

## 航母中线电视监视系统的设计

赵建川<sup>1\*</sup>, 邵俊峰<sup>2,3</sup>, 王弟男<sup>2</sup>, 陈长青<sup>2</sup>, 王锐<sup>2</sup>

(1. 海军驻长春地区军代表室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 研究设计了航母中线电视监视系统。依据照度、对比度及分辨率要求提出了一套基于电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)的光电成像系统。分析了航母中线电视监视系统的舰载稳定平台的精度要求,并探讨了该系统可采用的图像处理算法。分析表明:采用主流的 Andor Ixon EMCCD 并配合口径为 40 mm 的光学系统可满足照度、对比度和分辨率的要求;采用 Petzval 形式初步设计的  $F/2$  光学系统,其光学传递函数接近衍射极限;而现有舰载稳定平台技术可以满足指向稳定的需要。最后,分析了形心算法、边缘算子算法在获取着舰机位置和姿态角的应用。该系统具有全天候工作能力,适用于航空母舰的着舰引导。

**关键词:** 航母助降;光电成像系统;综合电视监视;电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)

**中图分类号:** U665.261; TN949.299 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120506.0625

## Design of centerline television surveillance system for aircraft landing on carriers

ZHAO Jian-chuan<sup>1\*</sup>, SHAO Jun-feng<sup>2,3</sup>, WANG Di-nan<sup>2</sup>, CHEN Chang-qing<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>

(1. *Naval Military Representative Office in Changchun, Changchun 130033, China;*  
2. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130049, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: zaojc@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** A centerline camera subsystem is designed for the mother-ship recovery television surveillance system. An Electron Multiplying Charge-coupled Device(EMCCD)-based Electrical-Optical(EO) imager is proposed according to the requirements for illumination principle, imaging contrast and resolution. The stability of a gyro-stabilized platform and the accuracy of a centerline camera are analyzed, and several imaging processing methods are discussed to solve the problems of position and inclination angles. It is found that the EO system

收稿日期:2012-09-21;修订日期:2012-11-23

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室自主基础研究课题资助项目(No. SKILLM 1004-002);院地合作长吉图专项基金资助项目(No. 2011CJT0006)

based on Andor Ixon EMCCD with a diameter of 40 mm can fulfill the optical requirements for the centerline camera. The  $F/2$  optical system based on a petzval show its MTF to be close to the diffraction limit. The stability and accuracy status-quo gyro-stabilized platform is enough for the surveillance system. The centroid algorithm and edge operator imaging processing method are proposed to calculate the altitude, latitude and inclination. The designed system is capable of performing surveillance with 24-hours a day, which is suitable for aircraft landing on carriers.

**Key words:** landing-aid in mother-ship;Electrical-Optical(EO) imager;integrated television surveillance;Electron Multiplying Charge-coupled Device(EMCCD)

## 1 引言

航母起降综合电视监视系统由中线监视光电子系统、全局监视子系统、起飞监视子系统、阻拦监视子系统、尾钩监视子系统等单元系统组成。系统所用的视频摄像技术能够提供最直观、最及时的信息<sup>[1]</sup>,同时系统记录的视频、音频信息还可用于考核飞行员的起降驾驶技术,进行事故分析等,其中,中线监视子系统是着舰指挥官实时获取舰载机飞行姿态信息的关键手段<sup>[1]</sup>。着舰指挥官可以利用中线监视系统得到着舰机在降落过程中的飞行姿态、飞行高度以及尾钩状态,还能获得着舰下降角度与飞行甲板及海平面的关系,这样着舰指挥官就可以指挥、协助飞行员进行着舰作业。

