

多光束傅里叶望远镜的移频设计

孔新新^{1,2} 黄旻¹ 张文喜¹ 伍洲¹ 李杨^{1,2} 周志盛^{1,2}

(¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094)
(² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 多光束傅里叶望远镜(MFT)对运动的深空暗目标快速成像有着独特的优势,但光学、电学、机械、软件等未突破的关键技术制约着其发展。根据傅里叶望远镜的成像原理和戈洛姆法则(Golomb ruler),分析选取了多光束成像下每束光的移频量,并设计了符合系统要求的声光移频器。结果表明,采用 Golomb ruler时,31束光系统下的最大相对移频量为7.47 MHz,设计的声光移频器通光孔径为8 mm,全频带下最低衍射效率为0.9021,各指标都能满足系统需求。因此,多光束傅里叶望远镜的移频技术可行。

关键词 成像系统;傅里叶望远镜;Golomb ruler;声光移频器

中图分类号 TH743 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.011102

Design of Laser Frequency Shift of Multiple-Beam Fourier Telescope

Kong Xinxin^{1,2} Huang Min¹ Zhang Wenxi¹ Wu Zhou¹

Li Yang^{1,2} Zhou Zhisheng^{1,2}

(¹ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)
(² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Multiple-beam Fourier telescope (MFT) has a unique advantage for high-speed imaging of moving object which is small and dim in deep space, but the key technology on optics, electricity, machinery and software limite the development of MFT. The frequency shift of every laser is analysed according to the principle of MFT and Golomb ruler, and a suitable acousto-optical device has been designed. As a result, with the help of Golomb ruler, the maximum of relative frequency shift is 7.47 MHz, under 31 lasers, the aperture of device is 8 mm, and the minimum of diffraction efficiency is 0.9021, the requirement of MTF can be satisfied with all these index. Therefore, the frequency shift technology of MTF is possible.

Key words imaging systems; Fourier telescope; Golomb ruler; acousto-optical device

OCIS codes 110.1650; 110.1758; 110.3175

1 引言

傅里叶望远镜采用光学干涉成像技术,20世纪70年代Aleksoff^[1]提出了利用激光干涉条纹对目标进行高分辨率成像的概念,1996年Holmes等^[2]在图像重构算法以及强大湍流的影响等方面做了大量深入研究,MacDonald等^[3]于1999年最早进行了室内原理验证的实验研究,在之后的短短3,4年里,傅里叶望远镜从理论走向了实际系统的开发和应用^[4]。

由于系统是多光束、针对远距离探测,所以其激光的特点是能量高、两两移频量差值不同、移频量小。为了得到目标全部的空间频谱,要在多组干涉条纹中提取出每两束光的干涉信息,所以要求两两激光的移频量差值不同。本文分析了系统采用31束激光的情况,如果采用简单的单向归纳法,第31束激光的移频量将达

收稿日期: 2012-07-01; 收到修改稿日期: 2012-08-01; 网络出版日期: 2012-10-24

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目资助课题。

作者简介: 孔新新(1988—),男,硕士研究生,主要从事计算光学方面的研究。E-mail: xxkong@aoe.ac.cn

导师简介: 黄旻(1976—),男,博士,研究员,主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: huangmin@aoe.ac.cn

到吉赫兹以上,声光移频器难以做到如此高的移频量和如此宽的移频带宽,同时激光的相干性也难以保证,为此,借助于戈洛姆法则(Golomb ruler)^[5],将移频量降到百赫兹量级,既满足了移频的要求,也大大降低了移频器的设计难度。由于系统是对远距离成像,大功率下有效光束直径达 5 mm 以上,现有的声光移频器最大口径为 3 mm,会降低激光的能量和质量;大口径的声光偏转器可满足口径要求,但其原理使用反常布拉格衍射,配合现有的驱动电路难以保证其移频稳定性和衍射角度稳定性,为此设计了新型符合系统要求的声光移频器和驱动电路。

