

doi: 10.3788/gzxb20134201.0048

星对星激光雷达反射层析成像技术探讨

瞿福琪^{1,2}, 胡以华², 焦均均², 董彬³

(1 武汉军械士官学校, 武汉 430075)

(2 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 合肥 230037)

(3 77108 部队 59 分队, 四川 崇州 611233)

摘要:以星对星激光雷达成像为应用背景,提出了一种基于啁啾脉冲信号的反射层析成像处理方法,该方法通过激光雷达多角度回波非相干累积实现高分辨率的图像重构;分析了星对星反射层析成像的实现条件,包括成像分辨率、工作模式及成像时间.研究表明,采用本文所提出的成像方法,通过同轨道面的伴星探测方式可以满足激光雷达反射层析成像多角度探测的要求,在观测角度范围大于 60°时能够得到 0.1 m 目标分辨率,角度范围越大,分辨率越高,且成像时间与卫星轨道半径和两星距离有关.实验验证了该方法的有效性和星对星反射层析成像的可行性.

关键词:反射层析;激光雷达;星对星成像;啁啾脉冲;空间分辨率;工作模式

中图分类号:TN958

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)01-0048-6

Satellite-to-satellite Lidar Imaging Using Reflective Tomography

QU Fu-qi^{1,2}, HU Yi-hua², JIAO Jun-jun², DONG Bing³

(1 Wuhan Mechanical Technology College, Wuhan 430074, China)

(2 State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute),
Hefei 230037, China)

(3 77108 Troops and 59 Unit, Chongzhou, Sichuan 611233, China)

Abstract: Taking satellite-to-satellite lidar imaging as application background, an imaging processing method based on chirped pulse for reflective tomography lidar is presented. In this method, high precision image reconstruction is obtained by extracting projection data of different observation angle and using CBP algorithm. The condition of satellite-to-satellite lidar reflective tomography imaging is analyzed, including imaging resolution, working modes and imaging time. The results show that, the mode of accompanying satellite detecting in the same orbit plan meet the requirement of multiple angle detecting for lidar reflective tomography imaging. 0.1 meter spacial resolution can be achieved while the range of detecting angle is larger than 60 degree, and the larger the range of angle, the higher the resolution is. The imaging time depends on the satellite orbit radius and the range between two satellites. Imaging experiment validates the feasibility and effectiveness of the presented method.

Key words: Reflective tomography; Lidar; Satellite-to-satellite imaging; Chirped pulse; Spatial resolution; Working modes

0 引言

以卫星为代表的空间飞行器已经在国民经济与军事应用领域发挥着举足轻重的作用.对空间目标成像侦察能够得到目标的精细特征,以实现对其分类识别,进而有针对性的对目标进行跟踪与打击.层

析成像的概念(Tomography)最早由 D. Munson 提出^[1],通过对目标多角度的雷达波照射,利用滤波反投影技术实现目标成像.2001年,美国空军研究所首次采用 CO₂ 激光雷达实现对 514 km 处在轨卫星 0.2 m 分辨率的反射层析成像^[2],验证了采用反射层析技术实现激光雷达远距离、高准确度目标成像

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 60672154, 60908033)和安徽省自然科学基金(No. 1004060Q61)资助

第一作者:瞿福琪(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为光电信息处理技术研究. Email: qfq666@163.com

导师:胡以华(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为光电信息处理技术研究. Email: yh_hu@263.net

收稿日期:2012-01-11;录用日期:2012-01-28

的可行性,该系统采用高能短脉冲作为发射信号,对激光器本身要求极高,系统体积庞大,需大量水冷却.2010年上海光机所的金晓峰等首次采用脉冲直接探测激光雷达反射层析成像方式获得了实验室环境下锥形物体图像^[3],并研究了采用相位恢复算法实现反射层析成像雷达回波自动套准技术,取得了较好的效果^[4].反射层析技术即可应用于相干合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Lidar, SAL)成像^[1],也可应用于非相干合成孔径激光雷达^[5]成像;应用于后者时,具有成像空间分辨率与作用距离无关,只与脉冲宽度、探测器的带宽和噪音有关的优势,且对湍流不敏感.

