

doi:10.3788/gzxb20154403.0304001

# 粗糙目标合成孔径激光雷达信号仿真

党文佳, 曾晓东, 曹长庆, 来志, 冯喆珺, 李甜田

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

**摘 要:** 建立粗糙表面的蒙特卡罗模型, 研究目标表面高度起伏对光外差信号的调制效应, 对不同粗糙程度的目标引起的退相干效应进行定量分析, 给出光外差信号恶化与粗糙目标表面参量的定量关系. 结果表明: 当相关长度为  $100\lambda$ , 光外差信号随着高度起伏均方根的增大而减小, 当高度起伏均方根超过  $0.2\lambda$  时, 光外差信号非常微弱; 当均方根高度起伏为  $0.1\lambda$  时, 光外差信号随相关长度的减小而减小, 给光外差探测造成困难.

**关键词:** 合成孔径激光雷达; 退相干效应; 光外差探测; 粗糙面; 高度起伏均方根; 相关长度

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0304001-5

## Simulation of the Rough Target's Signal in Synthetic Aperture Ladar

DANG Wen-jia, ZENG Xiao-dong, CAO Chang-qing, LAI Zhi, FENG Zhe-jun, LI Tian-tian

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on Monte Carlo method, the modulating effect of the target surface roughness on the optical heterodyne signal was discussed. The quantitative analysis of the decoherence effect caused by the roughness of targets was investigated. The relationship between the optical heterodyne signal and rough parameters of the target was given. It is shown that when the correlation length is  $100\lambda$ , the optical heterodyne signal increases with the height of the root mean square fluctuation decreasing. When the height of the root mean square fluctuation exceeds  $0.2\lambda$ , the optical heterodyne signal is very weak. In addition, when the height of the root mean square is  $0.1\lambda$ , the optical heterodyne signal decreases with the correlation length decreasing. It seriously affects the optical heterodyne detection of a rough target.

**Key words:** Synthetic aperture ladar; decoherence effect; Optical heterodyne detection; Rough surface; Height of the root mean square; Correlation length

**OCIS Codes:** 040.1880; 040.2840; 120.1880

## 0 引言

激光合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Ladar, SAL) 具有很多诱人的优点和应用前景, 受到国内外广泛关注<sup>[1-6]</sup>. 尽管在光波段利用合成孔径实现高分辨率雷达成像的想法已提出多年<sup>[7-11]</sup>, 但至今尚不能实际应用. 究其原因, 一些重要的核心技术并没有获得实质性突破, 譬如, 实际目标的外差探测技术<sup>[12-13]</sup>.

由于光波长很短, 目标表面粗糙对回波造成严重的退相干效应<sup>[15]</sup>, 这是制约 SAL 实用化的重要瓶颈之

一. 激光照射到目标不同位置时, 因表面起伏对波前形成调制, 导致回波光外差信号相消, 严重影响实际光外差信号的检测. 理论和实验<sup>[15]</sup>均表明, 目标表面的粗糙特性使回波外差信号严重恶化. 因此, 必须深入探讨回波光外差信号与描述目标表面粗糙程度的参量之间的定量关系, 为实用化 SAL 探测系统及信号处理系统设计提供坚实的基础.

本文通过对实际目标建立表面蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模型, 将实际目标表面粗糙程度量化为与高度起伏均方根 (纵向起伏) 和相关长度 (横向起伏) 有关的

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2006AA12Z144) 资助

第一作者: 党文佳 (1983-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为合成孔径激光雷达相关激光技术. Email: wenjia\_dang@126.com

导师: 曾晓东 (1956-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为激光器光学、光纤传感与测量技术以及远轴光传播等. Email: xdzen@xidian.edu.cn

收稿日期: 2014-09-05; 录用日期: 2014-12-11

<http://www.photon.ac.cn>

量,并且研究目标表面粗糙程度导致的光外差中频信号的退相干效应,对大量实际目标回波外差信号进行系统的数值仿真研究,深入探讨不同粗糙程度目标的光外差信号变化情况。

## 1 理论分析

假设本振光与信号光的电场振动方向相同,标量表达为

$$E_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$E_s(t) = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \quad (2)$$

探测器一个小面元  $dx dy$  上的中频信号为

$$di_{IF} = \alpha A_s A_1 \cos[(\omega_s - \omega_1)t + (\varphi_s - \varphi_1)] dx dy \quad (3)$$

