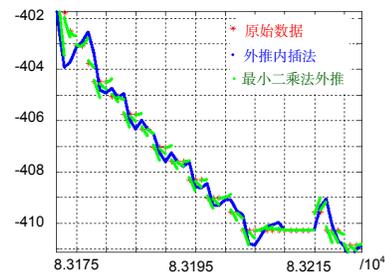




# 舰载环境下光电经纬仪的引导与实现

张兴国, 韩涛\*, 李靖

中国飞行试验研究院, 西安 710089



**摘要:** 舰载机飞行试验时, 舰上常配备有光电经纬仪测量系统。针对光电经纬仪引导时所遇到引导信息频率低、存在干扰的问题, 提出了数据预测的外推内插法和粗差别除的三点截止法; 为了平滑切换引导源, 提出了渐进式跟踪算法。实际数据比对表明, 上述方法有效地解决了舰载复杂环境下的数据滤波、插值和多源信息的引导问题。最后, 基于舰载 GPS/INS 组合惯导信息, 推导出动基座光电目标引导算法公式。

**关键词:** 飞行试验; 光电经纬仪; 动基座; 粗差; 引导算法

中图分类号: V271.4

文献标志码: A

## Guidance and implementation of photoelectric theodolite in shipborne environment

Xingguo Zhang, Tao Han\* and Jing Li

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

**Abstract:** The warship is generally equipped with photoelectric theodolite in carrier-borne aircraft flying test. Due to the low frequency of guidance source signal and disturbance from environment, the performance of the system is restricted. We proposed an extrapolation-interpolation method and a three points cut-off method to solve the problem, respectively. To smooth the switch of different guidance sources, we also recommended a gradually tracking algorithm. All the methods above resolve data filter, interpolation and multi-source problem effectively, which are usually encountered in the guiding photoelectric theodolite on the shipboard. At last, the guidance formulae of moving platform are established based on GPS/INS navigation information.

**Keywords:** flight test; photoelectric theodolite; moving base; outlier; guidance algorithm

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.006

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(5): 511–515

### 1 引言

舰载机飞行试验时, 为了精确测量舰载机进近段轨迹和特征点信息, 一般采用舰载光电经纬仪。它采用自主方式工作, 依据自身观测系统测得的目标位置信息和视频图像信息, 在甲板坐标系下解算, 获得目

标精确的运动轨迹。但由于光电经纬仪易受天气影响, 作用距离短且视场小, 当飞机进入它的工作区域内时, 经常来不及跟踪。国内外在该方面的论文资料较少, 针对这个问题, 业界常根据舰上和机上装备情况采用红外引导<sup>[1]</sup>、互引导和外引导等工作方式, 当有目标信号时, 引导经纬仪主镜朝向目标方向, 一旦目标进入试验区域则及时捕获。

目前, 国内外研究的视轴稳定技术主要有两种: 一是采用机械稳定平台的反方向摇摆克服舰艇的纵

收稿日期: 2017-02-22; 收到修改稿日期: 2017-04-10

\*E-mail: honkto@126.com

摇、横摇和艏摇,为光电跟踪测量设备提供近似水平的安装基础,如我国远望号测量船上的718光电经纬仪的稳像平台。另一种是直接把光电经纬仪安装在甲板上,通过船姿测量仪测量出船体摆动<sup>[2]</sup>,从而实时计算出视轴在大地坐标系中的偏离误差,并对俯仰轴和方位轴进行船摇姿态角的实时补偿。这种方法取消了笨重的机械稳定平台和中间测控环节,可以保证视轴的指向准确度。

飞行试验设备配置中,飞机上装备有GPS实时下发系统,舰上配备有遥测系统,因而项目采用了外引导工作方式。针对经纬仪舰载使用环境引起的数据源干扰大和数据下发速率低的问题,展开了复杂环境下动基座光电目标引导算法研究,旨在解决舰载光电经纬仪的稳定引导问题。本文涉及到的算法有机载GPS数据粗差剔除的三点截止法、数据预测的外推内插法、引导源平滑切换的渐进式跟踪算法、坐标变换算法等,几种算法均成功应用到项目中,取得了很好的效果<sup>[3]</sup>。

