

# 谐振腔式光纤陀螺性能分析及各项参数的确定

孙 黎

(航天工业部第二研究院)

邓 飞 帆

(国防科技大学)

**提要:** 本文导出了谐振腔式光纤陀螺的最佳长度解析表达式, 考虑到受激布里渊散射, 讨论了这种陀螺的极限灵敏度、耦合系数的确定及对接头损耗的要求。

## Function analysis and parameters determination of resonator type fiber-gyroscopes

Sun Li

(2nd Research Institute of Spaceflight Ministry)

Deng Feifan

(University of Defense Technology)

**Abstract:** An analytical formula for calculating optimum length of the resonator type fiber-gyroscopes has been deduced. After considering the stimulated Brillouin scattering, the sensitivity limit of the fiber-gyroscopes, the determination of the coupling coefficient and the demanded splice loss are discussed.

### 一、引 言

光陀螺的研究正在从有源向无源发展, 无源光陀螺一般都用光学纤维来实现。光纤陀螺可分为两类。一类称为干涉仪式的, 它是用多圈光纤形成一个 Sagnac 干涉仪, 通过测量干涉条纹的移动, 可以求得相对于惯性

空间的转速。对于这种干涉仪式的陀螺, 近几年已经有了许多深入的研究<sup>[1~3]</sup>。另一类可称之为谐振腔式的光纤陀螺, 是用多圈光纤组成一个闭合的谐振腔(见图1), 激光通过耦合器  $C_1$  由两个方向进入谐振腔, 激起顺、逆两个方向的振动。这顺、逆两个方向的振动又通过  $C_2$  耦合出去, 分别由光电元件

收稿日期: 1983年10月31日。

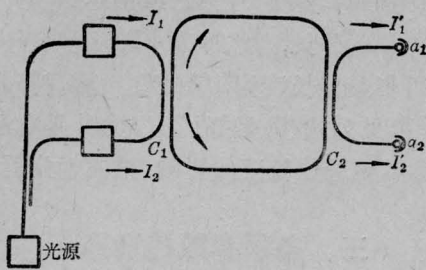


图 1

$\alpha_1$  和  $\alpha_2$  进行探测<sup>[4]</sup>。由 Sagnac 效应可以证明, 顺、逆两个方向的光纤谐振频率之差  $\Delta f$  由下式决定<sup>[9]</sup>:

$$\Delta f = \frac{4A}{\lambda \langle p \rangle} \Omega \quad (1)$$

式中  $A$  是一圈光纤所围的面积,  $\langle p \rangle$  是该面积的周长所相当的光程,  $\lambda$  是光在真空中的波长,  $\Omega$  是相对于惯性系的角速度。通常的做法是使耦合进来的光频率跟踪谐振腔的谐振频率, 然后测量输入光的频差, 就可以由 (1) 式算出  $\Omega$  来。这种类型的光纤陀螺目前研究得尚不充分。

D. Shupe 在 1981 年的文章<sup>[4]</sup> 中, 对谐振腔式的光纤陀螺作了分析, 认为它的精度和干涉式的光纤陀螺差不多。但由于它的精度不直接依赖于光纤的匝数(见公式(1)), 因此, 在接头损耗和耦合器损耗充分小的情况下, 可以采用较短的光纤来实现, 甚至只用一匝光纤, 从而可以大大消除温度引起的零漂。本文对谐振腔式光纤陀螺进行了分析, 指出最灵敏条件下的光纤长度不应该是一匝, 并提出了设计这种陀螺时各种损耗耦合系数的指标以及测  $\Omega$  可以达到的精度。

## 二、最佳光纤长度

为简单起见, 设谐振腔是完全对称的。这意味着耦合器  $C_1$  和  $C_2$  完全相同, 耦合系数皆为  $C$ , 透过系数为  $T$  (略去损耗则  $T+C=1$ )。  $C_1$  和  $C_2$  之间的两段光纤完全一样, 光纤的损耗系数为  $\alpha_T$ , 接头损耗和耦合器损耗

