

一种机载合成孔径激光雷达相位误差补偿方法

华志励 李洪平

(中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100)

摘要 准确理解大气湍流扰动相位对光束传输特性的影响机制,并以此为基础发展有效的相位误差补偿算法是实现合成孔径激光雷达(SAL)高质量成像的关键之一。从激光光束的相位结构函数入手,提出了一种新的大气湍流相位屏产生方法——结构函数法,建立了满足 Kolmogorov 统计规律的大气湍流数值模型,计算了不同强度湍流作用下机载 SAL 的成像结果。通过将其与秩一相位估计法联合使用,克服了秩一法对初始值敏感的缺点,提高了补偿算法的精度和效率。实验表明,与谱反演法相比,结构函数法的计算结果更接近于理论值,同时计算复杂度由 $O(N^2)$ 降至 $O(N)$ 。改进的秩一法能够较为有效地改善一定强度范围内大气湍流引起的 SAL 图像失真,而且补偿后图像的信噪比相比传统的秩一法提高了大约 5 dB,计算时间也缩短了约 30%。

关键词 大气光学; 合成孔径激光雷达; 结构函数法; 大气湍流; 相位屏

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1149

Phase Errors Compensation in Airborne Synthetic Aperture Ladar Data Processing

Hua Zhili Li Hongping

(Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract Accurately understanding the effects of phase fluctuation on the laser beam propagation through the atmospheric turbulence, and then making an effective wavefront correction will improve the imaging ability of practical synthetic aperture ladar systems. Based on the phase structure function of laser beam, the structure-function method for generating phase screens is presented, by which the Kolmogorov turbulence of different strength is numerically simulated to investigate its distortion on SAL imaging ability. By combining it with the rank one phase estimation (ROPE) algorithm, improvement of both accuracy and efficiency can be obtained by overcoming the weakness that ROPE is sensitive to initial value. Experiments show that the simulating results by structure function method, will be much closer to the theoretical value than that by spectrum method, and computational complexity will also be reduced from $O(N^2)$ to $O(N)$. At the same time, image distortion induced by atmospheric turbulence within a certain intensity range can be restored by the modified ROPE algorithm. Compared with the traditional ROPE, compensation results by the modified method can have a 5 dB signal-to-noise ratio improvement, and computing time can be cut down by 30%.

Key words atmospheric optics; synthetic aperture ladar; structure-function method; atmospheric turbulence; phase screen

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)是一种全天候、全天时的微波成像雷达,通过发射宽频带信号和对回波多普勒信号的相干累积实现了距离向和方位向分辨率的提高。利用激光器为辐射源的合成孔径激光雷达(Synthetic aperture ladar,

SAL)使用了合成孔径技术,由于工作频率远高于微波,对相对运动速度相同的目标可产生更大的多普勒频移,因此不仅克服了普通激光雷达波束窄、搜索目标困难等缺点,而且能够提供比 SAR 更高的方位分辨率及更短的成像时间^[1~5]。

作为光学传播介质的大气不同于自由空间,大

收稿日期: 2008-07-01; 收到修改稿日期: 2008-10-16

作者简介: 华志励(1982—),男,博士研究生,主要从事合成孔径激光雷达成像算法方面的研究。

E-mail: hua_zhili@yahoo.cn

导师简介: 李洪平(1966—),男,教授,主要从事合成孔径激光雷达成像算法和高性能并行计算等方面的研究。

E-mail: lihongping@orsl.ouc.edu.cn

气密度的涨落、折射率的起伏等大气湍流效应会引起光束的波前扰动,影响光束的强度和相干性,严重降低雷达成像的质量^[6]。因此,准确理解大气湍流相位扰动对 SAL 成像的影响机制,并在此基础上发展有效的相位误差补偿算法是实现高质量 SAL 成像的关键之一。目前对大气湍流的研究除了传统的实验和理论分析之外,数值模拟也是一种有效的手段,而如何准确生成大气湍流相位屏又是数值模拟的一个核心问题。相位屏的产生方法主要分为谱反演法^[7,8]和多项式展开法^[9]两类,二者各有所长但也存在着一定的局限。其中谱反演法主要体现为低频不足,而多项式展开法则在高频部分有所缺失。

