

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0447

傅里叶望远镜部分周期信号解调及对成像的影响

董磊, 刘欣悦, 刘杰, 于树海

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:为了解决傅里叶望远镜高功率短脉宽激光只能包含部分周期信号的难题,本文提出多脉冲拼接技术并对其基本原理和应用范围进行深入研究.首先介绍高功率短脉宽激光与声光移频器移频带宽之间的矛盾,进而引出利用傅里叶望远镜传统时间解调公式进行部分周期信号解调存在的困难.然后给出多脉冲拼接技术的基本理论,推导出理想情况下移频频率、脉冲重复率和脉宽满足的拼接条件.进而详细分析移频频率稳定性和脉冲重复率稳定性对多脉冲拼接成像结果的影响,并通过计算机仿真研究一般情况下脉宽变化对多脉冲拼接成像结果的影响.最后得出移频频率和脉冲重复率对成像无影响,激光脉宽变化小于 25% 仍可识别目标轮廓的结论.

关键词:傅里叶望远镜;多脉冲拼接;时间解调;部分周期;脉冲激光

中图分类号:TH743

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)04-0447-4

Demodulation of Part Period Signal of Fourier Telescope and Effects for Imaging

DONG Lei, LIU Xin-yue, LIU Jie, YU Shu-hai

(Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to settle the problem of high power short pulse laser of Fourier telescope including part period of signal, the technique of multiple pulse segment was first put forward and its basic principle and application was also first studied. Firstly, the conflict between high power short pulse laser and band width of acousto-optic frequency shifter was introduced, and then the difficulty that part period signal was demodulated by conventional time demodulation formula of Fourier telescope was put forward. Secondly, the basic principle of multiple pulse segment was given and the condition of segment between shifting frequency, pulse repetition and pulse width under ideal instance was deduced. Thirdly, the effects of stabilization of frequency shifting and pulse repetition on imaging results of multiple pulse segment were analyzed and the effects of changing pulse width on imaging results of multiple pulse segment under usual condition were studied by computer simulation. At last, the conclusion was acquired that shifting frequency and pulse repetition had no effects on imaging and the figure of object could also be identified under the condition of laser pulse changing less than 25%.

Key words: Fourier telescope; Multiple pulse segment; Time demodulation; Part period; Pulse laser

0 引言

随着科技进步,空基资源探测、灾害预警与高速

信息交换等高技术应用愈加频繁.空中卫星和高空飞行器的增多,使发展对深空暗弱目标的探测技术变得更加迫切.傅里叶望远镜就是能够对远距离小

基金项目:国家高技术发展计划(No. 2012AAXX1003X)资助

第一作者:董磊(1982—),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为傅里叶光学和激光技术的应用. Email: nodepression@126.com

收稿日期:2012-09-12;录用日期:2012-11-21

目标高分辨率成像的新型技术之一^[1-6]. 傅里叶望远镜具有主动成像、合成孔径、克服低阶大气湍流影响和低光学质量能量接收的特点, 从而成为近几年的研究热点^[7-12].

然而通过对傅里叶望远镜关键技术的深入研究, 发现对于超远距离成像选用的高峰值功率脉冲激光器存在脉宽过短, 从而引起现有移频器移频带宽范围内无法包含整数倍周期的信号的问题. 利用传统的时间解调公式无法对部分周期信号进行解调, 而针对该问题的解决方法还未见报稿, 所以本文尝试提出多脉冲拼接技术以克服该问题, 这也是本文的创新之处.

多脉冲拼接技术实际是将连续多个脉冲包含的调制信号拼接成整数倍调制信号, 再利用传统时间解调公式进行解调. 本文首先简单介绍部分周期时间解调问题的引出; 随后以两束光干涉为例, 推导理想多脉冲拼接技术中差频频率 f_s 、脉宽 W 和重复率 f_r 之间的对应关系; 然后分析一般情况下, 多脉冲拼接技术对成像结果的影响.

