

文章编号 1004-924X(2008)10-1836-05

新型棱镜型双通道光纤旋转连接器的设计

徐峰¹, 张瑞珏¹, 汪光骥¹, 王璐², 赵克俊², 余雷², 张静¹, 俞本立¹

(1. 安徽大学 光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽合肥 230039;

2. 华东电子工程研究所第38研究所, 安徽合肥 230039)

摘要:分析了棱镜型多通道光纤旋转连接器的结构和原理以及解旋转机制, 并由此设计了一种新型的应用方双柱面解旋转棱镜结构的双通道光纤旋转连接器, 该方双柱面棱镜是一种解旋转棱镜, 棱镜两侧界面为对称柱面, 这样的结构可使从一侧入射的光线经折射到达另一侧柱面对称位置后平行射出, 从而实现解旋转。分析了新型结构的光纤旋转连接器的耦合特性, 结果表明, 其损耗主要由机械误差和解旋转棱镜球差所产生。数值模拟结果表明, 该结构的光纤旋转连接器的插入损耗 <2.0 dB, 这一性能完全能满足雷达等相关军事装备对双通道光纤旋转连接器的应用要求。

关键词: 旋转连接器; 解旋转棱镜; 自聚焦透镜; 准直系统

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Design of novel dual-channel optical rotary joint by using de-rotating prism

XU Feng¹, ZHANG Rui-jue¹, WANG Guang-qi¹, WANG Lu²,
ZHAO Ke-jun², YU Lei², ZHANG Jing¹, YU Ben-li¹

(1. *Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and Manipulation, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China;*

2. *The No. 38 Institute of China Electronic Technology Corporation, Hefei 230039, China*)

Abstract: After analyzing the principle of a de-rotating prism for dual-channel fiber optical rotary joint, a novel dual-channel optical rotary joint using square-cylinder de-rotating prism was proposed. The analysis results for coupling characteristic of this optical rotary joint indicate that its insert loss mainly comes from the mechanical inaccuracy and the spherical aberration of de-rotating prism. The insert loss is lower than 2.0 dB according to the results of numerical simulation, which meets the requirement for military equipment such as radar system, and has widespread application prospect.

Key words: rotary joint; de-rotating prism; Gradient-index (GRIN) lens; collimating system

收稿日期: 2008-01-22; 修订日期: 2008-03-21.

基金项目: 安徽省科技攻关项目(No. 06012067B); 安徽省高等学校青年教师科研“资助计划”项目(No. 05010209)

1 引 言

光纤旋转连接器是实现旋转平台与平台之间数据传输的核心器件,广泛应用于雷达天线、导航等系统。常见的光纤旋转连接器分为单通道光纤旋转连接器 and 多通道光纤旋转连接器。单通道光纤旋转连接器具有结构简单、体积小、直接光耦合等特点而应用广泛,但可靠性低和传输容量小限制了它的某些应用。如:对可靠性和传输容量要求高的雷达等军事装备迫切需要多通道光纤旋转连接器来满足其应用要求。

多通道光旋转连接器设计方案常见有两种:一种是将单通道旋转连接器与波分复用技术相结合的波分复用(Wave Division Multiplexer, WDM)型多通道光纤旋转连接器^[1],另一种是利用解旋转结构设计的多通道光纤旋转连接器。本文在分析多通道解旋转棱镜的工作原理基础上,提出了一种基于方双柱面解旋转棱镜双通道旋转连接器的设计方案。

2 解旋转棱镜原理

解旋转棱镜是实现多通道旋转连接器的一种常用方案,其内部结构一般是利用各种解旋转棱镜的解旋转原理来实现多路光信号的同时传输,其中典型的解旋转棱镜如 DOVE 棱镜。

2.1 DOVE 解旋转棱镜结构^[2-4]

DOVE 棱镜结构如图 1 所示,入射平行光束 X 和 Y 入射到棱镜后,分别在棱镜中经过两次折射和一次反射后从 X₁ 和 Y₁ 射出,在 X₁ 和 Y₁ 处的接收光纤即可接收从 X 和 Y 出射的光。当入射光束 X 和 Y 以 DOVE 棱镜的中心轴旋转,同时棱镜以入射光束一半的转速同轴同向转动时,即可实现在固定位置 X₁ 和 Y₁ 处不间断地接收

