

文章编号: 0253-2239(2010)03-0747-06

反射层析激光雷达小系统成像模拟

金晓峰 孙建锋 严毅 周煜 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信与检验技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 对反射层析激光雷达近场小系统成像进行了理论分析与模拟验证, 当目标处于瑞利-索末菲衍射区域, 到达目标的波前属于球面波衍射。根据奈奎斯特定律对球面波反射层析图像重建所需角度采样数, 单投影采样点数约束条件进行了推导。引入了折线的方法, 用于避免平方开方的距离运算, 缩短图像重建时间。数值模拟表明此方法可以在降低计算量的前提下实现图像重建, 随着探测距离的拉长, 折线重建图像与参考图像相似度越来越高。

关键词 激光雷达; 反射层析; 瑞利-索末菲衍射; 滤波反投影; 图像相似度

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0747

Small System Imaging Simulation for Reflective Tomography Laser Radar

Jin Xiaofeng Sun Jianfeng Yan Yi Zhou Yu Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Theoretical analysis and simulation were made for near-field small system imaging of reflective tomography laser radar. In the Rayleigh-Sommerfeld diffraction domain, wavefront of the target belongs to spherical wave diffraction. According to Nyquist criterion, the constraints including the number of sampling angles and the number of sampling points in each projection for spherical wave reflective tomography were obtained. Broken lines method was introduced to avoid square and extraction operation and shorten imaging time. The simulation results show that double broken lines method was effective in solving the computational complexity problem in image reconstructed. Also with the increasing distance between the detector and the target, images reconstructed by the double broken lines method are close to the reference image.

Key words laser radar; reflective tomography; Rayleigh-Sommerfeld diffraction; filtered back projection; image correlation coefficient

1 引言

基于多角度一维探测信息实现二维图像重建的层析算法已经广泛的应用于医学计算辅助层析(CT)图像重建, 其优点在于不用点对点的直接测量吸收系数实现目标物体的二维横截面图像重建。随着激光的出现和发展, Charles L. Matson 等^[1~5]将层析算法引入到激光雷达反射层析成像算法中, 用于探测卫星、飞机等空中旋转目标。利用激光短脉冲探测和非相干探测器得到基于距离的多角度一维反射投影信息, 滤波反投影算法可以实现探测目标

图像横截面重建, 具有很高的分辨率。

在激光雷达反射层析图像重建系统中, 光源发出光波经过距离衍射到达目标, 将随着距离不同在目标前端产生不同的波前形状。根据波前形状将光源光波衍射分为三个区域, 瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)衍射, 菲涅耳(Fresnel)衍射和夫琅禾费(Fraunhofer)衍射。当目标处于瑞利-索末菲区域, 到达目标的波阵面呈现球面状态, 因而探测器所接收到的反射投影信息是目标物体表面反射特征系数沿着弯曲球面的积分^[6]。本文针对实验室短距离下近

收稿日期: 2009-04-30; 收到修改稿日期: 2009-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(60807024)资助课题。

作者简介: 金晓峰(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达成像方面的研究。E-mail: jxf2008@siom.ac.cn

导师简介: 孙建锋(1978—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事空间激光通信、激光雷达等方面的研究。

E-mail: sunjianfeng@163.com

场球面波反射层析情况进行考虑,直接的滤波反投影算法缺点在于反投影过程中涉及到重建图像坐标点到光源点的距离计算,随着投影采样角度数的增加,或重建图像像元间隔的减小,其计算量变大,图像重建效率降低。折线方法将反投影重建图像坐标点到光源点距离计算转换成坐标点到直线的距离计算,避免了平方开方运算,可以有效降低复杂度。

2 光源光波衍射特性

随着光源与目标距离的变化,激光到达目标的衍射特性也随之发生变化,不再对应统一的表达式。根据到达目标的波前形状,可以将光源光波衍射区划分为三种衍射区域^[7,8]。

1) 瑞利-索末菲衍射。当距离太近而不能满足菲涅耳衍射条件时,目标波前为近场球面波,可以得到光源散射点衍射在目标前所产生的波前场强表达式:

$$e(x, y) = \frac{E}{j\lambda z} \exp\left\{j \frac{2\pi z}{\lambda} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{z^2} - \frac{1}{8} \left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{z^2}\right]^2 + \dots\right]\right\}, \quad (1)$$

