

文章编号: 0253-2239(2010)03-0739-08

大气湍流下合成孔径激光雷达成像数值模拟及 PGA 补偿

戴品娟^{1,2} 刘国国^{1,2} 吴 谨¹

(¹ 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为研究大气湍流对合成孔径激光雷达(SAL)的成像影响,采用谱反演法对符合 Kolmogorov 谱的大气随机相位屏进行了数值模拟,给出了单层及多层叠加的随机相位屏图像;然后以多层随机相位屏叠加方式模拟实际大气湍流,计算了无湍流、弱湍流、中等湍流和强湍流等情况下理想机载单站聚焦式 SAL 对点目标以及扩展目标的成像,模拟成像表明大气湍流对 SAL 成像的方位分辨率有严重影响,湍流越强,图像方位向分辨率越差;针对湍流造成的 SAL 图像方位向分辨率降低,采用相位梯度自聚焦(PGA)算法对 SAL 图像进行了方位向补偿,结果有效地改善了图像的聚焦效果,提高了成像质量。

关键词 合成孔径激光雷达;大气湍流;随机相位屏;谱反演法;相位梯度自聚焦算法

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0739

Numerical Simulation on Synthetic Aperture Ladar Imaging Through Atmospheric Turbulence with Phase Gradient Algorithm Compensation

Dai Pinjuan^{1,2} Liu Guoguo^{1,2} Wu Jin¹

(¹ Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To investigate the influence of atmospheric turbulence on the image of synthetic aperture ladar (SAL), numerical simulation of phase screens following the Kolmogorov spectrum by using spectrum inverse transform is introduced and detailed pictures of monolayer or multilayer random phase screens are given, then the calculated multilayer random phase screens are used to simulate the real atmospheric turbulence. In an ideal monostatic airborne spotlight SAL imaging system, detailed calculations on the SAL images with point or extended targets through no, weak, medium and strong turbulence are illustrated. The results vividly show that the atmospheric turbulence can severely affect the azimuth resolution of the SAL image and with the increase of the atmospheric turbulence, the distortion of the SAL image deteriorates. To correct the degraded SAL images induced by atmospheric turbulence, phase gradient algorithm (PGA) method is implemented in azimuth, and the effort shows a significant improvement in the quality of the SAL image.

Key words synthetic aperture ladar; atmospheric turbulence; random phase screen; spectrum inverse transform; phase gradient autofocus algorithm

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是利用与目标做相对运动的小孔径天线探测并采用信号处理方法获得高分辨

率的相干成像雷达。利用激光器作辐射源的合成孔径激光雷达(SAL)是 SAR 技术在光学波段的精确类推。由于激光工作频率远高于微波,对于相对运

收稿日期: 2009-03-13; 收到修改稿日期: 2009-04-10

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z107)资助课题。

作者简介: 戴品娟(1982—),女,硕士研究生,主要从事合成孔径激光雷达方面的研究。E-mail: icysfm@gmail.com

导师简介: 吴 谨(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事脉冲气体激光技术以及合成孔径激光雷达等方面的研究。

E-mail: jwu909@263.net(通信联系人)

动速度相同的目标可产生更大的多普勒频移,因此理论上 SAL 能够提供比 SAR 更高方位分辨率的图像。国际上,早在 20 世纪 60 年代末 70 年代初就有人开始研究光波波段的合成孔径技术^[1~4]。这个阶段的工作主要是对 SAL 在概念上进行了简单的实验验证。此后,受到激光器件和探测器件发展水平的限制,研究工作进展不大,一直到最近十几年才开始有室内近距离演示成像的实验工作报告^[5~9],特别是从 2006 年美国 Raytheon Space and Airborne Systems 公司和 Northrop Grumman Electronic Systems 公司分别宣称实现机载 SAL 成像演示后,国内不少研究人员也表现出浓厚的兴趣,陆续有研究报告^[10~15]。SAL 的研究是一项高度技术性的工作,以实现自然条件下的远距离高分辨率成像、研制成功实用化的成像系统为根本目的。然而,由于 SAL 成像是基于相干探测,任何对探测激光相位的干扰都会导致成像质量的下降。在自然环境中,最严重的危害之一就是大气湍流。大气湍流会使激光光束的光强起伏、散焦和焦点漂移,从而导致目标位置的变化和雷达成像分辨率的降低。