因为回波相位受到目标粗糙表面的调制,如图 1,其相位分布应为位置  $(x, y)$  的函数,设为  $\varphi_s(x, y)$ ,设

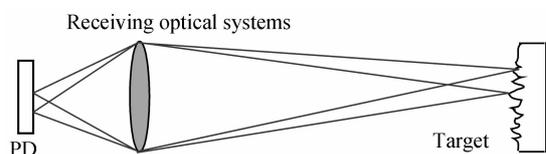


图 1 粗糙目标探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a rough target detection

本振相位  $\varphi_1 = 0$ . 若光电探测器光敏面的响应度是均匀的,则  $\alpha$  为常量,此时探测器输出的中频信号为

$$i_{IF}(t) = \alpha A_s A_1 \iint_S \cos[(\omega_s - \omega_1)t + \varphi_s(x, y)] dx dy \quad (4)$$

式中,  $A_s$  和  $A_1$  分别为信号光和本振光的振幅,  $\omega_s$  和  $\omega_1$  分别为信号光和本振光的频率,  $\varphi_s(x, y)$  为信号光的相位分布函数,  $\alpha$  是光电探测器的响应度,  $S$  是探测器光敏面面积。

假设不考虑光学系统和传输路径引起的光程差,以及光路中其他因素对信号光和本振光初相位和振幅的影响,只考虑由于目标表面随机起伏,在探测器光敏面处产生的光电流的相位差对光外差信号的影响. 如果用  $h(x, y)$  表示粗糙目标表面凹凸不平产生的高度起伏,那么回波信号的相位差与粗糙目标表面高度起伏之间的关系表示为

$$\varphi_s(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} h(x, y) \quad (5)$$

假设探测器光敏面均匀划分成若干个小面元  $s$ , 且  $s = \Delta x_i \Delta y_j$ , 那么在  $t = 0$  时刻, 式(4)近似为

$$i_{IF} = A \cdot s \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda} h(x_i, y_j) \right] \quad (6)$$

式中  $A = \alpha A_s A_1$ . 在理想情况下, 目标表面光滑无起伏, 中频电流为

$$i_{IF0} = A \cdot s \cdot M \cdot N \quad (7)$$

将式(6)和式(7)相比, 得到归一化中频电流为

$$i_{IF} = \frac{i_{IF0}}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda} h(x_i, y_j) \right] \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 归一化中频电流受粗糙目标表

面起伏  $h(x, y)$  的影响. 为了建立粗糙目标表面模型, 选用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法<sup>[14]</sup>. Monte Carlo 方法又称线性滤波法, 基本思想是对功率谱在频域进行滤波, 再作逆快速傅里叶变换, 得到粗糙表面的高度起伏. 它是以波长  $\lambda$  为度量单位, 以高度起伏均方根  $\delta$  和相关长度  $l$  为主要参量来模拟随机粗糙面的统计学方法. 假设目标为高斯型随机粗糙面, 其表面轮廓形状为  $h(x, y)$ . 如果光学系统没有像差, 则对应于探测器的划分, 目标表面也被分成  $M \times N$  个面元, 设面元面积为  $\Delta x \Delta y$ , 则目标边长为  $l_x = M \Delta x$  及  $l_y = N \Delta y$ . 粗糙面上每一面元处的高度表示为<sup>[14]</sup>

$$h(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m_1=-M/2+1}^{M/2} \sum_{n_1=-N/2+1}^{N/2} F(k_{m_1}, k_{n_1}) \cdot \exp[i(k_{m_1} x_m + k_{n_1} y_n)] \quad (9)$$

式中  $x_m = m \Delta x$ ,  $y_n = n \Delta y$ ,  $m = -M/2 + 1, \dots, M/2$ ;  $n = -N/2 + 1, \dots, N/2$ .

$$F(k_{m_1}, k_{n_1}) = 2\pi [L_x L_y S(k_{m_1}, k_{n_1})]^{1/2} \times \begin{cases} \frac{[N(0, 1) + iN(0, 1)]}{\sqrt{2}}, & m_k \neq 0, M/2 \text{ 且 } n_k \neq 0, N/2 \\ N(0, 1), & m_k = 0, M/2 \text{ 或 } n_k = 0, N/2 \end{cases} \quad (10)$$

