合成孔径激光雷达下视三维成像构型及算法

李小珍[1],吴玉峰[2],郭 亮[1],曾晓东[1]

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071;
2. 西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室,陕西 西安 710071)

摘 要:传统激光三维成像均采用实孔径成像技术,其分辨率会随着作用距离的变远而降低。相比于实孔径成像,合成孔径成像的一个显著优势是沿航向的分辨率不随作用距离的变化而变化。基于合成孔径技术提出一种合成孔径激光三维成像雷达的工作模型。该系统采用激光泛光发射模式和多波束相干接收,首先,在高度向,采用大时宽带宽的线性调频信号,并利用解线频调技术实现高分辨率;其次,沿航向利用合成孔径技术频域压缩算法实现高分辨率,其中考虑到激光调频信号的长扫频周期,对于平台连续运动引入的多普勒平移项进行了补偿;在跨航向通过实孔径阵列实现高分辨率。最后,通过仿真实验验证了该系统的有效性。

关键词:激光雷达; 合成孔径; 三维成像; 泛光发射模式; 多波束接收模式
中图分类号:TN958 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)10-3276-06

Downward-looking 3-D imaging configuration and algorithm for synthetic aperture ladar

Li Xiaozhen[1], Wu Yufeng[2], Guo Liang[1], Zeng Xiaodong[1]

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi′an 710071, China;
2. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi′an 710071, China)

Abstract: Traditional 3-D laser imaging systems are based on real aperture imaging technology, whose resolution would decrease with range′s increasing. An advantage of synthetic aperture imaging technology over real aperture imaging is that the resolution of the imaging system is constant with range′s increasing. In this paper, a novel 3-D imaging system was given, which was based on synthetic aperture technology. According to the characteristic of the signal, a suitable data progressing method was proposed based on the flood-light transmitting mode and multi-beam receiving mode. Firstly, in the range dimension, the signal with large time bandwidth product was adopted to obtain high resolution with the help of dechirp technology. Secondly, in the along-track dimension high resolution was obtained by synthetic aperture technology, in which the phase error caused by long scan duration was taken into account and compensated. Thirdly, in the cross-track dimension traditional real aperture array imaging method was adopted. Finally, simulation was provided to demonstrate the effectiveness of the proposed system.

Key words: lidar; synthetic aperture; 3-D imaging; flood-light transmitting mode; multi-beam receiving mode

收稿日期:2014-02-11; **修订日期**:2014-03-20

基金项目:国家自然科学基金(61107006);中央高校基本科研业务费资助(K5051305005,NSIY171412)

作者简介:李小珍(1983-),女,博士生,主要从事激光雷达系统设计成像方面的研究。Email:xzli@mail.xidian.edu.cn

导师简介:曾晓东(1956-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事激光器光学、光纤传感与测量技术以及激光雷达等方面的研究。Email:xdzeng@xidian.edu.cn

0 引 言

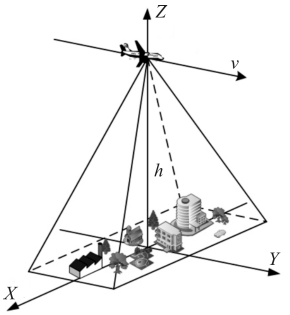
激光成像雷达是一种以激光为信号源的主动式遥感系统[1],由于其卓越的三维构形能力,被广泛运用于各种军事和民用领域[2-3]。激光三维成像雷达主要有两种工作方式:扫描式[4]和推帚式[1,5]。扫描方式通过平面转镜、平面摆镜、多面镜等的运动控制激光束有规律地对地扫描并探测激光回波,该方式要求系统有较高的脉冲重复频率(PRF)。推帚式激光三维成像系统在跨航向采用阵列的收发方式,只需要承载平台自身运动提供的沿航向扫描,就可以实现对目标的三维成像,因此,大大降低了系统 PRF 的要求。然而,无论是扫描式还是推帚式激光雷达成像系统,均采用实孔径成像技术,其分辨率会随着作用距离的变远而降低。