关于大气湍流对 SAL 系统的影响研究,Karr^[16]从理论上推导出大气湍流对聚束 SAL 的分辨率影响;Lucke^[17]用相位屏的方法数值仿真了大气湍流对一维 SAL 的成像质量影响;美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室(JHU/APL)^[18]也用计算机仿真了大气湍流下机载 SAL 系统对地面 M1 坦克成像的情况;中国海洋大学^[19]也数值仿真了大气湍流下相位补偿方法在改善 SAL 成像质量上的作用。这些工作虽然没有提供一个系统解决大气湍流中 SAL 成像质量的办法,但均表明,还是有办法在一定程度上改善大气湍流对 SAL 成像质量的影响。考虑到在大气层应用中,大气湍流是 SAL 成像系统不能绕过的问题,因此有关工作还值得进一步探讨。

基于文献[17]提供的模型和方法,考虑一个距离地面 10 km 的低空机载 SAL,采用聚束式的工作模式收集数据,假设沿光束传播路径的大气结构常数为相同值,接收到的信号用 PF 算法^[20]进行处理,详细计算了在无湍流、弱湍流、中湍流和强湍流等多种情况下,SAL 系统的成像质量,并探讨了采用 PGA 算法来改善受湍流影响的 SAL 图像质量。

2 大气相位屏的数值模拟

2.1 谱反演法

大气最重要的特征是通常处于湍流运动状态,

湍流大气的折射率是随时随地不断变化的,因此大气湍流是限制光束传输系统,成像系统等光学系统性能的重要因素。除了用实验和理论分析的方法研究大气湍流,数值模拟也是研究湍流问题的有效手段。用数值模拟方法研究大气湍流对光学系统影响的核心问题之一是模拟大气湍流畸变相位屏。

当光波通过地球大气层时,大气湍流扰动光波的波前相位随时间迅速变化,导致目标通过大气的成像质量下降。在短的曝光时间内,大气湍流可以假定为“冻结”的,可以采用随机相位屏来模拟大气湍流^[21]。

现已发展出多种方法模拟大气湍流效应的随机相位屏,数值模拟的方法基本可以分为两类:一是频率域的间接模拟,这种方法根据大气湍流的功率谱密度函数得到模拟的光学波前,常采用的是谱反演法^[22];另外一种是在空间域的直接模拟,利用正交完备的基函数来表示光学波前,比较常用的是泽尼克(Zernike)多项式法。通常谱反演法存在低频不足,但是叠加 4 级次谐波就可以比较完全的补偿低频部分;而 Zernike 法存在高频不足,虽然可以通过增加多项式级数加以改善,但是改善效果缓慢而且随着级数增加,计算量急剧膨胀,因此比较常用的是谱反演法^[23]。其基本思想是对功率谱一定的复高斯随机数矩阵进行逆傅里叶变换得到大气扰动相位^[22,23]:

$$\phi(j\Delta x, l\Delta y) = \sum_{n=0}^{N_x} \sum_{m=0}^{N_y} [a(k_x, k_y) + ib(k_x, k_y)] \exp[2\pi i(jk_x/N_x, lk_y/N_y)], \quad (1)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ 为空域内取样间隔, j, l, m, n 为整数, N_x, N_y 为取样点数, $i = \sqrt{-1}$, $a(k_x, k_y), b(k_x, k_y)$ 是频率域里的零均值,方差为 $\Delta k_x \Delta k_y F_\phi(k_r)$ 的高斯随机数矩阵,并且 $a(k_x, k_y) + ib(k_x, k_y)$ 满足厄米(Hermitian)对称。对这个复高斯矩阵再进行逆傅里叶变换就得到一层大气相位屏的中频部分:

$$\langle a^2(k_x, k_y) \rangle = \langle b^2(k_x, k_y) \rangle = \Delta k_x \Delta k_y F_\phi(k_r), \quad (2)$$

式中波数域内 $\Delta k_x, \Delta k_y$ 为取样间隔, $\Delta k_x = 2\pi/(N_x \Delta x)$, $\Delta k_y = 2\pi/(N_y \Delta y)$, $k_x = m\Delta k_x$, $k_y = n\Delta k_y$ 。

假定大气湍流各向同性,局地均匀,采用科尔莫戈罗夫(Kolmogorov)模型作为折射率功率谱密度

$$\Phi_n(k, z) = 0.033 C_n^2(z) k^{-11/3}, \quad (3)$$

式中 z 为光束传播方向; $C_n^2(z)$ 代表传播路径上湍流强度的结构常数; k 为三维空间波数,此时,与传播

方向(z 轴方向)垂直的任意薄层切片上的大气相位功率谱为

$$F_{\phi}(k_r) = 2\pi k^2 0.033k_r^{-11/3} \int_z^{z+\Delta z} C_n^2(\xi) d\xi, \quad (4)$$

式中 Δz 为湍流薄层厚度; $k_r = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$, $k_z = 0$ 。