它包含了二次项相位和更高阶的相位项。

2) 菲涅耳衍射。当 $|z|^3 \geq \pi(L_1 + L_2)^4 / (4\lambda)$ 时,目标处于光源光波的菲涅耳衍射区域,目标波前场强表达式为

$$e(x, y) = \frac{E}{j\lambda z} \exp\left(j \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \times \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{z^2}\right]. \quad (2)$$

3) 夫琅和费衍射。距离 z 进一步增大,当满足条件 $|z| \geq \pi(D^2 + L^2) / \lambda$,光源散射点衍射在目标前所产生的波前场强

$$e(x, y) = \frac{E}{j\lambda z} \exp\left(j \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \exp\left[j \frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right] \times \exp\left[-2\pi\left(\frac{xx_0}{\lambda z} + \frac{yy_0}{\lambda z}\right)\right], \quad (3)$$

式中 L_1 为光源出瞳直径, L_2 为物体尺寸, z 代表光源与目标之间距离, (x_0, y_0) 为光源散射点横向空间坐标。

3 滤波反投影算法

3.1 平行光透射层析

在医学计算机层析中,反投影成像是把取自有限物体空间的射线投影值反投影到射线所及的所有

空间点,数学过程如下^[9]。

如图 1 所示, $f(x, y)$ 为待建图像, $L_{r, \phi}$ 为对应的直线 $r = x \cos \phi + y \sin \phi$, $p(r, \phi)$ 为 $f(x, y)$ 沿直线 $L_{r, \phi}$ 的透射特征系数的积分^[10], 即角度 ϕ 所对应的一维透射投影

$$p(r, \phi) = \int_{L_{r, \phi}} f(x, y) ds, \quad (4)$$

反投影成像方法重建图像为

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^m p(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i, \phi_i) \Delta \phi, \quad (5)$$

式中 ϕ_i 为第 i 次投影所对应的角度, $\Delta \phi$ 为投影角度采样间隔, m 为总的投影数。为了减少重建图像伪迹,对获得的投影信息进行滤波处理,调整之后的投影数据^[11]

$$q(r, \phi) = \mathcal{F}_1^{-1}\{|k| \mathcal{F}_1[p(r, \phi)]\}, \quad (6)$$

式中符号 $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_1^{-1}$ 分别表示一维信号的傅里叶变换及其反变换, r 为空间变量, k 为频域变量, 滤波反投影重建图像

$$g_{\text{FB}}(x, y) = \sum_{i=1}^m q(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i, \phi_i) \Delta \phi. \quad (7)$$

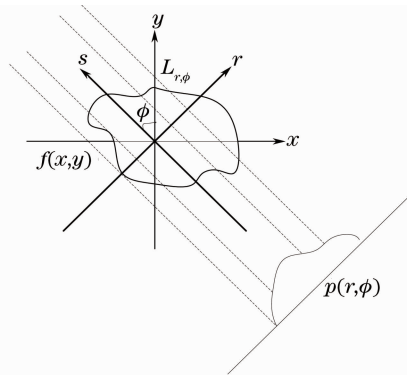


图 1 平行光透射层析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel beam transmission tomography

假设物体空域最大尺寸为 x_{\max} , 频域截止频率为 u_{\max} , 要想完全重建物体图像, 应用标准的奈奎斯特采样定律, 频域采样间隔要小于 $1/x_{\max}$ 。如图 2 所示, 可以得到投影角度间隔 $\Delta \phi$ 采样限制条件,

