

# 基于星图自动辨识的光学系统精确标定方法

王安国,王华斌,唐君,李辉,张磊

(海军大连舰艇学院,辽宁大连 116018)

**摘要:** 为实现光学测量系统的精确标定,通过星空图像处理及星象质心提取得到星体像空间坐标,基于天体自动辨识和多天体视位置同步计算技术,精确计算恒星视位置并修正大气折光影响,得到星象对应天体的物空间坐标,进而解算光学系统的镜头畸变等内外部参数,本文提出一套基于星图自动辨识的光学系统精确标定方法.

**关键词:** 星图; 辨识; 光学系统; 标定

**中图分类号:** TP212; TP391.4; V448.222 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0575-04

## An Accurate Aalibrating Method of Optical System Based on the Automatic Identification of Starmap

WANG An-guo, WANG Hua-bin, TANG Jun, LI Hui, ZHANG Lei

(Dalian Navy Academy Navigation Department, Dalian, Liaoning 116018, China)

**Abstract:** An accurate method based on the automatic identification of starmap is put forward in this paper to calibrate optical systems. The basic procedure is to obtain the star's coordinates in image space by processing starmap and calculating the centroid of a star, accurately calculate the star's apparent position, correct the atmospheric refraction, and obtain the the star's coordinates in object space by automatic celestial body identifying techniques, then calculate the lens aberration and the internal and external parameters of an optical system.

**Key words:** starmap; identification; optical system; calibrating method

### 1 引言

光学测量系统的测量精度受系统内外部参数变化影响.尤其对于复杂条件下使用的变焦光学系统而言,系统内外部参数具有时变特征,通过精确测量光学系统的内外部参数并予以修正的光学系统标定技术,是确保光学系统测量精度的必要前提.光学系统标定的实质,是利用光学系统实测数据和标定基准数据,解算光学系统视轴指向及围绕视轴的旋转等外部参数,以及镜头畸变、焦距、中心偏移、纵横向比例等内部参数.

恒星视位置计算精度优于 0.1",角径几乎为 < 0.01",星光理想的平行光源.本文基于多天体视位置同步计算、大天区天体自动辨识等相关技术,提出并实现一种基于星图自动辨识的光学系统精确标定方法.

### 2 实测数据获取

#### 2.1 星空图像处理

在光学系统后端加装低照度 CCD 获取星空图像.星图是一种无纹理特征的特殊图像,基于纹理或基于面积的降噪处理方法,容易造成部分星象的丢失.为避免星图处理误操作,增强星图处理效率,针对星空图像的特点,本文提出并实现了一种简洁高效的背景噪声剔除

方法.首先在全视场范围内随机提取  $n$  个像素的灰度值,以出现几率较大的灰度均值作为阈值.灰度低于阈值的像素灰度置零,从而实现背景噪声的剔除.基于背景灰度阈值的背景噪声剔除方法,具有效率高、误处理率低的优点.

#### 2.2 星空图像区域分割

为提取星象质心,需先进行星空图像的区域分割.不同天区的星象分布各不相同,但星象的共同特征是斜向凸状区域,针对这一特点,本文提出并实现了一种基于边缘搜索的区域分隔算法如图 1 所示.基于边缘搜索的区域分割算法,具有分割处理效率较高的显著优点,并且可以有效地避免星象拖尾等造成的误操作.

#### 2.3 星象质心提取

在分割区域内采用质心算法提取星象质心坐标.即:

$$\begin{aligned} x' &= \left( \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_i p_i \right) / \left( \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p_i \right) \\ y' &= \left( \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n y_i p_i \right) / \left( \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p_i \right) \end{aligned} \quad (1)$$