可以通过叠加低频次谐波来改善相位屏的大尺度(低频)统计特性^[22]:

$$\phi_{SH}(j\Delta x, l\Delta y) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 [a(n, m, p) + ib(n, m, p)] \exp\left[2\pi i 3^{-p} \left(\frac{jn}{N_x} + \frac{lm}{N_y}\right)\right], \quad (5)$$

式中 P 为次谐波级数, 并且

$$\langle a^2(n, m) \rangle = \langle b^2(n, m) \rangle = \Delta k_x \Delta k_y 3^{-2p} F_{\phi}(n\Delta k_x/3^p, m\Delta k_y/3^p), \quad (6)$$

(1)式代表中频部分和(5)式代表低频部分, 这两部分的合并就构成了补偿了低频部分的相位屏总相位。

通常, 大气相干长度必须大于或等于从一个相位屏到下一个相位屏的第一菲涅耳环的直径, 即^[21]

$$r_0 = 1.17 \times 10^{-8} \frac{(10^6 \lambda)^{6/5}}{(Z C_n^2)^{3/5}} \geq 2 \sqrt{\lambda Z}, \quad (7)$$

式中 Z 是相位屏之间的距离。

由(7)式可得相位屏之间的距离 Z 的选取应满足

$$Z \leq 9.4\lambda^{7/11} \left[\frac{10^{-16}}{C_n^2}\right]^{6/11} \text{ km}. \quad (8)$$

根据湍流结构常数不同, 大气湍流可以分为 5 类^[24]:

非常弱湍流: $C_n^2 < 6 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$,

弱湍流: $6 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,

中等湍流: $6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,

强湍流: $6 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,

非常强湍流: $C_n^2 > 6 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 。

非常弱湍流对光学成像系统影响很小, 非常强湍流对光学成像系统影响太大, 这两种极端情况不

予考虑, 下面只考虑弱湍流、中等湍流和强湍流 3 种情形下, SAL 系统的成像情况, 计算中, 湍流结构常数分别取为

弱湍流: $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,

中等湍流: $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,

强湍流: $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 。

从(8)式可以看出, 湍流越强, 相位屏之间的距离取值就越小, 如波长 $\lambda = 2 \mu\text{m}$, 取强湍流结构常数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 可以算出 $Z \leq 0.3375 \text{ km}$ 。假设取 $Z = 0.2 \text{ km}$, 当设定飞机飞行高度为 10 km 时, 大气湍流可由 50 层随机相位屏叠加的方法来模拟。

2.2 数值模拟

用谱反演法生成单层随机相位屏, 然后使用多层相位屏叠加的方法来模拟 SAL 与目标之间大气湍流的空间统计特性。

在实验中激光中心波长为 $2 \mu\text{m}$, SAL 系统方位向和距离向的分辨单元 $\Delta x, \Delta y$ 要求达到 0.01 m , 取样点数 $N_x \times N_y$ 为 256×256 , 则相位屏大小为 $N\Delta x = 2.56 \text{ m} \times 2.56 \text{ m}$, 湍流相位屏间距 $Z = 0.2 \text{ km}$ 。分别取上述设定的弱湍流、中等湍流和强湍流结构常数, 用谱反演法模拟随机相位屏。

图 1 是不同大气湍流下的单层随机相位屏三维模拟演示图。图 1(a)为弱湍流引起的相位 i 变化范围在 $-1 \sim 1 \text{ rad}$ 之间; 图 1(b)为中等湍流引起的相位变化范围在 $0 \sim 5 \text{ rad}$ 之间; 图 1(c)为强湍流引起的相位变化范围在 $-10 \sim 30 \text{ rad}$ 之间, 随着湍流增大, 相位面的波动也明显变大, 这表明成像的散焦现象也会严重, 使成像分辨率降低。图 1 中, 不同的湍流下, 相位面有倾斜, 这种倾斜不会发生散焦或者模糊, 但会使目标位置发生偏移。