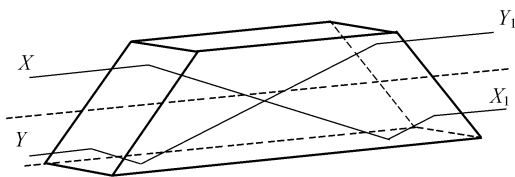


图 1 DOVE 棱镜结构

Fig.1 Structure of DOVE prism

到旋转入射光束 X 和 Y 发出的光,因而可实现多路光信号的旋转传输。

2.2 棱镜解旋转证明

棱镜解旋转结构的共同特点是让平行入射的光束经过几次折射和反射,出射点位于另一侧相对与中轴面(经过中轴线与底面平行的平面)对称的位置。当棱镜和旋转端转速满足 1:2 关系时,光束出射位置稳定。

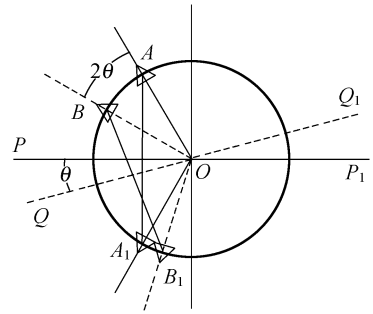


图 2 解旋转棱镜原理图

Fig.2 Principle illustration of de-rotating prism

如图 2 所示,PP₁ 为未旋转的棱镜中轴面,位置 A、A₁ 分别表示入射光束未旋转时的旋转端和静止端的位置,当旋转端旋转了 2θ 角时,A 旋转到了 B 的位置,同时解旋转棱镜旋转了 θ 角,中轴面也旋转了 θ 角,此时中轴面用 QQ₁ 表示,这时设光线出射位置为 B₁,出射位置 A₁ 和 B₁ 位置相同,证明如下:

已知 ∠POA₁ = ∠POA, ∠QOB = ∠QOB₁ (棱镜性质决定), ∠AOB = 2θ, ∠POQ = θ, ∠QOA₁ = ∠POA₁ - θ,

由解旋转性质可得:

$$\begin{aligned} \angle QOB_1 &= \angle QOB = \angle QOP + \angle POB = \\ &= \angle QOP + (\angle POA - \theta + (\angle POA_1 - 2\theta)) = \\ &= \angle POA_1 - \theta = \angle QOA_1 \end{aligned}$$

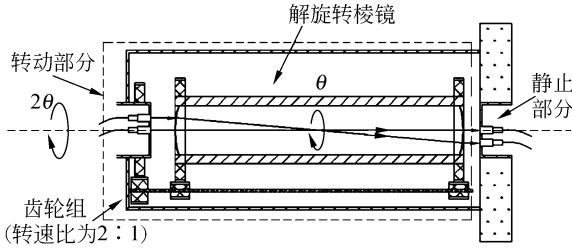
所以,∠QOA₁ = ∠QOB₁。

A₁ 点和 B₁ 点重合,说明在旋转端旋转的情况下,静止端仍能持续不断地接收光信号,由此证明了经过解旋转棱镜的解旋转仍然能够实现光的旋转传输。

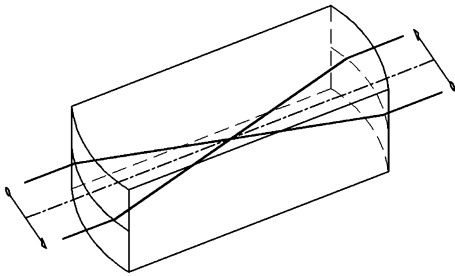
3 方双柱面棱镜光纤旋转连接器结构设计

根据上述的解旋转原理,本文提出了一种采

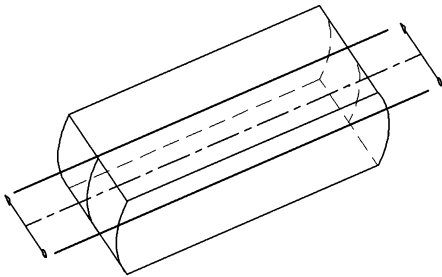
用方双柱面解旋转棱镜的双通道光纤旋转连接器结构。其结构如下图 3(a)所示,图中转动部分装配了两根 GRIN 准直光纤;静止部分也同样装配了两根 GRIN 准直光纤^[7];在旋转过程中保持转动部分与解旋转棱镜的转速比为 2:1。



(a)结构示意图
(a)Diagram of structure



(b)光路图 1
(b)Optical path 1



(c)光路图 2
(c)Optical path 2

图 3 方双柱面解旋转双通道旋转连接器结构
Fig.3 Structure of optical rotary joint using square-cylinder de-rotating prism

图 3(b)和(c)是方双柱面棱镜解旋过程示意图,棱镜两侧边界面为对称柱面,两边柱面焦平面都位于棱镜中心切面,这样的结构可使从一侧入射的光线经折射到达另一侧柱面的对称位置然后平行射出,符合解旋转棱镜的解旋原理。为减