可算在一起, 用  $\alpha_{sc}$  表示。它平均分配在两段光纤中, 按照法布里-珀洛腔的一般方法, 可得此谐振腔的透过率公式<sup>[10]</sup>:

$$\frac{P_o}{P_i} = \frac{G}{1 + F \sin^2 \delta / 2} \quad (2)$$

其中  $P_i$  是由一端输入到耦合器  $C_1$  的光功率 (譬如图 1 中的  $I_1$ ),  $P_o$  是由  $C_2$  的一端输出的功率 (譬如图 1 中的  $I'_1$ )。  $\delta$  是与整个光纤回路的光程  $\langle L \rangle$  有关的位相差, 若用  $\nu_q$  表示谐振腔第  $q$  个谐振频率,  $\nu$  表示输入激光的频率,  $c_0$  为真空中光速, 则:

$$\delta = \frac{2\pi \langle L \rangle}{c_0} (\nu - \nu_q) \quad (3)$$

(2) 式中  $G$  为最大透过率, 它由下式决定:

$$G = \frac{C^2 \exp(-\alpha)}{[1 - T \exp(-\alpha)]^2} \quad (4)$$

$F$  常称为精细度, 由下式决定:

$$F = \frac{4T \exp(-\alpha)}{[1 - T \exp(-\alpha)]^2} \quad (5)$$

(4)、(5) 两式中的  $\alpha$  是光纤总损耗的一半, 即:

$$\alpha = \frac{1}{2} (\alpha_T L + \alpha_{sc}) \quad (6)$$

由 (2) 式可以作出透过率与输入光频  $\nu$  的关系曲线, 见图 2。显然,  $F$  越大, 透过率曲线峰就愈窄。光陀螺总是在峰尽可能窄的条件下工作, 只有这样, 频率跟踪才能愈精确, 故实际的  $F$  总是  $\gg 1$ 。本文就在这一条件下进行下面的讨论。

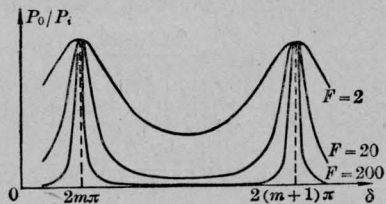


图 2

频率跟踪可有各种方法, 但原理上都是用调制的方法使光频和腔频之间相对移动, 检测其输出信号, 反馈回去使光频与腔频对准。为使调制得到最好的效果, 自然应使调制信号落在透过峰曲线斜率最大处。通过计

算,可知最大斜率处的透过率为:

$$\frac{P_o}{P_i} = \frac{2}{3} G \quad (7)$$

斜率最大值  $K_{\max}$  为:

$$K_{\max} = \frac{4\sqrt{2}\pi\langle L \rangle}{9c_0} G\sqrt{F}$$

式中  $c_0$  为真空中光速。按散粒噪声电流  $i_n$  与探测平均电流  $\bar{I}$  的关系<sup>[11]</sup>:

$$i_n = \sqrt{2eBI}$$

式中  $e$  为电子的电量,  $B$  为探测线路的带宽。电流与光功率的关系:

$$i = \frac{e\eta}{h\nu} P$$

式中  $\eta$  为探测器的量子效率,  $h$  为普朗克常数, 可得相应的噪声功率关系:

$$P_n = \sqrt{\frac{4Bh\nu G}{3\eta}} P_i$$

这个噪声功率相应的频率差  $\delta\nu$  应为:

$$\delta\nu = \frac{P_n/P_i}{K_{\max}}$$

考虑到顺、逆两个方向的光的频差应以误差规律迭加, 即乘上  $\sqrt{2}$ , 得到角速度灵敏度公式:

$$\delta\Omega = \frac{9c_0\lambda\langle p \rangle}{16\pi A} \sqrt{\frac{4Bh\nu}{3\eta P_i}} \frac{1}{\langle L \rangle \sqrt{GF}} \quad (8)$$

