

doi:10.3788/gzxb20134208.0973

基于聚束逆合成孔径激光成像雷达组的三维目标重构的研究

刘智超, 杨进华, 王晨阳, 赵鑫

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130000)

摘 要: 为了在聚束逆合成孔径激光雷达成像中获得三维重构需要的高程信息量, 设计了基于聚束逆合成孔径激光成像雷达组的目标重构算法. 系统在等边三角形三个顶点上分布安置逆合成孔径激光雷达, 根据位置和倾角的关系, 由另两个激光雷达提供三维目标重构的高程信息. 计算了被测目标任意方向进入系统探测区域后, 三个逆合成孔径激光雷达对应的高程函数表达式. 通过仿真实验可知, 被测目标的速度对高程函数没有显著影响. 而逆合成孔径激光雷达与目标的角度关系对高程信息变化有显著贡献, 在采用不同位置高程信息融合的过程中, 选择逆合成孔径激光雷达的分布方式对回波数据的利用率有影响. 由于不同角度变化产生了连续变化高程信息, 利用该方法可以有效地通过获取高程信息重构目标三维图像.

关键词: 遥感; 逆合成孔径激光雷达; 三维重构; 高程探测

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0973-5

Research on Three-dimensional Target Reconstruction Based on Spotlight Mode Inverse Synthetic Aperture Imaging Ladar Group

LIU Zhi-chao, YANG Jin-hua, WANG Chen-yang, ZHAO Xin

(School of Optoelectronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: In order to obtain the information of elevation which three-dimensional reconstruction needs in the spotlight mode inverse synthetic aperture ladar imaging, a target reconstruction algorithm was designed based on spotlight mode inverse synthetic aperture imaging ladar groups. The systems were placed inverse synthetic aperture ladar in the three vertices of an equilateral triangle. According to the relationship between the position and the inclination angle, the elevation information for reconstructing three-dimensional target could be provided by another two ladars. The elevation functions of three inverse synthetic aperture ladars were calculated when the measured target flied into detects area of the system in any direction. Simulation result shows that the speed of the measured target has no significant effect on the elevation function. Angular relationships of inverse synthetic aperture ladar and target have a significant contribution to the changes in elevation information. In the process of information fusion for different position elevation, the selection of distributed manner for inverse synthetic aperture ladar impacted the utilization of echo data. Because different angles change produces continuous changes in elevation information, this method can effectively reconstruct target three-dimensional image by elevation information obtained.

Key words: Remote sensing; Inverse synthetic aperture ladar; Three-dimensional reconstruction; Elevation detection

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60405006)资助

第一作者: 刘智超(1984-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为合成孔径激光雷达等. Email: s20070384@163.com

导师(通讯作者): 杨进华(1969-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光电测试及机器视觉. Email: yangjh@cust.edu.cn

收稿日期: 2013-01-29; 录用日期: 2013-03-11

0 引言

激光雷达^[1]是一种高灵敏度雷达,不但可以跟踪探测目标,获得方位、速度等信息,还能探测隐身飞机、化学战剂等,所以被应用于航空遥感、卫星探测、大气监测、军事侦察等众多领域.合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术应用与被测目标做相对运动的关系,将小孔径天线不同位置采集的数据通过信号处理的方法合成为大孔径天线信号,从而获得高空间分辨率.为了能实现地面对空间目标探测时达到厘米级的空间分辨率,将激光雷达与合成孔径技术相结合是必然趋势,即合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL)^[2-4].