1 问题的引出

傅里叶望远镜时间解调公式为^[13]

$$M(\mathbf{k}) = \sum_{j=0}^{N-1} S[\mathbf{k}, t + (j-1/2)T] \exp(-ij\Delta\omega T) = c'N \exp[i\Delta\omega t + i\varphi(\mathbf{k})]O(\mathbf{k}) + 2c'O(0) \cdot \frac{1 - \exp(-Ni\Delta\omega T)}{1 - \exp(-i\Delta\omega T)} + c' \exp[-i\Delta\omega t - i\varphi(\mathbf{k})] \cdot O^*(\mathbf{k}) \frac{1 - \exp(-2Ni\Delta\omega T)}{1 - \exp(-2i\Delta\omega T)} \quad (1)$$

为了消除 $O(0)$ 和 $O^*(\mathbf{k})$ 项, 必须满足关系

$$N\Delta\omega T = 2n\pi \quad (2)$$

对于主动调 Q(高功率脉冲激光器常采用的技术)脉冲激光器, 脉宽(半幅全宽)一般为 10~25 ns^[14], 而声光移频器的移频频率最高为几十 MHz. 不失一般性, 假设激光脉宽为 10 ns, 则在激光脉宽持续时间内包含满足式(2)的整数倍调制信号最少为 1 周期, 对应最低差频为 100 MHz. 考虑到傅里叶望远镜需要 3 种不同差频, 采用 100 MHz 作为最低差频, 可选移频频率为 0 MHz, 100 MHz 和 300 MHz. 但是经过调研发现目前可用的声光移频器的最高移频频率为 110 MHz (Gooch&Housego 生产). 由于移频频率与一级衍射光存在制约关系, 移频频率越高衍射效率越低, 一般情况下移频频率 > 200 MHz, 效率 < 10%, 如此低的光能利用率不适合作为声光移频器使用. 所以只能降低移频频率, 这就遇到差频值低于 100 MHz 的情况, 即在激光脉冲持续期间只能包含部分调制信

号. 根据式(2)可以得出, 部分周期解调结果无法消除 $O(0)$ 和 $O^*(\mathbf{k})$ 项. 同时根据周期信号离散傅里叶级数系数与非周期信号离散傅里叶变换之间的关系^[15]得到, 如果取部分周期的非周期信号进行傅里叶变换则得到的是以部分周期为周期的周期信号在该移频频率处的傅里叶级数系数, 不再是原始周期信号对应频率处的系数, 即无法获得真实的 $O(\mathbf{k})$.

2 多脉冲拼接基本原理

2.1 理想情况

假设推导过程满足移频频率稳定、激光脉冲宽度不变和重复率稳定条件, 对于不满足的情况将在之后分析. 图 1 和图 2 为差频频率 f_s 、脉宽 W 和重复率 f_r 三者之间关系的示意图. 其中图 1 为连续脉冲在信号中截取的部分周期信号的示意图, 图 2 为由连续脉冲包含的部分周期信号拼接为整数倍周期信号的示意图. 为了简化分析, 将图 1 中脉冲 1 的前沿与调制信号的 a 位置(零值)对齐. 为了避免脉

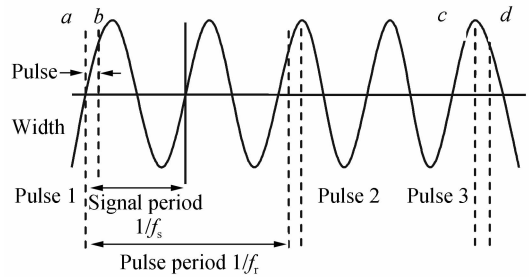


图 1 拼接前示意图

Fig. 1 Scheme before segment

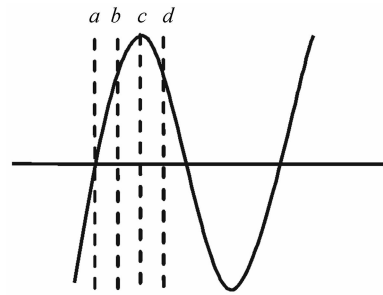


图 2 拼接后示意图

Fig. 2 Scheme after segment

冲 1 包含的调制信号与脉冲 2 所包含信号出现重叠, 脉冲 2 的前沿应该与所在周期的 b 位置对齐(也就是脉冲 1 的后沿与所在周期的交点位置). 根据上述关系可以推出在相邻脉冲 1 和 2 之间, f_s 、 W 和 f_r 三者满足