$$\Delta \phi \leq \frac{1}{x_{\max} u_{\max}}, \quad (8)$$

根据(8)式, 得到投影个数 N_{ϕ} ,

$$N_{\phi} \geq \frac{\pi}{\Delta \phi} = \pi x_{\max} u_{\max}, \quad (9)$$

单个投影上采样点 N_p 的限制条件

$$N_p \geq \frac{x_{\max}}{1/(2u_{\max})} = 2x_{\max} u_{\max}. \quad (10)$$

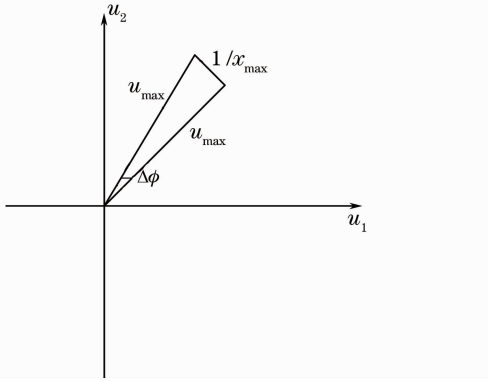


图 2 最小采样角度间隔示意图

Fig. 2 Schematic of minimum sampling interval of views

3.2 球面波反射层析

类似于上述的 CT 反投影重建过程,反射层析(基于距离)激光雷达成像的实质是将隔光源某一距离的有限物体表面区域反射所得的投影信息,反投影到隔光源相同此距离的所有区域。平行光反射层析与 CT 不同点在于:

1) CT 依据的是透射特征系数,只需要 $0 \sim \pi$ 的透射投影信息,而反射层析依据的是反射特征系数,需要 $0 \sim 2\pi$ 的反射投影信息。因而反射层析采样角度数限制条件

$$N_{\phi} \geq \frac{2\pi}{\Delta\phi} = 2\pi x_{\max} u_{\max}. \quad (11)$$

2) 截止频率 u_{\max} 的确定方法不同,CT 可以将投影数据通过合适的低通滤波器来确定^[12]。而在反射层析中,截止频率 u_{\max} 可由探测器和激光脉冲所确定的距离分辨率进行近似计算^[1],具体过程为:选取探测器和光脉冲二者中对对应较低的距离分辨率作为系统距离分辨率 ΔR ,转换到频域

$$\mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta R}\right)\right] = \text{sinc}(\Delta R u) = \text{sinc}(\Delta R u), \quad (12)$$

定义频域 sinc 函数第一个零点为图像频域截止频率

$$u_{\max} = 1/\Delta R. \quad (13)$$

当目标物体处于瑞利-索末菲衍射区域,到达目标的波阵面为球面波,球面波反射层析与平行光反射层析不同在于目标物体最大尺寸 x_{\max} 的计算不同。假设物体为半径 R 的区域,平行光所对应的是物体真实的最大尺寸 $x_{\max} = 2R$,而球面采样角度数 N_{ϕ} 对应的 $x_{\max 1}$ 为圆弧 $2S$,单投影上采样点数 N_p 对应的 $x_{\max 2}$ 为 $2R$,如图 3 所示。假设球面反投影角度为 2α ,球面波所对应的 $x_{\max 1}$ 为

$$x_{\max 1} = 2S = 2R\alpha(1 + 1/\sin \alpha). \quad (14)$$

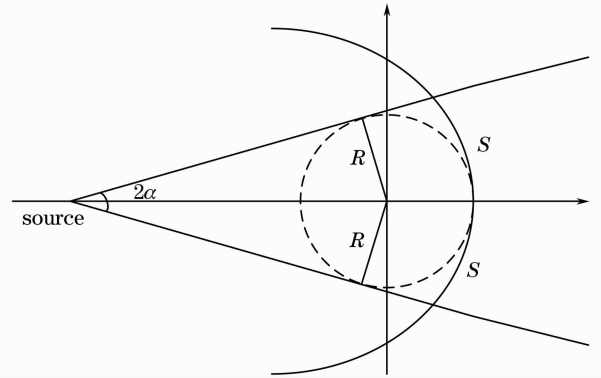


图 3 球面波反射层析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spherical wave reflective tomography

根据(10),(11),(13),(14)式,球面波反射层析所对应的采样角度数 N_{ϕ} 和单投影上采样点数 N_p 的限制条件为

$$N_{\phi} \geq 4\pi \frac{R\alpha(1 + 1/\sin \alpha)}{\Delta R}, \quad N_p \geq \frac{4R}{\Delta R}. \quad (15)$$