2 激光移频在傅里叶望远镜中的作用

多光束傅里叶望远镜(MFT)的原理是多束通过频率调制的激光同时照射到目标上,形成移动的干涉条纹并扫描目标,经探测器接收目标调制的反射回波,回波中包含着目标强度分布函数的频谱信息,经相位闭合算法消除大气湍流等引起的相位误差,解调出各频域下的频谱值,然后通过傅里叶逆变换重建目标图像^[2]。多光束傅里叶望远镜系统如图 1 所示。

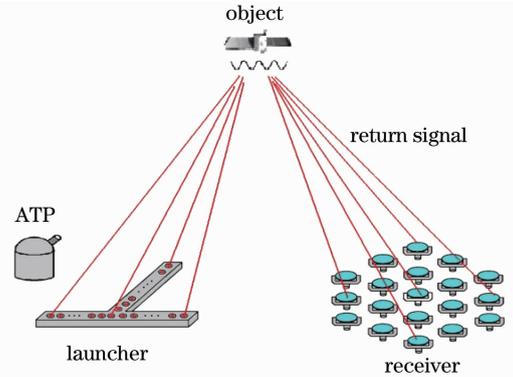


图 1 多光束傅里叶望远镜系统原理示意图

Fig. 1 Schematic of multiple Fourier telescope principle

多束激光同时照射目标,采集到的信号为^[2]

$$S(\vec{k}_m, t) = c \int_t^{t+T} d\tau \int O(\vec{R}) \times \left| \sum_{m=1}^{31} E_m \exp[i\omega_m \tau + i\vec{k}_m \vec{R} + \phi(\vec{k}_m)] \right|^2 dx dy = cO(0) + \sum_{\substack{m,n=1,2,\dots,31 \\ m < n}} O(\vec{k}_{mn}) \exp\left[-i\omega_{mn} \left(t + \frac{T}{2}\right) + i\phi(\vec{k}_{mn})\right] + c.c., \quad (1)$$

式中 \vec{k}_m 为空间频率, t 为探测器采样时刻, T 为探测器积分时间, c 为比例常数, E_m 为入射激光的振幅, $O(\vec{R})$ 为目标的强度分布, $\phi(\vec{k}_m)$ 为干涉光随机相位, $O(\vec{k}_{mn})$ 为目标频谱, $c.c.$ 为对应频谱的共轭。信号中包含了多组干涉条纹,分别为 $\omega = \omega_a - \omega_b$, a, b 为两个不同的发射口径,当满足 $N\omega T = 2n\pi$ 时,可通过公式^[2]

$$M(\vec{k}) = \sum_{j=0}^{N-1} S[\vec{k}, t + (j - 1/2)T] \exp(ij\omega T) \quad (2)$$

解调出各个空间频率的值。式中 \vec{k} 为空间频率, j 为采集次数。由于要同时得到多个空间频率分量,因此要对应地安排多个差频值 ω_m , 且满足两两光束的频差 ω_m 不同,利用相位闭合,消除相位的扰动误差,得到目标的真实相位,经过傅里叶逆变换,反演出目标图像。

3 移频量的选取

针对 31 束激光移频,移频量越小,越能降低对移频器的带宽要求,带来更高的衍射效率和更小的设计难度,同时也降低了对激光器能量的要求,但移频量太小会给移频器驱动电路设计带来复杂性,因此要兼顾光学和电学两个指标。为了保证提取出多个空间频率,必须要求两两光束的差频不同,满足这个要求的移频量可以通过单项归纳法和 Golomb ruler 推算,其对应的相对移频量如表 1 所示。

表 1 单项归纳法和 Golomb ruler 下的相对移频量的比较

Table 1 Comparison of relative frequency shift of laser by single induction or Golomb ruler

Laser number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Single induction /Hz	0	1	3	7	15	31	63	127	$2^8 - 1$
Golomb ruler /Hz	0	1	5	12	25	27	35	41	44

