

文章编号:1002-2082(2018)04-0447-06

# 一种新型光电侦察系统目标数据观测方法

刘建平,赵俊成,成莉,卢飞

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

**摘要:**针对在主要作战方向上工作的光电侦察系统,提出一种低成本的光电搜索设备获取目标数据的方法。采用光电探测器持续以固定角速度周转扫描的方法,多次连续捕获目标,不断迭代刷新目标方位和时间数据,完成对来袭目标相对侦察设备的角位置和水平距离的解算。推导出观测目标数据的数学模型,通过设计仿真软件,实验程序可在目标进入侦察设备观测边界范围后解算出其方位角,得出目标在不同时间的方位角、俯仰角和水平距离等信息,能够满足在侦察距离不小于20 km的状态下实现对速度不大于500 m/s、高度不超过5 km的目标进行跟踪,完成了对光电侦察设备的仿真验证,为后续火控计算提供了可靠数据。

**关键词:**光电搜索;捕获目标;角位置;水平距离;解算

**中图分类号:** TN202

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.5768/JAO201839.0401001

## Novel method for observing object data of photoelectric reconnaissance system

Liu Jianping, Zhao Juncheng, Cheng Li, Lu Fei

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Aiming at the photoelectric reconnaissance system working in the main operational direction, a method for obtaining the target data with low-cost photoelectric search equipment was proposed. The method of continuously scanning at a fixed angular velocity was utilized for the photodetector to capture the target at several times and to iterate and update the target azimuth and time data continuously, thus complete the calculation of the angular position and horizontal distance of the incoming target relative to the reconnaissance device. Furthermore, we deduced the mathematical model of target data. Through designing the simulation software, the experimental procedure can calculate the azimuth angle of target after the target enters into the observation boundary of reconnaissance equipment, and the information of target at different time azimuths, pitch angles and horizontal distances can be obtained. It can meet the tracking requirements for targets with a speed of no more than 500 m/s and a height of no more than 5 km in a state where the reconnaissance distance is not less than 20 km, realizes the simulation verification of the optical reconnaissance equipment, and provides reliable data for subsequent fire control calculations.

**Key words:** photoelectric search; target capture; angle position; horizontal distance; calculation

## 引言

现代战争作战环境下,在防空炮兵和导弹兵的侦察和火控系统中,需要采用光电侦察设备为目标进行准确定位,测量出来袭目标和光电设备相对于

大地的方位、俯仰角度。为更有效地拦截来袭目标,通常在主要作战方向或者作战地域的前沿地带部署一定的兵力,尽量前伸警戒线,力争尽早预警,实施监控<sup>[1-2]</sup>。为此在目标航道前方设立观测站,侦察单

收稿日期:2018-03-18; 修回日期:2018-04-29

作者简介:刘建平(1966—),男,陕西长安人,研究员,主要从事光电控制技术研究工作。E-mail:ljppia@163.com

元可捕获目标并产生观测数据,传输给信息处理单元作为数据源,引导火力单元攻击<sup>[3-5]</sup>。以往的光电设备往往采取先搜索、后捕获、再跟踪的次序来获得火控计算所需要的数据,这种做法虽然在光电设备对目标捕获跟踪后可以持续得到目标的定位数据,但是存在捕获跟踪过程中容易丢失目标、只能针对单一目标等问题,而且此种方式成本相对较高<sup>[6-9]</sup>(主要是跟踪系统和伺服系统的需求)。本文提出采用侦察设备连续扫描、多次捕获目标、不断迭代刷新获取目标方位信息的方法,通过原理推导和软件仿真对观测方法进行了分析验证。

## 1 系统设计原理

光电侦察观测目标数据方法,主要利用固定基站架设光电侦察设备,360°方位扫描,持续捕获目标信息,采用迭代递推算法,计算出捕获目标时的角位置等数据<sup>[10-11]</sup>。

首先,系统以大地为基准,以观测站所在位置A点为中心建立三维直角坐标系,如图1所示。

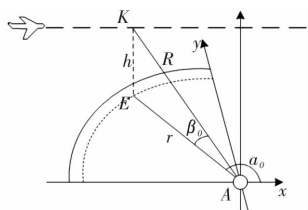


图1 目标到达侦察边界点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of target arriving at reconnaissance boundary point

