锐化函数对合成孔径激光雷达成像图像的影响

张 艳[1,2],陈 涌[2],周鼎富[2],侯天晋[2]

(1. 贵阳学院 电子与通信工程学院,贵州 贵阳 550005;
2. 西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

摘 要:根据线性调频信号的特点和光外差探测的原理,推导了具有高阶相位误差时线性调频信号经合成孔径激光雷达外差探测后的输出信号表达式。结合参考通道的系统结构和基于锐化函数的相位补偿算法,通过模拟仿真,对比分析了参考通道类型对单点目标成像的影响。通过研究锐化函数的物理含义,对锐化函数相位补偿算法进行了误差分析。指出了锐化函数相位补偿算法的适用范围,以及实现高质量的合成孔径激光雷达探测成像需进一步考虑的问题。

关键词:合成孔径激光雷达; 外差探测; 相位误差; 参考通道; 锐化函数; 目标图像
中图分类号:TN958.98 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)09-2588-05

Influence of sharpen function on the object image of synthetic aperture ladar

Zhang Yan[1,2], Chen Yong[2], Zhou Dingfu[2], Hou Tianjin[2]

(1. School of Electronic and Communication Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005,China;
2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the LFM (Linear Frequency Modulation) signal and the principle of the heterodyne, the expression on the output of the heterodyne detection in synthetic aperture ladar was induced in detail with the considerations of phase error. Combining with the reference channel design and phase compensation algorithm, the influence of reference channel design on single point object image had been analyzed by simulation. Some error analysis concerning the compensation algorithm with sharpen function had been given by researching the physical meaning of sharpen function. Finally, the application scope of the phase compensation algorithm with sharpening function had been given out, and some problems to realize high quality synthetic aperture laser radar imaging had been pointed out in these paper.

Key words: synthetic aperture ladar; heterodyne detection; phase error; reference channel; sharpen function; object image

收稿日期:2015-01-05; **修订日期**:2015-02-15

基金项目:国家自然科学基金(61505036);贵州省科技厅基金(黔科合 J 字[2015]2009 号);贵州省教育厅自然科学重点项目(黔教合 KY 字[2013]170);贵州省科技厅联合基金(黔科合 J 字 LKG[2013]37 号)

作者简介:张艳(1977-),女,副教授,博士后,主要从事光电探测、激光雷达方面的研究,Email: Eileen_zy001@sohu.com

0 引　言

在合成孔径激光雷达系统中，激光器输出的信号多是线性调波长而并非线性调频，并且在线性调波长过程中也不一定能够保持完全的线性扫描，就导致了合成孔径激光雷达信号频率非线性问题。线性调频信号的频率非线性会对合成孔径激光雷达的距离向成像造成影响，线性调频信号的线性度成为选择合成孔径激光雷达所需激光器的主要参数之一[1-7]，对于非理想线性调频信号的补偿方法也成为近年研究的热点[8-11]。

在合成孔径激光雷达成像过程中，可采用参考通道结构对线性调波长等原因带来的激光线性调频信号非线性进行时域上的校正。本文在建立参考通道结构的合成孔径激光雷达的成像算法模型的基础上，通过模拟仿真，针对条带工作模式的合成孔径雷达，考虑高阶相位误差的影响，讨论分析了参考通道类型对合成孔径激光雷达成像，通过研究锐化函数的物理含义分析了由锐化函数造成的误差。指出了锐化函数相位补偿算法的适用范围，以及实现高质量的合成孔径激光雷达探测成像需进一步考虑的问题。

1 基于参考通道结构的算法模型

在基于参考通道的合成孔径激光雷达系统结构[12-13]中，可调谐激光器发出的激光信号通过分光计可分为参考通道和目标通道两部分，由于采用外差探测，可以进一步分为参考信号、参考本振信号、目标信号、目标本振信号四种信号类型。假设光源输出信号频率非线性的形式为多项式形式，且有：

$$S_{\mathrm{t}}(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right)\exp\left(j2\pi\left(f_c t+\frac{1}{2}\gamma t^2+k_3 t^3\right)\right) \tag{1}$$

式中：k_3 为三次相位误差系数。由可调谐激光器产生的一般线性调频信号并不是一个标准的线性调频信号，而是一个略带弧度的近似直线，这是因为发射信号存在随快时间变化的高次误差。

