第 35 卷 第 1 期
2014 年 1 月

仪 器 仪 表 学 报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 35 No. 1
Jan. 2014

惯导平台下舰载光电设备舷角正交测距技术*

李 焱，张海波，张 强，董宇星

（中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033）

摘 要： 受到海面高温、高湿以及舰载光电设备体积、激光测距功率等综合因素的影响，激光测距机在海天环境下威力大大减小，特别是远距离目标的测距能力几乎为零，依靠激光测距得到距离信息的舰载光电设备其对抗能力大大减弱。在惯导平台下通过速度滤波前馈实现电视闭环稳定跟踪并结合“舷角正交”测量技术，实现舰面环境下的目标测距。并在 XX 项目中得到较好的实际应用。实现该技术方法主要分为 2 步：当目标同时出现在 2 台光电设备视场内并且对比度满足图像提取阈值要求时，利用 CA 最小二乘滤波模型求出的惯导速度数据前馈到速度回路，结合电视脱靶量信息完成电视跟踪的闭环控制；将 2 台光电设备以舷角正交的方式进行目标信息交汇数据处理，得出距离信息。通过试验，验证了该技术可实现远距离目标的测距，海天环境下在测距精度不大于 XX m 时测距距离可达 30 km，甚至更远，远远大于一般舰载激光测距系统。实现了舰载光电对抗设备远距离目标的无源测距，特别是提高了低空掠海目标的测距能力。在雷达静默状态下，可利用三维信息引导制导武器，实现对来袭目标的精确打击。

关键词： 惯导平台；舷角正交；测距；CA 模型；舰载光电设备

中图分类号： TN949.6 TH76 **文献标识码：** A **国家标准学科分类代码：** 460.40

Relative bearing orthogonal distance measurement technique for shipborne optoelectronic equipment based on inertial navigation platform

Li Yan, Zhang Haibo, Zhang Qiang, Dong Yuxing

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

Abstract: Being influenced by the high temperature, high humidity on the sea surface, the volume of the shipborne optoelectronic equipment and the output power of laser ranging, the power of the laser range finder is greatly reduced in such sea-sky environment; especially, the ability for detecting long-range target is near zero. The encounter ability of the shipborne optoelectronic equipment that relies on laser ranging to obtain the range information is weakened greatly. Here in the paper, under the inertial navigation platform we use the filtered speed feed-forward technology to realize the TV closed loop stable tracking, and combine the “side angle orthogonal” intersection measurement technology to realize the target distance measurement in ship-surface environment. The method has already been applied to the XX project successfully. There are two steps for realizing this technology. First, when the target appears simultaneously in the fields of sight of two optoelectronic tracking equipment and the image contrasts meet the threshold requirement for the image extraction, the speed data of the INS calculated with the CA filter model least-squares method is feed-forwarded to the speed loop, which is combined with the TV offset information to achieve the TV tracking closed-loop control. Secondly, the target data information is processed using two optoelectronic tracking instruments with the side-angle orthogonal method, and the distance information is obtained. The experimental results verify that the technology can realize the long distance target ranging; and the ranging distance can reach up to 30 km or longer when the ranging accuracy is not larger than XX m under the sea-sky environment, which is much larger than that of

收稿日期： 2013-01 Received Date: 2013-01

* **基金项目：** 国家 863 计划（2006aa701410）、中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

common shipborne optoelectronic ranging system. We can come to a conclusion that the passive ranging of the long-range ship-based optoelectronic equipment is realized with the side-angle orthogonal intersection method; especially, the ranging ability for low-altitude sea-skimming targets is improved. Under the state of the silent radar, the three-dimensional information can be used to directly guide the weapons to precisely track and attack the incoming targets.
Keywords: inertial navigation platform; relative bearing orthogonal; distance measurement; CA model; shipborne optoelectronic equipment

1　引　　言

由于舰载光电对抗设备的测距系统易受到海面高温、高湿等气象条件影响，特别易受到横、纵、艏摇而导致设备跟踪精度不高，随后带来束散角过大，回波强度变弱，以及设备体积限制，激光测距机功率等综合因素的影响，导致激光测距机在海天环境下威力大大减小，依靠激光测距得到距离信息的舰载光电设备其对抗能力大大减弱。这样无法发挥光电设备的优势，也无法通过火控系统“反引”导弹来对抗远距离来袭目标。