将坐标原点平移至像平面中心,得到星象计量坐标:

$$x = x' - x_0, \quad y = y' - y_0 \quad (2)$$

星象质心提取结果如图 2 所示.按行给出星象序

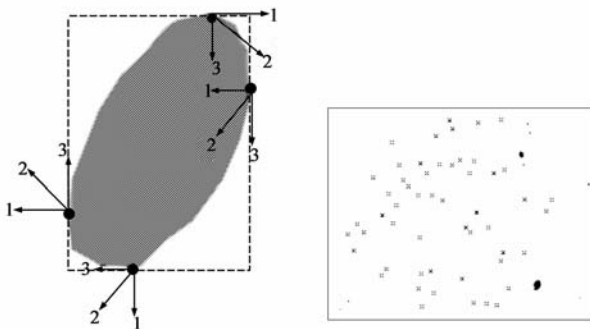


图1 区域分割

图2 星象标识图

号、计量坐标及亮度信息的星象计量坐标文件作为光学系统标定的实测数据,全面反映该光学系统内外部参数对基准数据的综合作用,并受环境条件、处理方法的影响。为能全面反映光学系统特性,应按星体密集、分布均匀、亮度均衡原则选定天区。

### 3 基准数据获取

#### 3.1 天体的赤道坐标和基准坐标

由于恒星视位置间的几何关系基本不变,基于恒星的星表历元平位置构造出反应恒星球面位置几何关系的天体辨识星库,以其为基准与星象质心位置间的几何关系进行匹配操作,进而辨识出各个星象所对应的恒星。本文采用的大天区天体自动辨识方法参见文献[1],不复赘述。在天体辨识基础上,采用文献[2,3]所述的天体视位置同步计算方法,计算出各星象对应天体在观测历元时的赤道坐标 $(\alpha_{io}, \delta_{io})$  ( $i = 1 \cdots n$  为天体序号)。天体在观测时刻  $S_C$ 、观测位置 $(\lambda, \varphi)$ 处的高度和方位为:

$$h_{io} = \tan^{-1}(z_{io}/\sqrt{x_{io}^2 + y_{io}^2}) \quad (3)$$

$$A_{io} = \tan^{-1}(y_{io}/x_{io})$$

其中:

$$\begin{pmatrix} x_{io} \\ y_{io} \\ z_{io} \end{pmatrix} = F_X \cdot R_Y(90^\circ - \varphi) \cdot R_X(S_C \pm \lambda_W^E) \cdot \begin{pmatrix} \cos \delta_{io} \cos \alpha_{io} \\ \cos \delta_{io} \sin \alpha_{io} \\ \sin \delta_{io} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中  $R_X(\theta)$ 、 $R_Y(\theta)$ 、 $F_X$  分别为以  $X$ 、 $Y$  为轴的旋转矩阵和  $X$  轴反向矩阵。星光在大气层中传播,不可避免地受到大气折光的影响。受大气折光影响的天体高度为  $h_i$ , 大气折光修正量  $\Delta h_i$  为:

$$\Delta h_i = h_i - h_{io} \approx 10^{-6} N_0 \sin(90^\circ - h_{io}) m'(90^\circ - h_{io}) \quad (5)$$

式中  $N_0$  为折射率,  $m'(90^\circ - h_{io})$  为映射函数(参见文献[4])。由此得到受大气折光影响的天体高度为:

$$h_i = h_{io} + \Delta h_i \quad (6)$$

大气折光对天体方位  $A$  的影响可以忽略,由此得到受大气折光影响的天体地平坐标:

$$(x_i \ y_i \ z_i)^T = (\cosh_i \sin A \ \cosh_i \cos A \ \sinh_i)^T \quad (7)$$

与其对应的地心赤道直角坐标为:

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix} = R_Z(-S_C \mp \lambda_W^E) \cdot R_Y(\varphi - 90^\circ) \cdot F_X \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

受大气折光影响的天体赤道坐标为:

$$\alpha_i = \arctan(y'_i/x'_i) \quad (9)$$

$$\delta_i = \arctan(z'_i/\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2})$$