世界各国的科研机构被合成孔径激光雷达的巨大优势及广阔前景所吸引,早期的SAL研究主要是简单验证其基本原理^[5].1970年,美国空军研究实验室^[6]T. S. Lewis用中心波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器作为辐射源,实现了采用红外波段获得合成孔径成像数据.林肯实验室^[7]在美国空军支持下于1994年研制成功的固体激光合成孔径雷达实验装置(Nd:YAG激光器,工作波长 $1.06\ \mu\text{m}$),系统以外差方式进行工作.1998年,日本邮政与电信部通信研究实验室的Shin Yoshikado等^[8]人使用 CO_2 激光器作为激光光源,对近红外波段实现合成孔径雷达二维成像的可行性进行了验证.在此基础上,该团队还完成了一个一维的合成孔径激光雷达系统,该系统的激光光源的中心波长为 $10\ \mu\text{m}$.2005年,美国国家航空航159天局^[9](NASA)研制了世界上第一台扫描式二维合成孔径激光雷达系统,也是首次使用移动的孔径对漫散射目标成像,工作方式为逆合成孔径激光雷达方式,其径向空间分辨率为 $90\ \mu\text{m}$,距离向空间分辨率为 $170\ \mu\text{m}$.2010年,Casey J. Pellizzari等^[10]人对逆合成孔径激光雷达在地球同步轨道上的空间目标成像的信噪比进行了研究,建立了通过二维傅里叶变换提高图像信噪比的数学模型.2011年,Wavefront公司^[11]展开了通过二维光谱数据构建三维立体图像的项目研究,使合成孔径激光雷达成像技术又迈向了更新的领域.虽然我国在合成孔径激光雷达领域起步较晚,技术工艺等多方面与世界先进国家有较大差距,但也先后有多家研究团体和高等院校开展了合成孔径激光雷达成像理论和原理样机的研究,其中包括西安电子科技大学、中国科学院电子学研究所、中国科学院上海光机所、中电集团二十七所、成都电子科技大学等^[12-13].

针对合成孔径激光雷达重构目标三维图像而言,主要是对高程信息获取的方法.国内外主要手段是多基线的工作方式,无论是改变卫星轨道还是多卫星联合使用的方式,由于其工作原理所决定,都存在探测时差和高程信息采样不均导致的失真问题^[14-15].本文采用逆合成孔径激光雷达针对地面对空间目标的三维合成图像重构提出了一种新的探测模型,由几个等距分布的激光雷达构成等边多边形的结构组成激光雷达探测组(本文采用等边三角形分布方式).该方法的主要目的是使多个探测器在同一平面上提供不同的高程信息分量,从而实现无探测时差且高程采样均匀的探测需要.

1 基本原理

图1(a)为合成孔径激光雷达工作原理示意图,图1(b)为逆合成孔径激光雷达合成孔径激光雷达工作原理示意图.当激光器与被测目标各参量、探测

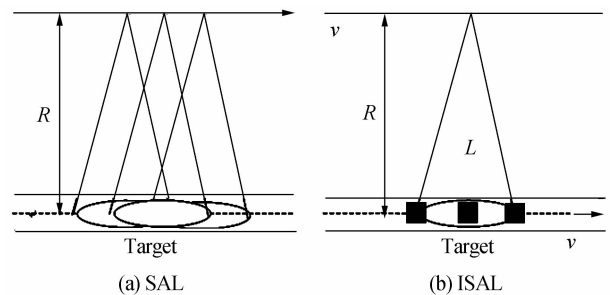


图1 合成孔径激光雷达工作原理

Fig. 1 Schematic of synthetic aperture ladar

距离与目标速度都一致时,二者在两个方向上的空间分辨能力相同,即逆合成孔径激光雷达的合成孔径长度可表示为

$$L = \frac{\lambda}{D}R \quad (1)$$

式中, D 为真实孔径, R 为激光雷达与目标间的斜距.对应的有逆合成孔径激光雷达的方位分辨率和距离分辨率分别为

$$\begin{cases} \rho_{\text{方位}} = \frac{D}{2} \\ \rho_{\text{距离}} = \frac{c}{2B} \end{cases} \quad (2)$$

即方位分辨率只与天线尺寸有关,与距离波长无关;距离分辨率只与发射信号带宽(B)有关.

