

基于激光通信链路的机载IRST被动定位方法

陈鑫^{1,2}, 王海晏¹, 徐强¹, 王芳¹, 台起龙³

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军93721部队, 山西 怀仁 038301;
3. 中国人民解放军94575部队, 江苏 连云港 222345)

摘要: 为了实现机载IRST高精度、快速被动定位, 针对一般机间数据链对大容量实时图像传输的限制问题, 提出了基于激光数据链路的机载IRST被动定位方法。分析了定位原理和激光链路建立、红外图像配准融合、红外目标检测的过程。在研究UKF算法的基础上, 考虑到观测方程的非线性和测量噪声的影响, 利用UKF方法对目标的状态参数进行估计。仿真实验表明, 这种算法得到较好的距离和速度估计精度, 而且在提高机载IRST采样频率后, 可以进一步提高被动定位精度。

关键词: 机载IRST; 被动定位; 激光链路; UKF

中图分类号: V271.4; TN976 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2013)06-0040-05

A Method for Passive Locating of Airborne IRST Based on Laser Communication Link

CHEN Xin^{1,2}, WANG Haiyan¹, XU Qiang¹, WANG Fang¹, TAI Qilong³

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. No. 93721 Unit of PLA, Huaiyin 038301, China; 3. No. 94575 Unit of PLA, Lianyungang 222345, China)

Abstract: In order to implement high-precision and rapid passive locating of airborne IRST, and considering the limit of ordinary inter-flight data link to large-capacity image transmission, a method for passive locating of airborne IRST was proposed based on laser link. The principle of locating, the process of establishing airborne laser link, the infrared image registration and fusion, and the infrared target detecting and recognition were analyzed. Unscented Kalman Filter (UKF) was studied and was used to estimate the state parameters of the target taking the effect of observation equation's nonlinearity and noise into consideration. The simulation result showed that the method can improve the evaluation accuracy of distance and velocity, and can also improve the locating precision with increased airborne IRST sampling frequency.

Key words: airborne IRST; passive locating; laser link; UKF

0 引言

在多维复杂的信息战环境下, 机载有源雷达电磁隐蔽性、抗侦察、抗干扰能力差等弱点日益呈现。无源定位通过测量目标有意辐射和无意辐射来得到目标参数, 具有作用距离远、隐蔽性能好、设备重量体积小等特点, 对现代信息战有着极其重要的军事意义。

目前, 无源定位的方法主要有测向交叉定位、时差定位、测向测时差混合定位和时差频差定位等^[1]。在机载平台中, 目标的视线角信息较容易得到, 通过单个

运动观测平台测量的目标视线角对目标定位的模式一直受到人们的关注。文献[2]分析了单机多点测向交叉定位问题, 把海面舰艇目标视为固定目标, 建立了伪线性最小二乘估计模型; 文献[3]研究了IRST单站被动定位系统的问题, 分析了单站被动测距的几种典型算法, 设计了基于红外成像、序列图像处理和三维运动分析的单站被动定位系统方案。但是, 这种定位模式要求载机在准确估计目标红外辐射模型的前提下机动飞行, 存在可观测性弱、收敛速度慢、定位精度低等缺点。针对这一问题, 文献[4]利用双机探测到的目标方位角和俯仰角, 结合非线性滤波算法估计出目标的位置和速度参数; 文献[5]对单机无源定位算法进行分析, 针对有机动加速度的目标提出了修正协方差自

适应卡尔曼滤波算法。多机协同被动定位需要机间数据链传输观测数据,对于数据链的时延性、容量提出了更高的要求。在机载IRST被动定位中,一般的机间射频通信不仅无法实时传输大容量的原始红外图像信息,而且在一定程度上破坏了“无源性”和“隐蔽性”。本文提出一种基于激光链路的机载IRST被动定位方法,激光数据链满足图像信息传输和“隐蔽性”要求。考虑到观测方程非线性和测量噪声的影响,利用UKF良好的数值稳定性和非线性滤波能力对目标状态参数进行估计,最后给出仿真实验结果。

