

基于 GDOP 的红外跟踪系统双站交汇测距能力分析

王 东, 张恒伟, 刘小虎

(光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘 要:分析了红外跟踪系统双站交汇测距理论,引入 GDOP 作为交汇测距精度评价指标,对红外跟踪系统测距精度进行了仿真,得到了不同条件下测距误差。结果表明:双站交汇测距误差与红外跟踪系统自身的测角精度、目标位置、目标距离密切相关。给定条件下,方位角 20° 时,5 km ~ 60 km 范围测距误差在 1.5 % ~ 24 % 之间逐渐增加;方位角 90° 时,5 km ~ 60 km 范围红外跟踪系统测距误差在 1 % ~ 8 % 之间逐渐增加。

关键词:GDOP; 红外跟踪系统; 交汇测距; 测距误差

中图分类号:TN219;TN976 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.10.018

Analysis of two-station intersection ranging capability of GDOP-based infrared tracking system

WANG Dong, ZHANG Heng-wei, LIU Xiao-hu

(Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In this paper, the two-station intersection ranging theory of infrared tracking system is analyzed, GDOP is introduced as the evaluation index of intersection ranging accuracy, and the simulation of infrared tracking system ranging accuracy is carried out to obtain the ranging errors under different conditions. The results show that the two-station intersection ranging error is closely related to the angular accuracy, target position and target distance of the infrared tracking system. Under the given conditions, when the azimuth angle is 20° , the ranging error of 5 km ~ 60 km increases gradually between 1.5 % and 24 %, and when the azimuth angle is 90° , the ranging error of infrared tracking system increases gradually between 1 % and 8 % in the range of 5 km ~ 60 km.

Keywords: GDOP; infrared tracking systems; intersection ranging; distance-measuring error

1 引 言

以被动方式工作的红外跟踪系统,具有作用距离远、测角精度高、隐蔽性好等特点,在多套组网条件下还可实现对目标的被动测距^[1-4],组网红外跟踪系统的测距能力与目标相对于站点的位置关系密切相关^[5-9]。为了评价组网红外跟踪系统的测距能力,引

入定位精度几何稀释(Geometrical Dilution of Precision, GDOP)^[10]作为评价指标。通过对 GDOP 的计算,可以得到组网红外跟踪系统中站点测量精度及几何布局对测距能力的影响。本文通过对红外跟踪系统双站交汇测距理论的分析,基于 GDOP 对红外跟踪系统测距精度进行了仿真,得到了不同条件下绝对测

距误差。

2 双站交汇测距理论

双站交汇测距技术通过高精度的测向设备,在两个观测站通过对辐射源测向来完成定位。如图 1 所示,在实际应用中,站点 1 和站点 2 一般不在同一水平面上,设站点 1 的坐标为 $S_1(x_1, y_1, z_1)$, 站点 2 的坐标为 $S_2(x_2, y_2, z_2)$ 。对于目标 $E(x_e, y_e, z_e)$, 两站所测的同一目标方位角和俯仰角分别为 α_1, α_2 和 β_1, β_2 , S_2 和 E 在 z_1 平面的投影分别为 S_2' 和 E' 。

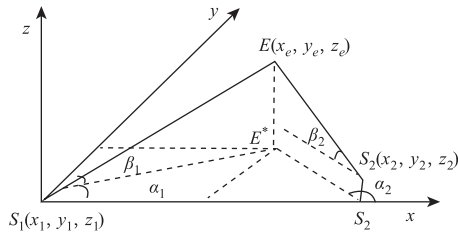


图 1 双站交汇测距原理图

Fig. 1 Schematic diagram of two-station intersection ranging

由图 1 中的几何关系可得^[3]:

