

一种基于红外被动探测的多目标定位方法研究

唐祎俊, 何衡湘, 邓洪峰

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 针对多目标红外被动探测定位技术应用的需要, 提出了一种基于红外被动探测的多目标定位方法。研究了三站联合定位算法, 解决了多目标情况下虚假目标干扰、数据匹配难度大的问题, 开展了定位精度、虚假目标剔除效果数学仿真。仿真分析和实验表明, 该方法能够有效剔除虚假目标, 实现多目标红外被动探测定位功能, 定位精度满足应用需要。

关键词: 红外被动探测; 多目标定位; 虚假目标; 数据融合

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2019)03-0279-05

A New Method for Multi-target Localization with Infrared Passive Detection

TANG Yijun, HE Hengxiang, DENG Hongfeng

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the limitations of infrared passive detection technology in a multi-target environment, a new localization method based on infrared passive detection is proposed. This joint localization algorithm of three stations is studied to solve the problems of false target interference, and can be used in the case of multiple targets. Experimental simulation and analysis show that this method can successfully eliminate false targets and realize the function of multi-target infrared passive detection and localization. In addition, the positioning accuracy meets the application requirements.

Key words: infrared passive detection, multi-target positioning, false object, data- fusion, GDOP

0 引言

红外被动探测定位技术以其隐蔽性好、工作距离远、抗干扰能力强等特点, 目前已成为对军事目标探测的主要手段之一^[1-5]。近年来, 有关红外被动探测定位的研究已有不少报道, 文献[6]和文献[7]提出了一种双站红外被动测距方法, 针对红外被动探测范围进行了计算机仿真。文献[8]提出了一种新型三站被动测距方法, 分析了该方法的定位精度。但随着战场形势日益复杂, 防守方面临多来袭目标的威胁, 现有红外被动探测定位技术在多目标环境下常出现虚假目标干扰、目标数据匹配难度大等问题^[9-11]。本文提出了一种基于红外被动探测的多目标定位方法, 分析了布站约束条件, 建立了探测定位模型, 进行了定位精度分析, 搭建了仿真实验装置, 开展了外场实验验证, 解决了多目标环境下虚假目标干扰、目标数据冗余、定位处理速度慢的问题, 较好地满足了多目标定位要求。

1 多目标定位基站布设约束条件分析

如图1所示, 当使用双站进行红外被动探测定位时, 若空间存在多个目标, 会因维度缺失导致系统无法分辨真实目标与虚假目标差异, 无法实现多目标识别、定位等功能。

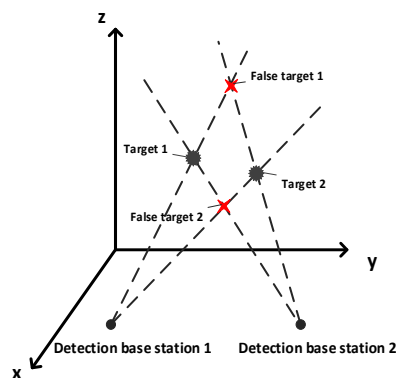


图1 双站定位虚假目标示意图

Fig.1 Sketch map of false target in two station positioning

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2019-03-05.

作者简介: 唐祎俊(1994-), 男, 四川省成都市人, 硕士研究生, 主要研究方向: 光电对抗, 红外被动定位, 自动控制。E-mail: tyj_0612@outlook.com。

通信作者: 何衡湘(1968-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为光电对抗, 导航、制导与控制。E-mail: hhhxh@163.com。

基金项目: 装备预先研究项目。

使用三站进行红外被动探测定位,当三站布置方式呈线状(如图2),同样由于维度问题,可发现虚假目标数量虽减少,但仍无法完全剔除。利用空间三维关系,将三站呈三角形布置(如图3),发现虚假目标干扰问题不再出现。得出结论:当使用静态探测基站进行红外被动探测定位时,基站数量最小为3,且布站方式需为三角形。

