

南京航空航天大学
论文集

(二〇〇二年)

第8册

三院

南京航空航天大学科技部编

二〇〇三年六月

三 院

○三四系 ○三五系



序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
1	蔡青春 王惠南 王兴虎	硕士 正高 硕士	034 034 034	单天线GPS测姿的软件实现	导航	2002.38.06	
2	蔡青春 王惠南	硕士 正高	034 034	单天线GPS接收机载体姿态测定分析	南京理工大学学报	2002.26.00	J
3	陈春晓 刘建业 王惠南	博士 正高 正高	034 031 034	心电信号去噪处理及QRS波的检测	中国科协首届博士生学术交流大会	2002.11	
4	陈春晓 刘建业 衡彤 黄强	博士 正高 中级 硕士	034 031 外 034	智能化无创血氧饱和度检测系统的研究	南京航空航天大学学报	2002.34.04	J
5	陈春晓 刘建业 王惠南	博士 正高 正高	034 031 034	An Approach Based Wavelet Transform to Measure the QT Interval	第五届亚太地区控制与测量国际会议	2002.01	
6	陈春晓 衡彤 刘建业	博士 中级 正高	034 外 031	XE1201在无线中央监护系统中的应用	四川工业学院学报	2002.21.02	J
7	陈春晓 刘建业 衡彤 王惠南 杨平	博士 正高 中级 正高 中级	034 031 外 034 980	心血管功能诊断仪的研制	重庆医科大学学报	2002.27.04	J
8	陈春晓 刘建业	博士 正高	034 031	QT间期测量的小波分析方法	华西医科大学学报	2002.23.04	J
9	胡志忠 沈春林	副高 正高	034 031	基于数字地图预处理的实时航迹规划	南京航空航天大学学报	2002.34.04	J
10	胡志忠 沈春林	副高 正高	034 031	基于特征点的地形数据存贮模型	宇航学报	2002.23.01	H
11	黄凤玲 王远亮 陈春晓 王惠南	初级 正高 博士 正高	034 外 034 034	三氧化二砷和肿氨基乙酸体外抗癌作用的比较	癌症	2002.21.04	H
12	王惠南	正高	034	应用梯度折射率透镜的光纤加速度系统中的光功率耦合分析	中国惯性技术学报	2002.10.05	J

序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
1	曹云峰 苏丙未	副高 博士	035 035	无人机4D制导系统研究	南京航空航天大学学报	2002.00.05	J
2	曹云峰 王柳文 陶勇 沈春林	副高 硕士 中级 正高	035 035 035 031	微型飞行器控制与导航系统研究	航空电子技术	2002.33.01	H
3	曹云峰 陶勇 苏丙未 沈勇璋	副高 中级 博士 正高	035 035 035 031	一种无人机推测导航（DR）抗侧风控制策略	飞机设计	2002.00.01	
4	陈欣 苏丙未 曹云峰 杨一栋	副高 博士 副高 正高	035 035 035 031	一种基于神经网络的非线性飞行控制系统设计方案研究	数据采集与处理	2002.17.03	H
5	高攀 沈春林 李丽荣	博士 正高 中级	035 035 035	A New Digital Map Elevation Data Storage Format	亚太控制与测量（APCCM）	2002.01	
6	李丽荣 沈春林 陆宇平	中级 正高 正高	035 035 035	在SGI图形工作站上实现低空突防三维视景及跨平台仿真	南京航空航天大学学报	2002.34.02	J
7	李秀娟 许湘剑	副高 硕士	035 035	一种采用光波导的触觉传感器	仪器仪表学报	2002.23.03	H
8	李秀娟 许湘剑	副高 硕士	035 035	一种采用光波导的触觉传感器	中国仪器仪表学会第四届青年学术会议	2002.01	
9	刘国刚 沈春林 陆宇平 李丽荣	博士 正高 正高 中级	035 035 035 035	飞行航迹动态逆跟踪控制的神经网络方法	南京航空航天大学学报	2002.34.02	J
10	刘国刚 沈春林	博士 正高	035 035	分布式多用户控制系统数学模型仿真的实现	系统仿真学报	2002.22.01	J
11	刘国刚 沈春林 李丽荣	博士 正高 中级	035 035 035	飞行器航迹控制的神经网络方案	弹箭与制导学报	2002.22.01	J
12	刘久富 王宁生	中级 正高	035 053	人工神经网络在三次设计中的应用研究	机械制造	2002.40.455	
13	刘久富 王宁生	中级 正高	035 053	三次设计的扩展介绍与探讨	工业工程	2002.5.01	J
14	刘久富 王宁生	中级 正高	035 053	大规模定制设计的产品簇匹配研究	南京航空航天大学学报	2002.34.04	J
15	刘久富 沈春林 王宁生	中级 正高 正高	035 035 053	面向大规模定制生产的产品设计	机械设计与制造	2002.10.06	J
16	刘坤 曹云峰	硕士 副高	035 035	Integrated Flight /Fire /Thrust Vectoring Control	The 5th Asia-Pacific Conference on Control and Measuring	2002.01	