## 2 坐标系定义及数据源

### 2.1 坐标系定义

#### 2.1.1 大地切平面坐标系 $GX_g Y_g Z_g$

以舰上GPS安装点 $G$ 为原点, $GX_g$ 指向大地东, $GY_g$ 指向北, $X_g, Y_g, Z_g$ 构成右手系,在不引起误解时,也称为大地坐标系。

#### 2.1.2 甲板坐标系 $OXYZ$

设原点 $O$ 为惯导的三轴交点, $OY$ 轴平行于原点处的甲板切平面,指向船艏; $OZ$ 轴垂直于甲板切平面,向上为正; $OX$ 轴按右手法则确定。

#### 2.1.3 舰姿态角

1) 艏摇角 $\psi$ :指艏艉线在水平面的投影与大地北之间的夹角。从正北开始到舰艏艉线在水平面的投影顺时针方向为正。

2) 纵摇角 $\theta$ :指艏艉线与水平面之间的夹角。舰艏上翘时取正值。

3) 横摇角 $\gamma$ :指甲板绕已经纵倾的舰艏艉线的转角。甲板右舷下倾取正值。

### 2.2 目标源

在飞行试验中有两个引导源:机载GPS下发数据和遥测系统通过网络发送的数据。机载GPS定位系统通过无线数据链下发飞机的定位数据,受舰上电磁环境和飞机距离、姿态变化引起的遮挡及无线数据链带宽的影响和限制<sup>[4]</sup>,下发的数据受到噪声污染且频率

低,为了消除坐标转换中的误差传递,采用“三点截止法”对接收到的数据进行第一次粗差剔除之后,再进行坐标转换。对遥测系统送来的引导数据,频率较高,数据较稳定,采用门限法剔除野值后,再参与引导计算。

### 2.3 动基座环境数据

经纬仪外引导方式下工作时,需要将目标的大地坐标转换到经纬仪甲板坐标系。经纬仪舰载应用时,它的稳定跟踪除了定基座所面临的振动干扰,大气干扰,背景干扰外,由于舰的运动和海浪的影响,舰载经纬仪还存在包括舰的艏摇、横摇、纵摇的摇摆和舰的垂荡、横荡和纵荡等干扰运动和甲板扭曲变形的影响,为了隔离舰运动的干扰,在经纬仪的底座上安装环境姿态测量系统<sup>[5]</sup>,该系统采用GPS与惯导组合方式,实时获取经纬仪底座的位置和舰平台的姿态,参与目标引导计算。

## 3 算法及实现

### 3.1 三点截止法

机载下发的GPS数据经数据提取后以时间、大地经纬度、经度、高程和东、北、天速度的形式参与计算,记为 $T, B, L, H, V_e, V_n, V_u$ 。对实际接收数据分析发现有以下几个特点<sup>[6]</sup>:一是数据丢点较多且成片;二是含有偏离正常航迹不多的小野点且常以单点的形式存在;三是一组数据中的各变量 $T, B, L, H, V_e, V_n, V_u$ 出错无相关性,即纬度 $B$ 出错,经度 $L$ 可能正确;四是东北天三向速度 $V_e, V_n, V_u$ 相比大地坐标来说异值较少。下发数据率低,飞机又是大机动目标,关键时刻每个正确数据都非常珍贵。因此,三点截止法的出发点是在剔除掉粗差时用估计值替代的同时,尽量保留正确数据<sup>[7]</sup>。

在数据滤波的顺序上,通常是将大地极坐标系 $T, B, L, H$ 转换到大地切平面坐标直角坐标系后再利用常规的滤波方法,如最小二乘滤波, Kalman滤波等,但是若用含有野值(即使是贴近正确数据的小野值)的数据直接进行坐标转换<sup>[8]</sup>,转换后的数据野值量成几何级数增加。因此,该方法对大地极坐标系下的数据粗差进行剔除,再进行其它的数学计算。

#### 1) 算法

设 $\hat{T}_{k-1}, \hat{B}_{k-1}$ 为前一时刻的数据接收时刻和参数估计值, $T_k, B_k$ 为当前时间和数据实测值,算法分三步:

第一步:判断是否 $\text{abs}(B_k - \hat{B}_{k-1}) > \lambda \cdot D_i \cdot \text{abs}(dB)$ ,

如果是, 则到第二步; 如果不是, 则到第三步;

第二步:  $\hat{B}_k = \hat{B}_{k-1} + D_i \cdot dB$ ;