建立视轴稳定[1-2]能在一定程度上起到隔离舰摇的作用，提高跟踪精度，但是由于提高的精度有限，不能成倍或更大地减小束散角来增强回波强度。而且在海空背景高温、高湿环境下激光传输双程透过率严重下降，导致测距能力不够。目前国内外关于交汇测量系统的研究都采用 2 个 CCD“正交交汇”构成交汇靶面或区域[3-4]，但是在实际的舰面环境下受到空间限制做到 2 台设备的光轴空间相互垂直的正交式布站的操作非常困难，双 CCD 交汇测量非正交系统的布站参数优化[5]虽然描述了测量精度与有效视场与基线长度、仰角和视场角 3 个参数的关系，并提出根据有效视场来确定最优设计方法——最小基线法，但是文章仅仅提供了软件仿真结果，没有在实际工程中得到具体应用。文献[6-8]详细分析并给出了 CCD 交汇测量系统布站的精度，文献[9-11]也给出了交汇测量的一些理论分析和低空测距方法，但是都没有建立舰摇环境下的交汇布站方案，更没有相关舰面试验条件下的理论和试验数据分析。

本文在惯导平台下利用前馈控制 CA 模型滤波原理[12-14]结合理论仿真和试验数据而建立的“舷角正交”舰面设备交汇[15-16]布站方案，创新地提出了一种适合舰载光电设备的无源远目标测距策略。本策略根据火控中心台分配的信息，目标同时出现在 2 台光电设备视场内并且对比度满足图像提取阈值要求时，利用 CA 模型最小二乘法求出的惯导速度数据前馈到速度回路，结合电视脱靶量信息完成电视跟踪的闭环控制; 将 2 台光电设备通过“舷角正交”得到的信息进行数据处理，得出目标的距离信息。通过试验，验证了对于海天高温、高湿环境下在测距精度要求不大于 XX m 时测距距离可达 30 km，远远大于一般激光测距系统。通过“舷角正交”法实现了舰载光电对抗设备的无源测距，特别是提高了测量低空掠海目标距离信息的能力。在一定意义上可以弥补雷达受到干扰时的不足，即可利用三维信息引导制导武器实现对来袭目标的精确打击。

2　惯导平台舷角正交测距算法原理

2.1　前馈控制的 CA 模型滤波原理

“舷角正交”任务的前提是建立稳定的闭环跟踪，一旦目标出现在搜索视场并且图像提取阈值满足要求时，主任务便调用 CA 最小二乘滤波模型，将三维惯导角度数据滤波出速度数据，前馈到速度回路，并结合电视脱靶量信息完成电视跟踪的闭环控制。

二阶系统 CA 最小二乘滤波公式:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_s = \hat{\boldsymbol{x}}_{s/s-1} + \dfrac{3(3n^2-3n+2)}{n(n+1)(n+2)}[z_s - \hat{\boldsymbol{x}}_{s/s-1}] \\ \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}_s = \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}_{s/s-1} + \dfrac{18(2n-1)}{n(n+1)(n+2)\Delta t}[z_s - \hat{x}_{s/s-1}] \\ \hat{\ddot{\boldsymbol{x}}}_s = \hat{\ddot{\boldsymbol{x}}}_{s-1} + \dfrac{60}{n(n+1)(n+2)\Delta t^2}[z_s - \hat{\boldsymbol{x}}_{s/s-1}] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\hat{\boldsymbol{x}}_{s/s-1} = \hat{\boldsymbol{x}}_{s-1} + \Delta t\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}_{s-1} + \dfrac{\Delta t^2}{2}\hat{\ddot{\boldsymbol{x}}}_{s-1}$, $\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}_{s/s-1} = \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}_{s-1} + \Delta t\hat{\ddot{\boldsymbol{x}}}_{s-1}$, $\hat{\boldsymbol{x}}_{s/s-1}$ 和 $\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}_{s/s-1}$ 分别表示在 t_{s-1} 时刻未接收新的测量值 z_s 前，只根据目标运动规律对 t_s 时刻的位置、速度预测。Δt 为采样周期，z_s 为 s 时刻新的测量值，n 为有限记忆的维数。

二阶系统的状态转移矩阵即 CA 模型:

$$\boldsymbol{\phi}(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \Delta t^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