受大气折光影响的恒星赤道坐标 $(\alpha_i, \delta_i)$ 即为光学系统标定的基准数据。

#### 3.2 赤道坐标与基准坐标间的变换

为建立基准数据与实测数据间的对应关系,需要把恒星的赤道坐标变换为平面坐标。如图3所示,在单位球上,视轴投影为光心  $T$ ,在以  $T$  为切点的切平面中,以  $T$  为原点建立基准坐标系  $\mu T\nu$ 。赤道坐标为 $(\alpha, \delta)$ 的天体投影为切平面中的  $M$ ,其在基准坐标系中的坐标为 $(\mu, \nu)$ 。由于星象质心坐标 $(x_i, y_i)$ 及星象对应天体的赤道坐标 $(\alpha_i, \delta_i)$ 已知,光心  $T$  的赤道坐标 $(\alpha_0, \delta_0)$ 的赤道坐标 $(\alpha_0, \delta_0)$ 可以近似计算如下:

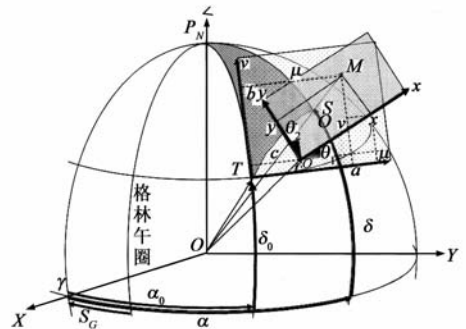


图3 计量坐标与理想坐标

$$\alpha_0 = \text{mean}_{\substack{i=1 \cdots n-1 \\ j=i \cdots n}} \left( \frac{\alpha_i \cos \delta_i - \alpha_j \cos \delta_j}{x_i - x_j} x_0 \right) \quad (10)$$

$$\delta_0 = \text{mean}_{\substack{i=1 \cdots n-1 \\ j=i \cdots n}} \left( \frac{\delta_i - \delta_j}{y_i - y_j} y_0 \right)$$

其中  $\text{mean}(\cdot)$  为均值算子。天体  $S_i$  在赤道坐标系中的矢量形式为:

$$OS_i = (\cos \delta_i \cos \alpha_i \ \cos \delta_i \sin \alpha_i \ \sin \delta_i)^T \quad (11)$$

天体矢量在基准坐标系中的矢量为:

$$OS_i = P_X R_Y(90^\circ - \delta_0) R_Z(\alpha_0) \begin{pmatrix} \cos \delta_i \cos \alpha_i \\ \cos \delta_i \sin \alpha_i \\ \sin \delta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \delta_0 \cos \delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0) + \cos \delta_0 \sin \delta_i \\ \cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0) \\ \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta_i \end{pmatrix} \quad (12)$$

由于为单位球,

$$z = \cos\delta_0 \cos\delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0) + \sin\delta_0 \sin\delta_i = 1$$

据此将基准坐标系中的矢量写成规范化形式得:

$$OS_i = \begin{pmatrix} \frac{\cos\delta_0 \sin\delta_i - \sin\delta_0 \cos\delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin\delta_0 \sin\delta_i + \cos\delta_0 \cos\delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ \frac{\cos\delta \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin\delta_0 \sin\delta_i + \cos\delta_0 \cos\delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

新系的  $X$  轴对应于基准坐标系中的  $\nu$  轴,  $Y$  轴对应于  $\mu$ , 于是得到:

$$\mu_i = \frac{\cos\delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin\delta_0 \sin\delta_i + \cos\delta_0 \cos\delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \quad (14)$$

$$\nu_i = \frac{\cos\delta_0 \sin\delta_i - \sin\delta_0 \cos\delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin\delta_0 \sin\delta_i + \cos\delta_0 \cos\delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)}$$

式(14)精确地给出天体基准坐标  $(\mu_i, \nu_i)$  与光心赤道坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  及天体赤道坐标  $(\alpha_i, \delta_i)$  间的关系. 对于给定光心, 也可由式(14)导出天体基准坐标到赤道坐标的变换:

$$\tan(\alpha_i - \alpha_0) = \frac{\mu_i}{\cos\delta_0 - \nu_i \sin\delta_0} \quad (15)$$

$$\tan\delta_i = \frac{\nu_i \cos\delta_0 + \sin\delta_0}{\cos\delta_0 - \nu_i \sin\delta_0} \cos(\alpha_i - \alpha_0)$$