式中  $S(k_x, k_y)$  为二维高斯粗糙面的功率谱密度

$$S(k_x, k_y) = \delta^2 \frac{l_x l_y}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_x^2 l_x^2 + k_y^2 l_y^2}{4}\right) \quad (11)$$

式中  $k_{m_1} = 2\pi m_1 / L_x$ ,  $k_{n_1} = 2\pi n_1 / L_y$ ,  $\delta$  为粗糙目标表面的高度起伏均方根, 其值为  $\delta = \sqrt{E[h^2(x, y)] - \{E[h(x, y)]\}^2}$ , 自相关函数为  $\rho(R_x) = E[h(x)h(x+R_x)] / \delta^2$  和  $\rho(R_y) = E[h(y)h(y+R_y)] / \delta^2$ , 把  $\rho(R_x)$  和  $\rho(R_y)$  等于  $1/e$  时对应的  $R_x$  和  $R_y$  值记为  $l_x$  和  $l_y$ , 分别称为  $x$  方向和  $y$  方向的相关长度。

因此, 由式(8)和(9)可以看出, 归一化中频电流与高度起伏均方根  $\delta$  和相关长度  $l$  有关, 不同的  $\delta$  和  $l$  对应的中频电流是不同的。

## 2 仿真结果与分析

由于粗糙目标表面凹凸不平, 使用 Monte Carlo 方法建立的仿真模型如图 2, 仿真中取  $\lambda = 532 \text{ nm}$ . 不同位置回波达到探测器的光程差是不同的, 这导致退相干效应<sup>[15]</sup>, 使光信号接收信噪比下降. 图 2 是相关长度一样但不同均方根高度起伏的两个粗糙目标表面形貌的仿真结果, 都是高斯分布. 由图 2 可以看出: (b) 的表面起伏比(a)大。

实际中不同目标, 如农田、沙地、草地、森林的粗糙度是不同的. 平坦沙地不稳定层粗糙度平均值为  $(0.5 \sim 1.1) \times 10^{-4} \text{ m}$ , 若取  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 即  $100\lambda \sim 200\lambda$ . 由于回波信号是周期函数, 不管粗糙目标表面起伏多大, 最终导致的回波相位调制效应, 只与实际相位去掉周期的整数倍以后剩下的相位有关。