第三步:  $\hat{B}_k = B_k$ 。

第二步连续只执行三次, 第四次跳过第二步直接执行第三步。 $\lambda$  由试验确定, 试验表明: 对经度和纬度处理取 5, 高程处理取 20。

### 2) $D_i, dB$ 的确定

$D_i$  表示当前接收时刻与上次接收时刻之间所经过的时间周期数<sup>[9]</sup>, 可由接收数据的计算机时刻决定。 $dB$  表示  $D_i$  内目标的位置变化, 可由目标的速度估计得到, 采用五点中位数法估计, 设  $V_x(k-4), V_x(k-3), V_x(k-2), V_x(k-1), V_x(k)$  表示  $T_k$  时刻已采集到的速度的前 5 个采样值, 则:

$$\begin{aligned} \hat{V}_x &= \text{median}(V_x(k-4), V_x(k-3), \\ &V_x(k-2), V_x(k-1), V_x(k)), \quad (1) \\ dB &= \text{function}(\hat{V}_x), \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $\text{median}$  表示取中位数, 速度估计  $\hat{V}_x$  的下标  $x$  表示 GPS 的东、北、天三向速度,  $\text{function}$  表示大地切平面直角坐标到大地极坐标运算。

## 3.2 外推内插法

在光电目标引导时, 光电经纬仪要求的引导速率为 50 Hz。对飞机下发的 1 Hz 数据, 通常的作法对已接收到的若干个数据<sup>[10]</sup>, 采用多项式拟合外推, 由于下发的数据频率太低, 飞机又是高速运动目标, 下一个接收到的数据与上个时间点的第 49 个外推数据存在明显的“台阶”, 用这样的数据引导光电经纬仪, 导致光电经纬仪的主镜筒出现明显的抖动。外推内插法很好地解决了该问题。

### 3.2.1 1 Hz 数据的外推

设  $t_k$  时刻 ( $k \geq 5$ ) 系统已接收到 5 组数据  $\{t_{k-i}, x_{k-i}\}$ , ( $i = 4, 3, 2, 1, 0$ ), 用二次多项式  $x = a + bt + ct^2$  拟合, 外推出  $t_{k+1}$  时刻的估计值  $\hat{x}_{k+1}$ 。用滑窗最小二乘估计系数  $a_k, b_k, c_k$ , 则:

$$(a_k \quad b_k \quad c_k)^T = (A_k^T A_k)^{-1} A_k^T X_k. \quad (3)$$

其中:

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & t_{k-5} & t_{k-5}^2 \\ 1 & t_{k-4} & t_{k-4}^2 \\ 1 & t_{k-3} & t_{k-3}^2 \\ 1 & t_{k-2} & t_{k-2}^2 \\ 1 & t_{k-1} & t_{k-1}^2 \end{bmatrix}, X_k = \begin{bmatrix} x_{k-5} \\ x_{k-4} \\ x_{k-3} \\ x_{k-2} \\ x_{k-1} \end{bmatrix}, k \geq 5.$$

则:

$$\hat{x}_{k+1} = a_k + b_k(t_k + 1) + c_k(t_k + 1)^2. \quad (4)$$

### 3.2.2 数据内插

根据在  $t_k$  时刻的测量值  $x_k$  与  $t_{k+1}$  时刻的估计值  $\hat{x}_{k+1}$ , 用线性插值获取  $t_k$  和  $t_{k+1}$  之间的 48 个估计值, 设  $x_k^i$  为  $t_k$  和  $t_{k+1}$  之间的第  $i$  个估计,  $N$  为要内插的数据个数, 则:

$$x_k^i = x_k + (\hat{x}_{k+1} - x_k) \cdot \frac{i}{N}, \quad (5)$$

其中  $i = 1, \dots, N-1$ 。

从该公式可得出, 当  $i = 0$  时, 估计值为  $t_k$  时刻的测量值; 当  $i = N$  时, 估计值为  $\hat{x}_{k+1}$ , 这时下一个实时数据  $x_{k+1}$  已接收到, 下一个周期的估计循环开始。