在满足(15)式限制条件下获取物体的球面反射投影信息 $p_s(r, \phi)$,用(6)式对获得的投影信息 $p_s(r, \phi)$ 进行滤波处理得到 $q_s(r, \phi)$ 。球面波滤波反投影重建图像

$$g_s = \sum_{i=1}^m q_s \left[\sqrt{(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i - x_0)^2 + (-x \sin \phi_i + y \cos \phi_i - y_0)^2}, \phi_i \right] \Delta \phi, \quad (16)$$

4 折线反投影

折线滤波反投影的实质是将探测器所得到的球面反射投影信息,滤波后反投影到所对应的折线上。为简化过程,假设光源点为理想点光源,如图 4 所示,在角度 ϕ_i 下,折线反投影是将弧线(对应距离 r_j) 所对应的球面投影信息反投影到折线 a, b 上。反投影角度 α 由物体所占区域半径 R 和距离 z 来确定

$$\alpha = \arcsin(R/z). \quad (17)$$

假设激光光源点处于 $(z, 0)$,可以得到相应的距离 $r_j = z - x_0, x_1 = z - r_j \cos \alpha, y_1 = r_j \sin \alpha, x_2 = z - r_j \cos \alpha, y_2 = -r_j \sin \alpha, x_0 = z - r_j, y_0 = 0$,由点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 可以确定距离 r_j 所对应的折线方程。

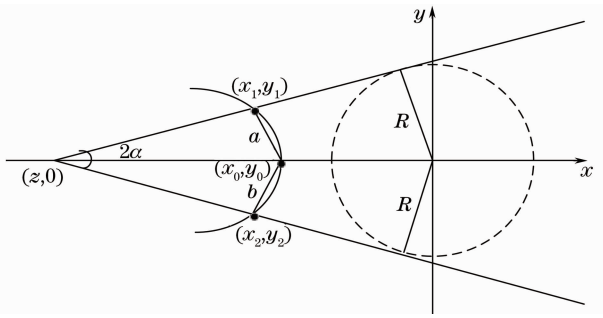


图 4 折线反投影原理示意图

Fig. 4 Schematic of broken-lines back projection

折线 a 的方程:

$$y_a(r_j - r_j \cos \alpha) = r_j \sin \alpha(x_a - z + r_j), \quad y_a > 0,$$

折线 b 的方程:

$$y_b(r_j - r_j \cos \alpha) = -r_j \sin \alpha(x_b - z + r_j), \quad y_b < 0. \quad (18)$$

反投影成像过程中,折线经过的像元都看作是反投影的区域。折线滤波反投影具体重建公式如下所示:

物体旋转角度 ϕ_i 之后,图像坐标点 $(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i, -x \sin \phi_i + y \cos \phi_i)$ 到角度 ϕ_i ,投影距离 r_j 所对应的折线的距离

$$d = \frac{|-(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i) \sin \alpha + |-x \sin \phi_i + y \cos \phi_i|(1 - \cos \alpha) + (L - r_j) \sin \alpha|}{\sqrt{2 - 2 \cos \alpha}}, \quad (19)$$

若 $d \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta R$,

$$g_{\text{FBI}}(x, y) = \sum_{i=1}^{N_\phi} \sum_{j=1}^{N_r} q_i(r_j, \phi_i) \Delta \phi, \quad (20)$$

式中 $|x|$ 表示 x 的绝对值, ΔR 为重建图像 $g_{\text{FBI}}(x, y)$ 像元间隔。

5 计算机模拟

模拟采用的物体为边长 3 m ($R = \sqrt{3}$ m) 的正三角形,如图 5 所示,与光源之间距离 z ,反投影角度 $\alpha = \arcsin(R/z)$,相对应最大尺寸 $x_{\text{max}1} = 2S = 2 \times R\alpha(1 + 1/\sin \alpha)$, $x_{\text{max}2} = 2R$ 。假设系统距离分辨率采样 $\Delta R = 0.2$ m,距离 z 的变化范围为 10~100 m,波长为 1064 nm,光源为理想点光源。根据第二部分的讨论,目标处于瑞利-索末菲衍射区域,到达目标波前为球面波。根据第三部分的讨论,球面波条件下完全重建正三角形物体,投影角度间隔和单投影采样点数应满足 $\Delta \phi \leq 1.62^\circ$, $N_\phi \geq 34.64$,模拟中 $\Delta \phi = 1^\circ$, $N_\phi = 35$ 。