为得到最佳光纤长度, 可由上式对  $L$  求极值。考虑到  $F \gg 1$  的条件, 采用指数的近似展开, 最后得到最佳光纤长度的解析式:

$$L_{\text{最佳}} = \frac{2C + \alpha_{sc}}{\alpha_T} \quad (9)$$

在最佳长度条件下, 能测出的最小角速度为:

$$\delta\Omega_{\min} = M \frac{2C + \alpha_{sc}}{2C} \alpha_T \quad (10)$$

其中  $M$  代表下列一大堆数:

$$M = \frac{9c_0\lambda\langle p \rangle}{16\pi A} \left[ \frac{4Bh\nu}{3\eta P_i} \right]^{1/2}$$

D. Shupe 在他的文章<sup>[4]</sup>中曾用计算机描曲线的办法找出在  $\alpha_T$ 、 $\alpha_{sc}$  确定的情况下, 最佳光纤长度为 1600 米, 相应的  $C$  应取 0.3。按本文的公式 (9), 将 D. Shupe 的数

值代入 ( $\alpha_T = 2$  分贝/千米,  $\alpha_{sc} = 0.7$  分贝,  $C = 0.3 = 1.3$  分贝, 此时  $F \approx 5$ , 近似程度稍差), 可得最佳长度为 1650 米。两者符合得很好, 可见公式 (9) 是好用的, 尤其是它示出了各参数对最佳长度的影响, 更便于分析。

### 三、各项参数的选择

从 (9) 式看, 要降低光纤长度, 应使耦合系数  $C$  和损耗尽量地小。加大  $\alpha_T$  虽然也能使最佳长度减小, 但这样会增大  $\delta\Omega_{\min}$  (见 (10) 式), 因而不可取的。

$C$  是不是越小越好呢?  $\alpha_{sc}$  是否也要无限地追求低数值呢?

$C$  是腔与外界的耦合系数,  $C$  越小, 腔内与腔外的光功率比就越大, 当输出光功率一定时, 腔内振荡就越强。由  $C$  的定义可知, 腔内功率  $P_o$  与输出功率  $P_o$  间有下列关系:

$$P_o = \frac{1}{C} P_o$$

在最佳条件下,  $P_o$  大体上就等于输入功率  $P_i$  的一半 (另一半在腔内损耗了), 因此有:

$$P_o \approx \frac{1}{2C} P_i$$

这说明在一定的输入功率情况下,  $C$  越小, 腔内功率  $P_o$  就越大。由于光纤是很细的,  $P_o$  的增大很快就使得纤维内的场强变得很大, 根据分析<sup>[5]</sup>, 纤维中首先会出现受激布里渊散射。一旦出现受激散射, 光纤的损耗就急剧增加, 而且是不稳定的。因此, 受激布里渊散射的阈值限制了  $P_o$ , 因而也就限制了  $C$  值。按一般估计, 令  $P_o < 10$  毫瓦是大体合理的<sup>[5, 6]</sup>, 若  $P_i = 1$  毫瓦, 则  $C$  应是 0.05 的数量级, 比这个数小很多的  $C$  值是不允许的。降低  $P_i$  来使  $C$  值增大, 直接影响探测器的信噪比, 显然也是不可取的。

$C$  值大体确定之后,  $\alpha_{sc}$  的指标也就可以定了。因为在 (9) 式和 (10) 式中  $2C$  和  $\alpha_{sc}$  是相加的关系, 故只要  $\alpha_{sc}$  明显地小于  $2C$ , 再减小  $\alpha_{sc}$  是无意义的。因此在工艺上对  $\alpha_{sc}$  的



追求,如能达到 0.02 以下,也就可以了。

$C$  和  $\alpha_{sc}$  确定之后,根据现有光纤损耗率  $\alpha_T \approx 1$  分贝/千米  $\approx 0.05$ /千米,可以算出最佳光纤长度:

$$L_{最佳} = \frac{2C + \alpha_{sc}}{\alpha_T} = 200 \sim 400 \text{ 米}$$

上面的两个数分别对应于  $\alpha_{sc} \ll 2C$  和  $\alpha_{sc} \approx 2C$  的情形。由此可见,考虑到受激散射的限制,无论怎样改善光纤耦合器和接头损耗,光纤的最佳长度也长达 200 米以上而不是 0.5 米(相当于一匝)。Shupe 及其他一些作者,没有考虑到光纤很短以及损耗很小时,腔内功率会高到引起强烈的受激布里渊散射,因此得出光纤可以无限缩短的结论,这显然是不恰当的。

