

基于非均匀周期采样的傅里叶望远镜 时域信号采集方法

于树海^{1,2}, 王建立^{1*}, 董磊¹, 刘欣悦¹, 王国聪^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了在低信噪比条件下清晰重构深空暗弱目标,提出了一种基于非均匀周期采样(NUPS)的傅里叶望远镜(FT)时域信号采集方法。对提出的方法进行了模拟实验并与均匀采样方法重构的图像进行了对比。基于NUPS方法,用1 MHz和5 MHz的采样频率分别采集100个点,对两个序列信号分别进行快速傅里叶变换,并对关心频率信息进行平均;传统的均匀采样方法则分别用1 MHz和5 MHz的采样频率采集200个点,再进行解调平均。对比结果显示:当信噪比(SNR)为50时,本文重构图像与衍射极限图像的斯托里尔比(Strehl)相比原方法提升了0.03,SNR为20时,Strehl比为0.5311,较均匀采样提高了0.2233。实验结果表明:NUPS方法在低信噪比条件下成像质量较高,可降低对激光功率的要求,为FT工程系统的实施奠定了技术基础。

关键词:傅里叶望远镜;非均匀周期采样;低信噪比;高分辨成像

中图分类号:V557; TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130603.0395

Time region signal collecting method of Fourier telescope based on non-uniform periodically sampling

YU Shu-hai^{1,2}, WANG Jian-li^{1*}, DONG Lei¹, LIU Xin-yue¹, WANG Guo-cong^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to clearly reconstruct targets in a dim and deep space under the condition of the Lower Signal to Noise(SNR), a new time domain signal acquisition method of Fourier Telescopy(FT) based on Non-uniform Periodic Sampling(NUPS) was proposed. The simulation experiments on the proposed method were performed and the reconstructed images by NUPS method and traditional uniform sample method were compared. With the NUPS method, 100 points were respectively collected at the sampling frequency 1 MHz and 5 MHz. Then the signals of two sequences were respectively fast Fourier transformed and the concern frequency information was averaged. With traditional uniform sampling methods, 200 points were collected at 1 MHz and 5 MHz sampling frequency and then demodulated average was developed. Compared results show that the Strehl ratio of reconstructed image with diffraction-limited image is enhanced 0.03 compared to the original

收稿日期:2013-01-11;修订日期:2013-03-13

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AAXXX1003)

method when SNR is 50, and the Strehl ratio is 0.531 1 that is improved 0.223 3 compared with uniform sampling when SNR is 20. Obviously, imaging quality is improved by the NUPS method under conditions of low SNRs, thus the laser power is reduced. The NUPS lays the technical foundation for the implementation of the FT engineering system.

Key words: Fourier telescopy; non-uniform periodically sampling; low SNR; high-resolution imaging

1 引言

1994年, R. Holmes^[1]等人在空间探测技术会议上提出了傅里叶望远镜(FT)这一概念,采用激光主动照明技术并综合合成孔径的优势来实现深空暗弱目标高分辨成像^[2-5],利用相位闭合技术克服了发射望远镜之间的粗大相位差异(Piston相差)及大气低阶扰动对成像的影响,其成像分辨率由发射基线最大长度决定,而不受单一发射望远镜的限制,发射器口径一般选择为0.4 m或者为可见光大气相干长度的2~4倍,此时受大气高阶扰动的影响有限^[6]。傅里叶望远镜将目标的空间频率信息在时域上进行编码,对接收光学系统要求不高,采用价格低廉的定日镜即可。近些年,国内学者对傅里叶望远镜系统进行了跟踪研究,对其原理及室内外实验进行了分析验证^[7-13],得到了满意的结果。

现阶段,傅里叶望远镜的发展方向分为低轨道和同步轨道目标成像探测两个方面。数值模拟发现,同步轨道成像由于目标非常远(大约36 000 km),对返回的时域信号进行均匀采样时需要较高的信噪比^[14]才能清晰重构目标图像,若采用滤波等技术提升重构图像质量,必然会失去一定的目标细节信息,因此要求发射激光光束的功率较高,研制难度较大。目前公开报道的文献中,尚无在低信噪比条件下采用傅里叶望远镜清晰重构目标的研究。

近期提出的非均匀周期采样方法(NUPS)^[15],可保证每部分信号的均匀性,因此采用快速傅里叶变换即可完成对信号的谱分析,同时能有效地抑制频谱噪声。傅里叶望远镜采用对返回的时域信号进行解调,再采用相位闭合技术及相应的重构算法抽取目标的空间频率信息,满足时域非均匀周期采样方法理论。

