

文章编号 1004-924X(2012)01-0096-06

测绘相机立方镜与星敏立方镜转换矩阵的标定

王 智^{*}, 吴国栋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 传输型立体测绘卫星利用测绘相机进行摄影测量时, 需要确定测绘相机在惯性坐标系中的姿态。确定姿态时, 首先由星敏传感器测量得到星敏测量坐标系在惯性坐标系中的姿态, 然后通过星敏测量坐标系与星敏立方镜的转换矩阵、星敏立方镜与测绘相机立方镜的转换矩阵, 得到测绘相机测量坐标系在惯性坐标系中的姿态。文中介绍了各坐标系的定义, 根据星敏立方镜与测绘相机立方镜坐标系的关系, 利用 4 台经纬仪测量系统分别建立星敏立方镜和测绘相机立方镜的坐标系以及 2 坐标系间的转换矩阵, 介绍了 2 个立方镜坐标系的标定方法, 多次测量结果表明, 最大标定误差为 1.011 6", 优于 2"(1 σ), 满足立体测绘精度的要求。

关键词: 测绘相机; 立方镜; 星敏传感器; 转换矩阵; 标定

中图分类号: V447.3; V448.222 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0096

Calibration of transition matrix on cubic prisms in mapping camera and star sensor

WANG Zhi^{*}, WU Guo-dong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: wz070611@126.com

Abstract: It is necessary to determine camera postures in inertial coordinate systems, when the mapping camera is used in a photogrammetry for a transport stereo mapping satellite. In determining the camera postures, the postures of star sensor measuring system in the inertial coordinate system were measured by star sensors, then, the postures of the mapping camera measuring system in the inertial coordinate system were obtained by the transition matrix between star sensor measuring system and the cubic prism in star sensor and the transition matrix between the two cubic prisms in the star sensor and mapping camera. This paper introduces the definition of coordinate systems. By using the measuring systems of four theodolites, we establish coordinate systems on two cubic prisms respectively and a transition matrix for the coordinate systems. The calibration method of two coordinate systems is presented. The measuring results from many experiments show that the maximum calibration error is 1.011 6", which is better than 2"(1 σ) and satisfies the precision requirement of the stereoscopic mapping.

Key words: mapping camera; cubic prism; star sensor; transition matrix; calibration

收稿日期: 2011-03-18; 修订日期: 2011-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61108066)

1 引 言

星载立体测绘系统由测绘相机和 3 台星敏感器组成,其中测绘相机由 3 个线阵 CCD 相机构成,正视相机垂直指向地面,飞行方向与光轴方向垂直,前、后视相机分别与正视相机相交有一定的交会角。每个线阵 CCD 相机的测量坐标系均由其相应的立方镜引出^[1-2],以便于测绘相机总成过程中的检测标定,正视相机的测量坐标系作为测绘相机的测量坐标系,正视相机的立方镜作为测绘相机测量坐标系的引出基准。

传输型立体测绘卫星在利用测绘相机进行摄影测量时,需要知道测绘相机在惯性坐标系中的姿态^[3-4]。该姿态的确定,首先要通过星敏感器测量得到星敏测量坐标系在惯性坐标系中的姿态,然后通过星敏测量坐标系与星敏立方镜坐标系的矩阵转换、星敏立方镜坐标系与测绘相机立方镜坐标系的矩阵转换以及测绘相机立方镜坐标系与测绘相机测量坐标系的矩阵转换,最后得到测绘相机测量坐标系在惯性坐标系中的姿态。星敏立方镜与测绘相机立方镜坐标系的标定、测绘相机立方镜与测绘相机测量坐标系的标定是测绘相机研制任务中必不可少的环节,测绘相机立方镜与测绘相机测量坐标系的标定在文献^[5]中已有论述,本文主要论述了星敏立方镜与测绘相机立方镜坐标系的转换矩阵的标定方法。