根据不同的传播时间，可分别写出不同通道的信号形式，目标信号形式为：

$$S_{\mathrm{ti}}(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{t-\tau_{\mathrm{ti}}}{\tau_p}\right)\exp\left(j2\pi\left(f_c(t-\tau_{\mathrm{ti}})+\frac{1}{2}\gamma(t-\tau_{\mathrm{ti}})^2+k_3(t-\tau_{\mathrm{ti}})^3\right)\right) \tag{2}$$

目标本地振荡信号形式为：

$$S_{\mathrm{tlo}}(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{t-\tau_{\mathrm{tlo}}}{\tau_p}\right)\exp\left(j2\pi\left(f_c(t-\tau_{\mathrm{tlo}})+\frac{1}{2}\gamma(t-\tau_{\mathrm{tlo}})^2+k_3(t-\tau_{\mathrm{tlo}})^3\right)\right) \tag{3}$$

式中：f_c 为中心频率；τ_p为脉宽；γ 为调频率；$\tau_{\mathrm{tlo}}=\frac{2R_{\mathrm{tlo}}}{c}$ 为本振信号相对延迟；$\tau_{\mathrm{ti}}=\frac{2R_{\mathrm{ti}}}{c}$ 为目标回波信号相对延迟。

同理，可以写出参考信道信号形式 $S_{\mathrm{ri}}(t)$和参考本地振荡信号形式 $S_{\mathrm{rlo}}(t)$。由于每一个脉冲之间的高次相位误差系数 k_3 均不相同，对于目标通道和参考通道信号不妨取 $t_{\mathrm{m}}=0$ 时刻的波形来研究。

对目标通道的目标信号与目标本地振荡信号进行差频，差频后的回波信号形式为：

$$\begin{aligned}S_{\mathrm{tif}}(t)=S_{\mathrm{ti}}(t)\times S_{\mathrm{tlo}}^*(t)=&\mathrm{rect}\left(\frac{t-\tau_{\mathrm{ti}}}{\tau_p}\right)\mathrm{rect}\left(\frac{t-\tau_{\mathrm{tlo}}}{\tau_p}\right)\\&\exp\left(-j\frac{4\pi}{c}\gamma\left(t-\frac{2R_{\mathrm{tlo}}}{c}\right)(R_{\mathrm{ti}}-R_{\mathrm{tlo}})\right)\cdot\\&\exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_c(R_{\mathrm{ti}}-R_{\mathrm{tlo}})\right)\exp\left(j\frac{4\pi\gamma}{c^2}(R_{\mathrm{ti}}-R_{\mathrm{tlo}})^2\right)\cdot\\&\exp\left(-j\frac{16\pi k_3}{c}(R_{\mathrm{ti}}^3-R_{\mathrm{tlo}}^3)\right)\exp\left(j\frac{24\pi k_3}{c}(R_{\mathrm{ti}}^2-R_{\mathrm{tlo}}^2)t\right)\cdot\\&\exp\left(-j\frac{12\pi k_3}{c}(R_{\mathrm{ti}}-R_{\mathrm{tlo}})t^2\right)\end{aligned} \tag{4}$$

将参考通道的参考信号与参考本振信号进行差频，其回波信号形式为：

$$\begin{aligned}S_{\mathrm{rif}}(t)=S_{\mathrm{ri}}(t)\times S_{\mathrm{rlo}}^*(t)=&\mathrm{rect}\left(\frac{t-\tau_{\mathrm{ri}}}{\tau_p}\right)\\&\mathrm{rect}\left(\frac{t-\tau_{\mathrm{rlo}}}{\tau_p}\right)\exp\left(-j\frac{4\pi}{c^2}\gamma\left(t-\frac{2R_{\mathrm{rlo}}}{c}\right)(R_{\mathrm{ri}}-R_{\mathrm{rlo}})\right)\cdot\\&\exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_c(R_{\mathrm{ri}}-R_{\mathrm{rlo}})\right)\exp\left(j\frac{4\pi\gamma}{c^2}(R_{\mathrm{ri}}-R_{\mathrm{rlo}})^2\right)\cdot\\&\exp\left(-j\frac{16\pi k_3}{c}(R_{\mathrm{ri}}^3-R_{\mathrm{rlo}}^3)\right)\exp\left(j\frac{24\pi k_3}{c^2}(R_{\mathrm{ri}}^2-R_{\mathrm{rlo}}^2)t\right)\cdot\\&\exp\left(-j\frac{12\pi k_3}{c}(R_{\mathrm{ti}}-R_{\mathrm{tlo}})t^2\right)\end{aligned} \tag{5}$$

