

# 合成孔径激光成像雷达啁啾非线性的测量和抑制

栾 竹 周 煜 戴恩文 孙建锋 刘立人

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

**摘要** 合成孔径激光成像雷达系统中可调谐激光器的非线性啁啾,引起回波信号傅里叶频谱的展宽和相位的误差,影响距离向和方位向分辨率。实际测量了激光器的频率非线性,利用光纤法布里-珀罗干涉仪,测量激光器频率随时间的变化,得到高阶非线性项,给出了实验结果。以此为依据,研究了点目标回波外差信号的傅里叶频谱。通过改变分析信号的时间采样窗口宽度,压缩频谱宽度和相位误差,降低了非线性影响。在保证相位精度  $\pi/4$  时,得到了优化的时间采样窗口宽度。

**关键词** 光学测量;相干光学;合成孔径激光雷达;非线性啁啾;相位误差

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1212003

## Measurement and Overcoming of Nonlinear Chirp in Synthetic Aperture Imaging Ladar

Luan Zhu Zhou Yu Dai Enwen Sun Jianfeng 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** The nonlinear chirp of tunable laser in synthetic aperture imaging ladar (SAIL) can degrade the range resolution and influence the azimuth resolution. The polynomial nonlinear coefficients of laser frequency changed with time are measured by a fiber Fabry-Perot interferometer. The results of experiment are presented. Based on the data the Fourier frequency spectrum of the point target is discussed on the condition of the different frequency linearity. The spectral width and phase errors are reduced through changing the sampling pulse width. It is one method to compensate the degradation of resolution. The optimized sampling pulse width is derived at the phase error better than  $\pi/4$  corresponding to the optical diffraction limit.

**Key words** optical measurement; coherence optics; synthetic aperture ladar; nonlinear chirp; phase error

**OCIS codes** 120.2230; 110.1650; 070.0070

## 1 引 言

合成孔径激光成像雷达能够在远距离具有厘米量级的分辨率,国内外进行了理论和实验<sup>[1,2]</sup>研究。成像实验中,通常采用了调频激光器作为发射源。频率随时间的非线性变化会对回波信号距离向数据处理产生直接影响<sup>[3]</sup>,即频谱展宽和初始相位误差,因而导致系统成像距离向分辨率和方位向分辨率的劣化。为了克服非线性的影响,Steven M. Beck 等<sup>[1]</sup>提出增加匹配或非匹配参考通道的方法,从参考通道获得相位误差估算目标通道的相位误差。许楠等<sup>[4~6]</sup>进一步讨论了采用参考通道滤波补偿算法,都是间接

的方法。与采用参考通道的校正方法不同,本文针对目标通道直接测量激光器的频率线性度,给出了实验结果。以此为依据,优化实际时间采样宽度,对频谱展宽和初始相位误差进行抑制,直接补偿非线性的影响。本文讨论了激光器在不同线性度的情况下,为克服非线性影响应采用的最佳时间采样宽度,为进一步实验数据的分析处理提供了依据。

## 2 调谐激光器频率线性度的测量

### 2.1 测量原理

激光光源频率调制函数为  $f(t)$ ,理想情况下为

收稿日期: 2011-05-27; 收到修改稿日期: 2011-07-19

作者简介: 栾 竹(1973—),女,硕士,副研究员,主要从事激光通信、光学测量、合成孔径激光雷达等方面的研究。

E-mail: luanzhu@siom.ac.cn

线性函数,实际情况可以在  $t = 0$  处作级数展开表示:

$$f(t) = f(0) + \dot{f}(0)t + \frac{1}{2}\ddot{f}(0)t^2 + \frac{1}{6}\dddot{f}(0)t^3 + \dots \quad (1)$$

如果是线性调波长的激光器,即  $\lambda(t) = \lambda(0) + \dot{\lambda}(0)t$ ;二阶以上波长变化为 0。因为频率与波长是倒数关系,波长的线性变化,频率变化为非线性,但是较小,定义为最小非线性情况,表示为

$$f_{\min}(t) = \frac{c}{\lambda(0)} - \frac{c}{\lambda^2(0)}\dot{\lambda}(0)t + \frac{c}{\lambda^3(0)}\dot{\lambda}^2(0)t^2 - \frac{c}{\lambda^4(0)}\dot{\lambda}^3(0)t^3 + \dots \quad (2)$$

