

引用格式:宋睿,张合新,孟飞,等.激光主动成像制导图像去噪算法研究[J].电光与控制,2017,24(10):7-11,26. SONG R, ZHANG H X, MENG F, et al. On denoising algorithm for laser active imaging guidance[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):7-11, 26.

激光主动成像制导图像去噪算法研究

宋睿, 张合新, 孟飞, 吴玉彬, 宫梓丰
(火箭军工程大学控制工程系, 西安 710025)

摘要:快速有效地对所获图像进行去噪是提高激光主动成像制导精度的关键一步。针对成像中的散斑噪声,提出了一种改进的小波阈值与基于积分图像的非局部均值滤波相结合的去噪算法。首先对激光主动成像图像进行噪声分析;然后通过对数变换将乘性噪声转换为加性噪声;而后将含噪图像进行两层小波分解,在第一层高频部分运用改进的小波阈值法,在第二层高频部分运用基于积分图像的非局部均值滤波算法进行去噪;最后进行相应的逆变换得到去噪图像。理论分析和实验结果证明,该算法能有效去除噪声,较好地保证了图像细节,并且满足激光主动成像制导对图像去噪实时性的要求。

关键词:激光主动成像制导;小波阈值去噪;非局部均值滤波;积分图像;图像去噪

中图分类号:TN751 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.002

On Denoising Algorithm for Laser Active Imaging Guidance

SONG Rui, ZHANG He-xin, MENG Fei, WU Yu-bin, GONG Zi-feng
(Department of Automation, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Fast and effective image denoising is critical for improving the accuracy of laser active imaging guidance. Focusing on the speckle noise in imaging, a denoising algorithm based on the combination of improved wavelet threshold denoising algorithm and integral image based non-local means filtering is proposed. Firstly, noise analysis of laser active imaging is performed. Secondly, speckle noise is converted from multiplicative noise to additive noise by logarithmic transform. Then, the image is decomposed into two layers by wavelet transform; the improved wavelet threshold denoising algorithm is used for the high-frequency part of the first layer, and non-local means filtering is used for the high-frequency part of the second layer. Finally, inverse transforms are carried out and the denoised intensity image is obtained. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed algorithm has fine denoising performance and the details of image are well protected. Meanwhile, the proposed algorithm meets the requirements of laser active imaging guidance for real-time image denoising.

Key words: laser active imaging guidance; wavelet threshold denoising; non-local means filtering; integral image; image denoising

0 引言

激光主动成像制导是指利用武器自身携带的激光照射器对目标进行照射,由安装在同一武器上的激光接收装置对接收到的回波信号进行处理,并与预先存放在武器系统中的目标基准信息进行实时匹配,然后推算出导弹武器相对于目标的方向与位置,形成制导

指令,控制武器精确命中目标。

激光主动成像制导能够同时获得目标的距离图像和强度图像等特征信息,同时具备抗干扰能力强、成像精度高、易于与其他制导方式相结合进行复合制导等优势,已经逐步应用于部分导弹武器系统的末段制导环节,必将在未来复杂战场环境中发挥重要作用^[1]。

在目前的运用中,由于受大气环境、背景辐射及激光器自身成像系统设计等因素的影响,激光主动成像图像会不可避免地受到噪声的影响。如何对获取的噪声图像进行快速、有效的去噪,从而获得更为清晰的图像以进行目标识别,是提高制导精度极其重要的一步。

近年来,有学者针对激光主动成像图像提出了许

收稿日期:2017-01-13 修回日期:2017-02-05

基金项目:国家自然科学基金(61203189)

作者简介:宋睿(1993—),男,河南信阳人,硕士生,研究方向为激光主动成像制导目标识别。

多去噪算法,文献[2]提出了一种同态滤波和SURE (Sten's Unbiased Risk Estimation)方法结合的小波域去噪算法;文献[3]提出基于交互技术的降噪方法;文献[4]提出基于同态滤波与双数复值小波变换级联的图像去噪算法;文献[5]提出基于谱域约束的降噪方法;文献[6]提出基于像素点分类的激光主动成像混合滤波;文献[7]提出基于同态滤波和改进阈值整数提升小波变换级联的噪声抑制方法,上述方法均使去噪效果或算法运行效率得到一定提升。考虑到小波分解的多分辨率特性和非局部均值(Non-Local Means, NLM)滤波^[8]良好的去噪效果,本文提出了一种改进的小波阈值法与基于积分图像的NLM滤波相结合的去噪算法。理论分析和实验结果表明,本文方法不仅能对激光主动成像图像进行较好的噪声抑制,而且实时性较好,对于导弹武器系统有着一定的应用价值。