$$\sigma_{x_e}^2 = \left(\frac{-k_1}{\Delta k}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{k_2}{\Delta k}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{1}{\Delta k}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{-1}{\Delta k}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \left(\frac{c_1}{\Delta k^2}\right)^2 \sigma_{k_1}^2 + \left(\frac{c_2}{\Delta k^2}\right)^2 \sigma_{k_2}^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{y_e}^2 = \left(\frac{-k_1 k_2}{\Delta k}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{k_1 k_2}{\Delta k}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{k_2}{\Delta k}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{-k_1}{\Delta k}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \left(\frac{k_2 c_1}{\Delta k^2}\right)^2 \sigma_{k_1}^2 + \left(\frac{k_1 c_2}{\Delta k^2}\right)^2 \sigma_{k_2}^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{z_e}^2 = & \frac{1}{4} \sigma_{z_1}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{z_2}^2 + \frac{1}{4} f_1^2 \sigma_{t_1}^2 + \frac{1}{4} f_2^2 \sigma_{t_2}^2 + \\ & \frac{c_1^2}{4 \Delta k^4} \left\{ \left[\frac{t_1}{f_1} (x_e - x_1) + \frac{t_2}{f_2} (x_e - x_2) \right] + k_2 \cdot \left[\frac{t_1}{f_1} (y_e - y_1) + \frac{t_2}{f_2} (y_e - y_2) \right] \right\}^2 \sigma_{k_1}^2 + \\ & \frac{c_2^2}{4 \Delta k^4} \left\{ \left[\frac{t_1}{f_1} (x_e - x_1) + \frac{t_2}{f_2} (x_e - x_2) \right] + k_1 \cdot \left[\frac{t_1}{f_1} (y_e - y_1) + \frac{t_2}{f_2} (y_e - y_2) \right] \right\}^2 \sigma_{k_2}^2 + \\ & \frac{1}{4 \Delta k^2} \left\{ \left[\frac{k_2 t_1}{f_1} (x_e - x_1) + \frac{k_1 t_2}{f_2} (x_e - x_2) \right] + k_1 k_2 \cdot \left[\frac{t_1}{f_1} (y_e - y_1) + \frac{t_2}{f_2} (y_e - y_2) \right] \right\}^2 (\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2) + \\ & \frac{1}{4 \Delta k^2} \left\{ \left[\frac{t_1}{f_1} (x_e - x_1) + \frac{t_2}{f_2} (x_e - x_2) \right] + \left[\frac{k_1 t_1}{f_1} (y_e - y_1) + \frac{k_2 t_2}{f_2} (y_e - y_2) \right] \right\}^2 (\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2) \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\Delta k = k_2 - k_1 \quad (7)$$

$$\begin{cases} c_1 = k_2(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1) \\ c_2 = -k_1(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sigma_{k_1}^2 = \sec^4 \alpha_1 \cdot \sigma_{\alpha_1}^2 \\ \sigma_{k_2}^2 = \sec^4 \alpha_1 \cdot \sigma_{\alpha_2}^2 \\ \sigma_{t_1}^2 = \sec^4 \beta_1 \cdot \sigma_{\beta_1}^2 \\ \sigma_{t_2}^2 = \sec^4 \beta_2 \cdot \sigma_{\beta_2}^2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\tan \alpha_i = \frac{y_e - y_i}{x_e - x_i} = k_i \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

则目标在直角坐标系中的位置 $E(x_e, y_e, z_e)$ 由下式给出:

$$\begin{cases} x_e = \frac{y_1 - y_2 - k_1 x_1 + k_2 x_2}{k_2 - k_1} \\ y_e = \frac{k_2 y_1 - k_1 y_2 + k_1 k_2 (x_2 - x_1)}{k_2 - k_1} \\ z_e = \frac{1}{2} (z_1 + z_2 + t_1 f_1 + t_2 f_2) \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} t_i = \tan \beta_i = \frac{z_e - z_i}{f_i} \quad (i = 1, 2) \\ f_i = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2} \end{cases} \quad (3)$$

可见,两站点同时测出目标的方位角和俯仰角,便可得到目标的距离信息。

设红外跟踪系统位置测量、角度测量之间相互独立,根据测量误差理论,可推导出 x_e, y_e 和 z_e 定位误差的方差为:

定位误差与目标相对于红外跟踪系统的几何关系是密切相关的, GDOP 能够将各红外跟踪系统与目标间的相对几何位置同定位精度联系在一起,反映出目标相对几何位置与测量误差的对应关系,并能够准确衡量前者对后者的影响程度^[10]。当观测误差增大时,定位误差值也随之增大, GDOP 的大小与站点和目标的相对位置有关,还与站址误差和测向误差有关。

根据红外跟踪系统各观测站的站间距离和测角

精度,以及目标相对于各站点的位置和角度,可以获取到在该位置的 GDOP,表达式为:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (10)$$

其中, σ_x^2 、 σ_y^2 、 σ_z^2 分别表示 x 、 y 、 z 方向的定位误差均方差。

在交汇测距模型方程中,假设只考虑 x 、 y 方向的定位误差,则定位误差只与 α_1 、 α_2 相关,与 β_1 、 β_2 无关。设两站距离为 L ,两站点 (x_a, y_a) 、 (x_b, y_b) 的坐标分别为 $(-L/2, 0)$ 、 $(L/2, 0)$, 对 x 、 y 求全微分可以得到:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \Delta \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \Delta \alpha_2}{\sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot L \\ \Delta y = \frac{\sin^2 \alpha_2 \cdot \Delta \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1 \cdot \Delta \alpha_2}{\sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot L \end{cases} \quad (11)$$

假设 $\Delta \alpha_1$ 和 $\Delta \alpha_2$ 是零均值高斯分布随机变量,独立不相关,且 $\sigma_{\Delta \alpha}^2 = \sigma_{\Delta \alpha_1}^2 = \sigma_{\Delta \alpha_2}^2$, 那么上式可以化简为:

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \frac{(\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2)^2 + (\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1)^2}{\sin^4(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot L^2 \cdot \sigma_{\Delta \alpha}^2 \\ \sigma_y^2 = \frac{\sin^4 \alpha_2 + \sin^4 \alpha_1}{\sin^4(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot L^2 \cdot \sigma_{\Delta \alpha}^2 \end{cases} \quad (12)$$

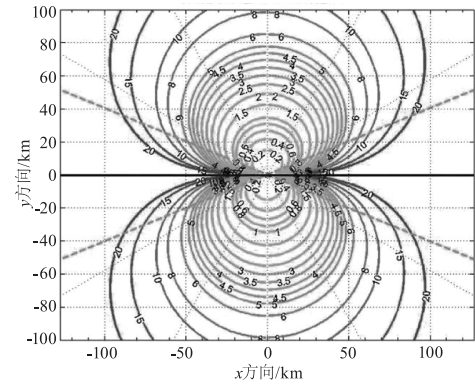
得到:

$$\begin{aligned} \text{GDOP} &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \\ &= \sqrt{\frac{(\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2)^2 + (\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1)^2 + \sin^4 \alpha_2 + \sin^4 \alpha_1}{\sin^4(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot L^2 \cdot \sigma_{\Delta \alpha}^2} \\ &= \sqrt{\frac{\sin^2 \alpha_2 + \sin^2 \alpha_1}{\sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)}} \cdot L \cdot \sigma_{\Delta \alpha} \end{aligned} \quad (13)$$

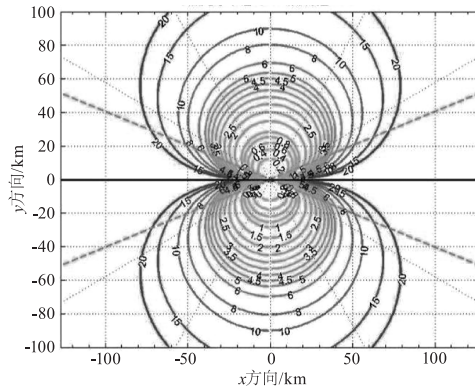
3 仿真计算

依据上述分析,对红外跟踪系统测距精度与角度测量误差之间的关系进行仿真,仿真条件:双站定位时站点坐标分别为 $S_1(0,0,0)$ 、 $S_2(300,0,0)$ 。站间基线距离为 300 m,站址测量误差 1 m,仿真测距范围 X 方向为 $-100 \text{ km} \sim 100 \text{ km}$, Y 方向为 $-100 \text{ km} \sim 100 \text{ km}$ 。方位测角误差依次设置为 0.01° 、 0.015° 、 0.02° 和 0.03° 。