以最小非线性状态为基准,对激光器实际的测试结果进行评估。

测定设备选用一种简单有效的 F-P 标准具,是两端面平行并且镀高反射膜的光纤,长度约为 0.5 m。激光从一端输入,另一端输出。当激光频率啁啾时,通过标准具的透过率与频率相关。 $I_t$  为

透过光强, $I_i$  为入射光强,透过率可以表示为

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)} \quad (3)$$

当激光垂直入射于光纤端面时, $\delta = \frac{4\pi nl}{c}f$ ,其中  $R$  为光纤端面的反射率, $n$  为光纤折射率, $l$  为光纤长度, $f$  为激光频率。透过率峰值间隔相等为  $\Delta f = \frac{c}{2nl}$ ,测量峰值对应的时间,可以经过多项式拟合,得出频率的变化率或者频率变化的非线性系数。

### 2.2 实验结果

通过示波器记录光纤 F-P 标准具的光强透过率随时间的变化,如图 1 所示。激光器啁啾开始波长为 1549.73 nm,是由 HCN 吸收盒同步来实现的。波长变化率 22 nm/s,选取分析的扫描范围为 0.44 nm。从图 1 中观察到 20 ms 后,明显脉冲间隔不等,是由于激光器内调波长元件到达极限位置后复位引起的,不列入激光器的非线性分析之中。

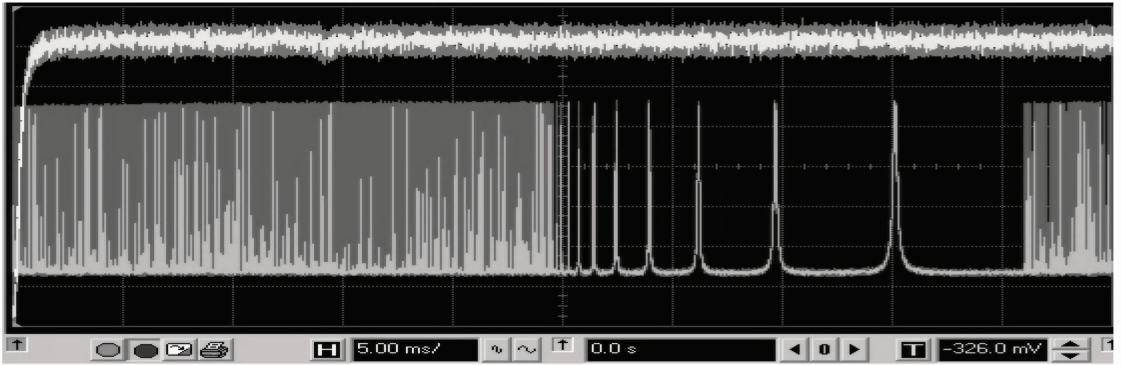


图 1 激光器啁啾下的 F-P 扫描图

Fig. 1 F-P scanning oscillogram of laser chirp

当前的最小非线性频率变化根据(2)式计算为

$$f_{\min}(t) = f_0 - 2.7366 \times 10^{12}t + 3.8693 \times 10^{10}t^2 - 5.4709 \times 10^8t^3 + \dots \quad (4)$$

经过实验数据的多项式拟合后得到的曲线为

$$f(t) = 3.7164 \times 10^7 - 2.7366 \times 10^{12}t - 5.7693 \times 10^{13}t^2 + 1.4169 \times 10^{15}t^3 \quad (5)$$

如图 2 所示,实际的测量结果说明,相对于理论上的线性调波长,即最小非线性情况,激光器存在调整误差。其中代表非线性的各多项式系数,二次项系数增大 1000 倍,三次项系数增大  $10^6$  倍。各阶系数越大,激光器的线性度越差,使系统成像分辨率劣化越严重。

