

# 相向运动条件下图像的辐射状退化及其复原研究

黄飞, 金伟其, 曹峰梅, 刘伯丰

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

**摘要:** 当摄像机随载体作高速运动时, 由于成像曝光时间、摄像机与目标间的纵向相对运动等因素使目标图像产生从中心到边缘的辐射状模糊, 使系统有效视场减少, 影响对目标的探测、识别和跟踪。本文根据运动成像关系和光电探测器的信号积分机理, 研究了摄像平台高速运动条件下, 图像辐射状模糊的图像退化模型, 对几种特殊图像的退化进行了分析; 并针对实际离散成像过程, 建立了图像退化模型, 分析了影响辐射状退化的因素; 提出了一种辐射状模糊图像的递推复原处理算法; 计算机方法模拟的辐射状退化图像与实际图像一致, 复原算法可有效地减轻相向运动所造成的图像辐射状模糊。

**关键词:** 成像系统; 辐射状模糊; 图像退化模型; 图像复原; 相向运动

**中图分类号:** TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)09-1710-04

## Simulation and Restoration Study on Radiant Degradation Image Under Lengthwise Relative Motion

HUANG Fei, JIN Wei qi, CAO Feng mei, LIU Bo feng

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** When the camera moves at high speed with its carrier, the target image will degrade with radiant blurring from the center to the periphery of image due to such factors as image exposure time, lengthwise relative motion between camera and target, and others. This will reduce the effective field of vision, and affect target detection, recognition and follow up. An image degradation model has been established and the factors affecting radiant image blurring are analyzed on the basis of motion imaging relations, signal integration mechanism of photo electronic detectors, investigation on consecutive image degradation models of radiant blurring under high speed lengthwise relative motion of camera platform, analysis of degradation of some specific images, and further analysis of the actual dispersion imaging processes. The restoration approach of radiant blurred image based on recursive algorithm is proposed. The radiant degraded image simulated by computerized method is consistent with the actual image, and the restoration algorithm is verified through the microcomputer, and experimental results show that the proposed algorithm can mitigate radiant blur of high speed lengthwise relative movement effectively.

**Key words:** radiant blurring; imaging system; radiant blurring; image degradation model; image restoration; lengthwise relative movement

### 1 引言

图像复原是现代图像处理技术的重要研究方向之一。成像过程的图像模糊退化除光学系统离焦、像差、探测器空间离散积分采样、电子处理等原因外, 在探测器的时间积分效应, 由于成像系统与目标场景的相对运动也是引起图像模糊的主要类型之一。目前大多数研究主要针对目标相对成像系统有横向移动、振动或旋转所造成的图像模糊及其处理<sup>[1~4]</sup>, 而对于目标相对成像系统有相向运动所引起的图像辐射状模糊(如图1)及其处理算法的研究公开报道的资料很少。实际上, 在超高速(5~10马赫)精确成像制导、NMD和WMD导弹防御系统中拦截导弹的目标图像探测以及其它高速过程的成像探测都涉及辐射状图像模糊及其复原问题, 但公开报道的资料较少。本文作者之一曾在俄罗斯参与对连续变焦过程成像问题的研究<sup>[5,6]</sup>, 其图像也具有辐射状模糊特性, 研究背景为高速成像制导。

在辐射状图像退化中, 图像边缘分辨率快速下降直至基本丧失, 有效视场明显降低, 给目标探测和识别带来困难。通常采用高帧频成像系统和电子快门等方式控制有效曝光时间, 可减小图像的退化模糊, 但帧频的提高受探测器以及处理电子线路的限制; 而在探测器灵敏度有限的情况下, 电子快门是以牺牲信号响应为代价, 最终将反映到系统作用距离的减小。



图1 辐射状模糊的模拟图像

本文将研究目标与成像系统相向运动所形成辐射状图像模糊的机理和特点, 探索消除或减小图像模糊(区域与模糊程度)的处理算法。

### 2 连续图像的退化模型

运动模糊是场景能量在像平面上成像传感器拍摄瞬间的

时间积分所形成. 设  $f(x, y)$  为原图像, 由于成像器与景物的相对运动而获得的模糊图像为  $g(x, y)$ . 假定成像器(如 CCD 成像系统)与景物做相