图2为侦察空域目标飞行过程在水平面上的投影,假设目标沿着与x轴平行方向自左向右水平飞行,飞行高度为h,飞行方向与x轴的间距为d,目标飞行速度为v,侦察设备按顺时针方向扫描,侦察距离为R,扫描角速率为 $\omega$ ,目标起点距离y轴的垂直距离为D。目标与x轴平行飞行,推导过程可以分为以下两种情况:

### 1.1 目标从y轴正半轴通过

① 图1中,先计算目标到达侦察设备A边界K点的时间,E点为边界K点在水平面上的投影边界,见图2。

通过已知量可计算出:

$$r = \sqrt{R^2 - h^2}, AP = \sqrt{r^2 - d^2} \quad (1)$$

从而可计算出目标到达水平投影边界E点的时间为

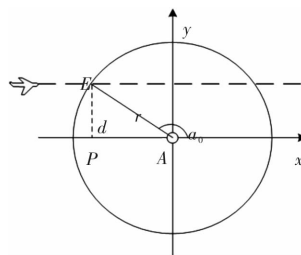


图2 目标进入侦察设备搜索区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of target entering into search area for reconnaissance equipment

$$t_0 = \frac{D - AP}{v} = \frac{D - \sqrt{r^2 - d^2}}{v} = \frac{D - \sqrt{R^2 - h^2 - d^2}}{v} \quad (2)$$

侦察设备在 $t_0$ 时刻的初始方位角为 $\theta$ 。

② 计算目标M进入侦察设备A边界E点时的角位置 $(\alpha_0, \beta_0)$ ,其中 $\angle KAE = \beta_0$ ,及水平距离 $L_0$ 。

根据空间几何关系可计算出:

$$\alpha_0 = 180^\circ - \arcsin\left(\frac{d}{r}\right), \beta_0 = \arctan\left(\frac{h}{r}\right),$$

$$L_0 = AE = r \quad (3)$$

③ 计算目标M从侦察设备A的边界向前飞行,侦察设备A在初始方位角为 $\theta$ 时,继续扫描,第一次扫描到目标M的角位置 $(\alpha_1, \beta_1)$ 及水平距离 $L_1$ 、时间 $t_1$ 。

可以认为在目标到达侦察设备的边界时,侦察设备以A点为中心,在初始角为 $\theta$ ,按顺时针方向连续扫描,设侦察设备在扫描过程中的瞬时方位角为 $\alpha_A$ ,目标在飞行过程中,从A点观测目标的瞬时方位角为 $\alpha_M$ ,侦察设备要扫描到目标,必然是在沿目标的飞行方向上,而且在E点的右侧某一点,假设在 $H_1$ 点,如图3所示,计算过程如下:

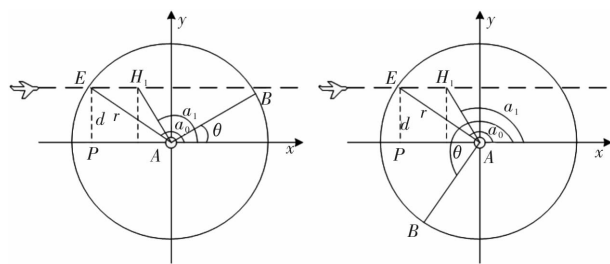


图3 第一次扫描到目标M时的角位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of angular position of 1st scanning to target M

对于侦察设备A,由于初始角位置的不同,有

以下两种情况:

当初始方位角  $\theta \leq \alpha_0$  时,有:  $360^\circ - \alpha_A = \omega t - \theta$ ,  
可得出  $\alpha_A = 360^\circ + \theta - \omega t$ ;

当初始方位角  $\theta > \alpha_0$  时,有:  $\theta - \alpha_A = \omega t$ ,可得出  $\alpha_A = \theta - \omega t$ 。