1 理论分析

1.1 机载IRST图像融合被动定位原理

假设长机、僚机编队飞行,协同探测同一目标区域,且IRST系统独立工作,分别得到目标红外图像1、2,被动定位原理如图1所示。

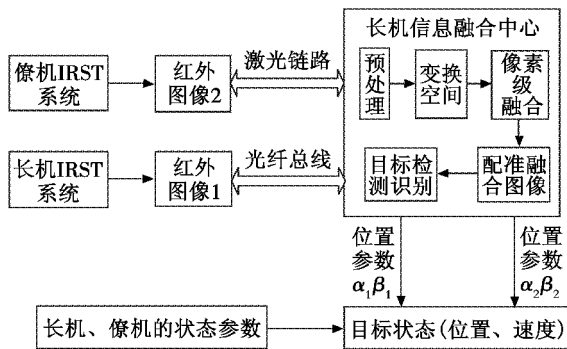


图1 被动定位原理框图

Fig. 1 The principle block diagram of passive locating

由导航系统提供载机的状态参数,通过机间激光数据链将需要定位的僚机信息实时传输到长机中,长机的测量信息经过机载光纤总线快速传输到融合中心。在长机信息融合中心,将同一场景不同视角的两幅红外图像进行预处理、变换空间、像素级融合等操作。配准融合后的图像具有更高的置信度、鲁棒性和可靠性,然后经过目标检测得到目标在图像中的准确位置(方位角和俯仰角)。结合长机和僚机的状态信息、IRST系统相对于载机的偏角和目标在图像中的方位信息,利用测向交叉定位原理得到目标的距离信息。这种被动定位方法的关键技术是机间激光数据链路的建立、图像配准融合、红外目标检测识别和目标状态估计。

1.2 机间激光数据链路建立

激光通信是以激光为载波,通信速度从几百兆比特/秒到几百吉比特/秒,具有信息容量大、抗干扰、抗截获能力强和体积小、质量轻、功耗低的特点^[6],它在星际间、星地间已经得到成功应用。随着激光大气传输理论不断完善发展和空间光通信应用的深入,机载

激光通信链路成为研究的热点^[7-8]。机间激光链路的建立不同于光电跟踪经纬仪和激光武器,它是基于己方两机相互合作和光束主动跟踪而建立的动态数据链路,可分为初始引导、快速捕获、复合轴跟踪和动态通信4个阶段。初始引导需要GPS实时定位和射频辅助传输位置信息,近距通信也可以使用头盔瞄准具的方法。在初始引导的同时,还需要对机载平台进行跟踪预测,文献[8]采用一种改进的粒子滤波方法进行预测,具有良好的自适应跟踪性能,根据预测指向调整光端机,可以补偿机间相对运动引起的激光束指向偏差。激光束的对准是通信能否进行的关键,采用ATP(捕获、跟踪与瞄准)技术来解决两机光端机的对准问题^[9]。ATP系统中采用收发合一的光学天线,同时采用信标光和信号光两种光束,信标光相对于信号光发散角大、光束宽,主要用于光路的对准,信号光主要用于通信。系统采用3级对准方法,即光路初始对准、光束粗对准和光束精对准,ATP系统流程如图2所示。

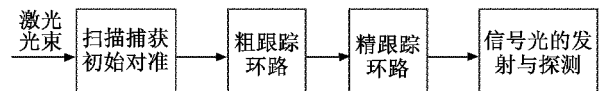


图2 ATP系统流程

Fig. 2 Flow chart of ATP system

在动态通信过程中,激光链路可能会多次断开和恢复,文献[10]通过激光猝发通信技术实现机间信息传输,系统最小误码率达到 10^{-10} ,保证了传输数据的正确性与完整性。

1.3 图像配准融合

机载IRST系统获得的红外图像可用数学描述为

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + f_\eta(x, y) \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为图像灰度信息; $f_T(x, y)$ 为目标信息; $f_B(x, y)$ 为背景信息; $f_\eta(x, y)$ 为图像噪声; (x, y) 为二维场景图像中的坐标。因此,在配准之前需要进行预处理,主要包括去噪、辐射校正、图像增强等。

图像配准是进行融合的前提,其精度直接影响到图像融合算法的效果,通常要求配准精度达到亚像素级。两机红外图像因观测位置、视角不同出现相对平移、旋转、比例缩放等,以长机获得的红外图像1为参考图,建立待配准图像(僚机红外图像2)相对参考图的空间变换关系。设 $t_{x,y}$ 表示平移量, θ 表示旋转角, s 表示缩放因子,空间变换表达式为