对相干信号相位误差的补偿问题,国内外已经开展了相关的研究,其中广泛应用于 SAR 成像处理的相位梯度自聚焦算法(PGA)和秩一相位估计法(ROPE)等^[10,11]随着不断地改进已经趋向成熟。但是,考虑到 SAL 高质量成像对相位信息精度的要求以及大气湍流相位畸变的随机性,上述方法是否依然适用尚属未知。

本文从激光光波的相位结构函数入手,根据 Monte Carlo 随机理论提出了一种新型的大气湍流相位屏的产生方法——结构函数法,对满足 Kolmogorov 统计规律的大气湍流进行了数值模拟。为了对 SAL 回波信号中的相位误差进行补偿,同时针对 ROPE 法存在的初始值敏感的缺点,在此本文对传统的 ROPE 法进行了改进,将结构函数法和 ROPE 法联合使用,实现了迭代运算初始条件的合理设置,并将该算法整合到聚束模式下机载 SAL 的成像模型中,较为有效地解决了一定强度范围内大气湍流扰动相位造成的图像退化。

2 大气湍流数值模型

对于在湍流大气中传输的激光光束,通常采用结构函数来对其统计特性进行描述,其定义为

$$D_R(r) = \langle [R(r_0 + r) - R(r_0)]^2 \rangle, \quad (1)$$

式中 R 为任意的一个随机变量, r_0 为某已知采样点的位置, r 为采样点之间的标量距离, $\langle \cdot \rangle$ 为在函数定义域内求平均。对于球面波,根据 Rytov 理论可知其波结构函数的表达式为

$$D(r) = 4\pi \int_0^{\infty} [1 - J_0(Kr)] \Phi(K) K dK, \quad (2)$$

式中 K 为空间波数, J_0 为零阶贝塞尔函数, $\Phi_n(K)$ 为大气湍流的功率谱密度,对于满足 Kolmogorov 统计规律的湍流谱,其谱密度表达式为

$$\Phi_n(K) = 0.033 C_n^2 K^{-11/3}, \quad \frac{2\pi}{L_0} \leq K \leq \frac{2\pi}{l_0} \quad (3)$$

式中 C_n^2 为大气湍流折射率结构常数, l_0 和 L_0 分别对应大气湍流的内外尺度。对于机载平台,通常认为大气湍流的内尺度 $l_0 \leq 1$ cm,外尺度 $L_0 \geq 1$ m,即 $l_0/L_0 \leq 0.01$ 。将 Kolmogorov 湍流谱代入(2)式可得

$$D_K(r) = 2.58 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{5/3} \left[1 - 1.1 \left(\frac{r}{L_0}\right)^{1/3} + 0.233 \left(\frac{r}{L_0}\right)^{7/3} \right], \quad (4)$$

式中, Fried 常数 $r_0 = (0.423 C_n^2 K^2 Z)^{-3/5}$,波数 $K = 2\pi/\lambda$, λ 为光束波长, Z 为待模拟湍流的垂直高度。

由于大气湍流相位屏对激光光束的影响主要体现在为相位的随机起伏,而在穿过相位屏的前后光束幅值的变化可以忽略不计,因此在这种情况下光束的波结构函数与其相位结构函数相同^[12]。而根据 Kolmogorov 湍流理论,一定区域内的大气湍流通常满足局部均匀各向同性的条件,故其相位起伏的分布不因采样点位置和方向的不同而改变,仅与位移矢量的大小有关。在此,从激光光波的相位结构函数入手,由(1)式根据不同采样点之间的相位差构建大气湍流相位屏。首先由大气湍流的相关参数建立相位结构函数的表达式,然后根据不同采样点之间的距离间隔,通过相位结构函数得到相位屏上相对于某参考点的相位起伏分布,最后通过引入随机相位起伏方差实现大气湍流相位起伏的随机分布。假设相位屏上任意一点 (i_0, j_0) 的初始相位值是 $\varphi_0(i_0, j_0)$,则由结构函数法生成的相位屏可写为

$$\varphi_t(i, j) = \varphi_0(i_0, j_0) + \sqrt{D_\varphi(r) + R\sigma_\varphi^2}, \quad (5)$$