1 激光主动成像图像噪声分析

由于目标表面相对于激光波长而言是凹凸不平的,激光的不同子波在相面上产生干涉,从而形成散斑图样^[9],表现在图像上就是散布在图像中的亮点。有研究表明,散斑噪声是以一种具有负指数分布统计特性的乘性噪声^[2],可以表示为

$$Y = XF \quad (1)$$

式中: Y 是观测到的原始图像信号; X 是无噪信号; F 是散斑作用系数。

由于NLM滤波算法的设计模型是针对加性噪声的,而乘性噪声与图像附着紧密、难以去除,所以本文算法先将含噪图像进行对数变换,从而使乘性噪声转换为易于去除的加性噪声。经对数变换后,图像噪声可表示为

$$\ln Y = \ln(XF) = \ln X + \ln F \quad (2)$$

2 改进的小波阈值去噪

2.1 小波阈值去噪

由于小波变换具有多分辨率特性和在时频域内良好的信号表征能力,因而其被广泛应用于图像去噪,并取得了良好的去噪效果。含噪图像的有用信号和噪声干扰经小波变换后能够表现出不同的统计特性,即含有噪声较多的高频部分和含有有用信号较多的低频部分,其中,高频部分尺寸为原图的3/4,低频部分尺寸为原图的1/4。

小波阈值去噪充分利用有用信号和噪声干扰不同的奇异性,将变换后的小波系数利用阈值函数进行比较和调整,从而筛选出合适的小波信号进行小波逆变换即可获得去噪图像。

传统的小波阈值去噪方法有硬阈值法和软阈值法。硬阈值法是将小于阈值的小波系数全部置零,而大于阈值的小波系数保持不变,即

$$\omega_{\delta} = \begin{cases} \omega & |\omega| \geq \delta \\ 0 & |\omega| < \delta \end{cases} \quad (3)$$

软阈值法是将小于阈值的小波系数全部置零,而大于阈值的小波系数通过与阈值做减法作为新的系数值,表示为

$$\omega_{\delta} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega)(|\omega| - \delta) & |\omega| \geq \delta \\ 0 & |\omega| < \delta \end{cases} \quad (4)$$

式中: δ 为预先设定的阈值; ω 为含噪信号的小波系数; ω_{δ} 为小波阈值去噪后的小波系数; $\text{sgn}(\ast)$ 为符号函数。

观察式(3)、式(4)可知,硬阈值法的阈值函数是不连续的,无法实现高阶可导,经硬阈值法处理过的小波系数对阈值附近的微小变化十分敏感,会使去噪图像中出现振铃、伪吉布斯效应,但硬阈值法边缘保持能力较好^[10];虽然软阈值法的阈值函数相对平滑、连续性较好,但当 $|\omega| \geq \delta$ 时,变换后的小波系数 ω_{δ} 与含噪小波系数 ω 之间存在固有偏差 δ ,这将会影响去噪图像与真实图像的逼近程度,导致图像细节和边缘模糊。

2.2 改进的小波阈值函数

针对硬阈值法、软阈值法存在的缺陷,发现比较合理的阈值函数需满足:1)输入-输出曲线连续,处理时相对平滑,以减少振铃、伪吉布斯效应;2)保持信号的小波系数基本不变,较好地保留图像边缘和细节^[10]。经上述分析,本文提出一种基于对数函数的改进阈值函数,即

$$\omega_{\delta} = \begin{cases} \text{sgn}(\ast) \left(|\omega| - \frac{\ln(\delta+1)}{\ln(|\omega|+1)} \delta \right) & |\omega| \geq \delta \\ 0 & |\omega| < \delta \end{cases} \quad (5)$$

