

机载红外搜索跟踪系统被动定位滤波算法研究

冯国强, 李伟仁, 李战武

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:首先用扩展卡尔曼滤波算法构建了机载红外搜索跟踪系统被动定位滤波模型,然后针对该滤波算法要求先验的噪声统计及存在系统观测模型线性化误差影响滤波精度的特点,利用虚拟噪声技术,提出了适合于红外搜索跟踪系统被动定位的自适应扩展卡尔曼滤波算法,该算法实时地估计了虚拟噪声的统计特性,减小了线性化误差,提高了非线性滤波的精度。仿真结果表明,在完全相同的初始条件下,自适应扩展卡尔曼滤波对目标距离和速度的估计结果明显优于扩展卡尔曼滤波,此算法具有很高的工程应用价值。

关键词:红外搜索跟踪系统; 被动定位; 扩展卡尔曼滤波; 自适应扩展卡尔曼滤波; 虚拟噪声

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)05-0606-06

Filter algorithm of passive location by IRSTS

FENG Guo-qiang, LI Wei-ren, LI Zhan-wu

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: First building the filter algorithm model of passive location by IRSTS by means of extended kalman filter, then aiming at the speciality of transcendental noise statistics and linearization error of measurement model effecting on filter precision during the study of extended kalman filter, adaptive extended kalman filter algorithm for passive location by IRSTS by means of subjective noise technique is advanced. It improved on extended kalman filter algorithm and approximated subjective noise statistics. The algorithm degraded linearization error and enhanced the nonlinear filter precision. The simulation experimental results show the advantage of adaptive extended kalman filter algorithm under the same condition, the algorithm supplied practical value of engineering.

Key words: IRSTS; Passive location; Extended Kalman Filter(EKF); Adaptive Extended Kalman Filter(AEKF); Subjective noise

收稿日期: 2004-11-20; 修订日期: 2005-01-05

作者简介: 冯国强(1978-), 男, 山西稷山人, 博士生, 研究方向为机载导弹武器系统工程。

0 引言

机载红外搜索跟踪系统(IRSTS)是一种重要的空中目标探测装置,它以被动方式工作,抗电子干扰和抗隐身目标能力强,且能保持无线电静默而实现隐蔽接敌^[1]。通常,IRSTS都能通过被动探测目标的红外辐射提供目标的方位角及俯仰角信息,但无法提供目标的距离信息。目前,IRSTS主要是根据测得的角度量来推导目标的位置量,实现被动定位^[2,3]。但是,IRSTS主要探测和跟踪5 km以外的点源目标,不提供丰富的目标图像信息,以下主要从滤波算法的角度介绍IRSTS被动定位。

近年来,许多学者应用滤波算法对被动定位、目标运动分析及跟踪等问题进行了广泛的研究,目前最常用的方法是扩展卡尔曼滤波(EKF)算法,但传统的EKF算法对非线性观测模型进行线性化处理时,存在线性化误差影响滤波精度,甚至导致算法不收敛的特点,从而提出了自适应扩展卡尔曼滤波(AEKF)算法。其中参考文献[4]在进行纯方位目标运动分析研究时,针对EKF算法存在线性化误差的特点,将系统观测模型偏差状态序列的动态特性设为半马尔可夫过程,并融入贝叶斯估值理论提出了一种适用于水下目标被动定位的自适应滤波算法,大大地提高了目标参数估值精度。参考文献[5]在研究导弹被动跟踪制导问题时,提出了基于虚拟噪声技术的AEKF算法。该算法将非线性测量模型的线性化截断误差当作虚拟噪声,补偿了线性化误差的影响,结果表明,AEKF算法的收敛速度和估计精度均优于EKF算法。利用参考文献[4]、[5]中的算法思想,根据IRSTS被动定位问题的特点,分别用EKF算法及基于虚拟噪声技术的AEKF算法构建了适合于IRSTS被动定位滤波算法模型,最后,在完全相同的初始条件下对两种算法进行了仿真比较。