观测方程的增益矩阵:

$$\boldsymbol{K}_n = [K_1 \quad K_2 \quad K_3] \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{3(3n^2-3n+2)}{n(n+1)(n+2)}$$

$$K_2 = \frac{18(2n-1)}{n(n+1)(n+2)\Delta t}$$

$$K_3 = \frac{60}{n(n+1)(n+2)\Delta t^2}$$

为观测方程增益矩阵的 3 个增益系数。

避免由于$\lim_{n\to\infty} K_1 = \lim_{n\to\infty} K_2 = \lim_{n\to\infty} K_3 = 0$，新的测量值$z_s$在滤波计算中不起作用，导致滤波计算与实际情况的偏差变的“发散”，而采用有限记忆处理，因此本文采用 n 为 30。

2.2 惯导平台下“舷角正交”测距原理及精度分析

舰面环境下 2 台光电设备对同一目标进行跟踪测量，给出目标飞行的方位、俯仰两维角度数据，并对数据进行交汇处理最终得出飞行目标的空间位置，如图 1 所示。所谓“舷角正交”是指甲板坐标系下 4 台光电设备 O_1、O_2、O_3 和 O_4 的本身旋变方位零点均构成 90°。

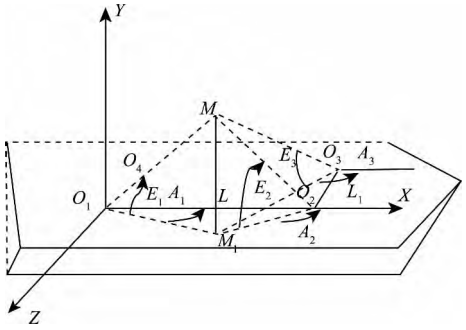


图 1 舷角正交图

Fig. 1 Relative bearing orthogonal diagram

以右舷配备 2 台为例，X 轴指向舰艏。O_1 和 O_2 分别为舰体右舷舰艉和舰艏 2 台光电设备，M 为目标，M_1 为目标在甲板系的投影，L 为 O_1 和 O_2 的距离；E_1、E_2、E_3 分别为 O_1、O_2、O_3 3 台光电设备的高低角。

建立交汇关系可得：

$$[M_1O_2 \quad M_1O_1 \quad MM_1]^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \dfrac{L\sin A_1}{\sin(A_2 - A_1)} \\ \dfrac{L\sin A_2}{\sin(A_2 - A_1)} \\ \dfrac{L\sin A_2}{\sin(A_2 - A_1)}\tan E_1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：E_1 和 A_1 分别为右舷舰艉设备的高低和舷角坐标信息；A_2 为右舷舰艏设备舷角甲板坐标信息；M_1O_2 为舰艏设备距离信息在甲板平面上的投影；M_1O_1 为舰艉设备距离信息在甲板平面上的投影；MM_1 为交汇点在甲板平面的垂高；L 为 O_1 和 O_2 2 台光电设备之间的距离。

以右舷配备 2 台为例，X 轴指向舰艏。

$$[R_1 \quad R_2]^{\mathrm{T}} = [O_1M \quad O_2M]^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \dfrac{L\sin A_2}{\sin(A_2 - A_1)\cos E_1} \\ \dfrac{L\sin A_1}{\sin(A_2 - A_1)\cos E_2} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：R_1 和 R_2 分别为舰艉和舰艏设备的测量距离。

$$R_{纵} = \left| \frac{R_1 + R_2}{2} \right| \tag{6}$$

式中：$R_{纵}$ 为通过“舷角正交”法得到的距离信息。

“舷角正交”法的测距精度关系到引导导弹打击来袭目标的精度，由非线性误差传播定律知：

$$[\mathrm{d}R \quad \Delta R]^{\mathrm{T}} = \left[\frac{\dfrac{\partial f}{\partial L}\mathrm{d}L + \dfrac{\partial f}{\partial A_2}\mathrm{d}A_2 + \dfrac{\partial f}{\partial A_1}\mathrm{d}A_1 + \dfrac{\partial f}{\partial E_1}\mathrm{d}E_1}{\sqrt{\left(\dfrac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \Delta L^2 + \left(\dfrac{\partial f}{\partial A_2}\right)^2 \Delta A_2{}^2 + \left(\dfrac{\partial f}{\partial A_1}\right)^2 \Delta A_1{}^2 + \left(\dfrac{\partial f}{\partial E_1}\right)^2 \Delta E_1{}^2}} \right] \tag{7}$$

