

基于重采样插值的菲涅耳望远镜成像算法研究

吕笑宇 闫爱民 李 兵 戴恩文 孙建锋 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达(简称菲涅耳望远镜)是一种新的高分辨率激光成像技术。在菲涅耳望远镜一维扫描工作模式中,目标和扫描光束的相对运动使得时间-空间变换后的采样信号呈不规则非均匀分布,影响匹配滤波算法中快速傅里叶变换的使用。提出基于重采样插值的菲涅耳望远镜算法,包括时间-空间变换、重采样插值和匹配滤波等主要步骤,其中利用重采样插值将不规则分布的原采样信号转换为正交规则分布的重采样信号。对三种重采样插值方法进行比较,并获得了点目标和面目标的计算机仿真重建图像,证明了算法的有效性。该算法对于菲涅耳望远镜具有实际意义。

关键词 成像系统;插值;重采样;菲涅耳望远镜;非均匀采样;激光雷达;光束扫描

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1211007

Imaging Algorithm of Fresnel Telescope Based on Resampling Interpolation

Lü Xiaoyu Yan Aimin Li Bing Dai Enwen Sun Jianfeng Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Fresnel telescope (short for Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar) is a new high resolution active laser imaging technique. In one-dimensional scanning operational mode of Fresnel telescope, spatial distribution of sampling signal is non-uniform because of the relative motion between target and scanning beam, which affects the fast Fourier transform in the following matched filtering algorithm. We propose the complete imaging algorithm for Fresnel telescope, including space-time transform, resampling interpolation and matched filtering, in which we use resampling interpolation to transform the signal into two-dimensional uniform distribution form. Three different resampling interpolation methods are analyzed, and we get good reconstruction results of point target and area target with computer simulation, which prove that the designed imaging algorithm for Fresnel telescope is effective. This work has substantial practical value and offers significant benefit for Fresnel telescope imaging system.

Key words imaging systems; interpolation; resampling; Fresnel telescope; non-uniform sampling; lidar; beam scanning

OCIS codes 110.6770; 100.3008; 280.3640; 010.0280

1 引 言

在目标探测和高分辨率目标识别领域,获得更高分辨率的图像是一项持续的工作,在军事应用中特别是预警探测、战略防御和侦察监视等方面具有战略性意义。菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷

达(简称菲涅耳望远镜)^[1,2]是一种新的高分辨率激光成像技术。它结合了激光合成孔径雷达^[3~7]和光学扫描全息术^[8~11]的优势,能够实现目标超光学分辨率极限的二维(2D)成像。由于实施了空间-时间的传输信号转化并采用了同轴光束相干探测和复数

收稿日期: 2011-06-22; **收到修改稿日期**: 2011-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(60907006)资助课题。

作者简介: 吕笑宇(1984—),男,博士研究生,主要从事激光雷达和数字信号处理等方面的研究。

E-mail: lvxiaoyu@siom.ac.cn

导师简介: 刘立人(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间激光通信和激光雷达等方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

相位合成,因此提高了接收灵敏度和成像信噪比,大大降低了大气对于激光传输的影响。

菲涅耳望远镜具有两种工作模式,即目标移动而光束一维(1D)扫描和目标静止而光束二维扫描。在一维扫描模式中,目标和光束的相对运动使得时间-空间变换后的采样信号呈二维空间非均匀分布,而在后续匹配滤波算法中使用的快速傅里叶变换(FFT)要求采样信号满足规则均匀分布。为此在菲涅耳望远镜成像算法中设计重采样插值步骤,通过重采样点一定邻域范围内采样点的数值计算获得规则均匀的正交重采样点处的数值。然后利用获得的重采样信号,使用匹配滤波算法重建目标图像。即菲涅耳望远镜一维扫描模式完整成像算法包括时间-空间变换、重采样插值和匹配滤波等主要步骤。

重采样插值是一种重要的数值计算方法,广泛应用于雷达成像、医学影像等领域^[12~14]。典型的重采样插值方法包括最近邻插值、双线性插值和立方卷积插值等,插值过程通常为对灰度值或强度值从规则分布到规则分布的运算。在菲涅耳望远镜中,采样信号呈周期折线式非规则非均匀分布,采样信号的函数值为菲涅耳波带片形式的复数相位值,即插值过程是对相位值从不规则分布到规则分布的运算,与现有的激光雷达和医学成像等工作中插值信号的分布和函数值均不同^[15~17]。因此必须选择适合于菲涅耳望远镜成像激光雷达采样信号特点的插值方法。