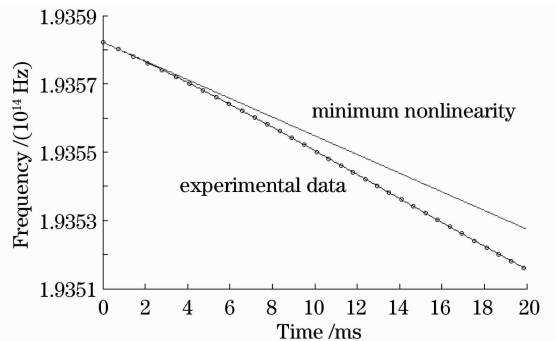


图 2 实验数据与最小非线性情况计算数据的频率啁啾

Fig. 2 Frequency chirp of the experimental data and the minimum nonlinearity simulation

### 3 非线性啁啾对距离向数据处理的影响和抑制

在合成孔径激光雷达的数据处理中,首先需要 对回波信号进行距离向压缩处理,利用傅里叶变换 取得一系列外差频率,其对应目标的距离,傅里叶频 谱的宽度与距离分辨率有关;同时获得初始相位的 信息,用来进一步处理得到方位向数据。为简化处 理,仅考虑成像的距离向压缩,点目标激光雷达的回 波信号可简化写为

$$u_r(t') = E_r \exp[j\varphi(t' - t_1)] = E_r \exp\left\{j\left[\varphi(0) + \int_0^{t'-t_1} 2\pi f(t') dt'\right]\right\}, (6)$$

式中  $E_r$  为回波信号的振幅,  $t_1$  为回波信号经历时 间,  $f$  为激光器的啁啾频率,  $\varphi(0)$  为与时间  $t'$  为 0 时 激光发射信号的相位。

本振信号为激光器本身的发射信号的延迟,延 迟时间为  $t_2$ ,本振信号为

$$u_{l_0}(t') = E_{l_0} \exp[j\varphi(t' - t_2)] = E_{l_0} \exp\left\{j\left[\varphi(0) + \int_0^{t'-t_2} 2\pi f(t') dt'\right]\right\}, (7)$$

式中  $E_{l_0}$  为本振信号的振幅。回波信号和本振信号 相干合成,平衡探测情况下,消除直流分量,场强表 示为

$$I(t') = 4E_r E_{l_0} \cos[\varphi(t' - t_1) - \varphi(t' - t_2)] = 4E_r E_{l_0} \cos \Delta\varphi. (8)$$

将时间表示为  $t = t' - t_1$ ,本振和回波之间的时 间差表示为  $\tau = t_2 - t_1$ ,相位差表示为频率的级数展 开形式[如(9)式所示],第一项  $\varphi_0$  为  $t = 0$  时的相

位,第二项为外差中频项,  $f_h = f\tau - \frac{1}{2}\dot{f}\tau^2$  为中频, 第三项为引起中频展宽的误差项,  $f_{h1} = \frac{1}{2}\dot{f}\tau$ 。忽略 了频率随时间的导数三阶以上的高次项,

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}\dot{f}t^2 + \frac{1}{6}\ddot{f}t^3 + \frac{1}{24}\ddot{f}t^4 + \dots\right)\Big|_{t-\tau}^t \approx 2\pi\left[\left(f_0\tau - \frac{1}{2}\dot{f}\tau^2 + \frac{\ddot{f}}{6}\tau^3\right) + \left(\dot{f}\tau - \frac{1}{2}\ddot{f}\tau^2\right)t + \left(\frac{1}{2}\ddot{f}\tau\right)t^2\right] = \varphi_0 + 2\pi f_h t + 2\pi f_{h1} t^2. (9)$$

处理的数据为有限时间  $T$ ,即时间采样窗口宽 度<sup>[3]</sup>。场强函数表示为

$$I(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(\Delta\varphi) = \frac{1}{2} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) [\exp(j\Delta\varphi) + \exp(-j\Delta\varphi)].$$

对其作离散傅里叶变换,这里将振幅取为 1,不 影响对频谱和相位的分析。以其中第一项为代表, 当理想线性频率变化时,二阶导数为 0,傅里叶变换 频谱为中心频率  $f_h$  的 sinc 函数,角宽度为  $1/T$ 。当 减小处理时间,频谱宽度增大,降低距离分辨率。当 频率等于  $f_h$  时,变换函数的相位等于初始相位  $\varphi_0$ ,

$$\mathcal{F}^{-1}\left[\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j\Delta\varphi)\right] = \exp(j\varphi_0) \delta(f - f_h) \otimes T \text{sinc}(Tf) = \exp(j\varphi_0) T \text{sinc}[T(f - f_h)]. (10)$$