合成孔径技术可以大大提高沿航向的分辨率[6]。相比于实孔径成像的一个显著优势是沿航向的分辨率不随作用距离的变化而变化。目前,合成孔径技术在微波雷达上的应用已经非常成熟[7-8]。对采用激光为信号源的合成孔径激光雷达(SAL)的研究也在不断深入,不断有室内演示验证系统被提出[9-10],并在 2011 年完成了机载合成孔径激光雷达演示样机的飞行实验[11],获得了较好的成像结果。基于这样的背景,相信合成孔径技术在激光三维成像系统上的应用将逐步成为研究的重点。

文中结合合成孔径技术,提出一种合成孔径激光三维成像雷达的工作模型,并对其信号形式进行分析,提出适用的信号处理方法。借鉴于推帚式激光三维成像系统的收发方式,采用激光泛光发射模式[12]和多波束接收模式。发射信号为线性调频信号(LFM),在高度向采用匹配滤波技术实现高度向的高分辨;沿航向采用合成孔径技术,通过对回波信号多普勒特性的分析,提高沿航向的分辨率;在跨航向依然采用实孔径成像方法。

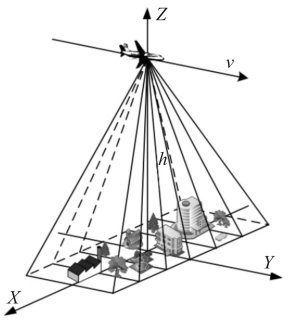
1 下视三维成像模型

借鉴推帚式三维成像构型,合成孔径激光雷达下视三维成像模型如图 1 所示。承载平台以速度 v 沿 Y 轴匀速直线飞行,其飞行高度为 h。雷达采用泛光发射、多波束接收的工作模式。定义 X 轴为跨航向,Y 轴为沿航向,Z 轴为高度向。



(a) 泛光发射模式

(a) Flood-light transmitting mode



(b) 多波束接收模式

(b) Multi-beam receiving mode

图 1 下视三维成像收发模式

Fig.1 Transmitting and receiving modes of downward-looking 3-D imaging

假设激光雷达采用调频连续波(FMCW)作为发射信号,其信号形式为:

$$s(\hat{t},t_m)=\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right)\exp(\mathrm{j}2\pi f_c t+\mathrm{j}\pi\gamma\hat{t}^2) \tag{1}$$

式中:f_c 为信号中心载频;T_p 为信号时间宽度,即脉冲重复间隔(PRI);γ 为信号调频率;$\hat{t}$ 为距离向快时间,$t_m=mT_p(m=1,2,3,\cdots)$为方位向的慢时间,即每个信号的起始时间,t 为全时间,它们三者之间的关系为 $t=t_m+\hat{t}$。假设成像场景中存在一个点目标 $P(x_0,y_0,z_0)$,则其回波为:

$$s(\hat{t},t_m)=\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}-R(\hat{t},t_m)/c}{T_p}\right)\cdot$$
$$\exp\left(\mathrm{j}2\pi f_c\left(t-\frac{R(\hat{t},t_m)}{c}\right)+\mathrm{j}\pi\gamma\left(\hat{t}-\frac{R(\hat{t},t_m)}{c}\right)^2\right) \tag{2}$$

式中:c 为光的传播速度;$R(\hat{t},t_m)$为点目标到收发天线的双程斜距,可以表示为 $R(\hat{t},t_m)=R_T(\hat{t},t_m)+R_R(\hat{t},t_m)$,

其中

$$\begin{cases} R_T(\hat{t},t_m)=\sqrt{x_0^2+(vt_m+v\hat{t}-y_0)^2+(h-z_0)^2} \\ R_R(\hat{t},t_m)=\sqrt{(x_R-x_0)^2+(vt_m+v\hat{t}-y_0)^2+(h-z_0)^2} \end{cases} \tag{3}$$

