

## 机载光电跟踪系统搜索策略研究

王国华<sup>1</sup>, 毛大鹏<sup>1</sup>, 刘 洵<sup>1</sup>, 陈新云<sup>2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031; 2. 南昌洪都航空工业集团 650 所, 江西 南昌 330024)

**摘要:**评价未来空战系统作战能力的主要因素包括如下方面:发现目标的能力、可发现的范围、发现的概率。本文以某机载光电跟踪系统为对象,研究在具有诸多约束条件下的一种激光搜索策略,在保证不漏扫,满足探测概率的前提下,使系统搜索范围最大,并适应载机上的纯惯性状态下惯导的最大导航误差。本文建立了可有效减少重复作业和无效搜索时间,充分利用激光探测器的有效视场,对目标进行较高效率的等效“一”字形激光搜索策略模型,给出并分析了模型的边界条件。并给出了在确定的边界条件下数学模型的仿真数据。分析结果表明:在保证不漏扫,满足探测概率的前提下,在 2000 m 以下的高度,采用  $N=3, L=12$  km 的光斑搜索范围,基本能够覆盖惯性  $3\sigma$  导航误差范围。若导航误差取  $1\sigma$ ,则在 1500 ~ 6000 m 高度都可覆盖。若想获得较高的搜索效能,需对搜索速度、重叠系数等因素综合考虑,而提高激光重复频率尤其重要。

**关键词:**机载光电跟踪系统;搜索策略;探测概率;搜索范围最大化

中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2011.09.016

## Study of search strategy on airborne optical tracking system

WANG Guo-hua<sup>1</sup>, MAO Da-peng<sup>1</sup>, LIU Xun<sup>1</sup>, CHEN Xin-yun<sup>2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. The 650 Institute of Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024, China)

**Abstract:** Evaluation of future air combat capability includes the following main factors: the ability of finding the target, the range can be found in, the probability of discovery. In this paper, an airborne optical tracking system as the object to study a laser-search strategy with many constraints, to maximize range of search with no leakage search and to meet the probability of detection, to adapt to the maximum navigation error of the pure inertia INS on the airborne. Establish a highly efficient search strategy model which can effectively reduce duplication of search and invalid search time, take advantage of the effective field of the laser detector, and analyzed the model boundary conditions. The paper shows the simulation data of mathematical model with the determining boundary conditions. Under the height of 2000 m, to ensure no leakage search and search probability, the  $N=3, L=12$  km laser spot search can cover the  $3\sigma$  navigation error range. If navigation error is  $1\sigma$ , this can be covered in 1500 ~ 6000 m altitude. To get higher search performance, the factors include search speed, overlap coefficient, especially Laser repetition rate should be taken into account.

**Key words:** airborne optical tracking system; search strategy; search probability; maximize of the search

## 1 引言

随着光电跟踪瞄准技术的发展,光电跟踪测量设备已成为机载火控系统中的重要组成部分。特别是采用了可见光电视和激光探测跟踪双重工作模式的光电跟踪系统,可全天候工作,被动探测,隐蔽性好,抗电子干扰性强,使战斗机的目标探测能力、对地攻击能力、作战有效性等各方面都有了大幅提高。夜战主要利用激光探测跟踪模式工作,激光探测视场 $2^\circ$ 采用四象限 APD 接收<sup>[1]</sup>,通过接收被激光照射目标的漫反射光斑,对目标进行探测和跟踪。在激光探测视场较小的条件下,为扩大搜索范围,需要进行扫描式搜索<sup>[2]</sup>。搜索受到下列条件的约束:①激光照射器采用编码照射,照射频率 10 Hz;②激光光斑探测器最大作用距离 12 km;③激光探测视场 $2^\circ$ ;④瞬时视场接收激光回波脉冲数不能小于 3 个。研究了等效“一”字形激光搜索策略模型,给出并分析了模型的边界条件。在保证不漏扫,满足探测概率的前提下,使系统搜索范围最大化,并尽可能覆盖载机上的惯导纯惯性状态下约 4 km( $3\sigma$ )的最大导航误差。仿真计算给出了各种不同条件下的计算数据。计算分析结果表明,在飞行高度 2000 m 以下,瞬时视场接收激光脉冲数为 3 个,激光光斑探测距离 12 km 时的光斑搜索范围基本能够覆盖惯性  $3\sigma$  导航误差。当导航误差取  $1\sigma$  时,在飞行高度为 500 ~ 6000 m 范围内,搜索范围都能覆盖导航误差。

