

文章编号 1004-924X(2011)05-1126-08

## 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制

李 焱\*, 曹立华, 王弟男

(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:**针对雷达引导偏差过大影响舰载光电设备迅速跟踪来袭目标,导致光电对抗能力减弱的问题,在惯导平台下提出了一种半自动搜索与电视跟踪技术相结合的控制算法,并应用于光电搜索跟踪系统中。该控制设计主要分为两步:雷达引导下,判断数引偏差是否超过当前视场,随即将人工干预转为自动搜索;当目标在搜索视场内对比度满足图像提取阈值要求时,利用 CA 模型将最小二乘法求出的惯导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。实验显示,该算法对于大引导偏差下的目标稳定捕获距离为 16.4 km,比传统方法捕获距离提高了 11 km,在半自动目标搜索、稳定捕获跟踪的同时,缩短了雷达引导偏差过大情况下的目标稳定捕获时间,提高了光电对抗能力。

**关键词:**惯导平台;CA 模型;搜索跟踪;舰载光电系统

中图分类号:TN949.6 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111905.1126

## Controlling of shipborne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform

LI Yan\*, CAO Li-hua, WANG Di-nan

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

\*Corresponding author, Email:liy211@163.com

**Abstract:** As the serious lead deviation of the radar will effect on the tracking ability of ship-based optoelectronic equipment, a new controlling algorithm combined the semi-automatic searching and TV tracking is provided based on an inertial navigation platform and applied to a optoelectronic searching and tracking system. The algorithm is mainly divided into two steps. Firstly, when the deviation of guide exceeds the current scene under the course of radar leading, the artificial mode turns into a auto-searching. Secondly, when the extraction threshold of the image is satisfied for the contrast of the target in the searching scene, the speed computed by using the CA model Least Square Method feeds back to the speed loop, and then combines the TV information to accomplish the closed-loop control of TV tracking. The algorithm is verified by a experiment. Experiment results show that the target capturing distance is 16.4 km on the great lead deviation by using the algorithm, which is higher 11 km than that by using the traditional algorithm. The algorithm can implement the semi-automatic searching and tracking, and can reduce capturing and tracking time, improve the optoelectric count measure a-

收稿日期:2010-04-09;修订日期:2010-08-24.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006aa701410);中科院知识创新工程领域前沿资助项目

bility when the lead deviation of the radar is great.

**Key words:** inertial navigation platform; CA Model; searching and tracking; shipborne optoelectronic system

## 1 引言

在现代电子战中,由于雷达系统受到干扰或半静默状态引起的引导精度下降,会导致依靠电子对抗的制导设备无法准确打击来袭目标,这就需要依靠光电设备来弥补其不足。但是当干扰正处在雷达引导过程中,特别是舰载光电设备还受到横、纵、艏摇的影响时,会导致目标长时间不会出现在光电设备的视场中,因而无法发挥光电设备的优势,也无法通过武控系统“反引”导弹来对抗来袭目标。

对于单纯的建立视轴稳定<sup>[1-2]</sup>虽然能在一定程度上起到隔离舰摇的作用,但是不能保证在引导偏差过大情况下目标也出现在视场中。文献<sup>[3]</sup>描述的光电跟踪仪的自主捕获技术虽然给出了它在二维坐标搜索雷达的引导下自主搜索捕获目标的思路,并给出光电探测器的最小方位视场角应不小于3倍目标指示精度的结论,但是并没有给出在舰载环境下如何具体实现自主引导的控制方法以及如何结合惯导数据来实现其搜索控制和视轴校正。针对近程导弹告警设备目前采用的连续扫描型系统以及国外大量装备的红外搜索和跟踪(IRST)系统<sup>[4-6]</sup>存在成像质量不高和固定凝视型成本过高的问题,文献<sup>[7]</sup>提出了将先进的非等速步进准凝视图象采集控制方法集成于一种复合式的小型导弹告警系统中,但没有考虑在舰摇环境下的控制方式,更没有在实际工程中得到应用。

本文提出了区别于常规圆周步进扫描的四场搜索步进凝视方法及具体工程实现过程,并在航迹滤波算法<sup>[8]</sup>的基础上结合舰载光电设备视轴校正<sup>[9-10]</sup>理论,提出了一种适合舰载光电设备的搜索控制策略,减少了搜索捕获的时间,提高了光电对抗能力。