## 3.3 渐进式跟踪算法

舰载机飞行试验时, 不同的任务需求会配备各种测量系统, 除了机载 GPS 外, 一般舰上装备的遥测系统、雷达系统等均可用于光电经纬仪引导。在引导源切换时, 由于各系统中系统误差、随机误差、测量误差、标校误差的存在, 从各系统解算的飞机位置在空间并不重合<sup>[11]</sup>, 当外引导源切换时, 引起经纬仪镜头的抖动。应用渐进式跟踪算法在不占用太多系统资源的情况下采用引导源的融合结果解决了该问题。

当外引导源切换时, 以时间为基准分别取源 1 和源 2 数据, 并在时间上有一定重叠(如 2 s), 在切换前, 用源 1 数据作为引导源, 切换后, 用源 2 数据作为引导源, 在切换的过程中用渐进式跟踪算法计算出引导数据。数学模型如下:

设有  $K$  个数据重叠,  $\theta_1$  为源 1,  $\theta_2$  为源 2, 则切换过程中引导数据:

$$\theta_{12}(i) = \frac{K-i}{K} \theta_1 + \frac{i}{K} \theta_2. \quad (6)$$

## 3.4 引导解算

光电经纬仪与舰甲板固定连接, 经纬仪镜头的指向(方位角  $A$  和俯仰角  $E$ ) 解算要在甲板系下完成, 目标坐标的解算在大地坐标系, 甲板系与大地系之间的转换通过舰载 GPS/INS 组合惯导测量系统获得的舰姿态信息和舰位信息解算得到<sup>[12]</sup>。

### 3.4.1 甲板系下目标解算

设舰载 GPS/INS 系统测得的舰位大地坐标为  $(B_0, L_0, H_0)$ , 飞机下发的 GPS 位置信息为  $B, L, H$ , 根据文献[1]计算出飞机在以  $B_0, L_0, H_0$  为原点的大地切平面坐标<sup>[13]</sup>为  $(X_g, Y_g, Z_g)$ , 则目标在以经纬仪三轴交点为圆心的甲板坐标系  $O_j - X_j Y_j Z_j$  下的坐标  $(X_j, Y_j, Z_j)$  为

$$\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:  $\psi, \theta, \gamma$  为舰的姿态角, 定义见 2.1.3 节,  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  为 GPS/INS 系统舰位 GPS 点在  $O_j - X_j Y_j Z_j$  的坐标, 可静态标校得到。

### 3.4.2 引导解算

不失一般性, 设经纬仪的方位与舰艏线平行并指向舰艏, 则经纬仪的引导方位角  $A$  和俯仰角  $E$  可以表示为

$$A = \arg \tan(X_j / Y_j), \quad (8)$$

$$E = \arg \tan\left(\frac{Z_j}{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2}}\right). \quad (9)$$

方位角速度:

$$dA = \frac{Y_j}{X_j^2 + Y_j^2} (Y_j dx - X_j dy). \quad (10)$$

俯仰角速度:

$$dE = \delta \cdot \{-X_j Z_j dx - Y_j Z_j dy + (X_j^2 + Y_j^2) dz\}. \quad (12)$$

其中: 
$$\delta = \frac{1}{(X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2)\sqrt{X_j^2 + Y_j^2}}, \quad (13)$$

式中:  $dx, dy, dz$  为飞机在  $O_g - X_j Y_j Z_j$  坐标系下三向的瞬间位移变化率, 可通过机载 GPS 下发数据中目标的东、北、天三向速度经过必要坐标旋转获得。

## 4 试验分析

### 4.1 三点截止法

如图 1 所示, 某日实际接收的数据如星号, 从上到下依次为接收到的时间、纬度、经度、高程数据, 不但包含偏离真实数据较大的大野值点, 也包含与真实数据很“贴近”的小野值点, 圆点是剔除野值后的结果<sup>[13]</sup>。

### 4.2 外推内插法

如图 2, 野值剔除后的飞机定位信息经坐标转换后, 数据频率仍然很低(图中星号所示)。采用该算法将低频率数据处理成经纬仪引导所需的高频率数据<sup>[14]</sup>。图 2 为采用最小二乘外推结果与本方法的结果比较, 从图可看出, 最小二乘外推结果呈“刺猬”状, 本方法的外推结果平滑连续。

### 4.3 渐进式跟踪算法

如图 3, 星号表示源 1, 圈表示源 2, 点表示切换过程的数据融合结果, 从引导源 1 切换到引导源 2, 采用式(6)的算法<sup>[15]</sup>, 可平滑地完成引导源的切换。