## 2 搜索方法

选择搜索方法的原则,是在保证不漏扫,并满足探测概率的前提下,获得最大的搜索范围。若不考虑载机飞行因素,有诸多搜索方法可供选则,如平扫形、螺旋形等<sup>[3]</sup>。考虑载机飞行因素后,简单的水平横向扫描与回扫,在与飞机运动相结合后,变成了“之”字形的搜索形态,其间或重叠率过大、或难免漏扫。通过对不同的搜索方式的计算及选择,认为等效“一”字形搜索方式是在诸多约束条件下,能保证足够的探测概率和最大扫描范围的一种搜索方式。

等效“一”字形搜索,是考虑到载机的运动后,光电跟踪系统的扫描运动使视轴相对于地面形成“一”字形的搜索方法。此时,光电跟踪系统方位、俯仰框架扫描模式如图 1 所示,瞬时视场覆盖地面上的示意图如图 2 所示,在地面形成的扫描区域示意图如图 3 所示。扫描过程如下:设初始状态为系统视轴指向航向左侧,方位由左向右扫描。在向右

扫描的同时,俯仰角相对水平基准不断增大。在方位扫描至最右侧后,俯仰迅速复位回到初始扫描状态。

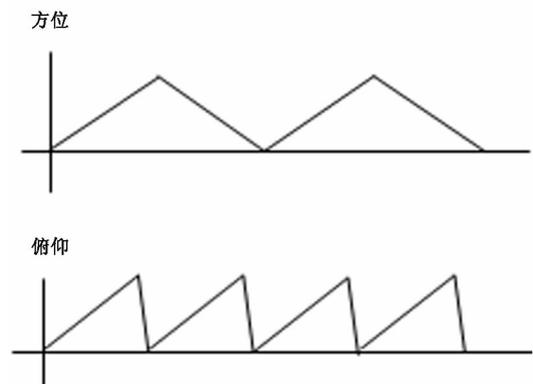


图 1 等效“一”字形搜索方位、俯仰扫描模式

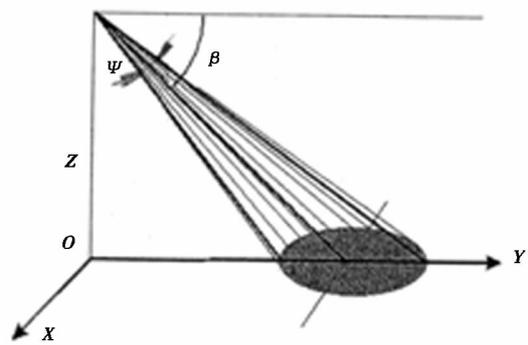


图 2 作用在地面上的瞬时视场  
有效扫描过程中每一脉冲光斑投影(间隔 0.1 s)

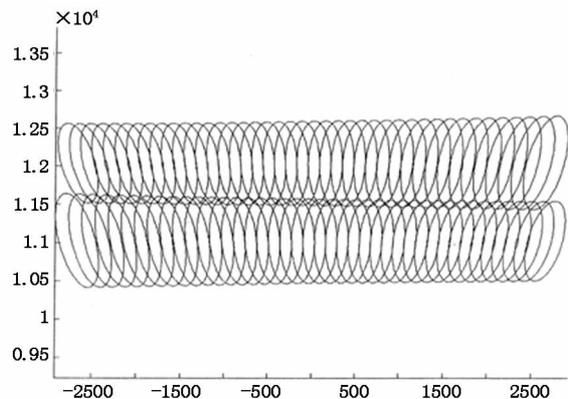


图 3 地面形成的扫描区域

### 2.1 等效“一”字形搜索数学模型

在建立等效“一”字形搜索数学模型之前,需建立在任意状态下,激光探测视场作用在地面的数学模型,设最大扫描方位角为 $\alpha$ 、俯仰角为 $\beta$ ,扫描过程中任意时刻激光探测视轴的方位角为 $\alpha_1$ 、俯仰角为 $\beta_1$ ,其数学模型示意图如图 4 所示。图中, $H$ —飞机飞行高度; $A$ —扫描过程中,视轴地面位置点(位于飞机纵轴与其地面投影构成的平面内); $B$ —光斑中心; $D$ —飞机地面垂直投影点; $l_{0i}$ —飞机与扫描位置点