基于以上分析,结合国内外研究现状,本文提出采用时域非均匀周期采样方法重构目标图像,克服了周期噪声及随机噪声对成像的影响,降低了系统对激光功率的要求,可以在低信噪比条件下清晰重构目标图像。

2 非均匀周期采样简介

均匀采样技术无论是在理论还是硬件实现上已经非常成熟。但由于受到采样定理的限制,要求采样频率必须大于被采信号最高频率的两倍,否则信号频谱将无法区别实际信号和混叠信号。非均匀采样的采样时间间隔是完全随机的,不受采样定理的限制,在高频信号中可以降低对采集频率的要求,在降低整个电路复杂性的同时也提升了系统的稳定性,但引入了一定的频谱噪声,这些噪声会淹没一些幅值较小的信号,而无法识别微弱信号。

非均匀周期采样方法是介于均匀采样和非均匀采样之间的一种采样方法。在一个采样频率下采样 k 点,然后改变采样频率再次采样 k 点,如式(1)所示:

$$\begin{aligned} x(n_{1,\dots,k}) &= \{x(1), x(2), \dots, x(k)\} \\ x(n_{k+1,\dots,2k}) &= \{x(k+1), x(k+2), \dots, x(2k)\} \\ &\dots\dots \\ x(n_{mk+1,\dots,2mk}) &= \{x(mk+1), x(mk+2), \dots, x(2mk)\} \end{aligned} \quad (1)$$

对每个信号片进行快速傅里叶变换(FFT),得到其频谱如式(2)所示:

$$\begin{aligned} X_1(N) &= \sum_{p=1}^k x(n_p) e^{-j2\pi n_p N/k} \\ X_2(N) &= \sum_{p=k+1}^{2k} x(n_p) e^{-j2\pi n_p N/k} \\ &\dots\dots \\ X_m(N) &= \sum_{p=mk+1}^{2mk} x(n_p) e^{-j2\pi n_p N/k} \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)对应相加即可得到完整的信号频谱。因此非均匀周期采样既具有非均匀采样的抗混叠特性,又具有均匀采样的抗频谱噪声特性等优点^[15-16]。

3 数值模拟实验

为了验证非均匀傅里叶变换在 FT 领域对噪声抑制作用的可行性,采用 MATLAB 软件对系统进行了仿真,数值模拟成像目标如图 1 所示,对应的衍射极限图像如图 2 所示。



图 1 成像目标

Fig. 1 Imaging target



图 2 衍射极限图像

Fig. 2 Diffraction-limited image

数值模拟条件:3 束光的差频分别为 50,100,150 kHz。3 光束频移为 50,100,200 kHz。均匀采集时,采集频率为 5 MHz,对应的最低差频为 50 kHz,采集 2 个完整的周期,采样点数为 200,单周期频率分辨率为 50 kHz;采集频率为 1 MHz 时,采集 10 个完整的周期,采集点数同为 200,单周期频率分辨率为 10 kHz。时域非均匀周期采样时,采集频率先设置为 1 MHz,采集 100 个点,再将采集频率调整为 5 MHz,同样采集 100 个点。噪声模型选择高斯白噪声。无噪声时,不同采集

频率对应的频谱如图 3 和图 4 所示。

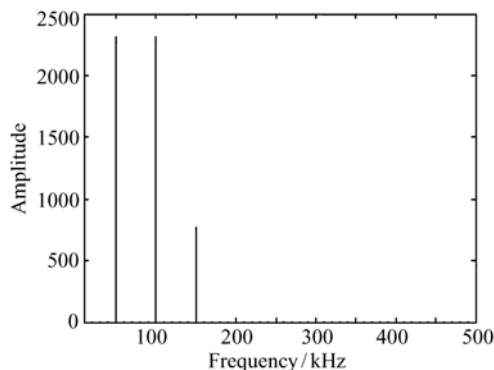


图 3 1 MHz 采样频率对应的频谱(无噪声)

Fig. 3 Spectrum of 1 MHz sampling frequency without noise

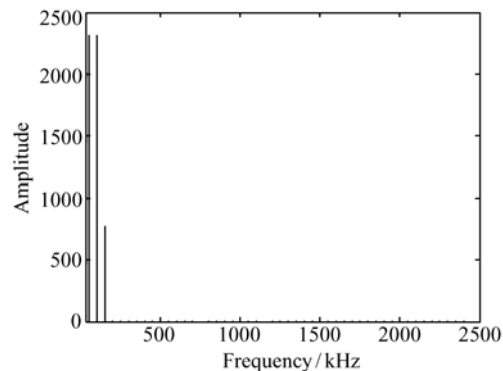


图 4 5 MHz 采样频率对应的频谱(无噪声)