在均匀光强的假设下,反射光功率信息的变化

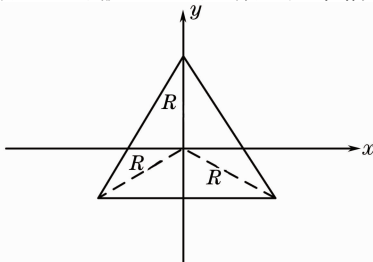


图 5 原正三角形图样

Fig. 5 Original regular triangle pattern

是不同的物体表面的反射特征系数引起的,即探测器所得到的光功率随时间的变化信息反映的是物体表面反射特征系数随物体深度的变化信息。假设目标为朗伯体,光线离散化后到达物体表面后沿原路返回到探测器中,即 $I(\theta) = I_0 \cos \theta$ 。其中 $I(\theta)$ 为与表面法线成 θ 角沿原路返回单位立体角内散射功率,面积元 dA 以 \mathbf{n} 为法向矢量,入射的激光能量密度矢量 $\langle \mathbf{S}_i \rangle$,如图 6 所示。在不考虑吸收损耗情况下,入射功率按照余弦定理散射到法向半空间,朗伯体表面的单位面积在 \mathbf{n} 方向上产生散射强度为 J ,则表面元总散射功率^[13,14]

$$P_s = \int_{\Omega} J dA \cos \theta d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int J dA \cos \theta \frac{ds}{r^2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} J dA \cos \theta \frac{r^2 \sin \theta d\theta d\varphi}{r^2} = \pi J dA. \quad (21)$$

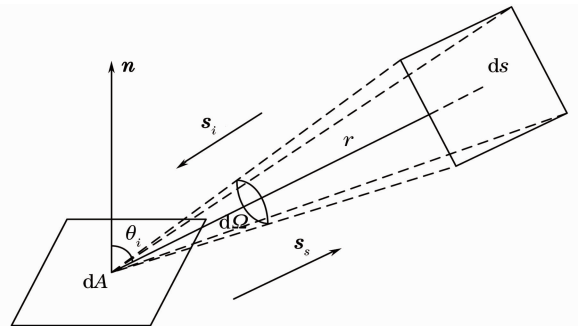


图 6 表面朗伯体散射原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of surface Lambert's body scattering

由入射功率等于散射功率得到该散射面元在入射方向的反射能流密度为

$$|\langle \mathbf{S}_i \rangle| = \frac{I(\theta)d\Omega}{ds} = \frac{LdA\cos\theta}{ds} \frac{ds}{r^2} = \frac{|\langle \mathbf{S}_i \rangle|}{\pi r^2} \cos^2\theta dA, \quad (22)$$

式中 r 为表面元距离雷达探测器的距离, ds 是立体角 $d\Omega$ 在雷达处所对应的面积元。在均匀光强照射的假设下, 由(22)式可以得到目标物体光线离散后