式中  $\otimes$  表示卷积。所以,当存在频率非线性的情况 下,傅里叶变换的频谱将展宽,劣化距离分辨率。在 中心频率处的相位与  $\varphi_0$  存在误差。当对激光雷达 成像数据进行处理时,这一相位误差会进一步影响 方位向的分辨率<sup>[3]</sup>,

$$\mathcal{F}^{-1}\left[\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j\Delta\varphi)\right] = \exp(j\varphi_0) \delta(f - f_h) \otimes \frac{j}{\sqrt{2f_{h1}}} \exp\left(-j\frac{\pi f^2}{2f_{h1}}\right) \otimes \exp(-j\pi Tf) T \text{sinc}(Tf) = j \exp(j\varphi_0) \frac{1}{\sqrt{2f_{h1}}} \exp\left[-j\frac{\pi}{2} \frac{(f - f_h)^2}{f_{h1}}\right] \otimes \exp(-j\pi fT) T \text{sinc}(Tf). (11)$$

对(11)式进行数值求解,可以得到不同的处理时间, 不同程度非线性的影响。

通过适当数据处理方法可以减弱非线性的影响。 当测量得到激光器的非线性系数,可以通过模拟信 号,逐一计算不同数据处理时间条件下傅里叶变换的 频谱展宽和初始相位。最终得出最佳数据处理时间 (初始相位精度高于衍射极限,频谱展宽最小的时间 采样窗口宽度)。建立一系列实验条件下的最佳数据 处理时间数据库,用于实验数据的有效处理。

## 4 系统仿真

### 4.1 仿真模型

选取点目标作为仿真目标,合成孔径激光成像 雷达系统的原理结构参见文献[7],对点目标回波外 差信号作距离向压缩处理。设计参数如下:光源为 1550 nm 啁啾激光器,啁啾速率为 22 nm/s,对应频 率变化率为  $\dot{f}(0) = 2.7 \times 10^{12}$  Hz/s,本振光学臂的 长度接近目标距离,相对距离为 11 m,外差中频为

200 kHz, 时间采样窗口基本宽度为 2.5 ms, 带宽 6.8 GHz, 理想距离分辨率为 22 cm。初始相位选取一个常数  $\pi/4$ 。

根据(2)式对最小非线性情况的定义, 激光器频率线性最佳状态下  $f_{\min}(t)$  的级数展开一次项系数为  $\dot{f}(0) = 2.7 \times 10^{12}$  Hz/s, 二次项系数为  $\frac{\ddot{f}_{\min}(0)}{2} = 3.906 \times 10^{10}$  Hz/s<sup>2</sup>。而在激光器的实际状态下, 非线性程度可能增加。目前使用的激光器产品, 一次项系数可以保持不变, 二次项系数增加  $K$  倍, 即二次项系数  $\frac{\ddot{f}(0)}{2} = K \frac{\ddot{f}_{\min}(0)}{2}$ 。在本文中,  $K$  分别取值 10, 100, 1000 进行研究。