本文通过对在轨卫星目标的探测与识别,探讨了星对星非相干合成孔径激光雷达反射层析成像技术的可行性.首先,相对于SAL的全时间-空间相干处理^[6],本文所探讨成像方式对于光频的空间相位分布和频率时间相位同步无严格要求,大大地降低了信号收集和数据处理中的技术难度,硬件结构简单;其次,卫星的绕轨或自旋运动的方式与反射层析成像的多角度雷达照射要求相一致,可以通过两星之间相对位置变化实现星载雷达多角度探测,激光雷达工作模式相对简单;再次,星对星成像可忽略大气湍流影响,因而可以选择短波长固体激光器,有利于模块化设计与实现.

1 层析成像概述

层析成像技术最初用于医学成像领域(X射线CT成像),是一种通过间接测量获得三维物体横截面各点吸收系数的技术手段,成像原理如图1.

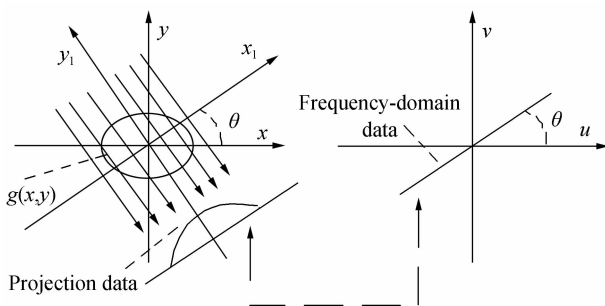


图1 层析成像原理图

Fig.1 Schematic diagram of computerized tomography

定义 $p_\theta(x_1)$ 为横截面吸收系数分布函数 $g(x, y)$ 在 θ 方向 x_1 位置上的投影数据

$$p_\theta(x_1) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta, x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta) dy_1 \quad (1)$$

式中 $p_\theta(x_1) = -\log \{ I_\theta(x_1) / I_0 \}$, I_0 为发出的 X 射线源的强度, $I_\theta(x_1)$ 为 X 射线经过截面吸收后被探测到的信号强度.层析成像能够实现的原理就在于

投影数据的傅里叶变换 $P_\theta(v_1)$ 和物体横截面吸收系数 $g(x, y)$ 的傅里叶变换 $G(u, v)$ 存在式(2)所示关系,即投影的中心频谱定理

$$P_\theta(v_1) = G(u \cos \theta, v \sin \theta) \quad (2)$$

由式(2)可知,不同 θ 角度的投影数据的一维傅里叶变换值等于物体的二维傅里叶变换在该 θ 角度的直线上的值.因此,当知道了物体所有方向的投影数据,就知道了物体的整个频谱,从而可以重现物体图像.

2 激光雷达反射层析卫星成像

卫星目标在一定的轨道上绕地球运行,其轨道可以认为是已知的,此外,卫星常采用一定的方式进行姿态控制(如自旋稳定和三轴稳定等),其姿态在成像时间内相对确定,可看作半合作目标,通过控制雷达照射角度和计算两星相对的空间几何关系可以实现对目标星的层析成像扫描,完成激光雷达对目标星的反射层析成像.已见报导的激光雷达反射层析成像主要采用简单脉冲发射信号,难以克服高准确度与远距离探测之间的矛盾^[7],限制了成像分辨率.本文提出一种基于啁啾脉冲信号的反射层析成像处理方法,该方法以大时间-带宽积的啁啾信号(文献[8]中的室内验证系统带宽达到了 1.25 THz)为发射信号,兼顾了远距离和高准确度探测的要求.

由于两星之间存在相对旋转运动,平动补偿^[9]后,建立如图2所示的基于转台模型的星对星激光雷达反射层析成像几何场景.

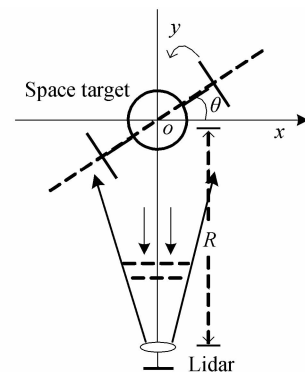


图2 基于转台模型目标反射层析成像

Fig.2 Reflective tomography imaging schematic diagram based on turntable model

当卫星目标相对于雷达转动角速度较低时,图2转台模型满足“一步一停”的近似条件下,下面对满足该条件的反射层析成像处理方法进行推导.