## 4 标定方程的建立和求解

一般说来, 计量坐标系与基准坐标系之间存在平移和旋转; 平移量是由式(10)计算的光心赤道坐标存在误差造成的, 其旋转量即光学系统相对于赤道坐标系的转角. 此外, 计量坐标系的两坐标轴未必正交; 计量坐标与基准坐标的计量单位不同, 计量坐标系两坐标轴上的单位也未必相同. 尽管如此, 由于计量坐标系和基准坐标系的原点非常靠近, 可以近似地认为计量坐标系  $xoy$  平面与基准坐标系  $\mu T\nu$  平面重合. 如图 3 所示, 星体  $S$  的基准坐标和计量坐标之间有如下关系:

$$\mu = mx \cos\theta_1 - ny \sin\theta_2 + c \quad (16)$$

$$\nu = mx \sin\theta_1 + ny \cos\theta_2 + f$$

其中,  $\theta_1$  为  $x$  轴相对  $\mu$  轴的旋转角,  $\theta_2$  为  $y$  轴相对  $\nu$  轴的旋转角;  $m, n$  分别为计量坐标  $x, y$  的单位与基准坐标  $\mu, \nu$  的单位之间的比例;  $c, f$  为计量坐标系  $xoy$  相对于基准坐标系  $\mu T\nu$  的平移. 引入符号:

$$a = m \cos\theta_1 - 1, \quad b = -n \sin\theta_2, \quad (17)$$

$$d = m \sin\theta_1, \quad e = n \cos\theta_2 - 1$$

则有:

$$\mu - x = ax + by + c \quad (18)$$

$$\nu - y = dx + ey + f$$

式(18)即为光学系统标定的 6 参数模型, 其中  $\mu, \nu$  可由式(14)求解, 该式对于小视场光学系统标定具有相当的精度. 考虑 CCD 平面倾斜、CCD 中心偏离、径向畸

变等因素的影响, 基准坐标与计量坐标间的映射关系可用二次曲面表达, 为此构造 14 参数的光学系统标定模型如下:

$$\begin{aligned} \mu - x &= k_{11} + k_{12}x + k_{13}y + k_{14}x^2 \\ &\quad + k_{15}xy + k_{16}y^2 + k_{17}x(x^2 + y^2) \\ \nu - y &= k_{21} + k_{22}x + k_{23}y + k_{24}x^2 \\ &\quad + k_{25}xy + k_{26}y^2 + k_{27}y(x^2 + y^2) \end{aligned} \quad (19)$$

标定系数  $(k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}, k_{16}, k_{17}, k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{24}, k_{25}, k_{26}, k_{27})$  可采用最小二乘法求解. 据式(17)定义有:

$$\theta_1 = k_{12} \tan\left(\frac{k_{22}}{1 + k_{12}}\right), \theta_2 = k_{12} \tan\left(\frac{-k_{13}}{1 + k_{23}}\right) \quad (20)$$

$$m = \frac{k_{22}}{\sin\theta_1} = \frac{1 + k_{12}}{\cos\theta_1}, n = \frac{-k_{13}}{\sin\theta_2} = \frac{1 + k_{23}}{\cos\theta_2}$$

$m, n$  以及  $k_{14}, k_{15}, k_{16}, k_{17}, k_{24}, k_{25}, k_{26}, k_{27}$  为光学系统内部参数. 如前所述, 平移量  $(k_{11}, k_{21})$  是由式(10)计算的光心赤道坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  存在误差造成的, 消除坐标平移的基准坐标系原点赤道坐标  $(\alpha'_0, \delta'_0)$ , 可据式(15)计算得到:

$$\tan(\alpha'_0 - \alpha_0) = \frac{k_{11}}{\cos\delta_0 - k_{21} \sin\delta_0} \quad (21)$$

$$\tan\delta'_0 = \frac{k_{21} \cos\delta_0 + \sin\delta_0}{\cos\delta_0 - k_{21} \sin\delta_0} \cos(\alpha'_0 - \alpha_0)$$