式中 $r = [(i - i_0)^2 + (j - j_0)^2]^{1/2}$ 为不同采样点之间的间距, $D_\varphi(r)$ 为根据相位结构函数生成的、间距为 r 的采样点之间的均方相位差, $\sigma_\varphi^2 = 1.0299(D/r_0)^{5/3}$ 为接收孔径 D 内的相位起伏方差, R 为根据 Monte Carlo 法生成的,在 $(0, 1)$ 之间满足高斯分布的随机因子。

大气湍流相位屏的个数由屏间区域 Δz 内的光强闪烁率 $\sigma_I^2(\Delta z)$ 决定,即需满足 $\sigma_I^2(\Delta z) < 0.1$ 。其中光强闪烁率的定义为 $\sigma_I^2 = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1$, I 表示光强。根据 Rytov 方差可得闪烁率的计算式为

$$\sigma_I^2(\Delta z) = 1.23 C_n^2 K^{2-a/2} \Delta z^{1+a/2}, \quad (6)$$

对于 Kolmogorov 谱,取 $\alpha = 5/3$ 。

3 改进的秩一相位估计法

秩一相位估计法作为一种广泛应用于 SAR 成

像领域的的相位误差补偿算法,其核心思想是根据不同距离单元内孤立强散射点的相位差来估计回波信号的多普勒信息,然后由多普勒信息与相位信息之间的函数关系互相推导,实现相位误差的估计和补偿。针对 SAL 回波信号复杂,难以直接进行相位误差的估计,以及传统的 ROPE 算法所存在对初始值敏感的缺陷,在此对 ROPE 算法进行了改进,将结构函数法与相位误差补偿相结合,具体过程包括:

3.1 数据预处理

在 SAL 回波历史中,理想的点目标方位向回波应具有线性调频信号的形式。但是,实际上由于 SAL 系统平台的运动以及大气湍流效应等诸多方面的影响,SAL 方位向回波不再是标称的线性调频信号,在此我们把标称线性调频信号成分之外的残余相位统称为相位误差。设离散化的 SAL 距离压缩回波信号为

$$s_r(m, n) = A_{m,n} \exp\{j[\Phi_{0,n} + 2\pi f_{m,n}m + \varphi_e(m, n)]\}, \quad (7)$$

式中 $A_{m,n}$ 为回波的振幅, $\varphi_{0,n}$ 为初始相位, $f_{m,n}$ 为

(m, n) 点处的多普勒频率, $\varphi_e(m, n)$ 为 (m, n) 处的相位误差, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 代表离散方位向采样点, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 为距离向采样点。

由于实际上 SAL 回波信号通常很难满足 ROPE 法在每个距离单元内只有一个特显点的要求,因此需要根据回波信号的复振幅选出距离单元中的孤立峰值点目标,通过循环移位使其位于方位中心,然后用合适的窗函数对移位后的图像进行统一加窗,构建特显点回波信号模型。在此,本文利用非相干平均的方法实现了自动加窗,即在每一个方位向单元通过(8)式对移位后的距离向数据 $s'_r(m, n)$ 的幅度求和,

$$\omega(m, n) = \sum_n |s'_r(m, n)|^2, \quad (8)$$

选择 10 dB 宽度的两倍作为窗宽。在迭代过程中,随着迭代次数的增加,图像聚焦的深度逐渐增大,窗宽也将随之减小,因此窗宽的大小可以作为评价函数来控制迭代次数。

3.2 相位误差估计

对 $s'_r(m, n)$ 进行差分处理消除初始相位可得

$$D(m, n) = s'_r(m+1, n)s'^*_r(m, n) = |A^2| \exp\{j[2\pi f_{m,n} + \varphi_e(m+1, n) - \varphi_e(m, n)]\} = |A^2| \exp\{j[2\pi f_{m,n} + \Delta\varphi_e(m, n)]\}, \quad (9)$$

式中 $\Delta\varphi_e(m, n) = \varphi_e(m+1, n) - \varphi_e(m, n)$, 待估计参数为 $f_{m,n}$ 和 $\Delta\varphi_e(m, n)$ 。从(9)式可知,若已知 $f_{m,n}$ 则可以从 n 的平均估计出 $\Delta\varphi_e(m, n)$, 反之若已知 $\Delta\varphi_e(m, n)$ 则可以从 m 的平均估计 $f_{m,n}$, 即

$$f_{m,n}^{(p)} = \frac{1}{2\pi} \arg \sum_{n=1}^N D(m, n) \exp[-j\Delta\varphi_e^{(p)}(m, n)], \quad (10)$$

$$\Delta\varphi_e^{(p)}(m, n) = \arg \sum_{m=1}^M D(m, n) \exp[-j2\pi f_{m,n}^{(p-1)}], \quad (11)$$

