

·信号与信息处理·

## 基于空间关系的FPA非均匀校正算法

傅景能<sup>1,2</sup>, 李 华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**提出了一种基于相邻图像空间变换关系的场景校正(SBNUC)算法。该算法利用相邻图像空间变换关系,将前一帧已校正的像元灰度组合为当前帧所期望的像元灰度,再以误差梯度迭代修正偏置和增益。理论上证明了在未加其他条件的情况下,该算法能够防止鬼影现象。红外图像序列校正结果显示,该算法在保证图像锐度的情况下,降低了FPA非均匀的高频信息,从而增强了图像对比度,同时自动补偿坏点。理论和实验结果证明了该算法的有效性和稳定性。

**关键词:**红外焦平面阵列;非均匀校正;空间关系

中图分类号: TN214

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)01-0066-05

## Nonuniformity Correction for FPA Using Spatial Relationship

FU Jing-neng<sup>1,2</sup>, LI Hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A new scene-based nonuniformity correction (SBNUC) algorithm using spatial transform relationship between adjacent image frames is proposed. Based on spatial transform relationship between adjacent image frames, the gray value of current frame can be got by the weighted combination of some corrected pixels in the former frame. Moreover the gain and the offset are adaptively updated with the respective error gradient. The algorithm can avoid ghosting artifacts without considering other conditions. Corrected results of real infrared image sequences show that under the condition of ensuring image sharpness, the algorithm can decrease FPA nonuniformity high frequency information for increasing the image contrast, meanwhile bad pixels can be compensated automatically. This algorithm is proved to be stable and robust theoretically and practically.

**Key words:** infrared focal plane arrays; nonuniformity correction; spatial relationship

红外焦平面阵列(FPA)作为红外成像系统的核心部件,具有广泛的用途。然而,由于探测器单元面积、耦合、增益、接口电路、探测器饱和电流、探测器量子效率、探测器单元的截至波长以及焦平面阵列上各点间的温差的差异最终导致FPA出现非均匀性,影响了成像质量<sup>[1]</sup>。目前为止FPA非均匀的校正算法主要分为两大类,一种是基于定标的方法<sup>[2]</sup>,另一种是基于场景校正算法。基于定标的方法需要黑体作为标准,在假设FPA输入输出呈现某种关系的

情况下,通过已知的黑体温度设置和响应信息,获取FPA响应参数。然而,空间噪声会随时间慢变,对于参数的有效性提出了挑战。和定标的方法相比,场景校正(SBNUC)技术仅仅使用图像序列信息,具备自适应的特点。因此,近年来,大量的文献更多地关注SBNUC算法,例如,John G. Harris 和 Yu-Ming Chiang<sup>[3]</sup>提出了常数统计(CS)SBNUC算法,该算法假设每个像素在时间和空间上均呈现常数的均值和方差分布,通过对当前输出值减去当前均值估计,再除以

收稿日期:2011-01-13

基金项目:光电技术研究所国家部委自然科学基金

作者简介:傅景能(1986-),男,重庆北碚区人,硕士,主要从事图像处理 and 光学系统设计。

当前方差估计就获取当前原始输入估计。另一种SBNUC算法是由 Sergio N. Torres 等人<sup>[4,5]</sup>通过空间低通滤波器处理后的图像作为期望的图像,借助神经网络框架结合LMS算法实现偏置和增益的更新。Majeed M. Hayat 等人<sup>[6]</sup>假设偏置和增益是随机变量,视其为时间离散的 Gauss-Markov 过程,借助 Kalman 滤波器更新参数。Bradley M. Ratliff 等人<sup>[7,8]</sup>提出了基于代数结构的SBNUC算法。

文中提出了一种基于相邻图像的空间位置关系的SBNUC算法。该算法利用相邻图像空间变换关系,将前一帧已校正的像元灰度组合为当前帧所期望的像元灰度,再以误差梯度迭代修正偏置和增益。几乎所有的SBNUC算法均要考虑鬼影的问题<sup>[3,5,9]</sup>。在文中,证明了在不加入额外的消除鬼影算法限制条件下能够自然消除鬼影。