由于光心赤道坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  存在误差, 天体基准坐标的误差也在所难免, 为此需要以新的光心赤道坐标  $(\alpha'_0, \delta'_0)$  计算天体基准坐标后重复上述计算过程, 直到  $(k_{11}, k_{21})$  小于给定阈值时为止. 通过迭代计算最终得到的光心赤道坐标仍记作  $(\alpha_0, \delta_0)$ . 最终得到光学系统的标定参数  $(k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}, k_{16}, k_{17}, k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{24}, k_{25}, k_{26}, k_{27})$ . 据球面天文学有:

$$h = \sin^{-1}(\sin\varphi \sin\delta_0 + \cos\varphi \cos\delta_0 \cos(\alpha_0 - S_C \mp \lambda_{\text{视}}^E))$$

$$A = \cos^{-1}((\cos\delta_0 - \sin\varphi \sin h) / \cos\varphi \cosh) \quad (22)$$

$A, h$  分别为光学系统视轴在地平坐标系中的方位和仰角, 光学系统视轴的空间指向由  $A, h$  唯一确定. 光学系统围绕视轴的旋转可由计量坐标  $Ox$  轴相对于基准坐标  $O\mu$  轴的转角  $\theta = \tan^{-1}(d/(1+a))$  所确定, 视轴方位  $A$ 、视轴仰角  $h$ 、围绕视轴的转角  $\theta$  即为光学系统的外部参数. 对于固联在运动载体上的光学系统而言, 若已知光学系统在载体上的安装舷角  $\xi$ 、仰角  $\zeta$  和转角  $\Psi$ , 可求得运动载体的航向角  $C$ 、俯仰角  $\omega$  和横倾角  $\rho$ . 此外, 对于运动载体上安装角可调的光学系统而言, 若已知载体的航向角  $C$ 、俯仰角  $\omega$  和横倾角  $\rho$ , 可求得光学系统的安装舷角  $\xi$ 、仰角  $\zeta$  和转角  $\Psi$ .

## 5 光学系统标定实例及分析

采用上述方法, 于 2008 年 7 月 25 日格林恒星时

$2^h 45^m 32^s$ , 在  $\varphi = 38.877011^\circ N$ ,  $\lambda = 121.664888^\circ E$  处对某光学测量系统实施标定, 计算光学系统内外部参数得:

$$\begin{aligned} a &= -1.000083313175365 & b &= -6.4911726453e-5 \\ c &= 3.1621e-11 & d &= -7.5831024601e-5 \\ e &= -0.9999916 & f &= 6.8833e-11 \\ k_{14} &= -1.93209e-9 & k_{15} &= -4.745518e-9 \\ k_{16} &= -6.01781e-10 & k_{17} &= -1.0632e-11 \\ k_{24} &= 1.921636e-9 & k_{25} &= -6.321003e-9 \\ k_{26} &= 1.891356e-9 & k_{27} &= -1.54e-11 \end{aligned}$$

据式(22), 视轴方位  $A = 140.2548^\circ$ , 仰角  $h = 31.3650^\circ$ ; 据式(20), 横轴旋转角  $\theta_1 = -42.0297^\circ$ , 纵轴旋转角  $\theta_2 = -38.0702^\circ$ ; 由此得到系统外部参数. 并计算出横向比例  $m = 8812$ , 纵向比例  $n = 9464$ , 横向视场角  $V_x = 4.6854^\circ$ , 纵向视场角  $V_y = 3.4866^\circ$ , 总视场  $v = 5.8404^\circ$ , 横向焦距  $f_x = 78.2185$ , 纵向焦距  $f_y = 78.8544$ , 总焦距  $f = 78.4145$ , 由此得到系统内部参数. 形变函数为:

$$\begin{aligned} \mu'_i &= (-1.93209x_i^2 - 4.745518x_i y_i + 0.601781y_i^2 \\ &\quad + 0.010632x_i(x_i^2 + y_i^2)) \times 10^{-9} \\ \nu'_i &= (1.921636x_i^2 + 6.321003x_i y_i + 1.891356y_i^2 \\ &\quad + 0.0154y_i(x_i^2 + y_i^2)) \times 10^{-9} \end{aligned}$$

为检验标定精度, 采用以上求得的参数, 通过标定计算求取各星象的赤道坐标  $(\alpha_i^B, \delta_i^B)$ , 与实际的天体赤道坐标  $(\alpha_{io}, \delta_{io})$  相比较, 据此计算赤经标定均方差为  $9.1''$ , 赤纬标定均方差为  $9.9''$ , 视位置标定均方差为  $19.8''$ .

