

基于迭代的傅里叶望远镜图像重构方法

周志盛^{1,2} 相里斌^{1,2} 张文喜² 李 杨²

(¹ 中国科学技术大学精密机械及精密仪器系, 安徽 合肥 230027)
² 中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 为了提高最终图像的质量, 结合传统的直接重构算法和相位重构算法, 提出了一种基于迭代的傅里叶望远镜图像重构方法。对反演得到的傅里叶频谱进行逆傅里叶变换得到直接重构图像, 取直接重构图像的阈值图像作为相位重构算法的初始输入, 通过迭代能够获得质量更高的图像。成像仿真实验结果表明, 成像信噪比为 50 倍时, 与直接重构图像相比, 迭代重构图像斯特列尔比从 0.82 提高到 0.88, 峰值信噪比从 17 dB 提高到 19 dB; 在成像信噪比为 100 倍时, 迭代重构图像斯特列尔比从 0.89 提高到 0.93, 峰值信噪比从 20 dB 提高到 22 dB。

关键词 成像系统; 傅里叶望远镜; 图像重构; 相位重构; 迭代

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0511005

Image Reconstruction Method of Fourier Telescope Based on Iteration

Zhou Zhisheng^{1,2} Xiangli Bin^{1,2} Zhang Wenxi² Li Yang²

¹ Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China
² Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract To improve the quality of the ultimate image, the conventional image reconstruction method and the phase retrieval method are combined and an image reconstruction method of Fourier telescope based on iteration is proposed. A direct reconstructed image is acquired by inverse Fourier transform of the measured Fourier component, and then a threshold image of the direct reconstructed image acts as the initial input for the phase retrieval reconstruction algorithm and a superior image is reconstructed through iteration. Simulation result shows that, compared with direct reconstructed image, the Strehl ratio of reconstructed image from the iterative method raises from 0.83 to 0.88 (50 signal-to-noise ratio) and from 0.89 to 0.93 (100 signal-to-noise ratio), besides the peak value signal-to-noise raises from 17 dB to 19 dB (50 signal-to-noise ratio) and from 20 dB to 22 dB (100 signal-to-noise ratio).

Key words imaging systems; Fourier telescope; image reconstruction; phase retrieval; iteration

OCIS codes 010.3640; 110.0115; 110.1758; 110.3175

1 引 言

傅里叶望远镜是一种能够对远距离暗弱目标进行高分辨率成像的计算成像技术, 自被提出以来就受到了国内外学者的高度关注。十多年来人们对其进行了深入的理论研究^[1-3], 并提出了定位于高轨道目标监测的 GLINT 计划和定位于低轨道目标监

测的 SAINT 计划^[4-5]。在国内, 长春光学精密机械与物理研究所、电子科技大学和国防科技大学完成了室内成像实验^[6-8], 且长春光学精密机械与物理研究所于 2011 年完成了外场实验^[9]。作为一种计算成像技术, 傅里叶望远镜不是对目标直接进行光学成像, 而是通过处理采集到的数据来反演目标图

收稿日期: 2013-11-05; 收到修改稿日期: 2013-12-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA7031003A)、国家杰出青年科学基金(61225024)

作者简介: 周志盛(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事激光干涉成像技术和光学测量技术方面的研究。

E-mail: zhouzhi@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 相里斌(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光谱成像技术和航空航天光学遥感等方面的研究。

E-mail: xiangli@aoe.ac.cn

像,这就为探寻系统参数间关系,利用数据处理方法来改进图像质量提供了可能性。陈卫等^[10]提出了基于全相位谱分析的傅里叶望远镜目标重构方法,刘欣悦等^[11]提出了基于压缩感知理论的稀疏采样傅里叶望远镜成像方法,于树海等^[12]对空域非均匀傅里叶变换的傅里叶望远镜进行了研究。

在系统采集到的信号信噪比不高的情况下,反演出来的频谱的相位畸变比较严重,传统的重构方法即直接逆傅里叶变换得到的图像斯特列尔比(SR)不高,且背景噪声较大。本文基于相位重构算法和傅里叶望远镜图像重构的基本原理,提出了一种迭代的图像重构方法,该方法能够一定程度上提高最终图像的质量。