观察式(5)可知,改进的阈值函数高阶可导,不仅继承了软阈值法和硬阈值法的优点,确保了函数的连续性,而且克服了软阈值法在处理过程中小波系数与原系数之间存在固有偏差的缺点,如图1所示。

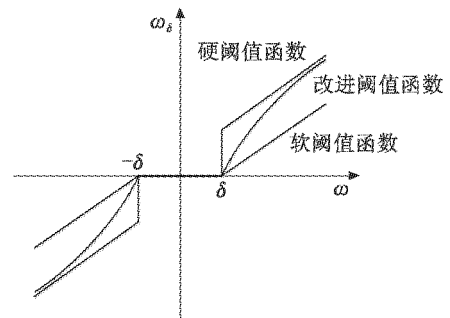


图1 改进的小波阈值函数

Fig. 1 The improved wavelet threshold function

如图1所示,分别做出硬阈值函数、软阈值函数和

本文改进阈值函数的图像,观察可知,改进的阈值函数是一种介于硬阈值法和软阈值法之间的折中,当含噪小波系数 ω 趋于无穷时,该函数趋近于硬阈值法,有利于图像细节和边缘的完整性;而当含噪小波系数 ω 在阈值 δ 附近时,该方法趋于软阈值法,能够克服振铃和伪吉布斯效应等视觉失真。

2.3 小波去噪的阈值选取

阈值 δ 的选取是影响小波阈值去噪效果的另一重要因素。若阈值选取过小,则去噪后的图像仍有噪声;若阈值选取过大,则会出现图像的过平滑,导致图像细节模糊。本文采用 BayesShrink 法自适应选取小波阈值 δ ,即

$$\delta = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x} \quad (6)$$

式中: σ_n 为噪声方差; σ_x 为小波分解后的子带系数标准差。对于式中的 σ_n 可采用 DONOHO^[11] 提出的鲁棒性中值估计,即

$$\sigma_n = \frac{\text{median}(HH_1)}{0.6745} \quad (7)$$

式中, HH_1 为小波分解第一层中对角线方向的小波系数。

采用最大似然估计方法得到每个含噪观测子带系数 $y(i)$ 的方差估计

$$\sigma_y = \frac{1}{n \times n} \sum_i y^2(i) \quad (8)$$

式中, $n \times n$ 是子带尺寸。

由 $\sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma_n^2$ 可得

$$\sigma_x = \sqrt{\max[(\sigma_y^2 - \sigma_n^2), 0]} \quad (9)$$

3 NLM 滤波算法

3.1 原始 NLM 滤波算法

NLM 滤波算法因具有良好的去噪效果,近年来引起了广泛关注和改进^[8]。NLM 滤波算法认为图像中存在大量的冗余信息,一副图像中有许多相似的部分,每个像素都不是孤立存在的,因此每个像素都可以由图像中其他与其相似的像素加权平均求得^[12]。如图 2a 所示,在图像中设定一个以像素 i 为中心的正方形图像块为搜索窗口,设定两个分别以像素 i, j 为中心的正方形图像块 $V(i)$ 和 $V(j)$ 为邻域窗口,用搜索窗口中所有像素来估计像素 i 的值。在算法执行过程中,令邻域窗口 $V(j)$ 在搜索窗口中滑动,从而比较其所在位置像素值与 $V(i)$ 的相似程度,由此来确定像素 j 相对于 i 的相似权值 $\omega(i, j)$ 。邻域窗口 $V(i)$ 可表示为图 2b 形式。