由于常数相位和关于快时间 t 变化的一次相位对距离压缩不会产生影响，所以需要补偿的仅仅为随快时间 t 变化的二次相位项。从目标回波信号中取得目标回波信号的二次相位为：$\ln e^{-j\frac{12\pi k_3}{c}(R_{\mathrm{ti}}-R_{\mathrm{tlo}})t^2}$；从参考回波信号中取得参考回波信号的二次相位为：$\ln e^{-j\frac{12\pi k_3}{c}(R_{\mathrm{ri}}-R_{\mathrm{rlo}})t^2}$；对所述的两个相位进行相比，得到首

次相位误差比为：

$$p(\tau_{ti})=\frac{\ln e^{-j\frac{12\pi k_3}{c}(R_{ti}-R_{tlo})t^2}}{\ln e^{-j\frac{12\pi k_3}{c}(R_{ri}-R_{rlo})t^2}}=\frac{R_{ti}-R_{tlo}}{R_{ri}-R_{rlo}}=\frac{\tau_{ti}-\tau_{tlo}}{\tau_{ri}-\tau_{rlo}} \tag{6}$$

由于目标本地振荡路径的参考距离、参考信道的模拟传输距离、参考本地振荡信道的模拟传输距离是由仪器所决定的，故 $p(\tau_{ti},\tau_{tlo},\tau_{ri},\tau_{rlo})=p(\tau_{ti})$。只要得到目标的距离或者回波延迟时间，就可以得到补偿后的目标回波信号：

$$S_{if}(t)=S_{tif}(t)\times\exp(-p(\tau_{ti})\ln(S_{rif}(t))) \tag{7}$$

对补偿以后的目标回波信号 $S_{if}(t)$ 进行 FFT 变换，得到距离压缩后的函数为：

$$\sigma(p(\tau_{ti});x)=\int S_{if}(t)\cdot e^{-j\omega t}dt \tag{8}$$

其中，x 在函数中沿方位向变化，在单次回波中，可以看成是一个确定的值。

上面所述的用 $p(\tau_{ti})$ 先对距离向相位误差做预补偿，由于函数 $p(\tau_{ti})$ 是不确定的值，因此对差频信号做一次 FFT 距离压缩后，得到的距离向无法聚焦，距离向的峰值就会很低。只有用确定的值进行补偿的时候，对差频信号做一次 FFT 以后，距离向聚焦才会产生一个很高的尖峰。具体的相位校正流程如图 1 所示。

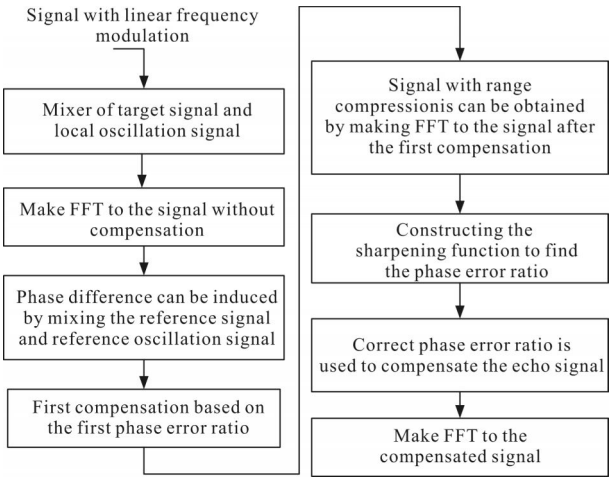


图 1 相位补偿的流程框图

Fig.1 Flow diagram of phase compensation

其中，构造锐化函数[10]为：

$$S(p(\tau_{ti}))=\frac{\sum_x|\sigma(p(\tau_{ti});x)|^4}{\left|\sum_x|\sigma(p(\tau_{ti});x)|^2\right|^2} \tag{9}$$