## 2 搜索跟踪系统控制算法原理

搜索跟踪系统一旦判断出雷达引导偏差超过

当前视场,随即人工干预转为自动四场步进凝视搜索。一旦目标出现在搜索视场并且图像提取阈值满足要求,即通过CA模型最小二乘滤波,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。

### 2.1 四场搜索控制原理

四场搜索控制原理见图1。搜索方向按照图1箭头所示,搜索策略采取步进加凝视的方案。步进6至步进1是搜索场逆程过程,其步进加凝视时间为 $\Delta P = nt$ 。

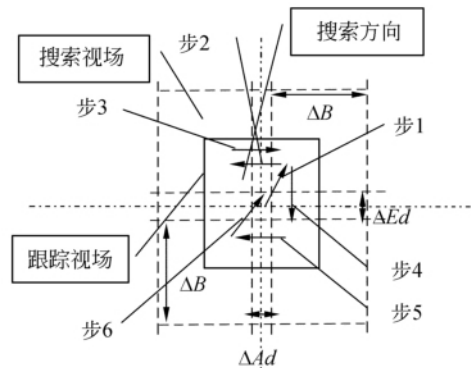


图1 四场搜索控制原理图

Fig. 1 Diagram of four-field searching control

其中: $\Delta A_d$ 为方位视场叠加, $\Delta E_d$ 为俯仰视场叠加, $\Delta B$ 为搜索步长。

方位搜索步长:

$$\Delta B_A = X_{\text{step}} \times Y_{\text{coder}} \times \frac{1}{360} \times \frac{1200}{f} \times \frac{1}{\cos E}, \quad (1)$$

其中: $X_{\text{step}}$ 为 $\frac{N \times S_{\text{pixel}} \times 57.3}{2f_{\text{max}}}$ 取整, $N$ 为选用CCD的像元数, $S_{\text{pixel}}$ 为像元尺寸, $Y_{\text{coder}}$ 为旋转变压器对应的满码值, $f_{\text{max}}$ 为系统最长焦距, $f$ 为系统连续变焦值, $\cos E$ 为雷达当前引导的高低角余弦值,方位和俯仰步长仅差正割补偿。

采取了方位、俯仰搜索视场叠加的策略,避免了在搜索过程中目标出现在视场拼接处而无法正常提取。

方位视场叠加:

$$\Delta A_d = \frac{N_A \times S_{\text{pixel}} \times 57.3}{2f_{\text{max}}} - X_{\text{step}}, \quad (2)$$

俯仰视场叠加:

$$\Delta E_d = \frac{N_E \times S_{\text{pixel}} \times 57.3}{2f_{\text{max}}} - X_{\text{step}}, \quad (3)$$

### 2.2 CA 模型的有限记忆最小二乘滤波原理

在电视闭环跟踪时有:

$$E_k = R_k + P_k - \dot{A}, \quad (4)$$

其中:  $E_k$  为速度回路输入,  $R_k$  为位置回路输出,  $P_k$  为前馈速度值, 即通过惯导角度数据滤波得到的速度值,  $\dot{A}$  为速度反馈。

速度回路主要作用是减小电机时间滞后, 提高系统的快速性, 通过闭环, 降低力矩扰动误差。直接通过角度差分得到的速度数据带有大量白噪声, 影响速度回路输入值, 最终表现在增大了力矩扰动误差, 无法稳定捕获跟踪, 因此需要通过滤波得到相对平滑的速度数据。

二阶系统有限记忆的最小二乘滤波公式:

$$\begin{cases} \hat{x}_s = (\hat{x}_{s/s-1}) + \frac{3(3n^2 - 3n + 2)}{n(n+1)(n+2)} [z_s - \hat{x}_{s/s-1}] \\ \dot{\hat{x}} = \dot{x}_{s/s-1} + \frac{18(2n-1)}{n(n+1)(n+2)\Delta t} [z_s - \hat{x}_{s/s-1}] \\ \ddot{\hat{x}}_s = \ddot{x}_{s-1} + \frac{60}{n(n+1)(n+2)\Delta t^2} [z_s - \hat{x}_{s/s-1}] \end{cases}, \quad (5)$$