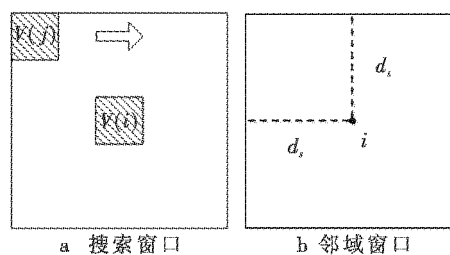


图 2 搜索窗口及邻域窗口

Fig. 2 Search window and neighbourhood window

由以上分析可知,对于任何一个像素 i ,都可以将搜索窗口中所有像素的加权平均作为其估计值,即

$$N_{LM}(i) = \sum \omega(i, j) z(j) \quad (10)$$

式中, $\omega(i, j)$ 为相似权值,表示像素 j 与像素 i 的相似程度。 $\omega(i, j)$ 算式为

$$\omega(i, j) = \frac{1}{C(i)} \exp(-d(i, j)/h^2) \quad (11)$$

式中, $C(i)$ 为归一化函数,即 $C(i) = \sum \exp(-d(i, j)/h^2)$,滤波参数 h 控制指数函数的衰减速度,它的取值与图像的噪声水平有关, $d(i, j)$ 为邻域窗口 $V(i)$ 和邻域窗口 $V(j)$ 之间的欧式距离,用来表征图像块之间的相似程度,即

$$d(i, j) = \|V(i) - V(j)\|_2^2 = \frac{1}{d^2} \sum_{-d_s \leq z \leq d_s} \|v(i+z) - v(j+z)\|_2^2 \quad (12)$$

式中: $v(i+z)$ 和 $v(j+z)$ 分别表示邻域窗口 $V(i)$ 和邻域窗口 $V(j)$ 中对应位置像素点的像素值; $d_s = \frac{d-1}{2}$ 表示邻域窗口一半的边长,用来限定邻域窗口的位置范围。

NLM 滤波算法充分利用了图像中的冗余信息,是一种效果较好的去噪算法,近年来引起广泛的关注和改进,但由于算法执行过程中需要不停地遍历图像以设置新的搜索窗口,并且遍历每个搜索窗口进行邻域窗口间的相似度比较,导致算法运算复杂度高达 $O(m \times n \times d^2 \times D^2)$,不满足激光主动成像制导对图像去噪算法实时性的要求。为了减小运算量,提高算法执行效率,本文考虑引入基于积分图像的 NLM 滤波算法。

3.2 基于积分图像的 NLM 滤波算法

积分图像由 VIOLA P 等人提出,积分图像是用于快速计算图像窗口的灰度值总和或灰度均值的一种图像中间表示^[13]。积分图像上任意一点的值 $I(x, y)$ 表示从积分图像左上角与当前点 (x, y) 所围成的矩形区域内所有像素点的像素值之和。

如图 3 所示,根据积分图像的定义,在积分图像中

计算 S_4 区域的灰度值之和 $S_{AT}(S_4)$ 只需通过简单的代数运算,即

$$S_{AT}(S_4) = I(S_1 + S_2 + S_3 + S_4) + I(S_1) - I(S_1 + S_2) - I(S_1 + S_3) \quad (13)$$

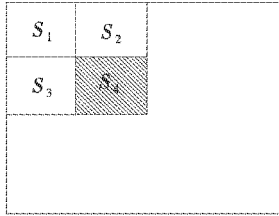


图 3 积分图像灰度值计算示意图

Fig. 3 Calculation of grey value in integral image

积分图像的构造只需将原图像所有像素遍历一遍,因此十分快速便捷,文献[14]提出了一种基于积分图像的 NLM 滤波算法^[14]。设含噪图像尺寸为 $m \times n$,则构造邻域窗口 $V(j)$ 在边长为 D 的搜索窗口中滑动,基于此即可构造关于像素差值的积分图像

$$S(z) = \sum s(z) \quad z = \{(z_1, z_2) | 0 \leq z_1 \leq m, 0 \leq z_2 \leq n\} \quad (14)$$

式中,

$$s(z) = \|v(z) - v(z+t)\|_2^2, \quad (15)$$

$t = j - i, t = \{(t_1, t_2) | -D_s \leq t_1 \leq D_s, -D_s \leq t_2 \leq D_s\}$ 表示像素 j 与像素 i 的位置差, $D_s = \frac{D-1}{2}$ 表示搜索窗口一半的边长,用来限定搜索窗口的位置范围。则邻域窗口 $V(i)$ 和邻域窗口 $V(j)$ 之间的欧式距离即可表示为

$$d(i, j) = \|V(i) - V(j)\|_2^2 = \frac{1}{d^2} (S(i_1 + d_s, i_2 + d_s) + S(i_1 - d_s, i_2 - d_s) - S(i_1 + d_s, i_2 - d_s) - S(i_1 - d_s, i_2 + d_s)) \quad (16)$$