向的匀速运动(如图 2), 运动速度为  $v$ , 且成像器运动相对场景的目标点不变, 忽略成像器的抖动、光学像差等带来的

**图 2 相向运动中的图像退化过程**

图像模糊及距离变化引起的成像放大率的变化, 则在成像器曝光时间  $T$  内, 实际采集的退化模糊图像  $g(x, y)$  与原图像  $f(x, y)$  的关系为

$$g(x, y) = \frac{1}{T} \int_T f[x(t), y(t)] dt \quad (1)$$

**2.1 理想成像过程的数学模型**

考虑对于采样积分开始时刻  $t = 0$  对应离轴  $r$  处的像元, 其对应的角度  $\omega$  满足  $\text{tg} \omega = r/L$  (2) 则在  $t$  时刻, 同样  $\omega$  角度的像元所对应的场景点为

$$r(t) = (L - v \cdot t) \cdot \text{tg} \omega = \frac{(L - v \cdot t)}{L} \cdot r = r - \frac{vr}{L} t = r + \dot{r} \cdot t \quad (3)$$

其中,  $\dot{r} = -vr/L$  为像元在场景上的移动速度, 且速度沿径向, 具有轴对称性, 图像形成辐射状模糊. 由于与  $r$  成正比, 故在整个像面上属于变速运动, 图像模糊随半径的加大而加剧.

于是, 式(1)以极坐标形式表示为

$$g(x, y) = g(r, \theta) = \frac{1}{T} \int_0^T f[r(t), \theta] dt = \frac{1}{T} \int_0^T f[r + \dot{r} \cdot t, \theta] dt \quad (4)$$

利用坐标变换, 可进一步将式(4)改写为

$$g(r, \theta) = - \frac{1}{T v \dot{r}} \int_{r(t)}^{r(0)} f(u, \theta) du \quad (5)$$

不难看出:  $\zeta = vT/L$  ( $\zeta \ll 1$ ) 是一个可表征图像模糊的特征量, 即信号积分时间内成像系统运动距离  $vT$  与目标距离  $L$  之比,  $\zeta$  越大, 模糊越严重,  $\zeta \rightarrow 0$  时,  $g(x, y) \rightarrow f(x, y)$ , 即无图像模糊.

加大目标距离  $L$ 、减小运动速度  $v$  以及减小曝光时间  $T$  均可以减小图像的模糊, 反之则加强. 图 3 给出了对于帧频 25Hz 逐行扫描成像系统, 在不同运动速度条件下, 目标距离  $L$  与  $\zeta$  的关系曲线.

**2.2 几种特例图像的讨论**

一般地, 若  $f(r, \theta)$  具有方向性, 则模糊图像  $g(r, \theta)$  也具有方向性, 但若  $f(r, \theta) = f(r)$ , 则即具有轴对称性, 则  $g(r, \theta)$  也具有轴对称性, 且式(5)进一步简化为

$$g(r) = - \frac{1}{\zeta r} \int_r^{(1-\zeta)r} f(u) du \quad (6)$$

(1) 当原图像为幂函数  $f(r) = r^n$  分布时, 模糊图像为

$$g(r) = \begin{cases} \frac{1}{\zeta} f(r) \ln \frac{1}{1-\zeta}, & n = -1 \\ \frac{1}{\zeta} \frac{1}{n+1} [1 - (1-\zeta)^{n+1}] f(r), & n \neq -1 \end{cases} \quad (7)$$

即模糊退化图像为原图像的常数倍, 且当  $n \geq 0$  时,  $g(r) \leq f(r)$ , 当  $n < 0$  时,  $g(r) > f(r)$ .

(2) 当  $f(r) = \exp(-ar)$  时, 模糊图像  $g(r) = \exp(-ar) \{ \exp(a\zeta r) - 1 \} / (a\zeta r)$ , 且  $g(r) > f(r)$ .

(3) 当原图像  $f(r) = 0.5 \cos(r) + 0.5$  时, 则  $g(r) = 0.5 \{ \sin(r) - \sin[(1-\zeta)r] \} / (\zeta r) + 0.5$ , 在  $\zeta = 0.1$  条件下,  $g(r)$  图像及与  $r$  的关系曲线如图 4 所示.