依表 1 类推,如果采用单项归纳法第 31 束激光的相对移频量将达到 $2^{30} - 1 \approx 1.07 \times 10^9$ Hz,而采用 Golomb ruler 第 31 束光相对移频量为 747 Hz,因此采用 Golomb ruler 能更好的满足要求,该法则下每束光的相对移频量如表 2 所示。

由于驱动电路的限制,频差不能取很小,将表 2 的相对移频量乘以 10 k,设计的移频器中心频率为 80 MHz,由于设计的移频器的衍射效率随驱动频率曲线如图 2 所示,当驱动频率大于中心频率时衍射效率下降较快,因此将全带宽分布在中心频率的两端,且整体向低频漂移,第一束激光设计实际移频量为 75.00 MHz,则第 31 束激光实际移频量为 82.47 MHz,这样能照顾到全带宽下的衍射效率,每束光的实际移频量如表 3 所示。

表 2 Golomb ruler 下每束光的相对移频量

Table 2 Relative frequency shift of laser in Golomb ruler

Laser number	Frequency /Hz
1	0
2	17
3	22
4	46
5	72
6	78
7	146
8	176
9	186
10	187
11	245
12	273
13	281
14	288
15	308
16	361
17	365
18	384
19	398
20	436
21	521
22	542
23	555
24	586
25	602
26	604
27	668
28	693
29	735
30	738
31	747

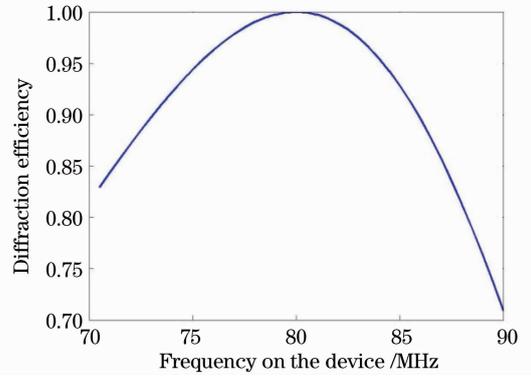


图 2 衍射效率随驱动频率变化曲线

Fig. 2 Diffraction efficiency versus driving frequency

表 3 Golomb ruler 下每束光的实际移频量

Table 3 Frequency shift of laser in Golomb ruler

Laser number	Frequency /MHz
1	75.00
2	75.17
3	75.22
4	75.46
5	75.72
6	75.78
7	76.46
8	76.76
9	76.86
10	76.87
11	77.45
12	77.73
13	77.81
14	77.88
15	78.08
16	78.61
17	78.65
18	78.84
19	78.98
20	79.36
21	80.21
22	80.42
23	80.55
24	80.86
25	81.02
26	81.04
27	81.68
28	81.93
29	82.35
30	82.38
31	82.47

4 声光移频器设计

声光移频器是通过改变驱动频率而达到改变激光光束频率值的器件。利用能量守恒和动量守恒,可以得到入射光和衍射光频率和波矢量之间的关系,即^[6]

$$\begin{aligned}\omega_i \pm \omega_s &= \omega_d \\ \mathbf{k}_i \pm \mathbf{k}_s &= \mathbf{k}_d,\end{aligned}\quad (3)$$

式中 ω_d 和 \mathbf{k}_d 为布拉格衍射一级衍射光的圆频率和波矢量, ω_i 和 \mathbf{k}_i 为入射光的圆频率和波矢量, ω_s 和 \mathbf{k}_s 为声光介质中声波的圆频率和波矢量, $\mathbf{k}_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$, $\mathbf{k}_s = \frac{2\pi}{\lambda_s} = \frac{2\pi f_s}{v_s}$ 。

所谓移频频率,即衍射光的频率与入射光的频率相比移动的频率,入射光和衍射光的波矢方向由动量守恒确定,如图 3 所示。通过控制超声波频率就可达到控制衍射光频率的器件,称为声光移频器。