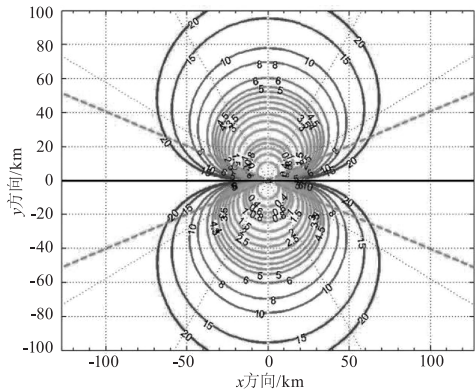
图 2 给出了上述条件下 XY 平面不同位置处的绝对测距误差仿真结果,曲线为不同位置对应的绝对测距误差(单位为 km),横纵坐标均为距离。



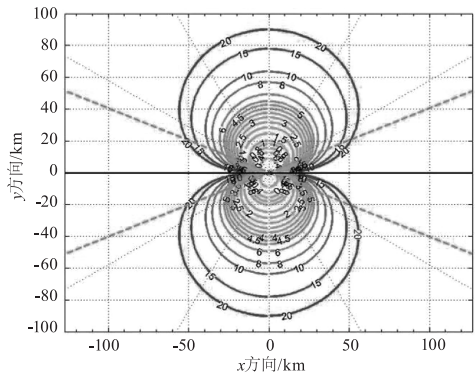
(a) 方位测角误差 0.01°



(b) 方位测角误差 0.015°



(c) 方位测角误差 0.02°



(d) 方位测角误差 0.03°

图 2 测距误差与距离对应关系仿真结果

Fig. 2 Simulation results of the correspondence between distance error and distance

4 结果分析

从图中仿真结果可以得出如下结论:

(1)测距误差随方位测角误差增大而增大,表明双站交汇测距误差与红外跟踪系统自身的测角精度密切相关。

(2)在固定方位测角误差的条件下,相同距离处的测距误差随着方位角从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 变化而先减小后增大,两站连线垂直方向 (90° 方向) 测距误差最小,随着方位角向该方向两侧偏离,测距误差逐渐增大。表明双站交汇测距误差与红外跟踪系统和目标之间的位置关系密切相关。

(3)在固定方位角的条件下,随着距离的增加,测距误差逐渐增大。表明双站交汇测距误差与红外跟踪系统和目标之间的距离密切相关。

图3给出了方位测角误差为 0.015° , 方位角 20° 、 50° 、 90° 条件下,相对测距误差仿真结果。从图中可以看出,在方位角 20° 条件下, $5\text{ km} \sim 60\text{ km}$ 范围测距误差在 $1.5\% \sim 24\%$ 之间线性增加;在方位角 50° 条件下, $5\text{ km} \sim 60\text{ km}$ 范围测距误差在 $1.3\% \sim 16\%$ 之间线性增加;在方位角 90° 条件下, $5\text{ km} \sim 60\text{ km}$ 范围红外跟踪系统测距误差在 $1\% \sim 8\%$ 之间线性增加。这说明双站交汇测距在远距离、小角度条件下由于测距误差过大而无法有效应用。随着方位角的增大或测距距离的减小,基本上可以保证达到相对较小的测距误差,此时具备较强的实用性。