其中:  $\hat{x}_{s/s-1} = \hat{x}_{s-1} + \Delta t \dot{\hat{x}}_{s-1} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\hat{x}}_{s-1}$ ;  $\dot{\hat{x}}_{s/s-1} = \dot{\hat{x}}_{s-1} + \Delta t \ddot{\hat{x}}_{s-1}$  分别表示在  $t_{s-1}$  时刻未接受新的测量值  $z_s$  前, 只根据目标运动规律对  $t_s$  时刻的位置、速度预测。

$\Delta t$  为采样周期。

二阶系统的状态转移矩阵即 CA 模型:

$$\phi(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

观测方程的增益矩阵:

$$K_n = [K_1 \quad K_2 \quad K_3], \quad (7)$$

其中  $K_1 = \frac{3(3n^2 - 3n + 2)}{n(n+1)(n+2)}$ ,  $K_2 = \frac{18(2n-1)}{n(n+1)(n+2)\Delta t}$ ,

$K_3 = \frac{60}{n(n+1)(n+2)\Delta t^2}$ , 为观测方程增益矩阵的 3 个增益系数。

为了避免由于  $\lim_{n \rightarrow \infty} K_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} K_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} K_3 = 0$ ,

新的测量值  $z_s$  在滤波计算中不起作用, 从而导致滤波计算与实际情况的偏差变得“发散”, 本文采用有限记忆处理,  $n$  设为 20。

## 3 搜索跟踪系统控制算法实现

### 3.1 四场搜索控制算法实现

本系统采用 1M30 数码相机, 靶面尺寸为 1K  $\times$  1K, 即  $N_A = N_E = N = 1\ 024$ , 像元尺寸为 12  $\mu\text{m}$ , 因此方位视场叠加等于俯仰视场叠加, 即  $\Delta A_d = \Delta E_d$ 。

旋转变压器对应 19 位码值 524 288,  $f$  为连续变焦的焦距, 其与引导距离信息对应关系见表 1, 最大取 200 ~ 1 200 mm, 有效焦距取 500 ~ 1 000 mm。

表 1 视场对应表

Tab. 1 Corresponding table of angle field

序号	距离/km	焦距(视场/°)
1	$L > 27$	1 000(0.70)
2	$17 < L < 27$	900(0.78)
3	$10 < L < 17$	800(0.88)
4	$5 < L < 10$	700(1.00)
5	$L < 5$	500(1.41)

通过式(1)得出, 在最长焦情况下  $X_{\text{step}}$  为 17' 其对应码值为 0X19C。

$$\Delta B_A = 0X19C \times \frac{1\ 200}{f} \times \frac{1}{\cos E}$$

$$\Delta B_E = 0X19C \times \frac{1\ 200}{f}$$

通过式(2)、(3)计算出  $\Delta A_d = \Delta E_d$  为 1.2' 对应的码值。

### 3.2 CA 模型有限记忆最小二乘滤波的实现

惯导提供的已知数据是艏摇  $H$ 、纵摇  $P$ 、横摇  $R$  的三维角度, 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:

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

其中:  $H_{n+1/n}, P_{n+1/n}, R_{n+1/n}$  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

$\dot{H}_{n+1/n}, \dot{P}_{n+1/n}, \dot{R}_{n+1/n}, \ddot{H}_{n+1/n}, \ddot{P}_{n+1/n}, \ddot{R}_{n+1/n}$  是需要通过公式(5)得到的未知量,初始化  $n=1$  时,速度及加速度为 0。系统状态转移矩阵为:

$$\phi_{k/k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中:光电和惯导系统同步周期为  $\Delta t=62.5 \text{ ms}$ 。

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

其中: $A_c, E_c$  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; $\omega_H, \omega_P, \omega_R$  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, 见图 2。