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
17	苏丙末 曹云峰 陈欣 杨一栋	博士 副高 副高 正高	035 035 035 031	一种鲁棒自适应Backstepping控制方案研究	应用科学学报	2002.20.04	H
18	唐超颖 吴文海 沈春林	硕士 博士 正高	035 035 035	滑模变结构飞行控制系统的设计	飞机设计	2002.00.04	
19	吴文海 沈春林 刘国刚	博士 正高 博士	035 035 035	飞行控制系统的特征机构配置法	哈尔滨工业大学学报	2002.00.05	H
20	吴文海 沈春林	博士 正高	035 035	机载计算机系统的故障诊断	航空电子技术	2002.33.01	H
21	吴文海 沈春林	博士 正高	035 035	Pursuit-evasion Games in light Control of A/C: A Review	国际数学家大会控制与决策卫星会议	2002.01	
22	袁锁中 杨一栋	中级 正高	035 031	基于 H_∞ 控制的侧向自动着舰导引系统设计	兵工自动化	2002.21.06	
23	张劲 陆宇平 李丽荣	硕士 正高 中级	035 035 035	一种基于Web的三维实时显示飞行仿真的实现方法	南京理工大学学报	2002.26.06	J

应用梯度折射率透镜的光纤加速度计 系统中的光功率耦合分析

王惠南, 宋君恩

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 研究了在光功率分布为高斯分布的情况下, 光纤加速度计系统中光功率耦合的数学模型, 并着重分析了几种情况下位移与光功率耦合之间的关系。通过对理论曲线的分析找出良好的线性区间, 为该类加速度计的研制提供了科学依据。

关键词: 加速度计; 光纤传感器; 微位移; 光功率耦合

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

Analysis on Coupled Power of Light in Fiber-optic Accelerometer Using Grade Refractive Index Lens

WANG Hui-nan, SONG Jun-en

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, the light power distributed by coupled power of light in a fiber-optic accelerometer using GRIN lens was studied, the relationship between the coupled power and the micro displacement were analyzed, the linear range is gained by simulating the math model.

Key words: accelerometer fiber-optic sensor; micro displacement; light power coupling

1 引言

采用 GRIN 透镜的光纤加速度计具有结构新颖、体积极小而分辨率却极高、不受电磁干扰和性价比高的特殊优点。因此, 对其测量精度影响较大的光功率耦合机理进行深入的研究十分必要。在该加速度计系统中, 光纤对和 GRIN 透镜位置如下: 其中光纤对的半径为 a , GRIN 透镜的半径为 R , 长度为 $L/4$ (L 为 GRIN 透镜中子午光线的周期长度), GRIN 透镜之径向折射率分布为抛物型分布, 由下式给出:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] & \text{当 } 0 \leq r \leq R \\ n_1 (1 - 2\Delta)^{\frac{1}{2}} \approx n_1 (1 - \Delta) = n_{21} & \text{当 } r \geq R \end{cases} \quad (1)$$

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (98JIB.05)

收稿日期: 2002-07-23

作者简介: 王惠南 (1946—), 男, 南京航空航天大学教授、博士生导师。

式中:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

由光线理论可知: 光线经过 1/4 周期长度自聚焦透镜的传播和反射, 在端面 I 上, 入射光线和反射光线关于 GRIN 透镜中心轴对称。所以在初始位置 (发射光纤和接收光纤相对于 GRIN 透镜中心轴对称时, 入射光线经 GRIN 透镜反射后, 全部进入到接收光纤中 (不计损耗)。当透镜相对于光纤对产生位移 x 时, 只有部分光线被反射到接收光纤当中, 即耦合光功率发生了变化。其中耦合光功率的大小与位移 x 有关。参见图 1 和图 2。

2 光功率的分布

在光纤中某一点光的光功率分布不仅与该点在光纤中的径向位置有关, 而且还和发射光纤中的光功率分布有关。参见图 3。

光功率与径向位置有关是由折射率在径向的二次分布引起的, 与 θ 有关是因为某点发出的光的强度在各个方向上的分布不是均匀的, 不同的 θ 处, 光功率分布不一样。

2.1 远场光功率分布

光在光纤中的出射光, 其远场稳态功率强度可以用高斯分布来描述, 即在光纤横截面上任意一点 t (r) 处, 发射光锥中的光功率强度为:

$$P(\rho) = P(0)e^{-\rho^2/2\sigma^2} \quad (2)$$

其中 $P(0)$ 为 $\rho = 0$ 时的值。在 $\rho_0 (\rho_0 = k \cdot \tan \theta_m)$ 处的光功率强度为:

$$P(\rho_0) = P(0)e^{-\rho_0^2/2\sigma^2} \quad (3)$$

由于数值孔径处的功率值可以定义为 $1/e^2$, 所以 $P(0) = 1$ 。因此远场光功率分布为:

$$P(\rho) = e^{-2(\rho^2/\rho_0^2)} \quad (4)$$

(4) 式也可以用 θ 表示, 因为 $\rho = k \cdot \tan \theta$, 所以

$$P(\theta) = e^{-2(\theta^2/\theta_m^2)} \quad (5)$$

2.2 近场功率分布

当光纤中的光功率分布均匀时, 光纤径向 r 处的光功率强度为:

$$p(r) = p_0[1 - (r/a)^2] \quad (6)$$

式中 p_0 为轴线处的功率强度。

当光功率分布不均匀时, 为了更准确地表示近场功率分布, 我们可以用均匀分布时的光功率强度作

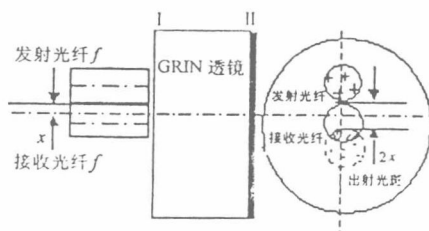


图 1 光线在自聚焦透镜中的入射和反射

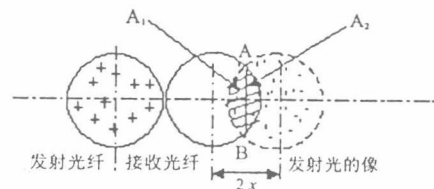


图 2 光功率耦合示意图

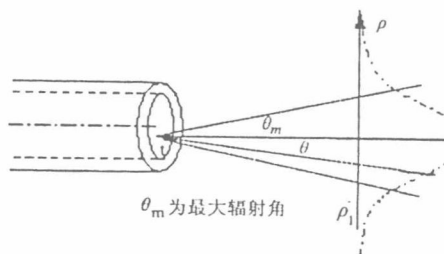


图 3 光功率分布示意图

为加权系数,于是稳态时光功率强度可以写为:

$$p(r) = p_0 \left[1 - (r/a)^2 \right] \int_0^{\theta_m} \theta \cdot e^{(-2\theta^2/\theta_m^2)} d\theta \quad (7)$$

当地数值孔径定义为:

$$NA(r) = n_1 - \sqrt{2\Delta} \left[1 - (r/a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = n(r) \cdot \sin \theta_m \quad (8)$$

由于 θ_m 、 Δ 都很小,因此:

$$\theta_m \approx \sqrt{2\Delta} \left[1 - (r/a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)中,可得:

$$p(r) = \frac{1}{4} \cdot (n_1^2 - n_2^2) \cdot (1 - e^{-2}) p_0 \left[1 - (r/a)^2 \right]^2 = p'_0 \left[1 - (r/a)^2 \right]^2 \quad (10)$$

式(10)即为光纤横截面上任一点处的近场光功率分布式。

3 耦合光功率的推导

下面分几种情况讨论耦合光功率 $T(x)$ 与位移 x 的关系。忽略光纤对与 GRIN 透镜之间的微小间隙。

3.1 光纤对是阶跃折射率型光纤,且 $NA_0 < NA(\rho)$

假设发射光纤和接收光纤的几何特性完全相同,折射率变化关系都为:

$$\begin{cases} n(r) = n_{01} & r < a \\ n(r) = n_{02} & r \geq a \end{cases} \quad (11)$$

式中 a 为光纤的半径。 NA_0 为光纤的数值孔径, $NA(\rho)$ 为 GRIN 透镜中的 ρ 点处的数值孔径。

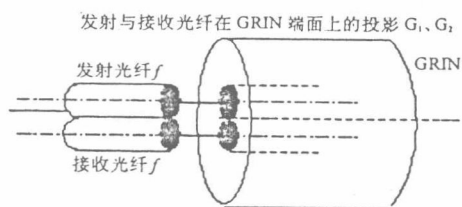


图4 光纤对及其在 GRIN 断面上的透影

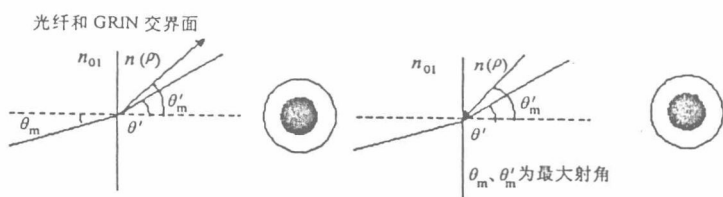


图5 光纤在 GRIN 中的传播示意图

假设光纤和 GRIN 透镜紧靠在一起(忽略光纤与 GRIN 透镜之间的微小间隙),由发射光纤发出的光直接进入 GRIN 透镜中。见图 6(a),在交界面上的某一点,由于光纤的数值孔径小于 GRIN 透镜的数值孔径,所以 $\theta_m < \theta'_m$ 。在该点处应用折射定律:

$$n_{01} \sin \theta_m = n(\rho) \sin \theta', \quad n_{01} < n(\rho) \quad (12)$$

式中 θ' 为光 GRIN 透镜中的传播角,因而 $\theta'_m > \theta' > \theta_m$,这就是说:由光纤发出的光完全被 GRIN 透镜接收,而且在透镜中的传播角度 θ' (与轴线方向的夹角)小于最大辐射角 θ'_m ,即没有光功率损失。当光线经 GRIN 透镜端面 II (镀膜端面) 反射,回到 GRIN 透镜端面 I 时,见图 5(b),在光纤与 GRIN

的接触面上,由自聚焦透镜成像原理可知,此时的入射角就是图 5(a)中的折射角。由于光线是可逆的,所以从 GRIN 透镜中射出来的光全部被光纤接受,虽然 GRIN 透镜在此处的数值孔径大于接收光纤的数值孔径,但在 GRIN 透镜中传播的光没有完全充满在此处的数值孔径,参见图 5。所以此时没有因为数值孔径不匹配而造成的光功率损失。