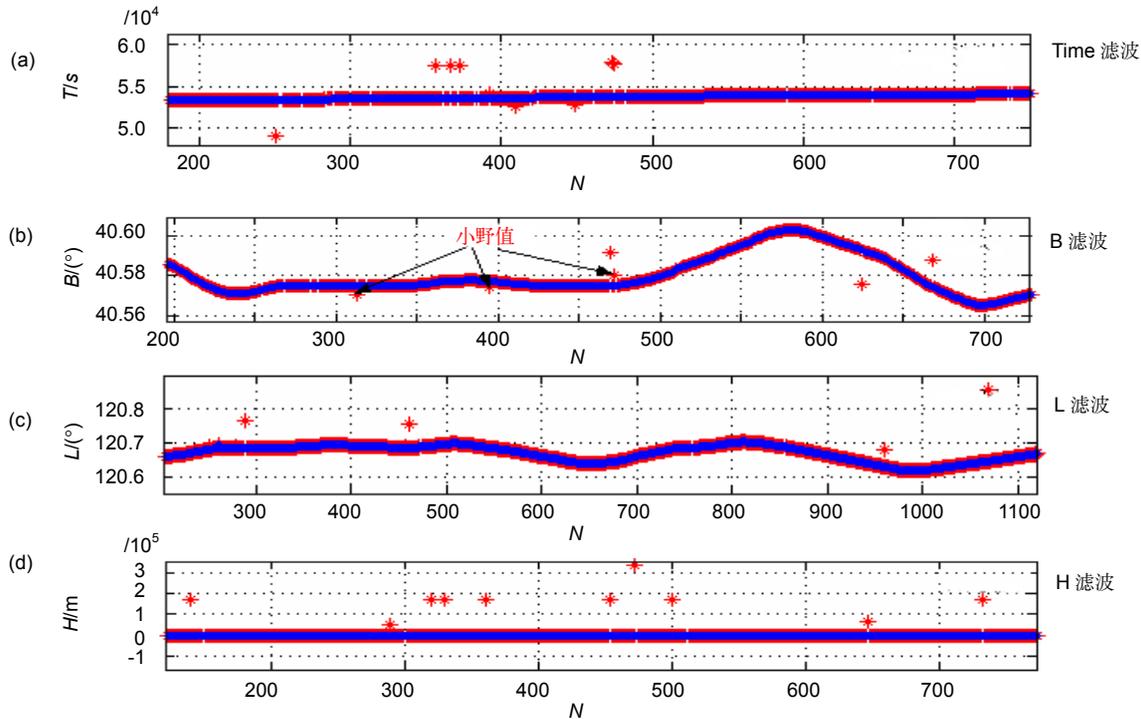


图 1 三点截止法剔除野值。(a) 时间。(b) 纬度数据。(c) 经度数据。(d) 高程数据。

Fig. 1 Three points cut-off method to eliminate outliers. (a) Time. (b) Latitude data. (c) Longitude data. (d) Altitude data.

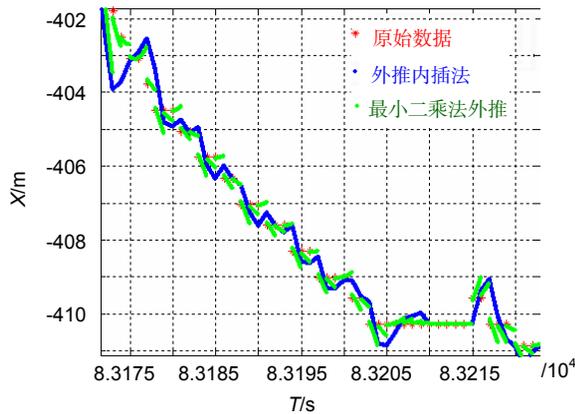


图2 外推内插法与最小二乘法外推。

Fig. 2 Extrapolation-interpolation method and the least squares extrapolation.