小侧面反射光,可在其表面镀反反射膜^[5-6]。

假设光束由左侧界面入射,左侧为旋转端,右侧为静止端,图 3(b)为转动部分和棱镜都没有旋转时,由三角形和圆形处的光束入射经过棱镜后分别出射到右侧相应的位置。当入射光束旋转 180°,如图 3(c)所示,同时解旋转棱镜同轴同向旋转 90°,输出光束位置不变。因此,上述方双柱面解旋转棱镜结构的光路可实现光束的解旋转。

4 方双柱面棱镜光纤旋转连接器的耦合理论分析

图 4 为利用双方柱面解旋转棱镜设计的双通道光旋转连接器结构示意图,在方双柱面棱镜两端分别用 GRIN 透镜对准,其中一对 GRIN 透镜的光路为直接通过中心轴,另一对透镜离轴高度为 h 。本文详细分析 GRIN 透镜的耦合损耗及解旋转棱镜对耦合损耗所产生的附加影响。

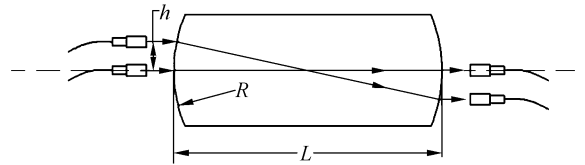


图 4 双通道光旋转连接器结构侧视图
Fig.4 Side view of multi-channel optical rotary joint

4.1 GRIN 透镜之间的耦合损耗分析

根据光纤耦合理论可知,GRIN 透镜耦合损耗主要包括三类:横向错位、角度偏差和端面间隙^[7-9]。

4.1.1 GRIN 透镜横向错位产生的损耗^[8-9]

当传播模场近似为高斯分布时,横向错位 X_0 的光纤间耦合损耗 L_1 为:

$$L_1 = 4.343 \cdot \left(\frac{X_0}{\omega_1} \right)^2, \quad (1)$$

式中, ω_1 为高斯光束经过 GRIN 透镜扩束后的光斑直径^[8],它可由下式计算得到:

$$\omega_1 = \frac{\lambda}{\pi n_0 \sqrt{A\omega_0}}, \quad (2)$$

式中, n_0 是 GRIN 透镜的中心折射率, \sqrt{A} 是 GRIN 透镜的聚焦参数,普通单模光纤的高斯光束的束斑直径 ω_0 约为 $5.25 \mu\text{m}$ 。

4.1.2 GRIN 透镜角度偏差产生的损耗^[9]

当两光纤端面夹角为 θ 时,角度偏差引起的损耗 L_2 为:

$$L_2 = 4.343 \cdot \left(\frac{\tan \theta}{n_0 \sqrt{A}\omega_0} \right)^2, \quad (3)$$

4.1.3 GRIN 透镜横向间隙产生的损耗^[9]

两 GRIN 透镜之间的横向间隙为 z 时,其耦合损耗 L_3 为:

$$L_3 = 4.343 \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{2\pi n \omega_1^2} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中, n 为空气间隙的折射率。

通过计算可知,3 种机械误差所引起的损耗主要是由横向错位和角度偏差所引起,而横向间隙耦合所引起的损耗可忽略^[10-11]。

4.2 解旋转棱镜对耦合损耗的附加影响

在分析采用方双柱面棱镜结构的光纤旋转连接器损耗特性时,耦合损耗包含机械装配误差所产生的损耗,以及由方双柱面棱镜的球差所引入的附加损耗。如图 4 所示,根据 GRIN 透镜和方双柱面棱镜的位置关系,以方双柱面棱镜的材料折射率为 2,曲面的曲率半径 $R = 25$ mm,GRIN 透镜参数选用肖特公司生产的通用型准直透镜参数为例,其折射率 $n_0 = 1.636$; $\sqrt{A} = 0.418$ mm⁻¹^[10]。

表 1 中给出了 GRIN 透镜离棱镜中心轴高度

表 1 解旋转棱镜球差产生的附加损耗

Tab.1 Additional loss from sphere aberration of de-rotating prism

离轴高度 h/mm	横向错位 /mm	横向错位 损耗/dB	角度对准偏差/(°)	角度对准 损耗/dB
2	0.005	0.005	0.006	0.004
3	0.011	0.019	0.027	0.077
4	0.026	0.156	0.044	0.199
5	0.050	0.575	0.086	0.759
6	0.089	1.835	0.152	2.371