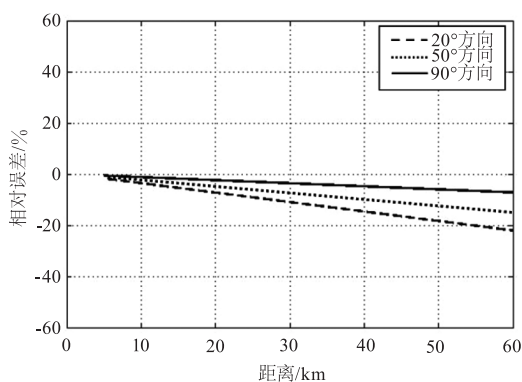


图3 固定方向的相对测距误差仿真结果

Fig. 3 Simulation results of relative ranging error in fixed direction

5 结 语

文中采用 GDOP 作为交汇测距精度评价指标,对红外跟踪系统测距精度进行了仿真,得到了不同条件下绝对测距误差。双站交汇测距误差与红

外跟踪系统自身的测角精度、目标位置、目标距离密切相关。在工程实现中要保证双站交汇定位精度,一方面要提高系统定向、指北、调平等精度;另一方面要对站点进行合理布局,在增大基线,尽可能选取接近 90° 方向的目标与双站基线夹角条件下,具备较强的实用性。文中仿真结果对红外跟踪系统双站交汇定位技术的实现和改进具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Wu Xueming, Wang Haiyan, Kou tian, et al. Test of infrared search and track system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 71-77. (in Chinese)
吴学铭,王海晏,寇添,等. 红外搜索跟踪系统测试[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 71-77.
- [2] Liu Haibo. Electro-optical detection technology for early warning[J]. Journal of Applied Optic, 2011, 32(1): 45-48. (in Chinese)
刘海波. 光电预警探测技术研究[J]. 应用光学, 2011, 32(1): 45-48.
- [3] Wang Dong, Zhou Qingming, Zhang Peng, et al. Analysis on passive ranging measurement ofIRST systems[J]. Infrared Technology, 2010, 32(8): 440-442. (in Chinese)
王东,周清明,张鹏,等. 红外告警系统被动测距方法分析[J]. 红外技术, 2010, 32(8): 440-442.
- [4] Wu Jianfei, Li Fanming. Passive ranging through triple-stationIRST system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(4): 560-564. (in Chinese)
吴健飞,李范鸣. 三站红外告警系统被动测距方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 560-564.
- [5] Chen Zhenfei. Precision analysis for double observation station ofIRST systems used for passive ranging[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(5): 842-844. (in Chinese)
陈振飞. 红外探测系统双站被动测距精度分析[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(5): 842-844.
- [6] Li Tingjun, He Youjin, Song Lihong, et al. Discussion of localizing method of target for IR alarm equipment[J]. Modern Electronics Technique, 2002, (4): 61-63. (in Chinese)

- 李廷军,何有金,宋立宏,等. 红外告警器应用研究[J]. 现代电子技术,2002,(4):61-63.
- [7] Wang Dong, Cheng Bin, Liang Dongming, et al. Passive range measurement based on triple-stationIRST system[J]. Laser & Infrared,2013,43(6):645-648. (in Chinese)
- 王东,成斌,梁冬明,等. 基于红外侦察告警系统的三站被动测距方法分析[J]. 激光与红外,2013,43(6):645-648.
- [8] Li Ying, Ma Ning, Jia Peng, et al. Long distance ranging with two airborne infrared system[J]. Laser & Infrared, 2017,47(8):982-986. (in Chinese)
- 李盈,马宁,贾鹏,等. 机载远程红外双站测距分析[J]. 激光与红外,2017,47(8):982-986.
- [9] Zhao Zhongyi, Deng Tianhua, Tang Zhaosheng. Research on kinematic model based passive ranging algorithm for infrared searching and tracking system[J]. Infrared Technology,2012,34(8):482-484. (in Chinese)
- 赵忠义,邓天华,唐召胜. 基于运动学的机载红外被动测距算法研究[J]. 红外技术,2012,34(8):482-484.
- [10] Tang Xiaomin, Zhu Hongwei, He You, et al. Effect analysis of systematic error on GDOP[J]. Computer & Digital Engineering,2013,41(6):901-903. (in Chinese)
- 唐小明,朱洪伟,何友等. 系统误差对GDOP的影响分析[J]. 计算机与数字工程,2013,41(6):901-903.