中线电视监视系统成像质量和分辨率对飞行姿态、下滑道精度以及母舰甲板与海平面夹角的测量精度起决定性作用。实现全天时监视对于舰载机起降的时段也非常重要,是系统的一项关键指标,一般需要采用微光夜视技术或中长波红外探测器技术实现。近年来,国外研制的中线电视监视系统除采用传统的光电被动成像技术以外,还发展了新型激光姿态测量等技术途径<sup>[2]</sup>,但是这些技术实现难度大、性能不稳定,而且成本高昂,实用性较差。传统光电成像技术仍为最主流、具有稳定性能的着舰监视手段。本文采用电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)作为核心器件,围绕成像系统视轴稳定、光电器件选择及光学系统设计、图像处理等关键问题进行探讨,从而解决中线电

视监视系统的设计问题。

## 2 中线监视系统设计

### 2.1 视轴稳定

船体摇晃会引起舰载光电系统的视轴晃动,从而导致获得的成像图像模糊,在跟踪过程中甚至能造成目标丢失<sup>[3]</sup>。成像设备对稳定精度的典型要求是在积分时间内视轴不稳定引入的晃动量小于 $1/3 \sim 1/2$ 的瞬时视场(单位像元所对应的视场角)。本中线电视监视系统设计的瞬时视场为 $0.2 \text{ mrad}$ (见下文分析计算),因此,要求跟踪精度 $< 66 \mu\text{rad}$ 。

为了克服舰体晃动带来的问题,通常需要引入光电稳定平台来稳定视轴<sup>[3-5]</sup>。在具体实现时,目前可以采用方位框架和俯仰框架安装单轴速率陀螺的途径进行两轴分量的补偿。文献[6]提出采用测速机构成闭环,陀螺测量、前馈船摇速度信号的伺服控制方法。对典型舰船五级海况(横摇 $20^\circ$ 、纵摇 $6''$ ,周期分别为 $10 \text{ s}$ 和 $8 \text{ s}$ ),采用前馈控制后的速度和加速度总跟踪误差 $< 0.072'$ ,即 $21 \mu\text{rad}$ ,可以满足小于 $66 \mu\text{rad}$ 的技术要求。可见该系统对于伺服控制要求相对较高,稳定跟踪精度还需要进行实际验证。

### 2.2 作用距离分析

中线电视监视子系统需要全天候提供着舰机清晰像,高分辨率是关键。本文提出采用EMCCD实现中线电视监视系统高分辨率、全天候工作能力的要求。根据系统对目标的识别能力及作用距离要求,分析了EMCCD的技术优势,计算了光学

系统的焦距和相对口径,满足对比度、分辨率的技术要求。

### 2.2.1 EMCCD 技术

EMCCD 和普通 CCD 相比,读出寄存器之后增加了倍增寄存器(如图 1 所示),可以从根本上克服相机的读出噪音,从而提供微弱图像采集方案。经过电子倍增后的增益  $G$  为:

$$G = (1 + R)^M, \quad (1)$$

式中: $R$  为平均每个倍增单元的平均增益, $M$  为每个倍增寄存器的倍增单元。

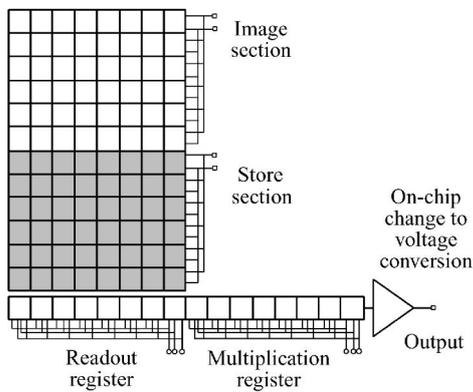


图 1 EMCCD 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EMCCD structure

目前科研领域广泛使用的 Andor Ixon DU897 型号 EMCCD 具有优越的弱信号检测能力,靶面最小亮度可达  $1 \mu\text{lx}$ 。因此,在设计航母中线监视系统时采用了 EMCCD 作为核心器件以实现全天候、高分辨率的监视能力。同时,该型号 EMCCD 具有很好的高速、高分辨率特性,其指标参数:单元像素尺寸为  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ ,有效像元数为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,帧频高达  $100 \text{ Hz}$ 。高帧频为着舰引导提供了高实时数据,具有重要作用。