式中：x_R 为接收天线在 X 轴方向的位置。考虑到信号收发过程中平台的连续运动，公式(3)的斜距与快时间 $\hat{t}$ 有关。为了去除瞬时斜距的双根号形式，可以采用等效相位中心原理，即当收发分置的两个天线之间基线长度相对于作用距离很短时，可以等效为两者连线的中心作自发自收的单基工作模式，但需要补偿一个常数相位[13]。等效相位中心到 P 点的距离为：

$$R'(\hat{t},t_m)=\sqrt{(x_R/2-x_0)^2+(vt_m+v\hat{t}-y_0)^2+(h-z_0)^2} \tag{4}$$

为了减小数据量及对采样单元的要求，雷达通常采用去斜(Dechirp)的接收方式，去斜函数可以表示为：

$$H_{\text{dechirp}}(\hat{t},t_m)=\text{rect}\left(\frac{\hat{t}-2R_{\text{ref}}/c}{T_p}\right)\cdot \exp\left(\text{j}2\pi f_c\left(t-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)-\text{j}\pi\gamma\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right) \tag{5}$$

式中：R_{ref} 为参考斜距。去斜后的差频输出信号为

$$s(\hat{t},t_m)=\exp\left(-\text{j}\frac{4\pi}{c}f_cR_\Delta\right)\cdot\exp\left(\text{j}\frac{4\pi}{c}\gamma\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)R_\Delta\right)\cdot \exp\left(\text{j}\frac{4\pi}{c^2}\gamma R_\Delta^2\right) \tag{6}$$

式中：$R_\Delta=R'(\hat{t},t_m)-R_{\text{ref}}$。公式(5)中忽略了对成像没有影响的幅度项。第一个指数项为方位向的相位历程，第二个指数项为由于 Dechirp 处理产生的距离向的单频信号，第三个指数项为剩余视频相位(RVP)，它会使多普勒有少许改变，必须进行补偿，具体补偿方法可以参考文献[14]。在随后的推导中，假设 RVP 项已经得到补偿。

2 成像算法

2.1 多普勒频移分析及校正

由于 FMCW 信号的扫频周期较长，平台在收发信号期间的运动必须加以考虑，因此，公式(4)的斜距与距离快时间有关。对其进行泰勒展开，变为：

$$R'(\hat{t},t_m)\approx R'(t_m)+\frac{v(vt_m-y_0)}{R'(t_m)}\hat{t} \tag{7}$$

式中：$R'(t_m)=\sqrt{(x_R/2-x_0)^2+(vt_m-y_0)^2+(h-z_0)^2}$。由公式(7)可知，由平台连续运动引入的多普勒频移为：

$$f_d=-\frac{2}{\lambda}\frac{\text{d}R'(\hat{t},t_m)}{\text{d}\hat{t}}=-\frac{2}{\lambda}\frac{v(vt_m-y_0)}{R'(t_m)} \tag{8}$$

式中：λ 为中心载频对应的波长；$\frac{vt_m-y_0}{R'(t_m)}=-\sin\theta$，$\theta$ 为点目标的瞬时观测角，所以：

$$f_d=-\frac{2}{\lambda}\frac{v(vt_m-y_0)}{R'(t_m)}=-\frac{2v}{\lambda}(-\sin\theta)=f_a \tag{9}$$

式中：f_a 为多普勒频率。将公式(7)代入公式(6)中，则接收的回波信号可以重新表示为：

$$s(\hat{t},t_m)=\exp\left(-\text{j}\frac{4\pi}{\lambda}(R'(t_m)-R_{\text{ref}})\right)\cdot \exp\left(-\text{j}\frac{4\pi}{c}\gamma\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)(R'(t_m)-R_{\text{ref}})\right)\cdot\exp(\text{j}2\pi f_a\hat{t}) \tag{10}$$

式中：第三个指数项为平台的连续运动引入的距离向多普勒频移。该项会使目标距离向聚焦位置发生改变，由于其与方位向频率有关，在距离脉压结果中表现为距离单元徙动(RCM)剩余。并且，目标聚焦位置的改变会造成目标信号对应的方位调频率与距离对应的方位调频率失配，严重时将影响方位的聚焦。因此，必须进行补偿，可以在方位多普勒域进行。将公式(10)变换到方位频率域，采用驻定相位原理[7]，可得：

$$s(\hat{t},f_a)=\exp\left(-\text{j}4\pi R_{\text{Bi}}\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}+\frac{\gamma}{c}\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)^2-\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}\right)\cdot \exp\left(-\text{j}2\pi\frac{y_0}{v}f_a\right)\cdot\exp\left(-\text{j}4\pi\left(\frac{1}{\lambda}+\frac{\gamma}{c}\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)R_{\text{ref}}\right)\cdot \exp(\text{j}2\pi f_a\hat{t}) \tag{11}$$