设啁啾脉冲发射信号表达式为

$$s(t) = A(t) \exp(i2\pi[f_c t + \gamma t^2 / 2]) \quad (3)$$

式中, f_c 表示载频, γ 为调频斜率, $A(t)$ 设为矩形发射信号脉冲波形,脉冲宽度为 T_p .

图2中,雷达接收的来自以点 (x_0, y_0) 为中心的微面元的反射回波信号表示为

$$r_0(t) = a(x_0, y_0) A \left(t - \frac{2R_0}{c} \right) \exp \left\{ i2\pi \left[f_c \left(t - \frac{2R_0}{c} \right) + \frac{1}{2} \gamma \left(t - \frac{2R_0}{c} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (4)$$

式中, $a(x_0, y_0)$ 表示该点处的目标反射率, R_0 表示该点与雷达的距离, c 代表光速。

由图2可知,目标上与雷达距离相等的点位于一段以雷达为中心的圆弧上. 对于远距离探测,圆弧可看作一条直线. 此时,直线上的点与雷达的距离 $R_0 \approx R + y_0$, 参考式(1), 设 $p_\theta(y)$ 为 θ 角度时目标反射率分布函数 $a(x, y)$ 沿过 y 点且与雷达视线垂直的直线的积分, 即 $a(x, y)$ 在 θ 方向 y 位置上的投影数据. 则与雷达视线垂直并经过 y_0 的线微分区域的反射回波可表示为

$$r_1(t) = p_\theta(y_0) A \left(t - \frac{2(R+y_0)}{c} \right) \exp \left\{ i2\pi \left[f_c \left(t - \frac{2(R+y_0)}{c} \right) + \frac{1}{2} \gamma \left(t - \frac{2(R+y_0)}{c} \right)^2 \right] \right\} dy \quad (5)$$

对回波信号进行相干接收(雷达中的解线调频方式)并对接收后信号进行距离向脉冲压缩处理^[10]得到

$$\begin{aligned} \overline{r}_1(f_r) &= p_\theta(y_0) T_p \sin c \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma y_0}{c} \right) \right] \cdot \\ &\exp \left\{ -i \frac{4\pi}{c} f_c y_0 \right\} \exp \left\{ i \frac{4\pi}{c^2} \gamma y_0^2 \right\} \cdot \\ &\exp \left\{ -i \frac{4\pi}{c} f_r y_0 \right\} dy \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知,变换得到的是在频率 $f_r = -2\gamma y_0/c$ 处的 $\sin c$ 状窄脉冲,脉冲宽度为 $1/T_p$.

由于采用非相干角度累积,忽略相位项,将式(6)取模得包络信息

$$r_1(f_r) = T_p |p_\theta(y_0)| \left| \sin c \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma y_0}{c} \right) \right] \right| dy \quad (7)$$

考虑到对目标上所有经反射率调制的回波进行相干压缩处理,在投影角度 θ 时,实际得到回波信号处理后的包络信息表示为

$$r(f_r) = \int T_p |p_\theta(y)| \left| \sin c \left[T_p \left(f_r + \frac{2\gamma y}{c} \right) \right] \right| dy \quad (8)$$

式中,积分区域取目标尺寸范围. 由式(8)可知,经回波处理后,输出信号沿频率轴的幅值与目标投影数据沿距离向的模值成比例,在距离向受到脉冲压缩后 $\sin c$ 状窄脉冲的模糊,因此可以通过对式(8)的处理得到目标在 θ 角度的投影数据.

由式(8)可知,当 $f_r = -2\gamma y_0/c$ 时, $r_1(f_r)$ 取得最大值

$$r_1(f_r)_{\max} = T_p |p_\theta(y_0)| dy \quad (9)$$

式(9)表示 y_0 处目标反射率分布函数的投影数据与 $f_r = -2\gamma y_0/c$ 时压缩信号的幅值成正比. 因为 y_0 是任意的,因此,将 $r(f_r)$ 沿 f_r 轴压缩 $-c/2\gamma$ 倍可得到沿距离向的目标投影数据

$$P_\theta(y) = |p_\theta(y)| = r(y|y = -cf_r/2\gamma)/T_p \quad (10)$$

与医学层析成像相似,由于卫星目标相对于雷达的转动,可以得到不同角度的投影数据,由式(2)可知,不同角度的投影数据理论上即可实现图像的重构.