A的斜距; $P_i$  - 飞机投影点D与位置点A的距离;  
 $c_i$  - 飞机投影点与光斑中心B的距离; $\gamma_i$  - 光斑中心  
 中心线的地面投影与飞机纵轴平面的夹角; $\beta'_i$  - 光斑  
 中心线的地面投影与地面夹角(注意其与 $\beta_i$ 的  
 区别)。

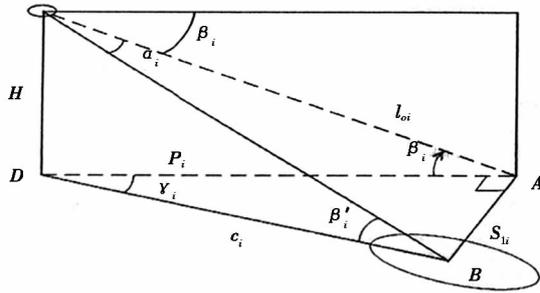


图4 任意时刻扫描数学模型示意图

长轴在飞机纵轴方向上的投影 $f_{垂直} = f \times \cos\gamma_i$ ，  
 在扫描过程中，首先受到激光搜索最远斜距 $L_{max}$ 的  
 限制。其次，对于不同的搜索方式，方位角变化范围  
 和俯仰角变化范围各不相同，所以应该按照不同的  
 搜索方式来计算投影椭圆的大小。图5表示长轴在  
 飞机纵轴方向上的投影。

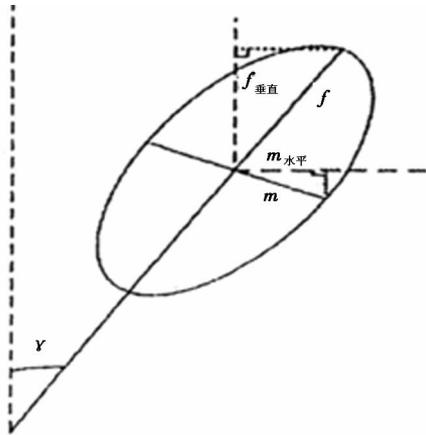


图5 长轴在飞机纵轴方向上的投影

令激光探测视场角为 $\psi$ ，视轴俯仰角为 $\beta$ ，飞机  
 高度为 $H$ ，激光探测视场作用在地面投影图形的长  
 轴为 $f$ ，短轴为 $m$ ，则：

$$\beta'_i = \arctan \left[ \frac{\sin\beta_i}{\sqrt{(\cos\beta_i)^2 + (\tan\alpha_i)^2}} \right] \quad (1)$$

$$\gamma_i = \arctan \left[ \frac{\tan\alpha_i}{\cos\beta_i} \right] \quad (2)$$

$$f = \frac{H \sin\psi}{\cos\psi - \cos(2\beta'_i)} \quad (3)$$

$$m = \frac{H^* \sin(\psi/2)}{\sqrt{\sin(\beta'_i + \frac{\psi}{2})^* \sin(\beta'_i - \frac{\psi}{2})}} \quad (4)$$

设飞机在搜索时刻处于水平飞行状态。令光电

跟踪系统搜索的方位角速度为 $\omega(^{\circ}/s)$ ，飞机地速为  
 $\nu(m/s)$ ，飞机高度为 $H(m)$ ，激光搜索的斜距为  
 $L(m)$ ，激光探测视场为 $\psi(^{\circ})$ ，瞬时探测视场内接收  
 的激光脉冲数为 $n$ 次，激光照射器照射频率为 $f(Hz)$ 。

横向扫描角速度：

$$\omega = \frac{f\psi}{n} \quad (5)$$

扫描过程中的起始状态、中间状态和终止状态  
 的特征参数为：

起始状态： $\alpha_1$ 为起始方位角； $S_1$ 为水平搜索范  
 围； $S_2$ 为初始状态的扫描中心斜距； $\beta_0$ 为起始俯仰  
 角； $P_0$ 为起始水平搜索距离。

中间状态： $\beta_1$ 为中间状态俯仰角； $P_1$ 为中间  
 状态水平搜索距离。

终止状态： $\alpha_2$ 为终止方位角； $P_2$ 为水平搜索范  
 围； $L$ 为终止状态扫描斜距； $q$ 为终止状态扫描斜距  
 投影长度； $\beta_2$ 为终止俯仰角。