2 传统重构方法存在的问题

傅里叶望远镜成像的基本原理为采用不同发射位置的三束或多束激光照射目标,在目标表面形成

干涉条纹并随时间完成对目标的扫描,探测器收集散射回波信号,从回波信号中解调出目标灰度分布的傅里叶频谱,最后从频谱中重构出目标图像^[1]。图1是傅里叶望远镜成像过程的框架图,其中图像重构过程对采集到的信号进行频谱解调和图像重构,是极其重要的环节。图像重构方法的好坏直接影响到最终图像的质量。传统的图像重构方法利用相位闭合算法抑制大气的低频相位误差,获得比较好的目标频谱,然后进行傅里叶逆变换得到最终的图像 $o(x, y)$:

$$o(x, y) = \iint_{u, v} F(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv, \quad (1)$$

其中 $F(u, v)$ 是解调得到的傅里叶频谱, u, v 对应不同光束形成的干涉条纹的空间频率。这种傅里叶逆变换的方法是一种直接重构方法,算法实现比较简单,在信噪比(SNR)较高时可以获得很好的结果。

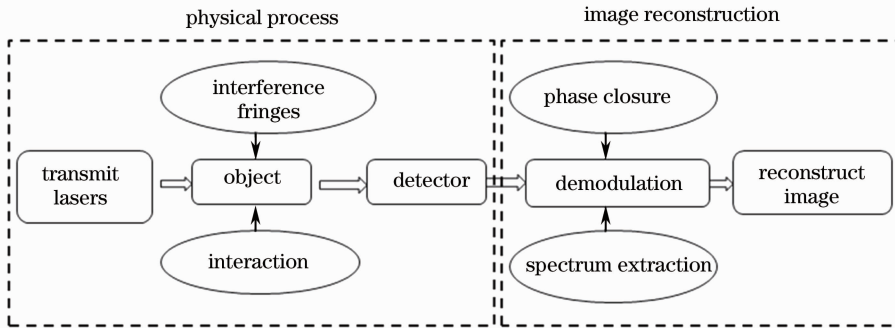


图1 傅里叶望远镜成像过程框架图

Fig. 1 Block diagram of imaging process of Fourier telescope

傅里叶望远镜利用探测器采集回波信号,采集时会受到各种噪声的干扰,包括激光散斑噪声,背景杂散光,探测器暗电流,动态范围限制等。因为回波信号强度较弱,所以采集信号信噪比一般不高,在环境比较恶劣时会降低至几十倍。在成像仿真实验中发现,当成像过程非理想、往成像系统中加入随机噪声且成像 SNR 不高时,解调得到的傅里叶频谱的相

位畸变要远比频谱的模畸变严重。在直接重构方法即傅里叶逆变换中,频谱的相位和模都需要用到,而且相位的作用是决定性的,在相位畸变很严重的情况下,重构图像的质量就会比较低。下面从理论上分析频谱的相位受噪声影响要远比模大的原因。

傅里叶望远镜成像系统探测器接收的能量为^[1]

$$S(\mathbf{k}_m, t) = c\{2O(\mathbf{k}_0) + O(\mathbf{k}_m) \exp[i\Delta\omega(t + T/2) + i\phi_m - i\phi_0] + c. c. \}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{k} 为两束相干光在目标表面形成的干涉条纹的空间频率, $\Delta\omega$ 为两相干光的频差, T 为采样周期, ϕ 为两相干光的随机相位差。第一项为直流项,第二项为频谱项, $c. c.$ 为频谱项的共轭项。考虑探测器噪声、周围背景光等噪声源的影响,并把这些噪声归结为服从某一分布的随机噪声 $\eta(\mathbf{k}_m, t)$ 添加到探测器接收到的能量中:

$$S(\mathbf{k}_m, t) = c\{2O(\mathbf{k}_0) + O(\mathbf{k}_m) \exp[i\Delta\omega(t + T/2) + i\phi_m - i\phi_0] + c. c. \} + \eta(\mathbf{k}_m, t), \quad (3)$$

