

光学相干层析成像系统中双通快速扫描光学延迟线的数值分析*

黄丽娜 俞晓峰 丁志华

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室,杭州 310027)

摘 要 以 matlab 为工具,详尽分析双通快速扫描光学延迟线在最佳耦合条件下的光束传输与分布,为双通快速扫描光学延迟线的设计、元件选择和系统调整提供理论依据. 得出离焦距离 $\Delta f=1 \mu\text{m}$ 和 $\Delta f=578 \mu\text{m}$ 两个理论上的最佳耦合点. 但就实际光路调试来看,离焦距离 $\Delta f=1 \mu\text{m}$ 为此系统的最佳耦合点.

关键词 生物医学成像;光学相干层析成像;快速扫描光学延迟线;最佳耦合

中图分类号 Q631 **文献标识码** A

0 引言

成像速度是光学相干层析成像(OCT)技术发展的重要指标. 在典型的 OCT 系统中,图像是由不同横向位置处的序列轴向反射(或散射)信号构筑而成的,所采用的轴向扫描方式在很大程度上决定了 OCT 系统的成像速度. 用旋转的立方体可以达到 384 Hz 的扫描速率,但占空比太低,而且扫描过程和时间不呈线性关系^[1,2]. 压电控制光纤伸缩可以达到 600 Hz 的频率,但是它受到静态和动态双折射效应的影响,温度稳定性也不佳,需要另外的器件去补偿^[3]. MIT 研究小组首先提出并采用的双通快速扫描光学延迟线(Double pass Rapid Scanning Optical Delay Line,RSOD),能达到 1K 的轴向扫描速率,实现了对活体组织进行实时结构成像的目的. 基于 RSOD 的扫描方法,相对于其他扫描技术而言,不仅扫描速度快,而且能够独立控制扫描的群速度和相速度,并具备调节色散的优点,因而被广泛采用.

双通快速扫描光学延迟线的光耦合效率和光束分布情况将直接影响 OCT 系统的性能. 鉴于此,本文将讨论双通快速扫描光学延迟线的最佳耦合条件,详细分析最佳耦合条件下的光束传输与分布情况,为双通快速扫描光学延迟线的设计、元件选择和系统调整提供理论依据.

1 双通快速扫描光学延迟线的数值分析

双通快速扫描光学延迟线的光学原理如图1^[4]. 从光纤里出来的光束经准直镜准直后,入射到衍射光栅上,被光栅衍射再经傅里叶变换透镜会聚后,不同频率成分的光呈直线聚焦在振镜上,被振镜反射,再经傅里叶变换透镜又重新打在衍射光栅上,被光栅衍射后回复到一束的状态打在反射镜上,最后被反射镜反射,原路返回光纤. 因为这一过程光束往返两次,所以称为双通快速扫描光学延迟线.

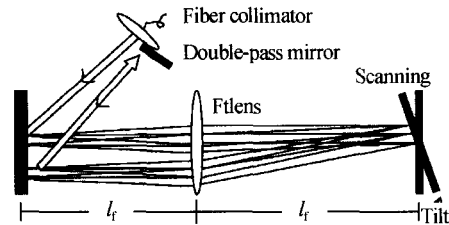


图 1 双光程快速扫描光学延迟线

Fig. 1 Double pass rapid scanning optical delay line

为便于分析,将双通快速扫描光学延迟线的光路加以展开,如图 2. f_0 表示准直镜的焦距, d 表示准直镜到傅里叶变换透镜的距离, f 表示傅里叶变换透镜的焦距, d_{mirror} 表示傅里叶变换透镜到反射镜

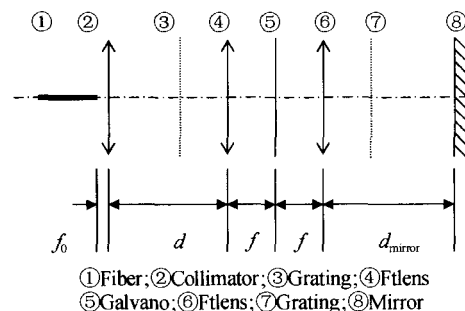


图 2 RSOD 展开图

Fig. 2 The unfolded optical system of RSOD

*国家自然科学基金(60378041)、浙江省自然科学基金(Z603003)、博士点基金(20030335099)、霍英东青年教师基金(91010)、光子技术福建省重点实验室开放课题(FP0404)和浙江大学 211 学科建设项目

Tel: 0571-87951194 Email: huanglina@126.com

收稿日期: 2004-09-06

的距离. 其中,衍射光栅位于傅里叶变换透镜的焦点处.

