

目标粗糙对合成孔径激光雷达回波的退相干效应*

党文佳[†] 曾晓东 冯喆珺

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2012年7月4日收到; 2012年7月12日收到修改稿)

本文研究了目标表面粗糙对回波信号探测的影响, 通过蒙特卡罗方法建立一维和二维目标高斯随机粗糙面模型, 并对目标回波信号的探测过程进行仿真, 研究目标表面粗糙对中频信号的影响. 还进行了粗糙面和光滑面两组光外差探测实验, 验证目标粗糙对合成孔径激光雷达回波信号严重的“退相干”效应. 同时, 采用数字波前分析仪对探测器处本振光和信号光波前分别进行检测, 检测结果与仿真一致, 证明粗糙面回波相位畸变严重. 文中研究结果对设计光源参数、接收系统参数以及评估系统作用距离奠定基础, 为合成孔径激光雷达系统设计提供定量参考.

关键词: 合成孔径激光雷达, 退相干, 粗糙表面, 蒙特卡罗方法

PACS: 42.25.Hz, 42.25.Kb, 42.15.Dp

DOI: 10.7498/aps.62.024204

1 引言

合成孔径激光雷达 (SAL) 是合成孔径雷达 (SAR) 技术和激光雷达^[1] (Ladar) 技术的结合, 与微波雷达相比可大幅度提高空间分辨率. 近些年来, SAL 成为国内外研究^[2-5] 的热点, 但至今不能实用化^[6-11], 其中一个重要的原因就是受光外差探测技术的制约. 光外差探测有很多的优点, 因此, 被广泛应用^[12] 在光通信和合成孔径激光雷达等众多关键领域中. 然而光外差探测实现的条件非常苛刻, 如本振光和信号光必须偏振匹配, 模式匹配, 波前^[13,14] 匹配等.

因为光波的波长很小, 目标表面的微小起伏都会造成很大的相位差, 所以绝大多数实际目标, 对光波来说都是粗糙的. 如当波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 时, 266 nm 的高度差就会引起回波 π 相位差, 从而造成目标表面不同位置回波外差信号相互抵消, 大大降低外差效率, 故研究随机粗糙面的高度起伏对外差信号的影响非常必要. 但目前对目标回波光外差探测的研究大多数还把目标当成光滑面, 没有考虑目标

粗糙引起的退相干效应. 这对于发射光源功率的确定、探测系统参数设计以及实际系统性能评估造成巨大误差.

本文就这一问题进行了深入分析, 建立了一维和二维随机粗糙面模型, 分析了由目标表面粗糙度随机起伏引起的相位差变化, 定量分析了对光外差中频信号的影响. 为了分析简单, 以下的讨论都是基于下面这些假设: 1) 信号光束和本振光束偏振态和初相位相同; 2) 信号光束和本振光束都是均匀的, 即它们的振幅与横向坐标无关; 3) 不考虑光路中其它因素对信号光和本振光初相位和振幅的影响, 只考虑随机粗糙面在探测器光敏面处产生的光电流的相位差对外差信号的影响.

2 理论分析

2.1 光外差探测基本原理

光外差探测的本质是本振光与信号光在光电探测器光敏面上的相干效应, 对光波所携带的振幅, 频率, 相位等信息进行探测. 光外差探测的原理如图 1 所示.

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2006AA12Z144) 和国家自然科学基金 (批准号: 61107006) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wenjia.dang@126.com

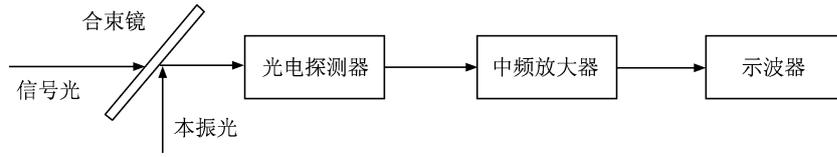


图1 光外差探测原理图

假设本振光与信号光的电场分布为

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

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

则探测器上一个面元 $dx dy$ 上的中频信号为

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

假设回波信号的相位分布是 $\varphi_s(x, y)$, 若光电探测器光敏面的响应度是均匀的, 则 α 为常数, 此时探测器输出的中频信号为

$$i_{IF}(t) = \alpha A_s A_1 \iint_S \cos\{(\omega_s - \omega_1)t + [\varphi_s(x, y) - \varphi_1]\} dx dy, \quad (4)$$

其中, A_s 和 A_1 分别为信号光和本振光的振幅, ω_s 和 ω_1 分别为信号光和本振光的频率, φ_s 和 φ_1 分别为信号光和本振光的相位, α 是光电探测器的响应度, S 是探测器光敏面面积.

当目标表面粗糙时, 光电探测器接收到的信号来自目标不同部位. 光波长很短, 不同部位表面起伏导致回波相位起伏, 引起 (4) 式中被积函数互相抵消, 使外差探测性能恶化. 这种现象我们称之为“退相干”效应.