$$n \cdot 1/f_s + W = 1/f_r \quad (3)$$

式中 n 为整数. 虽然式(3)由脉冲 1 和脉冲 2 推出, 同样也适用于其他任意相邻脉冲. 将脉冲 2 与脉冲 3 所对应参量代入式(3), 可以验证同样满足式(3). 显然, 如果多个脉冲所包含调制信号正好拼接为整

数倍周期的调制信号, 根据式(1)就能获得与目标空间频谱 $O(k)$ 成正比项, 即 f_s 与 W 满足

$$1/f_s = n'W \quad (4)$$

式中 n' 为整数.

仍然以 10 ns 脉宽为例, 取 $n'=10$, 则差频频率为 $f_s=10$ MHz. 以该差频为最低差频, 可以选择 3 束光的移频频率为 0, 10 MHz, 30 MHz, 这三种移频频率在目前声光移频器的最大移频范围之内, 是可以实现的. 对于正弦信号, 采样频率应该高于其频率的 3 倍, 工程应用中一般选择 5~10 倍. 又因每个脉冲至少应包含一个采样数据, 所以选择采样率 f_{sp} 满足 $\frac{1}{f_{sp}} < W$, 即 $f_{sp} > 100$ MHz. 几百 MHz 的采样率对于目前的 A/D 采集卡来说是可以实现的.

2.2 一般情况

在一般情况下, 声光移频器的移频频率会随时间漂移, 激光脉宽和重复率也会变化. 首先假定只有移频频率变化. 在现有器件水平下, 声光移频器的移频稳定性 < 1 KHz/h, 还是比较容易做到的. 采用 3.1 部分中的参量: 脉宽为 10 ns, 调制信号频率为 10 MHz, 连续 10 个脉冲包含的信号可以拼接成一个完整周期的信号. 假设脉冲重复率为 10 Hz, 为了获取 10 个周期的信号, 采样持续时间为 $10 \times 10 / 10 \text{ Hz} = 10 \text{ s}$. 假设移频值随时间线性变化, 所以在采样持续时间内移频偏移 $< 10 \text{ s} \times 1 \text{ kHz} / 3600 \text{ s} = 2.8 \text{ Hz}$, 该频偏相对于 10 MHz 来说是小量. 由于周期与频率之间存在反比关系, $T = \frac{1}{f}$, 两边取微分并取绝对值得, $|dT| = \left| \frac{1}{f^2} df \right|$. 将 $df = 2.8 \text{ Hz}$, $f = 10 \text{ MHz}$ 代入上式得 $|dT| = 2.8 \times 10^{-14} \text{ s}$, 即频偏引起的调制信号周期变化为 $2.8 \times 10^{-14} \text{ s}$. 该值与调制信号周期 10^{-7} s 和脉宽 10^{-8} s 相比, 是非常小量, 完全可以忽略. 故移频频率稳定性的影响可以忽略.

然后假定只有激光脉冲重复率发生变化. 因为一般脉冲激光器采用内腔调 Q 技术, 激光脉冲的重复率等于调 Q 器件损耗变化的重复率. 对于主动调 Q (高功率激光器经常采用), 损耗变化的重复率就等于所加驱动电压重复率. 对于电信号来说, 目前时钟准确度 (脉冲序列的时间间隔) 可以优于 ps, 从而相邻驱动电压脉冲的时间间隔准确度也可以优于 ps, 并且已经有不少军用测距激光器的输出光脉冲重复率达到 $10 \sim 60 \text{ pps}^{[14]}$ (即每 ps 有 $10 \sim 60$ 个光脉冲), 这就说明相邻激光脉冲的时间间隔准确度完全可以优于 ps. $\text{ps} = 10^{-12} \text{ s}$ 的脉冲周期准确度远小于调制信号周期 10^{-7} s 和脉宽 10^{-8} s , 故脉冲重复

率稳定性的影响完全可以忽略.