本文提出了菲涅耳望远镜的完整算法,利用重采样插值步骤解决非均匀采样的问题。讨论和分析了3种常用的重采样插值方法,证明立方卷积插值法更适用于菲涅耳望远镜成像系统。对包含立方卷积插值步骤的菲涅耳望远镜算法进行计算机仿真,得到了点目标和面目标的重建图像,证明了算法的可行性。

2 菲涅耳望远镜一维扫描工作模式采样信号

2.1 目标扫描轨迹

菲涅耳望远镜的原理基于对目标进行同轴同心

相位二次项偏振正交双光束扫描的光电信号收集以及光学和数字计算空间复相位解调的图像重构^[1]。

在菲涅耳望远镜一维扫描模式中,运动目标从照明场中飞过,光束做一维往复周期扫描,进行信号收集。点目标 $(x_i, y_i; t_2=0)$ 的运动函数为

$$f_i(x, y; t_2) = f(x_i, y_i) \delta[x - (x_i + vt_2 \cos \theta), y - (y_i + vt_2 \sin \theta)], \quad (1)$$

式中 v 是运动速度, θ 是运动方向, (x, y) 为目标平面的空间坐标系, t_2 为目标面时间。

假定 $t_2=0$ 时光斑中心在 y 轴最上方,则光束线性周期扫描函数 $y_w(t)$ 为

$$y_w(t) = Y_m \sum_{n=0, \pm 1, \pm 2, \dots} (-1)^n \text{tri} \left[\frac{t - n \frac{T}{2}}{\frac{T}{4}} \right], \quad (2)$$

式中 Y_m 为振幅, T 为扫描周期,tri代表三角函数。

由于目标和光束的相对运动,点目标在光斑内的实际扫描轨迹为

$$\begin{cases} x = x_i + vt_2 \cos \theta \\ y = y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2) \end{cases} \quad (3)$$

当目标运动方向与扫描方向垂直,即 $\theta=0^\circ$ 时,目标在光斑中的扫描轨迹如图1所示。

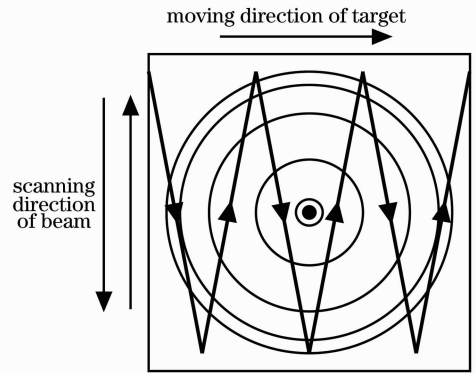


图1 照明光场内点目标扫描轨迹

Fig.1 Scanning path of a point target in illumination beam

2.2 采样信号的时间-空间变换

菲涅耳望远镜接收的一维时间信号经过 2×4 90° 空间光学桥接器和两路光学平衡接收,模数转换,然后实施复数化^[1]。复数化的采样数学信号为

$$I_{i,AB}(t_2 = n\Delta t_2) = A_5 f^2(x_i, y_i) \exp(j\Delta\varphi_{RLi}) S^2 [x_i + vn \Delta t_2 \cos \theta, y_i + vn \Delta t_2 \sin \theta - y_w(n\Delta t_2)] \times \exp \left\{ j \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vn \Delta t_2 \cos \theta)^2 + [y_i + vn \Delta t_2 \sin \theta - y_w(n\Delta t_2)]^2}{R_{\text{equ}}} \right\} \right\}, \quad (4)$$

式中的下标A(B)表示空间光学桥接器的上(下)路; Δt_2 是采样周期; $\Delta\varphi_{Li}$ 和 $\Delta\varphi_{Ri}$ 是两路光的相位延迟, $\Delta\varphi_{RLi} = \Delta\varphi_{Ri} - \Delta\varphi_{Li}$; f_l 和 f_r 是两个空间相位调制器的等效焦距; R_{equ} 是等效曲率半径,当 $f_r = -f_l$ 时,

$$|R_{\text{equ}}| = \frac{Z^2}{2M^2 f_{1,r}}, \quad (5)$$

式中 Z 是目标距离, M 是发射望远镜的放大率。

光束的艾里斑函数为

$$S(x, y) = \frac{2J_1\left(\frac{\pi D_t \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda Z}\right)}{\frac{\pi D_t}{\lambda Z} \sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (6)$$