式中：$\partial f/\partial L$ 为对距离 L 的偏导 $\dfrac{\sin A_2}{\sin(A_2 - A_1)\cos E_1}$，$\partial f/\partial A_2$ 为对 A_2 角度的偏导 $\dfrac{\cos A_2\sin(A_2 - A_1) - \sin A_2\cos(A_2 - A_1)}{\cos E_1\sin^2(A_2 - A_1)}$，$\dfrac{\partial f}{\partial A_1}$ 为对 A_1 角度的偏导 $\dfrac{L\sin A_2\cos(A_2 - A_1)}{\cos E_1\sin^2(A_2 - A_1)}$，$\dfrac{\partial f}{\partial E_1}$ 为对 E_1 角度的偏导 $\dfrac{L\sin A_2}{\sin(A_2 - A_1)}\sec E_1\tan E_1\Delta L$、$\Delta A_2$、$\Delta A_1$、$\Delta E_1$ 分别各变量上的误差，$\mathrm{d}R$ 为式(5) 中 R_1 的全微分，ΔR 为测距精度。

由此可见测距精度的判别是一个复杂的函数，但是可以得到如下关系：

1) 跟踪仰角 E_1 越大，舷角正交精度越低；

2) 交汇舷角度差正弦值越大，舷角正交精度越高，即仅仅在满足舷角正交精度的前提下，仅仅需要甲板坐标系下舷角正交，或近似舷角正交即可。

3) 跟踪误差越大，舷角正交精度越低；

4) 基线及基线误差越大，舷角正交精度越低。

3 惯导平台舷角正交测距技术实现

3.1 前馈控制 CA 模型滤波的实现

惯导提供的是艏摇 H、纵摇 P、横摇 R 的三维角度已知数据，需要通过有限记忆最小二乘建模，得到速度数据，本文设定如下：

$$X_{k-1} = [H_{n+1/n}, P_{n+1/n}, R_{n+1/n}, \dot{H}_{n+1/n}, \dot{KP}_{n+1/n}, \dot{R}_{n+1/n}, \ddot{H}_{n+1/n}, \ddot{P}_{n+1/n}, \ddot{R}_{n+1/n}]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中：$H_{n+1/n}$、$P_{n+1/n}$、$R_{n+1/n}$ 为电视跟踪状态下，惯导提供的

前 n 场角度数据已知量。即由已知前 n 场角度数据，来外推 $n+1$ 场速度和加速度。

六维的艏摇、纵摇、横摇角速度和角加速度 $\dot{H}_{n+1/n}$，$\dot{P}_{n+1/n}$，$\dot{R}_{n+1/n}$，$\ddot{H}_{n+1/n}$，$\ddot{P}_{n+1/n}$，$\ddot{R}_{n+1/n}$ 是需要通过式(1)得到的未知量，初始化 $n=1$ 时，速度及加速度为零。系统状态转移矩阵为:

$$\boldsymbol{\phi}_{k/k-1}=\begin{bmatrix}1&0&0&\Delta t&0&0&\Delta t^2/2&0&0\\0&1&0&0&\Delta t&0&0&\Delta t^2/2&0\\0&0&1&0&0&\Delta t&0&0&\Delta t^2/2\\0&0&0&1&0&0&\Delta t&0&0\\0&0&0&0&1&0&0&\Delta t&0\\0&0&0&0&0&1&0&0&\Delta t\\0&0&0&0&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0&0&0&0&1\end{bmatrix}\tag{9}$$

式中: 光电和惯导系统同步周期为 $\Delta t=62.5$ ms。

惯性导航角度速度经过建模滤波后平滑出的速度数据是在大地坐标系下的舰体三维摇摆数据 $[\omega_H\quad\omega_P\quad\omega_R]^{\mathrm{T}}$，大地直角坐标系需要先转换为甲板直角系，最终转换为甲板极坐标系进行视轴前馈校正。

$$\begin{bmatrix}\omega_{xc}\\\omega_{yc}\\\omega_{zc}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&1&-\sin P\\-\cos P\cos R&\sin R&0\\\cos P\sin R&\cos R&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega_H\\\omega_P\\\omega_R\end{bmatrix}\tag{10}$$

式中: ω_{xc}、ω_{yc}、ω_{zc} 分别为惯导角度数据在甲板坐标系下的转换值。

将上述转换后的甲板系的三维角度数据结合艏摇 H、纵摇 P、横摇 R 角度数据以及视轴指示角度方向，通过视轴校正，得到方位和俯仰的扰动速度[17]。

$$\begin{cases}A_{cv}=\omega_P\sin R-\omega_H\cos P\cos R-\\\tan E_c\left[(\omega_R-\omega_H\sin P)\cos A_c+\omega_P\cos R+\right.\\\left.\omega_H\cos P\sin R\right)\sin A_c\right]\\E_{cv}=-(\omega_P\cos R+\omega_H\cos P\sin R)\cos A_c+\\(\omega_R-\omega_H\sin P)\sin A_c\end{cases}\tag{11}$$