星敏立方镜与测绘相机立方镜坐标系的相互转换关系的建立以及测量方法关系到测绘相机测量坐标系在惯性坐标系中的姿态正确与否以及测绘相机的测绘精度,影响测绘相机的地面定位精度,因此,星敏立方镜与测绘相机立方镜坐标系转换矩阵的标定是立体测绘系统的关键技术之一,对测绘相机具有十分重要的意义。

2 坐标系定义

2.1 星敏感器测量坐标系 ($X_m Y_m Z_m$)

星敏感器测量坐标系为 $X_m Y_m Z_m$,坐标原点在 CCD 阵列的中心, Z_m 轴沿视轴方向, X_m, Y_m 轴在 CCD 面内,与 Z_m 轴成右手系。

2.2 星敏感器立方镜坐标系 ($X_a Y_a Z_a$)

星敏感器立方镜坐标系 $X_a Y_a Z_a$ 在星敏感器

的外部立方镜上,如图 1 所示。其坐标原点在立方镜的几何中心,三轴与星敏感器测量坐标系的三轴平行。星敏感器立方镜坐标系与星敏感器测量坐标系的关系如图 2 所示。



图 1 星敏感器及其立方镜
Fig. 1 Star sensor and cubic prism

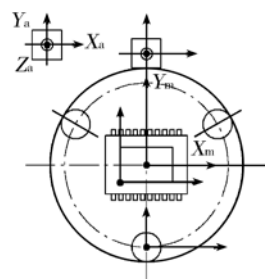


图 2 星敏感器立方镜坐标系与星敏感器测量坐标系关系图
Fig. 2 Graph of relationship between cubic prism coordinate system and measuring coordinate system for star sensor

2.3 测绘相机立方镜坐标系 ($X_j Y_j Z_j$)

坐标原点在立方镜的中心,三轴分别与测绘相机测量坐标系的三轴平行且一致。测绘相机立方镜坐标系 $X_j Y_j Z_j$ 与测绘相机测量坐标系 $X_c Y_c Z_c$ 的关系如图 3 所示。

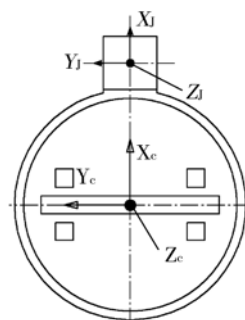


图 3 测绘相机立方镜与测绘相机测量坐标系的关系图
Fig. 3 Graph of relationship between cubic prism coordinate system and measuring coordinate system for mapping camera

3 测绘相机立方镜坐标系与星敏立方镜坐标系的转换矩阵

立方镜坐标系由立方镜几何中心及表面法线确定,坐标系原点为立方镜几何中心,以其中两个相互垂直的表面法线确定其中 2 个坐标轴方向,右手定则确定第三轴。利用方向余弦矩阵来表示两个坐标系关系是最直观的,如图 4 所示。

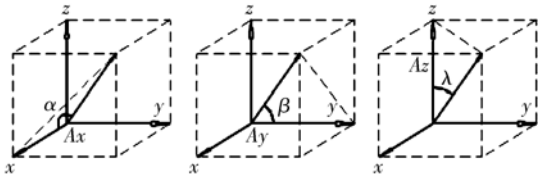


图 4 方向余弦描述法

Fig. 4 Scenario method of direction cosine

方向余弦角 (α, β, γ) 表示某一个向量在坐标系 $\{A\}$ 下,分别与 x, y, z 轴的夹角。假设某一坐标系 $\{B\}$ 的 x, y, z 轴在坐标系 $\{A\}$ 中的方向余弦角分别为 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1), (\alpha_2, \beta_2, \gamma_2), (\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)$,则 $\{B\}$ 相对于 $\{A\}$ 的转换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

因此,测绘相机立方镜坐标系与星敏感器立方镜坐标系的转换矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 为星敏立方镜坐标系的 X 轴与测绘相机立方镜坐标系 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的夹角; $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ 为星敏立方镜坐标系的 Y 轴与测绘相机立方镜坐标系 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的夹角; $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ 为星敏立方镜坐标系的 Z 轴与测绘相机立方镜坐标系 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的夹角。

