

文章编号:1001-5078(2007)11-1184-04

# 基于正交多站测角的机载红外定位技术研究

王春雷,杨日杰

(海军航空工程学院电子工程系,山东 烟台 264001)

**摘要:**研究了基于测角的被动定位方法,分析了双站测角定位系统的测距精度,针对双站测角定位精度较低且在一些目标方位上出现的几何方位影响精度(Geometric Dilution of Precision, GDOP)问题,结合机载平台的结构特点,提出了一种适用于单架飞机的红外被动测角定位方法。该方法按照正交方式将四个测量站装载到机载平台上,构成两个正交的测角定位系统,通过恰当选取两个系统的定位信息,可有效克服GDOP问题。最后进行了仿真验证,结果表明该方法能够有效克服GDOP问题,提高定位精度。

**关键词:**被动定位;红外辐射;机载平台;定位精度

**中图分类号:**TN219

**文献标识码:**A

## Research on Airborne Infrared Passive Location Method Based on Orthogonal Multi-station Triangulation

WANG Chun-lei, YANG Ri-jie

(Naval Aeronautical Engineering Institute, Electronic Engineering Dept., Yantai 264001, China)

**Abstract:** A method for passive location based on the triangulation principle was studied. By analyzing the ranging precision of dual-station triangulating location system, it proved to be with low precision, and for some target orientations the precision in the target location was completely lost, known as Geometric Dilution of Precision. Combined with the character of the airborne platform, an infrared passive triangulating positioning method applying to a single aircraft was proposed. Four stations were installed in an orthogonal manner on the platform, which constituted two orthogonal triangulation systems. The GDOP can be resolved by selecting the positioning data of the two triangulation systems appropriately. Finally, simulations were also made, whose results show that the method can eliminate the GDOP effect and increase the precision of location.

**Key words:** passive location; infrared radiation; airborne platform; location accuracy

### 1 引言

在现代战争中,反辐射导弹、隐身技术、综合电子干扰对雷达的生存提出了严峻的挑战,而红外被动探测系统具有抗电磁干扰、隐蔽性好的特点,更能发挥无源定位的诸多优点,成为研究的一个热点<sup>[1]</sup>。无源定位是被动地接收辐射源的信号,根据红外辐射源信号的到达时间、方位等信息来确定辐射源的位置<sup>[2-4]</sup>。传统的无源定位技术包括时间差异定位(TDOA)、频率差异定位(FDOA)和角度差异定位(ADL),早期由于雷达测向精度较差,ADL

应用较少,随着红外探测器的发展,测向精度的提高,使得基于角度测量的红外定位系统得到重视。

基本的红外测角定位系统是利用双观测站测量目标的角度信息,通过三角形关系计算得到目标方位,来实现三角交叉定位。但是在 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 方位附近,目标距离精确度会出现严重减弱,这种现象被称

**基金项目:**国家自然科学基金项目(60572161)资助。

**作者简介:**王春雷(1981-),男,硕士生,主要从事大气辐射传输、航空红外搜潜方面的研究。E-mail:cmue@163.com

**收稿日期:**2007-05-29; **修订日期:**2007-07-09

为几何方位影响精度(Geometric Dilution of Precision, GDOP)问题。文献[5]中提到的三站和多站定位,解决了 GDOP 问题,但是存在计算量大、数据融合复杂且不易实现等问题。本文研究了双站三角定位原理,分析了其定位精度及 GDOP 问题,进一步将其应用到机载红外探测系统中,结合载机平台特点,提出了一种适用于单架飞机的机载正交红外被动定位模型,并进行了模型近似,简化了计算过程,能够消除 GDOP 问题,提高定位精度;并且由于机载平台的灵活性可克服传统的固定双站机动性差的问题。

## 2 双站测角定位原理

传统的双站定位是采用两个固定的观测站,通过测量目标的角度信息来确定目标的方位。基本依据是人的双眼的定位原理,由目标和两个观测站构成的三角形的角度关系来分析得到目标的距离。其原理如图 1 所示。