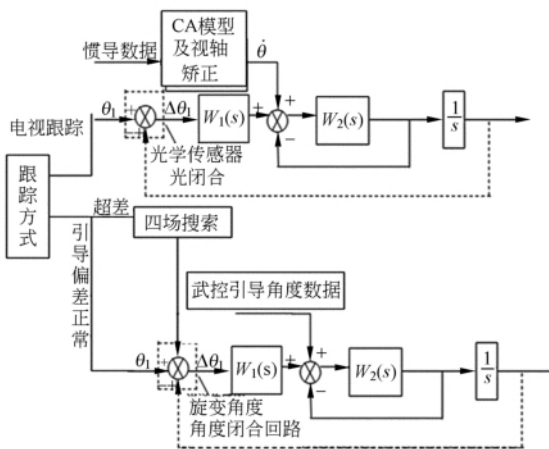


图 2 搜索跟踪控制原理图

Fig. 2 Diagram of searching and tracking control

速度回路多采用滞后超前校正, 滞后校正利

### 3.3 搜索跟踪前馈控制的实现

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  $[\omega_H \ \omega_P \ \omega_R]^T$ , 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。

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

其中: $\omega_{xc}, \omega_{yc}, \omega_{zc}$  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。

用滞后校正环节幅频特性的高频衰减特性使系统的剪切频率前移, 保证稳定精度; 超前校正利用其超前相位增加相角裕度, 改善系统稳定性。 $W_1(s), W_2(s)$  为位置和速度调节器。

其中速度回路二阶调节器传递函数:

$$\begin{cases} W_2(s) = \frac{K_V(T_2s+1)(T_3s+1)}{(T_1s+1)(T_4s+1)} \\ W_2(s) = \frac{1865(\frac{1}{8.5}s+1)(\frac{1}{93.37}s+1)}{(\frac{1}{0.2202}s+1)(\frac{1}{79.4}s+1)} \end{cases}$$

由于舰载光电设备受外界频带干扰较多, 剪切频率不能设得太大, 因此转电视跟踪后的位置回路也设计成滞后超前校正。

其中位置回路二阶调节器传递函数:

$$\begin{cases} W_1(s) = \frac{K_p(T_2s+1)(T_3s+1)}{(T_1s+1)(T_4s+1)} \\ W_2(s) = \frac{1440(2s+1)(2s+1)}{(20s+1)(27.28s+1)} \end{cases}$$

## 4 试验与分析

### 4.1 四场搜索扩大视场角度分析

由于连续变焦距的舰载光电设备其跟踪视场

是随着雷达引导距离信息而连续变化的,因此在不同的引导距离下,也就是不同的跟踪视场下,搜索控制策略的步长也是随焦距的变化而变化的,最终呈现的是搜索策略的视场扩大是随焦距的变化而变化的。这样做的目的就是为了实现连续变焦系统搜索视场的平滑拼接,不会出现搜索视场盲区,如图 3。

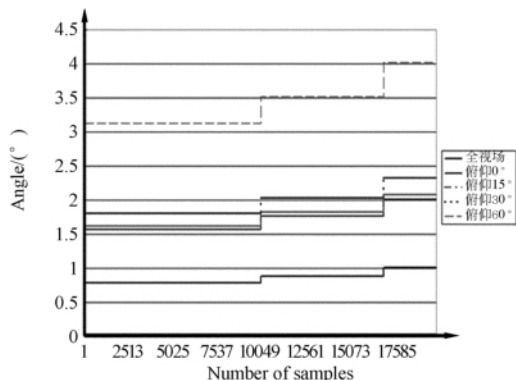


图 3 方位搜索视场比较图

Fig. 3 Comparative picture of azimuth searching field

上图距离信息从 27 km 至 7 km 时,对应焦距信息从 900 mm 至 700 mm 的方位搜索视场曲线图。曲线从上至下分别为俯仰角度为中高空 60°,30°和超低空 15°,0°以及不搜索时全视场曲线。可以看出对于超低空目标其方位搜索视场扩大了 2 倍和 2.07 倍,对于中高空目标其方位搜索视场扩大了 2.39 倍和 4 倍,完全可以弥补雷达的引导精度不足。

#### 4.2 CA 模型速度滤波分析

其滤波精度决定了前馈控制的精度。

将惯导数据采用有限元为 20 的记忆处理方式。采样实际横摇、纵摇、艏摇角度值、数据量为 1 000 个点,采样周期为 16 Hz,预测、滤波得到速度值与角度真值求导后进行比较。可以看出滤除了大部分噪声和杂波,提高了观测采样数据的信噪比。