4 测绘相机立方镜与星敏立方镜坐标系的标定方法^[5-7]

用 4 台经纬仪组成测绘相机立方镜与星敏立方镜坐标系的测量系统,利用自准直以及经纬仪互瞄原理建立 2 个坐标系的相互关系。

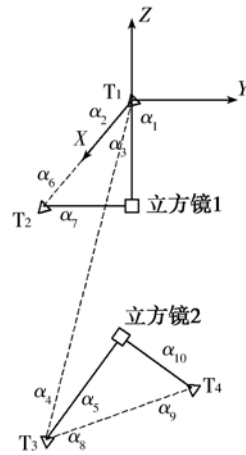


图 5 4 台经纬仪准直测量角度位置

Fig. 5 Angle position of collimating and measuring for four theodolites

(1)立方镜 1 两垂直面夹角的测量

用经纬仪 T_1 和 T_2 对立方镜 1 的两个相互垂直的表面进行自准直测量,然后 T_1 和 T_2 进行互瞄,记录测量数据,利用公式(3)可求得立方镜 1 两个相互垂直表面的空间夹角 α 。

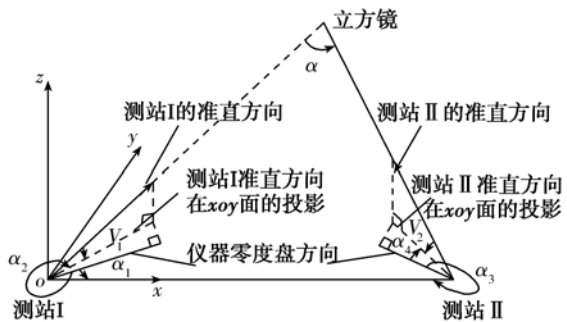


图 6 准直测量方向投影示意图

Fig. 6 Sketch of projection in collimating and measuring direction

设 α_1 为 T_1 在互瞄方向上的水平观测值, α_2 为 T_1 在准直方向上的水平观测值; α_3 为 T_2 在互瞄方向上的水平观测值, α_4 为 T_2 在准直方向上的水平观测值; V_1 为 T_1 在准直方向的垂直观测值, V_2 为 T_2 在准直方向的垂直观测值。

$$\begin{aligned} i_1 &= \cos V_1 \times \cos (\alpha_1 - \alpha_2), \\ i_2 &= \cos V_2 \times \cos (180^\circ - (\alpha_1 - \alpha_3)); \\ j_1 &= \cos V_1 \times \sin (\alpha_1 - \alpha_2), \\ j_2 &= \cos V_2 \times \sin (180^\circ - (\alpha_1 - \alpha_3)); \\ k_1 &= \sin V_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_2 &= \sin V_2; \\
 \mathbf{a} &= i_1 \mathbf{i} + j_1 \mathbf{j} + k_1 \mathbf{k}, \\
 \mathbf{b} &= i_2 \mathbf{i} + j_2 \mathbf{j} + k_2 \mathbf{k}, \\
 \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= i_1 i_2 + j_1 j_2 + k_1 k_2, \\
 \alpha &= \arccos(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}).
 \end{aligned} \tag{3}$$

为了方便夹角计算,设 2 个准直方向的长度为单位长度, i_1, j_1, k_1 分别为 T_1 测得的准直方向向量在 X, Y, Z 方向的投影; i_2, j_2, k_2 分别为 T_2 测得的准直方向向量 X, Y, Z 方向的投影。