当 GRIN 透镜相对于发射光纤产生位移 x 时,参见图 2,阴影部分的面积即为耦合面积,光线接收到的光功率 P_r 就是重叠部分的光功率 P_y ,于是可以得到耦合效率:

$$T(x) = \frac{\iint_y p(r) dr \cdot d\phi}{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} p(r) r dr} \quad (13)$$

$P(r)$ 为近场功率强度。

当光纤对为阶跃型光纤时,由式(9)可知: $P(r)$ 为恒定值,所以耦合光功率效率即为阴影面积与光纤端面面积之比:

$$T(x) = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos\left(\frac{x}{a}\right) - \frac{x}{a} \left[1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (14)$$

根据数字仿真,耦合效率 $T(x)$ 与 (x/a) 之间的曲线关系如 3.2~3.3 节所示(参见图 6)。

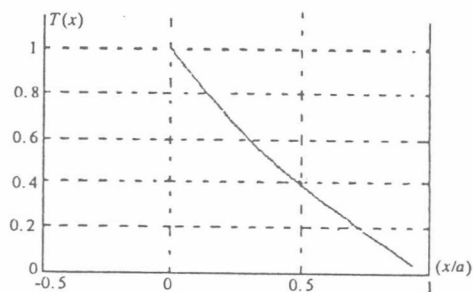


图 6 阶跃光纤与 GRIN 透镜之相对位移引起的光功率之变化曲线

3.2 光纤对为梯度折射率光纤,且 $NA(r) < NA'(r')$

$NA(r)$ 为光纤横截面上距轴线 r 处的数值孔径。 $NA'(r')$ 为 GRIN 透镜横截面上距轴线 r' 处的数值孔径。见下式:

$$NA(r) = \begin{cases} NA(r) \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right], & \text{当 } 0 \leq r \leq a \\ 0, & \text{当 } r > a \end{cases} \quad (15)$$

如前所述,当光经发射光进入到 GRIN 透镜时,由于 $NA(r) < NA'(r')$,所以光纤发出的光全部被 GRIN 透镜所接收,在 GRIN 透镜中的最大传播角小于最大辐射角。当光经 GRIN 透镜射出时,由于光的出射角小于接收光纤的最大接收角,所以当偏移量 $x=0$ 时,没有光功率损失。当偏移量 x 不为零时,光功率损失就是非重叠部分的光所携带的光功率。此时可以看成只有发射光纤和接收光纤,接收光纤像对于发射光纤的位移为 $2x$ 的情况,如图 2 所示。重叠部分被直线 AB 分成 A_1 , A_2 两部分。在区域 A_1 中,发射光纤的数值孔径比接收光纤的数值孔径小,所以在这个区域中射出的所有光功率都被接收光纤接受,于是,在 A_1 中接收到的光功率 P_{A1} 为:

$$P_{A1} = 2 \int_0^{\arccos \frac{x}{a}} \int_{\frac{x}{a}}^a p(r) r dr \cdot d\theta \quad (16)$$

式中, $p(r)$ 为近场光功率强度。

在区域 A_2 中,发射光纤的数值孔径比接收光纤的数值孔径大,但考虑到对称性(光纤结构完全相同),所以很容易得到这个光功率。区域 A_2 中某点 x_2 处,接收光纤的数值孔径与区域 A_1 中的它的对称

点 x_1 处发射光纤的数值孔径相同。因此,在区域 A_2 中任一点 x_2 处,接收光纤的光功率等于区域 A_1 中的对称点 x_1 射出的光功率。所以,经由区域 A_2 耦合的全部光功率 P_{A2} 与经由区域 A_1 耦合的光功率 P_{A1} 相等。所以接收光纤所接收到的总的光功率 P_r 为:

$$P_r = 2 \cdot P_{A1} \quad (17)$$

由式(12)、(13)得:

$$P_r = 4 \int_0^{\arccos \frac{x}{a}} d\theta \cdot \int_{\frac{x}{a}}^a p'_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^2 r \cdot dr \quad (18)$$

上式积分得:

$$P_r = 4 p'_0 \left[\frac{a^2}{6} \arccos \left(\frac{a}{x} \right) + \left(\frac{2}{15} ax + \frac{13}{45} \frac{x^3}{a} - \frac{4}{45} \frac{x^5}{a^3} \right) \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right] \quad (19)$$

发射光纤发出的总功率为:

$$P_s = \int_0^{2\pi} \int_0^a p'_0 \left[1 - (r/a)^2 \right]^2 r \cdot dr \cdot d\theta = \frac{\pi a^2}{3} p'_0 \quad (20)$$

所以耦合效率 $T(x)$ 为:

$$T(x) = \frac{P_r}{P_s} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{a}{x} \right) - 6 \left(\frac{11}{30} \left(\frac{x}{a} \right) - \frac{13}{45} \left(\frac{x}{a} \right)^3 - \frac{1}{45} \left(\frac{x}{a} \right)^5 \right) \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right] \quad (21)$$