式中的上标 p 表示第 p 次迭代。根据结构函数法由(5)式生成与 $s_r(m, n)$ 网格匹配的、半经验的湍流相位误差估计值 $\Delta\varphi_e^{(0)}(m, n)$, 然后代入(10)式求出 $f_{m,n}^{(0)}$, 以此作为迭代运算的初始条件。迭代估计完成之后, $\varphi_e(m, n)$ 可由 $\Delta\varphi_e(m, n)$ 累加得到。

3.3 相位误差补偿

对相位误差估计值 $\varphi_e(m, n)$ 取复共轭, 与距离压缩数据 $s_r(m, n)$ 复乘就可以实现对相位误差的补偿, 即

$$s_{rc}(m, n) = s_r(m, n) \cdot \exp\{j[-\varphi_e(m, n)]\}, \quad (12)$$

式中的 s_{rc} 为补偿后的距离压缩数据。在上述补偿过程中采用图像的均方差

$$E_S^2 = \iint_{-\infty}^{+\infty} [|S_r(k_x, k_y)| - |S_{rc}(k_x, k_y)|]^2 dk_x dk_y / \left[\iint_{-\infty}^{+\infty} |S_{rc}(k_x, k_y)|^2 dk_x dk_y \right], \quad (13)$$

作为另一个收敛判据, 若其小于预先设定的门限值, 则认为迭代过程已收敛。

4 实验与结果部分

根据表 1 中的相关参数, 分别采用谱反演法和

结构函数法生成了满足 Kolmogorov 统计规律的大气湍流相位屏, 并计算了各自对应的相位结构函数来对生成结果进行比较。从图 1 可见, 结构函数法能够一定程度上克服谱反演法低频不足的缺点, 其结果与理论值更加接近。对于大气湍流数值模型的

计算结果,本文通过光强闪烁率作为判据进行了验证,结果如图 2 所示。从对比可以看出,由相位屏组成的大气湍流模型对激光光强的影响在趋势上与理论值基本相同。此外,虽然相位屏产生的方法不同,

但是其构成的湍流模型对光强的影响在数值上非常接近,这也从另一个方面验证了相位屏对光束的退化作用主要体现在相位部分,其对幅值的影响非常有限。

表 1 数值模拟的相关参数

Table 1 Parameters of the numerical simulation

SAL parameters	Value	Turbulence parameters	Value
Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	1.5	$C_n^2 / \text{m}^{-2/3}$	$6.8 \times 10^{-18} \sim 2.3 \times 10^{-15}$
Physical aperture diameter D_T / cm	3	Inner scale l_0 / cm	1
Range to scene R / km	20	Outer scale L_0 / m	5.12
Velocity $V / (\text{m/s})$	100	Highest FFT frequency K_H	$2\pi/l_0$
Synthetic aperture length L_{SA} / m	1	Lowest FFT frequency K_L	$2\pi/L_0$
Azimuth resolution δ_a / cm	1.5	Phase screen number	10
Range resolution δ_r / cm	1.5	Grid number	512×512