最后分析激光脉宽变化的影响. 为了简单起见, 先进行定性分析. 一般脉宽变化小于 20%. 在采样率较高, 即每个脉冲对应多次采样时, 脉宽变大或变小可能造成对应采样值的增加或减少. 如果某次脉宽变大引起采样值增加, 则增加的采样值就会与下一次脉冲包含的采样值部分重复, 造成整数倍周期信号之外额外的采样值, 根据式(1)可以看到无法准确获得 $O(k)$. 但是如果增加的采样值相对较少, 解调后对 $O(k)$ 的影响也应较小, 故采用含少量重复采样值序列的解调结果作为真实 $O(k)$ 的估计值应该是可行的. 同样对于某次脉宽变小引起采样值减少, 会引起整数倍周期信号的部分采样数据丢失. 如果丢失数据相对较少, 采用丢失少量数据的序列的解调结果作为真实 $O(k)$ 的估计值也应是可行的. 为了验证该分析的正确性同时寻找不影响 $O(k)$ 估计的冗余或缺失采样值的允许范围, 在第 3 部分将利用计算机仿真开展更具体的分析.

3 计算机仿真

计算机仿真采用 128×128 分辨率的两维灰度图片作为原始目标, 如图 3 所示. 在目标散射的信号的一个周期内, 时间采样点数为 128, 采样周期数选择为 4. 为了提高运算速度, 选择重构目标的分辨率为 17×17 . 假设激光脉冲宽度为信号周期的 $1/4$, 并且信号频率 f_s 、脉冲重复率 f_r 和脉宽 W 满足 2.1 中的式(3), 则连续 4 个脉冲所包含的信号正好可以

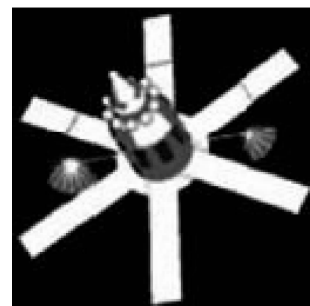


图 3 原始目标

Fig. 3 Original object

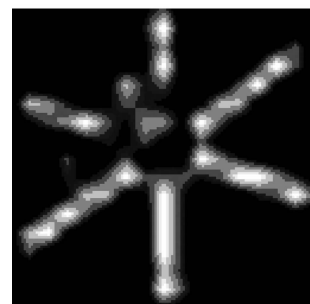


图 4 理想成像结果

Fig. 4 Ideal imaging result

拼接成一个周期. 为了提高信噪比我们选择 16 个脉冲, 拼接成 4 个周期的信号, 然后进行时间解调和图像重构. 在脉宽不变和单周期信噪比 (signal-noise ratio, snr) 为 100 情况下, 每次发射 16 个脉冲的仿真成像结果如图 4 所示.

实际激光脉宽会发生变化. 对于激光脉宽变化范围分别为 6%, 13%, 19% 和 25%, 在 snr=100 和每次发射 16 个脉冲情况下进行多脉冲拼接以及图像重构, 仿真得出重构图像与脉宽不变重构图像的相关性分别为 0.77, 0.75, 0.69, 0.54, 结果如图 5 所示.

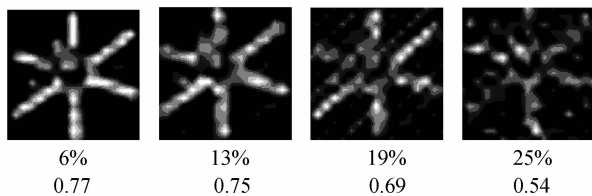


图 5 脉宽变化对应的成像结果

Fig. 5 Imaging results with changing width

通过比较不同脉宽变化对应的几幅图及其与理想重构图像的相关性, 可以看出, 当脉宽变化小于 13% 时, 与无脉宽变化重构结果很相似; 而脉宽变化大于 13% 时的重构结果开始变差, 19% 时出现背景噪音, 25% 时目标六个支臂出现不同程度的扭曲和破碎. 据此可以得出结论, 如果激光脉冲变化小于 13%, 则对重构图像质量无明显影响; 如果激光脉冲变化大于 13%, 小于 25%, 则稍微降低重构图像质量, 仍可以识别出目标轮廓.