根据锐化函数的表达式，可知实质上就是通过寻找光强的最大值来进行相位补偿的。找出函数 $S(p(\tau_{ti}))$ 取得最大值的点，该最大值点的横坐标对应的就是所需的对应相位误差比 $p'(\tau_{ti})$。再利用公式(10)，即得到补偿后的目标回波信号：

$$S_{if}'(t)=S_{tif}(t)\cdot\exp(-p'(\tau_{ti})\ln(S_{rif}(t))) \tag{10}$$

对补偿以后的目标回波信号 $S_{if}'(t)$ 做 FFT 变换进行距离压缩，即可得到补偿后的信号图像。

上述推导是针对线性调频信号高次误差项有随快时间三次方变化的情况，当线性调频信号高次误差项有随快时间四次方变化和更高次方变化的情况时，利用二项式定理展开，忽略高阶无穷小，该相位补偿算法对高阶相位误差依然适用。

2 模拟仿真

对于点目标成像模拟的主要参数如下：工作波长 $\lambda=1.55\ \mu m$，调谐带宽 $B=3.0\times10^9$ Hz，调谐速度 $v=100$ nm/s，脉冲宽度 $\tau_p=100\ \mu s$，调频斜率 $\gamma=3\times10^{13}$ Hz/s，天线尺寸 $D=0.02$ m，脉冲重复频率 $f=1.65\times10^4$ Hz，场景中心斜距 $PO'=10$ km，合成孔径激光雷达工作于条带工作模式。根据现在商用可调谐激光器的参数，计算出高阶相位误差的量级，本次模拟中取高阶相位误差 $k^3=3.75\times10^{17}$。雷达飞行速度 $V=30$ m/s，雷达视角 $\theta=45°$，单点目标位置(0.387 5 m，7.071 1 km)。根据公式(4)和公式(5)，结合校正相位补偿算法可以得到经过相位误差补偿后的图像，如图(2)~(5)所示。

(1) 参考通道类型对距离向成像的影响

匹配通道结构是指在合成孔径激光雷达系统中，目标通道的长度与参考通道的长度相等，而非匹配通道结构是指合成孔径激光雷达系统中，目标通道的长度与参考通道的长度不等。

如图 2 所示，给出了目标距离 $R=10$ km 时，对于匹配通道结构（光程长度 $R_r=10$ km），存在高阶相位误差($k^3=3.75\times10^{17}$)和没有高阶相位误差($k^3=0$)的距离向图像。由图 2 可见，对于匹配通道结构时，进行相位补偿后的距离向图像几乎与没有高阶相位误差的距离向图像一样，说明利用匹配通道可以很好的校正高阶相位误差对距离向成像的影响，但是由于要求参考通道长度与目标通道长度完全相等，这

限制了匹配通道结构合成孔径激光雷达的实际使用范围。

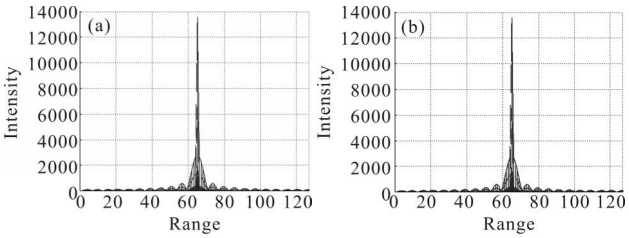


图 2 匹配通道的距离向图像

Fig.2 Range image from matching channel

图 3 中,给出了目标距离 R=10 km 时,对于非匹配通道结构(光程长度 R_r=10 m),存在高阶相位误差(k_3=3.75×10^{17})和没有高阶相位误差(k_3=0)的距离向图像。可见,当没有高阶相位误差(k_3=0)时,匹配通道和非匹配通道的距离向成像是一样的,即对于理想的线性调频信号,采用匹配通道或非匹配通道的系统结构,补偿后得到的距离向图像都是一样的。当存在高阶相位误差(k_3=3.75×10^{17})时,相对匹配通道的距离向图像而言,非匹配通道得到的距离向图像的峰值下降,旁瓣出现非对称分布。说明在匹配通道的基础上,提出的非匹配通道结构和利用锐化函数进行相位补偿算法能实现数据驱动的合成孔径激光雷达成像处理,改善距离向成像质量。在对距离向成像精度要求不太高的情况,这种方法能部分补偿高阶相位误差,实现距离向成像。