将连续 N 个采样周期数据相加,可以消除直流项和共轭项,提取出频谱项^[1],取 $t=0$,可得到

$$M(\mathbf{k}_m) = \sum_{j=0}^{N-1} S[\mathbf{k}_m, (j-1/2)T] \exp(-ij\Delta\omega T) = cN \exp(i\phi_m - i\phi_0) O(\mathbf{k}_m) + \sum_{j=0}^{N-1} \eta[\mathbf{k}_m, (j-1/2)T] \times \exp(-ij\Delta\omega T) = c' \exp(i\phi_m - i\phi_0) O(\mathbf{k}_m) + \eta'(\mathbf{k}_m) = c' [\exp(i\phi_m - i\phi_0) O(\mathbf{k}_m) + \eta''(\mathbf{k}_m)], \quad (4)$$

三束相干光间形成相位闭合三联体, 消除低频的随机相位误差^[1]

$$R(\mathbf{k}_m) = M(\mathbf{k}_m)/M(\mathbf{k}_{m-1})M(\mathbf{k}_1) = \frac{c' [\exp(i\phi_m - i\phi_0) O(\mathbf{k}_m) + \eta''(\mathbf{k}_m)]}{c' [\exp(i\phi_m - i\phi_1) O(\mathbf{k}_{m-1}) + \eta''(\mathbf{k}_{m-1})] c' [\exp(i\phi_1 - i\phi_0) O(\mathbf{k}_1) + \eta''(\mathbf{k}_1)]}, \quad (5)$$

很明显当无噪声项时, 随机相位差将会实现闭合而被消除掉。因为后续处理得到的频谱估计量 $O'(\mathbf{k}_m)$ 正比于 $R(\mathbf{k}_m)$, 所以只需要研究随机噪声对 $R(\mathbf{k}_m)$ 的模和相位的影响即可。把噪声项当作小量, 把频谱项当作自变量, 构造 R 关于频谱项的函数为

$$R = \frac{\exp(i\phi_m - i\phi_0) O(\mathbf{k}_m)}{[\exp(i\phi_{m-1} - i\phi_0) O(\mathbf{k}_{m-1})][\exp(i\phi_1 - i\phi_0) O(\mathbf{k}_1)]} = \frac{x_1}{x_2 x_3}. \quad (6)$$

计算 R 的误差传递函数, 得到 ΔR 的模和相位的变化不等式为

$$\begin{cases} \left| \frac{\Delta R}{R} \right| \leq \left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right| + \left| \frac{\Delta x_2}{x_2} \right| + \left| \frac{\Delta x_3}{x_3} \right| \\ \left| \phi\left(\frac{\Delta R}{R}\right) \right| \leq \left| \phi\left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right) \right| + \left| \phi\left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right) \right| + \left| \phi\left(\frac{\Delta x_3}{x_3}\right) \right| \end{cases}, \quad (7)$$

根据上式, 可以估计 $\Delta x/x$ 的变化即噪声项对 $M(\mathbf{k}_m)$ 的影响, 作为最终频谱估计量 $O'(\mathbf{k}_m)$ 的变化的估计。重新考察(4)式, 估计噪声项对 $M(\mathbf{k}_m)$ 的影响。图2是 Δx 的影响分析示意图, 其中 $x = c' \exp(i\phi_m - i\phi_0) O(\mathbf{k}_m)$, $\Delta x = \sum_{j=0}^{N-1} \eta(\mathbf{k}_m, t_j) \exp(-ij\Delta\omega T) = c' \eta''(\mathbf{k}_m)$ 。因为噪声的随机性, Δx 的相位的方向不可预测, 可能为 $[0, 2\pi]$ 间任意方向, 如图2圆圈内的虚线箭头所示。不失一般性, 取 Δx 的方向与 x 的方向相垂直, 分别观察模和相位的变化。因为 θ 比较小, $\|x + \Delta x\| - \|x\| / \|x\| = \theta^2$, $|\phi(x + \Delta x) - \phi(x)| = \theta$, 其中 $\theta \approx |\Delta x| / |x|$ 。可以用 SNR 的倒数去估计 θ , 一般傅里叶望远镜系统成像 SNR 在 50 倍以上, 所以 θ 远小于 1。 $M(\mathbf{k}_m)$ 的模的变化正比于 θ^2 , $M(\mathbf{k}_m)$ 的相位变化正比于 θ , 所以噪声项引起的相位畸变要远比