2.2 随机粗糙面建模的蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法是以高度起伏均方根 δ 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. 如假设一维随机粗糙面的表面形状为 $h(x)$, 且服从高斯分布, 则粗糙面的高度起伏均方根为

$$\delta = \sqrt{E[h^2(x)] - \{E[h(x)]\}^2}. \quad (5)$$

自相关函数 $G(R) = E[h(x)h(x+R)]$, 则归一化自相关函数为

$$\rho(R) = \frac{E[h(x)h(x+R)]}{\delta^2}, \quad (6)$$

式中 R 是粗糙面上两点间的距离. 把 $\rho(R)$ 降至 $1/e$ 时的 R 值称为表面相关长度, 记为 l .

高斯分布的相关函数

$$G(R) = \delta^2 \exp\left(\frac{-R^2}{l^2}\right). \quad (7)$$

将非归一化的高斯相关函数 $G(R)$ 进行 Fourier 变换, 就可以得到高度起伏的高斯功率谱密度, 记为

$$S(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(R) \exp(ikR) dR = \frac{\delta^2 l}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-k^2 l^2}{4}\right). \quad (8)$$

2.2.1 一维高斯随机粗糙面的离散化

粗糙表面可以认为是由大量的谐波叠加而成, 谐波的振幅是独立的高斯随机变量, 其方差正比于特定波函数的功率谱 $S(k_j)$. 因此, 由下列函数生成长度为 L 的一维随机表面样本即

$$h(x_n) = \frac{1}{L} \sum_{j=-N/2+1}^{N/2} F(k_j) \exp(ik_j x_n), \quad (9)$$

其中, $x_n = n\Delta x (n = -N/2 + 1, \dots, N/2)$ 表示粗糙面上第 n 个采样点, $F(k_j)$ 与 $h(x_n)$ 互为 Fourier 变换对, 定义为

$$F(k_j) = \frac{2\pi}{\sqrt{2\Delta k}} \sqrt{S(k_j)} \times \begin{cases} [N(0, 1) + iN(0, 1)], & j = -N/2 + 1, \dots, -1, \\ N(0, 1), & j = 0, N/2, \end{cases} \quad (10)$$

其中, $N(0, 1)$ 表示均值为 0, 方差为 1 的正态分布的随机数.

图 2 给出了不同均方根、相关长度的一维高斯随机粗糙面样本函数.

2.2.2 二维随机高斯粗糙面的离散化

假设二维高斯随机粗糙面在 x 和 y 方向的长度分别为 L_x 和 L_y , 等间隔离散点数分别为 M 和 N ,

相邻两点间的距离分别为 Δx 和 Δy , 即有 $L_x = M\Delta x$, $L_y = N\Delta y$, 则粗糙面上每一点处的高度可表示为

$$h(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m_k=-M/2+1}^{M/2} \sum_{n_k=-N/2+1}^{N/2} F(k_{m_k}, k_{n_k}) \times \exp[i(k_{m_k} x_m + k_{n_k} y_n)], \quad (11)$$

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

$$F(k_{m_k}, k_{n_k}) = 2\pi [L_x L_y S(k_{m_k}, k_{n_k})]^{1/2} \times \begin{cases} \frac{[N(0, 1) + iN(0, 1)]}{\sqrt{2}}, & m_k \neq 0, M/2 \text{ 且 } n_k \neq 0, N/2, \\ N(0, 1), & m_k = 0, M/2 \text{ 或 } n_k = 0, N/2. \end{cases} \quad (12)$$

$S(k_x, k_y)$ 为二维高斯粗糙面的功率谱密度, 其中, $k_{m_k} = 2\pi m_k / L_x$, $k_{n_k} = 2\pi n_k / L_y$.

$$S(k_x, k_y) = \delta^2 \frac{l_x l_y}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_x^2 l_x^2 + k_y^2 l_y^2}{4}\right). \quad (13)$$

通过 (11) 式、(12) 式、(13) 式就可以模拟二维高斯粗糙面. 图 3 给出了不同均方根和相关长度的二维高斯随机粗糙面的样本函数. 由图 2 和图 3 可以看出, 当相关长度相同时, 均方根高度越大, 粗糙面的起伏就越大; 而均方根固定时, 相关长度越小, 粗糙面变化就越剧烈, 即变化的周期就越小. 可见, 均方根高度决定着粗糙面的“纵向”变化特性, 相关长度决定着粗糙面的“横向”变化特性.