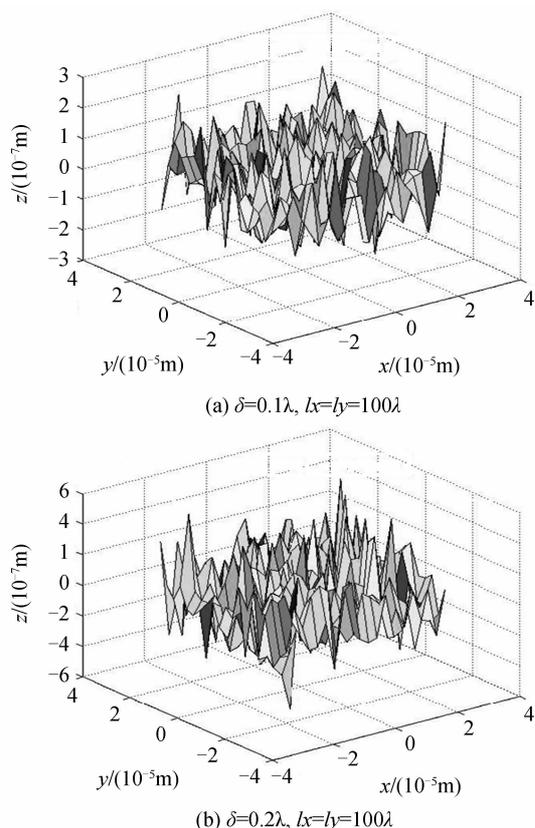


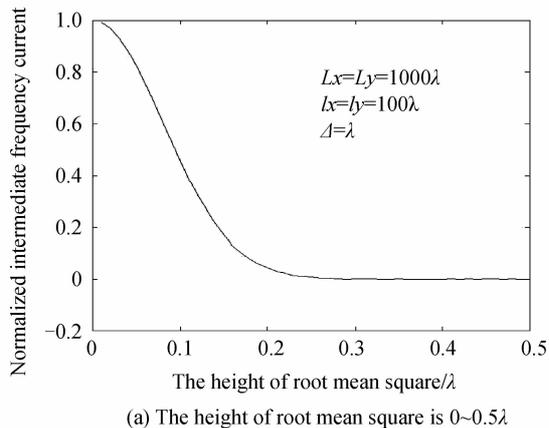
图2 二维高斯随机粗糙面

Fig. 2 Two-dimensional Gaussian random rough surface

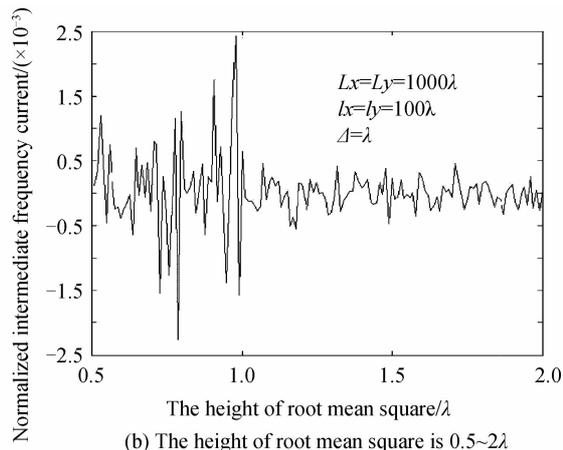
### 2.1 粗糙度“纵向”变化对归一化中频电流的影响

高度起伏均方根和相关长度是以 Monte Carlo 方法建立的粗糙面的两个重要参量,高度起伏均方根决定了粗糙面的“纵向”变化特征,表示粗糙表面轮廓的凹凸变化情况;相关长度决定了粗糙面的“横向”变化特性,表示粗糙面上高度变化的剧烈程度,这两者是描述目标表面粗糙特性的重要参量。

当相关长度  $l$  一定时,对 200 个不同粗糙程度  $\delta$  的目标计算归一化中频电流。计算时,每一个  $\delta$  值计算 1000 次中频电流,再取归一化中频电流的平均值,最后由这 200 个平均值绘出归一化中频电流随高度起伏均方根  $\delta$  的变化关系如图 3(注意图 3(a)、(b)纵轴标



(a) The height of root mean square is 0~0.5 $\lambda$



(b) The height of root mean square is 0.5~2 $\lambda$

图3 归一化中频电流随高度起伏均方根变化

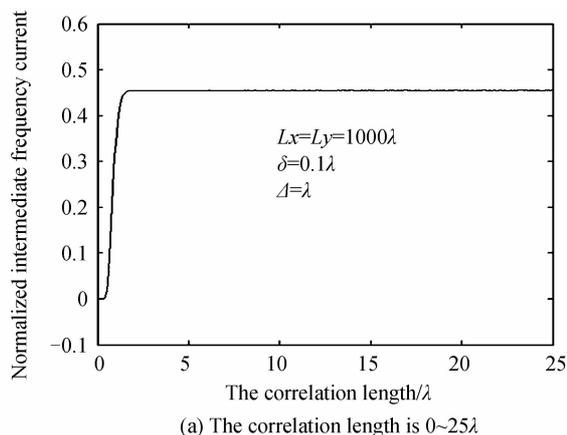
Fig. 3 Normalized intermediate frequency current variation with the height of root mean square

度的数量级不同)。计算时,相关长度为  $l_x = l_y = 100\lambda$  保持不变,高度起伏均方根(从 0 变化到  $2\lambda$ , 计算步长  $0.01\lambda$ 。每个粗糙面计算时,取  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 采样长度  $L_x = L_y = 1000\lambda$ , 采样间隔  $\Delta = \lambda$ , 每个粗糙面离散点数  $1000 \times 1000$ 。

由图 3 可知,当  $0 < \delta < 0.2\lambda$  时,归一化中频电流平均值随高度起伏均方根的增大而减小;当  $\delta > 0.2\lambda$  时,归一化中频电流平均值变化无明显规律,其平均值在零值附近随机波动。这一波动是由于目标表面随机起伏的统计特性引起的,同时表明当目标表面粗糙度达到一定值时,光外差信号平均值非常微弱,对光外差探测造成困难。