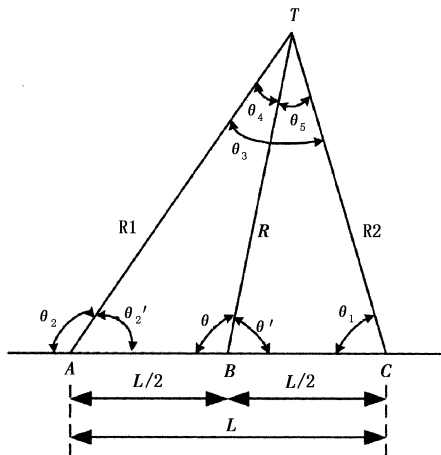


图 1 双站测角定位原理

Fig. 1 dual-station triangulating location principle

目标位于  $T$  点,两个红外传感器位于  $A$  和  $C$  点,它们距离  $T$  点的目标分别是  $R_1$  和  $R_2$ ;取  $A$  和  $C$  中点  $B$  作为对称的参考点,  $R$  代表  $B$  点到目标  $T$  的距离。图 1 标出了各种角度关系。为了便于分析,在这个模型里做了如下假设:

(1)  $AC$  的长度  $L$  在测量中没有误差;

(2) 红外探测器测量方位的误差已知,并且用  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$  表示;

(3) 忽略水平路径距离和倾斜路径距离之间的差异。

观察图 1,顶角满足关系式:

$$\theta_3 = \theta_2 - \theta_1 = \theta_4 + \theta_5 \quad (1)$$

由三角形正弦定理可以得到:

$$\frac{R}{\sin\theta_2} = \frac{L/2}{\sin\theta_4} \quad (2)$$

$$\frac{R}{\sin\theta_1} = \frac{L/2}{\sin\theta_5} \quad (3)$$

所以有:

$$\sin(\theta_2 - \theta_1) = \sin\theta_4 \cos\theta_5 + \cos\theta_4 \sin\theta_5 \quad (4)$$

进一步可得:

$$\sin(\theta_2 - \theta_1) = \frac{L}{2R} \left[ \sin\theta_2 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_1\right)^2} + \sin\theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_2\right)^2} \right] \quad (5)$$

$$R = \frac{L}{2} \cdot$$

$$\left[ \frac{\sin\theta_2 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_1\right)^2} + \sin\theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_2\right)^2}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \right] \quad (6)$$

解式(6)即可求得  $R^{[6]}$ 。

由距离  $R$  和测得的方位角,再结合载机的位置,就可以很容易地确定出目标的方位。

## 3 双站定位精度分析

由式(6),可知  $R/L$  是关于方位角  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的函数,由此可以得到距离灵敏度表达式的形式为:

$$\frac{\Delta R}{R} = f_1(\theta_1, \theta_2) \Delta\theta_1 + f_2(\theta_1, \theta_2) \Delta\theta_2$$

根据参考文献[6],可以得到  $R$  的标准化变化量为:

$$\left( \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\Delta\theta} \right) = \left( \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_2\right)^2} (\cos\theta_1 + \sin\theta_1 \cot(\theta_2 - \theta_1)) + \sin\theta_2 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_1\right)^2} \left( \cot(\theta_2 - \theta_1) - \frac{\left(\frac{L}{2R}\right)^2 \sin\theta_1 \cos\theta_2}{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_1\right)^2} \right)}{\sin\theta_2 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_1\right)^2} + \sin\theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_2\right)^2}} \right) \cdot \gamma_1 +$$

$$\left( \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_1\right)^2} (\cos\theta_2 - \sin\theta_2 \cot(\theta_2 - \theta_1)) - \sin\theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_2\right)^2} \left( \cot(\theta_2 - \theta_1) + \frac{\left(\frac{L}{2R}\right)^2 \sin\theta_2 \cos\theta_2}{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_2\right)^2} \right)}{\sin\theta_2 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_1\right)^2} + \sin\theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2R} \sin\theta_2\right)^2}} \right) \cdot \gamma_2 \cdot \alpha \quad (7)$$