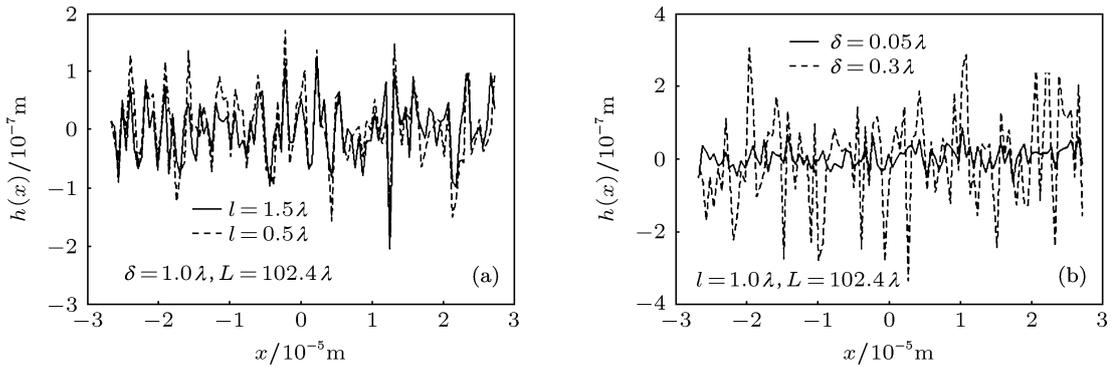


图 2 一维高斯随机粗糙面样本函数

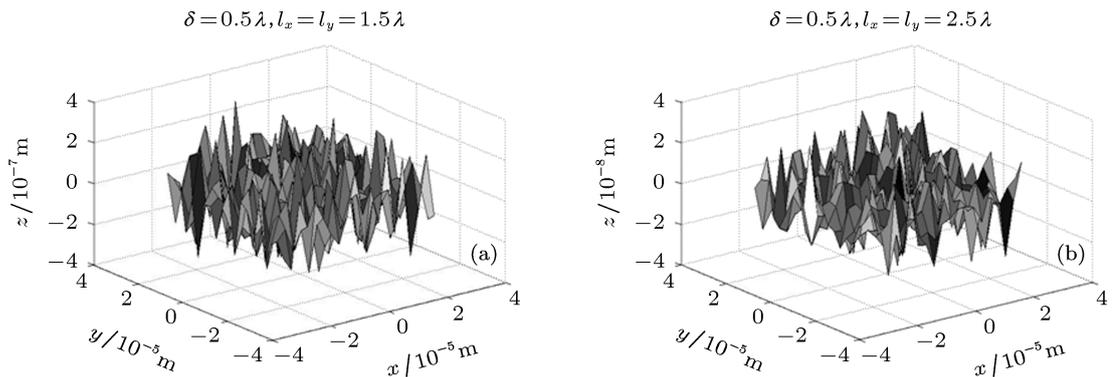


图 3 二维高斯随机粗糙面样本函数

3 数值模拟与分析

当目标表面粗糙度随机起伏时, 光程差也会随机起伏, 最终导致回波信号的相位差波动, 本振光

和信号光在光电探测器光敏面混频时, 不同位置的中频电流产生抵消, 使得外差效率降低. 以下讨论不考虑其他因素对相位的影响, 只考虑粗糙面高度起伏产生的相位差对中频电流的影响. 假设用蒙特

卡罗模拟生成的随机粗糙面高度起伏为 $h(x,y)$, 此时回波信号相位差与高度起伏之间的关系可以表示为

$$\Delta\varphi(x,y) = \frac{4\pi}{\lambda}h(x,y). \quad (14)$$

由此可以模拟出任意目标表面粗糙对应的回

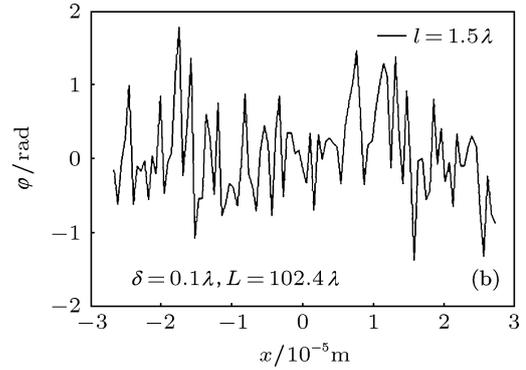
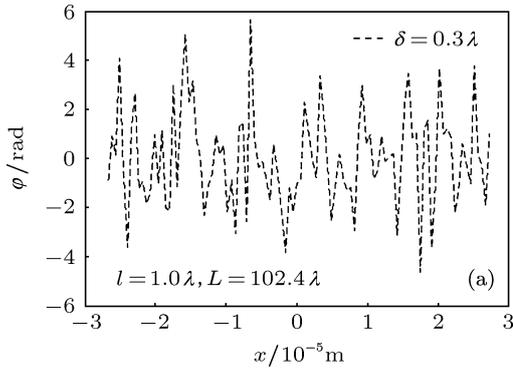


图4 一维高斯随机粗糙面回波信号相位差 (a) 目标为 $\delta = 0.3\lambda$ 粗糙面回波信号相位差; (b) 目标为 $l = 1.5\lambda$ 粗糙面回波信号相位差

利用 (11) 式就可以模拟光外差信号. 在探测器光敏面上任取一点 (i, j) , 对应小面元面积为 Δ_{ij} , 产生的光电流为

$$di(t) = \alpha |A_s| |A_i| \cos[(\omega_s - \omega_i)t + \Delta\varphi_{ij}] \Delta_{ij}. \quad (15)$$

令 $A = \alpha |A_s| |A_i|$, 则上式变换为

$$di(t) = A \cos(\omega_{IF}t + \Delta\varphi_{ij}) \Delta_{ij}. \quad (16)$$

将 (14) 式的相位差代入 (16) 式得

$$di(t) = A \cos\left[\omega_{IF}t + \frac{4\pi}{\lambda}h(x_i, y_j)\right] \Delta_{ij}. \quad (17)$$