### 2.2 搜索参数计算

飞机参数 $\nu, H$ 确定，求出 $\alpha_1, \alpha_2$ ，再求 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ ，  
 以及前后两个半程内的俯仰角速度 $\omega_{\beta_1}, \omega_{\beta_2}$ 。将扫  
 描的图形假设成矩形，扫描长度为 $2S_1$ ，宽度为 $b_0$   
 (中间状态椭圆长轴)：

$$b_0 = \frac{2H \sin\psi}{\cos\psi - \cos(2\beta_1)} \quad (6)$$

此时若在保证不漏扫，则 $\nu(T + t_{复位}) = Kb_0$ 。 $K$   
 为前进系数(或称重叠系数)。经过推导得到下面  
 方程组：

$$\begin{cases} \sin\alpha_2 = \frac{L \sin\alpha_1}{\sqrt{L_2 - 2\nu(\alpha_1 + \alpha_2) \sqrt{L^2(\cos\alpha_1)^2 - H^2} / \omega + \nu^2(\alpha_1 + \alpha_2) / \omega^2}} \\ \nu \left( \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\omega} + \frac{\lambda}{\omega_{复位}} \right) = \frac{2KH \sin\psi}{\cos\psi - \cos \left[ 2 \arctan \left( \frac{H}{\sqrt{(L \cos\alpha_1)^2 - H^2} - \nu \frac{\alpha_1}{\omega}} \right) \right]} \end{cases} \quad (7)$$

由此方程组可以解算出 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 。

### 3 仿真结果

首先确定边界条件如下：激光照射频率 $f$ 为  
 10 Hz，激光探测视场 $\psi$ 为 $2^{\circ}$ ，激光搜索的斜距 $L$ 取  
 12 km，飞行高度 $H = 1500 \sim 6000$  m， $\nu = 200 \sim$   
 $300$  m/s，瞬时探测视场内接收的激光脉冲数 $n$ 为  
 3， $k = 0.92$ 条件下，得到单侧扫描范围 $S_1$ 的结果如  
 表1所示，单位(km)。

表 1 3 脉冲单侧扫描范围

速度/( $m \cdot s^{-1}$ ) 高度/m	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
1500	5.9415	5.7638	5.5944	5.4329	5.2789	5.1319	4.9917	4.8578	4.7298	4.6076	4.4907
2000	5.1202	4.9480	4.7854	4.6317	4.4863	4.3487	4.2183	4.0946	3.9772	3.8657	3.7597
2500	4.4871	4.3238	4.1706	4.0267	3.8914	3.7641	3.6441	3.5308	3.4238	3.3226	3.2268
3000	3.9851	3.8316	3.6884	3.5546	3.4293	3.3119	3.2017	3.0980	3.0004	2.9083	2.8214
3500	3.5784	3.4347	3.3012	3.1768	3.0609	2.9525	2.8511	2.7560	2.6666	2.5826	2.5034
4000	3.2430	3.1085	2.9840	2.8684	2.7609	2.6607	2.5671	2.4795	2.3973	2.3202	2.2476
4500	2.9624	2.8364	2.7201	2.6124	2.5124	2.4194	2.3327	2.2516	2.1758	2.1047	2.0378
5000	2.7245	2.6063	2.4974	2.3968	2.3035	2.2169	2.1363	2.0610	1.9907	1.9248	1.8629
5500	2.5206	2.4095	2.3073	2.2130	2.1257	2.0448	1.9695	1.8993	1.8338	1.7725	1.7149
6000	2.3442	2.2395	2.1433	2.0546	1.9727	1.8968	1.8263	1.7606	1.6993	1.6420	1.5882

其他条件不变,瞬时探测视场内接收的激光脉冲数  $n$  为 2,  $k=0.85$  条件下,得到单侧扫描范围  $S_1$  的结果如表 2 所示,单位(km)。