式中 D_t 是发射孔径的直径。

采用扫描路径的反推, 目标物面点的时间信号可以恢复为二维空间分布, 实现时间域到空间域的变换, 如图 2 所示, 圆点代表时间-空间变换后的采样点, 恢复的空间分布复数信号属于非正交非均匀采样。

3 用于菲涅耳望远镜的重采样插值

为了在匹配滤波算法中使用 FFT, 必须采用重采样插值方法将一维扫描模式非均匀采样信号变换成正交坐标规则采样。

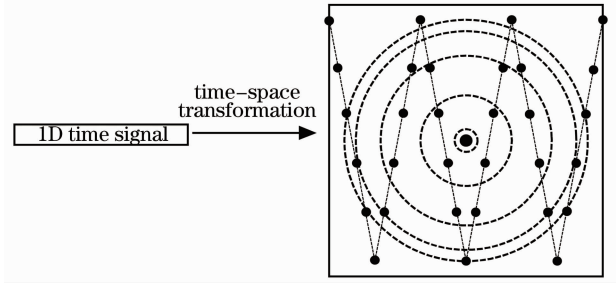


图 2 采样信号的时间-空间变换

Fig. 2 Sketch map of space-time transformation of sampling signal

典型的重采样插值方法包括最近邻插值、双线性插值和立方卷积插值。

最近邻插值法计算重采样点到几个相邻采样点的距离, 并选取最近采样点的数值作为重采样点的值^[18]。

双线性插值法考虑了周围 4 个采样点的影响, 在 x 方向和 y 方向进行两次线性插值, 获得重采样点的值^[19]。计算公式如下:

$$f(i+u, j+v) = (1-u)(1-v)f(i, j) + (1-u)v f(i, j+1) + u(1-v)f(i+1, j) + uv f(i+1, j+1), \quad (7)$$

式中 u, v 坐标表示采样点位置, $f(\cdot, \cdot)$ 表示采样点函数值。

立方卷积插值法不仅考虑 4 个直接相邻采样点的值, 而且考虑相邻采样点间数值变化率的影响, 利用重采样点周围更大邻域内采样点的值进行插值计算^[15,17]。立方卷积插值核是由定义在区间 $(-2, -1), (-1, 0), (0, 1), (1, 2)$ 上的三次分段函数组成的。在区间 $(-2, 2)$ 之外的插值核函数为零。在一维条件下, 插值核函数写为

$$g(x) = \begin{cases} 3|x|^3/2 - 5|x|^2/2 + 1 & 0 < |x| < 1 \\ -|x|^3/2 + 5|x|^2/2 - 4|x| + 2 & 1 < |x| < 2 \\ 0 & 2 < |x| \end{cases} \quad (8)$$

在二维情况下, 计算点 (u, v) 的公式为

$$V(u, v) = \mathbf{XYZ}, \quad (9)$$

式中

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} g(1+b) \\ g(b) \\ g(1-b) \\ g(2-b) \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} V(i-1, j-1)V(i-1, j)V(i-1, j+1)V(i-1, j+2) \\ V(i, j-1)V(i, j)V(i, j+1)V(i, j+2) \\ V(i+1, j-1)V(i+1, j)V(i+1, j+1)V(i+1, j+2) \\ V(i+2, j-1)V(i+2, j)V(i+2, j+1)V(i+2, j+2) \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} g(1+a) \\ g(a) \\ g(1-a) \\ g(2-a) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

从 3 种重采样插值方法的原理可以看出: 最近邻插值计算量小, 占用内存少, 精度低, 光滑程度差; 双线性插值计算量较大, 占用内存较多, 精度较高, 光滑程度较好; 立方卷积插值计算时间长, 占用内存多, 精度高, 光滑程度好。

利用重采样插值, 将时间-空间变换后的采样信号转换为空间均匀分布形式。重采样插值过程如图 3 所示, 左侧圆点表示原采样点, 右侧方形点表示重采样点, 满足正交均匀分布。