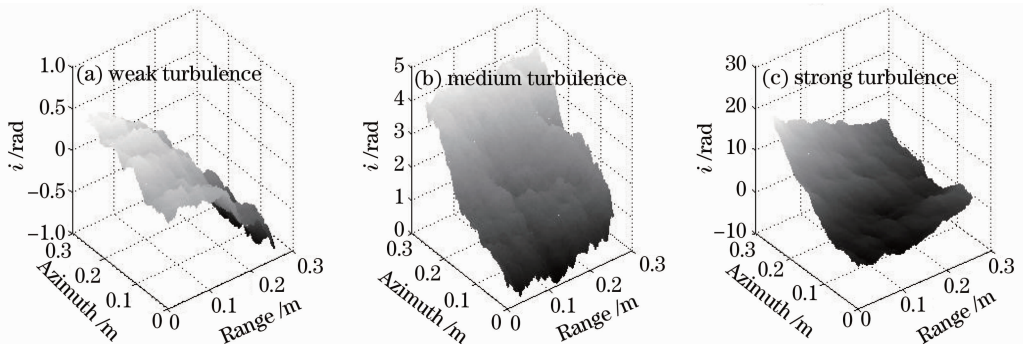


图 1 单层随机相位屏

Fig. 1 Simulation of monolayer phase screen

在激光往返的短时间内,认为大气湍流是“冻结”的,如图 2 为模拟机载 SAL 系统与目标之间 10 km 的大气湍流情况(50 层随机相位屏叠加以后的相位图)。从图 2 可见,50 层随机相位屏叠加后,弱湍流引起的相位变化范围在 $0 \sim 30$ rad,中等湍流引起的相位变化范围在 $-50 \sim 150$ rad,强湍流引起

的相位变化范围在 $0 \sim 200$ rad。叠加以后的大气相位屏不仅是单层相位屏的简单相加,而且更真实的反应大气湍流的情况。采用多层相位屏叠加的方式模拟大气湍流,能够实现更多的空间分布组合,保证相位分布的随机性。

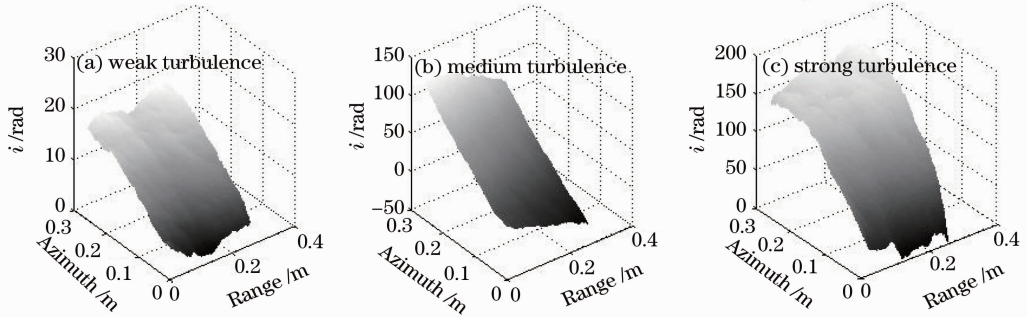


图 2 50 层随机相位屏叠加

Fig. 2 Congruence of fifty random phase screens

2.3 数值模拟正确性验证

相位屏数字模拟计算直接影响湍流下 SAL 成像仿真的结果,因此必须确保大气湍流模拟计算的正确性。大气湍流的统计特性可以用相位结构函数来描述,用相位结构函数来验证模拟结果的正确与否。采用上述谱反演法,随机产生 10, 50 和 100 个大气湍流,计算其平均结构体函数,并与湍流理想结构体函数项^[21] $D(r) = 2.91(2\pi/\lambda)^2 Z C_n^2 r^{5/3}$ 对比,如图 3 所示,随着模拟大气湍流统计样本的增加,大气湍流平均的模拟曲线越接近理想结构函数曲线,当选取 100 个大气湍流时,模拟曲线与理想曲线几乎重合。这说明,关于湍流相位屏的数字模拟计算是基本正确的。

随机相位屏模拟的大气湍流到达反射率为 δ 的目标点,然后从目标点反射回来,再经过相同的大气湍流到达接收器,最后用 PF 算法对回波进行处理,得到目标图像。在一个合成孔径期间,选取脉宽为 τ_{pul} , 调频率为 γ , 脉冲重复时间为 T 的线性调频脉冲序列为发射信号

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_r(t) p(t - nT), \quad (9)$$

$$p(t - nT) = \exp\{-j2\pi[f_0 + \gamma(t - nT)/2](t - nT)\} |t - nT| \leq \frac{\tau_{\text{pul}}}{2}, \quad (10)$$

式中 $a_r(\cdot)$ 为发射线性调频信号的窗函数,不加权的时候为矩形。

假设 R 为点目标 P 到发射孔径的最短距离,那回波信号表示为

$$s_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma a_r(t) a_a(t) p(t - nT - 2R/c), \quad (11)$$