在目标飞行过程中,通过侦察设备观测到目标的瞬时方位角为  $\alpha_M$ ,假设目标飞至  $H_1$  点,于是,在三角形  $AEH_1$  中,利用余弦定理可得出:

$$AH_1^2 = AE^2 + EH_1^2 - 2 \times AE \times EH_1 \times \cos \angle AEH_1 \quad (4)$$

式中:  $AH_1 = \frac{d}{\sin(180^\circ - \alpha_M)}$ ;  $AE = L_0$ ;  $EH_1 = v \cdot t$ ;  $\angle AEH_1 = 180^\circ - \alpha_0$ 。

代入(4)式即为

$$\left(\frac{d}{\sin(180^\circ - \alpha_M)}\right)^2 = L_0^2 + (v \cdot t)^2 - 2L_0 \cdot v \cdot t \cdot \cos(180^\circ - \alpha_0) \quad (5)$$

通过(5)式可得出目标的瞬时方位角  $\alpha_M$  为

$$\alpha_M = 180^\circ - \arcsin \left[ \frac{d}{(L_0^2 + (v \cdot t)^2 - 2 \cdot L_0 \cdot v \cdot t \cdot \cos(180^\circ - \alpha_0))^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (6)$$

由以上关系式可以看出,  $\alpha_A$  和  $\alpha_M$  均是时间  $t$  的函数,随着时间的递增,在某一时刻,必然会出现  $\alpha_A = \alpha_M$ ,即在这一时刻侦察设备 A 扫描到目标 M,则有:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_A = \alpha_M \\ \beta_1 = \arctan\left(\frac{h}{AH}\right) = \arctan\left(\frac{h \sin(180^\circ - \alpha_1)}{d}\right) \end{cases} \quad (7)$$

其水平距离为  $L_1 = AH_1 = \frac{d}{\sin(180^\circ - \alpha_1)}$ ,

$t_1 = t_0 + \Delta t$ ,  $R_1 = \sqrt{L_1^2 - h^2}$ ,  $\Delta t$  为从开始迭代到扫描到目标 M 的时间。

④ 计算侦察设备 A 第二次及后续扫描到目标 M 时的角位置  $(\alpha_2, \beta_2)$ ,  $(\alpha_i, \beta_i)$  及时间  $t_i$ , 计算过程如下。

如图 4,此时侦察设备的初始角可以看作  $\alpha_i$ ,即  $\theta = \alpha_i$ ,根据第二步的计算方法,可以列出侦察设备 A 的瞬时方位角为

$$\alpha_A = 360^\circ + \theta - \omega t = 360^\circ + \alpha_i - \omega t \quad (8)$$

目标 M 飞行过程中,通过侦察设备观测到目标的瞬时方位角为  $\alpha_M$ ,同第二步,在三角形  $AH_1H_2$  中,利用余弦定理可得出:

$$AH_2^2 = AH_1^2 + H_1H_2^2 - 2 \cdot AH_1 \cdot H_1H_2 \cdot \cos \angle AH_1H_2 \quad (9)$$

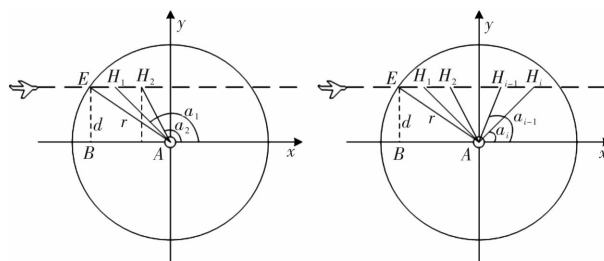


图 4 第二次及后续扫描到目标 M 时的角位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of angular position for 2nd and subsequent scanning on target M

式中:  $AH_2 = \frac{d}{\sin(180^\circ - \alpha_M)}$ ;  $AH_1 = L_1$ ;  $H_1H_2 = v \cdot t$ ;  $\angle AH_1H_2 = 180^\circ - \alpha_1$ 。

代入(9)式即为

$$\left(\frac{d}{\sin(180^\circ - \alpha_M)}\right)^2 = L_1^2 + (v \cdot t)^2 - 2 \cdot L_1 \cdot v \cdot t \cdot \cos(180^\circ - \alpha_1) \quad (10)$$