的反射光强功率信息。根据其所对应的距离 r , 对获得的反射光强功率信息进行排列, 最终得到模拟所需要对应角度的反射投影信息。

由上述参数设置, 获得满足物体重建所需的反射投影信息, 利用(20)式可实现反投影重建, 重建图像随距离变化如图 7 所示。

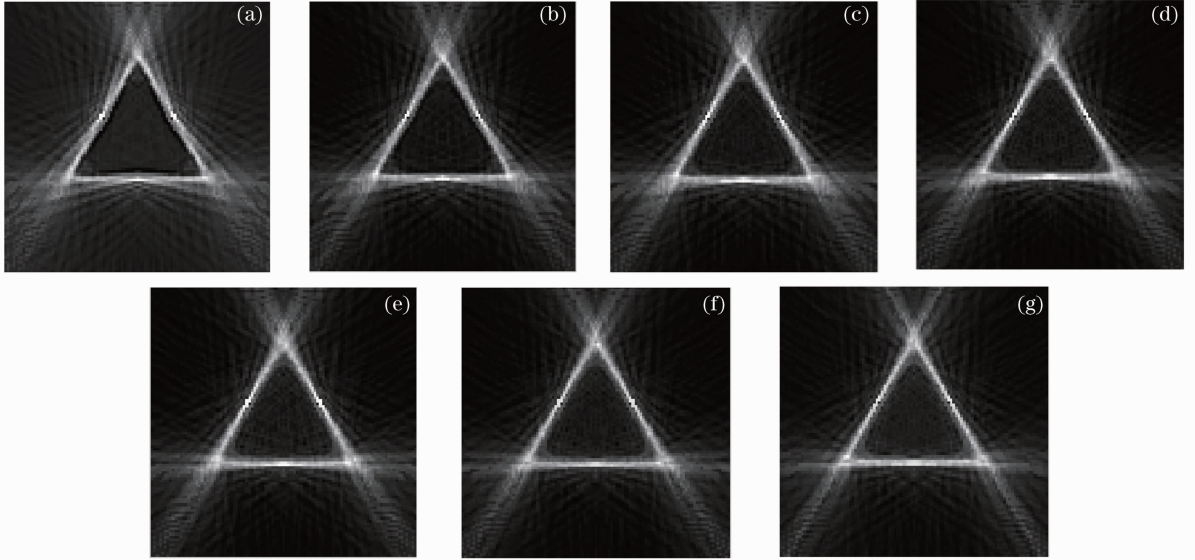


图 7 折线反投影重建图像。(a) $z=10$ m; (b) $z=15$ m; (c) $z=20$ m; (d) $z=30$ m; (e) $z=40$ m; (f) $z=50$ m; (g) $z=100$ m

Fig. 7 Images reconstructed with double broken-lines back projection method. (a) $z=10$ m; (b) $z=15$ m; (c) $z=20$ m; (d) $z=30$ m; (e) $z=40$ m; (f) $z=50$ m; (g) $z=100$ m

6 折线反投影重建图像质量评价

为了评价折线反投影重建图像质量, 采用三种评价函数: 绝对误差, 归一化均方根距离测量值, 图像相似度^[15]。 f' 为距离逐渐变大的折线重建图像, 如图 7 所示。 f 为参考图像, 如图 8 所示, 为距离 100 m 球面滤波反投影重建图像。评价函数表达式为平均绝对值误差

$$\sigma = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |f(i, j) - f'(i, j)|, \quad (23)$$

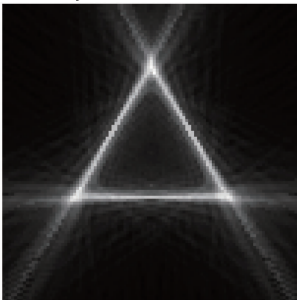


图 8 参考图像($L=100$ m 球面重建)
Fig. 8 Reference image($L=100$ m)

归一化均方根距离测量值

$$\eta = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - f'(i, j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - \bar{f}]^2} \right\}^{1/2}, \quad (24)$$

图像相似度

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i, j) - \bar{f}][f'(i, j) - \bar{f}']}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i, j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f'(i, j) - \bar{f}']^2}}. \quad (25)$$

对采用不同距离的重建图形, 分别计算以上三种评价函数测量值, 结果如图表 1 所示。

以上三种评价函数强调了图像的不同方面, 平均绝对值误差 σ 反映的是许多小误差积累对重建图像影响; 归一化均方根距离测量值 η 对较大的误差反映比较灵敏, 局部区域较大误差会导致 η 值变大; 图像相似度 ρ 反映重建图像与参考图像的相似程

度^[16]。由表 1 可以清楚看到,随着距离的变大,平均绝对值误差 σ 与归一化均方根距离测量值 η 逐渐变小,图像相似度变高。三种评价函数的变化趋势表明,模拟中随着距离的变大,折线方法的反投影重建图像伪迹减少,越来越接近于真实图像。

表 1 折线反投影不同距离重建图像质量评价

Table 1 Quality evaluations on images reconstructed with broken lines method based on different distances

Light L /m	Quality measures		
	σ	η	ρ
10	23.6878	0.6560	0.7565
15	12.8493	0.3487	0.8232
20	12.4761	0.3223	0.8457
30	11.2346	0.2828	0.8599
40	11.3624	0.2585	0.8804
50	9.9615	0.2159	0.8893
100	9.9010	0.1811	0.9147