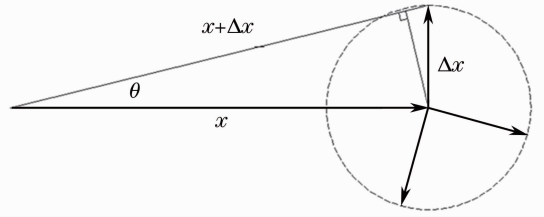


图2 Δx 的影响分析示意图

Fig. 2 Analytical schematic of influence of Δx 模的畸变严重。

上面的推导有一些地方并不是数学严格的, 只是对最后的频谱的模和相位的变化做量级的比较。结果表明, 傅里叶频谱的相位对噪声的敏感性远大于模对噪声的敏感性。为了验证结论的正确性, 利用成像仿真进行了无噪声情况、100 倍和 50 倍三种情况下解调频谱的模和相位的比较。为了消除噪声数据随机性的影响, 对两种带噪声情况都进行了 5 次成像仿真。采用两种 SNR 下频谱的模和相位与无噪声时频谱的模和相位的相关系数作为评价指标, 相关系数越大, 畸变越小; 相关系数越小, 畸变越大。结果如表 1 所示。结果表明, 频谱的相位畸变的确比频谱的模的畸变严重, 在低 SNR 情况下频谱的模依旧可以得到较好保持。

表1 频谱的模和相位的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of modulus and phase of frequency spectrum

Parameter	Value				
Modulus coefficient (SNR=100)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Phase coefficient (SNR=100)	0.20	0.24	0.19	0.19	0.17
Modulus coefficient (SNR=50)	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98
Phase coefficient (SNR=50)	0.15	0.09	0.08	0.11	0.18

理论分析和成像仿真实验数据表明, 傅里叶频谱的相位比频谱的模受到噪声的退化作用更明显。在系统成像信噪比较低时频谱的相位畸变将会十分

严重, 如果这时利用逆傅里叶变换直接重构, 图像的失真将会比较严重。传统重构算法直接采用逆傅里叶变换, 没有考虑在低信噪比时解调频谱的模和相

位的特点,没能够充分利用频谱模的抗噪声能力强的优点,重构图像质量较差。

3 迭代重构方法

如上所述,傅里叶望远镜解调频谱的模具有比较高的抗噪声能力,在低信噪比情况下仍然可以得到很好的保持,如果能够仅仅从频谱的模重构出图像,就有可能获得比直接重构方法质量好的结果。为此,提出了一种迭代重构方法,该方法结合了传统的直接重构算法和相位重构算法,通过迭代的方式逐步逼近目标图像。

3.1 相位重构问题及算法

相位重构问题又称为相位恢复问题,最早来源于天文干涉测量法的需求^[13]。因为传统大口径望远镜成像分辨率受限于大气湍流扰动,一些干涉测量法陆续被提出,例如散斑干涉法和振幅干涉法。干涉测量法能够以接近衍射极限的分辨率获得空间目标的傅里叶频谱的模,如果可以仅从傅里叶频谱的模重构出图像,那么实现超高分辨率成像将会成为可能。此外,相位重构问题在其他一些领域例如全息术、波前探测和相干照明成像中也有应用^[14-15]。Fienup提出对于天空的目标其强度反射率一般是实值且非负的,且目标是空间有界的,把这两点作为约束条件,对著名的 Gerchberg-Saxton 算法进行一些修改,得到所谓的误差递减逼近法,其框架示意图如图 3 所示^[13]。在每次迭代过程中, o 是目标图像的估计值,对其做傅里叶变换得到其傅里叶频谱 O ,然后用测量得到频谱的模 $|F|$ 去代替 $|O|$ 得到新的傅里叶频谱 O' ,再进行傅里叶逆变换得到 o' ,对 o' 进行空域约束得到新的估计值:

$$o_{k+1}(x) = \begin{cases} o'_k(x), & x \in C \\ 0, & x \notin C \end{cases} \quad (8)$$

式中 C 代表约束条件,即实值非负且限定在大略已知的空间区域内。对不满足约束条件的点简单地置为 0。理论和实践证明该方法中估计值 o 的傅里叶频谱的模的均方误差会逐渐下降,最后收敛到一个比较好的结果。