2 系统设计

2.1 等距逆合成孔径激光雷达组

对于合成孔径激光雷达而言,要实现三维图像重构,必须获取变化的高程信息,传统方法是采用多基线的工作方式,即几个卫星或同一卫星重复飞过

被测目标上空,每次飞行的轨迹只在高程上有等间距的变化,相当于高程方向等间距的采样,从而反演目标高度方向的信息.对于等距逆合成孔径激光雷达组而言(本设计中采用等边三角形),由于不同位置激光雷达对于目标的高程分量是不同的,所以在同一时刻采集的三组数据包含不同的高程信息.

当被测目标从 K 位置移动到 K' 位置时,不仅为合成孔径提供了有效行程,同时也产生了相对高程变化,相比单独一个激光雷达无法区分高程变化是有高度变化产生还是由目标位移产生而言,因为等距逆合成孔径激光雷达组中的多个激光雷达的位置是已知的,所以可以通过位置关系推算出目标的高程变化量,从理论上提供了连续的高程变化信息(实际要考虑目标位移量的最小分辨能力,即实际情况是获得阶梯变化的高程信息,但该信息量远大于多基线方式,且均匀采样能力更强).

被测的空间目标飞行轨迹为直线 k 方向,与 x 轴正方向平行且在 xOy 平面,由于角任意(也等价于 x 轴与 AB 延长线可以成夹角任意),所以对于任意的飞行轨迹都可以通过平移的方法将飞行轨迹 k 轨迹上,即推导 k 轨迹下逆合成孔径激光雷达三维成像的数学模型具有空间目标任意位置三维成像的普遍意义.设在地面上一个半径为 r 的圆上等边三角形的三个顶点的位置上分别有三台逆合成孔径激光雷达.此时 $ISAL_1$ 所在位置点 A 与圆心 O 的连线与 x 轴的夹角为 θ , k 直线到平面 xOz 的距离为 d .直线 k 与 y 轴的交点为 O' .设 P_1, P_2, P_3 分别是 A, B, C 三点到 x 轴的垂点.设被测目标的表面函数为 $y(x, z)$,表面反射系数函数为 $\rho(x, y, z)$,由于空间目标和激光雷达的距离远大于目标几何尺寸,所以目标对于激光雷达而言可以近似认为是无穷远处的平行光.由于对于 $ISAL_1$ 而言,是从 KK' 远小于 AK ,所以 AK, BK, CK 可以分别看作 $ISAL_1, ISAL_2, ISAL_3$ 的斜距.由于斜距不同所以对应的高程分量也不同,即提供了两个高程分量信息,当目标每改变一个最小位移识别量时,其可以产生两个高程变化分量.

2.2 高程信息的获取

如图 2 所示,当目标处于 O' 位置时为特殊情况,等价于单独一个 $ISAL$ 的工作效果,当目标在运动轨迹 k 直线上任意 K 位置时为一般情况.通过几何三角关系可知, $ISAL_1$ 的斜距为

$$R_1 = AK = \sqrt{AP_1^2 + P_1K^2} = \sqrt{(r \sin \theta)^2 + r \cos \theta + OQ)^2 + d^2} \quad (3)$$