式中：$R_{\text{Bi}}=\sqrt{(x_R/2-x_0)^2+(h-z_0)^2}$ 表示第 i 通道到点目标的最近距离。由公式(11)可知，多普勒频移的校正函数可以表示为：

$$H_{\text{DFS}}(\hat{t},f_a)=\exp(-\text{j}2\pi f_a\hat{t}) \tag{12}$$

公式(12)与公式(11)相乘后，信号变为：

$$S'(\hat{t},f_a)=\exp\left(-\text{j}4\pi R_{\text{Bi}}\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}+\frac{\gamma}{c}\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)^2-\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}\right)\cdot \exp\left(-\text{j}4\pi\left(\frac{1}{\lambda}+\frac{\gamma}{c}\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)R_{\text{ref}}\right)\exp\left(-\text{j}2\pi\frac{y_0}{v}f_a\right) \tag{13}$$

2.2 高度向处理

为了完成 RCM 校正及高度向的聚焦，将公式(13)第一个指数项对 $\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)$ 进行泰勒级数展开，为：

$$\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}+\frac{\gamma}{c}\left(\hat{t}-\frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right)^2-\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}\approx\phi_0(f_a)+\phi_1(f_a)\cdot$$

$$\left(\hat{t}-\frac{2R_{\mathrm{ref}}}{c}\right)+\phi_2(f_a)\left(\hat{t}-\frac{2R_{\mathrm{ref}}}{c}\right)^2 \tag{14}$$

其中

$$\phi_0(f_a)=\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2-\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}$$

$$\phi_1(f_a)=\frac{\gamma}{c\lambda\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2-\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}}$$

$$\phi_2(f_a)=-\frac{\left(\frac{\lambda}{c}\right)^2\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}{2\left(\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2-\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}\right)^3} \tag{15}$$

式中忽略了三次及三次以上的高次项。此外,$\phi_0(f_a)$为沿航向的相位项;$\phi_1(f_a)$为高度向与沿航向的耦合相位;$\phi_2(f_a)$为二次脉压项。根据公式(15),徙动校正及二次脉压函数可以表示为:

$$H_{\mathrm{RCMC,SC}}=\exp\left(-\mathrm{j}4\pi R_{B0}\left(\phi_1(f_a)\left(\hat{t}-\frac{2R_{\mathrm{ref}}}{c}\right)+\phi_2(f_a)\left(\hat{t}-\frac{2R_{\mathrm{ref}}}{c}\right)^2\right)\right)\cdot \exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi\gamma}{c}R_{B0}\left(\hat{t}-\frac{2R_{\mathrm{ref}}}{c}\right)\right) \tag{16}$$

公式(16)第三个指数项的作用是保证高度向聚焦之后目标的位置不会发生变化。此外,上式距离徙动校正及二次脉压参考函数中的 R_{Bi} 均采用承载平台正下方地平面上的点对应的垂直距离 R_{B0} 来近似。经过距离徙动校正及二次脉压后,信号被变换到距离频率域,由于回波信号采用 Dechirp 的接收方式,该步骤等效于实现了高度向的脉压。经过高度向脉压后的信号可以表示为:

$$S(f_r,f_a)=\exp\left(-\mathrm{j}4\pi R_{\mathrm{Bi}}\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2-\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}\right)\cdot \exp\left(-\mathrm{j}2\pi\frac{y_0}{v}f_a\right)\mathrm{sinc}\left(\pi T_p\left(f_r+\frac{2\gamma}{c}(R_{\mathrm{Bi}}-R_{\mathrm{ref}})\right)\right)\cdot \exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi R_{\mathrm{ref}}}{c}f_r\right) \tag{17}$$

为了使高度向处理具有保相性,需要对上式最后的指数项进行补偿,补偿函数为:

$$H_{\mathrm{PMF}}(f_r)=\exp\left(\mathrm{j}\frac{4\pi R_{\mathrm{ref}}}{c}f_r\right) \tag{18}$$