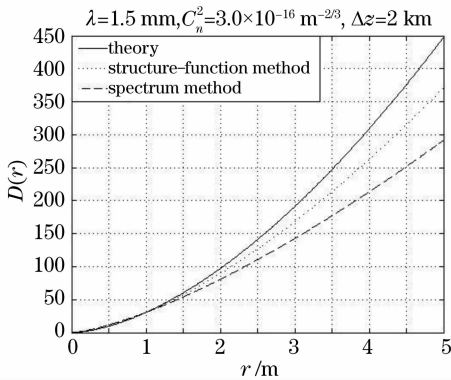


图 1 相位结构函数的对比

Fig. 1 Comparison of the phase structure function

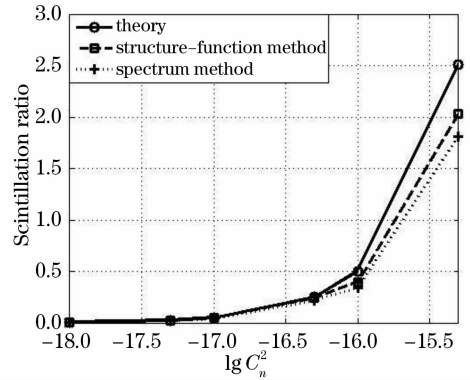


图 2 光强闪烁率的对比

Fig. 2 Comparison of light intensity scintillation ratio

对于 SAL 回波相位误差的补偿,将改进后的 ROPE 法整合到聚束模式下机载 SAL 的成像算法

中,对补偿效果进行了模拟验证,结果如图 3 所示。其中图 3(a)是理想条件下的 SAL 成像结果,图 3(b)

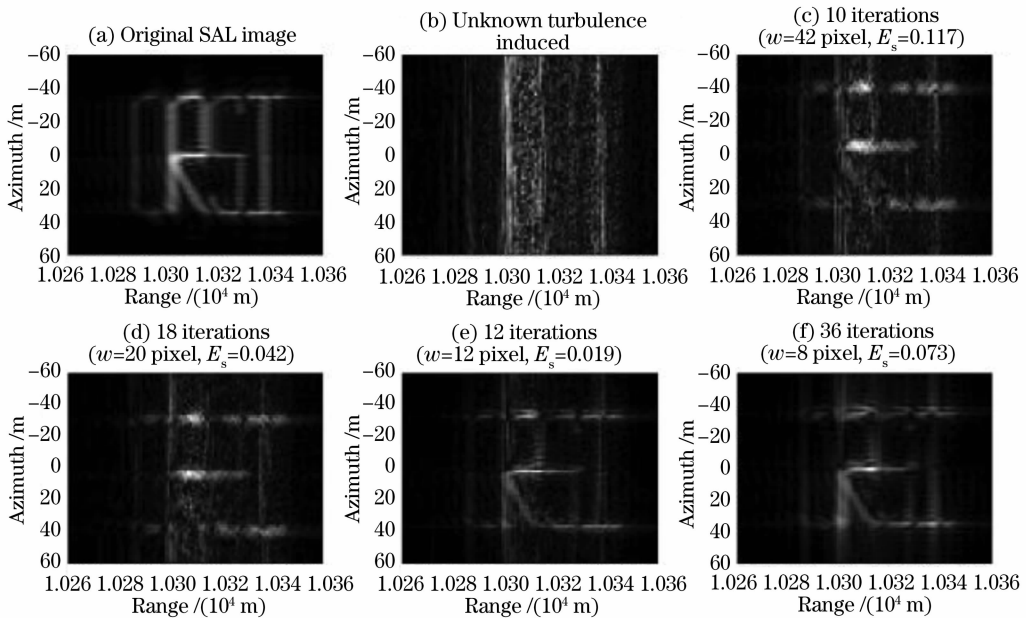


图 3 SAL 回波相位误差的补偿过程和结果

Fig. 3 Progress and results of phase error compensation in SAL data processing

为未知强度大气湍流存在时的成像结果,图像信噪比为 3.232 dB,图 3(c)~图 3(f)分别为迭代次数是 10、18、30 和 36 时的补偿结果。从图 3 可见,随着迭代次数的增加,图像的聚焦深度增大,最终补偿后图像的信噪比提高了大约 30 dB,均方根误差 E_s 降至 0.0073。同时在迭代的过程中,窗函数的宽度和均方根误差作为评价函数均线性减小,合理的控制了迭代运算的次数,实现了迭代补偿的自动停止。

对比实验分别对原始的 ROPE 法,谱反演-ROPE 联合补偿法(S-ROPE)和结构函数-ROPE

联合补偿法(SF-ROPE)的补偿效果进行了对比(图 4)。相对于原始的 ROPE 法,经过了湍流相位误差初始估计之后,两种联合估计法的补偿效果均有提高,补偿后图像的信噪比提高了 3~5 dB,均方误差由原来的 0.0141 分别降至 0.0092 和 0.0073,降幅分别达到 34.7% 和 48.2%。而在计算效率(图 5)上,由于结构函数法的计算复杂度[$O(N)$]相比谱反演法[$O(N^2)$]更低(图像网格数为 $N \times N$),因此 SF-ROPE 法在运算时间上比原始的 ROPE 法和 S-ROPE 法分别缩短了约 30% 和 15%。