(2)立方镜 2 两垂直面夹角的测量

立方镜 2 两垂直面夹角的测量方法与立方镜 1 相同。

(3)4 台经纬仪互瞄

利用 4 台经纬仪对 2 个立方镜准直以及经纬仪互瞄测量的角度位置关系如图 7 所示。

图中, α_1 为 T_1 准直测量方向的水平观测值; α_2 为 T_1, T_2 互瞄时 T_1 的水平观测值; α_3 为 T_1, T_3 互瞄时 T_1 的水平观测值; α_4 为 T_1, T_3 互瞄时 T_3 的水平观测值; α_5 为 T_3 准直测量方向的水平观测值; α_6 为 T_1, T_2 互瞄时 T_2 的水平观测值; α_7 为 T_2 准直测量方向的水平观测值; α_8 为 T_3, T_4 互瞄时 T_3 的水平观测值; α_9 为 T_3, T_4 互瞄时 T_4 的水平观测值; α_{10} 为 T_4 准直测量方向的水平观测值; V_1 为 T_1 准直测量方向的垂直观测值; V_2 为 T_2 准直测量方向的垂直观测值; V_3 为 T_3 准直测量方向的垂直观测值; V_4 为 T_4 准直测量方向的垂直观测值。由式(3)得:

$$\begin{aligned}
 i_i &= \cos V_i \times \cos \beta_i, \\
 j_i &= \cos V_i \times \sin \beta_i, \\
 k_i &= \sin V_i (i=1, 2, 3, 4), \\
 \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= i_i i_{i+1} + j_i j_{i+1} + k_i k_{i+1}, i=1, 2, 3, \\
 \alpha &= \arccos(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}).
 \end{aligned} \tag{4}$$

其中, $\beta_1 = \alpha_2 - \alpha_1$; $\beta_2 = 180^\circ - (\alpha_7 - \alpha_6)$; $\beta_3 = \alpha_4 - \alpha_5 + \alpha_6 - \alpha_8 + 180^\circ$ (某些情况下角度可能相差 180° , 可根据图形调整)。

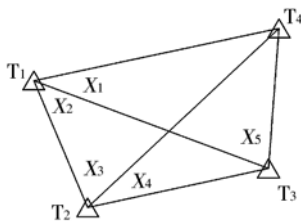


图 7 观测方向示意图

Fig. 7 Sketch of observation direction

(4)以 T_1, T_2 经纬仪为基础,建立测量坐标系。

(5)对所得角度值进行平差,得唯一角度方向值。建立 12 个观测量:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= H_{13} - H_{14}; L_2 = H_{12} - H_{13}; L_3 = H_{24} - H_{21}; \\
 L_4 &= H_{23} - H_{24}; L_5 = H_{34} - H_{31}; L_6 = H_{31} - H_{32}; \\
 L_7 &= H_{42} - H_{43}; L_8 = H_{41} - H_{42}; L_9 = H_{12} - H_{14}; \\
 L_{10} &= H_{23} - H_{21}; L_{11} = H_{32} - H_{34}; L_{12} = H_{41} - H_{42}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

其中部分角度也许相差 180° , 可根据图形调整。

根据图 7,建立观测方程:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= X_1; L_2 = X_2; L_3 = X_3; L_4 = X_4; L_5 = X_5; \\
 L_6 &= 180^\circ - X_2 - X_3 - X_4; L_7 = X_2 + X_3 - X_5; \\
 L_8 &= 180^\circ - X_1 - X_2 - X_3; L_9 = X_1 + X_2; \\
 L_{10} &= X_3 + X_4; L_{11} = 180^\circ + X_5 - X_2 - X_3 - X_4; \\
 L_{12} &= 180^\circ - X_5 - X_1.
 \end{aligned} \tag{6}$$

(6)检验后,建立立方镜 1 坐标系,先得到 y 轴方向余弦和 z 轴方向余弦(准直公式计算),然后通过计算得到 x 轴方向余弦:

$$\mathbf{x} = [\cos \alpha_x, \cos \beta_x, \cos \gamma_x] = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \cos \alpha_y & \cos \beta_y & \cos \gamma_y \\ \cos \alpha_z & \cos \beta_z & \cos \gamma_z \end{bmatrix}. \tag{7}$$

