

改进的混合 MAP-POCS 超分辨率图像复原算法研究

绍乐图^{1,2}, 陈晨³, 张红刚¹, 张国华¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;
2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 3. 空装重点型号部, 北京 100843)

摘要: 超分辨率图像复原技术在不改变硬件的条件下可提高成像系统获取图像的分辨率。研究了图像退化机理, 建立了精确的图像退化过程模型, 提出一种改进的混合 MAP-POCS 复原算法, 将 POCS 的凸集约束条件加入到 MAP 估计过程中。运用峰值信噪比 (PSNR) 等评价手段对复原图像进行质量评价。仿真结果表明, 改进的混合复原算法能够有效地保证复原求解的收敛性并保持复原图像的边缘细节, 提升了超分辨率的复原效果。

关键词: 图像复原; 图像处理; 超分辨率复原; 退化模型; 凸集投影

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0041-05

An Improved Hybrid MAP-POCS Algorithm for Super-Resolution Image Restoration Research

SHAO Le-tu^{1,2}, CHEN Chen³, ZHANG Hong-gang¹, ZHANG Guo-hua¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 2. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China; 3. Air Force Armament Department, Beijing 100843, China)

Abstract: Super-resolution image restoration technique can increase the resolution of the obtained images without altering the system hardware conditions. The image degradation mechanism is studied, and a precise image degradation process model is established. Then, an improved hybrid MAP-POCS restoration algorithm is proposed, which adds the convex set constraints to the MAP estimation process and uses the peak signal to noise ratio (PSNR) to evaluate the recovery image quality. The simulation results show that the improved hybrid algorithm can ensure the convergence stability of the restoration, maintain the edge details of the restored image, and enhance the effect of the super-resolution restoration.

Key words: image restoration; image processing; super-resolution restoration; degradation model; projection onto convex sets

0 引言

超分辨率复原技术可在不改变硬件环境的条件下, 恢复系统截止频率之外的高频信息, 改善图像在欠采样过程中的分辨率下降问题, 消除图像获取过程中的图像降级, 一定程度上突破了成像系统的空间分辨率极限, 满足光电成像系统对高分辨率图像的迫切需求, 已成为遥感探测、军事侦察、公共安全和医学成像等领域的研究热点。超分辨率复原技术起源于 20 世纪 60 年代, 80 年代得到了突破性的发展。文献 [1] 提出了凸集投影 (Projection onto Convex Sets, POCS) 法;

文献 [2] 提出基于外存的策略, 利用层次结构加速 POCS 法的配准过程, 可实现大尺寸遥感图像的复原; 并进一步针对遥感图像降质的因素改进了 POCS 法, 用于单帧图像的上采样, 并采用小波包对图像进行去模糊和去噪处理^[3]; 文献 [4] 针对 POCS 法常存在的 Gibbs 效应问题, 采用方向差分方法得到图像的边缘约束算子, 并将其融入到 POCS 的迭代过程中, 对残差阈值和点扩散函数进行修正, 有效抑制了 Gibbs 效应。最大后验概率 (Maximum a Posteriori, MAP) 法是基于贝叶斯原理的统计复原方法中的典型代表。文献 [5] 基于 Huber-Markov 图像先验模型, 提出一种基于多尺度边缘保持正则化的 MAP 算法; 文献 [6] 基于 Gaussian-MRF 图像先验模型, 提出一种联合估计帧间位移和高分辨率图像的预估计混叠度 MAP 算法; 文献 [7] 将基

收稿日期: 2014-05-20

修回日期: 2014-07-09

作者简介: 绍乐图 (1989—), 男, 蒙古族, 内蒙古包头人, 硕士生, 研究方向为光学与精密仪器。

于 Huber-Markov 先验模型的算法成功应用到了遥感图像的复原;文献[8]利用基于 Huber-Markov 先验模型的 MAP 法实现图像的频谱外推,然后根据成像模型对得到的频率分量进行频域校正,去除了调制传递函数过零点附近的伪信息。本文针对两种算法的优缺点进行了相应的改进:建立精确的退化过程模型,给出精确的退化函数模型;改进 POCS 法和 MAP 法,使之有机融合,结合两者的优点,提高了复原效果。