耦合效率 $T(x)$ 与 (x/a) 之间的曲线关系如图7所示。

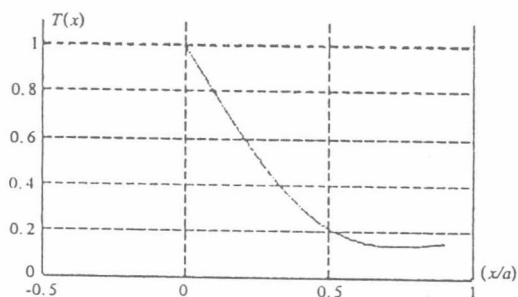


图7 梯度折射率光纤与GRIN透镜之相对位移引起光功率耦合之变化曲线

3.3 光纤对为梯度折射率光纤, 且 $NA_0(r) > NA_1(\rho)$

当光线由发射光纤进入GRIN透镜时, 由于接触面上任一点 Q 处, 发射光纤的数值孔径小于GRIN透镜的数值孔径, 所以GRIN透镜只能接受进入它自己的数值孔径范围的那部分光发出的光功率。由于 $\rho_2 < \rho_1$, $\rho_2 = k \cdot \tan \theta_m$, $\rho_1 = k \cdot \tan \theta'_m$, 因此在 Q 点处, 耦合功率为:

$$\tau(r) = \frac{\int_0^{\rho_2} p_1(\rho) \rho \cdot d\rho}{\int_0^{\rho_1} p_1(\rho) \cdot d\rho} = \frac{1 - e^{-2\theta_m^2 / \theta'^2_m}}{1 - e^{-2}} \quad (22)$$

所以GRIN透镜接受到的总的功率为:

$$P_g = \int_0^{2\pi} \int_0^a p'_0 \left[1 - (r/a)^2 \right]^2 \cdot \tau(r) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad (23)$$

在式(22)中, $\theta'_m = 2A' \left[1 - (r'^2 / R^2) \right]$, $\theta_m = 2A \left[1 - (r^2 / a^2) \right]$, $r'^2 = r^2 - 2rx \cos \theta + x^2$ 。

由于式 (23) 很难积分, 所以我们采用近似方法。

在 GRIN 透镜的横截面上, $r' \ll R$ (因为光纤的最大偏移量为 $a/2$, 所以 $r' \leq 3a/2$, 而 GRIN 透镜的半径一般为 $10a \sim 20a$, 所以可以把 θ_m 看成恒定值, 即在 $0 \sim r'$ 内, 可以把 GRIN 透镜看成阶跃折射透镜。此时:

$$P_g \approx \int_0^{2\pi} \int_0^a p_0' \cdot r \cdot dr \cdot d\theta = \pi a^2 p_0' \quad (24)$$

当光线由 GRIN 透镜射出, 入射到接收光纤时, 由于 GRIN 透镜的数值孔径小于接收光纤的数值孔径, 所以在重叠部分 (参见图 8), 接收光纤能够完全接受 GRIN 透镜反射出的光。

在 AO_2D 所围的区域内 (在发射光纤的像中建立坐标系), 接收光纤所接收的光功率为:

$$P_{AD} = \int_0^{\pi - \arccos(x/a)} \int_0^{\sqrt{a^2 - 4x^2 \sin^2 \theta - 2xc \cos \theta}} p_0' \cdot r \cdot dr =$$

$$\frac{p_0'}{2} \left\{ a^2 \left[\pi - \arccos\left(\frac{x}{a}\right) \right] - 4x^2 \left(\frac{x}{a}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - \right.$$

$$\left. 2x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2x}\right)^2 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} - 1 - \frac{a^2}{2} \arcsin \left[\frac{2x}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \right] \right\} \quad (25)$$

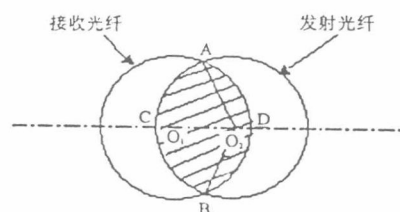


图 8 梯度折射率光纤对光功率分析示意图

在 AO_2C 所围的区域内, 接收光纤所接收的光功率为:

$$P_{AC} = \int_{\pi - \arccos(x/a)}^{\pi} \int_0^a p_0' \cdot r \cdot dr = \frac{p_0' a^2}{2} \arccos\left(\frac{x}{a}\right) \quad (26)$$

所以接收光纤所接收到的光功率为:

$$P_{\text{接}} = 2(P_{AD} + P_{AC}) =$$

$$p_0' \left\{ a^2 \pi - 4x^2 \left(\frac{x}{a}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - \right.$$

$$\left. 2x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2x}\right)^2 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} - 1 - \frac{a^2}{2} \arcsin \left[\frac{2x}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \right] \right\} \quad (27)$$

故光功率的耦合效率为:

$$T(x) = \frac{P_{\text{接}}}{P_g} =$$

$$p_0' \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \left(\frac{x}{a}\right)^3 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - \frac{2}{\pi} \frac{x}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \sqrt{0.25 + \left(\frac{x}{a}\right)^4} - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \right.$$

$$\left. \frac{1}{2\pi} \arcsin \left[\frac{2x}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \right] \right\}$$