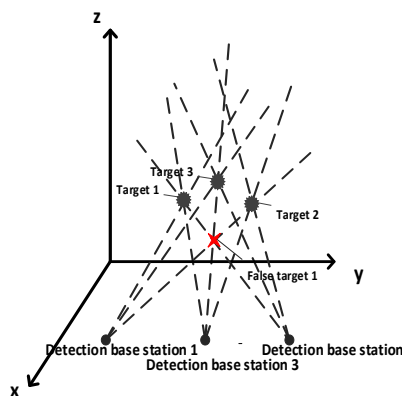


图2 三站(线性排布)定位示意图

Fig.2 Sketch map of three station positioning (linear arrangement)

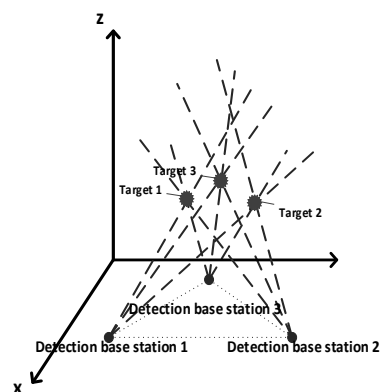


图3 三站(三角排布)定位示意图

Fig.3 Sketch map of three station positioning (triangle arrangement)

2 多目标红外被动探测定位模型

2.1 红外被动定位模型

由红外被动探测原理可知^[12],利用不同观测基站提供的位置信息和目标角度信息,可计算得出目标位置。如图4所示,假设在空间中布有两探测基站 T_1 、 T_2 , T_1 坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 观测角为 (α_1, β_1) ; T_2 坐标为 (x_2, y_2, z_2) , 观测角为 (α_2, β_2) 。

根据探测基站、目标位置的空间几何关系,由 α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 中任意3个角度值均可建立与探测基站坐标有关的三角函数表达式,另一个角度信息为冗余信息,可以用于提高定位精度^[13]。以 $(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2)$ 为例进行推导,分析如下:

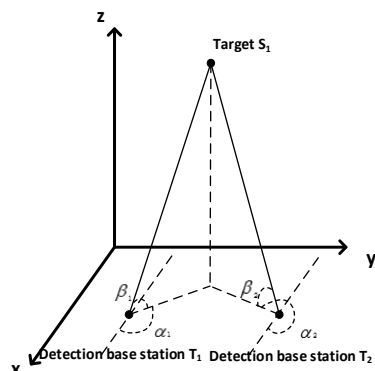


图4 测角定位原理图

Fig.4 Schematic diagram of angle positioning

$$\tan \alpha_1 = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (1)$$

$$\tan \beta_1 = \frac{z - z_1}{y - y_1} \times \sin \alpha_1 \quad (2)$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{y - y_2}{x - x_2} \quad (3)$$

联立式(1)~(3),可得含目标坐标的线性方程组,为方便求解,用以下矩阵方程表示:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \tan \alpha_1 & -1 & 0 \\ 0 & \tan \beta_1 & -\sin \alpha_1 \\ \tan \beta_2 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} x_1 \times \tan \alpha_1 - y_1 \\ y_1 \times \tan \beta_1 - z_1 \times \sin \alpha_1 \\ x_2 \times \tan \alpha_2 - y_2 \end{bmatrix}$$

故按照矩阵方程的求解,可得到目标的位置 $\mathbf{X} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Z}$ 。

2.2 定位误差分析模型

在红外被动定位精度分析中,通常引入评价误差的指标是精度的几何稀释度(Geometric Dilution of Precision, GDOP)^[13]。其表达式为:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{P}_{\text{dx}})} = \sqrt{\mathbf{P}_{\text{dx}}(1,1) + \mathbf{P}_{\text{dx}}(2,2) + \mathbf{P}_{\text{dx}}(3,3)} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$$