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

图像配准分为4个步骤^[11]:1)建立图像1与图像2的校正关系模型;2)利用源图像部分目标一致性确定配准控制点;3)由得到的配准控制点计算配准参数;4)进

行空间变换和重采样,求出输出图像各像素的灰度值。这里的配准属于单模图像配准,主要方法有相关插值法、梯度法、相位相关法、最大互信息法等。

图像融合是将IRST系统获得的不同图像在空间上的互补与冗余信息依据某种优化准则组合起来,产生对观测区域可靠、全面而精确的描述和解释,目的是提高被检测对象的分辨率和精度,抑制传感器的检测噪声,降低检测信息的不确定性,增强系统的容错性能和自适应性。红外图像是灰度图像,一般采用基于统计学的方法进行处理,主要有加权平均、马尔可夫随机场和主成分分析法等;另一种是基于多分辨率分析的方法,主要有金字塔变换和小波变换^[11]。图3所示为基于小波变换的图像融合。

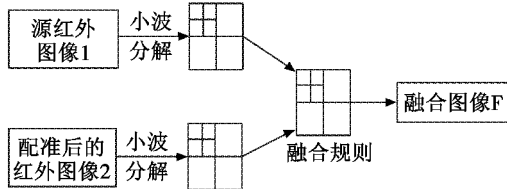


图3 基于小波变换的图像融合

Fig. 3 Image fusion based on wavelet transform

融合处理的步骤为:1)对两源图像进行小波分解,建立小波金字塔;2)对各分解层分别进行融合处理,可采用不同的融合算子得到融合后的小波金字塔;3)对融合后所得的小波金字塔进行小波逆变换,得到重构图,即融合图像。

1.4 目标检测识别

文献[12]分析了多传感器融合的红外图像检测流程,得出了在单传感器检测条件下,只有当图像SNR大于5dB、6dB才能实现高检测概率、低虚警率的性能,采用两传感器融合算法,更低的图像SNR就可以实现相近的检测性能,可见,图像融合方法提高了对红外目标的检测性能。由于红外目标是运动的空中目标,目标表面温度和发动机尾焰温度远大于周围背景,因此在红外图像中的表现为目标灰度值较高,存在一个信号奇异点,通过检测图像的奇异性就能提取到目标信息。图4为基于目标估计的检测原理。

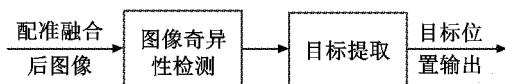


图4 基于目标的估计原理

Fig. 4 Estimation principle based on target

还有一种是基于背景预测的检测方法,利用原始图像减去背景估计来对背景进行抑制以及增强目标,最后利用阈值分割方法实现对小目标的检测,原理如图5所示。

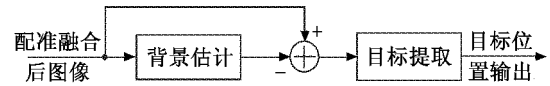


图5 基于背景的估计原理

Fig. 5 Estimation principle based on background

目标位置信息(方位角、俯仰角)是下一步目标状态估计的必需条件。由于图像配准融合过程是以长机图像为基准,根据检测信息可知,目标在长机图像中的位置为 (α_1, β_1) ,而目标在僚机红外图像中的位置 (α_2, β_2) 由图像配准变换函数的逆变换得到。

2 目标状态估计

考虑到测量噪声和非线性观测方程,利用UKF的方法进行目标状态估计。假设在地理坐标系中,目标的坐标为 (x, y, z) ,长机坐标 (x_1, y_1, z_1) ,僚机坐标为 (x_2, y_2, z_2) 。

2.1 目标模型的建立

为使用滤波方法进行目标定位,需建立目标运动模型。假设目标匀速直线运动,在笛卡尔坐标系中描述,则状态方程是简单的线性方程,滤波器的计算量较小。

目标的状态方程为

$$\mathbf{X}(k) = \Phi \mathbf{X}(k-1) + \Gamma \boldsymbol{\omega}(k-1) \quad (3)$$