## 1 基于场景的校正算法

基于场景的校正算法部分包括模型、更新算法和消鬼影三部分。

### 1.1 算法模型设计

通常,FPA的输入输出关系可以通过以下线形模型表示

$$Y(i, j, n) = G(i, j)X(i, j, n) + O(i, j) \quad (1)$$

$$1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$$

其中,像元阵列大小为:  $M \times N$ ;  $X(i, j, n)$  表示在第  $n-1$  帧与第  $n$  帧的时间内,空间坐标为  $(i, j)$  的探测器接收到的实际辐射能量;  $G(i, j)$ ,  $O(i, j)$  分别表示第  $n$  帧图像中空间坐标为  $(i, j)$  的探测器的增益和偏置;  $Y(i, j, n)$  表示第  $n$  帧图像中空间坐标为  $(i, j)$  的探测器的输出。

### 1.2 更新算法

希望对于第  $n$  帧图像中空间坐标为  $(i, j)$  的探测器的输出的估计  $\hat{Y}(i, j, n)$  与实际输出  $Y(i, j, n)$  相接近,于是定义了如下优化模型

$$\min : J(n) = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \epsilon(i, j, n)^2 \quad (2)$$

$$s.t. : \epsilon(i, j, n) = Y(i, j, n) - \hat{Y}(i, j, n)$$

其中,第  $n$  帧图像空间坐标为  $(i, j)$  的探测器的输出的估计特征

$$\hat{Y}(i, j, n) = G(i, j)\tilde{X}(i, j, n) + O(i, j) \quad (3)$$

其中,  $\tilde{X}(i, j, n)$  的表达式按以下给出。

相邻图像空间位置关系是多样的,权衡算法的有效性和复杂度,这里只考虑相邻图像的平移和旋转变换,当然局部的一些运动关系也可以作类似的讨论。由图1知第  $n$  帧和第  $n-1$  帧的空间变换关系可以表示为

$$\begin{pmatrix} x_{i,j,n-1} \\ y_{i,j,n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_n \\ j_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_n \\ q_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

进一步将这些坐标分别写成整数和小数部分,即

$$x_{i,j,n-1} = a_{i,j,n-1} + \alpha_{i,j,n-1}, y_{i,j,n-1} = b_{i,j,n-1} + \beta_{i,j,n-1},$$

其中:  $0 \leq \alpha_{i,j,n-1} < 1, 0 \leq \beta_{i,j,n-1} < 1$ 。

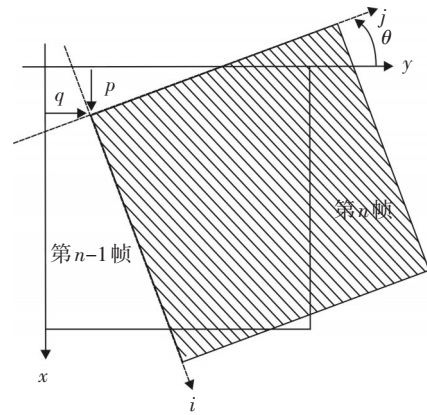


图1 相邻图像的平移和旋转关系示意图

根据以上讨论的相邻图像空间变换关系,组合量  $\tilde{X}(i, j, n)$  按常见的双线性插值方式书写

$$\begin{aligned} \tilde{X}(i, j, n) = & \alpha_{i,j,n-1}\beta_{i,j,n-1}\hat{X}(i + a_{i,j,n-1} + \\ & 1, j + b_{i,j,n-1} + 1, n - 1) + \\ & \alpha_{i,j,n-1}(1 - \beta_{i,j,n-1})\hat{X}(i + a_{i,j,n-1} + 1, j + b_{i,j,n-1}, n - 1) + \\ & (1 - \alpha_{i,j,n-1})\beta_{i,j,n-1}\hat{X}(i + a_{i,j,n-1}, j + b_{i,j,n-1} + 1, n - 1) + \\ & (1 - \alpha_{i,j,n-1})(1 - \beta_{i,j,n-1})\hat{X}(i + a_{i,j,n-1}, j + b_{i,j,n-1}, n - 1) \end{aligned} \quad (5)$$

对于  $X(i, j, n-1)$  的估计量定义为

$$\hat{X}(i, j, n-1) = \frac{Y(i, j, n-1)}{\hat{G}(i, j, n)} - \frac{\hat{O}(i, j, n)}{\hat{G}(i, j, n)} \quad (6)$$