(7)根据式(8)确定立方镜 1 坐标系到测量坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R}_1 .

$$\mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

其中: $a_1 = \cos(R_v) \times \cos(R_z)$; $a_2 = -\cos(R_v) \times \sin(R_z)$; $a_3 = \sin(R_v)$;

$$b_1 = \sin(R_v) \times \sin(R_v) \times \cos(R_z) + \cos(R_x) \times \sin(R_z);$$

$$b_2 = -\sin(R_x) \times \sin(R_v) \times \sin(R_z) + \cos(R_x) \times \cos(R_z);$$

$$b_3 = -\sin(R_x) \times \cos(R_v);$$

$$c_1 = -\cos(R_x) \times \sin(R_v) \times \cos(R_z) + \sin(R_x) \times \sin(R_z);$$

$$c_2 = \cos(R_x) \times \sin(R_v) \times \sin(R_z) + \sin(R_x) \times \cos(R_z);$$

$$c_3 = -\cos(R_x) \times \cos(R_v).$$

(8)建立立方镜 2 坐标系,确定旋转矩阵 \mathbf{R}_2 , 方法同上。

(9)求得立方镜 1 和立方镜 2 之间的旋转矩阵

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{R}_2. \tag{9}$$

xyz 为在 XYZ 下的三轴的夹角(即把立方镜

1 坐标系作为基准坐标系)的测量数据以测绘相机立方镜与星敏 A 的立方镜为例。表 1 为测绘相机

表 1 测绘相机立方镜与星敏感器 A 立方镜关系的测量值

Tab. 1 Measurement of angles between the two cubic prisms of mapping camera and star sensor A (°)

测量序号	x	y	z
1	X 107.158 621	92.716 504	139.551 621
	Y 88.817 785	42.926 828	119.746 107
	Z 39.732 014	108.747 550	102.191 763
2	X 107.158 235	82.717 093	139.551 691
	Y 88.818 041	42.927 039	119.746 499
	Z 39.731 537	108.747 384	102.191 320
3	X 107.158 349	82.716 979	139.551 641
	Y 88.818 015	42.926 989	119.746 427
	Z 39.731 655	108.747 405	102.191 448
4	X 107.158 704	82.716 967	139.551 317
	Y 88.818 003	42.927 107	119.746 552
	Z 39.731 996	108.747 552	102.191 739
5	X 107.158 219	82.717 337	139.551 586
	Y 88.818 276	42.927 054	119.746 656
	Z 39.731 417	108.747 229	102.191 308
6	X 107.158 775	82.717 020	139.551 225
	Y 88.818 178	42.927 018	119.746 557
	Z 39.731 985	108.747 411	102.191 848
7	X 107.158 546	82.717 244	139.551 327
	Y 88.818 134	42.927 204	119.746 741
	Z 39.731 789	108.747 471	102.191 555
多次测量解算	X 107.158 422	82.717 132	139.551 498
	Y 88.818 158	42.927 031	119.746 559
	Z 39.731 662	108.747 346	102.191 507

立方镜与星敏感器 A 的立方镜关系的测量数据。由表 1 得 x, y, z 的方差如表 2 所示。

表 2 三轴夹角的方差

Tab. 2 Variances of angles between the two cubic prisms of mapping camera and star sensor A

	X	Y	Z
x	0.000 254	0.000 154	0.000 201
y	0.000 164	0.000 123	0.000 108
z	0.000 281	0.000 192	0.000 217

测绘相机立方镜与星敏立方镜转换矩阵的标定必须在隔震地基上进行,影响标定精度的因素主要是经纬仪的调平误差和自准直测量误差。由方差矩阵可以看出,标定误差最大为 $0.000\ 281^\circ = 1.011\ 6''$,满足标定精度 $2''(1\sigma)$ 的技术要求。