4 结论

对于远距离傅里叶望远镜成像系统, 为了获取高峰值功率激光信号, 必将采用短脉宽技术, 从而使脉冲持续期间不能包含整数倍周期调制信号. 为了解决现有移频器移频带宽有限和时间解调程序不能部分周期工作的难题, 本文提出了多脉冲拼接技术, 利用连续多个脉冲拼接成整数倍周期信号. 比较了理想情况下与移频频率变化、脉冲重复率变化和脉宽变化下的仿真成像结果, 结果表明: 移频频率和脉冲重复率对成像无影响; 激光脉冲变化小于 13%, 对重构图像无明显影响; 脉冲变化大于 13%, 小于 25%, 稍微降低重构图像质量, 仍可以识别出目标轮廓.

参考文献

[1] GAMIZ V L, HOLEMS R B, CZYZAK S R, *et al.* GLINT: program overview and potential science objectives [C]. *Proceedings of International Society for Optics and Photonics*, 2000, **4091**: 304-315.
[2] OLSON D F, LONG S M, ULIBARRI L J. Comparison of complex exponential and least squares wavefront

reconstructors for regular square and non-square grid arrays [C]. *Proceedings of International Society for Optics and Photonics*, 2000, **4091**: 323-332.
[3] BELEN'KII M, HUGHES K, BRINKLEY T, *et al.* Residual turbulent scintillation effect and impact of turbulence on the fourier telescope system [C]. *Proceedings of International Society for Optics and Photonics*, 2004, **5160**: 56-67.
[4] CAI Jing, WANG Yan-gui, LI Quan. Analysis and simulation on interferometric synthetic aperture method [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1): 42-43.
蔡静, 王雁桂, 黎全. 相干编码成像分析及其仿真研究 [J]. *激光杂志*, 2009, **30**(1): 42-43.
[5] YE Su, LIU Yi, WU Jian. Effects of antenna array configurations on imaging quality in Fourier telescope [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 611-616.
叶溯, 刘艺, 吴健. 傅里叶望远镜中天线阵列配置对成像质量的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 611-616.
[6] DONG Lei, LIU Xin-yue, WANG Jian-li. The 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. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(6): 999-1002.
[7] ZHANG Yan, YANG Chun-ping, GUO Jing, *et al.* Spectrum extraction mode for Fourier telescope in laboratory [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 571-576.
张炎, 杨春平, 郭晶, 等. 实验室中傅里叶望远镜频谱抽取方式 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 571-576.
[8] CHEN Wei, LI Quan, WANG Yan-gui. Experimental research of fourier telescope imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0311001-1-6.
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): 0311001-1-6.
[9] LIU Xin-yue, DONG Lei, WANG Jian-li. 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.
[10] YU Qian-yang, QU Hong-song. Realization of high resolution visible earth observation on geostationary earth orbit [J]. *Chinese journal of optics and applied optics*, 2008, **1**(1): 1-12.
于前洋, 曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(上) [J]. *中国光学与应用光学*, 2008, **1**(1): 1-12.
[11] CHEN Bao-gang, DONG Lei, LIN Xu-dong. Segmented mirror of fourier telescope field experimental system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 87-91.
陈宝刚, 董磊, 林旭东. 傅里叶望远镜外场实验系统拼接主镜 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 87-91.
[12] DONG Lei, LIU Xin-yue, CHEN Bao-gang, *et al.* Field experiment and result analysis of fourier telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1317-1321.
董磊, 刘欣悦, 陈宝刚, 等. 傅里叶望远镜外场实验与结果分析 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1317-1321.
[13] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, *et al.* Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1996, **13**(2): 351-364.
[14] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed. Beijing: Springer, 2005.
[15] OPPENHEIM A V, WILLISKY A S, NAWAB S H. Signals and systems [M]. 2nd ed. Beijing: Prentice hall, 1998.