$\mathbf{X}(k)$ 是 6×1 维目标状态向量,表达式为

$$\mathbf{X}(k) = [x(k), y(k), z(k), v_x(k), v_y(k), v_z(k)]^T \quad (4)$$

Γ 为动态噪声矩阵, Φ 为目标状态转移矩阵,它是一个与时间参数 k 无关的常数矩阵,表示如下

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & T \cdot \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \cdot \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ T \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\boldsymbol{\omega}(k-1) = [\omega_x(k-1), \omega_y(k-1), \omega_z(k-1)]^T$ 是状态噪声,是相互独立的零均值高斯白噪声,噪声统计为

$$\begin{cases} E[\boldsymbol{\omega}(k)] = \mathbf{0} \\ E[\boldsymbol{\omega}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_j^T] = Q_k \delta_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

选取 α_i, β_i 为系统的观测量,系统的观测方程为

$$z(k) = H[\mathbf{X}(k), k] = [\alpha_1(k), \alpha_2(k), \beta_1(k), \beta_2(k)]^T + \mathbf{v}(k) \quad (7)$$

式中: $\alpha_1(k) = \arctan \frac{y(k) - y_1(k)}{x(k) - x_1(k)}$; $\alpha_2(k) = \arctan \frac{y(k) - y_2(k)}{x(k) - x_2(k)}$;

$$\beta_1(k) = \arctan \frac{z(k) - z_1(k)}{\sqrt{(x(k) - x_1(k))^2 + (y(k) - y_1(k))^2}};$$

$$\beta_2(k) = \arctan \frac{z(k) - z_2(k)}{\sqrt{(x(k) - x_2(k))^2 + (y(k) - y_2(k))^2}};$$

$\mathbf{v}(k) = [v_1(k), v_2(k), v_3(k), v_4(k)]^T$,是观测器测量噪声,假设它们服从独立高斯分布,则数学期望和方差分别为: $E[\mathbf{v}(k)] = \mathbf{0}$, $E[v_i \cdot v_j^T] = R \delta_{ij}$ 。

2.2 载机的运动模型

针对载机平台的IRST被动定位的特点,还需要考虑载机的运动参数。长机、僚机均作匀速直线运动时的状态方程为

$$X_{1,2}(k) = \Phi(k, k-1)X_{1,2}(k-1) \quad (8)$$

式(8)中 Φ 同上。若僚机作蛇形机动,其运动模型为

$$\begin{cases} x_2(k+1) = x_2(k) + v_{x2}T \\ y_2(k+1) = y_2(0) + R \cdot \sin(\omega T) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + v_{z2}T \end{cases} \quad (9)$$

式中: $y_2(0)$ 为僚机初始时刻 y 方向位置; ω 为蛇形机动的圆周频率; R 为蛇形机动的圆周半径。

2.3 UKF 滤波模型^[1]

1)初始化,根据状态方程维数需要计算sigma采样点: $\chi_0 = E[x_0], P_{x0} = E[(x_0 - \chi_0)(x_0 - \chi_0)^T]$ 。

计算对应的均值和协方差权值 $W_i^{(m)}, W_i^{(c)}$,根据状态转移矩阵得到sigma采样点的一步预测。 $\chi_i(k+1/k) = \Phi\chi_i(k/k), i=0,1,2,\dots,12$ 。

计算状态预测估计和状态协方差。

$$\hat{X}(k+1/k) = \sum_0^{12} W_i^{(m)} \chi_i(k+1/k) \quad (10)$$

$$P(k+1/k) = \sum_0^{12} (W_i^{(c)} [\chi_i(k+1/k) - \hat{X}(k+1/k)] \cdot [\chi_i(k+1/k) - \hat{X}(k+1/k)]^T) + Q(k) \quad (11)$$

2)每个采样点通过非线性函数传播,即从状态域映射到观测域。

$$y_i(k+1/k) = H(k+1, \chi_i(k+1/k)) \quad (12)$$

计算预测量测和协方差。

$$\hat{Z}(k+1/k) = \sum_0^{12} W_i^{(m)} y_i(k+1/k) \quad (13)$$

$$P_{zz} = \sum_0^{12} (W_i^{(c)} [y_i(k+1/k) - \hat{Z}(k+1/k)] \cdot [y_i(k+1/k) - \hat{Z}(k+1/k)]^T) + R(k+1) \quad (14)$$