式中: \mathbf{P}_{dx} 为定位误差协方差矩阵; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别表示在各自方向上的定位误差的标准差,将其分别代入 GDOP 方程即可得到误差的分布。对式(1)~(3)中各变量进行微分并化简,可得到:

$$\begin{cases} d\alpha_1 = -\frac{(\sin \alpha_1)^2}{y-y_1}dx + \frac{(\cos \alpha_1)^2}{x-x_1}dy + \frac{(\sin \alpha_1)^2}{y-y_1}dx_1 + \frac{(\cos \alpha_1)^2}{x-x_1}dy_1 \\ d\beta_1 = -\frac{(z-z_1) \times \cos \alpha_1}{r_1^2}dx - \frac{(z-z_1) \times \sin \alpha_1}{r_1^2}dy + \frac{\cos \beta_1}{r_1}dz + k_1 \\ d\alpha_2 = -\frac{(\sin \alpha_2)^2}{y-y_2}dx + \frac{(\cos \alpha_2)^2}{x-x_2}dy + \frac{(\sin \alpha_2)^2}{y-y_2}dx_2 + \frac{(\cos \alpha_2)^2}{x-x_2}dy_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $r_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}$,

$$k_1 = \frac{(z-z_1) \times \cos \alpha_1}{r_1^2}dx_1 - \frac{(z-z_1) \times \sin \alpha_1}{r_1^2}dy_1 + \frac{\cos \beta_1}{r_1}dz_1,$$

对式(4)分离变量并改写为矩阵形式, 可表示为:

$$dV = CdX + dX_S \quad (5)$$

式中: $dV = [d\alpha_1 \ d\beta_1 \ d\alpha_2]^T$ 为观测误差矢量; $dX = [dx dy dz]^T$ 为定位误差矢量; dX_S 为站址误差, 系数矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{(\sin \alpha_1)^2}{y-y_1} & \frac{(\cos \alpha_1)^2}{x-x_2} & 0 \\ -\frac{(z-z_1) \times \cos \alpha_1}{r_1^2} & -\frac{(z-z_1) \times \sin \alpha_1}{r_1^2} & \frac{\cos \beta_1}{r_1} \\ -\frac{(\sin \alpha_2)^2}{y-y_2} & \frac{(\cos \alpha_2)^2}{x-x_2} & 0 \end{bmatrix}$$

假设各探测基站相互独立, 测量误差均为零均值的高斯白噪声, 方位角和俯仰角观测误差的方差分别是 σ_α^2 和 σ_β^2 , 站址各分量测量误差的方差为 σ_p^2 。

观测误差的协方差矩阵为 $E[dV \times dV^T] = \text{diag}[\sigma_\alpha^2 \ \sigma_\beta^2 \ \sigma_p^2]_{3 \times 3}$ 。

布站误差的协方差矩阵为:

$$E[dX_S \times dX_S^T] = \text{diag} \left[\frac{\sigma_s^2}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \quad \frac{\sigma_s^2}{r_1^2} \quad \frac{\sigma_s^2}{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \right]_{3 \times 3}。$$

最后, 得到定位误差的协方差矩阵为 $P_{dx} = E[dX \times dX^T] = C^{-1} \{E[dV \times dV^T] + E[dX_S \times dX_S^T]\} C^{-T}$ 。

3 多目标红外被动定位数据处理算法

通过对多站间的数据融合处理, 可得到多目标精确坐标。步骤如下:

1) 各基站进行时间校准, 并对 N 个目标进行探测、跟踪, 将时间信息、目标的角度信息和基站自身位置信息打包传至上位机。

2) 将探测基站两两分为一组, 利用双站被动测距原理^[12]进行目标定位, 每组得到 N^2 个目标, 设目

标为 $L_{ijn}(n=1, 2, \dots, N^2)$, 其中 N 个目标为真实目标, $N(N-1)$ 个目标为虚假目标。

3) 设定阈值 σ , 将第一组得到的 L_{ijn} 与其他组进行匹配, 两组定位数据差值小于 σ 的则合并保留, 大于 σ 的则进行剔除, 并将保留后的数据与其他组进行同样操作, 直至遍历完成。

4) 整理数据, 得到 N 个真实目标。

若目标为动态时, 还可采取连续跟踪, 对目标航迹进行数据关联分析, 使用跟踪滤波算法进行航迹的修正、预测等功能。

4 实验结果分析

基于上述多目标红外被动定位模型、定位误差分析模型、虚假目标剔除效果, 进行数学仿真分析与外场实验验证。

4.1 GDOP 定位精度分析

设探测基站数量为 3 个, 站址坐标为 $(-500 \text{ m}, 0, 0)$, $(500 \text{ m}, 0, 0)$, $(0, -433 \text{ m}, 0)$, 测角误差的方差分别为 $\sigma_\alpha = 1 \text{ mrad}$ 和 $\sigma_\beta = 3 \text{ mrad}$, 布站误差的方差 $\sigma_p = 3 \text{ m}$, 目标高度为 3000 m , GDOP 仿真结果如图 5 所示 (图中数值表示欧式几何距离差, 单位: km)。