式中: A_c、E_c 分别为视轴指向的方位和俯仰角度; E_{cv}、A_{cv} 为视轴扰动速度，ω_H、ω_P、ω_R 分别为通过有限记忆最小二乘滤波得到的速度值 $\dot{H}_{n+1/n}$、$\dot{P}_{n+1/n}$、$\dot{R}_{n+1/n}$。

将校正后得到的视轴方位、俯仰速度扰动 E_{cv}、A_{cv}，前馈引入到速度回路，即实现了舰载光电搜索跟踪系统的前馈控制，如图 2 所示。

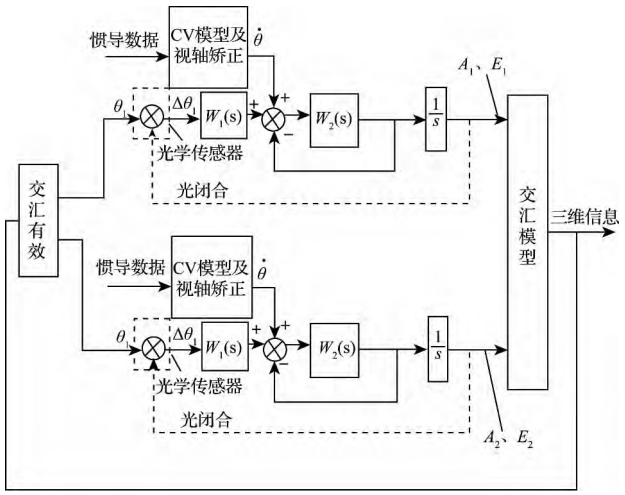


图 2　控制原理图

Fig. 2 The control principle diagram

3.2　惯导平台下舷角正交测距实现

整舰以 4 台配置为例，如图 3 所示，实线表示物理连接关系，说明 1 号、2 号、3 号、4 号跟踪仪分别与武控系统进行网络连接; 虚线表示测距空间连接，说明 2 台跟踪仪可对空中同一目标进行跟踪测距。

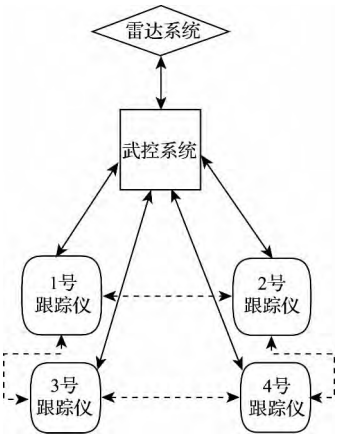


图 3　测距关系图

Fig. 3 The relationship diagram of distance measurement

本文仅以右舷舰艏、舰艉为例，根据“舷角正交”测距原理及精度分析推导，采用 2 台设备的舷角零点正交布站方式; 通过速度前馈滤波稳定转电视跟踪后，按通讯周期给出同一目标的 E_1、A_1 和 E_2、A_2 按式(5)计算出距离信息。

4　试验与分析

4.1　舷角正交测距精度仿真分析

相邻 2 台设备光轴舷角正交方式布站，按照式(7)用 MATLAB 空间组网进行仿真分析，仿真步长为 1°，范围取 0° ~ 180°，如图 4 所示。同样选取仿真步长为 10°，范围取 0° ~ 180°，如图 5 所示。

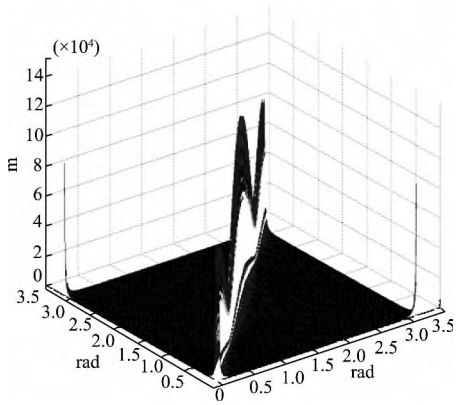
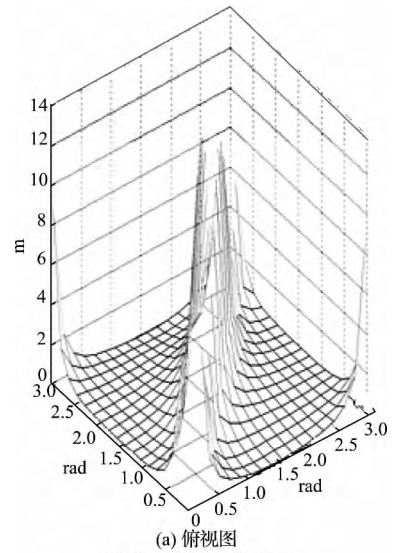