1 扩展卡尔曼滤波算法

1.1 系统模型的建立

假设目标匀速直线运动,在笛卡尔坐标系中描述该问题(如图1所示),则系统的动态方程是简单的线性方程,滤波器的计算量较小。图中 β 和 ε 分别代表

IRSTS测量的目标方位角和俯仰角。

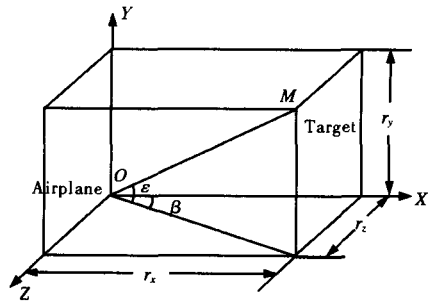


图1 直角坐标系中目标-载机相对运动模型

Fig.1 Relative kinematics model of the airplane and target in rectangular coordinates

系统的状态方程为:

$$X(k+1)=\Phi(k)X(k)+\omega(k) \quad (1)$$

式中 $X(k)$ 是 $n \times 1$ 维目标状态向量:

$X(k)=[x(k), y(k), z(k), v_x(k), v_y(k), v_z(k)]^T$, $\Phi(k)$ 为目标状态转移矩阵,对于匀速运动目标,它是一个与时间参数 k 无关的常数矩阵,表示如下(其中 T 是采样周期):

$$\Phi(k)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$\omega(k)$ 是 $n \times 1$ 维的独立的高斯白噪声,噪声统计为:

$$E[\omega(k)]=q_1(k), E[\omega(k)\omega^T(j)]=Q_1(k)\delta_{kj}$$

系统的观测方程为:

$$z(k)=[\beta(k), \varepsilon(k)]^T=h[X(k), k]+v(k) \quad (2)$$

式中 $\varepsilon(k)=\tan^{-1}\{[y(k)-y_0(k)]/([x(k)-x_0(k)]^2+[z(k)-z_0(k)]^2)^{1/2}\}+v_1(k)$, $\beta(k)=\tan^{-1}\{[z(k)-z_0(k)]/([x(k)-x_0(k)]+v_1(k))\}$ 分别是观测器测量的目标方位角与俯仰角; $v(k)=[v_1(k), v_2(k)]$ 是相应的测量噪声,假设它们服从独立高斯分布,则数学期望和方差分别为:

$$E[v(k)]=r_1(k), E[v(k)v^T(j)]=R_1(k)\delta_{kj}$$

1.2 扩展卡尔曼滤波方程

将非线性测量方程式采用一阶泰勒展开:

$$\beta = \beta^- + H_\beta(X - X^-) + v_1 \tag{3}$$

$$\varepsilon = \varepsilon^- + H_\varepsilon(X - X^-) + v_2 \tag{4}$$

式中上标“-”表示变量在展开处的值; H_β 、 H_ε 分别是 β 、 ε 变量在 X^- 的一阶导数, 公式如下:

$$H_\beta = (-\sin\beta^- \cos\beta^- \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) / r_{\beta^-}$$

$$H_\varepsilon = (-\cos\beta^- \ \sin\varepsilon^- \ -\sin\beta^- \ \sin\varepsilon^- \ \cos\varepsilon^- \ 0 \ 0 \ 0) / r_{\varepsilon^-}$$

在 EKF 算法中, 函数的泰勒展开点取为变量的预测位置, 如: $X^- = X(k+1/k)$, 其他变量也一样。令 $H(k) = (H_\beta \ H_\varepsilon)^T$, 根据上面所得到状态方程和测量方程直接使用 EKF 算法^[6-9], 得出下列滤波方程:

$$X(k+1/k) = \Phi(k+1, k)X(k) + q_1(k) \tag{5}$$

$$P(k+1/k) = \Phi(k+1, k)P(k+1/k+1)\Phi^T(k+1, k) + Q_1(k) \tag{6}$$

$$K(k+1) = P(k+1/k)H(k+1)^T \{H(k+1) \times P(k+1/k)H(k+1)^T + R_1(k)\}^{-1} \tag{7}$$