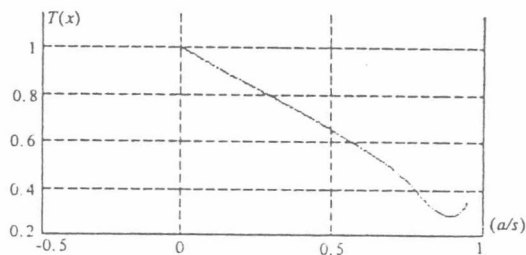


图 9 梯度折射率光纤与 GRIN 透镜相对位移引起的光功率耦合的变化曲线

耦合效率 $T(x)$ 与 (x/a) 之间的仿真曲线关系参见图 9。

4 结论

由图 6、7、9 的曲线可知,在上述三种情况下, $T(x)$ 与 (x/a) 在一定的区间内有很好的线性度。在第一种情况下,有很好线性度的区间,为 $0 \sim 0.5$;第二种情况有很好线性度的区间,为 $0 \sim 0.4$;第三种情况的线性度最差,区间仅为 $0 \sim 0.25$ 。这一功率耦合分析曲线为采用 GRIN 透镜的光纤加速度计的工程设计提供了科学的理论依据。

参考文献:

- [1] 王惠南. 采用 GRIN 透镜之光纤加速度计原理分析[J]. 光子学报. 1995, 24(1).
- [2] Miller C M, Mettler S X. A loss model for parabolic-profile fiber splices[J]. The Bell System Technical Journal. 1978, 57(9).
- [3] Senior J M, Cusworth S D, Burrow N G, Muirherd A D. Misalignment losses at multimode graded-index fiber splices[J]. Applied Optics. 1985, 24(7).
- [4] Gloge D, Marcattili E A. Multimode theory of graded-core fibers[J]. The Bell System Technical Journal. 1973, 52(9).
- [5] Miller C M. Transmisson vs transverse offser for parabolic-profile fiber splices with unequal core diameters[J]. The Bell System Technical Journal. 1976, 55(7).
- [6] Mettler S C. A general characterization of splice loss for multimode optical fibers[J]. The Bell System Technical Journal. 1979, 58(10).

(上接第 27 页)

③ 温度变化会使 r_0 产生较大的变化(约为 $1.7 \mu\text{m}$),但该变化只影响转子与电极之间的间隙,并不破坏转子的球形度,因此只要在结构设计时将该 r_0 变化考虑进去,并加以补偿,则 r_0 变化的影响就可忽略。

④ 结构 2 的谐波系数比结构 1 的谐波系数大,亦即结构 2 在工作环境下的变形更大。

⑤ 转子综合变形(工况 4)与转子加工的球形误差基本相当,谐波系数与球形误差是同一个数量级(10^{-5}mm)或小 1~2 个数量级。

5 结论

小型静电陀螺仪镶嵌了铜柱的实心转子在工作时的变形主要是由温度变化产生的温度变形和高速旋转产生的离心变形组成的。该变形产生二、四次谐波,其大小与转子加工的球形误差相当,由于二、四次谐波对干扰力矩的影响较小,因此转子在工作条件下的变形是可以接受的。

转子的工作变形与转子的结构有密切关系,垂直于赤道面均匀镶入四个小铜柱(结构 1)的变形小于在赤道面上垂直于极轴均匀镶入 4 个小铜柱(结构 2)的变形。

参考文献:

- [1] 颜明,田蔚风,金志华,等. 小型静电陀螺仪静电场基本干扰力矩分析[J]. 中国惯性技术学报. 2000, 8(2): 45-49.
- [2] 刘延柱. 静电陀螺仪动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1979.
- [3] 陈家斌,等. 静电陀螺电干扰力矩模型中有关问题[J]. 中国惯性技术学报. 1992, 1(5).

单天线 GPS 测姿的软件实现

蔡青春 王惠南 王兴虎

(南京航空航天大学 210016)

摘 要 详细介绍了单天线 GPS 测姿系统的软件部分, 软件实现中使用的编程语言是 C 语言, 并以功能为单位采用模块化设计, 分为数据接收与处理、卡尔曼滤波、姿态模型三部分, 其各部分所实现的功能可以简单描述为: 速度矢量分离模块 VELOCITY MODULE, 实现对 GPS 接收机所接收导航信息的处理并从中分离出载体在当地地理坐标系下各坐标轴向的速度分量; 卡尔曼滤波模块 KALMAN MODULE, 利用在 VELOCITY MODULE 中得出的速度矢量, 以载体在当地地理坐标系下三轴向加速度分量为滤波对象, 可解算出每一速度分量所对应的加速度分量; 伪姿态模块 PSEUDO_ATTITUDE MODULE, 以在 VELOCITY MODULE 和 KALMAN MODULE 分别求得的速度矢量和加速度矢量为输入, 输出即为载体的在航三维姿态信息, 亦称为伪姿态。

关键词 C 语言; 模块化; GPS; 载体伪姿态; 速度矢量; 加速度矢量

利用 GPS 确定载体的姿态是其在航空、航天和航海领域应用的一个重要方面, 国内外对此作了大量研究。国外研制和生产的一些多天线测姿系统已达到较高的精度; 国内在利用 GPS 的码相位、载波相位或多天线间的载波相位差来进行飞行器的载体姿态确定方面提出了许多不同的理论和实用的方法。本文给出一种新的测姿方法, 即利用载体的速度矢量来确定载体姿态^[1], 由于多数 GPS 接收机只需配备一根天线即可确定载体的速度矢量, 因此具有在系统设计上的易操作性。在该方法中, 软件部分的设计是重要的一环, 它决定着测姿的精度。集成开发环境是 BORLAND 公司开发的 Turbo C++, 因为它具有既支持面向过程的 C 编程又支持面向对象的 C++编程, 并且占用空间较少, 易于集成, 因此被本系统所采用。在开发过程中, 根据功能的不同、功能模块的重复引用和分工的需要, 将此软件部分分为 3 个模块: 速度矢量分离模块 VELOCITY MODULE; 卡尔曼滤波模块 KALMAN MODULE; 伪姿态模块 PSEUDO_ATTITUDE MODULE。下文将就各模块的程序说明、实现功能、接口实现和流程图逐一叙述。