目标的重采样函数为

$$I_i(x, y) = \sum_n^m B_i \exp(j\Delta\varphi_{RLi}) S^2(x + \Delta x_i - m\Delta L, y + \Delta y_i - n\Delta L) \times \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} \frac{(x + \Delta x_i - m\Delta L)^2 + (y + \Delta y_i - n\Delta L)^2}{R_{\text{equ}}}\right], \quad (11)$$

式中 ΔL 为采样间隔。

利用信号的相位二次项的共轭匹配滤波重建目标的像,即

$$E_i(x, y) = \sum_i I_i(x, y) * \exp\left(-j \frac{\pi}{\lambda} \frac{x^2 + y^2}{R_{\text{match}}}\right) = \sum_i B_i \exp(j\Delta\varphi_{RLi}) \iint S^2(x + \Delta x_i - m\Delta L, y + \Delta y_i - n\Delta L) \times \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} \frac{(\alpha + \Delta x_i)^2 + (\beta + \Delta y_i)^2}{R_{\text{equ}}}\right] \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda} \frac{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2}{R_{\text{match}}}\right] d\alpha d\beta, \quad (12)$$

式中 R_{match} 为匹配球面波的曲率半径。当 $R_{\text{equ}} = R_{\text{match}}$ 时,

$$E_i(x, y) = \sum_i B_i \exp(j\Delta\varphi_{RLi}) \delta_i(x + \Delta x_i, y + \Delta y_i). \quad (13)$$

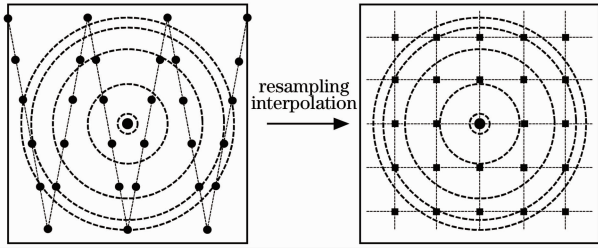


图 3 重采样插值示意图

Fig. 3 Sketch map of resampling interpolation

重采样插值后的采样点分布满足 FFT 对信号格式的要求。可以利用 FFT 将目标的重采样函数 $I(x, y)$ 和相位二次项共轭函数转换到频率域相乘,然后利用快速傅里叶逆变换 (IFFT) 将乘积结果转换到空间域,完成 (12) 式的匹配滤波过程,获得重建的目标图像。

4 计算机仿真和分析

仿真参数设置如下:在一维扫描模式中,假设激光扫描方向与目标飞行方向垂直,即 $\theta = 0^\circ$,目标飞行路径通过静止光斑中心;激光器波长为 $1 \mu\text{m}$,产生直径 $\phi 10 \text{ m}$ 的光场,照明光斑相位半波数 $N =$

18,光斑扫描振幅为 5 m ;设计采样点数为 $K = 101 \times 101$,重采样点数为 $K' = 99 \times 99$;同时建立理想二维扫描工作模式下采样点信号模型,用于对重采样插值结果的对比分析。由于主要工作是证明重采样插值算法的有效性,因此忽略附加相位的影响以简化计算模型。

分别利用 3 种重采样插值方法,对建立的非均匀分布采样信号进行重采样插值处理,获得了正交均匀分布的重采样信号。以信号实部的最近邻插值和信号虚部的立方卷积插值为例。图 4 为理想采样信号实部和最近邻插值信号实部的比较,其中图 4(a)为理想采样信号实部,图 4(b)为最近邻插值后信号实部,图 4(c)为理想采样信号实部和最近邻插值后信号实部的差值。图 5 为理想采样信号虚部和重采样插值信号虚部的比较,其中图 5(a)为理想采样信号虚部,图 5(b)为立方卷积插值后信号虚部,图 5(c)为理想采样信号虚部和立方卷积插值后信号虚部的差值。