数值计算外差信号的傅里叶变换, 得出频谱宽度, 相位误差(外差中心频率处的相位与真实初始相位的误差)。为了减小非线性的影响, 压缩分析信号

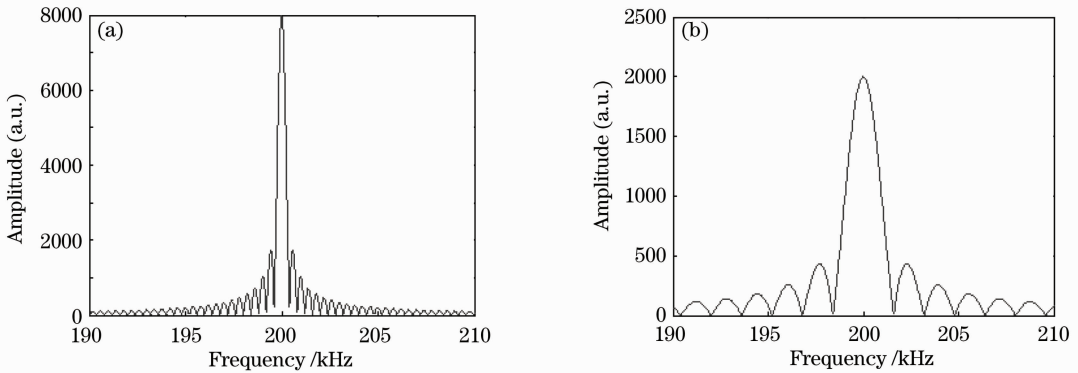


图3 最小非线性情况下的傅里叶频谱。分析信号的窗口宽度分别为(a)基本宽度  $T=2.5$  ms (b)  $T/4$

Fig. 3 Fourier spectrum of the minimum nonlinearity. Analyzed pulse time is (a) basic width  $T=2.5$  ms (b)  $T/4$

当啁啾非线性较大,  $K=1000$  时, 即本激光器的当前实验状态下, 如图4所示,  $T=2.5$  ms 下信号的频谱宽度约为 11.8 kHz, 因为外差中频淹没, 此时无法得到合理相位。截取时间信号的  $T/2, T/3, T/8$ , 傅里叶变换的频谱宽度为 5.0, 2.7 和 6.5 kHz。相位误差为 57, 29 和  $4^\circ$ 。随着时间窗口的减小, 谱宽度得到了压缩, 直至最小宽度, 然后转向增加; 相位误差呈现单调递减。

在光学上, 一般波面的控制精度以衍射极限为标准, 对应波面高度  $\lambda/4$ , 即相位误差  $45^\circ$ 。因此在满足相位误差小于衍射极限的情况下, 分析数据的时间窗口存在优化值为  $T/3$ , 使频谱宽度最小 2.7 kHz, 分辨率最好 75 cm。说明分析数据的时间窗口压缩, 可以补偿非线性的影响, 并且存在优化值。

二次项系数倍数  $K=10, 100$  时,  $T=2.5$  ms

的时间窗口宽度, 取基本宽度的  $1/n$  ( $n$  为正整数)。

## 4.2 仿真结果与分析

当激光器最小频率非线性情况下(波长线性), 外差信号的傅里叶变换如图3所示。图3(a)为时间采样窗口基本宽度  $T=2.5$  ms 下, 频谱的宽度为 800 Hz, 近似等于理论值。根据傅里叶变化的原理, 频谱对应的极大值点处的相位即为理想时间信号的初始相位, 依此为计算依据。频谱的峰值频率为 200 kHz, 其对应的相位即初始相位为  $48^\circ$ , 与理想值  $45^\circ$  的相位误差为  $3^\circ$ , 这是由于二次项系数的存在对初始相位有干扰, 但可以忽略。图3(b)为当截取部分时间信号  $T/4$  作傅里叶变换时, 频谱展宽为 3.2 kHz, 与理论值相同。求解的相位误差为  $0.15^\circ$ , 随着时间宽度的压缩, 非线性的影响产生的相位误差减弱。

下, 频谱的宽度为 800 和 880 Hz。相位误差为 3 和  $27^\circ$ 。数据处理的时间宽度优化值为全宽度, 不需要压缩。

综上所述, 在合成孔径激光成像雷达系统的数据处理中, 傅里叶变换的频谱宽度和初始相位是重要的中间参数。其中初始相位的高精度(衍射极限)求解, 需要频谱具有准确的峰值。当激光器非线性的影响较大时(例如  $K=1000$ ), 频谱展宽使得中频淹没在噪声中, 1)无法得到中心频率; 2)初始相位无法正确求解。利用本文的时间窗口压缩方法, 可以找到最佳时间窗口, 将初始相位求解由不可能变为可能, 同时将频谱展宽适当压缩。在没有参考通道的情况下, 可以使实验的数据处理达到最佳化。实时测量激光器的非线性, 对系统性能的充分估计, 对于进一步优化提供了依据。