此式即为标准化的距离灵敏度公式,这里  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  是独立的随机变量,均值为零,具有相同的标准差; $\alpha$  代表  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$  的均方根的比率;根据参考文献[7],采用一种保守的近似分析方法,通过  $\left| \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\Delta\theta} \right|$  来考虑距离精度,其中  $\left| \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\Delta\theta} \right| = \sqrt{m^2 + n^2}$ ,  $m, n$  代表随机变量  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  的灵敏度系数。设两个红外传感器的角度误差  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$  相同,即有  $\alpha = 1$ ,而目标距  $B$  点的距离与  $AC$  间距离的比值  $R/L$  分别取 10, 100, 1000, 代入  $\left| \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\Delta\theta} \right|$  中,通过 MATLAB 仿真得到距离灵敏度曲线如图 2 所示。

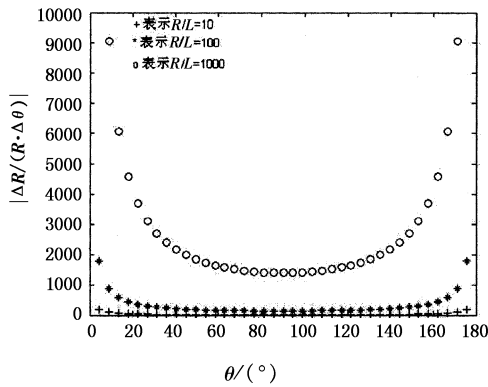


图2 双站定位测距灵敏度曲线

Fig. 2 dual-station location sensitivity curves

由图 2 可知,在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  附近距离灵敏度最高,也就是说,在这两个方位由测角引起的定位误差最大,出现 GDOP 问题;目标距离两传感器所在直线越远,距离测量的误差越大,定位精度越差;在一定范围内,两观测站间距越大,定位精度越高。

#### 4 单机机载正交多站红外测角定位模型

为了解决上面的双站定位模型的 GDOP 问题,最直接的方法就是采用多站测角数据融合的办法。对于地面和舰载观测站,文献[5]提到用等腰三观测站的方法,这里考虑到载机平台的特点,给出基于正交四站测角的机载红外定位模型,如图 3 所示。

图 3 中,结合载机平台,在机头(A)、机尾(C)和两翼(D和E,可以采用吊舱)分别安置了红外测向传感器,B表示AC和DE两组红外测角定位系统的中点,分别用下标L和S来区分AC、DE两个系统,其中每个系统都满足前面提到的双站测角定位模型的特性。考虑到充分利用两组测角系统测得的角度数据,以发挥最大探测效能,所以需要建立各个角度之间的一些新的联系,由图 3 分析可以得到下面的关系式:

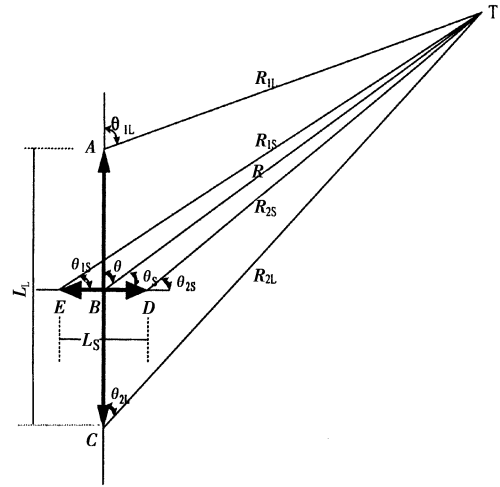


图3 机载正交多站测角定位模型

Fig. 3 airborne orthogonal multi-station triangulation location model

$$\cos\theta_S = \cos(90^\circ - \theta) = \sin\theta \quad (8)$$

$$\sin\theta_S = \sin(90^\circ - \theta) = \cos\theta \quad (9)$$

$$(R_{2L})^2 = R^2 + \left(\frac{L_L}{2}\right)^2 + RL_L \cos\theta \quad (10)$$

$$(R_{1L})^2 = R^2 + \left(\frac{L_L}{2}\right)^2 - RL_L \cos\theta \quad (11)$$

$$(R_{2S})^2 = R^2 + \left(\frac{L_S}{2}\right)^2 - RL_S \sin\theta \quad (12)$$

$$(R_{1S})^2 = R^2 + \left(\frac{L_S}{2}\right)^2 + RL_S \sin\theta \quad (13)$$

$$\frac{R}{\sin(\pi - \theta_{1L})} = \frac{R_{1L}}{\sin\theta} \quad (14a)$$

$$\frac{R}{\sin\theta_{2L}} = \frac{R_{2L}}{\sin(\pi - \theta)} \quad (14b)$$

$$\frac{R}{\sin\theta_{1S}} = \frac{R_{1S}}{\sin(\theta + \pi/2)} \quad (15a)$$

$$\frac{R}{\sin(\pi - \theta_{2S})} = \frac{R_{2S}}{\sin(\pi/2 - \theta)} \quad (15b)$$

$$\frac{L_L}{\sin(\theta_{1L} - \theta_{2L})} = \frac{R_{1L}}{\sin\theta_{2L}} = \frac{R_{2L}}{\sin(\pi - \theta_{1L})} \quad (16)$$

$$\frac{L_S}{\sin(\theta_{2S} - \theta_{1S})} = \frac{R_{1S}}{\sin(\pi - \theta_{2S})} = \frac{R_{2S}}{\sin\theta_{1S}} \quad (17)$$

假设载机翼展 38.0m, 机长 34.0m, 可以分别取  $AC$  和  $DE$  为 20m 和 4m; 因目前红外探测器的探测距离可以达到 10 ~ 18km<sup>[8]</sup>, 所以可以做一个合理的假设来简化模型, 认为  $R \gg L$ , 那么就可以近似的有  $R_{1L} = R_{2L} = R$ ,  $R_{1S} = R_{2S} = R$ , 将上面的分析结果代入前面的双站测角定位灵敏度公式(7), 可以得到简化的  $AC, DE$  两个定位系统的近似距离灵敏度公

式为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\Delta \theta}\right)_L = \left[ \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}}{\sin \theta} + \sqrt{1 - \left(\frac{L_L}{R} \sin \theta\right)^2} \right] \cdot \gamma_{1L} + \left[ \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}}{\sin \theta} \sqrt{1 - \left(\frac{L_L}{R} \sin \theta\right)^2} \right] \cdot \gamma_{2L} \cdot \alpha_L \quad (18)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\Delta \theta}\right)_S = \left[ \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}}{\cos \theta} + \sqrt{1 - \left(\frac{L_S}{R} \cos \theta\right)^2} \right] \cdot \gamma_{1S} + \left[ \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}}{\cos \theta} \sqrt{1 - \left(\frac{L_S}{R} \cos \theta\right)^2} \right] \cdot \gamma_{2S} \cdot \alpha_S \quad (19)$$

这里  $\gamma_{1L}, \gamma_{2L}, \gamma_{1S}, \gamma_{2S}$  是独立的随机变量, 具有零均值和统一的标准偏差, 并且  $\alpha_L, \alpha_S$  代表  $\Delta \theta$  的均方根的比率; 仍然采用前面提到的距离灵敏度的分析方法对近似公式(18)(或(19))与精确公式(7)进行比较。得到如图4所示结果。

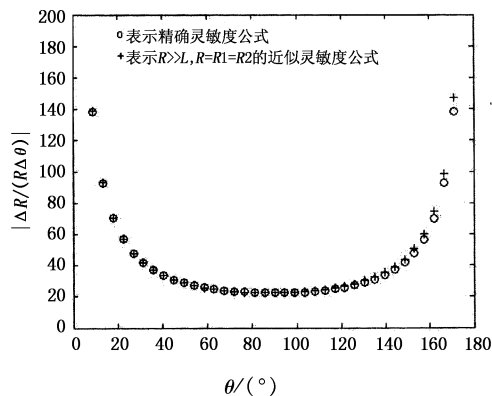


图4 近似灵敏度公式与精确灵敏度公式比较

Fig.4 comparison of the approximate sensitivity and the accurate sensitivity

由图4可以看出,近似的距离灵敏度公式与精确距离灵敏度公式能较好地吻合,只是在180°附近出现了稍微的偏差,也就是对于机载平台,采用近似的灵敏度公式能够满足测量精度的要求。下面我们将采用简化的近似距离灵敏度公式代替精确公式来进行分析。