只有入射光以特定角度入射时,才能满足动量匹配的条件,这时,极化波在介质内各处所激发的 m 级衍射光才是同相叠加的;而当入射光沿任意角度入射时,动量失配时不能满足同相条件,此时不能有效地激发出衍射光。根据耦合波方程得^[7]

$$\sin \theta = \frac{\mathbf{k}_s}{2\mathbf{k}_i} = \frac{\lambda_s}{2\lambda_i}, \quad (4)$$

式中 θ 为特定入射角,即布拉格角,对于正常声光互作用,当入射光以布拉格角 θ 入射时,0 级光和 1 级光动量匹配,所以衍射光中 0 级和 1 级光由于同相叠加而光强较大,其他各级光不满足动量匹配条件而光强较小,即以布拉格角入射时,出射光主要为 0 级光和 1 级光^[6]。

4.1 器件的基本要求

系统采用 1064 nm 激光,激光光束直径为 5 mm,为避免激光经过移频器影响光束质量,声光移频器的晶体大小要超过光束直径。

表 4 主要声光材料的性质

Table 4 Qualities of major acausto-optical medium

Medium	Density / (kg/m)	Velocity / (km/s)	Index (1064 nm)	Quality factor
Fused silica	2.20	5.950	1.46	0.006
Dense flint glass	6.30	3.100	1.92	0.120
LiNbO ₃	4.70	7.400	2.25	0.012
TeO ₂	5.99	4.203	2.21	0.212
PbMoO ₄	6.95	3.750	2.29	0.220

由表 4 所列的主要声光材料的质量因子可知,钼酸铅(PbMoO₄)和二氧化碲(TeO₂)是性能非常好的声光介质,已被广泛采用,由于正常声光作用下钼酸铅比二氧化碲的品质因数较高,因此晶体采用钼酸铅晶体。换能器采用常用的铌酸锂(LN)晶体,为保证 31 束激光的正常移频,由表 3 知器件要有 10 MHz 的带宽,为满足带宽基频比小于 1/2,结合换能器的设计难度和衍射效率的影响,基频定于 80 MHz,也是常见的器件选取指标,能够做到在较高的衍射效率下满足换能器的带宽要求。

4.2 换能器设计

压电换能器是声光移频器的重要组成部分,其作用是将电功率转变成声功率,从而在声光介质中建立起超声场。一般都是利用某些压电晶体的反压电效应,在外加电场作用下产生机械振动而形成超声波。所以它是起着将调制信号转变成声信号的作用。换能器长 L 宽 H 厚 D 。压电换能器制作工艺主要包括把压电换能器和声光互作用介质粘合在一起的键合工艺和压电换能器键合后的减薄工艺,这些工艺是制作体波声光器件的关键工艺,也是很成熟的基本工艺。

4.2.1 换能器长度的设计

换能器的长度要保证进入布拉格区条件、衍射效率和倍频程带宽条件。进入布拉格区即要求器件在低

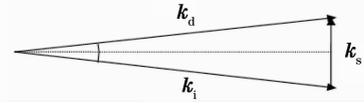


图 3 正常布拉格衍射的动量守恒

Fig. 3 Conservation of momentum of normal Bragg diffraction

频段能进入布拉格区,从而在整个频段内都能进入布拉格区即^[7]

$$L > 2L_0^{\perp}, \quad (5)$$

式中 $L_0^{\perp} = \frac{n\Delta L}{\lambda}$ 为低端特征长度, ΔL 为低端超声波长。

同时考虑到衍射效率,由衍射效率公式 $\eta = \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 LP_a}{2H}}\right)$ 知, L 要照顾宽度 H , 满足衍射效率越高越好。但考虑到带宽, L 应越短越好, 为使 3 dB 带宽大于 $\Delta F = \frac{f_H - f_L}{f_c}$, f_H 、 f_L 、 f_c 分别为设计带宽中的高端频率、低端频率和基频。文献[8]中考虑到带宽, 将 L 上限推导为