分别为 2、3、4、5、6 mm 时,由于棱镜球差而产生的附加损耗。

图 5 为解旋转棱镜球差引起的损耗示意图,可以看出当 GRIN 透镜离中心轴距离 5 mm 时,球差引起的横向错位损耗约为 0.5 dB,而球差引起的角度偏差损耗为 0.8 dB。因此由解旋转棱镜球差产生的总附加损耗为 1.3 dB。考虑国内现有的加工及装配精度产生的机械误差损耗 <0.5 dB^[12],根据以上损耗因素分析,可得该方双柱面解旋转棱镜双通道光纤旋转连接器的总耦合损耗 <2.0 dB,这一损耗特性与国外曾报道的多通道光纤旋转连接器相近。

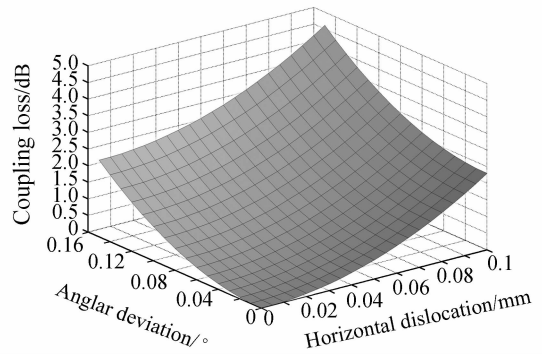


图 5 GRIN 透镜耦合损耗分析图

Fig.5 Analysis of GRIN-lens coupling loss

5 结 论

本文分析了解旋转棱镜的解旋转机理及其条件,提出了利用方双柱面解旋转棱镜实现的新结构双通道光纤旋转连接器。该结构具有光路简单,光信号耦合容易,可实现双通道旋转传输的特点。对其耦合损耗的理论分析表明,其设计总损耗 <2.0 dB,能完全满足雷达等相关军事装备对器件应用的要求,具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] JING W C, JIA D G, TANG F, et al. Design and implementation of a broadband optical rotary joint using C-lenses [J]. *Optical Express*, 2004, 12(17):4088-4093.

[2] GREGORY H A, GALES F, ROGER L M, et al. Passive, multi-channel fiber optic rotary joint assembly[P]. *US patent*:5371814,6, 1994.

[3] GREGORY H A, CONN F. Multi-channel fiber optical rotary joint for single-mode fiber[P]. *US*:5157745, 20,

1992.

- [4] MITCHEL K, BLUEBIRD A. Multi-channel fiber optical rotary joint:US,6301405 [P]. 2001.
- [5] 吕昊,刘爱梅. 球透镜耦合效率研究[J]. 光学精密工程, 2006,6(14):386-390.
LU H, LIU A M. Research on coupling efficiencies of ball lenses[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,6(14):386-390. (in Chinese)
- [6] 谢晋,阮兆武. 光学自由曲面反射镜模芯的镜面成型磨削[J]. 光学精密工程, 2007,15(3):344-349.
XIE J, RUAN ZH W. Mirror form grinding of free-form surface of reflector mould core[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(3):344-349. (in Chinese)
- [7] 袁建新,钟平. 基于图像处理技术的光纤准直器封装新方法[J]. 光学精密工程, 2007,15(9):1322-1327.
QIU J X, ZHONG P. Novel packaging method for optical fiber collimator based on image processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1322-1327. (in Chinese)
- [8] 金龙文,郝寅雷,王岩,等. 光通信用自聚焦透镜的制备[J]. 光学精密工程, 2002,10(5):483-486.
JIN L W, HAO Y L, WANG Y, *et al.* Preparation of a self-focusing lens for optical communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(5):483-486. (in Chinese)
- [9] 胡卫生,曾庆济. 自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析[J]. 中国激光, 1999,26(3):221-224.
HU W SH, ZENG Q J. Misalignment-induced excess loss in gradient-index-rod lens collimating systems [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(3): 221-224. (in Chinese)
- [10] GILSDORF R W, PALAIS J C. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(16): 3440-3445.
- [11] 贾大功. 多路空间互连光旋转连接器的研制[D]. 天津:天津大学, 2004.
JIA D G. Developments of Multi-channel Spatial Interconnection Optical Rotary Joint [D]. *Tianjin: Tianjin university*, 2004. (in Chinese)
- [12] 徐峰,江伟,俞本立. 一种基于光子晶体光纤的光纤旋转连接器设计[J]. 量子电子学报, 2007,24(4):510-514.
XU F, JIANG W, YU B L. Design of fiber optic rotary joint based on photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007,24(4):510-514. (in Chinese)

作者简介:徐峰(1977—),男,安徽宣城人,副教授,工学博士,主要从事光波导器件与材料,光纤通信技术等方面的研究。E-mail:fengx@ahu.edu.cn