纵摇的速度滤波幅值在  $\pm 0.75 (^{\circ})/s$  内波动,真值速度噪声在滤波速度曲线以  $\pm 0.15 (^{\circ})/s$  波动叠加。通过 CA 模型最小二乘滤波将速度噪声很好平滑,为视轴的复合校正提供了较高精度的纵摇速度信号,见图 4。

横摇的速度滤波幅值在  $\pm 3.3 (^{\circ})/s$  内波动,

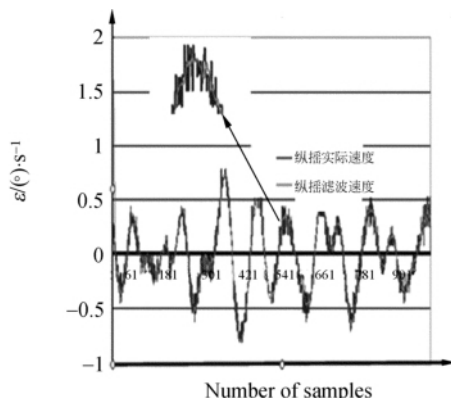


图 4 纵摇滤波图

Fig. 4 Filtering wave picture of pitching-swaying

真值速度噪声在滤波速度曲线以  $\pm 0.15 (^{\circ})/s$  波动叠加。最大波动速度在横轴采样 555 点附近,速度幅值从  $3.6 (^{\circ})/s$  渐变到  $2.2 (^{\circ})/s$ ,通过横摇滤波速度可以看出,平滑了机动运动带来的偏差,大大提高了速度精度,为前馈控制提供了较高精度的速度信号,见图 5。

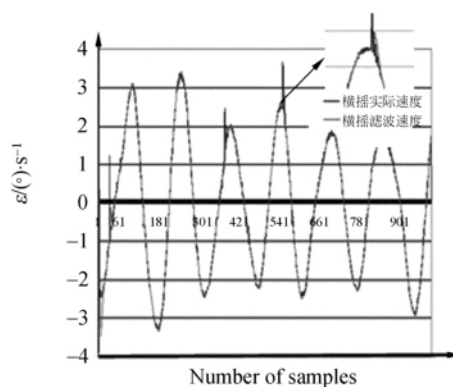


图 5 横摇滤波图

Fig. 5 Filtering wave picture of rolling-swaying

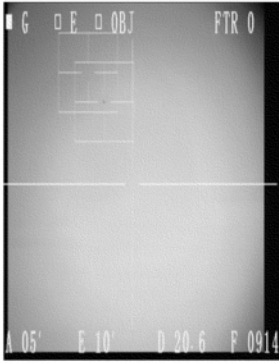
#### 4.3 搜索跟踪比较试验效果分析

在雷达引导偏差过大情况下,为了直观地验证搜索跟踪控制算法跟踪来袭目标比没有该策略的控制算法增大的具体捕获距离,做了两组针对性试验,即搜索跟踪控制和无搜索控制捕获跟踪试验。

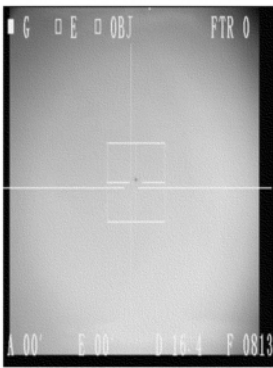
##### 4.3.1 搜索跟踪试验

对于仰角在  $12^{\circ}$  的目标,搜索跟踪跟试验见图 6。

在 22 km 处进行目标指示,由于雷达引导偏差过大,在视场中无来袭目标出现,从图 7 可以看



(a)搜索前  
(a)Before searching



(b)搜索后  
(b)After searching  
图 6 搜索跟踪图

Fig. 6 Picture of searching and tracking

出,通过步进、凝视四场搜索控制算法后在 20.6 km 处搜索到目标(图 6(a)),并在 16.4 km,进入 CA 模型后的视轴校正及速度前馈、电视闭环,能够稳定捕获跟踪目标(图 6(b))。