观察图 4 和图 5,重采样信号与理想的采样信号具有较好的相似度。为客观评价 3 种重采样插值算法的准确性,将重采样插值获得的复函数的实部

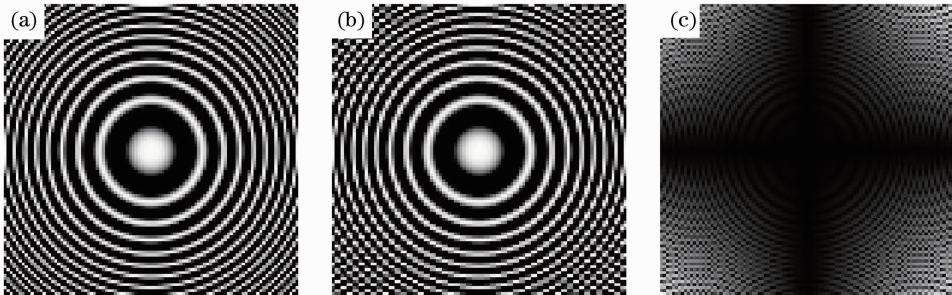


图 4 理想采样信号实部和最近邻插值信号实部的比较

Fig. 4 Comparison of real part of ideal signal and nearest neighbour interpolation signal

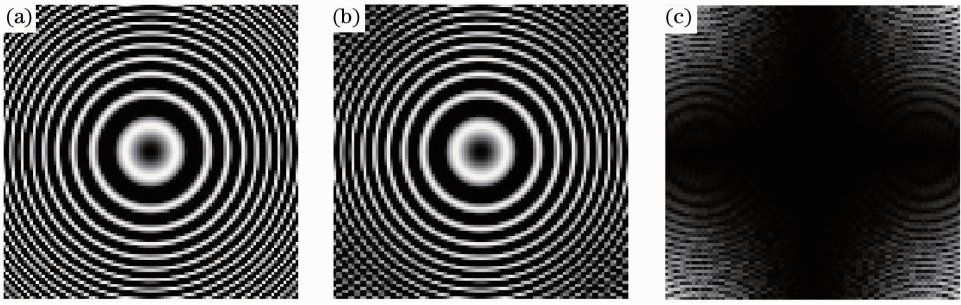


图 5 理想采样信号虚部和立方卷积插值信号虚部的比较

Fig. 5 Comparison of imaginary part of ideal signal and cubic interpolation signal

和虚部分别与理想采样情况下获得的复数信号相减,并计算差值的平均值、方差和标准差,结果如表 1,2 所示。

表 1 重采样信号实部与理想采样信号实部的差值

Table 1 Difference of real part between resampling interpolation signal and ideal sampling signal

	Mean value	Variance	Standard deviation
Nearest neighbor	0.1616	0.0306	0.1748
Linear	0.1268	0.0296	0.1722
Cubic	0.1090	0.0258	0.1607

表 2 重采样信号虚部与理想采样信号虚部的差值

Table 2 Difference of imaginary part between resampling interpolation signal and ideal sampling signal

	Mean value	Variance	Standard deviation
Nearest neighbor	0.1616	0.0306	0.1749
Linear	0.1269	0.0296	0.1721
Cubic	0.1080	0.0254	0.1593

从表 1 和表 2 的计算结果可以看出,3 种插值方法的误差均在较小的范围内。

相比最近邻插值和双线性插值,立方卷积插值法获得的信号与理想采样信号更为接近,具有更好的准确性。这是由于平衡探测信号满足菲涅耳波带片相位二次项的形式分布,相比其他两种插值方法,立方卷积插值法具有更高的阶次,连续性更好,因此误差相对较小。在采样点数量较少时,忽略立方卷积插值法计算时间较长的缺点,选择立方卷积插值法作为菲涅耳望远镜的重采样插值算法。

结合立方卷积插值法获得的信号,利用匹配滤波算法进行目标重建。结果如图 6 所示,从图 6 可以看到,点目标得到了较好的重建,从而证明了基于重采样插值的菲涅耳望远镜算法的可行性。

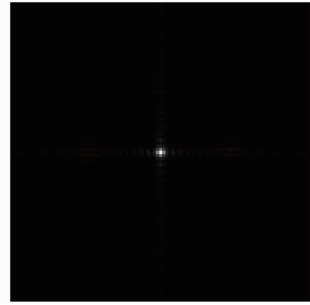


图 6 重建点目标图像

Fig. 6 Reconstructed image result of point target 标。利用基于立方卷积插值的菲涅耳望远镜成像算法对仿真采样信号进行处理和目标重建。获得的结果如图 8 所示。