通过(10)式可得出目标的瞬时方位角  $\alpha_M$  为

$$\alpha_M = 180^\circ - \arcsin \left[ \frac{d}{(L_1^2 + (v \cdot t)^2 - 2 \cdot L_1 \cdot v \cdot t \cdot \cos(180^\circ - \alpha_1))^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (11)$$

由以上关系式可以看出,  $\alpha_A$  和  $\alpha_M$  均是时间  $t$  的函数,随着时间的递增,在某一时刻,必然会出现  $\alpha_A = \alpha_M$ ,即在这一时刻侦察设备 A 扫描到目标 M,则有:

$$\begin{cases} \alpha_2 = \alpha_A = \alpha_M \\ \beta_2 = \arctan\left(\frac{h}{AH_2}\right) = \arctan\left(\frac{h \cdot \sin(180^\circ - \alpha_2)}{d}\right) \end{cases} \quad (12)$$

其水平距离为  $L_2 = AH_2 = \frac{d}{\sin(180^\circ - \alpha_2)}$ ,

$t_2 = t_1 + \Delta t$ ,  $R_2 = \sqrt{L_2^2 - h^2}$ ,  $\Delta t$  为从开始迭代到扫描到目标 M 的时间。

同理,可计算出第  $i$  次扫描到目标时的角位置  $(\alpha_i, \beta_i)$ ,可先得出:

$$\alpha_A = 360^\circ + \theta - \omega t = 360^\circ + \alpha_{i-1} - \omega t \quad (13)$$

$$\alpha_M > 90^\circ \text{ 时, } AH_i = \frac{d}{\sin(180^\circ - \alpha_M)}, \alpha_M = 180^\circ - \arcsin \frac{d}{\sqrt{L_{i-1}^2 - (v \cdot t)^2 - 2 \cdot L_{i-1} \cdot v \cdot t \cdot \cos(180^\circ - \alpha_{i-1})}} \quad (14)$$

$$\alpha_M \leq 90^\circ \text{ 时, } AH_i = \frac{d}{\sin \alpha_M}, \alpha_M = \arcsin \frac{d}{\sqrt{L_{i-1}^2 + (v \cdot t)^2 - 2 \cdot L_{i-1} \cdot v \cdot t \cdot \cos(180^\circ - \alpha_{i-1})}} \quad (15)$$

即可得出扫描到目标时的方位角

$$\begin{cases} \alpha_i = \alpha_A = \alpha_M \\ \beta_i = \arctan\left(\frac{h}{AH_i}\right) = \arctan\left(\frac{h \cdot \sin(180^\circ - \alpha_i)}{d}\right) \end{cases} \quad (16)$$

其水平距离为  $L_i = AH_i = \frac{d}{\sin(180^\circ - \alpha_i)}$ ,  $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ ,  $R_i = \sqrt{L_i^2 - h^2}$ ,  $\Delta t$  为从开始迭代到扫描到目标  $M$  的时间。

按照以上模型,设置相应的参数,通过递推,可以依次计算出由侦察设备扫描到目标时的角位置等数据,具有普遍性。

## 1.2 目标从 $y$ 轴负半轴通过

当目标从  $y$  轴负半轴通过时,同理有以下总结。

① 计算目标到达  $E$  点的时间,有:

$$\begin{cases} r = \sqrt{R^2 - h^2} \\ AP = \sqrt{r^2 - d^2} \\ t_0 = \frac{D - AP}{v} = \frac{D - \sqrt{R^2 - h^2 - d^2}}{v} \end{cases} \quad (17)$$

侦察设备在  $t_0$  时刻的初始方位角为  $\theta$ 。

② 计算目标  $M$  进入侦察设备  $A$  边界  $E$  点时的角位置  $(\alpha_0, \beta_0)$ , 水平距离为  $L_0$ , 有:

$$\alpha_0 = 180^\circ + \arcsin\left(\frac{d}{r}\right), \beta_0 = \arctan\left(\frac{h}{r}\right), L_0 = AE = r \quad (18)$$