1 图像退化模型

光电成像系统实际成像过程中,由于大气湍流的扰动、光学系统的像差和衍射极限、目标与成像系统间的相对位移、成像器件和电子线路的非理想特性等因素的影响,图像质量产生不同程度的下降,造成图像模糊和噪声污染,降低了图像的分辨率,这个过程称为图像的降质或退化。对此过程进行建模分析,得到图像退化的模型,如图 1 所示。

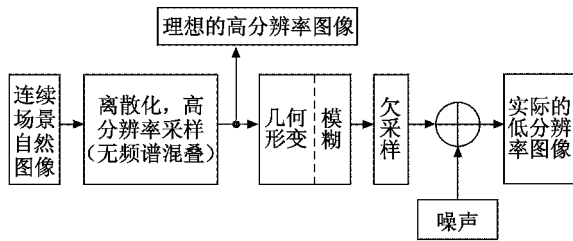


图 1 图像退化模型

Fig. 1 The image degradation process model

模型经空域离散化后,对于同一场景的 k 幅低分辨率图像,可由一幅高分辨率图像经过一系列的降质过程产生,包括几何运动、模糊、降采样和噪声等,可表示为

$$y_k = DB_k M_k s + n_k \quad 1 \leq k \leq p \quad (1)$$

式中:高分辨率图像 s 按辞书式排列表达为向量形式,大小为 $L_1 L_2 N_1 N_2 \times 1$,低分辨率序列图像同样按辞书式排列为向量形式,大小为 $N_1 N_2 \times 1$, L_1 和 L_2 为降采样因子;几何运动矩阵 M_k 的大小为 $L_1 L_2 N_1 N_2 \times L_1 L_2 N_1 N_2$;模糊矩阵 B_k 的大小为 $L_1 L_2 N_1 N_2 \times L_1 L_2 N_1 N_2$;降采样矩阵 D 的大小为 $(N_1 N_2)^2 \times L_1 L_2 N_1 N_2 \times L_1 L_2 N_1 N_2$ 。

2 改进的混合MAP/POCS 超分辨率复原算法

基于集合理论的凸集投影法是指,将待恢复的高分辨率图像 f 看作希尔伯特空间中的一个元素, m 个先验知识或约束对应着 m 个封闭的凸集 C_i ,封闭凸集与它们各自的投影算子 P_i 产生投影序列

$$f_{k+1} = P_m P_{m+1} \cdots P_1 f_k \quad k=1,2,\dots,m \quad (2)$$

假设退化函数 h 和噪声过程的统计特性是已知的,对于退化图像的每个像素可以定义下列的封闭凸集数据一致性限制条件,即

$$C_{x,y,i,k} = \{f_i(x,y) | r_k^f(x,y) \leq \delta_0\} \quad (3)$$

式中,

$$r_k^f(x,y) = g_k(x,y) - \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) h(x,y) \quad (4)$$

参数 δ_0 是反映统计置信度的先验边界, $h(x,y)$ 为退化函数,包含了几何形变、模糊、欠采样等退化过程,为使运算求解过程简单,一般表示为二维高斯函数,即

$$h(x,y) = C \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中: C 为常数; (x_0, y_0) 为退化函数作用于图像的中心点坐标。则高分辨率图像上的一点 $f_k(x,y)$ 在集合 $C_{x,y,i,k}$ 上的投影为

$$P_m[f(x,y)] = f_k(x,y) + \begin{cases} r_k^f(x,y) - \delta_0 & r_k^f(x,y) > \delta_0 \\ \sum_i \sum_k h^2(x,y) & \\ 0 & -\delta_0 < r_k^f(x,y) < \delta_0 \\ r_k^f(x,y) + \delta_0 & r_k^f(x,y) < -\delta_0 \\ \sum_i \sum_k h^2(x,y) & \end{cases} \quad (6)$$

POCS 法使用灵活,不仅可以引入上述的数据一致性凸集约束,还可以引入幅度约束、能量约束、边界约束等来进行超分辨率图像复原。但 POCS 法对初始值的选取依赖性很大,收敛稳定性不高,往往得到的是局部最优解而非全局最优解。所以对初始参考帧的构造就显得尤为重要,现有文献中对混合 MAP-POCS 法初始值的构造往往采用双线性插值法,并非是因为双线性插值法性能良好而是因其实现简单,可适当地简化运算。