EMCCD 为科学级相机产品,对环境要求相对苛刻。典型工作温度为  $0 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,典型工作相对湿度要求小于  $70\%$ 。但在极端条件下,海洋环境高温可达  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,海洋相对湿度达  $70\% \sim 95\%$ <sup>[7]</sup>。考虑到中线电视监视系统位于航母甲板凹槽中,并不与外界海洋环境直接接触,因此,可采用舰载电子设备循环风冷式密闭机柜技术<sup>[8]</sup>,并进行“三防”设计来满足舰载环境应用。

### 2.2.2 舰载机着舰下滑道的分辨率分析

下滑道指示精度决定着舰机与理想下滑道之间的偏差估计,是中线电视监视系统的最主要的技术指标。约翰逊判据<sup>[9]</sup>指出识别目标至少需要  $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ ,因此,采用角度分辨率与焦距、像素尺寸的几何关系式:

$$\beta = d/F, \quad (2)$$

式中: $\beta$  为角度分辨率, $d$  为像素尺寸, $F$  为光学系统焦距。

考虑到视场与分辨率、单元像素的关系:

$$V = N \times \beta, \quad (3)$$

式中: $\beta$  为角度分辨率, $N$  为像素个数, $V$  为视场。

以前面提到的 Andor Ixon DU897 型号 EMCCD 作为探测元件,中线电视监视系统水平视场典型值为  $\pm 3^\circ$  (以着舰跑道中线为中心),垂直视场典型值为  $\pm 1.4^\circ$ <sup>[1]</sup> (以理想下滑道为中心),由式(1)、(2)得到焦距为  $80 \text{ mm}$ 。此时单元像素对应的视场角为  $0.19 \text{ mrad}$ 。假设舰载机的典型线度为  $15 \text{ m}$ ,在  $3 \text{ km}$  远处分辨率达到  $0.6 \text{ m}$ ,飞机线度为  $25 \text{ pixel}$ ,满足约翰逊判据要求,而且提供了 3 倍的余量,为图像处理飞机的形心、姿态角提供了足够裕度,能够满足舰载机着舰的精度要求。

### 2.2.3 目标亮度和对比度

在空间分辨率满足要求的前提下,需要计算探测器接收目标亮度及对比度,分析所选探测器器件是否满足全天候工作需要。判定条件依据照度方程<sup>[10]</sup>:

$$E_m \geq E_c, \quad (4)$$

式中: $E_m$  为探测器上目标照度值, $E_c$  为探测器表面最小许用照度。

探测器接收的目标照度为:

$$E_m = \frac{1}{4} E_0 \rho \tau_0 \tau_1 \alpha \left(\frac{D}{f}\right)^2, \quad (5)$$

式中: $E_0$  是夜间月光的照度,为  $0.02 \sim 0.3 \text{ lx}$ ;  $\rho$  为目标反射系数,  $\rho = 0.35$ ;  $\tau_0$  为典型海洋条件下大气透过率,  $\tau_0 = 0.50$  (传输距离  $5 \text{ km}$ );  $\tau_1$  是光学系统透过率,  $\tau_1 = 0.50$ ;  $\alpha$  为光学弥散系数,取  $\alpha = 0.80$ ;  $D/f$  是光学系统的相对口径,取为  $1/2$ ,以保证较高的照度。探测器表面目标照度值  $E_m = 348 \mu\text{lx}$ ,EMCCD 的最小许可照度约为  $1 \mu\text{lx}$ 。因此,即使在极端条件下目标在探测器接收的照度仍远大于最小许用照度。

根据成像对比度的国际标准<sup>[12]</sup>,目标与背景对比度  $C$  应大于最小许用对比度  $[C]$ :

$$C = \left| \frac{E_m}{E_b} - 1 \right| > [C]. \quad (6)$$

探测器接收的夜晚天空背景照度为:

$$E_b = \frac{\pi}{4} B_b \tau_1 (D/f)^2, \quad (7)$$

式中:星夜条件背景亮度典型值  $B_b = 0.002 \text{ lx}$ ;光学系统透过率  $\tau_1 = 0.50$ ;光学系统相对口径  $D/f = 1/2$ 。