$$L < \frac{1.8L_0^{\perp}}{\Delta F[1 - (\Delta F/2)^2]}, \quad (6)$$

则计算出长度的区间为 12.0~33.6 mm, 具体的值还要结合换能器的宽度确定, 将在宽度设计一节给出。

4.2.2 换能器厚度的设计

换能器的厚度是由本征工作频率决定的, 为了使压电换能器内各点的超声振动传到端面时合振动最大, 从而耦合到声光晶体内的超声能量最大, 应要求压电换能器厚度 D 等于片内超声波的半波长^[9]:

$$D = \frac{v}{2\alpha f_c}, \quad (7)$$

式中 v 为压电换能器晶片中的声速, α 为频率比参数。根据换能器损耗和相对频率关系, 损耗较低且满足带宽的条件下一般选取 $\alpha = 1.2$, 这样计算出来的换能器厚度为 3.8×10^{-5} m。目前市场上已有基频 80 MHz 的移频器, 其换能器的厚度也是上述计算出的值, 不同的层厚度根据声匹配和键合工艺选择, 比较成功的键合工艺是钢冷焊、超声焊工艺和离子射频溅射等, 可以加工减薄到微米量级, 而且满足高频声光器件的机械强度。

4.2.3 换能器宽度的设计

换能器是利用晶体的压电效应, 使电信号转变成机械振动, 从而产生超声波进入晶体。为了使电信号和声光移频器匹配, 按照电学常规, 器件的输入阻抗 R_s 应为 50 Ω 的纯阻抗, 即从外面看来, 换能器应为 50 Ω 的纯电阻。为了使其达到 50 Ω , 在换能器的长度和厚度已经确定的情况下, 只有通过改变宽度的方法来调整其阻值。换能器的宽度由阻抗匹配条件决定, 即令换能器在本征工作频率处的阻抗等于驱动电源的输入阻抗。换能器为容性器件, 电容值为 $C = \frac{\epsilon S}{D}$ 。式中 ϵ 为介电常数, S 为换能器面积(换能器薄片上镀电极的面积)。其容抗通过电路上的匹配可以去掉, 则其电阻为^[8]

$$R_s = \frac{1}{2\pi\alpha f_c C} = \frac{D}{2\pi\alpha f_c \epsilon H' L}, \quad (8)$$

则宽度为

$$H' = \frac{D}{2\pi\alpha f_c \epsilon \epsilon_0 L R_s}, \quad (9)$$

式中 ϵ_0 为真空介电系数, ϵ 为压电晶片的相对介电系数。由(9)式计算出来的宽度为 $H' = 0.1757$ mm, 电极宽度太小, 工艺上制作比较困难, 解决的办法是将换能器分片串联, 即将压电晶片沿长度方向上切成若干片, 电路连接采用串联方式。经计算可将换能器分成四片串联, 在总长度保持不变的前提下, 电容将减小到单片时的 1/16, 容抗将扩大到单片的 16 倍, 为了保证容抗不变, 将换能片的宽度扩大到单片时的 16 倍, 则每段宽度 $H = 2.811$ mm, 此时分段数已经考虑衍射效率, 结合长度选取的, 这样的宽度是适于制作和应用的。结合换能器的宽度 H , 由布拉格衍射效率的公式 $\eta = \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 LP_a}{2H}}\right)$ 中的长度宽度关系, 调整长度使衍射效率取最大, 选取的换能器长度 $L = 21$ mm。

4.3 晶体尺寸的设计

在选择工作带宽时, 介质对超声的吸收是必须考虑的一个问题。介质材料的性能对声光移频器的质量有直接的影响, 因此合理选择声光材料是很重要的。设计时主要考虑两方面因素: 1) 应使声光移频器的调制

效率高,而需要的声功率尽量小。2)应使声光移频器有较大的调制带宽。在声光介质设计时,声光介质的宽度不能太大,太大时超声吸收将会非常严重,最高工作频率将降低,其他指标略大于换能器尺寸即可。但又要保证晶体的孔径大于激光直径,根据换能器的尺寸结合激光的直径,晶体的尺寸设计为 $22\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,这样的晶体目前可以高质量地生长出来。