Fig. 4 Spectrum of 5 MHz sampling frequency without noise

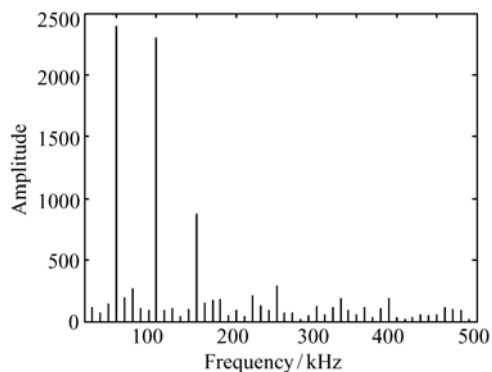


图 5 1 MHz 采样频率对应的频谱(SNR = 20)

Fig. 5 Spectrum of 1 MHz sampling frequency(SNR = 20)

当信噪比 SNR = 20 时,对应的返回信号频谱如图 5 和图 6 所示。

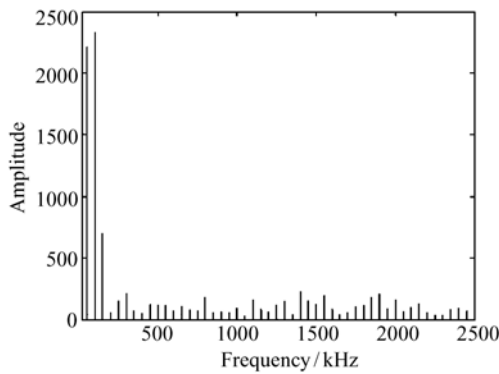


图6 5 MHz 采样频率对应的频谱(SNR = 20)

Fig. 6 Spectrum of 5 MHz sampling frequency(SNR = 20)

对比图3和图5,可以发现,在无噪声时,50和100 kHz处的幅值基本相同,这是因为两者抽取的是目标同一空间频率;而存在噪声时,100 kHz频率处的幅值 < 50 kHz。对比图4和图6发现,100 kHz的幅值 > 50 kHz。若单一用1 MHz和5 MHz的采样频率采样时,50和100 kHz两者的幅值差别将会增大,而采用非均匀周期采样方法时,可降低两者的差距并接近实际情况。

4 结果与讨论

在时域均匀时,5 MHz 采样时重构图像如图7所示;非均匀周期采样时,重构图像如图8所示。对比图7和8可以明显地发现,均匀采样方法重构的图像存在条纹状周期噪声,这也是非均

匀采样的另一个优势。

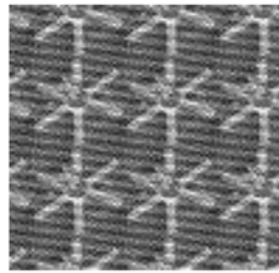


图7 均匀采样重构图像

Fig. 7 Reconstructed image using uniform sampling

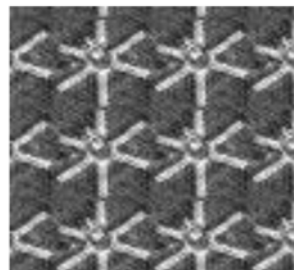


图8 非均匀周期均匀采样重构图像

Fig. 8 Reconstructed image using NUPS

为了客观分析,摒除1 MHz 采样对成像质量的影响,使得非均匀采样重构质量较高的误区,文中在相同的条件下用1和5 MHz 均匀采样方法进行了对比分析研究。重构结果如表1所示。可见当SNR = 50,采用1 MHz 均匀采样时,重构图像的条纹状周期噪声尤为明显。

表1 不同条件下的重构图像

Tab. 1 Reconstructed image under different conditions

	1 MHz uniform sampling	5 MHz uniform sampling	NUPS sampling
SNR = 20			
SNR = 50			

采用重构图像与衍射极限图像的斯特列尔比 (Strehl)式(4)来定量地评价重构图像质量。首

先计算重构图像与真实图像的交叉相关系数 H 如式(3)所示。

$$H(x,y) = O_T \otimes O_R = \sum_{m=0}^{Ma-1} \sum_{n=0}^{Na-1} O_T(m,n) [O_R(m+x,n+y)] , \quad (3)$$

式中: O_T 表示真实图像(此处为衍射极限图像)的灰度分布; O_R 表示重构图像灰度值; (m,n) 为二维坐标向量; (Ma, Ma) 为真实图像的二维维度,