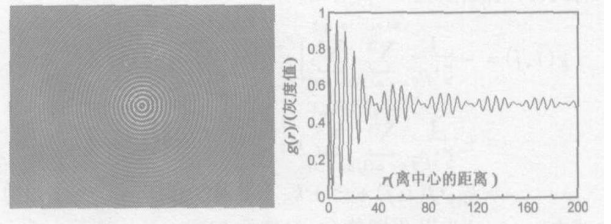


图 4 正弦波的退化图像及波形

(4) 原图像为同心圆环台阶函数  $f(r) = \sum_{i=1}^n (10 - i) \times 10^{-1} \text{rect}[r/(25i)]$ , 其中  $\text{rect}(r)$  为单位矩形函数,  $f(r)$  与  $g(r)$  的图像及其灰度曲线如图 5.

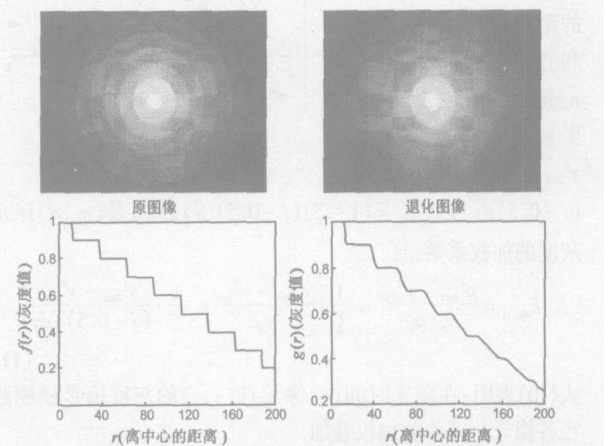


图 5 同心圆环台阶图像及其退化图像

需要指出: 辐射状图像模糊的程度随景物离视轴中心的距离加大而趋剧烈, 在图像平面上并不满足平移不变性, 因此按照线性系统理论, 图像处理中常用的传递函数或点扩散函数等概念和方法已不适用, 需要研究新的评价模型和处理算法.

**3 离散数字图像的退化仿真**

在运动模糊中, 景物像点沿积累轨迹的像元中心连线称为模糊路径, 模糊路径为一系列指向图像中心长度为  $\zeta \cdot r$  的径向线段. 在离散情况下, 由于探测器在空间分布的离散性以及有限时间的信号积分, 使高速运动模糊图像与连续情况有所区别.

由于退化图像  $g(i, j)$  的分辨率总小于静止的原图像  $f(i, j)$ , 我们假设为设成像器件的像元尺寸为  $dx \times dy$ , 像元数  $2M \times 2N$ , 占空比 100%. 在原图像空间的像元  $(i, j)$  具有尺寸

$dx \times dy$  和均匀灰度值  $f(i, j)$ . 以成像器件中心为坐标原点, 建立坐标系如图 6, 则  $(i, j)$  像元中心的坐标为

$$\begin{cases} x_i = i \cdot dx - dx/2, \\ i = -M + 1, \dots, M \\ y_j = j \cdot dy - dy/2, \\ j = -N + 1, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