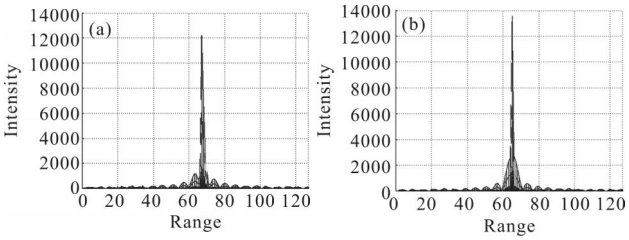


图 3 非匹配通道的距离向图像

Fig.3 Range image from unmatching channel

(2) 补偿前后的图像对比

图 4 给出了理想线性调频信号(k_3=0)对单个目标点成像的平面图和距离向视图,以及非理想线性调频信号(k_3=3.75×10^{18})对单个目标点成像补偿前后的平面图和距离向视图。可见,相比理想线性调频信号,由于高阶相位误差的存在,单点目标的合成孔径图像在距离向存在明显展宽,导致距离向分辨率显著降低。利用锐化函数进行相位误差补偿后,距离向显著压缩,其距离向的强度分布与理想情况相似。但是恢复后的强度峰值明显偏离理想点的强度峰值所在位置,有必要针对利用锐化函数进行相位补偿时影响合成孔径激光雷达成像质量的影响因素进行深入分析。

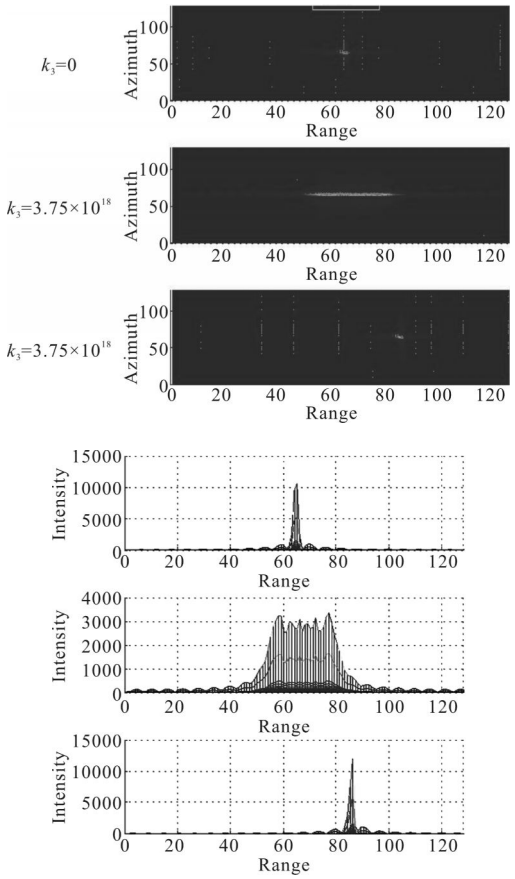
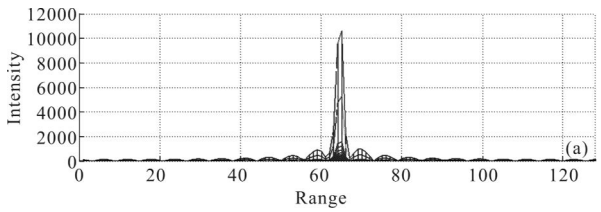


图 4 补偿前后的图像比较

Fig.4 Image comparison before and after compensation

(3) 利用锐化函数进行相位校正的误差分析

图 5 给出了单点目标在 k_3=0 时,利用锐化函数补偿前后的距离向分布图。经过锐化函数进行补偿后,目标点的峰值光强增大,主峰变窄,第一旁瓣增大,而不再是理想情况下的 Sinc 函数分布。结合图 4 可知,由于利用锐化函数进行相位补偿时,仅考虑了相位误差对幅度峰值的影响,只对强度进行校正,而