通过上述试验中录取的实际报文数据即从搜索发现目标到稳定捕获时间可以分析出雷达引导的一次差,见图 7。

$$\delta = \delta_{\text{Measure}} - \delta_{\text{True}}, \quad (12)$$

其中: $\delta_{\text{Measure}}$  为雷达引导角(方位指向角、高低指向角), $\delta_{\text{True}}$  为目标真值。

通过一次差可以算出雷达在受到干扰时候的引导系统误差:

$$m = 1/n \sum_{k=1}^n \delta. \quad (13)$$

其中: $\delta$  为一次差。

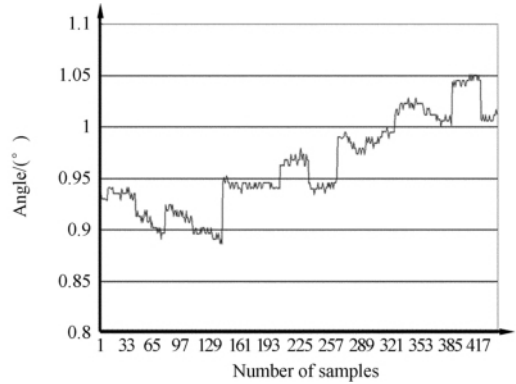


图 7 系统方位一次差图

Fig. 7 One difference of system azimuth

$n$  取 433 时,求得系统误差为  $0.973^\circ$ 。

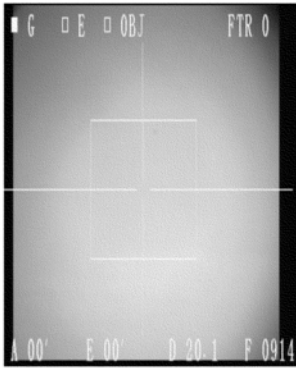
从图 7 可以看出,433 个采样点,采样周期为 16 Hz,即为从搜索发现目标到稳定捕获时间为 27.1 s,对于 150 m/s 的目标来说其前向飞行距离大概为 4 km 左右,正好与图 6 搜索发现目标到稳定跟踪距离相吻合。

其系统误差为  $0.973^\circ$ ,从表 1 可以看出对应目标在 20.6 km 至 16.4 km 处如没有搜索控制算法的视场为  $0.78^\circ$  至  $0.88^\circ$ ,目标不能出现在视场,通过图 3 可以看出,视场扩大了 2 倍左右,可以将系统误差包含在内,因此搜索控制算法在某些特殊情况下是十分必要的。

#### 4.4.2 无搜索跟踪试验

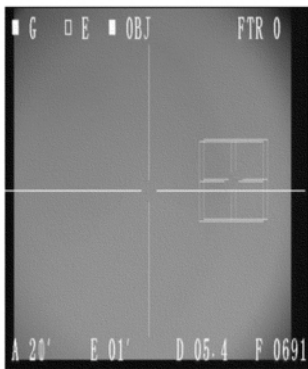
图 8 为无搜索跟踪图。从图 8 可以看出,在 20.1 km 处进行目标指示,无搜索前(图 8(a)),由于雷达引导偏差过大,在视场中无来袭目标出现;随着目标距离的接近,视场的不断增大,在 5.6 km 处目标出现在视场(图 8(b)),随后稳定跟踪。

通过图 7,公式(12)、(13)可以知道系统误差为  $0.973^\circ$ 。从表 1 可以看出对应目标在 20.1~5.4 km 处如没有搜索控制算法的视场为  $0.78^\circ \sim 1.00^\circ$ ,目标在小于 10 km 后视场增大到  $1.00^\circ$ ,可以将引导系统误差包含在内,但是由于舰摇的影响以及目标相对速度和加速度都随距离的临近而增大等其他综合因素,直到 5.4 km 处才稳定