将整个探测器各点相加, 得到总的中频电流为

$$i_{IF} = A \cdot \Delta \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \cos\left[\omega_{IF}t + \frac{4\pi}{\lambda}h(x_m, y_n)\right]. \quad (18)$$

(18) 式已假设网格均匀划分, 各 $\Delta_{ij} = \Delta$ 相同. 在某个特定的时间点, 不妨假设 $t = 0$ 时刻, 则上式转化为

$$i_{IF} = A \cdot \Delta \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda}h(x_m, y_n)\right]. \quad (19)$$

当不存在高度起伏, 即认为目标是光滑面反射时, 取同样数目点, 由于 $\Delta\varphi_{ij} = 0$, $i = 1, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N$, 此时, 总的中频电流为

$$i_{IF\text{光滑面}} = M \cdot N \cdot A \cdot \Delta. \quad (20)$$

波信号相位差变化. 图 4(a) 和 (b) 分别是目标为 $\delta = 0.3\lambda$, $l = 1.5\lambda$ 时一维高斯随机粗糙面回波信号的相位差. 图 5 是目标为 $\delta = 1.5\lambda$, $l_x = l_y = 2.5\lambda$ 时二维高斯随机粗糙面回波信号的相位差. 图 6 是目标为 $\delta = 0$, $l_x = l_y = \infty$ 时, 即目标为光滑平面时, 回波信号的相位差.

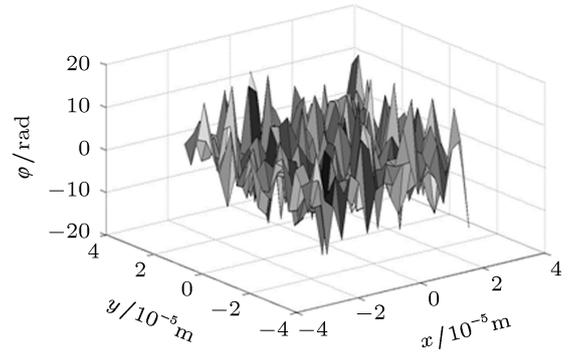


图5 目标为 $\delta = 1.5\lambda$, $l_x = l_y = 2.5\lambda$ 粗糙面回波信号相位差

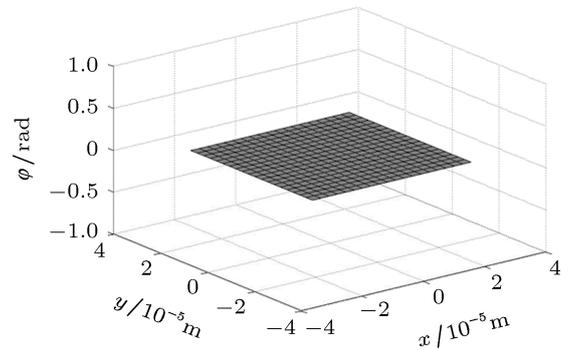


图6 目标为光滑平面回波信号相位差

(19) 式与 (20) 式相比, 即归一化中频电流为

$$i_{IF} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda}h(x_m, y_n)\right]. \quad (21)$$

目标为一维高斯随机粗糙面时, 归一化中频电流为

$$i_{IF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h_i\right). \quad (22)$$

图 7(a), (b), (c), (d) 是目标分别为 $\delta = 0.2\lambda$, $\delta = 10\lambda$, $l = 5\lambda$, $l = 10\lambda$ 的一维高斯随机粗糙面

时, 归一化中频电流在探测器光敏面上的分布. 图 8(a), (b), (c) 是目标分别为 $\delta = 0.2\lambda$, $l_x = l_y = 50\lambda$; $\delta = 5\lambda$, $l_x = l_y = 50\lambda$ 以及 $\delta = 5\lambda$, $l_x = l_y = 10\lambda$ 的二维高斯随机粗糙面时, 归一化中频电流在探测器光敏面上的分布.