比较式(16)和式(12)可知,在积分图像中计算邻域窗口间的欧氏距离只需简单的数学运算,无需如式(12)遍历整个搜索窗口,极大地减小了算法的运算量,从而提高了相似性权值 $\omega(i, j)$ 的计算效率,使整个算法复杂度降为 $O(m \times n \times D^2)$ 。这种基于积分图像的 NLM 滤波算法是对原始 NLM 滤波算法的加速,实时性的提高为其在激光主动成像制导上的运用创造了条件。

4 本文去噪算法

本文提出一种改进的小波阈值与基于积分图像的 NLM 滤波相结合的去噪算法。算法利用小波变换的多分辨率特性,将图像进行两层小波分解,得到两层含有噪声较多的高频部分和含有有用信号较多的低频部分,通过在第 1 层高频部分运用改进的小波阈值去噪对图像进行初步的噪声抑制,在第 2 层高频部分运用

基于积分图像的 NLM 滤波进行图像“精修”,不仅去噪效果得到提升,而且小波分解带来的图像尺寸的减小和基于积分图像的 NLM 滤波的运用带来的运算加速,能够缩短算法的运算时间。

基于以上分析,本文去噪算法具体实现如下(见图 4):

1) 对含有散斑噪声的激光图像进行对数变换,使得乘性噪声转换为易于滤除的加性噪声;

2) 对含噪图像进行第 1 层小波分解,分别获得第 1 层低频部分和高频部分,对第 1 层高频部分采用改进的小波阈值去噪算法进行处理;

3) 为了去除第 1 层低频部分存在的少量噪声,对第 1 层低频部分再进行一层小波分解,得到第 2 层低频部分和高频部分,此时第 2 层高频部分仅为初始含噪图像尺寸的 $3/16$,对第 2 层高频部分采用基于积分图像的 NLM 滤波算法进行去噪;

4) 对 2) 和 3) 处理后的小波系数进行小波逆变换得到重构图像;

5) 将重构图像进行指数变换,从而获得最终的去噪图像。

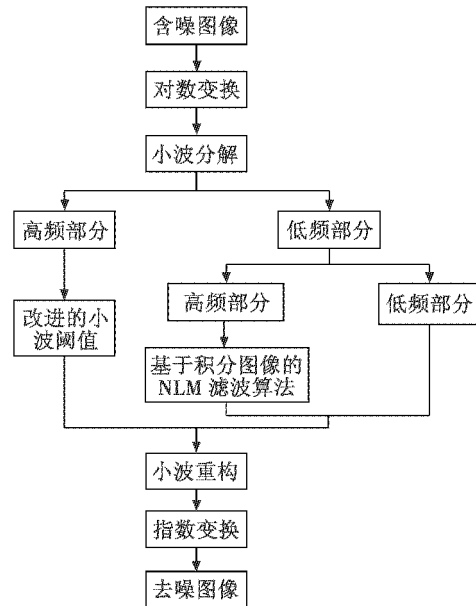


图 4 本文算法流程图

Fig. 4 Flow chart of our algorithm

5 实验仿真与分析

本文使用 Matlab R2013b 软件在 Inter(R) Core (TM) i5-2400 3.10 GHz 2 GB 内存的计算机上进行仿真实验,采用加入散斑噪声的标准图像 House 和 Airport 模拟激光主动成像图像,其中,House 和 Airport 图像尺寸分别为 256×256 和 512×512 。实验中对图像采用 sym4 小波基进行两层图像分解,邻域窗口边长 d