2.3 沿航向聚焦

完成距离向的保相性补偿后,就可以进行方位脉压了。方位脉压的参考函数为:

$$H_{\mathrm{az}}(f_a)=\exp\left(-\mathrm{j}4\pi R_{\mathrm{Bi}}\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2-\left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}\right) \tag{19}$$

公式(19)与公式(18)相乘后,进行方位向的逆傅里叶变换,就完成了数据的聚焦过程。由公式(17)可知,点目标高度向被聚焦在最近距离处,而不是聚焦在目标的真实高度,因此,需要根据各个通道的几何关系,进行相应的投影变换,将聚焦的点目标投影到它们的真实位置。如图 2 所示为所提算法一个相位中心处理的流程图,再沿跨航线拼接即为三维图像。

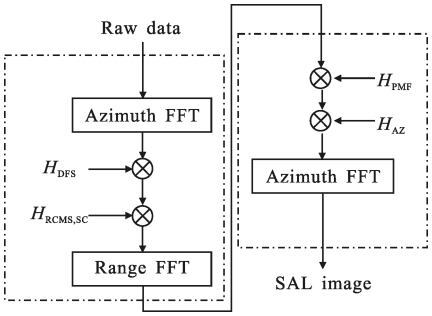


图 2 所提算法的一个相位中心处理流程图

Fig.2 Flow diagram of proposed algorithm in one phase center

3 仿真实验

为了验证文中所提的合成孔径激光雷达下视三维成像构型及成像算法的有效性,该节给出仿真实验结果。仿真参数如表 1 所示。仿真场景设置如图 3 所示,共有 9 个点目标,分布在 3 个层面上,其中地平面上放置 4 个点,高度为 5 m 的层面放置一个点,高度为 10 m 的层面放置 4 个点,9 个点目标的坐标分别为(单位为 m):(0.5 0 0),(−0.5 0 0),(0 0.5 0),(0 −0.5 0),(0 0 5),(0.5 0 10),(−0.5 0 10),(0 0.5 10),(0 −0.5 10)。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

Parameter	Value
Carrier wavelength/μm	1.5
Signal bandwidth/GHz	6
Aperture of transmitter/cm	0.8×0.2 ($C\times A$)
Number of receiving elements	65
Pulse repetition interval/μs	50
Sampling frequency/MHz	20
Flight altitude/km	2
Velocity/m·s^{-1}	60

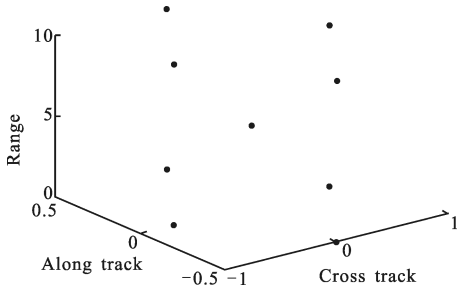


图 3 点目标分布图

Fig.3 Display of points

采用该方法对仿真数据进行处理，成像结果如图 4 所示，成像后点目标位置与原始场景中点目标位置基本相同，从成像效果可以看出：文中算法是有效的。为了进一步验证所提算法，对跨航向位置为零处的点目标的成像结果作性能分析，图 5(a)为该切

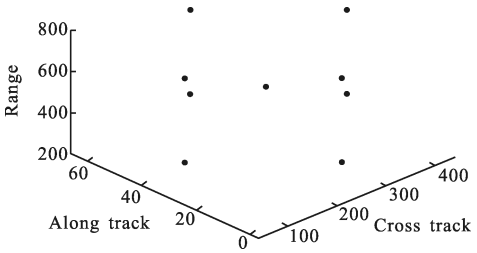
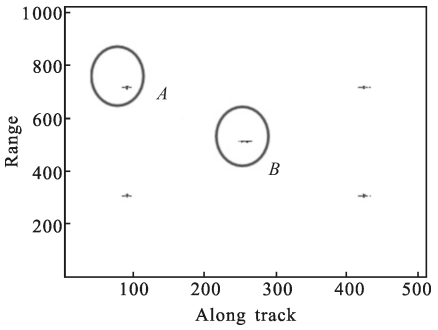