针对误差递减逼近法收敛速度较慢的缺点,Fienup 对其改进得到了几种改进算法,其中最有效的是混合-输入-输出法^[13],其框架流程与误差递减逼近法完全一致,不同之处在于对 o' 进行空域约束得到新的估计值 o 时的替代公式为

$$o_{k+1}(x) = \begin{cases} o'_k(x), & x \in C \\ o_k(x) - \beta o'_k(x), & x \notin C \end{cases} \quad (9)$$

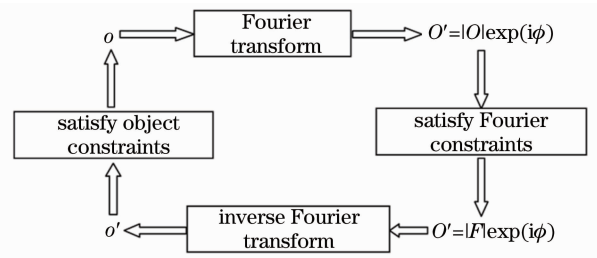


图 3 误差递减逼近法框架示意图

Fig. 3 Block diagram of the error-reduction approach 式中 β 为一个常数,一般根据经验选取。混合-输入-输出法相对比较简单,收敛速度快,因而被广泛采用。

3.2 迭代重构方法

相比于传统的相位重构问题,傅里叶望远镜的图像重构有其特殊性:相位重构问题基本上都是只能获取频谱的模而相位大量缺失,而傅里叶望远镜可以同时获得所有频谱的模和相位;虽然在低信噪比情况下相位的畸变较大,但傅里叶望远镜仍然可以通过直接重构获得目标的大概轮廓图像。如果在进行相位重构时利用目标的大概轮廓信息,把直接重构算法和相位重构算法结合起来,就有可能获得比两种方法都好的结果。为了和纯粹的相位重构算法区分,称这种结合的方法为迭代重构方法,其实现步骤如下:

- 1) 对采集的数据进行相位闭合和频谱提取,然后进行逆傅里叶变换获得直接重构图像,即传统的图像重构过程;
- 2) 对直接重构图像取阈值,低于阈值的像素置 0,高于阈值的像素置 1,得到一幅显示目标大概轮廓的二值图像;
- 3) 把二值图像作为输入,运行相位重构算法,获得迭代重构图像。

该迭代重构方法的精髓在于取目标的轮廓图像作为相位重构算法的输入,这虽然是很简单的一个步骤,但是在频谱的模存在一定畸变时,输入图像的好坏直接影响了相位重构结果,所以这个步骤不仅是连接两种重构算法的桥梁,也是迭代重构方法的关键所在。

4 成像仿真实验

4.1 仿真实验结果

为了观察傅里叶望远镜图像直接重构、相位重构和迭代重构的实际效果,进行了计算机成像仿真实验,比较直接重构和相位重构的效果。仿真实验

过程如下:1)模拟傅里叶望远镜成像过程,生成测量数据;2)从测量数据反演出目标频谱,计算出目标频谱的模;3)对反演频谱进行傅里叶逆变换,获得直接重构图像;4)估计卫星目标的粗略位置,生成限定区域像素为1,其余像素为0的二值图像,把二值图像作为初始输入,运行混合-输入-输出重构算法,获得相位重构图像。图4给出了SNR为50倍及100倍两种信噪比下的目标源图像、直接重构图像、初始二

值图像和相位重构图像,其中(a),(b),(c),(d)分别为SNR为50倍时的相对应图像,(e),(f),(g),(h)分别为SNR为100倍时相对应图像。结果表明,相位重构算法的确可以重建目标图像,是一种可行的重构方法,但是与直接重构图像相比不具有优势,因为整体轮廓和细节信息都不如直接重构图像清晰。这意味着对傅里叶望远镜图像重构而言,相位重构算法与直接重构算法相比并不具有优势。