(a) 无搜索前

(a) Before non-searching



(b) 无搜索后

(b) After non-searching

图 8 无搜索跟踪图

Fig. 8 Picture of non-searching and non-tracking

捕获目标。对于 150 m/s 的目标来说其前向飞行距离大概为 14.7 km, 从目标指示到发现捕获目标的时间为 98 s。

## 5 结 论

针对雷达在受到电子干扰或半静默等特殊情况下引起的引导精度严重下降, 提出了“搜索跟踪”模型算法, 半自动控制舰载光电设备实现步进凝视四场搜索, 并通过 CA 模型滤波完成前馈控制, 以弥补雷达的不足, 从而将光电设备跟踪好的目标信息通过武控系统“反引”导弹来对抗来袭目标。试验验证表明, 该模型算法对于大引导偏差下的目标稳定捕获距离为 16.4 km, 比无该算法下捕获距离提高了 11 km; 从搜索发现目标到稳定捕获时间为 27.1 s, 比无搜索控制算法的 98 s 提高了 71 s, 实现了舰载光电设备半自动搜索与捕获跟踪的同时, 增强了光电对抗能力, 提高了舰载火控系统的综合对抗能力。该控制设计已在工程中得到应用, 具有很高的实用价值。

### 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. (in Chinese)
- [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]. 武器装备自动化, 2003, 22(1): 19-23.  
ZOU D M, LIU Q SH, CHEN CH Q, et al.. Stabilization analysis of LOS for carrier-based electro-optical tracking equipment[J]. *Armament Automation*, 2003, 22(1): 19-23. (in Chinese)
- [3] 李连学, 曹秋生. 光电跟踪仪的自主捕获技术研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(12): 1142-1145.  
LI L X, CAO Q SH. Study on the autonomous-capturing target technology of opto-electronic tracker [J]. *Lase and Infrared*, 2006, 36(12): 1142-1145. (in Chinese)
- [4] 付伟. 舰载光电侦察告警装备发展综述[J]. 舰载武器, 2002, 2: 22-27.  
FU W. A comprehensive survey on development of shipborne optical and infraed waring systems[J]. *Shipborne Weapons*, 2002, 2: 22-27. (in Chinese)
- [5] 陈兆峰, 李勇. 红外搜索跟踪技术发展研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(2): 116-118.  
CHEN ZH F, LI Y. Research on development of shipborne serarching and tracking technology [J]. *Modern Defence Technology*, 2009, 37(2): 116-118. (in Chinese)
- [6] 韩根甲. 舰载红外搜索与跟踪系统的最新现状与发展趋势[J]. 现代防御技术, 2007, 35(3): 111-116.  
HANG G J. Present status and development trend of shipborneIRSTs[J]. *Modern Defence Technology*, 2007, 35(3): 111-116. (in Chinese)
- [7] 陈兆兵, 郭劲, 苗用心, 等. 基于步进凝视控制策略

- 的告警系统[J]. 光电工程, 2008, 35(12): 9-12.  
CHEN ZH B, GUO J, MIAO Y X, *et al.*. Warning system based on step-stare control [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35 (12): 9-12. (in Chinese)
- [8] 沈永良, 徐亚飞. 舰载平台下的光电跟踪技术[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(7): 13-15.  
SHEN Y L, XU Y F. Electro-optical tracking technology based on shipborne platform[J]. *Fire Control and Command Control*, 2008, 33(7): 13-15. (in Chinese)
- [9] 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, CHEN CH Q, CHEN T. Full-automatic ultralow-altitude control arithmetic in shipborne optical-electronic tracking system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(2): 318-324. (in Chinese)
- [10] 李焱, 陈涛, 曹立华, 等. 舰载光电设备跟踪掠海目标的控制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 937-941.  
LI Y, CHEN T, CAO L H, *et al.*. Control of ship-based optoelectronic equipment for tracking near-sea targets[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 937-941. (in Chinese)

#### 作者简介:



李焱(1980—)男,吉林长春人,博士,副研究员,2010于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事嵌入式操作系统 VxWorks 底层及应用层设计开发、舰载光电设备伺服控制、电子学总体设计、舰载光电火控系统等方面的研究。E-mail: liy211@163.com



曹立华(1971—)男,吉林磐石人,博士研究生,研究员,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副主任,主要从事光电仪器总体设计、目标红外辐射特性测量等技术的研究。E-mail: cao0983@sina.com



王弟男(1955—)男,吉林长春人,高级工程师,主要从事电子学总体设计、舰载光电测控设备、舰载光电对抗装备的研制工作。E-mail: wangdinan926@sina.com