本文采用分形插值法^[9]对初始参考帧进行构造。分形考虑了局部和整体的关系,反映了自然事物的特性。分形插值实质上是递归中点位移的过程,假设 $i=0,1,\dots,M, j=0,1,\dots,N$,当 i,j 为偶数时, $B_H(i,j)$ 为给定的取样点。当 $B_H(i,j)$ 均为奇数时

$$B_H(i,j) = \frac{1}{4} \{B_H(i-1, j-1) + B_H(i+1, j-1) + B_H(i+1, j+1) + B_H(i-1, j+1)\} + \sqrt{1-2^{2H-2}} \|\Delta x\| \cdot H \cdot \sigma \cdot G \quad (7)$$

当 $B_H(i,j)$ 有且只有一个为奇数时

$$B_H(i,j) = \frac{1}{4} \{B_H(i, j-1) + B_H(i-1, j) + B_H(i, j+1) + B_H(i+1, j)\} + 2^{-H/2} \sqrt{1-2^{2H-2}} \|\Delta x\| \cdot H \cdot \sigma \cdot G \quad (8)$$

式中: G 为服从 $N(0,1)$ 为分布的 Gaussian 随机变量; $\|\Delta x\|$ 为样本间距; H 为分形布朗运动的 Hurst 变量; $\sigma^2 = E\{|B_H(X+1) - B_H(X)|^2\}$,为分形布朗运动第一阶增量的方差。

分形插值充分考虑了图像的纹理特征,尽量描述随机的图像特征,可获得保持原纹理特征的图像,便于在边缘保持上进行优化,与传统的插值方法相比较具

有较少的块状马赛克效应。

MAP 法是将超分辨率复原问题看作一个统计估计问题,在已知低分辨率图像的前提下,使出现高分辨率图像的后验概率最大。根据贝叶斯原理有

$$P(z/y) = \frac{P(y/z)P(z)}{P(y)} \quad (9)$$

式中: $P(y/z)$ 为已知高分辨率图像的前提下,低分辨率图像产生的条件概率; $P(z)$ 和 $P(y)$ 分别表示高分辨率图像和退化图像的先验概率。将最优估计问题简化得到

$$z = \arg \max \{ \lg [P(y/z)] + \lg [P(z)] \} \quad (10)$$

要求最优解,需确定先验概率 $P(z)$ 和 $P(y/z)$ 条件概率。条件概率项通常采用高斯模型

$$P(y/z) = \frac{1}{(2\pi)^{PM/2} \sigma_n^{PM}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{m=1}^{PM} (y_m - \sum_{r=1}^N W_{m,r}(s)z_r)^2 \right\} \quad (11)$$

现有 MAP 法中常用的模型为 Gibbs 模型, Gauss-Markov 模型和 Huber-Markov 模型。Gibbs 模型是基于格子领域系统的随机场模型,描述一个质点的局部统计特性和该随机场的联合统计特性,表达较为简洁; Gauss-Markov 随机场模型通过定义领域系统的能量函数来表达领域系统的结构信息,现有混合 MAP-POCS 算法多采用该随机场模型进行运算求解,但 Gauss-Markov 随机场模型易过度平滑解从而导致细节部分的丢失。本文采用 Huber-Markov 随机场模型,使得对图像的平滑约束能力和降噪能力达到一个较好的平衡点,避免了解的过度平滑导致细节的损失使超分辨率复原效果下降。基于 Huber-Markov 随机场的图像概率密度函数表示为

$$P(Z = z) = \frac{1}{K} \exp \{ -U(z) \} = \frac{1}{K} \exp \left\{ -\sum_{c \in S} \varphi_c(d'_c x) \right\} \quad (12)$$

式中: K 为归一化常数; $U(x)$ 为能量函数; c 为图像中的“簇”; S 为簇的集合。 $\varphi_c(x)$ 为一个标量惩罚函数,其定义为

$$\varphi_c(x) = \begin{cases} x^2 & |x| \leq T \\ T^2 + 2T(|x| - T) & |x| > T \end{cases} \quad (13)$$

式中, T 为一个固定阈值,合适的 T 可对平滑度进行区分,避免边缘信息过度模糊。

融合算法最早由 Schultz 提出,对 MAP 的代价函数进行优化时,引入投影限制^[10];文献[11]在此基础上,将概率统计法和 POCS 法相结合,给出优化函数为

$$\min \varepsilon^2 = \{ [y_k - W_k z]^T R_n^{-1} [y_k - W_k z] + \alpha [Lz]^T V [Lz] \} \quad (14)$$