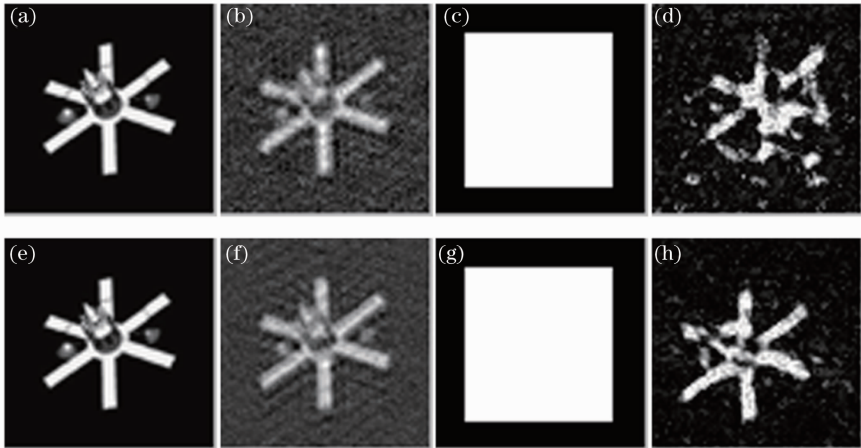


图4 相位重构方法重构结果

Fig. 4 Reconstruction result of phase retrieval method

其次比较直接重构和迭代重构的效果。仿真实验过程中步骤4的输入图像改为直接重构图像的阈值图像。图5给出了SNR为50倍及SNR为100倍两种信噪比下目标源图像、直接重构图像、取阈值后的二值图像和迭代重构图像,其中(a),(b),(c),(d)分别为SNR为50倍时的对应图像,(e),(f),(g),(h)分别为SNR为100倍时的对应图像。对比直接重构图像和迭代重构图像,发现后者的主观视觉效果更好:卫星顶点更尖锐更明显,太阳帆板边缘

性更好,SNR为100倍时迭代重构图像中卫星主体的白色部分已经趋向于规则的矩形,而不是直接重构图像中的不规则形状。采用重构图像与目标源图像的SR来定量评价成像质量,SNR为50倍时直接重构图像SR为0.82,迭代重构图像SR为0.88;SNR为100倍时直接重构图像SR为0.89,迭代重构图像SR为0.93。两种情况下后者的SR都比前者有所提高。另外,迭代重构图像减少了卫星周围背景的噪声扰动,图像峰值信噪比(PSNR)得到了提高:

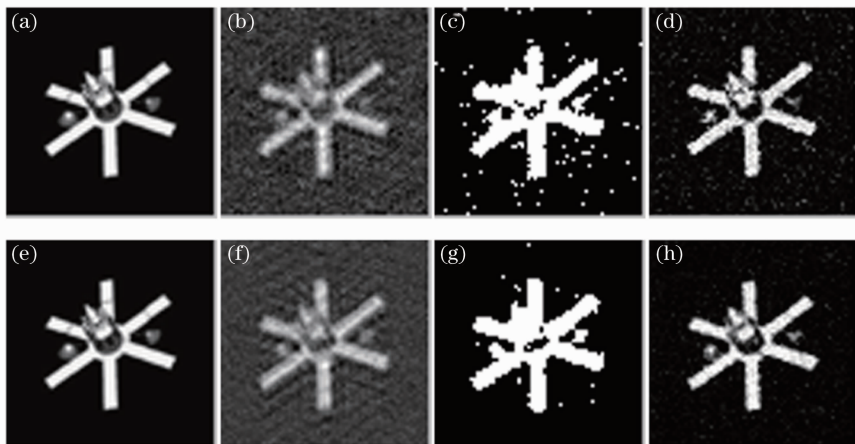


图5 迭代法重构结果

Fig. 5 Reconstruction result of iterative method

SNR 为 50 倍时 PSNR 从 17 dB 提高到 19 dB; SNR 为 100 倍时 PSNR 从 20 dB 提高到 22 dB。

为了观察噪声强弱对重构算法的影响,对 SNR 为 10 倍到 SNR 为 100 倍的不同信噪比情况进行了成像仿真实验,仿真结果的曲线如图 6 所示。从上到下的曲线分别为频谱的模的相关系数曲线、迭代重构图像的 SR 曲线、直接重构图像的 SR 曲线和频谱的相位的相关系数曲线。为了减小噪声数据随机性的影响,每种 SNR 情况都进行了 5 次成像仿真,取数据平均值作为最终结果。结果表明,当 SNR 大于 30 倍时,迭代重构图像的 SR 得到提高,当 SNR 小于 30 倍时,迭代重构方法并无优势,甚至有可能比直接重构方法效果还要差。