本文采用经典卷积反投影算法(CBP)实现目标图像的重构^[11],直角坐标系下点 $(r \cos \varphi, r \sin \varphi)$ 处的目标反射率在极坐标下可表示为

$$a(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{N_\theta} P_k(y) h_f(r \cos(\varphi - \theta_k) - y) dy \quad (11)$$

式中, N_θ 表示总投影角度数, $P_k(y)$ 表示第 k 个角度时的投影数据, $h_f(\cdot)$ 表示卷积反投影算法中用于降低噪声的时域滤波函数.

3 星对星激光雷达反射层析成像分析

3.1 成像分辨率

成像分辨率与雷达信号参量、探测角度范围的关系是激光雷达反射层析成像的关键问题,决定了激光雷达对卫星成像应用的边界条件. 卷积反投影算法重建图像的本质是把取自有限空间的投影数据均匀的回抹(反投影)到射线所及的无限空间的各点上^[12],不可避免的引入星状伪迹噪音,伪迹噪音通过滤波函数加以抑制.

当连续的观测角度范围为 $\Delta\theta$, 目标反射率分布函数可写成

$$a(r, \varphi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\varphi} d\theta [P_\theta(y) * h_f(y)]_{y=r \cos(\varphi-\theta)} \quad (12)$$

反射层析成像的分辨率可以通过目标的点扩散函数加以描述,由式(12)可得,图像重构过程的点扩散函数极坐标表示为

$$p(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\varphi} h_f(r \cos(\varphi-\theta)) d\theta \quad (13)$$

由式(13)可知,理想点目标重构图像的分布情况由滤波函数和观测角度范围大小决定. 为了说明激光雷达反射层析成像的分辨率与观测角度大小的关系,对相距为 0.1 m 的两个理想点目标成像进行仿真,激光波长设为 1.5 μm ,发射信号带宽为 2 GHz,采用典型的 R-L 滤波函数^[13],该滤波函数具有高的计算效率和空间分辨率,仿真结果如图3、图4.

由图3、图4可知,观测角度范围与反射层析成像的距离分辨率无关,主要决定了方位向分辨率大小. 这是因为,根据反射层析成像原理,反射层析雷达回波数据反投影所产生的伪迹沿与雷达探测方向

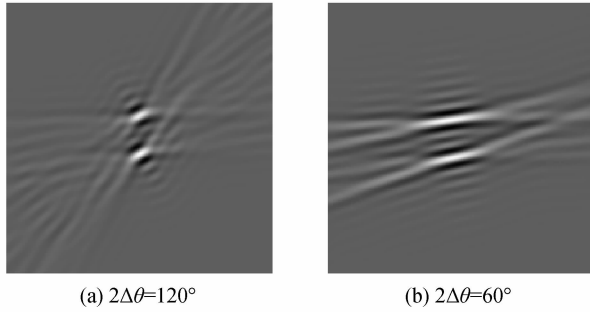


图 3 不同观测角范围距离向上成像

Fig. 3 Range imaging at different range of projection angle

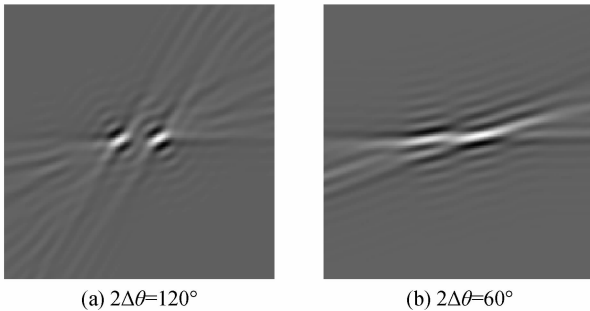


图 4 不同观测角范围方位向上成像

Fig. 4 Azimuth imaging at different range of projection angle 相垂直的方向分布,即伪迹噪音沿方位向影响图像重构的准确度.在所设仿真条件下,方位向分辨率达到 0.1 m 的条件为观测角度范围 $\Delta\theta \geq 60^\circ$.由式(6)可知,雷达在距离向分辨率由回波距离压缩处理后 $\sin c$ 状窄脉冲宽度决定,因为频率与距离关系为 $f_r = -2\gamma y/c$,计算可得距离向分辨率为 $\rho_r = c/2B$,其中, $B = \gamma T_p$,表示发射线性调频信号带宽.