7 结 论

当目标处于瑞利-索末菲衍射区域,光源发出光波到达目标的波阵面为球面状态。根据物体最大尺寸,激光脉冲与探测器所确定的距离分辨率,得到了球面波反投影重建约束条件。在约束条件的限制下,折线的方法可以在缩短重建时间的前提下实现物体重建。同样此算法也可应用到三维图像的重构之中,不过需要物体两维反射投影信息。值得注意的是,在模拟重建中,物体的旋转轴与旋转角度都假定已知,在实际中物体却往往做多维的复杂运动,这就需要分析目标物体与探测器的相对运动。而且并不是 360° 的投影信息都能够获得,在某些情况下,只能获得局域角度的反射投影信息。关于反射层析激光雷达的一般化的理论和体系结构可见文献[17]。

参 考 文 献

- Charles L. Matson, Eric P. Magee, Donald E. Holland. Reflective tomography using a short-pulselength laser: system analysis for artificial satellite imaging[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(9): 2811~2820
- Eric P. Magee, Charles L. Matson, David H. Stone. Comparison of techniques for image reconstruction using tomography[C]. *SPIE*, 1994, **2302**: 95~102
- Stephen D. Ford, Charles L. Matson. Projection registration in reflective tomography[C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 189~197
- Jeffrey K. Parker, E. B. Cragg, D. I. Klick *et al.*. Reflective

- tomography: image from range-resolved laser radar measurements[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(13): 2642~2643
- Frederick L. Knight, David Klick, Danette P. Ryan-Howard *et al.*. Laser radar reflective tomography utilizing a steak camera for precise range resolution [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2196~2198
- T. K. Truong, I. S. Reed. An extended version of the tomographic transform convolution for the wavefront curvature [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1987, **15**(3): 11~14
- T. K. Truong, I. S. Reed. 波阵面弯曲时层析投影变换卷积的推广[J]. *电子学报*, 1987, **15**(3): 11~14
- Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 997~1000
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 997~1000
- J. D. Gaskill. Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1978. 3501~441
- R. M. Marino, R. N. Capes, W. E. Keicher *et al.*. Tomographic image reconstruction from laser radar reflective projections[C]. *SPIE*, 1988, **999**: 248~268
- Zeng Yaguang, Xing Dachang, Fu Hongbo *et al.*. Signal process of photoacoustic tomography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 97~100
- 曾亚光, 邢达常, 付洪波 等. 光声层析成像的信号处理[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 97~100
- Zhang Dong, Dong Xiufen. The influence of $|\omega|$ filter function on nonlinear parameter imaging using filtered convolution method [J]. *Acta Acoustica*, 1995, **20**(4): 271~279
- 章 东, 龚秀芬. $|\omega|$ 滤波器对卷积滤波法进行非线性参量 B/A 成像的影响[J]. *声学学报*, 1995, **20**(4): 271~279
- Henry Stark, John W. Woods, Indraneel Paul *et al.*. Direct fourier reconstruction in computer tomography[J]. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1981, **29**(2): 237~244
- Chen Zhong, Kong Qingyan. Analysis of radar camouflage on ground weapons by using Lambert surface material [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2005, **2**(1): 11~13
- 陈 重, 孔庆颜. 朗伯表面材料实现地面目标雷达隐身的可行性分析[J]. *装备环境工程*, 2005, **2**(1): 11~13
- Zhang Leihong, Yang Yan, Zang Huaguo *et al.*. Reflective characteristics of target in laser rangefinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1001~1004
- 张雷洪, 杨 艳, 臧华国 等. 目标反射特性对激光测距的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1001~1004
- Ahmet M. Eskicioglu, Paul S. Fisher. Image quality measures and their performance [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1995, **43**(12): 2959~2965
- Zhang Dongping, Zhang Dinghua, Zhang Fengshou *et al.*. The influence of filter on the quality of image reconstruction using FBP algorithm[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2007, (9): 66~68
- 张东平, 张定华, 张丰收 等. 滤波器对滤波反投影重建图像质量的影响[J]. *机械设计与制造*, 2007, (9): 64~68
- Liu Liren. Incoherently synthetic aperture imaging ladar: architecture and algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 109~116
- 刘立人. 非相干合成孔径激光成像雷达: 体系结构和算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 109~116