### 2.2 粗糙度“横向”变化对归一化中频电流的影响

当高度起伏均方根  $\delta$  一定时,对 1500 个不同粗糙程度(不同  $l$ )的目标产生的归一化中频电流平均值进行计算,每一个粗糙面目标计算 1000 次,得到的归一化中频电流值再取平均值,最后由这 1500 个平均值绘出归一化中频电流平均值随相关长度  $l$  的变化关系如图 4。计算时,高度起伏均方根  $\delta = 0.1\lambda$  保持不变,图 (a)中相关长度从 0 变化到  $25\lambda$ , 计算步长为  $0.05\lambda$ ;图 (b)中相关长度从 0 变化到  $1000\lambda$ , 计算步长为  $\lambda$ 。每个



(a) The correlation length is 0~25 $\lambda$

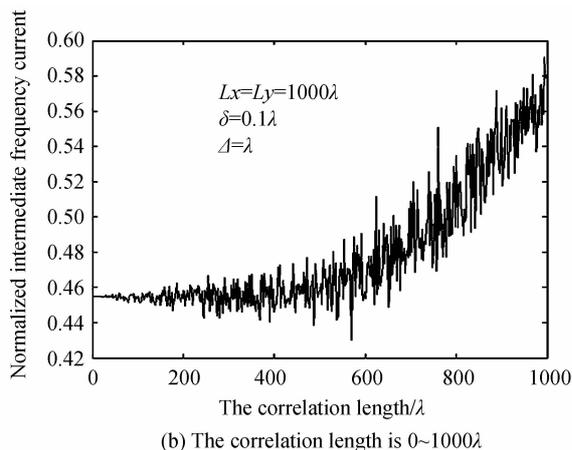
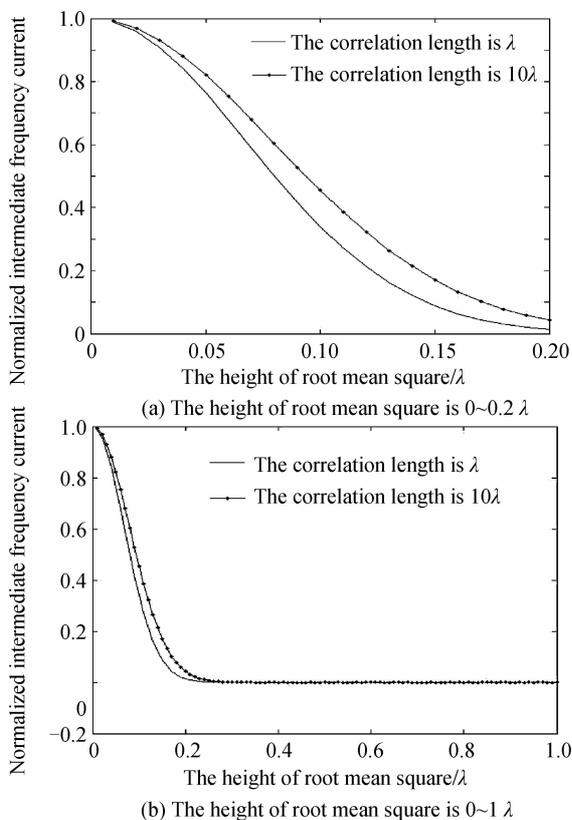


图4 归一化中频电流平均值随相关长度变化

Fig. 4 Normalized intermediate frequency current variation with the correlation length

粗糙目标计算时,取  $\lambda=532\text{ nm}$ , 采样长度  $L_x=L_y=1\ 000\lambda$ , 采样间隔  $\Delta=\lambda$ , 离散点数  $1\ 000\times 1\ 000$ .

均方根  $\delta=0.1\lambda$  时,当  $0<l<1.8\lambda$  时,归一化中频电流平均值随相关长度的增大而急剧增大;当  $l>1.8\lambda$  时,归一化中频电流平均值随相关长度的增大而增大,并且产生随机波动,这一波动也是由于目标表面随机起伏的统计特性引起的.需要注意的是,当相关长度  $l$  很大时,目标表面已接近光滑,呈缓慢增长的趋势.

图5 归一化中频电流平均值随均方根高度和相关长度变化  
Fig. 5 Normalized intermediate frequency current variation with the height of root mean square and the correlation length

当相关长度和高度起伏均方根同时变化时,归一化中频电流平均值的变化情况如图5,图中取  $\lambda=532\text{ nm}$ , 采样长度  $L_x=L_y=1\ 000\lambda$ , 离散点数  $1\ 000\times 1\ 000$ , 采样间隔  $\Delta=\lambda$ .