$$\tilde{Z}(k+1) = z(k+1) - h[X(k+1/k, k+1)] - r_1(k+1) \tag{8}$$

$$X(k+1/k+1) = X(k+1/k) + K(k+1)\tilde{Z}(k+1) \tag{9}$$

$$P(k+1/k+1) = \{I - K(k+1)H(k+1)\}P(k+1/k) \tag{10}$$

以上滤波算法要求 $r_1(k)$ 、 $q_1(k)$ 、 $R_1(k)$ 、 $Q_1(k)$ 是已知的。

EKF 要求先验的噪声统计, 实际上它们常常是未知的。如果采用错误的噪声统计会产生滤波误差, 甚至使滤波发散。利用虚拟噪声技术, 非线性系统的线性化误差在一定程度上可以归为线性系统模型中的一种噪声。因此, 用自适应滤波在线地估计虚拟噪声的统计特性, 可以降低线性化误差, 提高非线性滤波的精度, 这也是 EKF 的改进算法, 而且计算量与扩展的卡尔曼滤波相差不多。文中使用参考文献[5]提出的 Sage-Husa 时变噪声统计估值器在线地估计虚拟噪声统计特性(即噪声的均值和方差), 并应用到 EKF 中, 得到了 AEKF 算法。

2 自适应扩展卡尔曼滤波算法

AEKF 算法系统模型采用第 1.1 节中的模型, 当

模型噪声均值 $r_1(k)$ 、 $q_1(k)$ 和协方差 $R_1(k)$ 、 $Q_1(k)$ 未知时, 基于 Sage-Husa 噪声统计估值器, 可以用指数加权方法联立给出模型噪声和观测噪声的未知时变均值和协方差:

$$\hat{q}_1(k+1) = (1-d_k)\hat{q}_1(k) + d_k[x(k+1/k+1) - \Phi(k)x(k/k)]$$

$$\hat{Q}_1(k+1) = (1-d_k)\hat{Q}_1(k) + d_k \times \left[K(k+1)\varepsilon(k+1)\varepsilon^T(k+1)K^T(k+1) + P(k+1/k+1) - \Phi(k)P(k/k)\Phi^T(k) \right]$$

$$\hat{r}_1(k+1) = (1-d_k)\hat{r}_1(k) + d_k[z(k+1) - H(k+1)x(k+1/k)]$$

$$\hat{R}_1(k+1) = (1-d_k)\hat{R}_1(k) + d_k \times \left[\varepsilon(k+1)\varepsilon^T(k+1) - H(k+1) \times P(k+1/k)H^T(k+1) \right]$$

下面, 讨论 AEKF 的设计问题。AEKF 可以对四个噪声统计值同时估计。但是在实际应用中, 如果初值选择不当, 滤波器容易发散^[10]。为了增强 AEKF 的鲁棒性, 在实际条件允许的情况下, 应该尽可能地只对四个噪声统计值的一部分进行实行估计。在直角坐标系下 IRSTS 系统对目标实行被动探测的数学模型中, 系统的动态模型是线性的, 因此不存在动态模型线性化误差。动态噪声的均值和方差可以验前确定其界, 所以这里不考虑实时估计问题。系统的观测模型是非线性的, 应用 EKF 原理时存在线性化误差, 所以需要实时地估计虚拟观测噪声的统计特性。

将观测方程 $z(k) = [\beta(k), \varepsilon(k)]^T = h[x(k), k] + v(k)$ 在 $x(k+1/k)$ 处 Taylor 展开可得线性化的观测模型:

$$z(k) = \frac{\partial h}{\partial x(k+1/k)}x(k) + \eta(k)$$

式中 $\eta(k) = v(k) + H.O.T$, $H.O.T$ 为 Taylor 展开式中的所有高阶项。称 $\eta(k)$ 为虚拟观测噪声, 它带有未知的时变统计:

$$E[\eta(k)] = r_2(k), E[\eta(k)\eta^T(j)] = R_2(k)$$

对 $r_2(k)$ 和 $R_2(k)$ 进行估计,把改进的 Sage-Husa 时变观测噪声统计估值器推广到非线性系统。得到:

$$\hat{r}_2(k+1)=(1-d_k)\hat{r}_2(k)+d_k[z(k+1)-h[x(k+1/k+1),k+1]]$$

$$\hat{R}_2(k+1)=(1-d_k)\hat{R}_2(k)+d_k \times \left[\begin{aligned} & \left[I - \frac{\partial h}{\partial x(k+1/k)} K(k+1) \right] \varepsilon(k+1) \times \\ & \varepsilon^T(k+1) \left[I - \frac{\partial h}{\partial x(k+1/k)} K(k+1) \right]^T + \\ & \frac{\partial h}{\partial x(k+1/k)} P(k+1/k+1) \left[\frac{\partial h}{\partial x(k+1/k)} \right]^T \end{aligned} \right]$$