通过计算,  $E_b = 196 \mu\text{lx}$ ,  $C = 0.77$ ,按国际标准  $[C] = 0.02 \sim 0.1$ <sup>[12]</sup>,显然  $C > [C]$ ,满足目标与背景最小对比度要求。

值得注意的是,在相对口径的选择上,应该尽量选择较大值,以保证目标的亮度即使在夜间也较高。实际应用时目标亮度要远远高于极端值。白天环境照度可达  $1\ 000 \sim 10\ 000 \text{ lx}$ 。估算可知实际靶面照度值为极端计算值的  $2 \sim 6$  个数量级以上,因此,可以满足亮度、对比度的要求。

### 2.3 光学系统设计

根据所提出的技术指标,焦距为  $80 \text{ mm}$ ,相对孔径为  $1:2$ ,视场为  $6.5^\circ$ ,属于大相对孔径,小视场结构,采用 Petzval 结构(见图 2)。该结构球差、彗差可以得到很好的校正,因此,相对孔径可以做得很大,中心视场成像质量优良。在靠近像

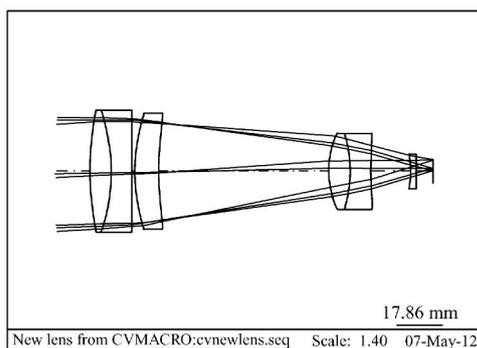


图2 光学系统设计

Fig. 2 Optical Layout

面处增加一个负透镜来校正场曲,并在前后两组之间再增加一个近于不晕的透镜以增大相对孔径。这样,不但可以增大光学视场,同时也提高了相对孔径。

系统传递函数如图 3 所示,在  $50 \text{ lp/mm}$  处系

统中心视场及边缘视场 MTF 值均在  $0.75$  以上,能够保证整个视场范围内良好的成像质量。

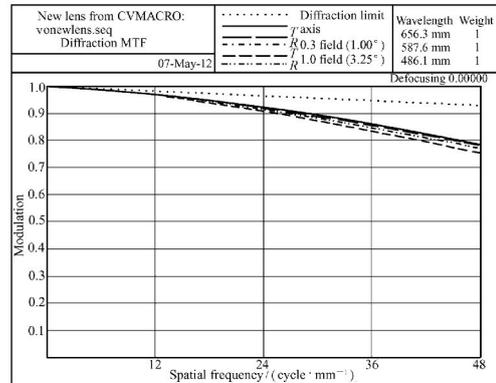


图3 光学系统传递函数

Fig. 3 MTF of optical system

### 2.4 图像处理

图像处理的目的是为获得目标的形心及姿态角信息。为计算目标形心,可采用 Sobel 算子求取目标的边缘<sup>[13]</sup>,然后对目标进行二值化处理后再计算目标的形心。通过对比形心与水平参考线和垂直参考线交点相互位置,可计算得到目标的偏移信息,从而得到舰机与甲板相对高低、与理想对中线的偏移。为获得飞机的姿态角,利用二值化的图像,可采用横向和纵向逐行扫描的方式求得舰机的机翼、机身角点,从而拟合出其姿态角。

从上节瞬时视场指标可估算姿态角分辨率为  $0.6 \text{ mrad}$ (为 3 倍瞬时视场值)。更准确的指标依赖于所选用的具体算法。

## 3 结 论

本文探讨了航母中线电视系统的功能和组成,并对电视监视系统进行了设计。最终的设计指标为:(1)光学系统的口径为  $\Phi 40 \text{ mm}$ ,相对孔径为  $1/2$ ,视场为  $6.5^\circ$ ;(2)核心成像器件选择 Andor Ixon EMCCD,像元为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,姿态角分辨率优于  $3'$ ,可满足舰载机助降的需要。分析结果表明:所设计的光学系统满足照度、对比度和分辨率的要求,能够满足全天候工作的技术要求。采用前馈控制的舰载稳定平台技术可以实现小于等于  $66 \mu\text{rad}$  的指向稳定指标。根据