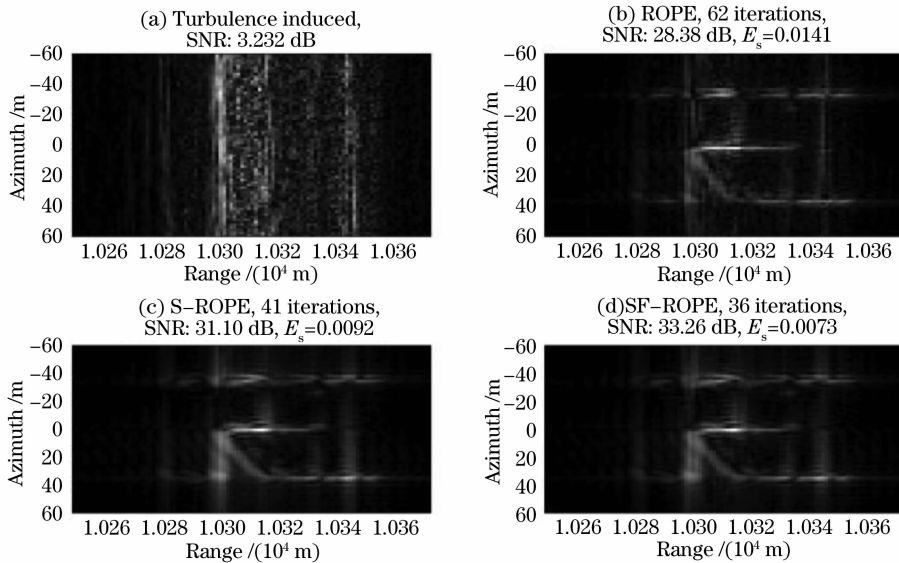


图 4 ROPE, S-ROPE 和 SF-ROPE 补偿结果信噪比(SNR)和均方根误差(RMS)的对比

Fig. 4 Comparison of ROPE, S-ROPE and SF-ROPE by SNR and RMS error

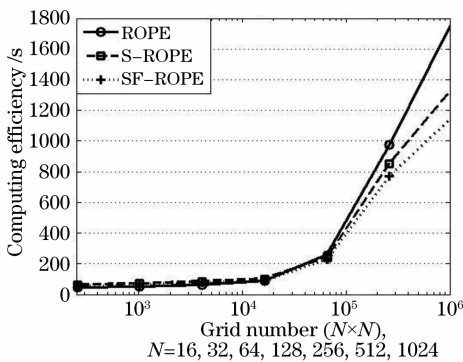


图 5 ROPE, S-ROPE 和 SF-ROPE 性能的对比

Fig. 5 Comparison of ROPE, S-ROPE and SF-ROPE by computing efficiency

不同强度大气湍流影响下相位误差的补偿效果如图 6 所示。从图中可见,随着湍流强度的增加,补偿效果逐渐减弱。对于弱湍流和中等强度的湍流,即相干长度 r_0 大于系统实孔径长度 D 和合成孔径长度 L_{SA} 时, SF-ROPE 法较为有效;而对于强湍流,即 $r_0 < D$, 此时 SAL 各子孔径之间回波信号的相干

性被严重破坏,难以准确获取回波的多普勒信息,进而限制了相位误差估计的精度,最终导致补偿效果不理想,无法达到图像恢复的目的。

5 结 论

大气湍流对 SAL 回波信号的退化作用是影响 SAL 高质量成像的主要原因之一。本文从激光光束的相位结构函数入手,提出了一种新型的大气湍流相位屏产生方法——结构函数法。模拟实验表明,结构函数法的计算结果更接近于理论值,一定程度上克服了谱反演法存在的低频不足的缺点。在对机载 SAL 回波进行相位误差补偿时,如果将该方法与 ROPE 法联合使用,能够较为有效地改善一定强度范围内的大气湍流对图像的退化作用,同时在计算效率方面比原始的 ROPE 法有所提高。当大气湍流强度过大以至于相干长度小于 SAL 实孔径长度时,该方法的补偿效果较为有限。