在上述的最佳条件下,可以求得散粒噪声限制的灵敏度。为此,可取  $P_i = 1$  毫瓦,得:

$$\frac{\delta\Omega_{min}}{\sqrt{B}} \approx \frac{1}{60} \times 10^{-3} \text{ 度}/\sqrt{\text{小时}}$$

若取样时间定为 1 分钟,则相应的带宽可取

$$B = 1/60 \text{ 赫, 算得:}$$

$$\delta\Omega_{min} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ 度/小时}$$

这个数字,比姜亚南等人的文章<sup>[7]</sup>估计的数字要低得多。顺便指出,他们在那里用  $B = 1$  赫来估计精度如此高的角速度是不合理的,因为在这种情况下,频率差远小于 1 赫,取样时间必须足够长才能测得这样低的频率差。

还可以求出在上述最佳长度情况下透过率曲线的带宽  $\Gamma \approx 1.6 \times 10^4$  赫。这个值对入射光源的带宽提出了要求,即入射激光源的带宽至少应明显地小于这个值,才不致降低前面分析所得到的灵敏度。

#### 四、目前存在的问题

由上面的分析可见,谐振腔式光纤陀螺,是能够达到实用所要求的精度的,关键似乎在耦合器和接头的损耗,目前这两项损耗大

约是 0.4 分贝。如果能降到 0.1 分贝,则相应的  $\alpha_{sc} = 0.23 \times 0.1 = 0.023$ ,就可以满足本文所提出的设计要求了。当然,耦合系数小 ( $C = 0.05$ ) 而且很稳定的耦合器,还要做一定的努力才能达到。此外,还存在下列问题。

首先是偏振问题。在单模光纤中可以存在两个正交的偏振模。由于不可避免的双折射效应,这两个偏振模的波速有极细微的差别,导致两偏振模谐振频率不同,而且,这种双折射是随环境条件变化而随机变化的。这就造成频率跟踪的不确定性,带来了不可容忍的误差。因此必须采用单模单偏振光纤。

严重的问题是顺、逆光强不等造成的零漂。S. Ezekiel 等人的文章<sup>[8]</sup>已指出顺、逆两光强度差 1 微瓦,由于非线性光学效应造成的零漂每 100 米光纤将高达 0.1 度/小时。光纤谐振腔中的光功率是 10 毫瓦量级,要保持两路光强差远低于 1 微瓦是困难的,这也许就是谐振腔式光纤陀螺致命的弱点(干涉仪式的光纤陀螺中,光强往往在 0.1 毫瓦以下)。产生光强差的原因很多,耦合器的不稳定、两路损耗不对称等都是。因此必须采取强有力的措施,甚至必要时牺牲最佳条件,缩短光纤长度以降低光强差的影响。

#### 参 考 文 献

- [1] V. Vali, R. W. Shorthill; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, 1099.
- [2] R. A. Bergh *et al.*; *Optical Society of America* 1981, **6**, 502.
- [3] J. L. Davis, S. Ezekiel; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, 505.
- [4] D. M. Shupe; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, 286.
- [5] Shih-Chun Lin *et al.*; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, 915.
- [6] A. Yariv; *Quantum Electronics*, John Wiley & Sons, Inc., 1975, p. 497.
- [7] 姜亚南等;《激光》,1981, **8**, No. 9, 34.
- [8] S. Ezekiel *et al.*; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 9.
- [9] A. H. Rosenthal; *JOSA*, 1962, **52**, 1143.
- [10] M. 波恩, E. 沃耳夫著; *光学原理*, 429 页。
- [11] A. Yariv; *Introduction to Optical Electronics*, New York Holt, 1971, p. 281.