其中,  $\hat{G}(i, j, n)$  和  $\hat{O}(i, j, n)$  分别表示探测元  $(i, j)$  经过第  $n-1$  次更新后的增益和偏置的估计。

$$\text{显然, } \frac{\partial J(n)}{\partial G(i, j)} = -\tilde{X}(i, j, n)\epsilon(i, j, n),$$

$$\frac{\partial J(n)}{\partial O(i, j)} = -\epsilon(i, j, n)。$$

由参数空间的分布特征,增益与偏置相差好几个数量级。为了防止偏置和增益更新的不同步性导致的不稳定<sup>[10]</sup>,在准确知道各个像元偏置和增益的数量级关系的时候,可以对每个像元进行步长修正。而这里作了折中处理:假设所有增益和偏置分别主要分布于 $[G_1, G_2]$ 和 $[O_1, O_2]$ ,运用尺度变换对角阵, $D = \text{diag}(\frac{O_2 - O_1}{G_2 - G_1}, 1)$ ,并且结合基于梯度搜索的算法,采用相应的误差梯度值迭代,从而平滑地去修正相应的参数。最终更新表达式(7)以原来的参数空间形式表示出来,但工作在尺度变换后的参数空间。

$$\begin{pmatrix} \hat{G}(i, j, n+1) \\ \hat{O}(i, j, n+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{G}(i, j, n) \\ \hat{O}(i, j, n) \end{pmatrix} - \lambda D^{-2} \begin{pmatrix} -\tilde{X}(i, j, n)\epsilon(i, j, n) \\ -\epsilon(i, j, n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G(i, j) = \hat{G}(i, j, n) \\ O(i, j) = \hat{O}(i, j, n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{G}(i, j, n) \\ \hat{O}(i, j, n) \end{pmatrix} - \lambda D^{-2} \begin{pmatrix} -\tilde{X}(i, j, n)\tilde{\epsilon}(i, j, n) \\ -\tilde{\epsilon}(i, j, n) \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, $\tilde{\epsilon}(i, j, n) = Y(i, j, n) - \hat{G}(i, j, n)\tilde{X}(i, j, n) - \hat{O}(i, j, n)$ ,而 $\lambda$ 是步长常数;另外,考虑到式(5),将更新区域须限定在第 $n$ 帧和第 $n-1$ 帧的交叠区域,从而对于 $(i, j)$ 加以限制,对于其他探测单元

$$\begin{pmatrix} \hat{G}(i, j, n+1) \\ \hat{O}(i, j, n+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{G}(i, j, n) \\ \hat{O}(i, j, n) \end{pmatrix} \quad (8)$$

初始设定  $\hat{G}(i, j, 1) = \frac{G_1 + G_2}{2}$ ,  
 $\hat{O}(i, j, 1) = \frac{O_1 + O_2}{2}$ 。

### 1.3 消鬼影

当图像场景由长时间保持缓慢变化或者根本不发生变化的状态,突然发生大的变化的时候,可能在当前图像中留下原来场景的影像,即所谓的鬼影现象。当然几乎所有的基于场景的非均匀矫正算法都会考虑算法中可能出现的鬼影现象<sup>[3,5,9]</sup>。在这里可以证明,文中算法在不需要像以前加入额外条件限制的情况下,可以达到自动消除鬼影的目的。

由以上讨论知道,当运动突然停止的时候, $p_n = 0$ , $q_n = 0$ 和 $\theta_n = 0$ ,此时式(5)变为

$$\begin{aligned} \tilde{X}(i, j, n) &= X(i, j, n-1), \text{ 而} \\ \tilde{\epsilon}(i, j, n) &= Y(i, j, n) - \hat{G}(i, j, n)\tilde{X}(i, j, n) - \hat{O}(i, j, n) = \end{aligned}$$

$$Y(i, j, n) - \hat{G}(i, j, n)\tilde{X}(i, j, n) - \hat{O}(i, j, n) = Y(i, j, n) - Y(i, j, n-1)$$

此时, $\tilde{\epsilon}(i, j, n) = 0$ ,根据式(7), $\begin{pmatrix} \hat{G}(i, j, n+1) \\ \hat{O}(i, j, n+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{G}(i, j, n) \\ \hat{O}(i, j, n) \end{pmatrix}$ ,即更新暂停,而防止向出现鬼影的方向更新参数。同样的道理,当全局运动突然变慢的时候,重复上面的讨论, $\tilde{\epsilon}(i, j, n)$ 也会变小,最后偏置和增益的更新同样会减小。