同理可得, $ISAL_2$ 和 $ISAL_3$ 的斜距分别为

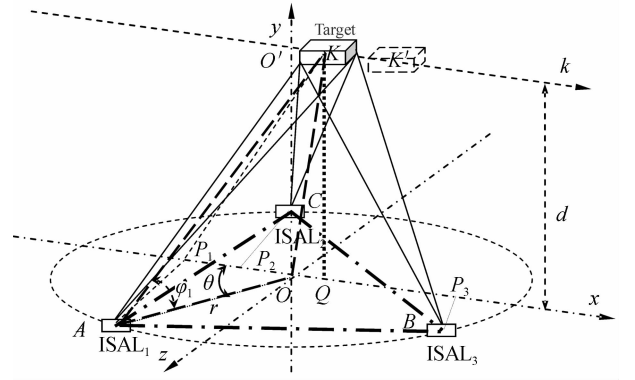


图 2 等边三角形逆合成孔径激光雷达组工作原理
Fig. 2 Schematic of equilateral triangle ISAL group

$$R_2 = CK = (CP_2^2 + P_2K^2)^{1/2} = [(r \sin (120^\circ - \theta))^2 + (r \cos (120^\circ - \theta) + OQ)^2 + d^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$R_3 = BK = (BP_3^2 + P_3K^2)^{1/2} = [(r \sin (60^\circ - \theta))^2 + (r \cos (60^\circ - \theta) + OQ)^2 + d^2]^{1/2} \quad (5)$$

在此基础上,通过已知的 $ISAL$ 组位置为和建立函数关系,即

$$OK^2 = AO^2 + AK^2 - 2AO \cdot AK \cos \phi_1 = r^2 + AK^2 - 2rAK \cos \phi_1 \quad (6)$$

$$OK^2 = d^2 + OQ^2 \quad (7)$$

将方程(6)和(7)合并得

$$d^2 + OQ^2 = r^2 + AK^2 - 2rAK \cos \phi_1 \quad (8)$$

由三角关系有

$$\begin{cases} AP_1 = r \sin \theta \\ AK^2 = (r \sin \theta)^2 + (r \cos \theta + OQ)^2 + d^2 \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)带入式(8)有

$$r + \cos \theta OQ = \sqrt{r^2 + 2rOQ \cos \theta + OQ^2 + d^2} \cdot \cos \phi_1 \quad (10)$$

简化后得

$$\phi_1 = \arccos \frac{r + OQ \cos \theta}{\sqrt{(r + OQ \cos \theta)^2 + d^2}} \quad (11)$$

同理可得

$$\phi_2 = \arccos \frac{r + OQ \cos (120^\circ - \theta)}{\sqrt{(r + OQ \cos \theta (120^\circ - \theta))^2 + d^2}} \quad (12)$$

$$\phi_3 = \arccos \frac{r + OQ \cos (60^\circ - \theta)}{\sqrt{(r + OQ \cos \theta (60^\circ - \theta))^2 + d^2}} \quad (13)$$

到目前为止,已将三个 $ISAL$ 对目标的空间角度表达成关于 r, OQ, θ 和 d 的函数形式.其中, r 可以通过等边三角形位置距离关系得到,即为已知量; OQ 是目标在飞行直线 k 上某点到基点 O' 的距离.因为 O' 点处具有三个 $ISAL$ 采集的数据的特殊性,所以目标经过的 O' 点的时刻可以很容易地被标记,而目标的飞行速度是可测的,则 OQ 是可求的; θ 是 AO 与 x 轴的夹角,也等于直线 AB 与飞行轨迹在地面投影直线的夹角加 30° ,而目标的飞行轨迹是

可求的,所以对应位置的 ϕ_1 也是可求的; d 就是 OO' , 在 r 和斜距已知的条件下是可求得. 综上所述, 对于任意位置的被测目标的三个空间角是可求的, 则对于三个 ISAL 而言被测目标的表面反射系数函数分别为 $\rho(x, y, z) \cos \phi_1$ 、 $\rho(x, y, z) \cos \phi_2$ 和 $\rho(x, y, z) \cos \phi_3$, 则此时的表面反射系数函数可以看作不同角度上不同高程信息产生的表面反射率函数, 即由此获得三维图像所需的高程信息.

要指出的是, 不是 k 轨迹上每个位置都可以获取对应的高程分量信息的, 即 OQ 需要满足一定的条件, 该值至少是距离向分辨率的整数倍, 且同时满足使三个 ISAL 探测系统都产生可探测的变化量. 其会受到 ISAL 探测性能、大气参量、卫星速度等多个参量的影响, 所以不是连续高程信息采集, 但比多基线高程信息采集方式数据量要大得多, 且均匀性、相关性更好.