1 速度矢量分离模块

1.1 程序说明

在实际使用时由于 GPS 的型号不同、生产的厂家不同,其输出的 GPS 数据格式也有不同。本项目的系统设计中采用美国 Rockwell 公司设计的 Jupiter GPS 接收机,它可以提供 4 种压缩格式的数据,通过硬件设置可将 GPS 接收机数据输出格式设置为 NMEA 0183 ASCII 这种国际标准格式。在完成了 GPS 接收机的设置、GPS 接收机和 PC 机的串行通讯连接及 GPS 接收机启动后,即可进入该功能模块的运行过程:函数 `initcom()` 设置了串行通讯的波特率、数据位,奇偶校验、停止位分别为 9600、8、N、1; `readcom()`

定义了串行通讯的中断服务程序; `enablecom()` 设置 `readcom()` 按时钟中断的方式执行中断服务并开放中断; `disablecom()` 屏蔽中断服务; `putdata()` 缓存读入数据; `getdata()` 为该缓存并返回获得缓存数据的句柄。速度矢量分离模块流程图如图 1 所示。

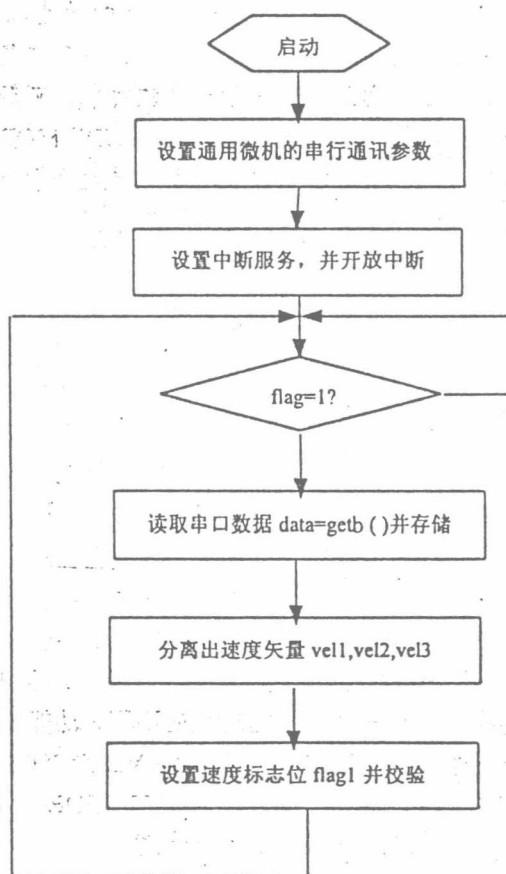


图 1 速度矢量分离模块框图

1.2 功能

初始化通讯设置,处理GPS接收机的导航信息并计算得到飞行载体在东北天坐标系中各轴向的速度矢量。

1.3 接口实现

提供给功能模块卡尔曼滤波模块需要的速度矢量VEL1, VEL2, VEL3。

2 卡尔曼滤波模块

2.1 程序说明

图2所示为卡尔曼滤波模块的程序流程图,在该程序模块中将实现利用速度矢量分离模块中求得的速度矢量来估计相应方向上的加速度矢量,由于在该程序中要同时考虑在东北天坐标系中3个坐标轴向的滤波,于是在滤波开始前要先完成3个轴向的方向选择,同时要完成在选定方向上的前后相临时刻状态变量的赋值。其中方向的选择由方向标志位来决定, $kk=0$ 表示东北天坐标系的东向(E), $kk=1$ 表示北向(N), $kk=2$ 表示垂直往上(U)。

2.2 功能

实现对东北天坐标系中三个坐标轴方向的状态变量的滤波估计,求出载体的加速度矢量。

2.3 接口实现

输入速度矢量分离模块求得的速度矢量VEL1, VEL2, VEL3,得到加速度矢量ACCEL1, ACCEL2, ACCEL3。

3 姿态模型模块

3.1 程序说明

姿态模型程序流程图如图3所示。在速度矢量分离模块和卡尔曼滤波模块中,我们可以分别求得载体在东北天坐标系中三坐标轴向的速度矢量和加速度矢量,从而可以求得加速度矢量在速度矢量法向方向的分量值,最终我们可以得到该分量值在东北天坐标系三坐标轴向的分量。对重力加速度 g 也同样处理。两者综合即可求得载体的合提升力加速度,同时假设一水平参考分量,参照文献1中所建立的伪姿态模型,即可求解载体伪姿态。