3.2 工作模式设计

大量对地姿态稳定卫星在绕地飞行的过程中,需要时刻调整自己的姿态.当位于载星平台上的激光雷达对目标星实施反射层析成像时,目标星会在激光雷达视线方向上形成相应的转动分量.反射层析激光雷达正是利用目标星相对于雷达的大范围角度转动对其进行多角度观测而成像的.因此,利用星载激光雷达对目标星实施反射层析成像主要采用聚焦模式.工作方式设计为伴星探测方式,为了完成对目标星某一确定成像面的多角度观测,以减少成像模糊,载星轨道应该选取与目标星轨道要素相近的伴随轨道,为了简化两星相对运动状态,设计载星轨道位于目标星轨道平面内不同高度处,轨道高度可以根据激光器能量、成像时间等系统参量具体设置,成像过程如图 5.

为了减小成像距离,同时尽量降低立体目标成像时的遮掩效应^[14],选择在两星相距最近距离两侧对称范围内进行成像探测,雷达在载星与目标星相

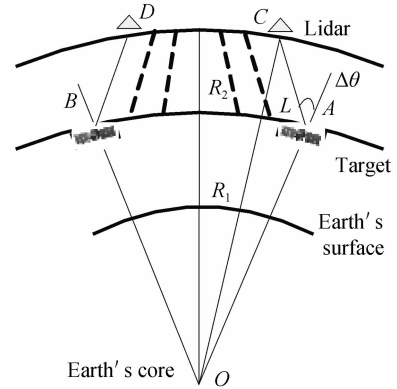


图 5 伴星探测示意图

Fig. 5 Schematic diagram of companion satellite detection

对运动过程中完成多角度探测,成像区域为 ABCD 所形成的梯形.图 5 中, R_1, R_2 分别为目标星与载星的轨道半径(地球半径与轨道高度之和), $\Delta\theta$ 为成像观测角度范围的一半, L 为成像过程中两星最大相距距离.

3.3 成像时间

在发射信号带宽确定的情况下,激光雷达反射层析成像的分辨率主要由对目标的观测角度范围大小决定.在图 5 的工作模式下,根据成像分辨率要求计算反射层析成像所需的成像时间.

设观测角度范围为 $2\Delta\theta$,所需成像时间表示为 T .在图 5 中, $\angle CAO = 180 - \Delta\theta$, $\angle COA = (\omega_1 - \omega_2)T/2$,其中 ω_1, ω_2 分别表示目标星和载星的对地角速度.

根据开普勒第三定律,可得目标星与载星的角速度差为

$$\omega_1 - \omega_2 = \sqrt{\mu/R_1^3} - \sqrt{\mu/R_2^3} \quad (14)$$

式中, μ 地球的地心重力常量,大小为 $3.986\ 005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$.在 $\triangle AOC$ 中,已知两边和一个角度值,利用余弦定理计算得

$$L = -R_1 \cos \Delta\theta + \sqrt{R_1^2 \cos^2 \Delta\theta - (R_1^2 - R_2^2)} \quad (15)$$

根据正弦定理可知

$$\frac{L}{\sin [(\omega_1 - \omega_2)T/2]} = \frac{R_2}{\sin (180 - \Delta\theta)} \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)并整理可得

$$T = \frac{2}{\omega_1 - \omega_2} \arcsin \left[\sin (180 - \Delta\theta) \times \left(\frac{\sqrt{R_1^2 \cos^2 \Delta\theta - (R_1^2 - R_2^2)} - R_1 \cos \Delta\theta}{R_2} \right) \right] \quad (17)$$

由式(17)可知,成像时间取决于与成像准确度要求相对应的观测角度大小、目标星轨道高度及两星轨道距离.在轨道确定情况下,观测角度越大,成像分辨率越高;观测角度确定情况时,轨道越高,成

像时间越长.