所提出的技术指标,对采用的光学系统进行了设计。分析了形心算法、边缘算子等算法在获取舰机位置和姿态角的应用。本文对开展舰载光电系统应用、舰载机着舰引导与监视技术研究提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] US Department of the Navy, Landing signal officer reference manual(Rev B)[G]. VIRGINIA: Landing Signal Officers School Naval Air Station Oceana Virginia Beach, 1999.
- [2] 朱大勇,莫文凯. 航母飞机着舰引导与姿态监视技术新进展[J]. 激光杂志, 2009, 20(5): 4-6.  
ZHU D Y, MO W K. New technique headway for induct landing of aircraft carrier flight and attitude surveillance[J]. *Laser J.*, 2009, 20(5): 4-6. (in Chinese)
- [3] 郑峰婴,杨栋,胡恩勇. 激光助降侧向目视对中着舰引导系统[J]. 应用科学学报, 2008, 26(4): 430-435.  
ZHENG F Y, YANG D, HU E Y. Laser aided lateral visual lineup landing system for carrier aircraft[J]. *J. Appl. Sci.*, 2008, 26(4): 430-435. (in Chinese)
- [4] 郑峰婴. 舰载机着舰引导技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
ZHENG F Y. Research on carrier landing technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [5] 邹东明,刘栖山,陈长青,等. 舰载光电跟踪设备视轴稳定分析[J]. 武器装备自动化, 2003, 22(1): 15-19.  
ZOU D M, LIU X SH, CHEN CH Q, et al. . Stabilization analysis of LOS for carrier based electro optical tracking equipment[J]. *Armament Automation*, 2003, 22(1): 15-19. (in Chinese)
- [6] 骆乐. EMCCD 噪声特性分析与测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.  
LUO L. EMCCD noise characteristics analysis and detection test technique research[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [7] 刘永,徐晓. 舰载电子设备循环风冷式密闭机柜[J]. 雷达与对抗, 2008(4): 53-55.  
LIU Y, XU X. A circular wind-cooled airtight cabinet for ship borne electronic equipment[J]. , 2008(4): 53-55. (in Chinese)
- [8] 张卫国,王玉坤,王斌. 舰载光电设备的防护技术及设计[J]. 红外技术, 2008, 30(4): 214-216.  
ZHANG W G, WANG Y K, WANG B, et al. . Design and three-proofing technique of shipborne optic-electronic equipment[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(4): 214-216. (in Chinese)
- [9] RATCHES J A. Night vision modeling: historical perspective[J]. *SPIE*, 1999, 3701: 2-12.
- [10] 黄猛,张葆,沈宏海,等. 海上光电监视系统的设计与研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 849-852.  
HUANG M, ZHANG B, SHEN H H, et al. . Design and study of a seaborne electro optical surveillance system[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2007, 36(6): 849-852. (in Chinese)
- [11] 周蓓蓓. 电子倍增 CCD 的工作模式及其光子计数成像研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.  
ZHOU B B. Research on the operating modes of the EMCCD and its applications in photon counting imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Sciences and Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] GERALD H. *CCD Arrays, Cameras, and Displays*[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 1998: 351-359.
- [13] 刘清,林土胜. 数学形态学的边缘检测算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(35): 188-189.  
LIU Q, LIN T SH. Edge detection algorithm based on multi-structure element multi-scale mathematical morphological [J]. *Computer Eng. Appl.*, 2008, 44(35): 188-189. (in Chinese)

作者简介:赵建川(1969—),男,吉林长春人,工程师,主要从事光电设备研制和改造的研究。E-mail:zaojc@ciomp.ac.cn