计算交互协方差。

$$P_{xz} = \sum_0^{12} (W_i^{(c)} [\chi_i(k+1/k) - \hat{X}(k+1/k)] \cdot [y_i(k+1/k) - \hat{Z}(k+1/k)]^T) \quad (15)$$

计算卡尔曼滤波增益。

$$K(k+1) = P_{xz} P_{zz}^{-1} \quad (16)$$

3)时间更新,状态更新方程。

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k+1/k) + K(k+1) [Z(k+1) - \hat{Z}(k+1/k)] \quad (17)$$

状态更新协方差。

$$P(k+1) = P(k+1/k) - K(k+1) P_{zz} K^T(k+1) \quad (18)$$

3 仿真实验

目标作匀速直线运动,其运动参数为: $V_x =$

$0.15 \text{ km/s}, V_y = 0.25 \text{ km/s}, V_z = 0.01 \text{ km/s}, x(0) = 100 \text{ km}, y(0) = 50 \text{ km}, z(0) = 5 \text{ km}$ 。机载IRST系统获得红外图像采样周期均为 $T = 1 \text{ s}$,观测时间为 60 s ,且激光链路的带宽满足同步融合条件。观测误差均为 5 mrad 。长机作匀速直线运动,参数为: $x_1(0) = 22 \text{ km}, y_1(0) = 18 \text{ km}, z_1(0) = 3 \text{ km}, V_{x1} = 0.28 \text{ km/s}, V_{y1} = 0.15 \text{ km/s}, V_{z1} = 0.01 \text{ km/s}$;僚机作蛇形机动,其运动参数为 $x_2(0) = 30 \text{ km}, y_1(0) = 25 \text{ km}, z_1(0) = 2 \text{ km}, V_{x1} = 0.2 \text{ km/s}, V_{z1} = 0.005 \text{ km/s}, R = 5 \text{ km}, \omega = 0.06 \text{ rad/s}$ 。取UKF的初始状态估计为: $X(0/0) = [110, 52, 6, 0.2, 0.3, 0.01]$, $P(0/0) = \text{diag}[50, 50, 50, 0.01, 0.01, 0.01]$ 。得到目标的真实轨迹和UKF轨迹如图6所示。

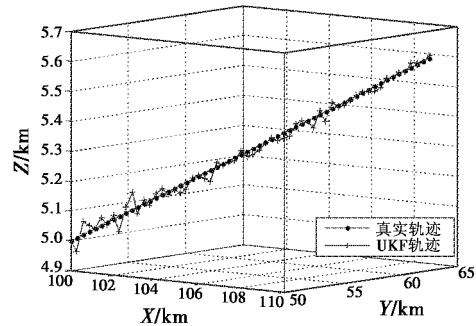


图6 目标的真实轨迹与UKF轨迹

Fig.6 Sketch map of target true track and UKF track

在完全相同的条件下进行了50次Monte-Carlo仿真实验,得到距离和速度的估计误差统计结果如图7~图8所示。

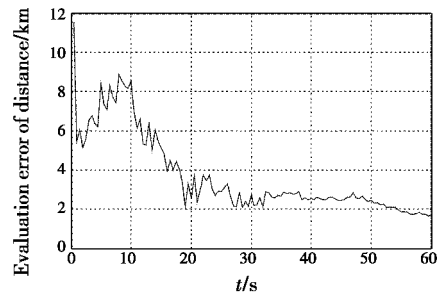


图7 目标距离估计误差

Fig.7 Estimation error of target's distance

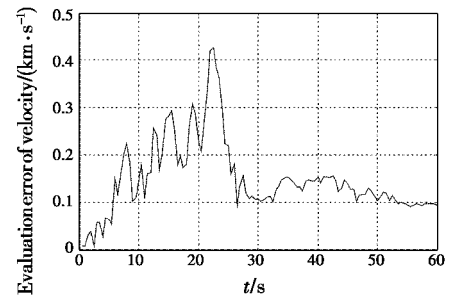


图8 目标速度估计误差

Fig.8 Estimation error of target's velocity

改变IRST采样周期为 0.6 s ,由于融合中心配准

的图像序列增多,得到的目标位置参数相对精确,误差均取为 3 mrad,经过 Monte-Carlo 仿真实验得到距离和速度的估计误差统计结果如图 9 ~ 图 10 所示。