4 星对星成像验证实验

仿真参量设计为:目标星轨道高度为 100 km, 已知地球半径为 6 370 km, 则 $R_1=6\ 470$ km, 目标星与载星距离为 100 km, 载星轨道高度设为 $R_2=6\ 570$ km, 目标尺寸为 10 m, 发射信号带宽为 2 GHz, 观测角度间隔为 2° , 每个观测角度回波数据按 2 cm 的距离步进采样, 发射激光信号波长为 $1.5\ \mu\text{m}$. 此外, 为便于说明, 假设目标具有均匀反射表面, 后向反射率为 0.5. 当要求分辨率为 0.1 m 时, 根据 3.1 节分析可知, 所需观测角度至少为 60° , 根据 3.2 节计算得最小成像观测时间为 635.4 s. 图 6 为用于仿真的卫星数据模型, 两个太阳能板连接在卫星主体两侧, 该模型绕垂直于纸面的轴旋转, 激光沿纸面照射目标.

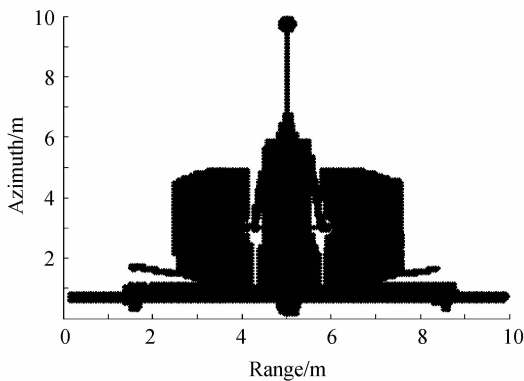


图 6 卫星仿真模型

Fig. 6 Simulation model of satellite

本文选取对观测角度范围为 60° 和 120° 两种情况进行仿真成像, 结果如图 7.

图 7 表明, 角度范围为 120° 时, 图像较清晰, 范围为 60° 时, 由于观测角度范围的严重不足, 成像结果比较模糊, 目标底部信息缺失严重, 但尚能看清目标总体轮廓, 可以通过图像处理技术进一步提取卫星目标的轮廓及特征参量.

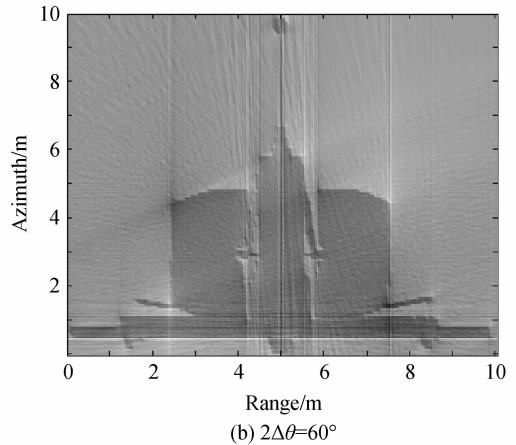
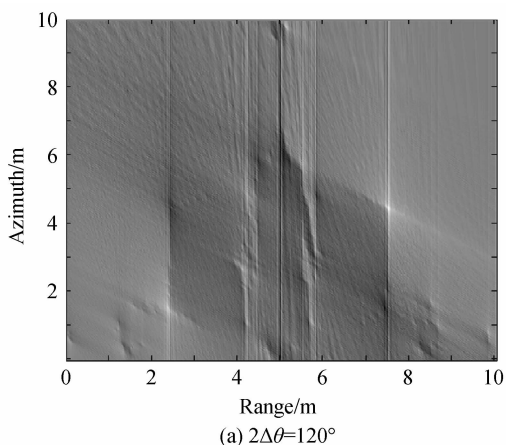