表 2 2 脉冲单侧扫描范围

速度/( $m \cdot s^{-1}$ ) 高度/m	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
1500	7.1406	6.9729	6.8108	6.6541	6.5027	6.3564	6.2151	6.0785	5.9466	5.8191	5.6958
2000	6.3192	6.1455	5.9791	5.8197	5.6670	5.5207	5.3803	5.2458	5.1167	4.9928	4.8740
2500	5.6526	5.4791	5.3141	5.1572	5.0078	4.8656	4.7300	4.6008	4.4776	4.3600	4.2476
3000	5.1017	4.9318	4.7712	4.6193	4.4756	4.3394	4.2102	4.0877	3.9713	3.8607	3.7555
3500	4.6399	4.4754	4.3208	4.1752	4.0380	3.9086	3.7864	3.6708	3.5615	3.4579	3.3596
4000	4.2483	4.0901	3.9421	3.8032	3.6729	3.5504	3.4351	3.3264	3.2238	3.1268	3.0351
4500	3.9127	3.7613	3.6200	3.4880	3.3644	3.2486	3.1399	3.0376	2.9413	2.8505	2.7648
5000	3.6228	3.4780	3.3434	3.2180	3.1009	2.9914	2.8889	2.7926	2.7021	2.6169	2.5366
5500	3.3701	3.2320	3.1038	2.9846	2.8736	2.7700	2.6732	2.5824	2.4972	2.4172	2.3418
6000	3.1485	3.0166	2.8945	2.7812	2.6759	2.5778	2.4861	2.4004	2.3201	2.2446	2.1737

其他条件不变,瞬时探测视场内接收的激光脉冲数  $n$  为 1.7,  $k=0.8$  条件下,得到单侧扫描范围  $S_1$  的结果如表 3 所示,单位(km)。

表 3 1.7 脉冲单侧扫描范围

速度/( $m \cdot s^{-1}$ ) 高度/m	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
1500	7.5123	7.3512	7.1949	7.0433	6.8963	6.7537	6.6154	6.4812	6.3511	6.2250	6.1026
2000	6.7043	6.5339	6.3701	6.2124	6.0608	5.9148	5.7743	5.6391	5.5090	5.3836	5.2629
2500	6.0379	5.8648	5.6995	5.5415	5.3905	5.2462	5.1081	4.9760	4.8496	4.7285	4.6125
3000	5.4796	5.3077	5.1444	4.9894	4.8420	4.7019	4.5685	4.4415	4.3206	4.2052	4.0951
3500	5.0062	4.8377	4.6786	4.5283	4.3861	4.2514	4.1238	4.0028	3.8879	3.7788	3.6750
4000	4.6007	4.4371	4.2833	4.1385	4.0022	3.8735	3.7521	3.6372	3.5286	3.4256	3.3280
4500	4.2504	4.0924	3.9444	3.8056	3.6754	3.5528	3.4375	3.3287	3.2261	3.1290	3.0372
5000	3.9454	3.7933	3.6514	3.5187	3.3944	3.2779	3.1684	3.0654	2.9685	2.8770	2.7906
5500	3.6780	3.5319	3.3960	3.2692	3.1508	3.0400	2.9361	2.8386	2.7469	2.6605	2.5791
6000	3.4422	3.3020	3.1719	3.0508	2.9379	2.8325	2.7339	2.6414	2.5546	2.4729	2.3960

#### 4 结 论

本文以某光电跟踪系统为对象,建立了激光搜索策略模型,给出了模型的边界条件。表 1 仿真结果表明,在保证不漏扫,满足探测概率的前提下,在 2000 m 以下的高度,采用  $N=3, L=12$  km 的光斑搜索范围,基本能够覆盖惯性  $3\sigma$  导航误差范围。若导航误差取  $1\sigma$ ,则在 1500 ~ 6000 m 高度都可覆盖。表 2、表 3 表明,若想获得较高的搜索效能,需对搜索速度、重叠系数等因素综合考虑,而提高激光重复频率尤其重要。

#### 参考文献:

- [1] Masahiro Toyoda, Kenichi Araki, Yoshiaki Suzuki. Measurement of characteristics of a quadrant avalanche photodiode and its application to a laser tracking system [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(1): 145 - 149.
- [2] Li Chengxuan, Zhu Bin. Foreign shipborne IR search & tracking system [J]. *National Defense Technology*, 2005, 8: 38 - 41. (in Chinese)  
李承选,朱斌. 国外舰载红外搜索跟踪系统 [J]. *国防科技*, 2005, 8: 38 - 41.
- [3] Zhang Genpeng, Liu Zong, Tiao Xiaodong. Searching and simulation of underwater cooperative mine detection based on UUV group [J]. *O. I. Automation*, 2007, 26(4): 62 - 67. (in Chinese)  
张跟鹏,刘忠,田小东. 基于 UUV 组群的水下协同探雷与仿真 [J]. *兵工自动化*, 2007, 26(4): 62 - 67.