式中 $a_a(t)$ 不仅是方位向信号的滤波加权,而且和天线波束形状有关。

仿真时,把湍流影响引起的相位误差 $\phi_e(t, P)$ 加到回波的瞬时相位中,得到该目标的回波信号:

$$s_r'(t) = s_r(t) \exp[j\phi_e(t; P)]. \quad (12)$$

然后对回波信号进行外差探测,实现外差探测的本振信号是分离发射信号,并延迟一个参考时间 t_0 , $t_0 = 2R_0/c$ 。

$$s(t) = \iint_{\text{area}} s_r'(t) s^*(t - t_0) dx dy. \quad (13)$$

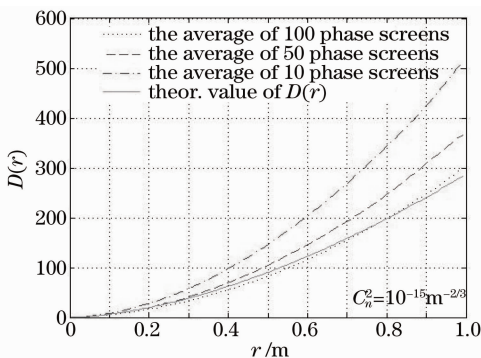


图 3 结构函数

Fig. 3 Structure function

3 SAL 系统通过大气湍流的成像

3.1 SAL 系统成像算法

由发射器从直径为 D_T 的孔径发射激光,经过

式中 * 表示共轭。最后,接收到的信号 $s(t)$ 分别进行二维匹配滤波和极化处理^[20],得到目标图像。

3.2 SAL 仿真参数设定

实验中,机载 SAL 以单稳态(即接收和发射共用一个口径)、聚束式的工作模式收集数据。假设飞行轨道和激光雷达运动平台是理想的,并且数据处理不受硬件设施影响。仿真参数如表 1 所示。

表 1 模拟成像所取参数

Table 1 Synthetic aperture ladar parameters

Parameters	Value
Wavelength $\lambda/\mu\text{m}$	2
Bandwidth B/GHz	15
Platform velocity $V/(\text{m/s})$	100
Distance between platform and center of imaging area R/km	10
Sampling aperture in azimuth D/cm	4
Width of the area W_r/m	1
Sampling frequency F_s/MHz	300
Grid interval /m	0.01
Pulse repetition rate PRR/kHz	10
Grid point number	256×256
Synthetic aperture length L_{SA}/m	0.5

3.3 SAL 成像模拟结果

3.3.1 点目标模拟成像

SAL 脉冲响应(IPR)函数就是对一个点目标进行 SAL 成像,它可以清楚地反映目标点方位向和距离向的能量分布。由于湍流主要影响方位向分辨率,而对距离向影响可以忽略^[16],主要讨论湍流对方位向 IPR 函数的影响。图 4 是 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的场景中一个点目标成像方位向 IPR 函数。图 4(a)显示了不同湍流结构常数下的 IPR 函数图像,图 4(b)湍流强度为中等湍流时的 IPR 函数以及经过 PGA 校正的 IPR 函数图像。

由图 4(a)可以看到,在湍流比较小,IPR 函数几乎和没有湍流时的 IPR 重合,随着湍流不断增大,目标信号能量逐渐损失,并且目标位置发生偏移,目标图像分辨率严重下降。图 4(b)为在中等湍流下的用 PGA 算法改善成像质量的情况,可见,通过 PGA 算法进行校正后目标可以很好聚焦;下面将进一步通过扩展目标的成像来展示 PGA 算法对改善图像质量的也有效性。

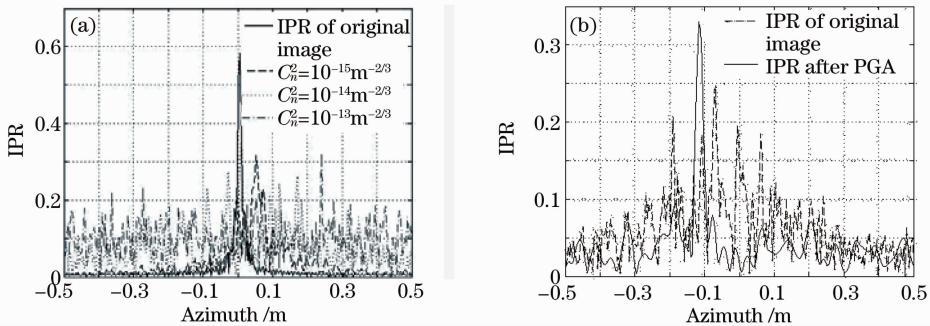


图 4 点目标 SAL 成像的 IPR 函数
Fig. 4 IPR of a SAL imaging system

3.3.2 多点目标模拟成像

取场景为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,目标为一个 I 字形,不同湍流强度下 SAL 成像结果如图 5 所示。图 5(a)为未加湍流情形,可见场景距离向和方位向的目标能

够很好地区别,相互之间干扰很小,分辨率很好;图 5(b)为弱湍流情形,图像水平聚焦变差,根据文献^[16],当激光波长和相位屏间距一定时,湍流的大小 C_n^2 也可以用大气相干长度 r_0 描述,合成孔径长