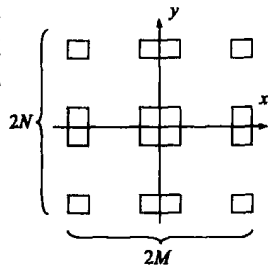


图 6 高散探测器阵列

距坐标中心的距离

$$\rho_{i,j} = [(i - 0.5) \cdot dx]^2 + [(j - 0.5) \cdot dy]^2 \quad (9)$$

将式(5)离散化, 且  $r = \rho_{i,j}$ , 则

$$\begin{aligned} g(i, j) &= -\frac{1}{\zeta \cdot \rho_{i,j}} \sum_{m=m(1)n=n(1)}^{m(q_0)n(q_0)} \int_{\beta_{mn}}^{\beta_{mn}'} f[m(q), n(q)] \cdot du \\ &= -\frac{1}{\zeta \cdot \rho_{i,j}} \sum_{m=m(1)n=n(1)}^{m(q_0)n(q_0)} u \Big|_{\beta_{mn}}^{\beta_{mn}'} f[m(q), n(q)] \\ &= k_{i,j} \cdot f(i, j) + \dots + k_{m,n} \cdot f[m(q_0), n(q_0)] \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $g(i, j)$  为退化图像  $(i, j)$  像元灰度;  $f(i, j), \dots, f[m(q), n(q)]$  为模糊路径上原图像的像元灰度,  $\rho_{mn}$  和  $\rho_{mn}'$  分别为模糊路径切割  $(m, n)$  像元线段端点距中心的距离 (如图 7);  $y'_{mn}$  和  $y''_{mn}$  分别为切割  $(m, n)$  像元线段端点的纵坐标,  $y'_{m(q+1)n(q+1)} = y''_{m(q)n(q)}$  (其中  $y'_{ij} = (j - 0.5)dy, y''_{m(q_0)n(q_0)} = (1 - \zeta)(j - 0.5)dy$ );  $k_{m,n}$  是  $(m, n)$  像元灰度的加权系数, 且

$$k_{m,n} = \frac{\rho_{mn} - \rho_{mn}'}{\zeta \cdot \rho_{i,j}} = \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{y'_{mn} - y''_{mn}}{y_j} = \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{y'_{mn} - y''_{mn}}{(j - 0.5) \cdot dy} \quad (11)$$

式(10)表明: 在曝光时间内, 像元点  $(i, j)$  的灰度值是模糊路径各像元灰度值的加权叠加.

为了确定模糊路径以及加权系数, 考虑到辐射状模糊主要发生在径向, 因此, 不失一般性, 我们可以第一象限为例进行分析:

模糊路径是从  $(i, j)$  点指向坐标原点且长度  $\Delta\rho_{i,j} = \rho_{i,j}\zeta$  的线段. 若设  $dy/dx = k$ , 则过  $(x_i, y_j)$  的模糊路径方程可写为  $y = kx(j - 0.5)/(i - 0.5)$ , 其与  $x = tdx (t = i - 1, i - 2, \dots, 1)$  的交点  $[tdx, (j - 0.5)tdy/(i - 0.5)]$  距  $(x_i, y_j)$  的垂直距离  $\Delta y_t = (j - 0.5)dy - (j - 0.5)tdy/(i - 0.5) = (j - 0.5)(i - 0.5 - t)dy/(i - 0.5)$ ; 将  $(x_i, y_j)$  到  $y = sdy (s = j - 1, j - 2, \dots,$

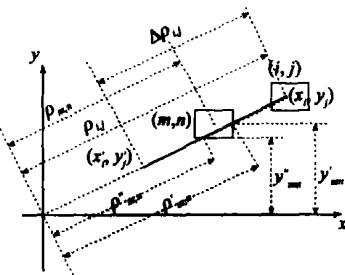


图 7 模型参数图示

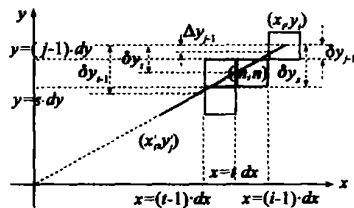


图 8 模糊路径过像素图

1) 的垂直距离定义为  $\delta y_s$ , 即  $\delta y_s = y_j - sdy$ . 设  $m(1) = i, n(1) = j, t = i - 1, s = j - 1$ , 通过分析比较  $\Delta y_t$  与  $\delta y_s$ , 可确定模糊路径进入下一个像元 (即  $[m(q+1), n(q+1)]$ , 如图 8) 的类型.

- 当  $\Delta y_t < \delta y_s$  时,  $m(q+1) = m(q) - 1, n(q+1) = n(q)$ , 像元左移,  $t = t - 1$ , 且  $y''_{mn} = (j - 0.5)tdy/(i - 0.5)$ , 进行下轮比较;

- 当  $\Delta y_t > \delta y_s$  时,  $m(q+1) = m(q), n(q+1) = n(q) - 1$ , 像元下移,  $s = s - 1$ , 且  $y''_{mn} = [n(q) - 1]dy$ , 进行下轮比较;

- 当  $\Delta y_t = \delta y_s$  时,  $m(q+1) = m(q) - 1, n(q+1) = n(q) - 1$ , 像元向左下移,  $t = t - 1, s = s - 1$ , 且  $y''_{mn} = [n(q) - 1]dy$ , 进行下轮比较;