## 6 结论

本文给出的标定模型精确, 几何意义明确, 标定方法适用于任意视轴, 标定精度可达弧秒量级. 基于恒星参考系的光学系统标定, 具有精度高、自主性强、适用性好等显著优点, 尤其对于星敏感器、对地对空观测等开放性光学测量系统的精确标定而言, 具有重要的实际意义.

### 参考文献

- [1] 曹焱. 面向捷联式天文航姿测量的天体辨识方法的研究[D]. 大连: 海军大连舰艇学院, 2008. 1.
- [2] 王安国. 船用恒星视位置高精度计算[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(04): 117-120.  
WANG An-guo, JIA Chuan-ying, SUN Peng. Precise apparent position calculation of star in navigation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 117-120. (in Chinese)
- [3] 王安国. 高精度行星视位置计算自动化技术研究[J]. 中国航海, 2005, 58(1): 30-34.  
WANG An-guo, JIA Chuan-ying, SUN Peng. Research on pre-

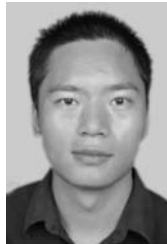
cise apparent position calculation for navigation using planets [J]. Navigation of China, 2005, 58(1): 30-34. (in Chinese)

- [4] 严豪健, 符养, 洪振杰. 现代大气折射引论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2006.
- [5] 全红艳, 张田文. 一种新的利用模板进行摄像机自标定的方法[J]. 电子学报, 2005, 33(11): 1941-1945.  
QUAN Hong-yan, ZHANG Tian-wen. A new camera self-calibration method using template [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11): 1941-1945. (in Chinese).
- [6] 柳庆武, 胡晓惠, 袁麟. 深空可见光图像中弱小运动目标实时检测[J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1614-1617.  
LIU Qing-wu, HU Xiao-hui, YUAN Lin. Real time detection for dim moving target in visible optical image of deep outer space[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1941-1945. (in Chinese)
- [7] WANG Anguo. A three-dimensional fixing method based on the measurement of angles between references [J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 16(4): 744-748.
- [8] SAMAAAN M A. Toward Faster and More Accurate Star Sensors Using Recursive Centroiding and Star Identification [D]. America: Texas A & M University, 2003. 25-233.

### 作者简介



**王安国** 山东无棣人, 工学博士, 海军专业技术大校, 海军大连舰艇学院航海系教授, 博士生导师. 教育部教学指导委员会天文学分委员会委员, 中国电子学会高级会员、天文惯性导航专业委员会副主任, 中国天文学会会员. 主要研究天文导航、信号处理、军事航海.  
E-mail: wagoffice@163.com



**王华斌** 山东济宁人, 1986年10月出生, 工学硕士在读, 海军中尉. 2004年9月考入海军大连舰艇学院, 2008年7月本科毕业, 保送进入本院导航制导与控制学科攻读研究生, 师从王安国教授, 研究方向为天文导航.



**唐君** 1983年2月生, 辽宁大连人, 海军上尉. 2006年6月毕业于海军大连舰艇学院航海专业; 2006年7月至2009年8月任某驱逐舰副航海长; 2009年9月考入海军大连舰艇学院攻读交通信息工程及控制专业硕士学位.

**李辉** 汉族, 河南省确山县人, 1979年10月出生, 海军上尉. 海军大连舰艇学院交通信息工程及控制专业博士研究生, 目前从事天文导航、信号处理及故障诊断相关研究工作.