③ 计算目标  $M$  从侦察设备  $A$  的边界  $E$  点向前继续飞行,侦察设备  $A$  在初始方位角为  $\theta$  时继续扫描,第一次扫描到目标  $M$  的角位置  $(\alpha_1, \beta_1)$ , 水平距离为  $L_1$ , 时间为  $t_1$ 。

对于侦察设备  $A$ , 由于初始角位置的不同,有以下两种情况:

当初始方位角  $\theta \leq \alpha_0$  时,有  $\alpha_A = 360^\circ + \theta - \omega t$

当初始方位角  $\theta > \alpha_0$  时,有  $\alpha_A = \theta - \omega t$

目标  $M$  飞行过程中,通过侦察设备观测到目标的瞬时方位角  $\alpha_M$  为

$$\alpha_M = 180^\circ + \arcsin\left[\frac{d}{(L_0^2 + (v \cdot t)^2 - 2 \cdot L_0 \cdot v \cdot t \cdot \cos(\alpha_0 - 180^\circ))^{\frac{1}{2}}}\right] \quad (19)$$

根据相遇的条件即可得出方位角

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_A = \alpha_M \\ \beta_1 = \arctan\left(\frac{h}{AH_1}\right) = \arctan\left(\frac{h \cdot \sin(\alpha_1 - 180^\circ)}{d}\right) \end{cases} \quad (20)$$

其水平距离为  $L_1$ , 即:

$$\begin{cases} L_1 = AH_1 = \frac{d}{\sin(\alpha_1 - 180^\circ)}, t_1 = t_0 + \Delta t \\ R_1 = \sqrt{L_1^2 - h^2} \end{cases} \quad (21)$$

④ 计算侦察设备  $A$  第  $i$  次扫描到目标  $M$  时的角位置  $(\alpha_i, \beta_i)$  及时间  $t_i$ , 有:

$$\alpha_A = 360^\circ + \theta - \omega t = 360^\circ + \alpha_{i-1} - \omega t \quad (22)$$

$$\alpha_M > 270^\circ \text{ 时, } AH_i = \frac{d}{\sin(360^\circ - \alpha_M)}, \alpha_M = 360^\circ -$$

$$\arcsin \frac{d}{\sqrt{L_{i-1}^2 + (v \cdot t)^2 - 2 \cdot L_{i-1} \cdot v \cdot t \cdot \cos(\alpha_{i-1} - 180^\circ)}} \quad (23)$$

$$\alpha_M \leq 270^\circ \text{ 时, } AH_i = \frac{d}{\sin(\alpha_M - 180^\circ)}, \alpha_M = 180^\circ +$$

$$\arcsin \frac{d}{\sqrt{L_{i-1}^2 + (v \cdot t)^2 - 2 \cdot L_{i-1} \cdot v \cdot t \cdot \cos(\alpha_{i-1} - 180^\circ)}} \quad (24)$$

根据相遇的条件即可得出方位角  $\alpha_i = \alpha_A = \alpha_M$ ,

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{h}{AH_i}\right) = \arctan\left(\frac{h \cdot \sin(\alpha_i - 180^\circ)}{d}\right) \quad (25)$$

其水平距离为  $L_i$ , 亦即:

$$\begin{aligned} L_i &= AH_i = \frac{d}{\sin(\alpha_i - 180^\circ)}, t_i = t_{i-1} + \Delta t, \\ R_i &= \sqrt{L_i^2 - h^2} \end{aligned} \quad (26)$$

至此,从侦察设备  $A$  第 1 次到第  $i$  次扫描到目标  $M$  所获取的方位信息推导完毕。

## 2 光电侦察系统仿真模型设计

根据以上推导过程,设计仿真软件,以验证系统模型的可靠性和正确性。按照顺时针扫描,软件设计为可输入参数,计算出被观测目标每一次被捕获的时间和其方位参数,并将仿真结果以图形的方式给出,便于对输出结果进行处理分析。仿真软件流程框图见图 5。

## 3 实验结果

预设侦察任务系统达到以下指标,最大探测目标高度为 5 km;探测目标最大速度为 500 m/s;最小侦察距离为 20 km;布设高度为 3 m~100 m。

按照侦察设备仿真模型及预设指标设计程序。程序运行后,分别输入侦察设备和目标的参数,包括:单站扫描周期为  $\omega = 180^\circ/\text{s}$ , 侦察距离