4.4 器件性能

在以上的设计参数下,考虑到实际制作,引入 10% 的加工误差后得到的无频率失配下的衍射效率为

$$\eta' = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 L' P'_a}{2H}} \right) t = 0.9560, \quad (10)$$

式中 M_2 为声光优值, P'_a 为驱动器的驱动功率, t 为晶体透射率。

在使用同一款移频器时,第 1 束和第 31 束的失配转化效率分别为

$$\eta_1 = \text{sinc}^2 \left[-\frac{\pi L F (F - 1)}{2L_0^c} \right] \eta' = 0.9021, \quad (11)$$

$$\eta_{31} = \text{sinc}^2 \left[-\frac{\pi L F' (F' - 1)}{2L_0^c} \right] \eta' = 0.9398, \quad (12)$$

式中 $F = f/f_c$ 为超声相对频率, $L_0^c = \frac{n\Delta_c^2}{\lambda}$ 为特征长度, Δ_c 为中心超声波长。由图 2 知,中间光束的衍射效率将大于边界光束的衍射效率,因此全频带都能满足衍射效率的要求,设计的器件制作可行,通光孔径、衍射效率和带宽满足系统要求^[10,11]。

5 结 论

由于多光束傅里叶望远镜有成像速度快、可对远距离运动目标高分辨率成像等优点,国内外研究机构已将三光束成像的实验阶段转移到多光束成像的原理分析上来,多光束傅里叶望远镜还有着多项关键技术有待攻克,包括光学、机械、电学、软件等分系统的关键技术^[12]。分析了光学分系统中发射部件的激光移频技术,根据声光移频器的性质确定了多束光的移频量,并设计了符合带宽和衍射效率的声光移频器,全带宽下最低衍射效率为 0.9021,通光孔径大于激光直径,分析设计对多光束傅里叶望远镜理论的实验验证提供了部分依据。

参 考 文 献

- 1 C. Aleksoff. Synthetic interferometric imaging technique for moving objects[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(8): 1923~1929
- 2 R. B. 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
- 3 K. MacDonald, J. Boger, M. Fetrow *et al.*. An experimental demonstration of Fourier Telescope[C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 23~29
- 4 R. Holmes, T. Brinkley. Reconstruction of images of deep space objects using Fourier telescope[C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 0277-786X/99
- 5 Conpp program. The best Golomb rulers [OL]. IBM, 2012, <http://www.research.ibm.com/people/s/shearer/grpp.html>
- 6 Xu Jieping. The Principle, Design and Application of Acousto-Optic Device[M]. Beijing: Science Press, 1982
徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982
- 7 A. Sliwinski. Acousto-optics and its perspectives in research and applications [J]. *Ultrasonics*, 1990, **28**(4): 195~213
- 8 Yu Kuanxin, Ding Xiaohong, Pang Zhaoguang. The Principle of Acousto-Optic Device[M]. Beijing: Science Press, 2011
俞宽新, 丁晓红, 庞兆广. 声光原理与声光器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011
- 9 Xie Benliang, Rao Minru. Transducer of Hg_2I_2 acousto-optic devices and the determination of the bandwidth and layers' thickness[J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2003, **30**(12): 1979~1982
谢本亮, 饶敏如. Hg_2I_2 声光器件换能器带宽及镀层厚度的确定[J]. 上海交通大学学报, 2003, **30**(12): 1979~1982
- 10 Li Yinzhu, Li Zuo, Yang Rui. Development of the multichannel acousto-optic modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9): 809~813
李银柱, 李 卓, 杨 睿. 多通道声光调制器的研制[J]. 中国激光, 2000, **A27**(9): 809~813

- 11 Liu Hong, Zhu Yifeng, Wang Lipeng. Research of high efficiency acousto-optical modulator[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2004, **27**(4): 70~71
刘 红, 朱一峰, 王莉鹏. 高效声光调制器研究[J]. 长春理工大学学报, 2004, **27**(4): 70~71
- 12 Dong Lei, Wang Bin, Liu Xinyue. Introduction to key techniques of multiple beam Fourier telescope[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(5): 440~445
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