设测角误差的方差 $\sigma_\alpha = 1 \text{ mrad}$, 布站误差的方差为 $\sigma_p = 3 \text{ m}$ 和 $\sigma_p = 5 \text{ m}$; 目标高度为 5000 m , GDOP 仿真结果如图 6 所示。

由图 5、图 6 可知, 相对于误差源而言, 测角误差仍然是影响定位精度的主要因素, 在实际工程应用中应选用测角误差较小的探测设备。

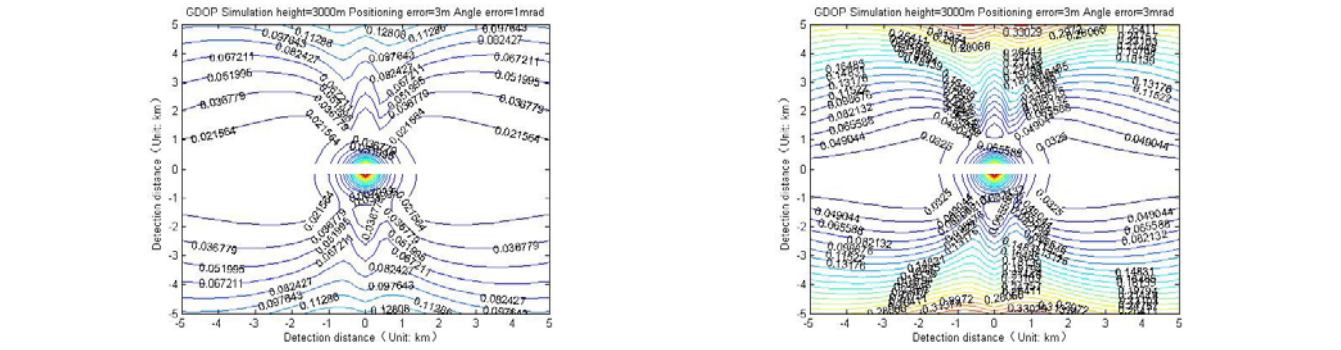
4.2 仿真与实验分析

为更好地反映虚假目标剔除与定位效果, 开展了数学仿真和试验验证。设探测基站 1 获得的目标 1 的角度信息 (单位: rad) 为 $\alpha_{11} = 0.785$, $\beta_{11} = 0.785$, 目标 2 的角度信息为 $\alpha_{12} = 1.571$, $\beta_{12} = 1.107$; 探测基站 2 获得的角度信息分别为 $\alpha_{21} = 2.356$, $\beta_{21} = 0.785$ 和 $\alpha_{22} = 2.618$, $\beta_{22} = 0.785$, 探测基站 3 获得的角度分别为 $\alpha_{31} = 0.000$, $\beta_{31} = 1.571$ 和 $\alpha_{32} = 2.988$, $\beta_{32} = 1.157$ 。

如图 7 所示, 在使用传统红外被动探测定位方法时, 若目标数为 2 个, 传统测角定位算法共会得到 4 个目标 (2 个真实目标, 2 个虚假目标), 无法满足多目标定位的需求。