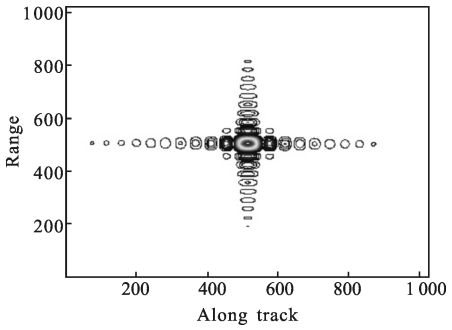
图 4 点目标成像结果

Fig.4 Imaging results of points



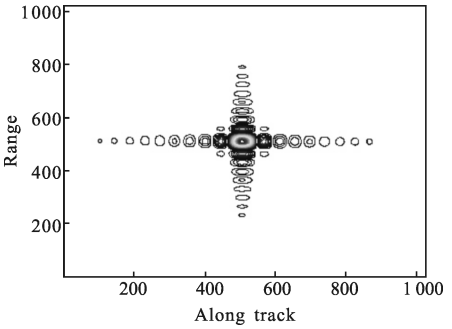
(a) 仿真结果

(a) Simulation result



(b) *A* 点的等高线图

(b) Contour maps of imaging result for point *A*



(c) *B* 点的等高线图

(c) Contour maps of imaging result for point *B*

图 5 文中方法成像结果

Fig.5 Imaging results of proposed algorithm

片位置的成像结果，图 5(b)、5(c)为图 5(a)中 *A*、*B* 两点的等高线图。由图可以看出，等高线图很规则，且主瓣旁瓣能够明显分开，说明成像效果良好。

4 结 论

合成孔径激光雷达作为远距离主动成像的有效手段，是未来遥感发展的研究热点。文中给出一种基于合成孔径技术的激光三维成像系统，并且提出了相应的成像算法。最后，通过仿真实验说明了系统的有效性。主要目的在于对现有激光成像系统工作方式进行扩展，为激光雷达应用前景提供一条新的思路。

参考文献：

[1] Ni Shuxin, Li Yifei. Trend of laser radar for military [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2003, 32(2): 111-114. (in Chinese)
倪树新, 李一飞. 军用激光雷达的发展趋势 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 111-114.

[2] Li Lei, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, et al. Application of three-dimensional laser imaging technology [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2009, 46(2): 66-71. (in Chinese)
李磊, 胡以华, 赵楠翔, 等. 激光三维成像技术应用现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(2): 66-71.

[3] He Min, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, et al. Application of airborne three-dimensional laser imaging [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2008, 45(4): 43-49. (in Chinese)
贺敏, 胡以华, 赵楠翔, 等. 机载激光三维成像技术应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(4): 43-49.

[4] Ma Yao. Study on laser scanning imaging system [D]. Changchun: Changchun University of Science and

Technology, 2012. (in Chinese)
马瑶. 激光扫描成像系统[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.

[5] Chen Weijun. Study on key technology of push-broom laser 3-D imaging system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
陈伟军. 推帚式激光三维成像雷达关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

[6] Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation [D]. Norwood: Artech House, 2005.

[7] Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar Imaging Techniques [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[8] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing [M]. New York: John Wiley, 1991.

[9] Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu, et al. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging ladar[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2008, 28(12): 2446-2448. (in Chinese)
周煜, 孙建锋, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径成像激光雷达的孔径合成实验[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2446-2448.

[10] Xing Mengdao, Guo Liang, Tang yu. Design on the indoor optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2009, 38 (2): 290-294. (in Chinese)
邢孟道, 郭亮, 唐禹. 合成孔径成像激光雷达实验系统设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 290-294.

[11] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture ladar flight demonstration [C]//CLEO -Laser Application to Photonic Applications, 2011. PDPB7.

[12] Sun Zhihui, Deng Jiahao, Wang Chang. Linear array detection mode of three-dimensional imaging laser radar[J]. ***Laser & Infrared***, 2011, 41(4): 381-385. (in Chinese)
孙志慧, 邓甲昊, 王昌. 三维成像激光雷达线阵探测模式分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 381-385.

[13] Liang Yi. Signal processing of FMCW synthetic aperture radar data[D]. Xi′an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
梁毅. 调频连续波 SAR 信号处理[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

[14] Franceschetti G, Lanari R. Synthetic aperture radar processing [D]. Boca Raton: CRC Press, 1999.