式中: R_n 为噪声的自相关系数; L 为拉普拉斯算子; V 为加权矩阵。该算法是通过 MAP 估计求得凸集所对应的投影算子,然后使用 POCS 算法将所求的投影算

子作用到初始估计的高分辨率图像上,进行约束求解,得到最终复原的高分辨率图像。上述算法是在限制凸集里最小化 MAP 的代价函数,相当于将 MAP 作为约束加入到 POCS 算法当中,只是对 MAP 和 POCS 的孤立使用,并不能有效地发挥 MAP 法的收敛稳定性和 POCS 法的边缘保持能力。

本文结合改进的 POCS 法和 MAP 法,将 POCS 的凸集约束加入到 MAP 的估计过程中,在统筹到全局信息的同时兼顾到图像的细节信息,即 MAP 算法对整幅图像的全局残差进行约束,而 POCS 算法是对每个像素进行约束,避免了两种算法的孤立使用,实现了算法的优缺点互补,改进的混合 MAP/POCS 法为

$$f_{\text{MAP-POCS}} = \arg \min \left\{ \frac{1}{2\sigma^2} (Y - HX)^2 + \frac{1}{2\lambda} \sum_{N_r} \left(\sum_{j=1}^N d_{i,j} x_j \right)^2 + \frac{1}{2\lambda} \sum_{N_r'} [T^2 + 2T(|d'_i| - T)] \right\} \quad r^{(x)} \leq |\delta_0| \quad (15)$$

复原图像的质量采用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)评价,定义两个信号 X, Y 的均方差(Mean Square Error, MSE)为

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| X_i - Y_i \|^2 \quad (16)$$

式中, n 为信号的长度。则峰值信噪比定义为

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left(\frac{\max X}{\sqrt{E_{\text{MSE}}}} \right) \quad (17)$$

3 实验仿真

仿真采用大小为 512×512 的原始高分辨率 lena 图像,经过高斯模糊($\sigma = 5$)和加高斯噪声(均值为 0,方差为 0.005),对图像进行 2 倍降采样处理,仿真退化过程如图 2 所示。

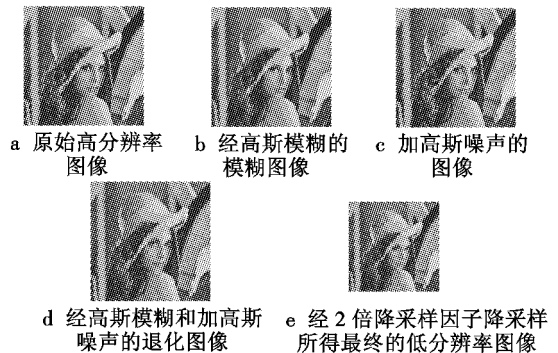


图 2 图像退化过程的仿真

Fig. 2 Simulation of the image degradation process

根据上述原理,本文改进的算法执行步骤如下所述:1)对低分辨率图像进行分形插值构造初始参考图像;2)根据初始参考图像和先验模型施加 POCS 数据一致性约束;3)根据图像的先验模型确定目标方程 $f(X)$;4)求得目标方程的负梯度 $-\nabla f(X)$;5)采用变

步长 β , 使 $f(X_{k+1}) < f(X_k)$; 6) 计算 $X_{k+1} = X_k + \beta(b - TX_k)$; 7) 若 $|r^{(X)}| \leq \delta_0$, 则结束, 否则执行步骤 2)。

对于迭代步长, 变步长相较于固定步长可使迭代过程收敛到全局最优, 相较于最优步长可以加快计算收敛速度, 但需要说明的是, 改进的混合 MAP-POCS 算法虽然结合了两种算法的优点, 进行了互补, 同时也继承了两种算法计算慢的特点。

为了对本文的算法进行比较, 对图 2e 低分辨率图像同时使用不同的超分辨率算法, 仿真结果如图 3 所示。图 3 中的 a ~ f 分别为双立方插值法、维纳滤波法、文献[4]提出的 POCS 法、文献[10]提出的 MAP 法、文献[11]提出的混合 MAP-POCS 法和本文提出的改进混合 MAP-POCS 算法的复原效果图; a' ~ f' 分别为各自复原图像的傅里叶频谱图。