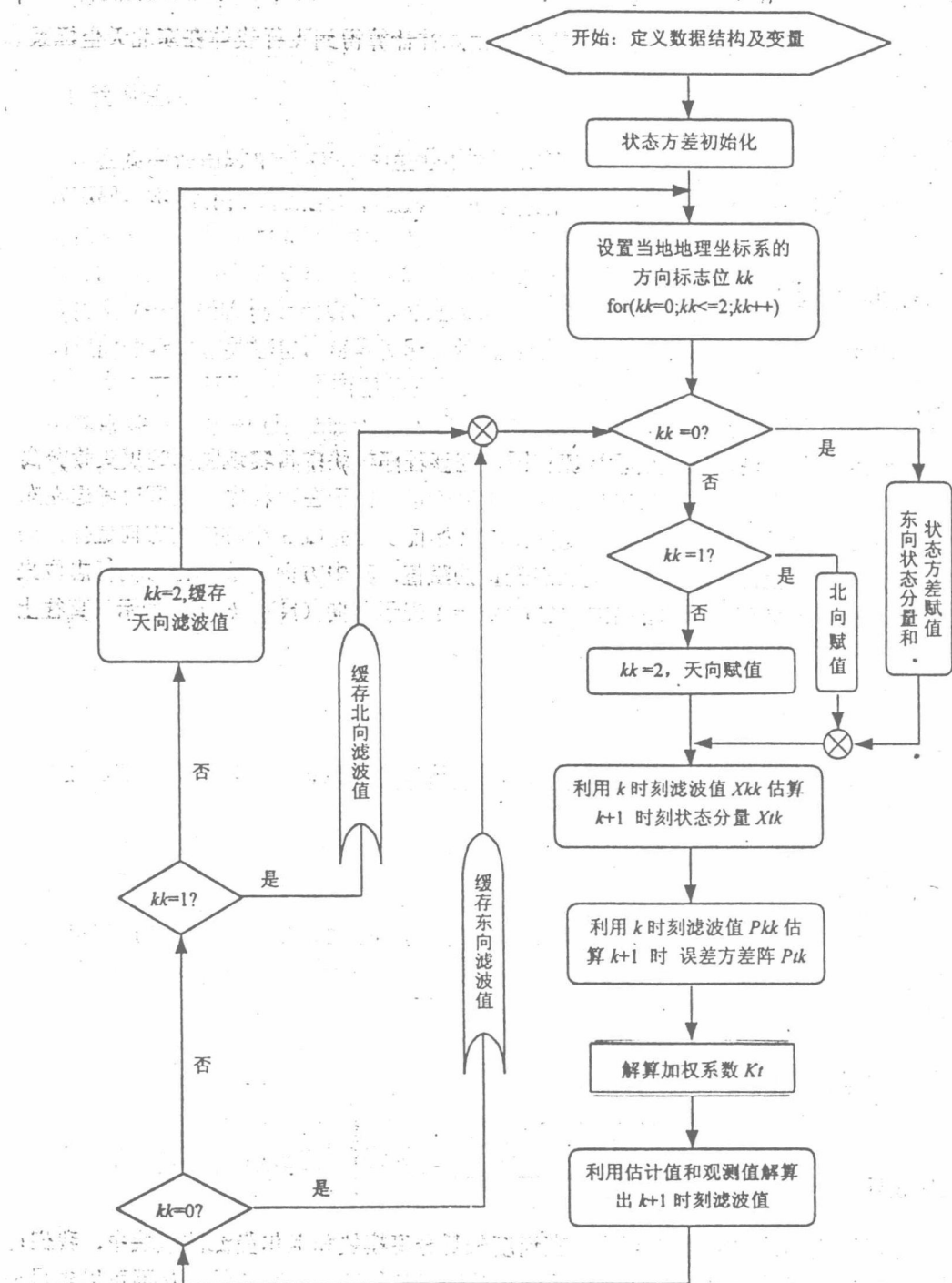


图 2 卡尔曼滤波模块框图

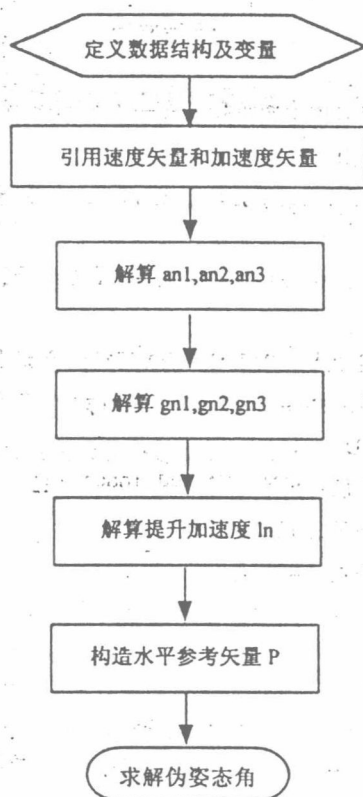


图3 姿态模型程序流程图

3.2 功能

解算载体伪姿态。

3.3 接口实现

输入速度矢量分离模块求得的速度矢量 $VEL1$ 、 $VEL2$ 、 $VEL3$ 和卡尔曼滤波模块中所求加速度矢量 $ACCEL1$ 、 $ACCEL2$ 、 $ACCEL3$ 。

4 总 结

由于所开发的软件系统还没有经过动态仿真, 因此作为系统总体来讲, 肯定还有不完善的地方。在下一步的动态仿真中, 将会解决存在的一些问题。改进情况会在进一步的论述中给予解答。