### 3 结论

建立粗糙面的 Monte Carlo 模型,研究了目标回波光外差信号与目标粗糙程度参量——均方根高度及相关长度的相互关联.数值仿真给出了光外差信号与均方根高度及相关长度的定量关系曲线.结果表明:光外差信号的平均值受均方根高度参量影响很大,在  $0<\delta<0.2\lambda$  范围内,外差信号随着高度起伏增大而急剧下降,当  $\delta>0.2\lambda$  时,外差信号基本稳定,但振幅平均值已很小,给外差探测带来困难.对于一定的表面起伏均方根值,相关长度越大(也就是表面越“平滑”),外差信号越强.当相关长度在  $0<l<1.8\lambda$  时,外差信号随着  $l$  的增大而迅速增大,当  $l>1.8\lambda$  时,增长趋于缓慢.

#### 参考文献

- [1] STEPHEN M, BARRY D C, THOMAS J, *et al.* Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(6): 960-964.
- [2] THOMAS J, GREEN Jr, STEPHEN M, *et al.* Colella synthetic aperture radar imaging with a solid-state laser[J]. *Applied Optic*, 1995, **34**(30): 6941-6949.
- [3] SHIN Y, TADSSHI A. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(24): 5631-5639.
- [4] SHIN Y, TADSSHI A. Short-range verification experiment of a trial one dimensional synthetic aperture infrared laser radar operated in the  $10\mu\text{m}$  band[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(9): 1421-1425.
- [5] AMAUD W, ERIC L, OLIVIER H, *et al.* Synthetic aperture laser optical feedback imaging using galvanometric scanning [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(20): 3031-3033.
- [6] STEVEN M B, JOSEPH R B, WALTER F B, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(4): 7621-7629.
- [7] HE Jin, ZHANG Qun, YANG Xiao-you, *et al.* Sampling technology of ISAIL [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1272-1277.  
何劲, 张群, 杨小优, 等. 逆合成孔径成像激光雷达数据采样技术[J]. 光子学报. 2010, **39**(7): 1272-1277.
- [8] ZHANG Hai-yang, ZHAO Chang-ming, JIANG Jun-qi, *et al.* Detection of doppler signal of moving target using  $1.06\mu\text{m}$  coherent detection lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 507-511.  
张海洋, 赵长明, 蒋奇军, 等.  $1.06\mu\text{m}$  相干激光雷达动目标多普勒信号探测[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 507-511.
- [9] DAI Pin-juan, LIU Guo-guo, WU Jin. Numerical simulation on synthetic aperture ladar imaging through atmospheric turbulence with phase gradient algorithm compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 739-746.  
戴品娟, 刘国国, 吴谨. 大气湍流下合成孔径激光雷达成像数值模拟及 PGA 补偿[J]. 光学学报. 2010, **30**(3): 739-746.
- [10] PANG Ya-jun, WANG Chun-hui, TANG Tian-tian. Principle of dual-balanced coherent receive and its application

- in heterodyne interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1015-1018.
- 庞亚军,王春晖,唐甜甜. 双平衡式相干接收原理及其在外差干涉仪中的应用研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9):1015-1018.
- [11] HONG Guang-lie, GUO Liang. Effects of angle vibration on imaging quality of synthetic aperture ladar[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, **30**(6): 571-576.
- 洪光烈,郭亮. 角振动对合成孔径激光雷达成像的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(6):571-576.
- [12] LIU Li-ren. Synthetic aperture imaging ladar (VI): space-time speckle effect and heterodyne signal-to-noise ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2326-2332.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(VI):时空散斑效应和外差探测性噪比[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8):2326-2332.
- [13] WANG Qi, WANG Chun-hun, SHANG Tie-liang, *et al.* Signal noise ratio in optical heterodyne detection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(suppl.): 183-186.
- 王琪,王春晖,尚铁梁,等. 高斯本振光和艾里斑信号光相干探测的外差效率[J]. *中国激光*, 2003, **30**(增刊): 183-186.
- [14] 郭立新,王蕊,吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论与方法[M]. 科学出版社, 2010,1:1-30.
- [15] DANG Wen-jia, ZENG Xiao-dong, FENG Zhe-jun. Decoherence effect of target roughness in synthetic aperture Ladar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(2): 024204.
- 党文佳,曾晓东,冯喆珺. 目标粗糙对合成孔径激光雷达的退相干效应[J]. *物理学报*. 2013, **62**(2): 024204.