如图 8 所示, 在使用本文所设计的方法时, 目标数量由 4 个降到了 2 个, 满足多目标下虚假目标剔除要求, 成功实现多目标红外被动探测定位。

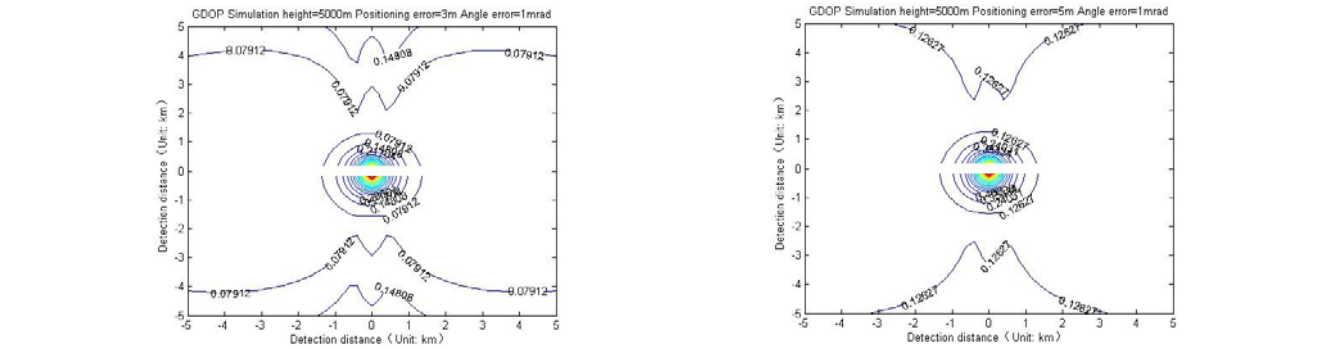
为更好地验证该方法可靠性，进行了基于该方法下的三站定位实验。以目标 1 为原点，转换各点于一东、北、天相对坐标系下。实验数据如表 1 所示。



(a) 当 $\sigma_s=1$ mrad、 $\sigma_p=3$ m 时的 GDOP 仿真图 (b) 当 $\sigma_s=3$ mrad、 $\sigma_p=3$ m 时的 GDOP 仿真图
(a) The simulation diagram of GDOP based on $\sigma_s=1$ mrad、 $\sigma_p=3$ m (b) The simulation diagram of GDOP based on $\sigma_s=3$ mrad、 $\sigma_p=3$ m

图 5 当 $\sigma_s=1$ mrad 和 $\sigma_s=3$ mrad、 $\sigma_p=3$ m 时的 GDOP 仿真图

Fig.5 The simulation diagram of GDOP based on $\sigma_s=1$ mrad 和 $\sigma_s=3$ mrad、 $\sigma_p=3$ m



(a) 当 $\sigma_s=1$ mrad、 $\sigma_p=3$ m 时的 GDOP 仿真图 (b) 当 $\sigma_s=1$ mrad、 $\sigma_p=5$ m 时的 GDOP 仿真图
(a) The simulation diagram of GDOP based on $\sigma_s=1$ mrad、 $\sigma_p=3$ m (b) The simulation diagram of GDOP based on $\sigma_s=1$ mrad、 $\sigma_p=5$ m

图 6 当 $\sigma_s=1$ mrad、 $\sigma_p=3$ m 和 $\sigma_p=5$ m 时的 GDOP 仿真图

Fig.6 The simulation diagram of GDOP based on $\sigma_s=1$ mrad、 $\sigma_p=3$ m and $\sigma_p=5$ m

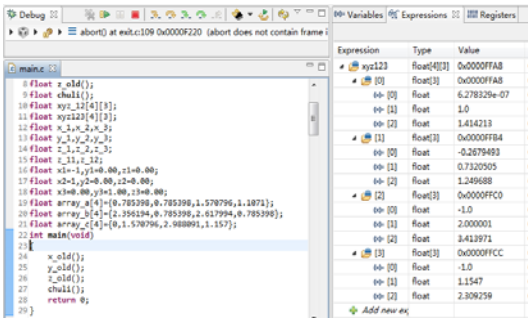


图 7 未使用本文方法的仿真结果
Fig.7 The simulation diagram with the algorithm

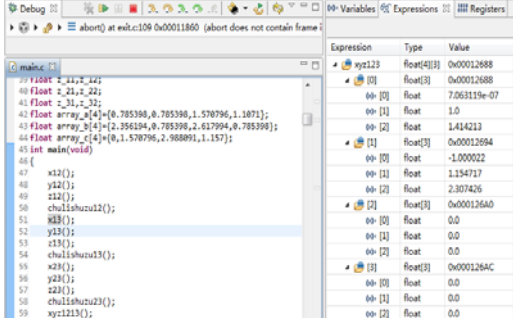


图 8 使用本文方法的仿真结果
Fig.8 The simulation diagram without the algorithm

表 1 外场实验数据表 Table 1 The experimental data sheet

Experimental point	X (Sky direction) /m	Y (Eastward direction) /m	Z (Northwarddirection) /m	Horizontal angle/°	Pitch angle/°
Target 1	0	0	0	None	None
Station 1	-185.611	-183.728	903.972	-78.8344	11.4344
Station 2	-223.523	-239.175	1318.832	-79.7175	10.2961
Station 3	-199.857	-107.319	1189.65	-85.2564	9.5506