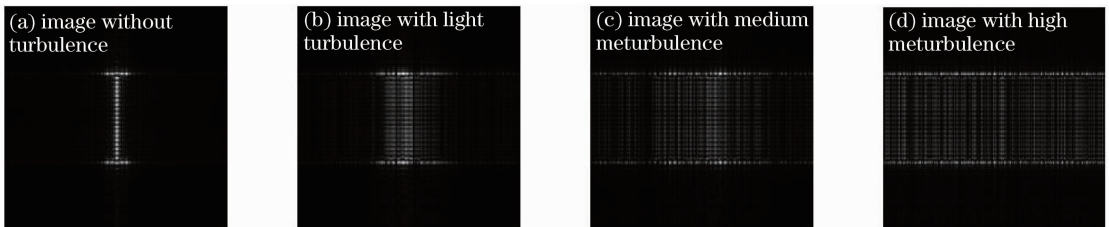


图 5 不同湍流强度下 SAL 成像
Fig. 5 SAL imaging with various turbulence

度 L_{SA} 与大气相干长度 r_0 的比值决定了湍流对合成孔径激光雷达成像的影响程度, 单站工作模式下 $\bar{r}_0 = r_0 / 2^{5/6} = 4.6$ cm, 合成孔径长度 L_{SA} 为 50 cm, $L_{SA} / \bar{r}_0 \approx 10.9$, 分辨率将近有 11 倍的损失; 图 5(c) 为中等湍流情形, 这时 $\bar{r}_0 = 1.12$ cm, $L_{SA} / \bar{r}_0 \approx 44.6$, 预测分辨率上会有 45 倍的损失, 图像方位散焦严重; 图 5(d) 强湍流情形, 这时干扰很大, 图像几乎无法分辨。

4 PGA 算补偿

4.1 PGA 算法

从上面的模拟计算可以看出, 大气湍流较强时, SAL 成像质量可能会受到严重影响, 因此, 如何补偿由大气湍流引起的相位误差将是机载 SAL 系统数据处理中一个关键问题。在 SAL 成像系统中因湍流随机相位误差而引起的主要影响表现有: 空间方位向分辨率的下降、方位模糊、几何和相位失真。

相位梯度自聚焦 (PGA) 可用来估计高阶相位误差, 该算法的独特之处就在于它不是基于模型的, 应用时不需要明确确定待估计的相位误差的最高阶。PGA 算法适合于高阶相位甚至是随机相位的自聚焦。相比传统的自聚焦算法 MD、PPP 算法^[20], 不需要场景中有强反射点, 并且对低阶、高阶以及随机误差都能进行较好的补偿^[25]。采用 PGA

算法的原因: 一方面由于大气湍流是不能准确测量或者估计出来, 因此处理经过湍流的 SAL 图像, 只能基于无模型的自聚焦算法^[17]。另一方面由于湍流对 SAL 成像只对方位向信号有影响, 而对距离向信号几乎没有影响^[16], 因此可以采用 PGA 算法对方位向进行聚焦处理。

PGA 基本算法流程是输入一个待处理的 SAL 图像^[26], 选出单位距离单元的能量最高点, 圆移到图像中部, 估计窗宽度, 并对圆移后的图像进行加窗处理, 在慢时间或者方位向进行傅里叶变换, 估计出整个合成孔径时间内的相位误差函数。PGA 算法的估计相位误差是对方位向相位误差的一阶导数积分, 从而计算出方位相位误差, 它是全孔径内方位采样数的函数。然后将相位误差的估计转换为误差修正向量, 一种典型的应用就是修正误差向量中的常数项和线性项, 然后运用于信号历程, 并对校正过的数据迭代运用该算法从而减少残余误差。

4.2 PGA 补偿结果

下面是不同湍流下 SAL 图像进行 PGA 补偿以后的效果。

图 6 为弱湍流时 SAL 图像的 PGA 补偿效果, 可见经过 PGA 算法 10 次迭代就能获得比较好的聚焦图像。

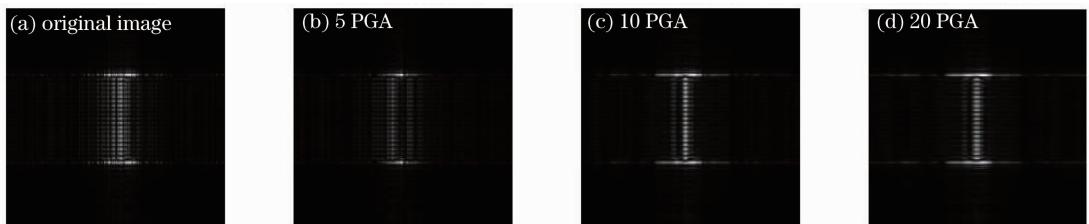


图 6 弱湍流下 SAL 图像的 PGA 矫正

Fig. 6 PGA corrected SAL image with weak turbulence

图 7 为中等湍流时 SAL 图像的 PGA 补偿效果, 经过 PGA 算法 10 次迭代处理图像聚焦效果明显, 但迭代 20 次后聚焦反而变差。其原因在于该 PGA 算