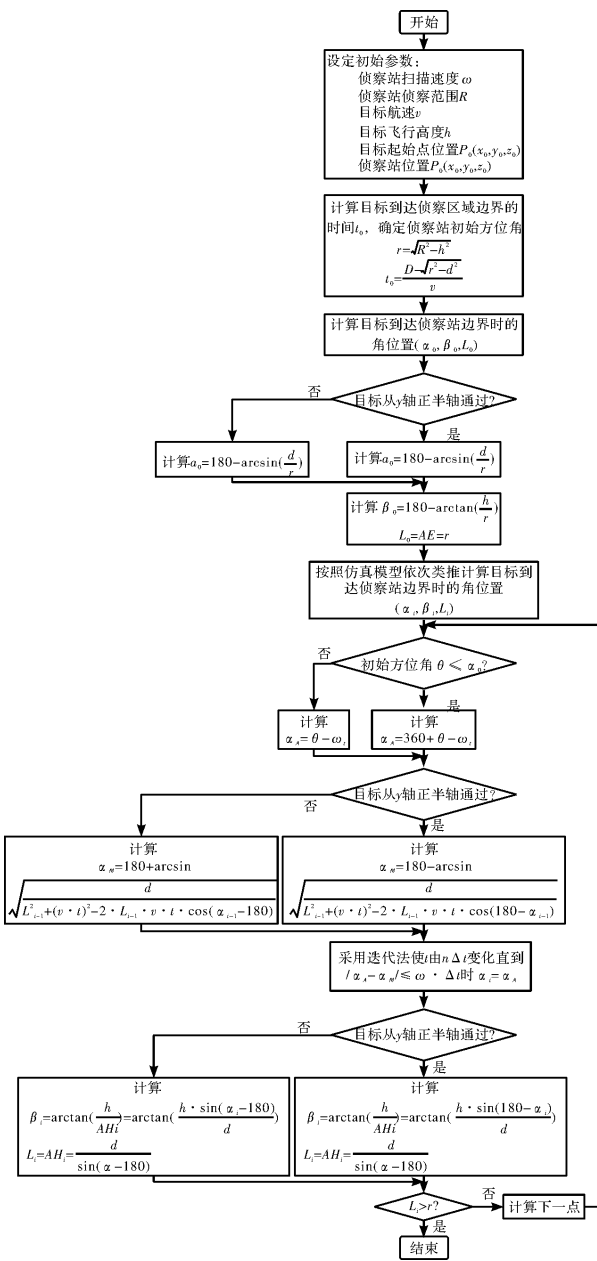


图 5 侦察设备仿真流程图

Fig. 5 Simulation flow chart of reconnaissance equipment  
 $R=20\text{ km}$ 。其中,目标在距离  $y$  轴  $D=30\text{ km}$  处以  $V=500\text{ m/s}$  的速度在  $A$  点的直角坐标系下沿航路  $y=6\text{ km}$  飞行,飞行高度为  $h=5\text{ km}$ 。

通过仿真软件可获取侦察设备  $A$  探测到目标的角位置和时间数据,仿真数据见图 6 和表 1。

从表 1 中可以看出,侦察设备首次和末次发现目标时,目标距离数据与侦察距离  $\geq 20\text{ km}$  指标吻合。同时,侦察设备在第一次发现目标后,光电侦察设备经过周转后多次捕获目标,直至目标离开侦察边界,所获得的仿真数据中目标的方位角俯仰角分布合理,目标数据随时间变化连续稳定,符合预期设计要求。