对于AC,DE两个测角定位系统分别取距离R为2km和20km进行分析,由公式(18)和(19)得到图5、图6两个距离灵敏度曲线。

从图5、图6中可以看出,在0°和180°方位附

近,较短的DE系统的性能优于较长的AC系统的性能;而在90°附近一个较宽的角度范围内,AC系统的性能较好。进一步,在 $\theta = 10^\circ$ 和 $\theta = 170^\circ$ 附近有一个交叉点将坐标区域分成两部分,在角度 $\theta < 10^\circ$ 和 $\theta > 170^\circ$ 之间,DE系统的距离测量精度要好于AC系统,而在 $10^\circ$ 到 $170^\circ$ 之间,AC系统则表现出较好地定位精度。可见,AC,DE长短两个系统的距离精度刚好互补。也就是说,通过一定的方法将两个系统的距离数据融合到一起,恰当选择,就可以解决双站模型中的GDOP问题了。同时又可以发现,探测距离的精度也与 $R/L$ 有关,在 $L$ 一定的情况下,载机离目标越远,定位精度越低;反之,载机距离目标越近,定位精度越高。

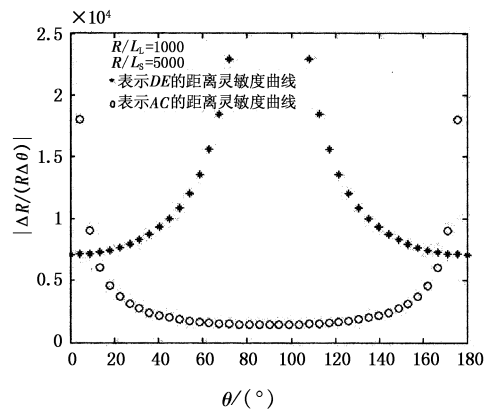


图5 正交多站灵敏度曲线  $R = 20\text{km}, \alpha_L = \alpha_S = 1$

Fig.5 orthogonal multi-station sensitivity curves

$R = 20\text{km}, \alpha_L = \alpha_S = 1$

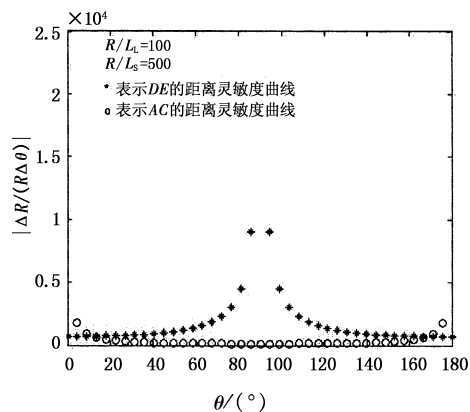


图6 正交多站灵敏度曲线  $R = 2\text{km}, \alpha_L = \alpha_S = 1$

Fig.6 orthogonal multi-station sensitivity curves

$R = 2\text{km}, \alpha_L = \alpha_S = 1$

需要补充说明的是,这里得到的距离 $R$ 是载机与目标之间的倾斜距离,要得到水平距离 $D$ 只要用高度数据 $H$ 通过三角关系式 $D = \sqrt{R^2 - H^2}$ 进行解算即可。

(下转第1191页)