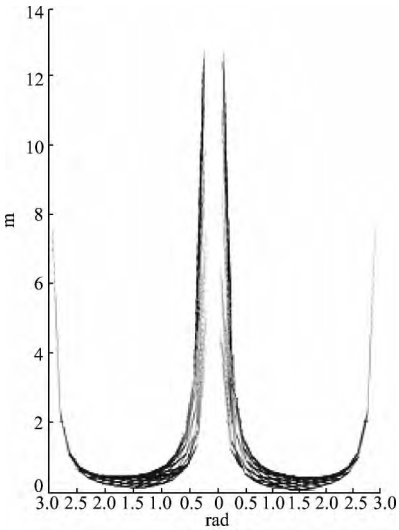
图 4 精细仿真图

Fig. 4 High precision simulation diagram



(a) 俯视图

(a) The top view diagram



(b) 平视图

(b) horizontal view diagram

图 5 粗略仿真图

Fig. 5 Low precision simulation diagrams

精细仿真图可以形成 180 × 180 点阵的空间区域，其特点是形成详细的点阵分布，精度较高，但是分布趋势不明显；

粗略仿真图以形成 18 × 18 点阵的空间区域，其特点是形成粗略的点阵分布，精度较低，但是分布趋势明显。

图 4、5 中 X、Y 坐标指 2 台设备舷角的弧度值单位 rad，Z 坐标为测距米偏差，单位 m。从图 4、5 可以看出光轴正交布站方式偏差最小。

为了更直观地分析测距精度，截取精细仿真图的数据，选取 36 点构成二维平面网，如表 1 所示，表中内容为理论交汇 ΔR，单位 m。可以看出舷角正交时即 ΔA_1 和 ΔA_2 相位差 90°时理论数据最小，表示测距精度越高。Inf 表示为无穷大。

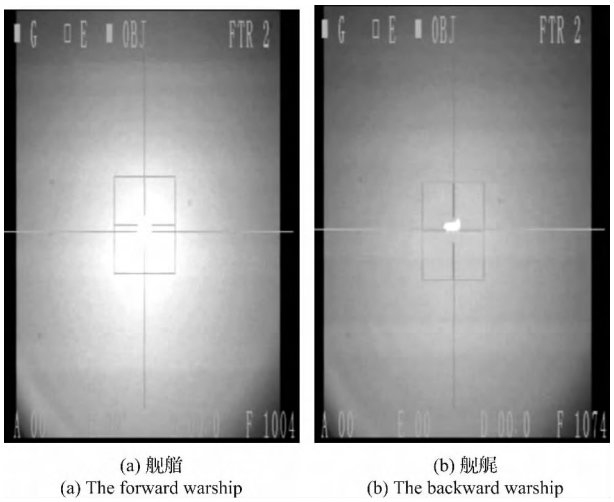
表 1 二维平面数据表

Table 1 Two dimensional data table

ΔA_2	ΔA_1					
	0°	30°	60°	90°	120°	150°
0°	Inf	2.569 5	0.313 5	**0.235 1**	0.856 5	3.510 0
30°	4.340 7	Inf	3.997 9	2.254 3	**1.969 2**	2.323 7
60°	3.491 5	6.472 4	Inf	7.590 4	3.733 3	**3.077 0**
90°	3.482 7	4.182 3	8.527 2	Inf	7.828 0	4.027 5
120°	3.581 3	**3.177 0**	3.796 6	7.204 0	Inf	6.132 1
150°	4.955 7	2.357 6	**1.899 9**	2.108 7	3.814 9	Inf

4.2 典型目标测距精度分析

为了更进一步验证惯导平台下的“舷角正交”技术的工程实用性，做了相应的针对性试验。测量条件均以极限方式进行考虑，基线为 70 m、基线误差 ΔL 为 3 m，系统跟踪误差为 10′，目标高度为 10 km，进行测距分析，如图 6 所示。