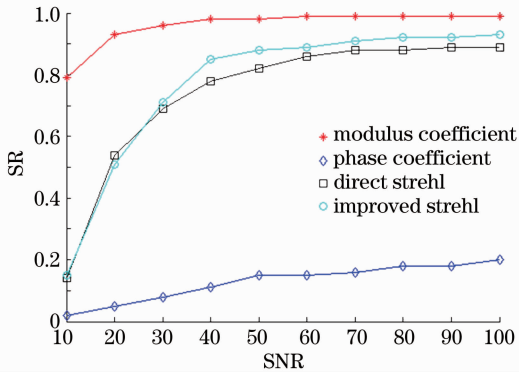


图 6 不同信噪比下重构图像 SR 变化曲线

Fig. 6 SR curves of reconstructed image under different SNRs

4.2 分析与讨论

频谱的相位受到噪声影响而产生的退化要远比频谱的模厉害,但是图 4 说明了仅仅靠频谱的模进行相位重构的方法,效果不如结合频谱相位和模的直接重构方法。深究其原因,发现在图像重构时相位的重要性要远大于模,而且是决定性的。图 7 给出了一个显示相位重要性的例子,其中(a)、(b)是两幅轮廓差别很大的卫星目标图像,(c)是利用(a)的频谱的模和(b)的频谱的相位组成新的频谱,然后逆变换得到的图像。显然(c)总体上显示了(b)的卫星图像,所以相位的作用的是决定性的,这就解释了为什么相位畸变如此严重情况下直接重构依然能够获得比较理想的图像。频谱的模畸变虽然小,但是当目标轮廓比较复杂时,相位重构方法的结果严重依赖于初始输入图像。当目标轮廓的初始信息比较缺乏时,相位重构方法就难以获得比直接重构方法更优的图像。

如上所述,作为一种面向于一些只能获取频谱

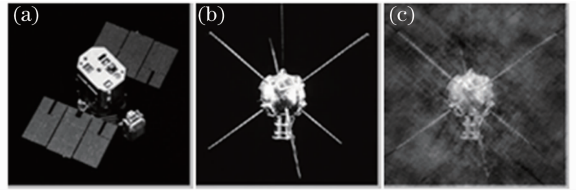


图 7 (a)目标图像 A; (b)目标图像 B; (c) A 频谱的模和 B 频谱的相位的重构图像

Fig. 7 (a) Object image A; (b) object image B;

(c) reconstructed image with A's modulus and B's phase

的模的问题的解决方法,纯粹的相位重构方法在傅里叶望远镜中效果不好,但是结合直接重构和相位重构的迭代重构方法能够一定程度上提高重建图像的质量。该方法充分利用了傅里叶望远镜成像的特点:1)傅里叶望远镜能够同时获取目标频谱的相位和模,而且利用相位闭合抑制大气扰动影响,这样就能获得相对比较好的目标图像,对其取阈值就能获得好的目标轮廓的估计图像,好的估计图像作为输入在相位重构算法中特别是频谱的模有畸变的情况下是非常重要的;2)傅里叶望远镜解调得到的频谱的模受噪声的影响比较小,模的畸变越小,相位重构的效果越好。结合这两个特点,迭代重构方法获得质量更优的图像就成为了可能,仿真实验结果也证实了这一点。当然,作为一种迭代算法,该方法需要至少十几次,多至几十次的傅里叶变换,需要耗费大量的时间,这就限制了它在实时处理中的应用,如何加快迭代收敛过程是一个需要研究的问题。另外仿真时采用的是灰度值为 0 到 255 的图像,迭代时很容易对图像的像素值进行空域限定,实际应用时反演得到的频谱对应的重构图像的灰度区间是未知的,由于像素灰度限定合理与否直接关系到重构效果,所以如何寻找好的灰度限定空间是一个比较重要的问题,这些都需要在后续工作中进一步研究。