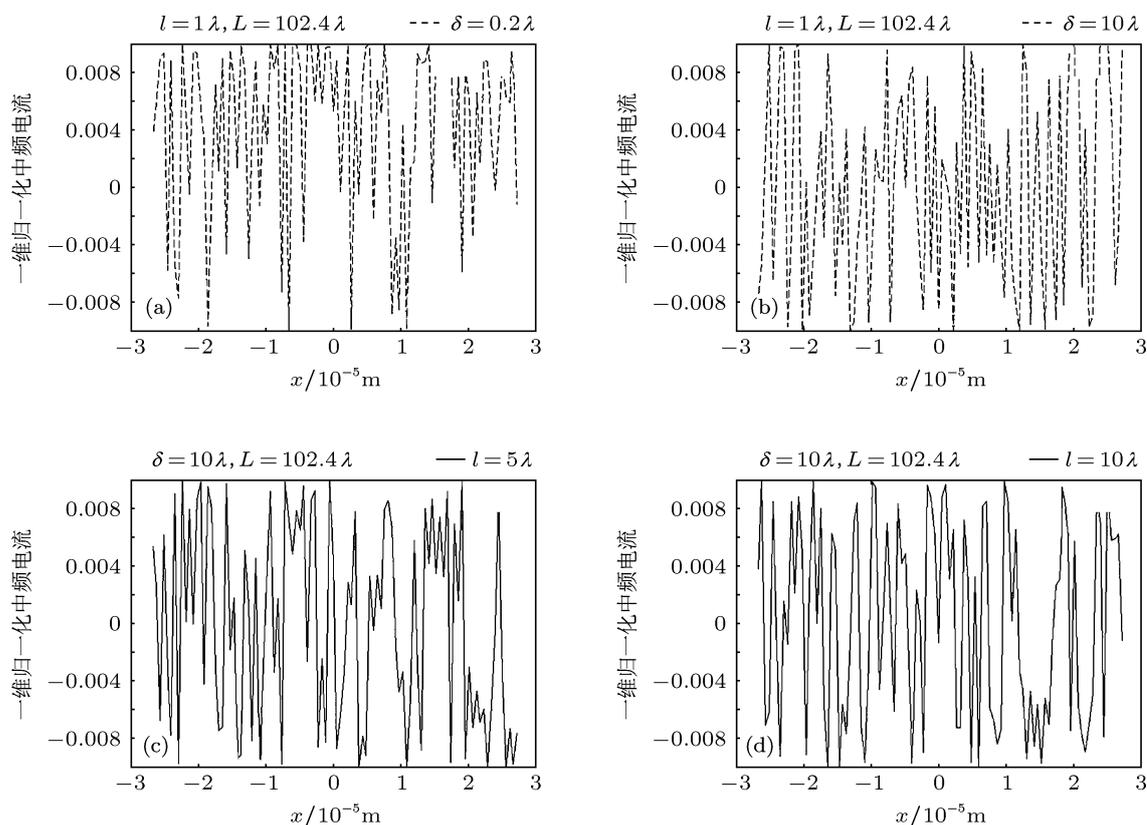


图 7 一维归一化中频电流在探测器光敏面上的分布 (a) 目标为 $\delta = 0.2\lambda$ 的一维高斯随机粗糙面; (b) 目标为 $\delta = 10\lambda$ 的一维高斯随机粗糙面; (c) 目标为 $l = 5\lambda$ 的一维高斯随机粗糙面; (d) 目标为 $l = 10\lambda$ 的一维高斯随机粗糙面

经计算, 图 7 中一维归一化中频电流值分别为: (a) 0.4320, (b) 0.0108, (c) 0.0075, (d) 0.0254. 当相关长度一定时, 均方根越小, 粗糙面越光滑, 中频信号越大; 当均方根一定时, 相关长度越大, 粗糙面越光滑, 中频信号越大.

经计算, 图 8 归一化中频电流值分别为 (a) 0.4812, (b) 0.0068, (c) 0.0033. 由图 8(a), (b) 和 (c) 对比可以得出和一维时相同的结论. 即目标表面越光滑, 归一化中频电流越大, 外差信号越强. 若目标为光滑面时, 归一化中频电流达到最大值 1, 此时外差信号最强. 只要目标表面粗糙, 其上不同部位回波的外差信号有可能发生反相, 使中频电流相互抵消, 总的外差效率降低, 造成中频信号的“退相干”效应.

4 实验系统及测量结果

实验装置结构框图如图 9, 用于检测目标表面粗糙引起的外差中频电流变化, 验证目标表面粗糙对合成孔径激光雷达信号的“退相干”效应.

图 9 中采用 Coherent 公司的 Verdi-II 激光器, 波长为 532 nm, 线宽 5 MHz, 光束直径 $2.25 \text{ mm} \pm 2.25 \text{ mm} \times 10\%$, 发散角 $< 0.5 \text{ mrad}$. 声光调制器采用中国电子科技集团公司第二十六研究所的 TSGMN-3/Q 声光调制器, 调制频率 100 MHz. 放大器由中国电子科技集团第十三研究所提供, 放大器型号为 SSFSL101000-80 型可变增益滤波放大器, 小信

号功率增益大于等于 60 dB, 噪声系数小于等于 2.0 dB. 探测器采用 PIN 光电二极管, 光敏面直径 0.5 mm.

分别采用光滑的平面反射镜和 A4 复印纸作为目标进行检测. 在显微镜下观察, 复印纸由植物纤维杂乱编织而成, 是典型的“退相干性”目标. 而反

射镜则认为表面平整, 经过镜面不同位置反射的回波信号不会有相位差变化, 产生的中频电流最大. 两次测量本振光保持相同, 当目标换为 A4 复印纸后, 反射率下降, 通过改变衰减器使照射功率加大, 以保证从目标回到探测器的光功率与镜面时一致. 实验实测数据如表 1.