(Mb, Mb) 为重构图像的二维维度,且 $0 \leq x < Ma + Mb - 1, 0 \leq y < Ma + Mb - 1$ 。将式(1)计算结果 $H(x,y)$ 带入式(2)即可得到 Strehl 比。

$$S = \frac{\max |H(x,y)|^2}{\iint O_T^*(x,y) O_T(x,y) dx dy \iint O_R^*(x,y) O_R(x,y) dx dy} , \quad (4)$$

式中: O_T^* 为 O_T 的复共轭; O_R^* 为 O_R 的复共轭。通

过计算得到表1 重构图像的 Strehl 比(如表2)。

表2 重构图像与衍射极限图像的 Strehl 比

Tab.2 Strehl ratio of reconstructed image and diffraction-limited image

	1 MHz uniform sampling	5 MHz uniform sampling	NUPS sampling
SNR = 20	0.307 8	0.296 0	0.531 1
SNR = 50	0.526 8	0.558 6	0.589 7

由表2可以看出,本文方法在低信噪比条件下重构图像质量改善较为明显,且该算法简单,硬件采集卡没有本质上的改变,不存在技术难度,适合工程系统。

由于 NUPS 在信号采集过程中改变了采集频率,可以克服条纹状的周期噪声。对于系统的随机噪声,考虑到程序运算时间,采用基线长度为 17×17 的发射模式进行 20 次模拟研究。当 $SNR = 50$ dB 时,Strehl 比如图9所示,1 MHz 采样的 Strehl 比均值为 0.681 1,均方根为 0.087 8,采用 NUPS 方法的均值为 0.686 9,均方根为 0.070 3;当 $SNR = 8$ dB,采样频率为 1 MHz 时,20 次模拟

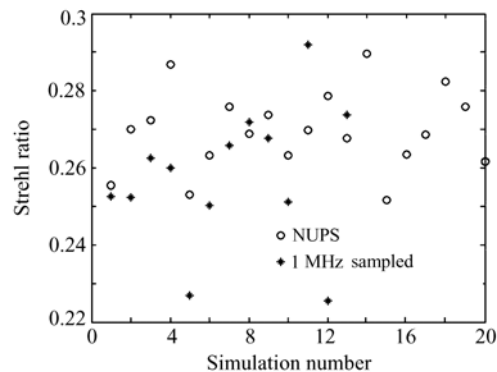


图10 SNR = 8 dB 时模拟结果

Fig. 10 Simulation results(SNR = 8 dB)

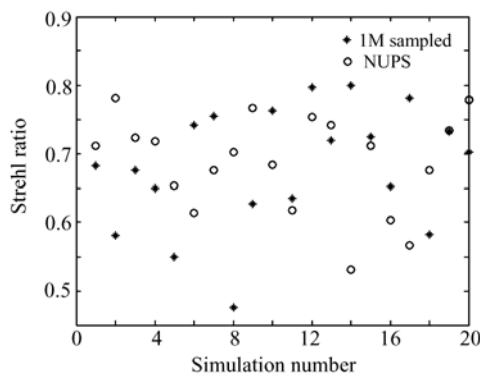


图9 SNR = 50 dB 时模拟结果

Fig.9 Simulation results(SNR = 50 dB)

中只有 13 次能分辨目标轮廓,Strehl 比均值为 0.257 9,均方根为 0.018 2;当采用采样频率分别为 1 MHz 和 5 MHz 的 NUPS 方法时,20 次模拟都可以分辨目标,Strehl 比均值为 0.269 5,均方根为 0.010 3。Strehl 比对比结果如图 10 所示。

5 结 论

本文对低信噪比条件下提升重构图像质量的方法进行了研究。提出了采用时域非均匀周期采样的方法,该方法简单高效,既保证了单周期内多点采样,同时也保证了多周期采样。对加性高斯

白噪声,在低信噪比条件下进行的数值模拟发现,此方法重构图像质量较之前的均匀采样方法提升明显,Strehl 提升了0.223 3,对噪声有一定的抑制

作用,同时系统降低了对激光功率的要求。提出的方法使傅里叶望远镜技术真正应用于工程实施向前迈进了一大步。

参考文献:

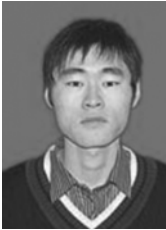
- [1] HOLMES R, MACGOVERN A, BHOWMIK A, *et al.*. An active imaging technique that attains ultra high resolution with ultra-low transmitter power [C]//Proceedings of the 1994 Space Surveillance Workshop, Lexington Mass. Apr. 5-7, 1994: pp. 135-140.
- [2] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, *et al.*. Aperture-synthesis techniques that use very-low-power illumination [J]. *SPIE*, 1995, 2566: 177-185.
- [3] MACDONALDA K R, BOGER J K, MATTHEW F, *et al.*. An experimental demonstration of Fourier telescope [J]. *SPIE*, 1999, 3815: 23-29.
- [4] HOLMES R B, BRINKLEY T. Reconstruction of images of deep space objects using fourier telescope [J]. *SPIE*, 1999, 3815: 11-22.
- [5] MATHIS J, STAPP J, CUELLAR E L. Field experiment performance of the receiver elements for a fourier telescope imaging system [J]. *SPIE*, 2005, 5896: 58960F.
- [6] BRINKLEY T J, SANDIER D. Effect of atmospheric turbulence and jitter on fourier telescope imaging systems [J]. *SPIE*, 1999, 3815: 42-48.
- [7] 董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 999-1002.
DONG L, LIU X Y, WANG J L. The realization of Fourier telescope technology in laboratory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 999-1002. (in Chinese)
- [8] 董磊, 王斌, 刘欣悦. 多光束傅里叶望远镜的关键技术 [J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(5): 440-445.
DONG L, WANG B, LIU X Y. Introduction to key techniques of multiple beam Fourier telescope [J]. *chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(5): 440-445. (in Chinese).
- [9] 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.
LIU X Y, DONG L, WANG J L. Fourier telescope imaging via sparse sampling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 521-527. (in Chinese)
- [10] 陈卫, 黎全, 王雁桂. 傅里叶望远镜成像系统的实验研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 68-73.
CHEN W, LI Q, WANG Y G. Experimental research of fourier telescope imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0311001: 68-73. (in Chinese)
- [11] 陈卫, 黎全, 王雁桂. 基于全相位谱分析的傅里叶望远镜目标重构 [J]. *光学学报*, 2011, 30(12): 3443-3446.
CHEN W, LI Q, WANG Y G. Object reconstruction of fourier telescope based on all phase spectrum analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3443-3446. (in Chinese)
- [12] 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): 22-28.
DONG L, LIU X Y, LIN X D, *et al.*. Improvement of performance and analysis of results of field experiments of fourier telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 22-28. (in Chinese)
- [13] 于树海, 王建立, 董磊, 等. 全相位谱分析的傅里叶望远镜外场实验数据处理 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2275-2282.
YU SH H, WANG J L, DONG L, *et al.*. File experiment data processing of fourier telescope base on all phase spectrum analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2275-2282. (in Chinese)
- [14] 王鸣浩, 董磊. 傅里叶望远镜成像原理对比验证 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1646-1652.
WANG M H, DONG L. Comparison of Fourier telescope imaging principles [J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2012, 41(6): 1646-1652. (in Chinese)
- [15] 汪安民, 王殊, 陈明欣. 一种抗混叠的非均匀周期采样及其频谱分析方法 [J]. *信号处理*, 2005, 21(3): 240-243.
WANG A M, WANG SH, CHEN M X. A novel spectrum analysis method for nonuniform periodically Sampling [J]. *Sig-*

nal Processing,2005,21(3):240-243. (in Chinese)

[16] 汪安民. 基于非均匀采样的信号频率检测方法及其实现[D]. 武汉:华中科技大学,2004.

WANG A M. Methods of signal frequency measurement and implementation based on nonuniform sampling[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2004. (in Chinese)

作者简介:



于树海(1985—),男,吉林通化人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事傅里叶望远镜关键技术及光电信号处理方面的研究。E-mail: yushuhai_0707@sina.com



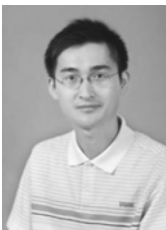
刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,1999年、2006年分别于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,主要从事光学成像及图像处理与分析等方面的研究。E-mail: sirliuxy@hotmail.com



王建立(1971—),男,山东曲阜,博士,研究员,博士生导师,1999年、2002年分别于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



王国聪(1988—),男,河北沧州人,硕士研究生,2011年于西北工业大学获得学士学位,主要从事傅里叶望远镜关键技术及光学系统设计分析方面的研究。E-mail: wangguocong0215@163.com



董磊(1982—),男,山东济宁人,硕士,助理研究员,2004年、2007年分别于山东大学获得学士、硕士学位,主要从事傅里叶光学和激光应用等方面的研究。E-mail: psotgradu@yahoo.com.cn