## 2 实验结果及分析

这一节,并不打算给出其他算法的对比结果,原因主要出于以下考虑:从算法的角度看,这是一个非常复杂的问题,特别是在不同算法中的不同算法思想的运用,以及“最佳”初始化参数的一致,算法的性能差距会很大。比如,在神经网络算法和当前算法中步长均设置为0.001,对比结果显示当前算法收敛速度更快,但是并不能断言当前算法就比神经网络算法更优秀,也不确定在相同步长设置为0.1时,会得出同样的结论。因而有必要在以后的工作详细而且慎重地讨论这个问题。

为验证该算法的有效性和可靠性,采用制冷型面元大小为 $200 \times 250$ 的中波波段的HgCdTe焦平面阵列采集14位红外图像数据。由于实验条件限制,未对空间噪声数据进行标定,无法获取反演生成标准图像序列,但是在采集数据前,还是对均匀的天空背景进行单点校正,作为参考图像序列的校正参数。最后,以20 Hz频率采集运动的月球表面图像,获取了1 000帧图像序列。

为评价该算法的性能,采用Sharpness Metric  $\rho$ <sup>[9]</sup>,它是图像空间高频规范化度量函数,一般图像空间高频信息即边沿信息,在整个空间频域信息所占能量不会很大,而未校正的非均匀图像,空间高频分量会明显增加。由此看来,Sharpness Metric  $\rho$ 作为非均匀性的相对度量是很有意义的。

在运动估计算法方面,参考了文献[11],它能够达到大约0.03个像素宽度平移估计的精度,以及 $0.03^\circ$ 的旋转估计精度。参数设定方面,通过对以往偏置和增益的数据统计,设定尺度对角阵 $D = \text{diag}(10^4, 1)$ 比较合适,同时为保证数据更新的稳健性,步长选取 $\lambda = 0.001$ ,当然,步长的设定在充分掌握了探测器的工作特性的情况下,可以尽量加大,



以保证尽快完成校正进入工作状态。

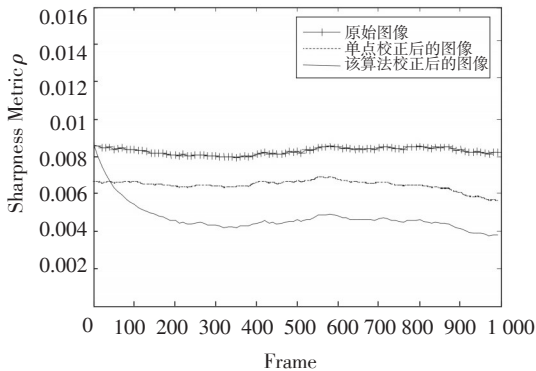


图2 校正后的图像 $\rho$ 的演变与原始图像序列, 以及单点校正后的图像序列对比

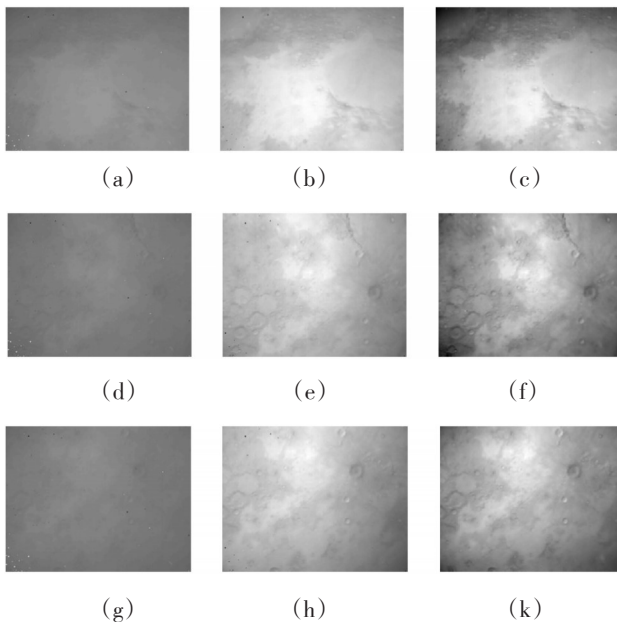


图3 第一行是与第30帧相关的数据,第二行是第400帧相关的数据,第三行是第1000帧相关的数据。其中,(a)(d)(g)是原始图像,(b)(e)(h)是采用基于相邻图像空间变换关系的FPA非均匀自适应校正算法后的图像,(c)(f)(k)是单点校正后的图像