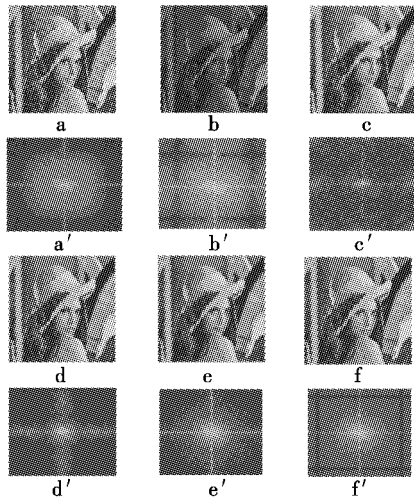


图 3 不同算法的实验仿真结果

Fig. 3 The simulation of different restoration algorithms

采用峰值信噪比对复原图像进行客观质量评价, 计算结果如表 1 所示。

表 1 不同算法的 PSNR

Table 1 The values of PSNR in different algorithms

	双立方插值法 (Bicubic)	维纳滤波法 (Wiener)	凸集投影法 (POCS)
PSNR	19.031 2	17.887 2	19.405 2
	最大后验概率法 (MAP)	文献[11]的混合 MAP-POCS 法	本文改进的混合 MAP-POCS 算法
PSNR	20.660 6	20.713 7	21.497 2

依据主观质量评价, POCS 算法具有较强的边缘保持能力, 但去噪能力不强; 而 MAP 算法具有较好的降噪效果, 但边缘细节具有较明显的锯齿效应; 文献[11]提出的混合 MAP-POCS 法虽一定程度上互补了两者的优缺点, 但相对孤立的融合使得复原图像并没有获得良好效果; 而本文提出的算法在有效融合两种算法的基础上获得了较好的复原效果。傅里叶频谱图也显示

出本文的算法复原了图像丢失的部分高频信息, 增强了边缘细节的保持能力, 同时对噪声的抑制效果也较明显。依据客观质量评价, 本文提出的改进混合算法具有较大的峰值信噪比, 表示复原效果较好。

为进一步说明本文算法的有效性, 对某地区的航拍图像进行处理, 实际图像的复原效果图如图 4 所示。

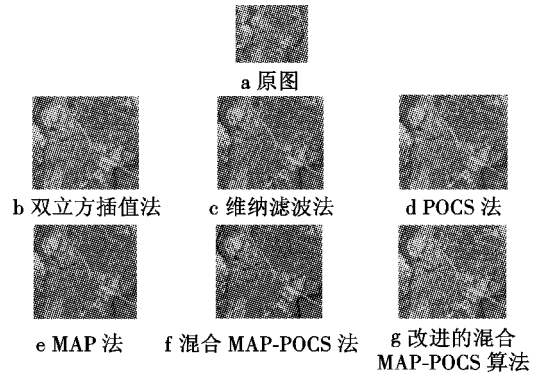


图 4 实际图像复原对比图

Fig. 4 The contrast of the actual image restoration

从图中可以得出, 本文提出的改进混合算法对实际图像具有较好的处理效果, 地物细节表现得更加清晰明显。

4 结论

在对成像过程建立精确的退化模型的基础上, 提出改进的混合 MAP-POCS 超分辨率复原算法, 采用分形插值法构造初始参考图像, 提高了复原求解过程的收敛稳定性, 采用 Huber-Markov 随机场模型作为先验概率模型, 利用 Huber 函数取得降噪平滑和边缘保持的平衡, 对复原过程施加了较强的约束, 保证了图像复原的质量。该算法将 MAP 算法较强的降噪能力和唯一解等优点与 POCS 算法灵活、方便、有较强的边缘保持能力和先验知识利用能力的优点相结合。通过对仿真图像和实际图像的处理表明, 该算法具有较强的超分辨率复原能力, 对经模糊和噪声污染的图像有较好的复原效果。

参考文献

- [1] STARK H, OSKOU P. High resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projections [J]. Optics and Image Science, 1989, 6(11): 1715-1726.
- [2] 张砚, 徐昆, 李勇. 基于外存和凸集投影法的遥感图像超分辨率方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(10): 1743-1746, 1756. (ZHANG Y, XU K, LI Y. Remote sensing image super-resolution based on POCS and out-of-core [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(10): 1743-1746, 1756.)