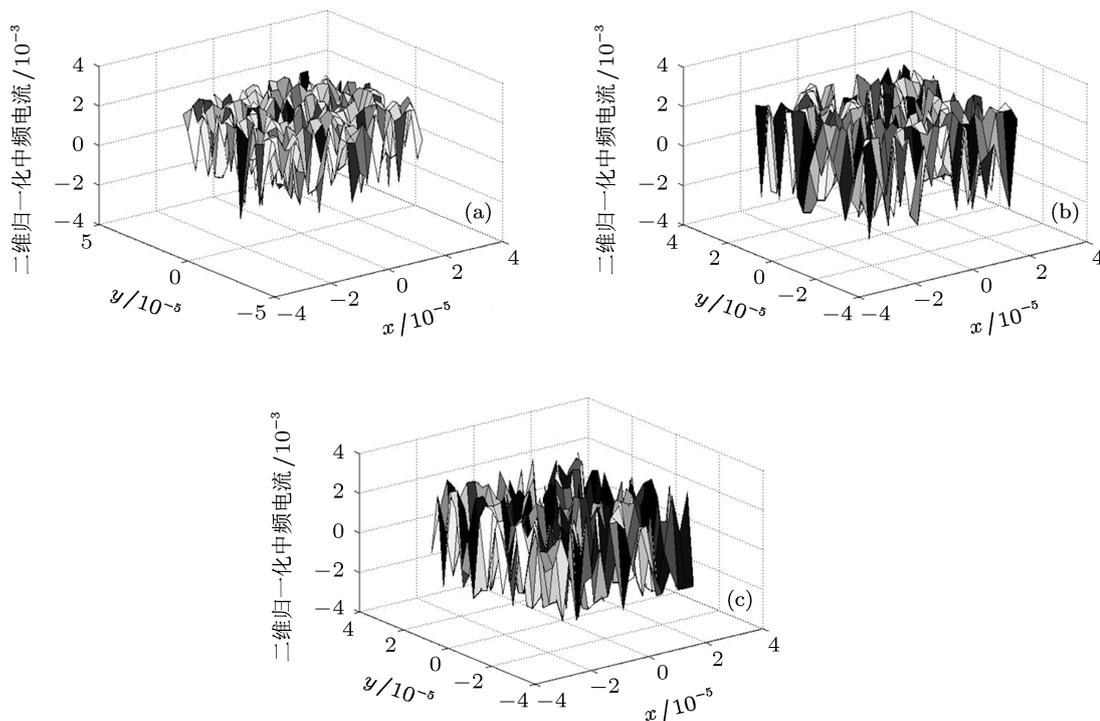


图 8 二维归一化中频电流在探测器光敏面上的分布 (a) 目标为 $\delta = 0.2\lambda, l_x = l_y = 50\lambda$ 的二维高斯随机粗糙面; (b) 目标为 $\delta = 5\lambda, l_x = l_y = 50\lambda$ 的二维高斯随机粗糙面; (c) 目标为 $\delta = 5\lambda, l_x = l_y = 10\lambda$ 的二维高斯随机粗糙面

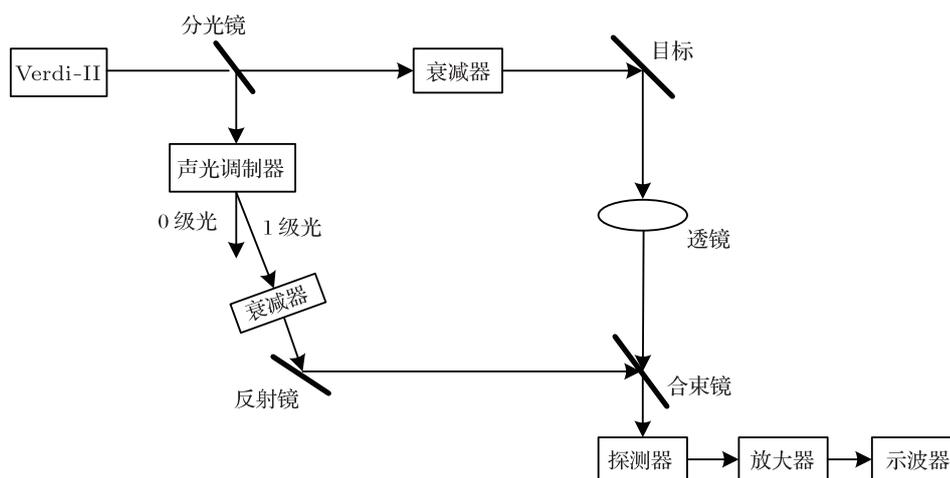


图 9 实验装置结构框图

表 1 光外差实验数据表

目标	照射功率/mW	放大器增益/dB	本振光/mW	信号光/mW	外差信号/mV
反射镜	0.322	60	3.91	87.2	1220
复印纸	630	60	3.91	87.2	29.5

两次实验中频信号波形如图 10 和图 11.

图 10 外差信号为 1.22 V, 示波器量程为 500 mV/div; 图 11 外差信号为 29.5 mV, 示波器量程为 10 mV/div, 两图中外差信号相差 41 倍, 这完全是由于目标粗糙的“退相干”效应所致. 实验结果验证了表面粗糙的目标“退相干性”非常严重.