3 仿真分析

3.1 高程分量重构算法

在有了高程信息的条件下, 就可以对获得被测目标的三维重构了. 设从 O' 开始 (x 是可使高程产生变化的最小变量, 也等于 N 倍的 OQ). 当被测目标沿轨迹 k 从点 O' 飞到点 K' , 三个 ISAL 得到的不同高程点应该有 $3N-2$ 个. 这些高程点对应的距离分别表示为三组.

对 ISAL₁ 有

$$h_{1i} = d \arcsin \left[\arccos \frac{4 + N_i \Delta x \cos \theta}{\sqrt{(r + N_i \Delta x \cos \theta)^2 + d^2}} \right] \quad (14)$$

对 ISAL₂ 有

$$h_{2i} = d \arcsin \left\{ \arccos \left[\frac{r + N_i \Delta x \cos (120^\circ - \theta)}{\sqrt{(r + N_i \Delta x \cos (120^\circ - \theta))^2 + d^2}} \right] \right\} \quad (15)$$

对 ISAL₃ 有

$$h_{3i} = d \arcsin \left\{ \arccos \left[\frac{r + N_i \Delta x \cos (60^\circ - \theta)}{\sqrt{(r + N_i \Delta x \cos (60^\circ - \theta))^2 + d^2}} \right] \right\} \quad (16)$$

式中, $N_i = 0, 1, 2, \dots$. 将三组距离数据按照大小排列, 即获得高程向采样数据. 对此数据分布仿真分析, 观察其高程向覆盖范围、均匀性等证明其可行性.

3.2 仿真结果分析

由于系统针对空间目标探测, 以地球同步轨道高度为例, 则设 $d = 36\,000$ km. 由于 r 为等距逆合成孔径激光雷达的距离, 设其为 100 m, 则对变量 N_i 、 Δx 、 θ 对高程数据的影响进行仿真分析, 其中 Δx 、仿真结果如图 3.

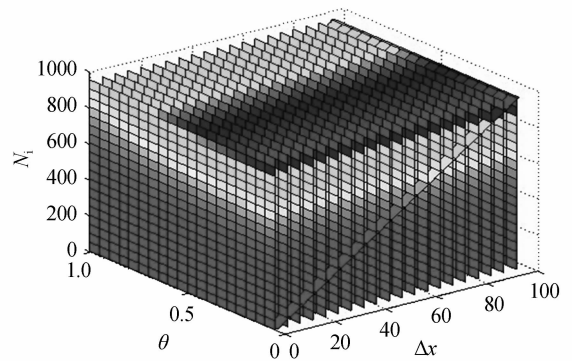


图 3 高程函数变化图

Fig. 3 The changes of elevation function

根据仿真图可知, 在探测距离和逆合成孔径激光雷达的距离一定的条件下, 三维图像重构需要的高程函数信息是关于变量 N_i 、 Δx 、 θ 的函数, 其中, Δx 的变化对函数的影响很小, 在 $0 \sim 100$ 的变化范围内, 仿真图像中灰度数据没有明显改变的区域说明当被测物看作匀速运动时, 速度的大小对高程数据融合没有显著影响; θ 的改变对高程信息变化的贡献明显, 说明在采用不同位置高程信息融合的过程中, 选择逆合成孔径激光雷达的分布方式对回波数据的利用率有影响, 这也是该方法可行的重要依据之一; N_i 对高程函数的影响体现了激光雷达合成孔径范围对系统的制约, 这个参量决定于光学系统的构造. 同时, 函数分布体中没有明显的突变, 连续变化的过程也满足多个逆合成孔径激光雷达数据融合的要求, 只是在数据处理过程中需要考虑不同位置逆合成孔径激光雷达数据变化速率对高程函数造成的畸变问题.