(a) 舰艏 (b) 舰艉

(a) The forward warship (b) The backward warship

图 6 测距图

Fig. 6 Distance measurement diagrams

图 6(a) 为舰面环境下舰艏 O_2 号设备跟踪的目标，图(b) 为舰艉 O_1 号设备跟踪的目标，其中舰艏设备零点为指向舰艏，舰艉设备零点为指向右舷舰横，即 2 台设备甲板坐标系下舷角正交。舰艏、艉具体跟踪交汇数据如表 2 所示。

表 2　测距精度表

Table 2 Precision table of distance measurement

稳跟距离/km	仰角(°)	航捷 km	1 号舷角(°)	2 号舷角(°)	测距精度 ΔR/m
30	19.47	4	45	-45.43	10.67
25	23.58	4	41	-49.46	27.51
20	30.10	4	37	-53.54	40.44
15	41.80	4	33	-57.56	57.31
10	83.90	4	30	-62.83	167.10

在舰摇隔离度做到 15 dB 时，计算 30 km 处，仰角为 19°，测距精度为 10.67 m，10 km 处，仰角为 83.9°精度为 167.10 m。可以看出在 10 km 处目标几乎过天顶，仰角很大，因此测距精度很低。与前文测距精度分析，E_1 越大，舷角正交精度越低，测距误差也很大结论相互吻合，但是完全可以满足引导制导武器的精度。

5　结　　论

舰载光电设备的激光测距系统极易受到高温、高湿的海面环境影响，而导致作用距离下降，通过文中提出的在惯导平台下速度滤波前馈法完成的电视闭环稳定跟踪基础上结合“舷角正交”交汇测量技术，实现舰面环境下的远距离的目标测距，弥补了激光测距的不足。

通过理论分析并结合具体试验，验证了该技术可实现远距离目标的测距，对于海天高温、高湿环境下在测距精度要求不大于 XX m 时测距距离可达 30 km，远远大于一般的激光测距机。通过“舷角正交”测距法实现了舰载光电对抗设备的无源远距离目标测距，特别是提高了测量低空掠海目标距离信息的能力。亦可利用三维信息引导制导武器实现对来袭目标的精确打击，增强了光电对抗能力的同时提高了舰载火控系统的综合对抗能力。该设计在某工程中得到应用，具有较高的实用价值。

参考文献

[1] 葛兵，高慧斌. 舰载经纬仪视轴自稳定方法 [J]. 舰船科学技术，2006，28(6) : 93-96.
GE B，GAO H B. Stabilization of LOS for carrier-based theodolite [J]. Ship Science and Technology，2006，28(6) : 93-96.

[2] 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]. 兵工自动化，2003，22(1) : 15-19.
ZOU D M，LIU Q SH，CHEN CH Q，et al. Stabilization analysis of LOS for carrier-based electro-optical tracking equipment [J]. Ordnance Industry Automation，2003，22(1) : 19-23.

[3] 侯宏录，周德云. 光电经纬仪异面交会测量及组网布站优化设计 [J]. 光子学报，2008，37(5) : 1023-1028.
HOU H L，ZHOU D Y. Measurement method and location optimization of multi-photoelectric theodolite for positioning of aviation weapons [J]. Acta Photonica Sinica，2008，37(5) : 1023-1028.

[4] 王英，曾光宇. 双线阵 CCD 交汇测量立靶精度系统研究 [J]. 光电工程，2011，38(10) : 33-38.
WANG Y，ZENG G Y. Intersection measuring system of erecting target with dual liner CCD [J]. Opto-Electronic Engineering，2011，38(10) : 33-38.

[5] 夏小虎，张林. 双 CCD 交汇测量非正交系统的布站参数优化设计 [J]. 合肥学院学报，2006，16(2) : 44-46.
XIA X H，ZHANG L. Optimal design for structure parameters of dual-CCD intersection non-orthogonal measurement system [J]. Journal of Hefei University，2006，16(2) : 44-46.

[6] 王泽民，高俊钗，雷志勇，等. CCD 交汇测量系统布站方式的精度分析 [J]. 山西电子技术，2006(5) : 38-40.
WANG Z M，GAO J CH，LEI ZH Y，et al. Measurement method and location optimization of multi-photoelectric theodolite for positioning of aviation weapons [J]. Shanxi Electronic Technology，2006(5) : 38-40.

[7] 王玉宝，付丽琴. 基于相机标定的交汇测量系统精度分析 [J]. 国外电子测量技术，2009，28(5) : 17-20.
WANG Y B，FU L Q. Accuracy analysis of intersection measuring system with camera calibration [J]. Opto-Electronic Engineering，2009，28(5) : 17-20.