同时, 两次实验均采用 PhaseView DWC1000 数字波前分析仪对探测器处信号光和本振光的波前分别进行测试. 实验测得波前变化如图 12 至图 15.

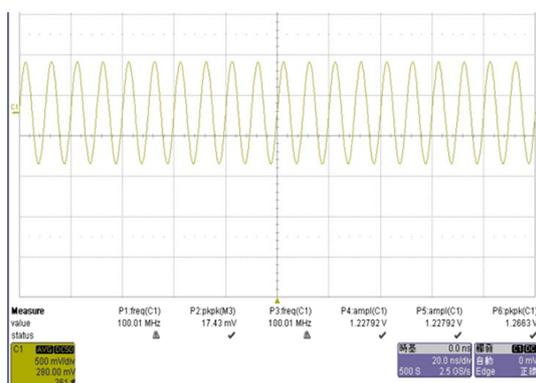


图 10 反射镜光外差实验中频信号

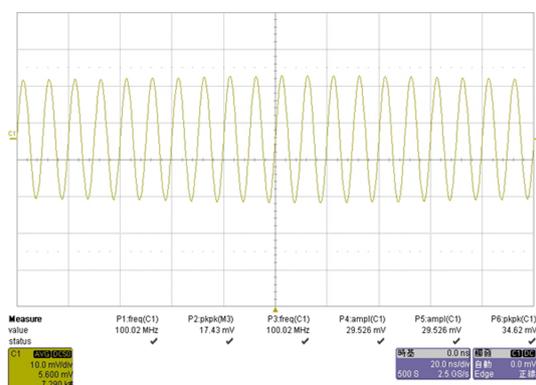


图 11 A4 复印纸光外差实验中频信号

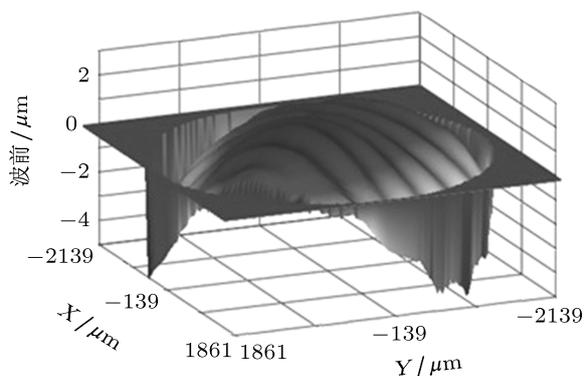


图 12 光源波前

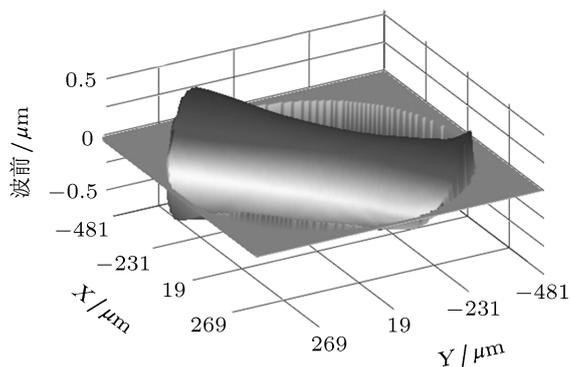


图 13 本振光波前

本振光和反射镜回波信号的波前比较光滑, 略有起伏, 可能是高反膜和衰减器不均匀所致. 图 15 为复印纸回波信号波前, 此时波前表面起伏杂乱无章, 与图 14 相差甚远, 很难和本振光波前曲率匹配, 是严重影响外差信号的因素.

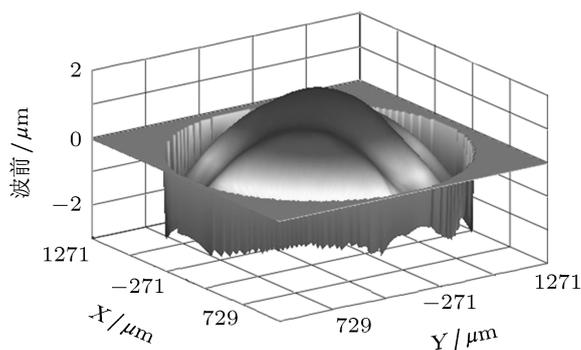


图 14 反射镜回波信号波前

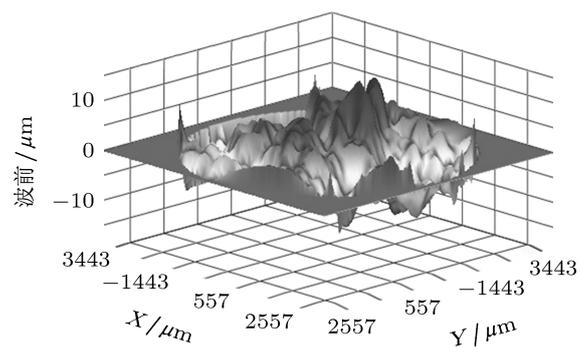


图 15 复印纸回波信号波前

5 结论

目标表面粗糙引起的回波信号的相位起伏, 直接影响外差信号的大小, 这种严重的“退相干性”对合成孔径激光雷达的实际应用有重要影响, 也对探测系统设计和性能评估造成很大误差. 而现实中的

目标对光波来说基本上都是粗糙面,故粗糙面的光外差探测技术研究将成为合成孔径激光雷达技术实用化的关键.系统参数设计和性能评估中必须考虑粗糙表面的“退相干”效应.本文不仅对目标粗糙表面进行建模、理论推导和模拟了这种变化,并对波前进行实际检测,结果进一步验证了粗糙面严重

的“退相干性”.文中所用蒙特卡罗仿真方法适用于各种粗糙面建模.