4 结论

在聚束逆合成孔径激光雷达中, 合成孔径数据可以完成二维图像的获得, 而再加入高程信息即可求得被测目标的三维信息. 该系统通过在等距位置上设置激光雷达(等边三角形的三个顶点), 根据位置和倾角的关系, 可以提供被测目标的高程信息, 再由高程信息反演三维图像. 对这三个重要参量进行仿真实验, 被测目标的速度对高程函数没有显著影响, 说明被测目标的速度不影响该算法的应用. 选择逆合成孔径激光雷达组的分布方式对回波数据的利用率有影响. 函数分布体中没有明显的突变, 连续变化的过程也满足多个逆合成孔径激光雷达数据融合的要求. 总之, 该方法可以获取高程信息从而重构目标三维图像.

参考文献

- [1] LÜ Xu-guang, HAN Shi-qi, LENG Jiao-feng, *et al.* Combined time-frequency imaging method of SAL based on adaptive windowing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5):

- 575-581.
吕旭光,郝士琦,冷蛟峰,等. 基于自适应窗的合成孔径激光雷达联合时频成像方法[J]. 光子学报, 2012, **41**(5): 575-581.
- [2] QU Fu-qi, HU Yi-hua, LENG Jiao-feng, *et al.* Reflective tomography Lidar imaging based on chirped pulse signal[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(4): 55-59.
瞿福琪,胡以华,冷蛟峰,等. 基于啁啾脉冲的反射层析激光雷达成像[J]. 光电工程, 2012, **39**(4): 55-59.
- [3] JIN Xiao-feng, YAN Yi, SUN Jian-feng, *et al.* Angle-Doppler resolved tomography laser imaging radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 1-7.
金晓峰,严毅,孙建锋,等. 基于角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(8): 1-7.
- [4] MATSON C L, MOSLEY D E. Reflective tomography reconstruction of satellite features-field results[J]. *Applied Optics*, 2011, **40**(14): 2290-2296.
- [5] YAN Yi, JIN Xiao-feng, SUN Jian-feng, *et al.* Research of spotlight mode incoherently synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 1-8.
严毅,金晓峰,孙建锋,等. 聚束非相干合成孔径激光成像雷达研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 1-8.
- [6] ZHANG Wen-rui, ZENG Xiao-dong, MAN Xiang-kun. Study on optical heterodyne detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 146-147.
张文睿,曾晓东,满祥坤. 激光外差实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(2): 146-147.
- [7] SHI Guang-ming, LIN Jie, CHEN Xu-yang, *et al.* UWB echo signal detection with ultra-low rate sampling based on compressed sensing[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems-II: Express briefs*, 2008, **55**(4): 379-383.
- [8] 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.
- [9] XING Meng-dao, GUO Liang, TANG Yu, *et al.* Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidai[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 128-132.
刑孟道,郭亮,谭于,等. 合成孔径成像激光雷达实验系统研究[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(2): 128-132.
- [10] SHANG Xiao-qing, YANG Lin, ZHAO Zhi-long, *et al.* A new SAR segmentation algorithm based on nonconvex regularization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **8**(28): 120-125.
尚晓清,杨琳,赵志龙,等. 基于非凸正则化项的合成孔径雷达图像分割新算法[J]. 光子学报, 2012, **8**(28): 120-125.
- [11] BARANIUK R. A lecture on compressive sensing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, **24**(4): 118-121.
- [12] ARVIZU A, CHAVEZ R. Balanced photoreceiver for coherent optical communications [J]. *Instrumentation and Development*, 1988, **3**(10): 3-14.
- [13] GUO Liang, XING Meng-dao, LIANG Yi, *et al.* Synthetic aperture imaging lidar 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.
- [14] BECK S M, BUCK J R, BUELL W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(35): 7621-7629.
- [15] YANG Lian-chen, SHEN Mang-zuo, GUO Yong-hong. The speckle imaging simulation of space objects [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1108-1111.