法能保证有效性, 但是收敛性效果不是很好, 迭代次数过多, 图像效果有可能反而会下降, 因此有必要在迭代过程中设定门限来选取最优效果^[27]。

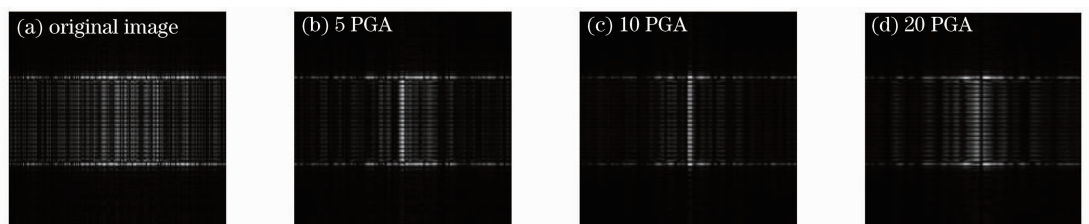


图 7 中等湍流下 SAL 图像的 PGA 矫正

Fig. 7 PGA corrected SAL image with medium turbulence

图 8 为强湍流时 SAL 图像的 PGA 补偿效果, 可见经过 PGA 算法 20 次迭代处理, 方位向完全不

能分辨的图象已基本能分辨。

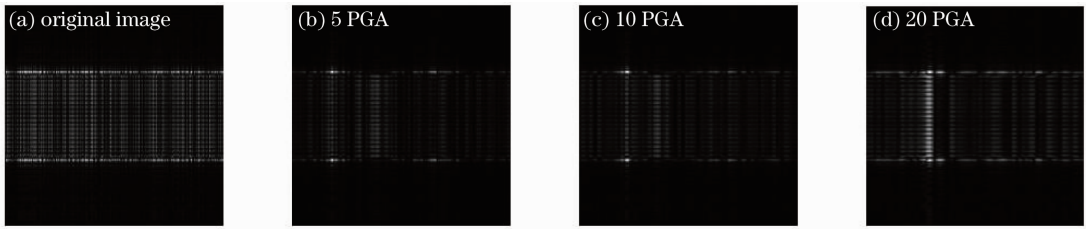


图 8 强湍流下 SAL 图像的 PGA 矫正

Fig. 8 PGA corrected SAL image with strong turbulence

由以上结果可以看出,PGA 算法可以较好的消除大气湍流引入的方位向相位误差,取得较好的方位向聚焦效果。由图 7 可知当湍流为中等湍流时,成像结果已经不能分辨,但是经过 PGA 算法 10 次迭代就可以分辨出图像的形状。同时 PGA 算法可以很快收敛,当湍流为弱湍流时,从迭代 5 次和 10 次的效果上看,在图像分辨上区别不是很大,迭代 5 次成像已经可以分辨,当湍流强度比较强的时候,经过 10 次迭代方位向还是有一定的展宽,再经过 10 次 PGA 算法可以得到方位向聚焦比较好的图像。一般来说,湍流越大,所需 PGA 迭代就越多。

由此可知,和预想的结果相符,PGA 算法可以补偿大气扰动带来的高阶相位误差,这些误差是其他聚焦算法不能补偿的^[19]。至于补偿后的图像出现拖尾现象,是由于数字信号处理过程中能量泄露引起的,其大小相比与像点大小可以忽略,并且这种泄露可以通过优化算法加以改善。

5 结 论

从数值模拟了弱湍流、中等湍流、强湍流三种情况的合成孔径激光雷达成像情况看,湍流对 SAL 成像的影响是随着湍流强度增加而增加。当湍流很强时,不经过图像的聚焦处理,目标图像将淹没在湍流噪声中。事实上,湍流大气相当于聚束 SAL 方位向的低通滤波器,抑制了方位向的高分辨率,而对距离向分辨率基本没有影响。

基于湍流的随机特性,模拟计算表明,PGA 算法可以有效地提高 SAL 成像质量,但随着湍流强度的不同,需要 PGA 迭代次数也有所区别,合适迭代次数会使成像效果会明显变好。