- [3] 张砚,李先颖,满益云. 基于凸集投影法和复数小波包域的遥感图像上采样研究[J]. 计算机学报,2011,34(3):482-488. (ZHANG Y, LI X Y, MAN Y Y. Remote sensing images upsampling based on projection onto convex sets and complex wavelet packet transfer[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(3):482-488.)
- [4] 杨欣,唐庭阁,费树岷,等. 基于投影修正和 POCS 的图像超分辨率重建[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2013,34(5):564-568. (YANG X, TANG T G, FEI S M, et al. Image reconstruction with super-resolution based on projection modification and POCS[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2013, 34(5):564-568.)
- [5] 张新明,沈兰荪. 基于多尺度边缘保持正则化的超分辨率复原[J]. 软件学报,2003,14(6):1075-1081. (ZHANG X M, SHEN L S. Super-resolution restoration with multi-scale edge-preserving regularization[J]. Journal of Software, 2003, 14(6):1075-1081.)
- [6] 孟庆武. 预估计混叠度的 MAP 超分辨率处理算法[J]. 软件学报,2004,15(2):207-214. (MENG Q W. An aliasing degree pre-estimated MAP algorithm of super-resolution processing[J]. Journal of Software, 2004, 15(2):207-214.)
- [7] 徐鹏宇,傅山. 基于 HMRF 先验模型的超分辨率重建[J]. 计算机工程,2009,35(17):213-214,216. (XU P Y, FU S. Super resolution reconstruction based on HMRF prior model[J]. Computer Engineering, 2009, 35(17):213-214,216.)
- [8] 王静,章世平,孙权森,等. 基于 MAP 估计的遥感图像频域校正超分辨率算法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2010,40(1):84-88. (WANG J, ZHANG S P, SUN Q S, et al. MAP based remote sensing image super-resolution with frequency domain correction[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(1):84-88.)
- [9] HONDA H, HASEYANA M, KITAJIMA H. Fractal interpolation for natural images[C]//International Conference on Image Processing, 1999,657-661.
- [10] SCHULTZ R R, STEVENSON R L. Extraction of high-resolution frames from video sequences [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(6):996-1011.
- [11] ELAD M, FEUER A. Restoration of a single super-resolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12):1646-1658.
- (上接第 40 页)
- [9] 孙福明,吴秀清,祁凯. 基于当前统计模型的自适应强跟踪算法[J]. 数据采集与处理,2008,23(2):191-195. (SUN F M, WU X Q, QI K. Adaptive strong tracking algorithm based on current statistical model[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2008, 23(2):191-195.)
- [10] 刘建书,李人厚,刘云龙. 基于“当前”统计模型的交互式多模型算法[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(7):1351-1354. (LIU J S, LI R H, LIU Y L. Interacting multiple model algorithm based on the current statistical model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(7):1351-1354.)
- [11] 钱广华,李颖,骆荣剑. 机动目标跟踪中一种机动频率和方差自适应滤波算法[J]. 雷达学报,2013,2(6):258-264. (QIAN G H, LI Y, LUO R J. One maneuvering frequency and the variance adaptive filtering algorithm for maneuvering target tracking[J]. Journal of Radars, 2013, 2(6):258-264.)
- [12] 姜伟,吕泽均,蓝瑶. 基于变维交互作用的 IMM-CKF 算法[J]. 计算机应用与软件,2013,30(5):4-6. JIANG W, LÜ Z J, LAN Y. IMM-CKF algorithm based on variable dimension interaction [J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(5):4-6.)
- [13] 郑作虎,王首勇,万洋. 一种参数自适应调整的机动目标跟踪模型[J]. 空军雷达学院学报,2011,2(4):113-116. (ZHENG Z H, WANG S Y, WAN Y. Model of maneuvering target track with adaptive parameter adjustment[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2011, 2(4):113-116.)
- [14] 刘玉磊,冯新喜,叶杨,等. 改进的“当前”统计模型自适应跟踪算法[J]. 科学技术与工程,2013,22(8):6464-6469. (LIU Y L, FENG X X, YE Y, et al. Improved current statistical model and adaptive tracking algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 22(8):6464-6469.)

欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>