式中 $d_k=(1-b_f)/(1-b_f^{k+1})$,其中 $0 < b_f < 1$ 为遗忘因子。

分别将 $\hat{r}_2(k+1)$ 和 $\hat{R}_2(k+1)$ 代替 EKF 方程中的 $\hat{r}_1(k+1)$ 和 \hat{R}_1 ,得到 AEKF 方程为:

$$X(k+1/k)=\Phi(k+1,k)X(k)+q_1(k) \quad (11)$$

$$P(k+1/k)=\Phi(k+1,k)P(k+1/k+1)\Phi^T(k+1,k)+Q_1(k) \quad (12)$$

$$K(k+1)=P(k+1/k)[\partial h/\partial X(k+1/k)]^T\{[\partial h/\partial X(k+1/k)] \times P(k+1/k)[\partial h/\partial X(k+1/k)]^T+\hat{R}_2(k+1)\}^{-1} \quad (13)$$

$$\tilde{Z}(k+1)=z(k+1)-h[X(k+1/k,k+1)]-\hat{r}_2(k+1) \quad (14)$$

$$X(k+1/k+1)=X(k+1/k)+K(k+1)\tilde{Z}(k+1) \quad (15)$$

$$P(k+1/k+1)=\{I-K(k+1)[\partial h/\partial X(k+1/k)]\}P(k+1/k) \quad (16)$$

3 仿真实验

3.1 EKF 及 AEKF 算法在导弹被动跟踪制导中的应用仿真

参考文献[5]研究导弹被动跟踪制导问题时,对 EKF 及 AEKF 算法在完全相同的条件下进行了 50 次 Monte-Carlo 仿真研究,得到两种算法对距离与速度的估计误差统计结果。

仿真结果表明,在完全相同的条件下,AEKF 的性能明显要优于 EKF 的性能,特别是对速度的估计结果要更好。即使 EKF 已知测量噪声的统计特性,由于它忽略了观测模型线性化误差的影响,其性能仍然较

差。特别是当目标与导弹之间的相对距离较小时导弹的制导加速度趋于零,系统的可观测性下降,观测噪声迅速增大,EKF 中相对速度的估计误差很大。如果把误差很大的相对速度估计值反馈给制导律,制导精度会受到严重影响。而同样的情况下,AEKF 的估计误差要小得多。

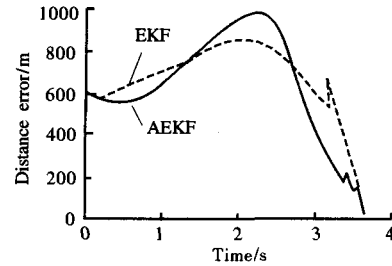


图 2 距离估计误差

Fig.2 Evaluation error of distance

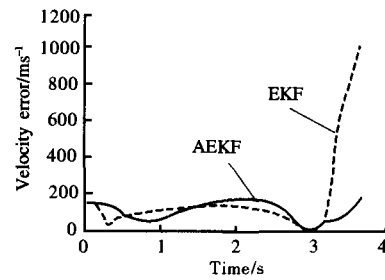


图 3 速度估计误差

Fig.3 Evaluation error of velocity

3.2 IRSTS 被动定位仿真

针对红外搜索跟踪系统的被动定位的特点,进行以下仿真研究。

载机作蛇行机动,其运动模型为:

$$x_0(k)=x_0(k-1)+v_{0x}T$$

$$y_0(k)=y_0+R_0\sin\omega t$$

$$z_0(k)=z_0(k-1)+v_{0z}T$$

式中 y_0 是载机初始时 y 方向位置; ω 是蛇行机动的圆周频率; R_0 是蛇行机动圆周半径。目标作匀速直线运动其运动模型为:

$$x(k)=x(k-1)+v_x(k-1)T+\frac{1}{2}a_xT^2$$

$$y(k)=y(k-1)+v_y(k-1)T+\frac{1}{2}a_yT^2$$

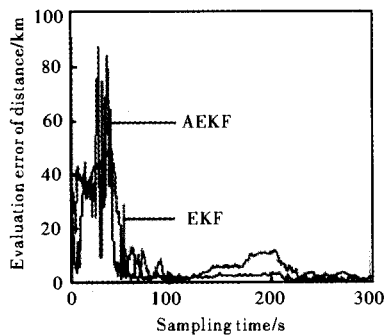
$$z(k) = z(k-1) + v_z(k-1)T + \frac{1}{2}a_zT^2$$