通过外场实验(如图9所示)发现,该方法能够成功定位目标,且定位误差小于目标与探测基站之间直线距离的3%,与GDOP仿真结果相符,满足定位要求。



图9 外场实验图 Fig.9 The field test map

5 结论

本文针对多目标红外被动定位的典型应用背景,提出了一种多目标红外被动探测定位方法。分析了该方法的基本原理,重点讨论了探测基站约束条件、三站联合定位算法、如何利用数据融合排除虚假目标。理论分析和仿真结果表明,该方法采用红外被动探测系统收集到的角度信息,实现多目标定位。通过数学仿真和实验分析表明,该方法能够成功剔除虚假目标,且定位误差小于目标与探测基站之间直线距离的3%,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 郝振兴, 罗继勋, 胡朝晖, 等. 红外探测与追踪的双机被动定位模型[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(1): 28-32.
HAO Zhenxing, LUO Jixun, HU Zhaohui, et al. Two-fighter Passive Location Model for Infrared Search and Track[J]. *Journal of Detection & Control*, 2016, 38(1): 28-32.
- [2] 范宏波. 被动红外光电搜索预警雷达的发展思考[J]. 红外技术, 2009, 31(10): 559-562.
FAN Hongbo. Discussion of the Development on Early Warning System Based on Passive Infrared Detecting[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(10): 559-562.
- [3] 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(7): 629-632.
LIU Zhichun, YUAN Wen, SU Zhen. Equipment and Development Tendency of the Electro-optical Warning Reconnaissance Technology[J]. *Laser & Infrared*, 2008(7): 629-632.
- [4] 雷文英, 陈伯孝, 杨明磊, 等. 基于 TOA 和 TDOA 的三维无源目标定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 816-823.
LEI Wenyong, CHEN Baixiao, YANG Minglei, et al. Passive 3D target location method based on TOA and TDOA[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(5): 816-823.
- [5] 王红梅, 杨雪锋. 船舶二维测距定位中的 GDOP 分析[J]. 航海工程, 2018, 47(3): 137-140.
WANG Hongmei, YANG Xuefeng. GDOP Analysis in Two Dimensional Location System Based on Range[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2018, 47(3): 137-140.
- [6] 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(5): 84844.
CHEN Zhenfei. Precision Analysis for Double Observation Station of IRST Systems Used for Passive Ranging[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007(5): 84844.
- [7] 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): 663.
LI Tingjun, HE Youjin, SONG Lihong, et al. Discussion of Localizing Method of Target for IR Alarm Equipments[J]. *Modern Electronic Technique*, 2002(4): 663.
- [8] 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.
WANG Dong, CHENG Bin, LIANG Dongming, et al. Passive range measurement based on triple-station IRST system[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(6): 645-648.
- [9] 赵杨. 被动测距方法研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(5): 54-55+157.
ZHAO Yang. Research on Passive Ranging Method[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(5): 54-55+157.
- [10] Practical constrained least-square algorithm for moving source location using TDOA and FDOA measurements[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2012, 23(4): 488-494.
- [11] 孙仲康, 郭福成, 冯道旺, 等. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
SUN Zhongkang, GUO Fucheng, FENG Daowang, et al. *Passive Location and Tracking Technology by Single Observer*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [12] 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.
WANG Dong, ZHOU Qingming, ZHANG Peng, et al. An Analysis on Passive Ranging Measurement of IRST Systems[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(8): 440-442.
- [13] 刘钰. 无源定位技术研究及其定位精度分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
LIU Yu. Research on Passive Location Technology and Analysis of Its Location Accuracy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.