综上所述,本文工作指出了目标粗糙的“退相干性”是造成目标回波外差检测性能恶化的重要因素;本文结论对定量设计光源参数、接收系统参数以及评估系统作用距离奠定基础.

-
- [1] Li Y H, Wu Z S, Gong Y J, Zhang G, Wang M J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6988 (in Chinese) [李艳辉, 吴振森, 宫彦军, 张耿, 王明军 2010 物理学报 **59** 6988]
- [2] Beck S M, Buck J R, Buell W F 2005 *Appl. Opt.* **44** 7621
- [3] Buell W F, Marechal N J 2005 *SPIE* **22** 661
- [4] Bell W, Marechal N, Buck J 2005 *SPIE* **5791** 152
- [5] Li Z J, Wu J, Liu G G, Zhu B Q 2010 *Acta Optica Sinica* **30** 994 (in Chinese) [李增局, 吴谨, 刘国国, 朱炳祺 2010 光学学报 **30** 994]
- [6] Guo L, Xing M D, Zhang L, Tang Y, Bao Z 2009 *Sci. China E* **52** 1678 (in Chinese) [郭亮, 邢孟道, 张龙, 唐禹, 保铮 2009 中国科学 E 辑 **52** 1678]
- [7] Dai P J, Liu G G, Wu J 2010 *Acta Optica Sinica* **30** 739 (in Chinese) [戴品娟, 刘国国, 吴谨 2010 光学学报 **30** 739]
- [8] Li F, Wu S Y, Zheng Y C, Yang H G 2006 *Infrared and Laser Engineering* **35** 56 (in Chinese) [李番, 鄢双阳, 郑永超, 杨红果 2006 红外与激光工程 **35** 56]
- [9] Chen Y B, Tang B, Wang L N, Zhang M D, Chinese J 2006 *Radio Science* **21** 975 (in Chinese) [陈云波, 唐波, 王丽娜, 张明东 2006 电波科学学报 **21** 975]
- [10] Hua Z L, Li H P 2009 *Acta Optica Sinica* **29** 1149 (in Chinese) [华志励, 李洪平 2009 光学学报 **29** 1149]
- [11] Lai Z, Zeng X D, Feng Z J, Cao C Q 2011 *Optics and Precision Engineering* **19** 1531 (in Chinese) [来志, 曾晓东, 冯喆君, 曹长庆 2011 光学精密工程 **19** 1531]
- [12] Li Y C, Wang C H, Gao L, Cong H F, Qu Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044207 (in Chinese) [李彦超, 王春晖, 高龙, 丛海芳, 曲杨 2012 物理学报 **61** 044207]
- [13] Luo Q, Huang L H, Gu N T, Li W, Rao C H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069501 (in Chinese) [罗群, 黄林海, 顾乃婷, 李雯, 饶长辉 2012 物理学报 **61** 069501]
- [14] Zhao T Y, Liu Q X, Yu F H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 074207 (in Chinese) [赵廷玉, 刘钦晓, 余飞鸿 2012 物理学报 **61** 074207]

Decoherence effect of target roughness in synthetic aperture ladar*

Dang Wen-Jia[†] Zeng Xiao-Dong Feng Zhe-Jun

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 4 July 2012; revised manuscript received 12 July 2012)

Abstract

Optical heterodyne detection is one of the key techniques for developing synthetic aperture ladar. The decoherence effect caused by the roughness of the target surface is particularly important for the practical use of the synthetic aperture ladar. The effect of the target surface roughness on the echo signal detection is discussed in the paper. One-dimensional and two-dimensional Gaussian random rough surface model are created by the use of the Monte Carlo method. The detection process of the target echo signal is simulated to study the effect of the target surface roughness on the intermediate frequency signal. And two optical heterodyne detection experiments are conducted in which the targets each include a rough surface and a smooth surface to verify the serious decoherence effect of the target roughness on the synthetic aperture laser radar echo signal. Meanwhile, the wavefronts of both the local oscillator and the signal beam are monitored at the position of the detector with a digital wavefront analyzer. The measured phase distribution accords well with the simulation result. It is shown that the phase of the echo signal from a rough surface has a serious distortion. The results obtained could be useful for designing the parameters of the laser source and the receiver, as well as for estimating the detection range of the ladar system.

Keywords: synthetic aperture ladar, decoherence, rough surface, Monte Carlo method

PACS: 42.25.Hz, 42.25.Kb, 42.15Dp

DOI: 10.7498/aps.62.024204

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z144), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107006).

[†] Corresponding author. E-mail: wenjia.dang@126.com