv: Instrumentation and Detectors*, 2016, 29(3): 1-20.
- [12] Stefani F, Belfi J, Maccioni E, et al. A heterodyne frequency-stabilization method for large ring laser gyroscopes with Sub-nW output power [C]// *International frequency control symposium*, 2013: 799-801.