[8] 王旻，宋立维，乔彦峰. 外视场拼接测量系统的视场拼接和交汇测量算法及其实现 [J]. 中国光学与应用光学，2010，3(3) : 229-238.
WANG M，SONG L W，QIAO Y F. Convergence algorithm of field stitching and intersection measurement for external field stitching measuring system and its implementation [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics，2010，3(3) : 229-238.

[9] 江南，李姗. 光电经纬仪测量系统的网络化分析 [J]. 仪器仪表学报，2006，27(增刊 3) : 1817-1819.
JIANG N，LI SH. Computer networked on photoelectric theodolite texting system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2006，27(Suppl. 3) : 1817-1819.

[10] 赵建宏，杨建宇，唐斌. 利用多径测量低空目标高度的

一种新技术[J]. 电子测量与仪器学报,2008,22(2):16-20.
ZHAO J H,YANG J Y,TANG B. Research on low-angle altitude measurement using multipath effect [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2008,22(2):16-20.

[11] 刘云清,姜会林,佟首峰,等. 基于交会方式的舰载火控雷达零位误差动态标校仪设计[J]. 仪器仪表学报,2009,30(2):428-432.
LIU Y Q,JIANG H L,TONG SH F,et al. Design of zero position error dynamic calibration device for radar based on spatial-resection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2009,30(2):428-432.

[12] 李焱,曹立华,王弟男. 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制[J]. 光学 精密工程,2011,19(5):1126-1133.
LI Y,CAO L H,WANG D N. Controlling of shipborne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform [J]. Optics and Precision Engineering,2011,19(5):1126-1133.

[13] 李焱,陈涛,曹立华. 舰载光电设备跟踪掠海目标的控制[J]. 光学 精密工程,2010,18(5):935-942.
LI Y,CHEN T,CAO L H. Control of ship-based optoelectronic equipment for tracking near-sea targets [J]. Optics and Precision Engineering,2010,18(5):935-942.

[14] 李焱,陈长青,陈涛. 舰载光电跟踪系统全自动低空控制算法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(2):318-324.
LI Y,CHNE CH Q,CHEN T. Full-automatic ultralow-altitude control arithmetic in shipborne optical-electronic tracking system [J]. Journal of Scientific Instrument,2010,31(2):318-324.

[15] 安源,钟兴,贾学志,等. 单光源高精度正交十字形激光标定装置设计[J]. 仪器仪表学报,2013,34(3):691-697.
AN Y,ZHONG X,JAO X ZH,et al. Design of high precision orthogonal cross laser demarcation device with single laser [J]. Journal of Scientific Instrument,2013,34(3):691-697.

[16] 陈爱华,高诚辉,何炳蔚. 基于正交消失点对的摄像机标定方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(1):161-166.
CHEN AI H,GAO CH H,HE B W. Camera calibration method based on orthogonal vanishing point pair [J]. Journal of Scientific Instrument,2012,33(1):161-166.

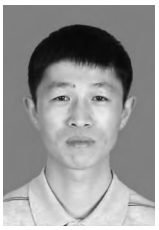
[17] 王凤英,张显库,任承志,等. 光电跟踪器船摇自稳定建模及仿真[J]. 光电工程,2005,32(7):11-14.
WANG F Y,ZHANG X K,REN CH ZH,et al. Self-stabilization modeling and simulation on ship-sway of a photoelectric tracker [J]. Opto-Electronic Engineering,2005,32(7):11-14..

作者简介



李焱,2003 年于吉林大学获得学士学位,2009 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为长春光机所光电对抗部副研究员,主要研究方向为电子学设计、舰载光电系统伺服控制、舰载光电对抗设备总体设计等。
E-mail: liy211@163.com

Li Yan graduated from Jilin University and received bachelor degree in 2003, and obtained doctor degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics in 2009. Now, he is an associate research fellow in Photoelectric Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research direction is electronic design, ship-borne photoelectric servo control system, overall design technique of ship-borne photoelectric warfare equipment.



张海波,2000 年于吉林大学获得学士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电对抗部助理研究员,主要研究方向为电子学设计、舰载光电对抗设备信息控制系统技术。
E-mail: ciomphaibo@163.com

Zhang Haibo graduated from Jilin University and received bachelor degree in 2000. Now, he is an assistant researcher in Photoelectric Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research direction is electronic design, ship-borne photoelectric information control system.