表 1 侦察设备观测目标仿真数据

Table 1 Simulation data of target observed by reconnaissance equipment

| 序号 | 侦察设备 A 观测目标参数 |          |          |           |
|----|---------------|----------|----------|-----------|
|    | 方位角/(°)       | 俯仰角/(°)  | 时间/s     | 距离/m      |
| 1  | 161.295 1     | 14.962 4 | 25.941 6 | 19 366.00 |
| 2  | 160.257 7     | 15.721 4 | 27.947 4 | 18 452.85 |
| 3  | 159.103 6     | 16.553 7 | 29.953 8 | 17 549.18 |
| 4  | 157.812 6     | 17.468 7 | 31.961 0 | 16 656.45 |
| 5  | 156.360 7     | 18.476 9 | 33.969 0 | 15 776.73 |
| 6  | 154.717 9     | 19.590 5 | 35.978 1 | 14 912.25 |
| 7  | 152.846 8     | 20.822 3 | 37.988 5 | 14 065.86 |
| 8  | 150.701 0     | 22.185 9 | 40.000 5 | 13 241.05 |
| 9  | 148.222 4     | 23.694 4 | 42.014 2 | 12 442.19 |
| 10 | 145.338 3     | 25.358 2 | 44.030 3 | 11 674.70 |
| 11 | 141.958 2     | 27.181 9 | 46.049 0 | 10 945.32 |
| 12 | 137.971 8     | 29.157 8 | 48.071 2 | 10 262.39 |
| 13 | 133.248 7     | 31.257 3 | 50.097 4 | 9 636.11  |
| 14 | 127.646 8     | 33.417 9 | 52.128 5 | 9 078.68  |
| 15 | 121.034 5     | 35.528 6 | 54.165 3 | 8 604.22  |
| 16 | 113.337 9     | 37.421 6 | 56.208 0 | 8 228.09  |
| 17 | 104.614 3     | 38.881 7 | 58.256 5 | 7 965.40  |
| 18 | 95.125 1      | 39.692 7 | 60.309 2 | 7 828.77  |
| 19 | 85.340 3      | 39.712 3 | 62.363 6 | 7 825.55  |
| 20 | 75.825 0      | 38.936 8 | 64.416 4 | 7 955.92  |
| 21 | 67.057 2      | 37.503 1 | 66.465 1 | 8 212.83  |
| 22 | 59.308 7      | 35.625 7 | 68.508 2 | 8 583.87  |
| 23 | 52.645 5      | 33.521 0 | 70.545 2 | 9 053.98  |
| 24 | 46.998 0      | 31.359 9 | 72.576 6 | 9 607.78  |
| 25 | 42.236 1      | 29.255 6 | 74.603 0 | 10 231.09 |
| 26 | 38.217 6      | 27.273 0 | 76.625 4 | 10 911.55 |
| 27 | 34.811 2      | 25.441 8 | 78.644 3 | 11 638.90 |
| 28 | 31.905 7      | 23.770 4 | 80.660 4 | 12 404.72 |
| 29 | 29.409 4      | 22.254 7 | 82.674 3 | 13 202.22 |
| 30 | 27.249 1      | 20.884 3 | 84.686 3 | 14 025.93 |
| 31 | 25.365 9      | 19.646 5 | 86.696 8 | 14 871.41 |
| 32 | 23.713 0      | 18.527 5 | 88.705 9 | 15 735.15 |
| 33 | 22.252 6      | 17.514 4 | 90.714 1 | 16 614.26 |
| 34 | 20.954 7      | 16.595 3 | 92.721 3 | 17 506.37 |
| 35 | 19.794 4      | 15.759 3 | 94.727 7 | 18 409.63 |
| 36 | 18.751 8      | 14.996 9 | 96.733 5 | 19 322.41 |