角度是观测值,将滤波器的初始参数用角度表示,考虑到 IRSTS 的作用范围,以此为基础进行初始化:

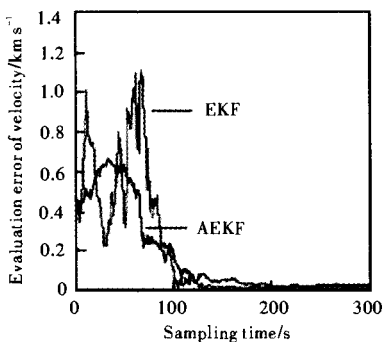
$$\hat{X}(0/0) = \begin{bmatrix} R\cos[\beta(1)]\cos[\varepsilon(1)] & R\sin[\beta(1)]\cos[\varepsilon(1)] & R\sin[\beta(1)]\sin[\varepsilon(1)] & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{P}(0/0) = \text{diag}(\delta_{R_x}^2, \delta_{R_y}^2, \delta_{R_z}^2, \delta_{v_x}^2, \delta_{v_y}^2, \delta_{v_z}^2) = \text{diag}(100, 100, 100, 0.01, 0.01, 0.01)$$

取各量初始值 $v_x=0.4$ km/s, $v_y=0.2$ km/s, $v_z=0.01$ km/s, $R=150$ km, $R_0=2.5$ km, $\sigma=0.5^\circ$, $\omega=0.04$ arc/s, 仿真给出 100 次 Monte-Carlo 的距离估计与速度估计误差曲线,如图 4(a)、(b)所示,并等间隔地给出目标的距离及速度仿真值与理论值对照表,如表 1、表 2 所示。



(a) 距离估计误差
(a) Evaluation error of distance



(b) 速度估计误差
(b) Evaluation error of velocity

图 4 仿真曲线

Fig.4 Simulation curves

表 1 EKF 仿真数据

Tab.1 Simulation data of EKF

Time/s	Target real distance/km	Target estimative distance/km	Evaluation error of distance /%	Target real velocity /kms ⁻¹	Target estimative velocity /kms ⁻¹	Evaluation error of distance /%
0	126	150	20.6	0.447	0	100
50	103	155.5	51.43	0.447	0.660	47.84
100	102	104.7	2.65	0.447	0.608	36.14
150	93	95.2	2.41	0.447	0.473	5.84
200	89	94.3	6.03	0.447	0.470	5.19
250	70	72.4	3.44	0.447	0.462	3.52

表 2 AEKF 仿真数据

Tab.2 Simulation data of AEKF

Time/s	Target real distance/km	Target estimative distance/km	Evaluation error of distance /%	Target real velocity /kms ⁻¹	Target estimative velocity /kms ⁻¹	Evaluation error of distance /%
0	126	150	20.6	0.447	0	100
50	103	145.2	41.71	0.447	0.611	36.79
100	102	107.9	5.57	0.447	0.521	16.71
150	93	93.5	3.16	0.447	0.466	4.24
200	89	91.8	1.94	0.447	0.461	3.23
250	70	71.5	1.94	0.447	0.457	2.34

4 结论

通过对两种算法的仿真研究可以得出以下结论:在完全相同的条件下,AEKF 算法的估计精度明显优于 EKF,特别是对目标速度的估计精度。另外,IRSTS 被动定位的滤波算法的仿真结果还表明,滤波初始估计状态 R 的选取值对滤波的收敛速度影响不大;当目标的速度增加时,滤波的收敛速度加快,但是收敛精度有所下降;当载机机动的圆周频率增加估计效果会更好。总之,基于虚拟噪声技术的 AEKF 算法较适用于 IRSTS 被动定位,但如果能进一步改进时变观测噪声统计模型,那么,IRSTS 被动定位的精度会更高,这有待于进一步分析研究。