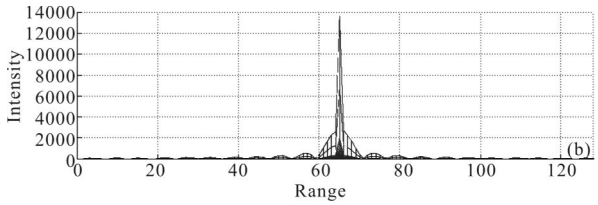


图 5 锐化函数相位校正算法的误差分析

Fig.5 Error analysis of phase correction algorithm with sharpening function

没有考虑相位误差对成像位置的影响，导致强度峰值出现了位置偏移。这需要进一步研究合成孔径激光雷达利用参考通道结构进行相位补偿时的图像定位和配准问题。

3 结 论

文中通过模拟仿真，讨论了参考通道类型对合成孔径激光雷达成像的影响，说明了匹配通道和非匹配通道各自的优劣。通过补偿前后的图像对比，分析了锐化函数进行相位补偿时的误差因素。指出利用锐化函数进行相位误差补偿实质上就是通过寻找光强的最大值来进行相位补偿的，从而该算法对目标反射率分布情况等较为敏感，有较好的目标分辨能力和压缩效果。对于非理想线性调频信号，该算法能补偿高阶相位误差，显著压缩由于高阶相位误差造成的距离向光斑弥散，提高距离分辨率。由于利用锐化函数进行相位补偿时，仅考虑了相位误差对幅度峰值的影响，没有考虑相位误差对成像位置的影响，需要进一步对合成孔径激光雷达成像图像进行定位和配准。

参考文献：

[1] Song Jingwei. Effect of the linearity on range resolution of linear frequency-modulated radar [J]. ***Journal of University of Electronic Science and Technology of China***, 1992, 21 (2): 121-126. (in Chinese)
宋景唯. 线性度对线性调频雷达距离分辨力的影响[J]. 电子科技大学学报, 1992, 21(2): 121-126.

[2] Wang Xuegang, Feng Jianxiong, Xiang Jingcheng. Linearity correction for linear FM sweep signals [J]. ***Acta Electronica Sinica***, 1996, 24(10): 120-122. (in Chinese)
汪学刚, 冯建雄, 向敬成. 线性调频信号的线性度校正[J]. 电子学报, 1996, 24(10): 120-122.

[3] Zhou Yalai, Li Chunsheng. A synthesized method of LFM signal analysis[J]. ***Modern Radar***, 2005, 27(11): 39-41. (in Chinese)
周亚来, 李春升, 一种线性调频信号参数分析的综合方法, 现代雷达, 2005, 27(11): 39-41.

[4] Hu Shibing, Wang Xuegang, Si Qiang. Effects of phase errors on LFM waveform generator[J]. ***Journal of Electronic Measurement and Instrument***, 2008, 22 (2): 101-106. (in Chinese)
胡仕兵, 汪学刚, 姒强. 线性调频波形产生器相位误差影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(2): 101-106.

[5] Dong Yongwei, Liang Xingdong, Ding Chibiao. Non-linear signal processing for FMCW SAR[J]. ***Journal of Electronics & Information Technology***, 2010, 32 (5): 1034-1039. (in Chinese)
董勇伟, 梁兴东, 丁赤飚. 调频连续波 SAR 非线性处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1034-1039.

[6] Lu Biying, Liang Diannong. Effects of FM linearity on the performance of LFM signals[J]. ***Systems Engineering and Electronics***, 2005, 7(8): 1384-1387. (in Chinese)
陆必应, 梁甸农. 调频线性度对线性调频信号性能影响分析[J]. 系统工程和电子技术, 2005, 7(8): 1384-1387.

[7] Lu Wei, Xu Nan, Liu Liren. Algorithm of matched filtering overcoming nonlinear chirp effect in synthetic aperture ladar [C]//SPIE, 2009: 7442.

[8] Xu Nan, Lu Wei, Liu Liren. Simulation of nonlinear-chirp compensation by scan-filtering in SAIL [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2008, 29(1): 47-54. (in Chinese)

[9] Lu Wei, Xu Nan, Liu Liren. Algorithm of matched filtering overcoming nonLinear chirp effect in synthetic aperture lader [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2009, 29 (7): 2011-2017. (in Chinese)

[10] Guo ling. Study on experiment and algorithm of synthetic aperture imaging lidar [D]. Xi′an: Xidian University, 2009. (in Chinese)

[11] Zhi Ya′nan, Sun Jianfeng, Hou Peipei, et al. Phase error correction by phase differential algorithm for synthetic aperture imaging ladar[C]//SPIE, 2013, 8520: 85200S-1-9.

[12] Stephen Marcus, Barry D Colella, et al. Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. ***Applied Optics***, 1994, 33(6): 960-964.

[13] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, et al. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. ***Optics Letters***, 2002, 27(22): 1983-1985.