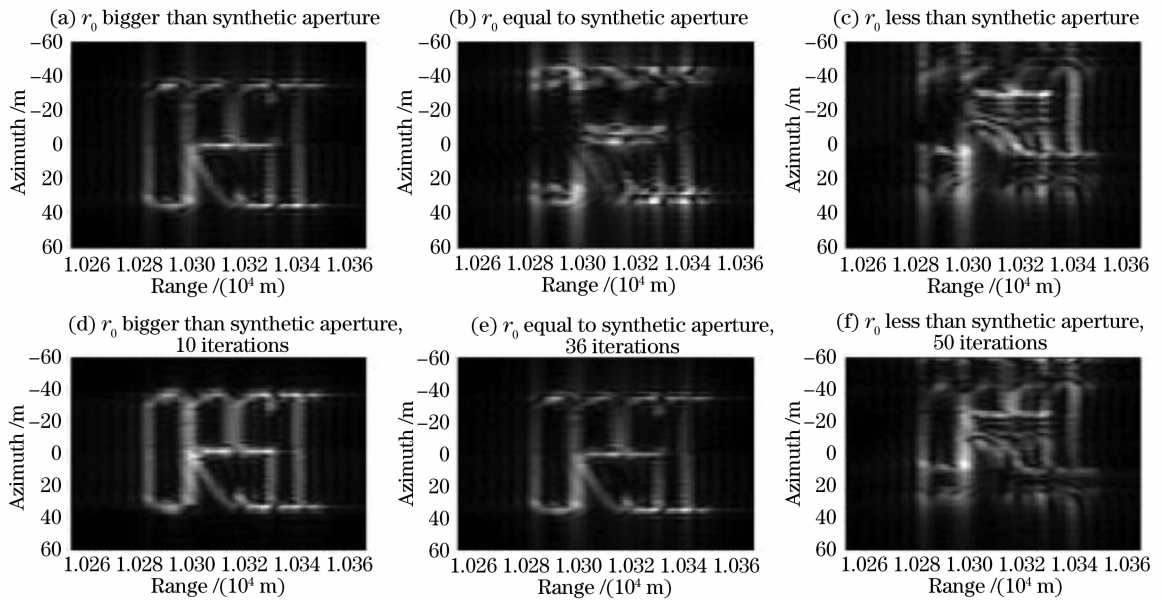


图 6 对不同强度大气湍流相位误差的补偿结果

Fig. 6 Compensation results as the strength of turbulence increases

参 考 文 献

- 1 Steven M. Beck, Joseph R. Buck, Walter F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**: 7621~7629
- 2 T. J. Karr. Synthetic aperture ladar resolution through turbulence[C]. *SPIE*, 2003, **4976**: 22~33
- 3 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 997~1000
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 997~1000
- 4 Liu Liren. Synthetic-aperture ladar (II): Spatial phase biased telescope for transmitting antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197~1200
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(II): 空间相位偏置发射望远镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1197~1200
- 5 Peng Renjun, Wu Jian, Yang Chunping *et al.*. Synthesizing aperture in optics with interferometric imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 355~359
彭仁军, 吴健, 杨春平等. 用干涉法实现光学合成孔径技术[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 355~359
- 6 Zhili Hua, Hongping Li, Yongjian Gu. Atmosphere turbulence phase

- compensation in synthetic aperture ladar data processing[C]. *SPIE*, 2007, **6787**: 678724-1~678724-7
- 7 C. M. Harding, R. A. Johnston, R. G. Lane *et al.*. Fast simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(11): 2161~2170
- 8 R. G. Lane, A. Glindemann, J. C. Dainty *et al.*. Simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. *Waves in Random Media*, 1992, **2**: 209~224
- 9 Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207~211
- 10 Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C *et al.*. Phase gradient autofocus—A robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 1994, **30**(3): 827~834
- 11 Zheng Yiming, Bao Zheng. An improved phase error estimation algorithm[J]. *J. Xidian University*, 2001, **28**(4): 472~477
郑义明, 保铮. 一种改进的相位误差估计算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2001, **28**(4): 472~477
- 12 R. L. Lucke, C. Y. Young. Theoretical wave structure function when the effect of the outer scale is significant[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(4): 559~569