5 结 论

研究了一种傅里叶望远镜图像的迭代重构方法。从理论分析和成像仿真实验两个方面证明了当采集数据存在噪声干扰时,反演傅里叶频谱的相位的畸变要远比频谱的模的畸变严重,以此为出发点利用基于频谱的模的迭代重构算法得到比直接重构更优的图像。成像仿真实验结果表明,仅仅依赖于频谱的模进行相位重构,效果并不理想;联合频谱的相位,把直接重构图像的阈值图像作为初始输入,迭代重构后图像质量变优,SR 和峰值信噪比得到提高。该迭代重构方法可以作为傅里叶望远镜成像的

后续处理手段,以提高最终图像质量。

参 考 文 献

- 1 R Holmes, S Ma, A Bhowmik, *et al.*. Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium [J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, 13(2): 351–364.
- 2 Zhang Wenxi, Xiangli Bin, Kong Xinxin *et al.*. Resolution of coherent field imaging technique [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(16): 164203.
张文喜, 相里斌, 孔新新, 等. 相干场成像技术分辨率研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(16): 164203.
- 3 Kong Xinxin, Huangmin, Zhang Wenxi. Effect analysis of laser frequency-shift error on imaging quality in Fourier telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1211001.
孔新新, 黄旻, 张文喜. 傅里叶望远镜中激光移频误差对成像质量影响的分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1211001.
- 4 S D Ford, D G Voelz, L Victor, *et al.*. Geo light imaging national testbed (GLINT): past, present, and future [C]. *SPIE*, 1999, 3815: 2–10.
- 5 James Stapp, Brett Spivey, Laurence Chen, *et al.*. Simulation of a Fourier telescope imaging system for objects in low earth orbit [C]. *SPIE*, 2006, 6307(1): 1–11.
- 6 Dong Lei, Liu Xinyue, Wang Jianli. Realization of Fourier telescope technology in laboratory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 999–1002.
董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境中傅里叶望远镜技术的实现 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 999–1002.
- 7 Dong Hongzhou, Wu jian, Liu Yi, *et al.*. Imaging verification system of Fourier telescope in laboratory [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(11): 40–49.
董洪舟, 吴健, 刘艺, 等. 傅里叶望远镜的实验室验证系统 [J]. *光电工程*, 2011, 38(11): 40–49.
- 8 Chen Wei, Li Quan, Wang Yangui. Experimental research of Fourier telescope imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0311001.
陈卫, 黎全, 王雁桂. 傅里叶望远术成像系统的实验研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0311001.
- 9 Dong Lei, Liu Xinyue, Lin Xudong, *et al.*. Improvement of performance and analysis of results of field experiments of Fourier telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0201004.
董磊, 刘欣悦, 林旭东, 等. 傅里叶望远镜外场实验性能改进和结果分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0201004.
- 10 Chen Wei, Li Quan, Wang Yangui. Object reconstruction of Fourier-telescope based on all-phase spectrum analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3441–3446.
陈卫, 黎全, 王雁桂. 基于全相位谱分析的傅里叶望远术目标重构 [J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3441–3446.
- 11 Liu Xinyue, Dong Lei, Wang Jianli. Fourier telescope imaging via sparse sampling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 521–527.
刘欣悦, 董磊, 王建立. 稀疏采样傅里叶望远镜成像 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 521–527.
- 12 Yu Shuhai, Wang Jianli, Dong Lei, *et al.*. Fourier telescope based on spatial non uniform Fourier transform [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1661–1665.
于树海, 王建立, 董磊, 等. 基于空域非均匀傅里叶变换的傅里叶望远镜 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(7): 1661–1665.
- 13 J R Fienup. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform [J]. *Opt Lett*, 1978, 3(1): 27–29.
- 14 J R Fienup, A M Kowalczyk. Phase retrieval for a complex-valued object by using a low-resolution image [J]. *J Opt Soc Am A*, 1990, 7(3): 450–458.
- 15 Manuel Guizar-Sicairos, James R Fienup. Phase retrieval with transverse translation diversity: a nonlinear optimization approach [J]. *Opt Express*, 2008, 16(10): 7264–7278.

栏目编辑: 韩峰