5 结 论

星载立体测绘系统由星敏感器测量得到星敏感器测量坐标系在惯性坐标系中的姿态,通过星敏立方镜、测绘相机立方镜的转换,得到测绘相机在惯性坐标系中的姿态。因此,测绘相机立方镜与星敏立方镜坐标系间转换矩阵的标定是获得测绘相机在惯性坐标系中姿态必不可少的环节,需要在相机装调完成后在地面进行转换矩阵的标定。本文用 4 台经纬仪构成的测量系统实现了 2 个立方镜的坐标系的测量以及转换矩阵的确定,测量结果表明,该标定方法精度优于 $2''(1\sigma)$,满足立体测绘的使用要求。

参考文献:

- [1] 王智,张立平,姚惠. 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计[J]. 光子学报, 2010, 39(2): 227-232.
WANG Z, ZHANG L P, YAO H. Design on optical lens of three-linear tridimensional mapping camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(2): 227-232. (in Chinese)
- [2] 王智,乔克,张立平. 三线阵立体测绘卫星 LMCCD 相机的实现[J]. 光机电信息, 2010, 27(11): 110-

114.

- WANG Z, QIAO K, ZHANG L P. Implementation of LMCCD camera for stereo mapping satellite using three-line array CCDs [J]. *OME Information*, 2010, 27(11): 110-114. (in Chinese)
- [3] 陈元枝. 基于星敏感器的卫星三轴姿态测量方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000.
CHEN Y ZH. Method for testing satellitic axes attitude based on star tracker[D]. *Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chi-*

nese Academy of Sciences,2000. (in Chinese)

- [4] 陈东祥,王多,王金敏.利用“球面三角”建立三维图形旋转变换参数间的关系[J].工程图形学报,2001,4(4):97-99.
CHEN D X, WANG D, WANG J M. Applying spherical trigonometry method to establish the interconversion between 3D rotation transformation parameters[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2001,4(4):97-99. (in Chinese)
- [5] 吴国栋,宋丹.测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J].光学精密工程,2007,15(11):1727-1730.
WU G D, SONG D. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1727-1730. (in Chinese)
- [6] 宋丹.星载测绘系统中星、地相机综合几何标定精度分析[D].北京:中国科学院研究生院,2008.
SONG D. *Accuracy analysis of mapping camera comprehensive geometric calibration in the spaceborne mapping system*[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences,2008. (in Chinese)
- [7] 吴国栋.离轴三反光学镜头像面畸变的标定方法[J].光学精密工程,2008,16(11):2127-2131.
WU G D. Calibration of distortion for three-mirror off-axis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2127-2131. (in Chinese)

作者简介:



王 智(1978—),男,山东寿光人,博士,副研究员,2000年、2003年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,2006年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事航天光学遥感器的研制工作。E-mail: wz070611@126.com



吴国栋(1965—),男,辽宁阜新人,研究员,主要从事光学遥感器像质评价及测绘相机几何标定技术的研究。E-mail: wuguodong586@163.com

●下期预告

光纤色散法测量闪烁体脉冲光谱

魏福利,王培伟

(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

建立了一种利用光纤波长色散测量脉冲光谱的方法。具有较宽光谱脉冲光在一定长度的光纤中传播会发生波形展宽,根据标定结果对该展宽的波形进行校正,得到光源的光谱曲线。利用 ps 级脉冲光源对测量系统进行时间响应标定,得到系统的时间响应函数;通过对不同波长光的走时测量,得到不同波长的群折射率;测量光纤中的光谱衰减,得到各种波长的相对衰减或传输效率。利用以上三个标定结果,先对波形进行数字逆卷积,然后进行走时校正和衰减系数校正,即可对所得到的波形进行恢复。经实验测量和数据处理,得到了一种红光闪烁体的发光光谱曲线,所得到的中心波长与用其他方法测到的中心波长相差小于 2 nm,谱线形状基本一致。结果表明,在脉冲光的脉冲宽度远小于其色散展宽时,可以利用光纤的波长色散对脉冲光的光谱进行测量。