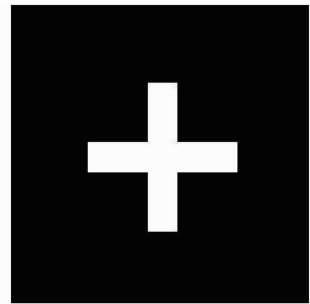


图 7 原始面目标图像

Fig. 7 Original image of area target



图 8 重建面目标图像

Fig. 8 Reconstructed image of area target

图 7 为设计的模拟飞机仰视图的“十”字形面目

5 结 论

针对一维扫描工作模式菲涅耳望远镜采样信号的特点,利用重采样插值解决了目标和光斑相对运动造成的非均匀采样问题,并给出了基于重采样插值的菲涅耳望远镜一维工作模式的完整成像算法。通过理论分析和计算机仿真,对不同重采样插值算法进行了比较,证明立方卷积插值更适用于菲涅耳望远镜成像系统。获得了点目标和面目标的重建图像,证明了成像算法的可行性。该工作对于菲涅耳望远镜成像激光雷达具有重要的实际意义。能够提高采样均匀性的变速扫描模式和改进的重采样插值算法将在后续工作中讨论。

参 考 文 献

- Liu Liren. Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar: principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 012800
刘立人. 菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达:原理[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 012800
- Xiaoyu Lü, Liren Liu, Aimin Yan *et al.*. Imaging system of Fresnel telescoping [C]. *SPIE*, 2010, **7818**: 78180Z
- S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (IV): unified operation mode and two-dimensional data collection equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 1~6
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(IV):统一工作模式和二维数据收集方程[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 1~6
- Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (V): imaging resolution and antenna aperture function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1408~1415
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V):成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 566~568
周煜,许楠,栾竹等. 实验室合成孔径激光成像雷达点目标二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 566~568
- Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 2030~2032
周煜,许楠,栾竹等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 2030~2032
- B. D. Duncan, T.-C. Poon. Gaussian beam analysis of optical scanning holography [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(2): 229~236
- T.-C. Poon, M. H. Wu, K. Shinoda *et al.*. Optical scanning holography [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(5): 753~764
- T. C. Poon. *Optical Scanning Holography with Matlab* [M]. New York: Springer, 2007
- Sun Ping, Xie Jinghui, Zhou Yuanlin. Optical tomography based on Fresnel zone plate scanning holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 110~114
孙萍,谢敬辉,周元林. 基于菲涅耳带板扫描全息术的光学层析成像[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 110~114
- T. J. Trainer, F. K. Sun. Image resampling in remote sensing and image visualization applications [C]. *SPIE*, 1991, **1567**: 650~658
- X. L. Lou, W. G. Huang, C. B. Zhou *et al.*. A new intensity interpolation for resampling of remote sensing imagery [C]. *SPIE*, 2003, **4898**: 65~70
- Xu Weihua, Yin Xuesong. Interpolation algorithms of medical images [J]. *Computer Simulation*, 2006, **23**(1): 111~114
许为华,尹学松. 医学图像插值算法的研究[J]. *计算机仿真*, 2006, **23**(1): 111~114
- Robert G. Keys. Cubic convolution interpolation for digital image processing [J]. *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1981, **29**(6): 1153~1160
- A. Camps, J. Bara, F. Tarres *et al.*. Extension of the CLEAN technique to the microwave imaging of continuous thermal sources by means of aperture synthesis radiometers [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 1998, **18**: 67~83
- Tan Ruoting, Wan Guolong. Application of cubic convolution interpolation in synthetic aperture radiometer [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2006, **29**(3): 103~104,109
谭若婷,万国龙. 立方卷积插值在合成孔径成像中的应用[J]. *电子测量技术*, 2006, **29**(3): 103~104,109
- You Yuhu, Zhou Xiaokuan. Research of optimal interpolation algorithm for digital image [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2005, (3): 14~18
尤玉虎,周孝宽. 数字图像最佳插值算法研究[J]. *中国空间科学技术*, 2005, (3): 14~18
- Jin Haiding, Zhou Xiaokuan. Self-adaptive interpolation algorithm for digital image [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(9): 907~910
金海丁,周孝宽. 数字图像自适应插值法[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(9): 907~910

栏目编辑:李文洁