由图2明显看出,基于相邻图像空间变换关系的FPA非均匀自适应校正算法,在图像序列校正大约经过200帧后,Sharpness Metric  $\rho$  稳定的保持在较低的水平。从统计数据上看,从200帧到1000帧,对于经过该算法校正后的图像的Sharpness Metric  $\rho$  平均值为0.0044。相对于原始图像的0.0083,和单点校正图像的0.0064,表明对于FPA非均匀的高频信息得到了很好的去除,从侧面也反映了该算法的有效性和稳定性。

由图3知道,对于没有校正的红外图像具有很差的对比度,基本上是看不见场景成像的内容,而且坏点是非常明显的,而单点校正后,图像质量得到提升,但是发现一些坏点依旧存在;而采用基于相邻图像空间变换关系的FPA非均匀自适应校正算法后的图像,在不牺牲锐度的情况下,对比度得到了改善,而且该算法能够自动补偿坏点,最后,能够很清晰地分辨出月球上微小的陨石坑。综合图2以及图3,该算法在保证图像锐度的情况下,能够降低代表FPA非均匀的高频信息以增强图像对比度的。

### 3 结 论

文中提出了基于相邻图像空间变换关系的FPA非均匀校正算法。该算法利用相邻图像空间变换关系,将前一帧已校正的像元灰度组合为当前帧所期望的像元灰度,再以误差梯度迭代修正偏置和增益。同时理论上证明了在未加入额外的限制条件下,能够达到消除“鬼影”的目的。在实验部分,通过月球表面的中波红外图像序列的不断校正,对比原始图像序列和经过单点校正后的图像序列,可以看出Sharpness Metric处于较低的水平,表明经过该算法校正后的图像的非均匀高频信息得到了很好的去除。而在对比实际图像和经过单点校正的图像灰度分布,图像锐度也得到了保证。对于非均匀异常的坏点,该算法具有自动补偿的功能。进一步的工作方向,一是深入分析各种FPA非均匀性校正算法的关系;二是在结合单帧图像灰度分布特点和相邻图像的相关信息,降低算法的复杂度;三是在复杂空间变换关系怎样有效地进行数学表示下,进行算法稳定性分析。

### 参考文献

- [1] A F Milton, F R Barone, M R Kruer. Influence of Nonuniformity on Infrared Focal Plane Array Performance [J]. Opt. Eng, 1985, 24(5):855-862.
- [2] 黄战华,杨基春,赵天虹,等. 红外焦平面阵列非均匀性嵌入式实时校正技术[J]. 光电工程,2008,35(3):35-37.
- [3] John G Harris, Yu-Ming Chiang. Nonuniformity Correction of Infrared Image Sequences using The Constant-statistics Constraint [J]. IEEE transaction on image processing, 1999, 8(8):1148-1151.
- [4] Sergio N Torres, Cesar San Martin, Daniel G Sbarbaro, et

- al. A Neural Network for Nonuniformity and Ghosting Correction of Infrared Image Sequence [J]. Lecture Notes in Computer Science(S1611-3349), 2005, 3656: 1208-1216.
- [5] Flavio Torres, Sergio N Torres, Cesar San Martin. A Recursive Least Square Adaptive Filter for Nonuniformity Correction of Infrared Image Sequences [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3773: 540-546.
- [6] Sergio N Torres, Majeed M Hayat. Kalman Filtering for Adaptive Nonuniformity Correction in Infrared Focal-plane Arrays [J]. JOSA A, 2003, 20(3): 470-480.
- [7] Bradley M Ratliff, Majeed M Hayat, Russell C. Hardie. An Algebraic Algorithm for Nonuniformity Correction in Focal-plane Arrays [J]. JOSA A, 2002, 19(9): 1737-1747.
- [8] Bradley M Ratliff, Majeed M Hayat, J Scott Tyo. Generalized Algebraic Scene-based Nonuniformity Correction Algorithm [J]. JOSA A, 2005, 22(2): 239-249.
- [9] Russell C Hardie, Frank Baxley, Brandon Brys, et al. Scene-based Nonuniformity Correction with Reduced Ghosting using A Gated LMS Algorithm [J]. Optics Express, 2009, 17(17): 14918-14933.
- [10] J E Dennis, Jr Robert, B Schnabel. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations [M]. Pennsylvania: SIAM, 1987: 155-157.
- [11] D Keren, S Peleg, R Brada. Image Sequence Enhancement using Sub-pixel Displacements [C]// Washington D. C: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1988: 742-746.