和 D 分别取为 5 和 11, 滤波参数 h 取为 10。用于对比的算法有小波硬阈值法、小波软阈值法、基于积分图像的 NLM 滤波算法及本文算法。

5.1 去噪效果定性比较

图 5a 为 Airport 原图, 图 5b 为噪声方差是 0.04 的含噪图像, 图 5c ~ 图 5f 为 4 种算法对含噪图像的处理效果图。

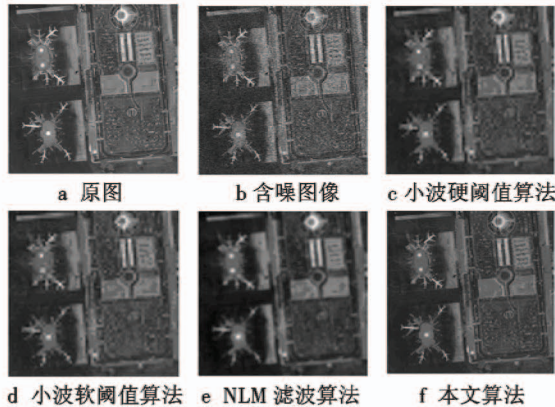


图 5 不同算法去噪效果图

Fig. 5 Results of different denoising algorithms

由图 5 可知, 小波硬阈值法和小波软阈值法去噪效果较差, 处理后的图像还含有较为明显的噪声, 且图像中的线条和纹理分辨效果较差。基于积分图像的 NLM 滤波算法去噪效果较好, 处理后的图像基本没有噪声, 而且细节和轮廓较为明显, 但图像出现过平滑现象, 图像色彩偏暗且图像整体比较模糊。而本文算法继承了小波阈值去噪和 NLM 滤波算法的优点, 不仅去噪效果较好, 而且边缘和细节清晰, 更符合人眼的视觉标准。

5.2 去噪效果定量比较

为了更为客观地描述几种去噪算法的去噪效果, 进行定量比较, 评价标准为峰值信噪比 (PSNR)。对图像加入方差分别为 0.01, 0.04 和 0.07 的散斑噪声, 所得实验结果如表 1 所示。

表 1 不同去噪算法的峰值信噪比 (PSNR) 对比

Table 1 PSNR of different denoising algorithms

图像	σ	小波硬 阈值法	小波软 阈值法	基于积分图像的 NLM 滤波算法	本文算法
House (256 × 256)	0.01	32.26	32.33	48.27	48.13
	0.04	31.91	31.99	48.17	47.78
	0.07	31.75	31.79	48.03	46.65
Airport (512 × 512)	0.01	29.99	30.03	48.26	48.12
	0.04	29.82	30.01	48.14	47.63
	0.07	29.76	29.97	47.86	47.01

由表 1 可知, 本文算法与基于积分图像的 NLM 滤波算法的 PSNR 值大致相当, 但与小波软阈值法和小波硬阈值法相比, 本文算法的 PSNR 值占有绝对优势,

这说明本文算法的去噪效果较好, 与 5.1 节中定性比较的结果一致。

5.3 算法实时性比较

分别用 4 种对比算法对噪声方差为 0.04 的 House 和 Airport 图像进行运算时间比较, 所得结果如表 2 所示。

表 2 不同去噪算法执行时间对比

Table 2 Execution time of different denoising algorithms

图像	小波硬 阈值法	小波软 阈值法	基于积分图像的 NLM 滤波算法	本文算法
House(256 × 256)	0.18	0.20	0.75	0.26
Airport(512 × 512)	0.24	0.31	2.95	0.87

由表 2 可知, 本文算法运算比小波硬阈值法和小波软阈值法稍慢, 而比基于积分图像的 NLM 滤波算法提升较为明显, 能够满足激光主动成像制导对图像去噪算法的实时性要求。

6 结束语

针对激光主动成像制导对图像去噪性能和去噪算法实时性要求高的特点, 提出了一种改进的小波阈值与基于积分图像的 NLM 滤波相结合的去噪算法。这种方法对含噪图像进行对数变换, 将乘性噪声转换为加性噪声, 而后对图像进行两层小波变换, 在第 1 层高频部分运用改进的小波阈值法, 在第 2 层高频部分运用基于积分图像的 NLM 滤波。实验表明, 本文算法能够有效抑制激光主动成像图像噪声, 而且实时性较好。