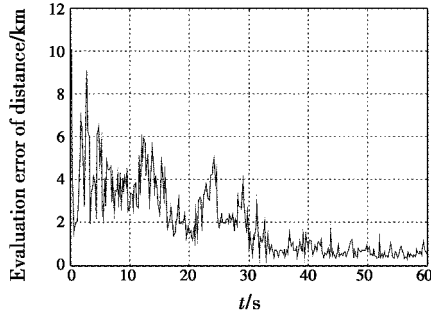


图 9 提高采样频率后的目标距离估计误差

Fig. 9 Estimation error of target's distance with improved sampling frequency

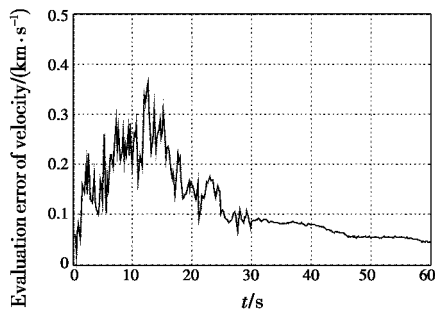


图 10 提高采样频率后的目标速度估计误差

Fig. 10 Estimation error of target's velocity with improved sampling frequency

从仿真图可以看出,距离和速度的估计误差随着观测时间的增加而趋于收敛,这表明基于激光链路的双机红外图像融合的被动定位方法是可行的。分别对比图 7 与图 9、图 8 与图 10,机载IRST系统的采样频率增加以后,目标速度估计误差收敛时间提前,距离估计精度大约在 1 km 以下,速度估计精度达到 50 m/s,而且满足目标指示和导弹隐蔽发射所需的估计精度。

4 结束语

机载无源定位具有广泛的应用前景,为了达到“先敌发现,先敌发射”的作战目的,需要发展定位精度高、自身隐蔽性好的无源定位新技术。本文提出的基于激光链路的双机IRST被动定位方法,利用激光数据链传

输容量大、保密性强、抗干扰性强的特点,满足多源图像的实时融合要求。图像融合提高了IRST探测距离和弱小红外目标的检测能力,结合UKF良好的滤波性能,得到目标状态参数的估计方法。仿真实验结果表明,IRST获得红外图像的采样频率提高,能缩短收敛时间并提高目标距离和速度的估计精确度。但是对于激光链路又提出了更高的要求,激光链路是空间信息传输最有竞争力的技术途径,关于机载平台快速建立和保持激光链路有待进一步分析研究。

参考文献

- [1] 刘聪锋. 无源定位与跟踪[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2011:3-32.
- [2] 梁捷,谢晓方,曹建,等. 机载多点测向交叉定位的最优机方向研究[J]. 电光与控制,2010,17(10):14-17.
- [3] 李思科. IRST单站被动定位系统的关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2008.
- [4] 张平,方洋旺,朱剑辉,等. 基于UKF算法的双机协同无源跟踪[J]. 电光与控制,2012,19(4):26-30.
- [5] 谢细全. 单站无源定位修正协方差卡尔曼滤波算法[J]. 计算机仿真,2011,28(4):6-9.
- [6] 姜会林,佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010:228-237.
- [7] 姜会林,刘志刚,佟首峰,等. 机载激光通信环境适应性及其关键技术分析[J]. 红外与激光工程,2007,36(s):299-302.
- [8] 曹阳,赵明富. 机载空间激光通信平台跟踪理论研究[J]. 半导体光电,2011,32(2):255-258.
- [9] 张景阳,王海晏,陈鑫,等. 双机之间激光通信ATP技术研究[J]. 激光与红外,2012,42(5):490-494.
- [10] 张景阳,王海晏,王领,等. 机载激光猝发通信技术研究[J]. 激光与红外,2012,42(3):258-262.
- [11] 刘卫光. 图像信息融合与识别[M]. 北京:电子工业出版社,2008:29-30.
- [12] 张光明,盛卫东,樊士伟,等. 基于多传感器融合的红外图像序列检测性能分析[J]. 红外与毫米波学报,2009,28(1):16-19.