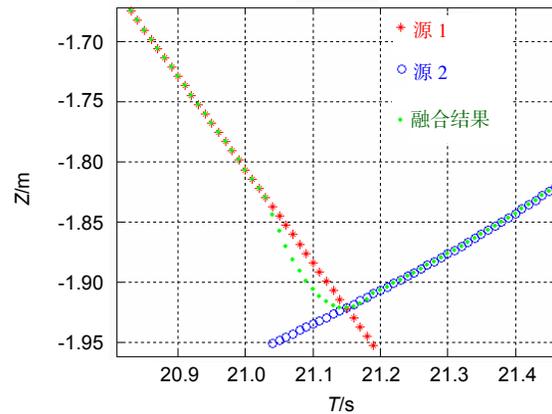


图3 渐进式跟踪算法数据融合。

Fig. 3 Data fusion of progressive tracking algorithm.

## 5 结束语

舰载机飞行试验中, 根据光电设备的引导需求, 分析了机载系统可提供数据特点, 研究并实现了舰载环境下光电经纬仪的引导算法。通过飞行试验验证, 方法有效可行, 已应用到舰载环境的数据处理和目标跟踪中, 文中的数据处理方法也可推广应用到其它目标, 如导弹、舰艇和民用飞机的航迹和姿态解算中。

## 参考文献

- Zhang Zi, Hu Yucong, Zhang Chuanchun, et al. Designing parking guidance information system based on internet of things[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **668-669**: 1263-1268.
- Yao Zhiqiang, Zhu Hengjun, Du Wenhe. Design and implementation of automated warehouse monitoring system based on the internet of things[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **543-547**: 1099-1102.
- Zhou Fengli, Li Qing. Parking guidance system based on ZigBee and geomagnetic sensor technology[C]// Proceedings of 2014 13th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science, 2014: 268-271.
- Patil M, Reddy S R N. Design and implementation of home/office automation system based on wireless technologies[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, **79**: 19-22.
- Hou Haixiao. External Guide For Photoelectric Theodolite Based on Telemetry PCM Receiving Channel[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42(7)**: 36-41.  
侯海啸. 基于遥测 PCM 接收通道的光电经纬仪外引导[J]. *光电工程*, 2015, **42(7)**: 36-41.
- Li Fengmei, Wei Yaoguang, Chen Yingyi, et al. System design of online monitoring and controlling system based on Zigbee in greenhouse[M]// Li D, Chen Y. Computer and Computing Technologies in Agriculture VIII. CCTA 2014. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Cham, 2015, **452**: 702-713.
- Yang Tingwu, Zhang Zhengzhong. Optical-Electronic Measurement Theory and Methods in Flight Test[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 2014: 71-77.
- 杨廷梧, 张正中. 航空飞行试验光电测量理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 71-77.
- Qiu Weimin, Dong Linxi, Wang Fei, et al. Design of intelligent greenhouse environment monitoring system based on ZigBee and embedded technology[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics-China, 2015: 1-3.
- Yan Hui, Wu Heng, Hu Binghua. Precise Measurement by Single Theodolite on Moving Platform without Laser Ranging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41(4)**: 30-34.  
晏晖, 吴衡, 胡丙华. 无激光测距的动平台经纬仪单站精确测量[J]. *光电工程*, 2014, **41(4)**: 30-34.
- Zhang Jie, Wang Jinghai, Shi Lei, et al. The Research of Real-time Attitude Measurement Based on Theodolite by Using Auto collimation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42(5)**: 39-44.  
张杰, 王京海, 石磊, 等. 一种经纬仪自准直姿态实时测量方法[J]. *光电工程*, 2015, **42(5)**: 39-44.
- Wang Kaikai, Sun Kelin, Zhou Pei. Implementation of the photoelectric theodolite image real-time compression[J]. *Microcomputer & its Applications*, 2014, **33(16)**: 31-33.
- Li Guoyou, Fu Chengyu, He Peilong, et al. The method of miss distance measurement based on coordinate operation of radar and photoelectric theodolite[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, **34(2)**: 168-171.
- Tabatabaeifar A, Shafeian M A, Banizaman H, et al. Design and implementation of a web-based greenhouse remote monitoring system with zigbee protocol and GSM network [J]. *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, 2014, **5(19)**: 71-79.
- Sultan Mahmud Rana G M, Khan A A M, Hoque M N, et al. Design and implementation of a GSM based remote home security and appliance control system[C]// International Conference on Advances in Electrical Engineering, 2014: 291-295.
- Hasan R, Khan M M, Ashek A, et al. Microcontroller Based Home Security System with GSM Technology[J]. *Open Journal of Safety Science & Technology*, 2015, **5(6)**: 55-62.