假定从光纤末端出射的光束为高斯光束,所有的成像透镜为薄透镜,并忽略象差和对光束的截断效应. 做如下约定:出发光束束腰半径 ω_0 , 中心波长 λ_0 , 离焦距离 Δf_0 , 即光纤末端到准直镜焦点的距离, 返回到光纤的光束的束腰位置离准直镜的距离为 L .

当从光纤末端出发的光束束腰位置和回到光纤末端光束的束腰位置一致时,即

$$f_0 + \Delta f - L = 0 \tag{1}$$

得到 $\Delta f = 1 \mu\text{m}$ 或者 $\Delta f = 578 \mu\text{m}$, 将得到图 3 所示情况. 图中圆圈所在位置为根据式(1)得出的最佳耦合点.

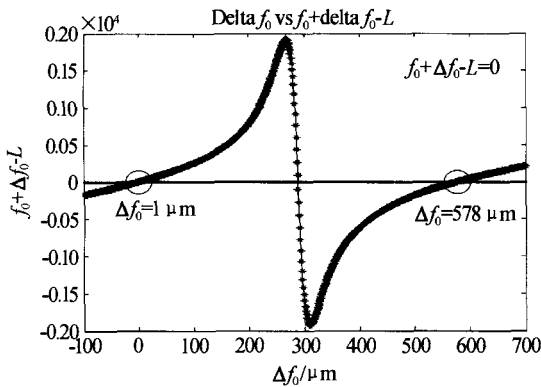


图 3 离焦距离 vs 束腰距离差

Fig. 3 Δf_0 vs $f_0 + \Delta f_0 - L$

当从光纤末端出发的光束束腰半径和回到光纤末端光束的束腰半径相等时,即

$$\text{waist}(i)/\omega_0 = 1 \tag{2}$$

得到 $\Delta f = 1 \mu\text{m}$ 或者 $\Delta f = 578 \mu\text{m}$. 并得到图 4 所示情况. 图中圆圈所在位置为根据式(2)得出的最佳耦合点.

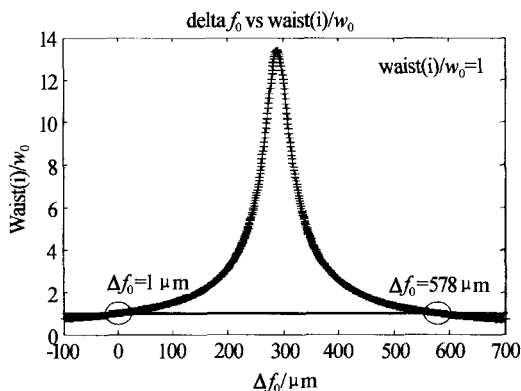


图 4 束腰半径比 vs 离焦距离

Fig. 2 $\text{Waist}(i)/\omega_0$ vs Δf_0

看到,在束腰半径耦合和束腰距离耦合两种情况下得到的离焦距离是相等的,但这并不是巧合.

知道,瑞利距离 $z_0 = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$, 所以在同一光路中,在特

定的中心波长下,相同的高斯光束的束腰半径对应相同的瑞利距离点,因此,在我们的光路中,束腰半径耦合了,束腰距离也就耦合了. 所以说,两个耦合条件其实是等价的,只要满足一个就可以了.

2 结果分析

当 $\Delta f = 1 \mu\text{m}$, 光束近似从光纤焦点出发, RSOD 中高斯光束束腰边界分布如图 5.

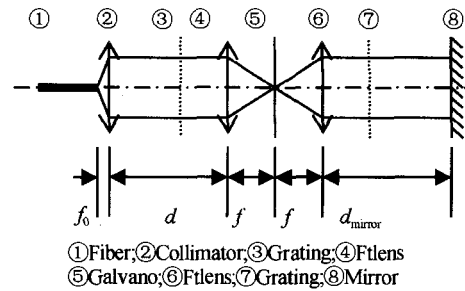


图 5 RSOD 中高斯光束分布图

Fig. 5 The distribution of gaussian beam in RSOD

看到,光束在透镜与透镜、透镜与反射镜之间是均匀分布的,而在其他光学元件上都是会聚的,就是说光斑半径不是最大就是最小,这将给实际调试工作带来不少方便.