(上接第28页)为核心。数字化、智能化、网络化光谱分析检测技术和光谱仪器必将是光谱技术和光谱仪器持续发展的主要方向。同时,产品应实现系列化、规模化,涵盖专用级、便携级、研究级等低、中、高端,不断拓展应用,形成规模效应。

## 参考文献

- [1] 吴瑾光,近代傅里叶变换近红外光谱技术及其应用(上卷).北京:科学技术文献出版社,1994.
- [2] 郭云山,等.近红外分析仪[J].光学精密工程,1993,1(1):47-53.
- [3] Turner J F, Treado P J. App 1 Spectrosc, 1996, 50(2):277.
- [4] Fulton G, Horlick G. App 1 Spectrosc, 1996, 50(7):885.
- [5] Exander A, Gao G H, Tran C D. App 1 Spectrosc, 1997, 51: 1603.
- [6] 吉海彦.近红外光谱仪器技术[J].现代科学仪器,2001,6: 25-28.
- [7] 徐广通,袁洪福,陆婉珍.现代近红外光谱技术及应用进展[J].光谱学与光谱分析,2000,20(2):134-142.
- [8] 陆婉珍.现代近红外光谱分析技术[M].北京:中国石化出版社,2007.
- [9] Thomas E V, Haaland D M. Anal Chem, 1990, 62:1091-1099.
- [10] 徐云,王一鸣,等.用近红外光谱检测牛奶中的三聚氰胺[J].红外与毫米波学报,2010,29(1).
- [11] 马东红,王锡昌,等.近红外光谱技术在食品产地溯源中的研究进展[J].光谱学与光谱分析,2011,31(4): 877-881.
- [12] 周子立,张瑜,等.基于近红外光谱技术的大米品种快速鉴别方法[J].农业工程学报,2009,8(5):131-135.
- [13] 刘翠玲,郑光,等.近红外光谱技术在农药残留量检测中的研究[J].北京工商大学学报,2010,4(5):52-55.
- [14] 陈兰珍,赵静,等.蜂蜜真伪的近红外光谱鉴别研究[J].光谱学与光谱分析,2008,11(4):2565-2568.
- [15] 徐玮,谭红,等.近红外光谱法快速测定白酒中的酒精度[J].中国农学学报,2010,26(19):70-72.

(上接第36页)

- [5] A D Gleckler. Multiple-Slit Streak Tube Imaging Lidar (MS-STIL) Applications [J]. Proc. SPIE, 2000, 4035: 266-278.
- [6] Asher Gelbart, Chris Weber, Shannon Bybee-Driscoll, et al. FLASH lidar data collections in terrestrial and ocean environments [J]. SPIE, 2003, 5086: 27-38.
- [7] Mark Kushina, Geoff Heberle, et al. ALMDS Laser System [J]. SPIE, 2003, 4968: 163-168.
- [8] Andrew J Nevis. Automated Processing For Streak Tube Imaging Lidar Data [J]. SPIE, 2003, 5089: 119-129.
- [9] A D Gleckler, A Griffis, J Plath, et al. Streak Tube Imaging Lidar for Electro-Optic Identification [C]// Proceeding of the Fourth International Symposium on Technology and Mine Problem. Naval Post Graduate School, Monterey, CA, 2000: 12-16.
- [10] Anthony D Gleckler, Asher Gelbart. Three-dimensional imaging polarimetry [J]. SPIE, 2001, 4377: 175-185.
- [11] 魏靖松,程元丽,徐强,等.单狭缝条纹管激光雷达的成像[J].中国激光,2008,35(4):496-500.
- [12] 孙剑峰,郜键,魏靖松,等.条纹管激光成像雷达水下探测成像研究进展[J].红外与激光工程,2010,39(5): 811-814.
- [13] 孙剑峰,魏靖松,刘金波,等.条纹管激光成像雷达目标重构算法[J].中国激光,2010,37(2):510-513.