循环直至模糊路径的端点  $(x'_i, y'_j)$ , 即模糊路径经历的最后一像元  $[m(q_0), n(q_0)]$ , 其中  $\text{Int}[x]$  为  $x$  取整函数

$$m(q_0) = \text{Int}[\zeta(i - 0.5) + 0.5], n(q_0) = \text{Int}[\zeta(j - 0.5) + 0.5]$$

将对应以上三种情况下的  $y''_{mn}$  的值代入式(11), 求出加权系数  $k_{m,n}$  值

$$k_{m,n} = \begin{cases} \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{y'_{mn} - (n(q) - 1)dy}{(j - 0.5)dy}, & \Delta y_t \geq \delta y_s \\ \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{y'_{mn} - (j - 0.5)tdy/(i - 0.5)}{(j - 0.5)dy}, & \Delta y_t < \delta y_s \end{cases} \quad (12)$$

#### 4 一种辐射状退化图像的复原算法

显然, 图像的辐射状模糊将减小系统的有效观察视场, 影响对目标的搜索、探测和识别. 因此, 研究快速有效的复原处理算法具有重要的意义. 虽然已有许多有效的图像复原处理算法, 但由于图像退化过程的特殊性, 目前尚未有针对辐射状模糊图像的有效复原算法.

根据图像退化模型, 可以沿着图像降质的逆过程进行图像的复原处理. 同理, 仍取第一象限进行讨论, 式(10)可归结为一个大型方程组, 写成矩阵形式为

$$U = HV \quad (13)$$

式中,  $U = [u(k)]^T$  和  $V = [v(k)]^T$  是长度为  $MN$  的列向量;  $H = [h(l, p)]$  为  $(MN) \times (MN)$  的矩阵; 向量和矩阵的分量分别定义为

$$u(k) = g(i, j), v(k) = f(i, j), k = (M - i)N + N + 1 - j \quad (14)$$

$$h(l, p) = \begin{cases} k_{m(q), n(q)}, l = (M - i)N + N + 1 - j, \\ p = [M - m(q)]N + N + 1 - n(q) \\ 0, \text{ other} \end{cases} \quad (15)$$

可以看出:  $H$  为上三角矩阵.

复原处理是在已知  $g(i, j)$  和由  $k_{i,j}, \dots, k_{m,n}$  组成的矩阵  $H$  的条件下, 求解原图像  $f(i, j)$ . 由于位于图像中心的像素退化前后的灰度值保持不变, 即  $f(M, N) = g(M, N)$ , 理论上由此为出发点, 可依次递推求出  $f(i, j)$ . 但是通过模拟仿真表明:  $H$  矩阵为一大型病态稀疏矩阵, 随着图像像素数的增加, 不仅处理时间增长, 而且由于舍入误差和病态方程的影响, 会使图像产生一定的失真.

考虑到病态方程降低条件数方法复杂性, 特别是会损失系数矩阵稀疏性及三角性, 因此进一步的求解方法需要深入

的研究. 我们研究提出了一种较为简单的复原处理算法, 回避了直接求解病态方程. 对于像素数较多的图像, 首先对图像进行隔行隔列采样处理, 使其变成像素数较少的图像, 进行方程组的求解, 然后, 再与图像直接复原的图像进行综合, 即用小图像复原的结果修正直接复原图像的失真部分, 从而可尽量消除图像的失真部分.

## 5 实验结果及分析

根据退化模型, 我们对多种图像进行了辐射状模糊退化的模拟. 图 9 给出某场景对应  $\zeta = 0.1, 0.2, 0.3$  时的退化模拟图像, 可以看出:

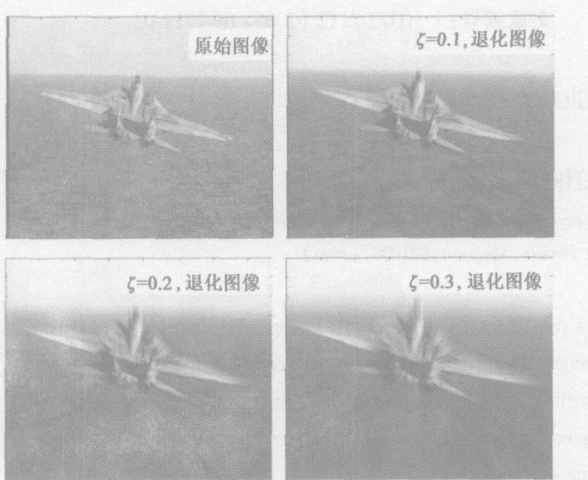


图 9 相对运动退化图像的仿真

(1) 按模型模拟的退化图像与实际物理模糊的趋势或现象一致, 说明模型的有效性; (2) 随着  $\zeta$  的加大, 图像辐射状模糊效果渐趋明显, 有效视场明显减小; (3) 在  $\zeta = 0.1$  时, 视场中央图像的模糊尚不明显; 但当  $\zeta \geq 0.2$  后, 辐射状模糊已非常明显. 利用图 3 的曲线可以对实际应用系统的图像模糊程度进行估计.

图 10 给出某场景红外图像在  $\zeta = 0.2$  的仿真模糊图像及用本文方法的复原图像, 可以看出: 复原算法取得了一定的复原效果.



图 10  $\zeta=0.2$  时相对运动退化红外图像的仿真与复原

## 6 结束语

本文研究了目标与成像系统相向运动所形成辐射状图像模糊的机理, 建立了图像退化模型. 模拟的模糊图像从中心向外呈辐射状, 距离中心越远的像元模糊越严重, 使系统有效视场减少, 这与实际成像过程的情况是一致的, 这种辐射状图像模糊将影响成像系统对目标的探测、识别和跟踪.

在高速成像制导中, 成像系统除产生目前普遍关注的气动光学现象<sup>[7]</sup>外, 辐射状图像模糊也是面临的一个重要问题. 此外, 在成像式引信的交汇过程也存在类似问题. 因此, 辐射

状图像模糊已成为一类实用的图像退化模式. 在实际应用中, 通过高帧频或电子快门等技术虽然可减小模糊程度, 但系统灵敏度及作用距离也将受到明显的影响, 因此, 这里存在一个综合平衡的问题. 显然, 如果能在图像模糊机理的研究基础上, 提出适宜的图像复原处理算法, 对于提高成像系统的性能具有重要意义. 因此, 本文也初步提出了一种辐射状模糊图像的复原算法, 并取得一定的效果, 但算法及其稳定性、适应性等均需要进一步的考察, 有关的研究将在后续的文章中给出.

## 参考文献:

- [1] Hanyu Hong, Tianxu Zhang. Fast restoration approach for rotational motion blurred image based on deconvolution along the blurring paths[J]. Opt Engng, 2003, 42(12): 3471-3486.
- [2] Hu Haigen. Arithmetic research of blurred image restoration about relative motion[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2003, 20(5): 136-138.
- [3] 王旭辉, 郭光亚. 二维均速运动模糊图像恢复问题的研究[J]. 计算机应用, 2000, 20(10): 25-28.  
Wang Xuhui, Guo Guangya. Research of restoration of photographs blurred by uniform planar image motion[J]. Computer Applications, 2000, 20(10): 136-138. (Chinese Source)
- [4] Boris Likhterov, Norman S Kopeika. Motion blurred image restoration using modified inverse all pole filters[J]. Proc SPIE, 2002, 4790: 56-62.
- [5] Cao Fengmei. The camera's Zoom's Influences to the CCD Detector's Imaging Quality[A]. Investigations Photonics Asia[C]. Shanghai: IPA, 2002, 4925: 476-481.
- [6] Быков Р. Е., Цао Ф. Разрешающая способность оптико-электронных преобразователей в режиме ма сшабирования изображения[J]. Оптический журнал, 2002, 69(8): 43-46.
- [7] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.  
Yin Xingliang. Principle of Pneumatic Optics[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2003. (Chinese Source)

## 作者简介:



黄 飞 男, 1982 年出生于河南, 2002 年获北京理工大学工学学士学位, 同年保送为北京理工大学光电工程系攻读硕士学位, 现为北京理工大学信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和光电成像等.

E-mail: huangfei\_82@163.com.



金伟其 男, 1961 年出生于云南省, 1982 年北京工业学院光电工程系毕业, 1990 年获理工大学工学博士学位, 现为北京理工大学教授, 博士生导师, 曾获国家科技进步二、三等奖和多项部级科技进步奖, 发表学术论文 100 余篇, 主要从事夜视与红外技术、光电检测技术、图像处理技术和电子光学等教学和科研工作.