当 $\Delta f = 578 \mu\text{m}$, 经精确结算,RSOD 中高斯光束束腰边界分布如图 6.

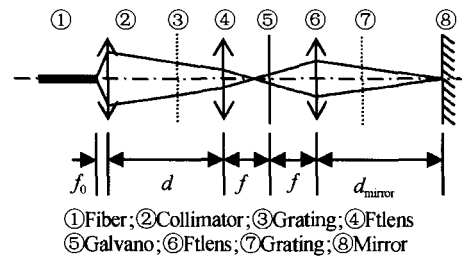


图 6 RSOD 中高斯光束分布图

Fig. 6 The distribution of gaussian beam in RSOD

比较图 6,可以看到在整个 RSOD 中,光束都不是均匀的,而且傅里叶变换透镜和扫描振镜的光斑介于最大最小之间,这至少将给调试工作带来难度,并且还会引入其他不希望的因素,降低系统性能.

从理论上来说,上述两种情况都满足了最佳耦合条件,但是在实际操作中,还要考虑当各个光学元件不处于理想状态以及衍射效率、调节难度等复杂情况,需要根据实际出现的问题,做一些适当的调节. 对比两者,可以发现后一种情况的光路不容易调试,而且在整个 RSOD 中由于抑制色散等其他原因,需要调节傅里叶变换透镜和光栅之间的距离,这样就会打乱整个光路,整个调试工作将会很复杂,但前一种情况就不会产生这一问题. 故而在实际情况中多采用准直的高斯光束.

3 结论

综上所述,通过对光学相干层析系统中快速扫描光学延迟线的数值分析,得到的主要结论如下:1)当光纤末端到准直镜焦点距离 $\Delta f=1 \mu\text{m}$ 或者 $\Delta f=578 \mu\text{m}$,达到最佳耦合状态,即耦合效率最高;2)在实际操作中,又以 $\Delta f=1 \mu\text{m}$ 时的光束分布为最佳.

参考文献

- 1 Su C B. Achieving variation of the optical path length by a few millimeters at millisecond rates for imaging of turbid media and optical interferometry; a new technique. *Opt Lett*, 1997, **22**(10): 665~667
- 2 Ballif J, Gianotti R, Chavanne P, et al. Rapid and scalable scans at 21 m/s in optical low-coherence reflectometry. *Opt Lett*, 1997, **22**(11): 757~759
- 3 Tearney G J, Bouma B E, Boppart S A, et al. Rapid acquisition of in vivo biological images by use of optical coherence tomography. *Opt Lett*, 1996, **21**(17): 1408~1410
- 4 Rollins A M, Kulkarni M D, Siavash Yazdanfar, et al. In vivo video rate optical coherence tomography. *Opt Lett*, 1998, **3**(6): 219~229

Numerical Analysis of Double Pass Rapid Scanning Optical Delay Line in Optical Coherence Tomography

Huang Li'na, Yu Xiaofeng, Ding Zhihua

State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2004-09-06

Abstract Double pass Rapid Scanning Optical Delay Line (RSOD), as an axial scanning method widely which is used in Optical Coherence Tomography (OCT), is one of key technologies in developing OCT. This thesis was deeply analyzed beam transmission and beam distribution in RSOD under the condition of coupling optimization using matlab, thus increased theoretic arguments for RSOD design, elements choice and system adjustment. The two defocus distances $\Delta f=1 \mu\text{m}$ and $\Delta f=578 \mu\text{m}$ were got as theoretic coupling optimization, but concerning the practical adjustment, the defocus distance $\Delta f=1 \mu\text{m}$ was better. So $\Delta f=1 \mu\text{m}$ was the coupling optimization of RSOD.

Keywords Biomedical imaging; Optical Coherence Tomography (OCT); Rapid Scanning Optical Delay Line (RSOD); Coupling optimization



Huang Li'na was born in 1981, is a postgraduate student in the Department of Optical Engineering, Zhejiang University. She received her B. S. degree in 2003 from the Department of Optical Engineering, Zhejiang University and entered State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University in Sep. , 2003 under the supervisor of Prof. Ding zhihua, dedicating herself to the construction of Optical Coherence Tomography system. From Oct. , 2004, she studied in haute ecole valaisanne, Sion, Switzerland as an exchange student for one year. Her supervisor is Prof. Martial Geiser, and mainly works on the development of a multiwavelength optical coherence tomography system for measuring the partial oxygen blood pressure in the human retina.