参考文献:

- [1] XIE Xi-quan, YI Hua. Model of dynamically measuring range and velocity by IRSTS[J]. Infrared and Laser Engineering (谢希权, 易华. 机载红外搜索跟踪系统的单站单波段测距测速模型. 红外与激光工程), 2000, 29(3): 28-31.
- [2] LU Yuan, SHI Jia-ming, LING Yong-shun, et al. Research on infrared passive location[J]. Infrared and Laser Engineering (路远, 时家明, 凌永顺, 等. 红外被动定位研究. 红外与激光工程), 2001, 30(6): 405-409.
- [3] WANG Xue-wei, SHEN Tong-sheng, ZHOU Xiao-dong. Passive location of IRST[J]. Laser and Infrared (王学伟, 沈同圣, 周晓东. IRST被动定位研究. 激光与红外), 2001, 31(6): 362-363, 373.
- [4] ZHAN Yan-mei. Research on bearing-only target motion analysis [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University (詹艳梅. 纯方位目标运动分析研究. 西安: 西北工业大学), 2001.
- [5] ZHOU Di. New Guidance Laws for Homing Missile [M]. Beijing: National Defence Industry Press (周获. 寻的导弹新型导引规律. 北京: 国防工业出版社), 2002.
- [6] Vincent J A, Sherry H. Utilization of modified polar coordinates for bearing-only tracking [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1989, 28(2): 2-16.
- [7] Aidala V. Kalman filter behavior in bearing-only tracking applications [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, AES-15(1): 29-39.
- [8] Song T L, Speyer J A. A stochastic analysis of a modified gain extended Kalman filter with applications to estimation with bearings only measurements [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1985, AC-30(10): 940-949.
- [9] Fagin S. Comments on a method for improving extended Kalman filter performance for angle-only passive ranging [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(3): 1148-1150.
- [10] SUN Zhong-kang, ZHOU Yi-yu, HE Li-xing. Technology of Active or Passive Location by Single or Multiple Stations [M]. Beijing: National Defence Industry Press (孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术. 北京: 国防工业出版社), 1996. 196-312.

《红外与激光工程》征稿简则

《红外与激光工程》系中国宇航学会光电技术专业委员会会刊, 由中国航天科工集团公司主管。双月刊, 国内外公开发行。本刊主要报导国内外红外与激光技术在航天、卫星和战术导弹武器系统中应用的学术论文、科研报告, 各类新的光电技术实验方法和成果, 新工艺、新材料等, 也报导国内领先的光电技术在民用方面的最新科研成果。本刊也刊登英文稿件, 欢迎广大读者踊跃投稿。来稿要求及注意事项如下:

1 投稿须论点明确, 数据可靠, 文字简炼, 逻辑严谨, 一般 5000 字为宜, 凡属国家自然科学基金资助的重点科研项目, 请予以注明。

2 来稿请用 A4 纸按标准格式打印, 版心为 174 mm×246 mm, 公式、图表中量符号的大小写及上、下角标须标清楚。

3 来稿要有中、英文对照的摘要, 中文摘要 200~300 字, 英文摘要不得少于 100 个单词, 中、英文关键词 3~6 个; 按中国图书馆分类法(第四版)对投稿进行分类, 并给出中图分类号。

4 来稿中的图表均不超过 8 个。中文稿须有中、英文对照的图题及表题, 图表中的文字须译成英文, 或用相应的符号表示。

5 参考文献应择最主要的列出, 应是国内外公开发表过的文献, 欢迎引用本刊同行发表的文章, 在正文中按引用顺序用上角标标出。由于本刊准备进入 SCI, 要求稿件中的中文参考文献采用中英文对照形式。

6 文稿不应涉及保密内容及他人利益, 文责自负。

7 请勿一稿多投。文稿一旦录用, 编辑部发录用通知单。编辑部有权删改录用稿件。来稿录用与否, 3 个月内通知作者。

8 文稿一经发表, 按规定支付稿酬, 并赠送本期刊物两本。

欢迎使用电子邮件投稿, Email: irla@vip.sina.com, 具体格式参见期刊主页 <http://irla.vip.sina.com>。邮寄请寄天津 225 信箱 32 分箱《红外与激光工程》编辑部收, 邮编 300192。