实际的机载 SAL 系统中,湍流的影响是不可忽视的问题,这里理论上模拟讨论表明,PGA 算法可以有效提高因湍流造成的 SAL 成像质量。当然,SAL 系统的成像质量还受其他因素,比如散斑效

应、后散射效应、激光发射机的频率不稳定等的影响,这些因素需要通过系统设计及有效的补偿算法来解决。

参 考 文 献

- 1 T. S. Lewis, H. S. Hutchins. A synthetic aperture at optical frequencies[J]. *IEEE*, 1970, **58**(4): 578~588
- 2 T. S. Lewis, H. S. Hutchins. A synthetic aperture at 10.6 microns[J]. *IEEE*, 1970, **58**(10): 1781~1782
- 3 C. C. Aleksoff, C. R. Christensen. Holographic Doppler imaging of rotating objects [J]. *App. Opt.*, 1975, **14**(1): 134~141
- 4 C. C. Aleksoff. Synthetic interferometric imaging technique for moving objects[J]. *App. Opt.*, 1976, **15**(8): 1923~1929
- 5 Stephen Marcus, Barry D. Colella, Thomas J. Green. Solid-state laser synthetic aperture radar [J]. *App. Opt.*, 1994, **33**(6): 960~964
- 6 Thomas J. Green, Stephen Marcus, Barry D. Colella. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. *App. Opt.*, 1995, **34**(30): 6941~6949
- 7 M. Bashkansky, R. L. Lucke, E. Funk *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt. Letts.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 8 W. Buell, N. Marechal, J. Buck *et al.*. Demonstrations of synthetic aperture imaging radar [C]. *SPIE*, 2005, **5791**. 152~166
- 9 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**(35): 7621~7629
- 10 Li Fan, Wu Shuangyang, Zheng Yongchao *et al.*. Overview of the development of synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 56~59
李 番, 鄒双阳, 郑永超等. 合成孔径激光雷达技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(1): 56~59
- 11 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): defocused and phase2 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
- 12 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (II): spatial phase biased telescope for transmitting antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197~2004
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): 1197~2004
- 13 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (III): circulated duplex telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405~1410
刘立人, 合成孔径激光成像雷达 (III): 双向环路发射接收望远镜

- [J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1405~1410
- 14 Guo Liang, Xing Mengdao, Liang Yi *et al.*. Algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging ladar data processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1183~1189
郭亮, 邢孟道, 梁毅等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1183~1189
- 15 Chen Yunbo, Tang Bo, Wang Lina *et al.*. Study on the frequency stability problem of SAL[J]. *Chinese J. Radio Science*, 2006, **21**(6): 975~977
陈云波, 唐波, 王丽娜等. 合成孔径激光雷达频率稳定性问题研究[J]. 电波科学学报, 2006, **21**(6): 975~977
- 16 Thomas J. Karr. Resolution of synthetic aperture imaging through turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2003, **20**(6): 1067~1083
- 17 Robert L. Lucke. Synthetic aperture ladar simulations with phase screens and fourier propagation [J]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004, **3**: 1788~1798
- 18 J. C. Ricklin, P. G. Tomlinson. Active imaging at DARPA[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 1~9
- 19 Zhili Hua, Hongping Li, Yongjian Gu. Atmospheric turbulence phase compensation in synthetic aperture ladar data processing [C]. *SPIE*, 2007, **6787**: 1~6
- 20 Walter G. Carrara, Ron S. Goodman. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Process Algorithms[M]. Artech House, 1995. 95~109
- 21 J. W. Goodman. Statistical Optics[M]. Wiley, 1985. 361~464
- 22 R. G. Lane, A. Glindemann, J. C. Dainty. Simulation of a kolmogorov phase screen [J]. *Waves Random Media*, 1992, **2**: 209~224
- 23 Zhang Huimin, Li Xinyang. Numerical simulation of wavefront phase screen distorted by atmospheric turbulence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1): 14~19
张慧敏, 李新阳. 大气湍流畸变相位屏的数值模拟方法研究[J]. 光电工程, 2006, **33**(1): 14~19
- 24 Karin R. Weiss, Wrana, Leslie S Balfour. Statistical analysis of measurements of atmosphere turbulence in different climates[C]. *SPIE*, 2002, **4538**: 93~101
- 25 D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia *et al.*. Phase gradient autofocus -A robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, **30**(3): 827~835
- 26 Charles V. Jakowatz, Jr., Daniel E. Wahl. Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic-aperture-radar imagery [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1993, **10**(12): 2539
- 27 Paul H. Eichel, Dennis C. Ghiglia, Charles V. Jackowatz *et al.*. Phase correction system for automatic focusing of synthetic aperture radar[P]. United States Patent : 4924229