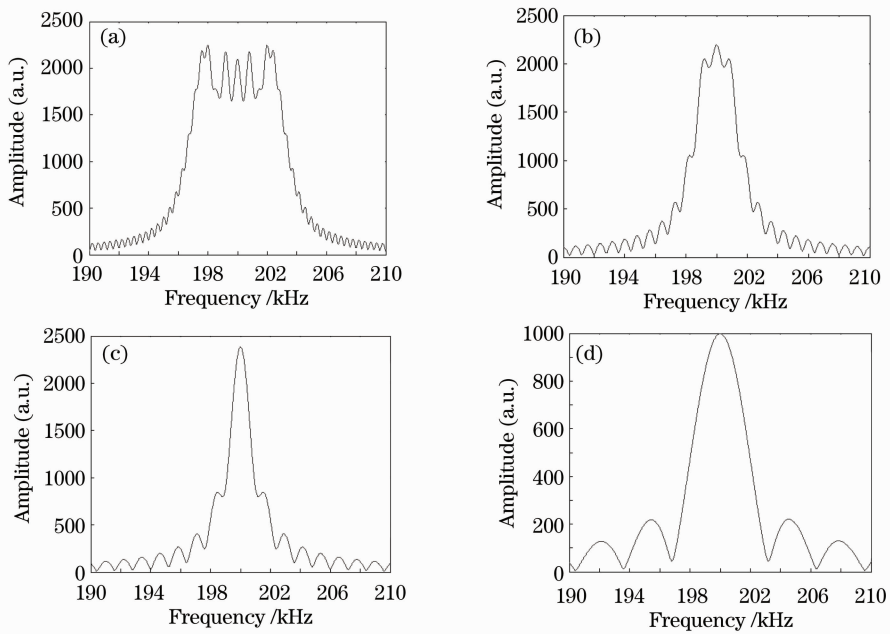


图 4  $K=1000$  情况下的傅里叶频谱。窗口宽度分别为 (a)  $T=2.5$  ms, (b)  $T/2$ , (c)  $T/3$ , (d)  $T/8$

Fig. 4 Fourier spectrum of  $K=1000$ . Pulse time is (a)  $T=2.5$  ms, (b)  $T/2$ , (c)  $T/3$ , (d)  $T/8$

需要指出的是经过压缩处理后,得到的分辨率与理想分辨率相比,仍然劣化 3 倍以上。因此在实际应用中,激光器的线性度应该根据分辨率的需要控制在一定范围。

## 5 结 论

合成孔径激光成像雷达系统中,克服激光器的频率非线性影响,可以采用直接压缩时间窗口的方法。通过减小分析数据时采用的时间采样窗口宽度,可以降低频谱宽度和相位误差,改善成像分辨率。在保证相位误差小于  $\pi/4$  的情况下,窗口的压缩比例存在优化值。对于不同线性度的激光器,优化值也不同,所以对激光器啁啾的线性系数实际测量是必不可少的环节之一。

## 参 考 文 献

- 1 S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- 2 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 2030~2032

- 周 煜, 许 楠, 栾 竹等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 2030~2032
- 3 Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (V): imaging resolution and antenna aperture function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V):成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- 4 Xu Nan, Lu Wei, Liu Liren. Simulation of nonlinear-chirp compensation by scan-filtering in SAIL[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 47~54
- 许 楠, 鲁 伟, 刘立人. 合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾逐一扫描滤波校正算法的仿真与分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 47~54
- 5 Lu Wei, Xu Nan, Liu Liren. Algorithm of matched filtering overcoming nonlinear chirp effect in synthetic aperture lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 2011~2017
- 鲁 伟, 许 楠, 刘立人. 合成孔径激光雷达非线性啁啾克服的匹配滤波算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 2011~2017
- 6 Liu Guoguo, Wu Jin, Zhu Bingqi *et al.*. Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture lidar experiment[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(9): 934~938
- 刘国国, 吴 谨, 朱炳祺等. 合成孔径激光雷达距离像分辨率非线性恶化与补偿[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(9): 934~938
- 7 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 566~568
- 周 煜, 许 楠, 栾 竹等. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 566~568

栏目编辑: 谢 婧