参考文献

- [1] 李建中, 彭其先, 李泽仁, 等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4):1117-1123.
- [2] 李晓峰, 徐军, 罗积军, 等. 激光主动成像图像噪声分析与抑制[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2):332-337.
- [3] HYENKYUN W, YUN S. Alternating minimization algorithm for speckle reduction with a shifting technique[J]. Image Processing, 2012, 21(4):1701-1714.
- [4] 吴坤, 张合新, 孟飞, 等. 激光主动成像图像噪声抑制方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9):2397-2402.
- [5] 王灿进, 孙涛, 王锐, 等. 基于信号子空间谱域约束的激光主动成像散斑噪声去除[J]. 中国激光, 2013, 40(11):1109001-1-1109001-6.
- [6] 王灿进, 孙涛, 陈娟. 基于像素点分类的激光主动成像混合滤波[J]. 中国激光, 2014, 41(3):0309001-1-0309001-7.
- [7] 张合新, 王强, 张腾飞, 等. 激光主动成像图像噪声抑制算法研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(11):52-56.

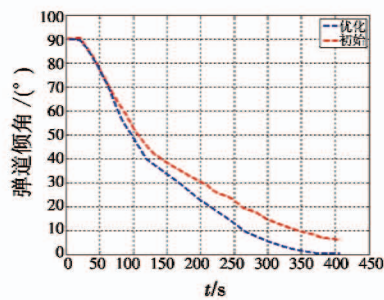


图 5 主动段当地弹道倾角变化曲线

Fig. 5 Curves of trajectory inclination angle

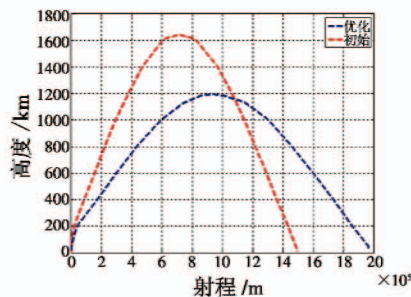


图 6 弹道变化曲线

Fig. 6 Trajectory curve

4 结束语

本文通过建立的主动段弹道射程优化模型,结合导弹在主动段整个飞行过程中受到的主要约束条件,提出了一种基于遗传算法和单纯形法的复合算法用于弹道设计优化。以某二级导弹为例进行仿真验证,结果表明该方法具有较强的通用性,对导弹的射程有较为明显的提高,可用于导弹设计初期方案论证、试验弹道设计。

参考文献

- [1] 甘楚雄,刘冀湘. 弹道导弹与运载火箭总体设计[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- [2] 刺朝阳,魏娟,王广通. 基于 Matlab 遗传算法的数控铣床切削参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(1):39-41.
- [3] 李鑫. 地地弹道导弹轨迹优化设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [4] LIU X, YANG T, ZHANG Q B. Trajectory optimization and parameter analysis for boost-glide missile[J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(3):43-48.
- [5] 贾沛然,陈克俊,何力. 远程火箭弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2009.
- [6] 陈琦,王中原,常思江,等. 基于改进遗传算法的滑翔增程弹控制参数优化设计[J]. 电光与控制,2014, 21(10):20-23.
- [7] ZHAO B, YU W, CHEN H, et al. Hydraulic optimization of a double-channel pump's impeller based on multi-objective genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3):634-640.
- [8] LI Y Q, WANG R X, LIU Y, et al. Satellite range scheduling with the priority constraint: an improved genetic algorithm using a station ID encoding method[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(3):789-803.
- [9] 冯增喜,任庆昌,彭彦平,等. 基于单纯形法的 MFAC 参数寻优[J]. 控制工程,2016,23(3):405-410.
- [10] 谢利平,史金光,李元生,等. 基于遗传粒子群算法的底排参数优化[J]. 弹道学报,2016,28(1):33-38.
- [8] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005:60-65.
- [9] 王灿进,石宁宁,孙涛. 同态非局部滤波在激光主动成像散斑抑制中的应用研究[J]. 液晶与显示,2016, 31(2):193-200.
- [10] 杨恢先,王绪四,谢鹏鹤,等. 改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪[J]. 自动化学报,2011, 37(10): 1167-1174.
- [11] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3):613-627.
- [12] 张兆伦. 基于非局部均值图像去噪算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2015.
- [13] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2001:511-518.
- [14] FROMENT J. Parameter-free fast pixelwise non-local means denoising[J]. Image Processing on Line, 2014(4):300-326.

(上接第 11 页)