光加热由计算机进行控制。人工手动控制增加了检测人员的劳动强度,整个过程中,各个步骤与时间的对应较为麻烦,使得对热传递过程的时间统计缺乏准确度。

从仪器的通用性来讲,主动加热源的加热能量应该具有较好地可调性,以适用于不同的检测对象和加热需求。同时加热过程的实施,若能通过计算机软件进行控制,就可与热像仪的图像采集过程相协调。这样,就可充分利用计算机的运算能力,在材质内部热传递过程变化与热图像之间建立有效的参照系、函数关系或理论模型,便于对被检测对象内部损伤的定量计算和定性分析,提高整个红外热成像检测过程的自动化程度,保证检测结果的可靠性。

#### 4.4 环境条件

红外热像仪通过接收被测量对象表面发射的红外热辐射并将其转换为电信号,进而实现输出热图像的功能。实际测量中,热像仪接收到的有效辐射主要包括三部分:目标自身辐射、环境反射辐射和大气辐射。当环境温度过高、湿度较大或者成像区域内气流扰动较强时,都会影响热图像的质量。在实际检测中,应该尽量采取可行的措施或方法,避免或降低上述环境因素产生的不利影响。

#### 4.5 红外热像仪操作

热像仪的正确操作也关系到热图像的准确记录。尤其是正确设定被测物体的热辐射率、检测环

境温湿度、热像仪温度测量范围等参数和焦距调整等环节,否则所得到的热图像将存在较大失真。

### 5 结论

通过对飞机损伤红外热成像检测系统的构建和相关实验,对于外部主动加热方法得出如下结论:

(1)主动红外检测中的加热过程最终归结为对加热能量和加热时间的综合控制问题。对不同的检测对象,加热能量与加热时间之间并没有固定关系,两者取值应根据实际应用需要进行调整。

(2)外部加热源应该具有较好地可控性,便于对被检测对象材质内部热传递过程变化与热图像之间建立有效地参照系、函数关系或理论模型,利于缺陷或损伤的定量计算和分析。

(3)无论何种方式加热,必须保证足够的温差持续时间,同时必须把握好图像采集的时间,否则一旦被检测对象整体达到热平衡后,将不再具有最佳检测灵敏度。

#### 参考文献:

- [1] 张建合,郭广平. 国内外飞速发展的热像无损检测技术[J]. 无损探伤,2005,29(1):1-3.
- [2] 李艳红,张存林,等. 碳纤维复合材料的红外热波检测[J]. 激光与红外,2005,35(4):262-264.
- [3] Xun Wang. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and composite[D]. Master Thesis, Wayne State Univ. (Applied Physics,2001).

(上接第 1187 页)

### 5 结束语

随着红外技术的发展和红外测角精度的不断提高,机载红外探测技术越来越受到重视,利用机载红外探测器进行被动定位已经成为研究的一个热点。前面结合载机平台特点,展示了一种切实可行的正交多站三角测量的被动定位方案,解决了固定双站定位的 GDOP 问题,并且对定位精度进行了分析,表明该方案符合机载红外探测系统的要求,具有一定的现实可行性。

#### 参考文献:

- [1] 侯娜,黄道君. 红外无源定位技术研究[J]. 电子对抗技术,2002,17(4):12-15.
- [2] 张正明,等. 平面时差定位精度分析[J]. 西安电子科

- 技大学学报,2000,27(1):13-16.
- [3] 茅玉龙,等. 无源雷达协同定位精度仿真研究[J]. 雷达与对抗,2004,(4):22-26.
- [4] Y Oshman, P Davidson. Optimization of observer trajectories for bearing-only target localization[J]. IEEE Trans On AES,1999,35(3):892-902.
- [5] 韦毅,杨万海,李红艳. 红外三维定位精度分析[J]. 红外技术,2002,24(6):37-40.
- [6] R J Pieper, A W Cooper. A triangulation method for passive ranging[M]. Technote NACIT-94-1, delivered JHU/APL, November 1993:7-11.
- [7] J S Acceta. Infrared and track systems[M]. The Infrared and Electro-Optical Handbook, Vol. 5, ed. Steven Campana, Bellingham WA: SPIE Optical Engineering Press, 1993:336-341.
- [8] 谢邦荣. 机载红外被动定位方法研究[J]. 红外技术, 2001,23(5):1-3.