图 7 不同观测角度范围的仿真成像

Fig. 7 Imaging experiment at different range of projection angle

5 结论

卫星与卫星之间的相对转动满足反射层析成像需多角度观测的条件, 以星对星激光雷达反射层析成像为应用背景, 本文提出并推导了一种基于啁啾脉冲信号的反射层析成像处理方法, 兼顾了远距离和高准确度探测的要求, 同时由于不同角度回波数据的非相干累积处理, 该方法对信号的相位相干性要求较低; 分析了星对星反射层析成像基本条件, 包括成像分辨率、工作模式设计及成像时间. 仿真实验表明, 以同轨道面不同高度的伴星探测方式, 通过本文所提方法可以在满足分辨率要求所需的成像时间内实现星对星远距离高准确度成像. 由于实现图像重构的 CBP 算法所固有的伪迹噪声影响, 图像的高方位分辨率依赖于大的雷达观测角度范围. 下步需研究实现短成像时间高分辨率反射层析成像, 重点研究小观测角度条件下的图像重构算法.

参考文献

- [1] JENKINS D M D. A topographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, **71**(8): 917-925.
- [2] MATSON C L, MOSLEY D E. Reflective tomography reconstruction of satellite features-field results[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(14): 2990-2996.
- [3] JIN Xiao-feng, SUN Jian-feng, YAN Yi, *et al.* Small system imaging simulation for reflective tomography laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 747-752. 金晓峰, 孙建峰, 严毅, 等. 反射层析激光雷达小系统成像模拟[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 747-752.
- [4] JIN Xiao-feng, SUN Jian-feng, YAN Yi, *et al.* Application of phase retrieval algorithm in reflective tomography laser radar imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(1): 012801-1:4.
- [5] LIU Li-ren. Incoherently synthetic aperture imaging lidar: 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.

- [6] 斯廷森 G W. 机载雷达导论[M]. 吴汉平,译. 2 版. 北京:电子工业出版社,2005:19-21.
- [7] 戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2010:210-211.
- [8] GUO Liang, XING Meng-dao, ZHANG Long, *et al.* Research on indoor experimentation of range SAL imaging system[J]. *Science China, Series E, Technological Science*, 2009, **39**(10): 1678-1684.
郭亮,邢孟道,张龙,等. 室内距离向合成孔径激光成像的实验研究[J]. 中国科学, E 辑:技术科学, 2009, **39**(10):1678-1684.
- [9] CHEN C, ANDREWS H C. Targer-motion-induced radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, **16**(1): 2-14.
- [10] GUO Liang, XING Meng-dao, LIANG Yi, *et al.* Synthetic aperture imaging ladar imaging algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 448-452.
- 郭亮,邢孟道,梁毅,等. 合成孔径成像激光雷达成像算法研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(2):448-452.
- [11] MATSON C L, MAGEE E P, HOLLAND D E. Reflective tomography using a short-pulse length laser: system analysis for artificial satellite imaging [J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(9): 2811-2820.
- [12] 何勇,罗辞勇,徐征,等. 电阻抗成像原理[M]. 北京:科学出版社,2009:120-124.
- [13] RAMACHANDRAN G N, LAKSHMINARAYANAN A V. Three dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: application of Fourier transforms[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1971, **68**: 2236-2240.
- [14] XUEMIN J, LEVINE R Y. Bidirectional reflectance distribution function effects in ladar-based reflection tomography[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(20): 4191-4200.

• 下期预告 •

光子晶体定向耦合三波长功分器

黎磊,桂强,元浩,唐发林

(江西师范大学 物理与通信电子学院 江西省光电子与通信重点实验室, 南昌 330022)

摘要:以二维三角晶格光子晶体为研究对象,在该光子晶体中引入两行以一行耦合介质柱为间距的平行单模线缺陷波导.通过分析和研究光子晶体波导耦合结构的耦合和解耦合特性,发现在不同频率下耦合波导的耦合长度不同.利用平面波展开法和定向耦合原理计算了在不同入射光频率下,缺陷波导间耦合波导的耦合长度,设计了一种新型超微光子晶体波导耦合型三波长功分器,实现了归一化频率分别为 0.369、0.394、0.435 的光波的分束效果.采用时域有限差分法验证了该功分器具有很好的功率分配效果.本文结果有助于光子晶体新型滤波器、定向耦合器、波分复用器、偏振光分束器以及光开关等光子器件的研究.

关键词:光学器件;光子晶体;耦合波导;功分器