4 结论

本文提出的光电侦察方法可实现在观测站侦

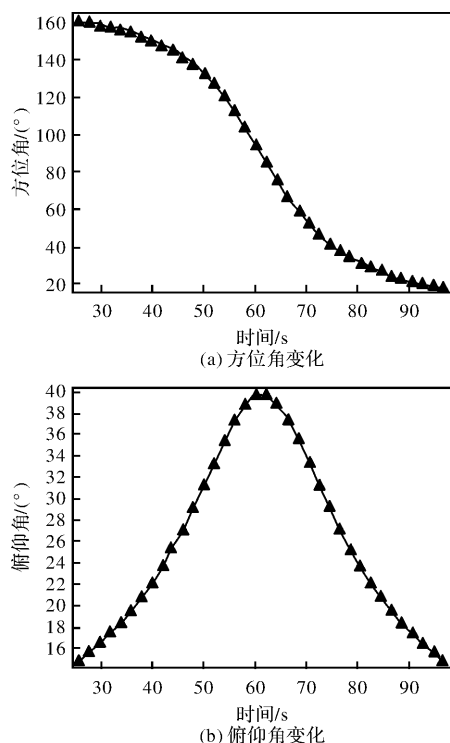


图6 侦察设备A目标仿真结果

Fig. 6 Target simulation results of reconnaissance equipment A

察范围内对目标的持续捕获追踪,在目标进入光电侦察设备的有效探测距离,被光电侦察设备发现并捕获后,采用本方法可多次连续捕获目标并测出目标方位信息,形成目标的三维航迹,提供给火控系统,引导火力单元更新目标参数。由此可形成对敌目标的多波次持续火力打击,显著提高拦截概率。本方法设计了一种光电侦察系统目标数据处理的验证方法,通过建立仿真模型,产出光电侦察系统对目标的观测数据,验证了新型光电侦察系统的关键技术。

#### 参考文献:

- [1] LIU Zhichun, YUAN Wen, SU Zhen. Equipment development tendency of the electro-optical warning reconnaissance technology[J]. Laser & Infrared, 2008,38(7):629-630.  
刘志春,袁文,苏震. 光电侦察告警技术的装备与发展[J]. 激光与红外,2008,38(7):629-630.
- [2] HUANG Bo. Research on image positioning technology based on airborne photoelectric measuring system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2011.  
黄波. 基于机载光电测量系统的图像目标定位技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2011.
- [3] SHI Hui, HAO Xihui, YANG Yuqiong, et al. Target location accuracy evaluation index of electro-optical reconnaissance system[J]. Journal of Applied Optics,2012,33(3):446-451.  
史辉,郝晰辉,杨玉琼,等. 光电侦察系统目标定位精度评价指标研究[J]. 应用光学, 2012, 33 (3): 446-451.
- [4] ZHU Rong, SUN Dong, ZHOU Zhaoying, et al. A linear fusion algorithm for attitude determination using low cost MEMS-based sensors measurement[J]. Measurement, 2007, 40 (3):322-328.
- [5] SUN Chao, DU Jiyan, DUAN Lianfei. A technology of UAV positioning to target by two-point space rendezvous[J]. Ordnance Industry Automation,2011,30 (6): 35-36.  
孙超,都基焱,段连飞. 一种空间两点交会无人机定位方法[J]. 兵工自动化,2011,30(6): 35-36.
- [6] YAO Xin. Research on the improved orientation accuracy method of UAV[J]. Ship Electronic Engineering, 2011,31(10): 56-59.  
姚新. 无人机提高目标定位精度方法研究[J]. 舰船电子工程,2011,31(10): 56-59.
- [7] HE Wentao. UAV position technology and its application [J]. Electro-Optic Technology Application 2003,18(5): 3-6.  
何文涛. 无人机定位技术及其应用[J]. 光电技术应用,2003,18(5): 3-6.
- [8] MEERSCHAERT M M. Mathematical modeling and analysis[M]. 3rd ed. Translated by Liu Laifu. Beijing:China Machine Press,2009.  
米尔斯切特. 数学建模方法与分析[M]. 3 版. 刘来福,译. 北京:机械工业出版社,2009.
- [9] CHEN Zhaobing, WANG Bing, CHEN Ning, et al. Analysis of overall accuracy of mast-mounted photo-detection system[J]. Acta Armamentarh, 2013, 34 (4):507-512.  
陈兆兵,王兵,陈宁,等. 桅杆型光电探测系统总体精度分析[J]. 兵工学报,2013,34(4):507-512.
- [10] MICHAEL K M. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems[J]. Control Systems Magazine,2008,28(1):47-64.
- [11] JIA Qinglian, QIAO Yanfeng, DENG Wenyan. Target location and accuracy analysis of multi-station infrared panoramic searching system[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(4):720-726.  
贾庆莲,乔彦峰,邓文渊. 多基地周视红外搜索系统的目标定位与精度分析[J]. 光学精密工程,2009,17 (4):720-726.