

高精度法布里珀罗腔谐振频率漂移跟踪系统关键 器件参数模拟研究^{*}

刘桐君^{1,2,3} 叶慧琪^{1,2} 唐 靛^{1,2} 肖 东^{1,2†}

(1 中国科学院南京天文光学技术研究所 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室 南京 210042)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 近年来, 宽带法布里珀罗(Fabry Perot, FP)腔广泛应用于高精度天文光谱定标中, 使用FP腔实现优于1 m/s的光谱长期定标精度需要实现好于 10^{-9} (即<MHz)的稳定性. 然而镀膜老化、间隔材料相变和环境长期的变化等因素都会造成FP谱线的缓慢漂移, 影响光谱定标的长期重复精度. 为改善其长期定标精度, 设计了一套以铷吸收池作为绝对频率基准的激光扫描高精度跟踪系统, 利用小自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)的辅助FP腔配合铷吸收谱线对激光扫描频率进行精确标定. 为了确定辅助FP腔的参数, 模拟了两种材质、不同FSR的扫描频率标定FP腔在不同探测条件下(温度变化和噪声大小)频率标定效果. 结果表明: 在不考虑环境及探测因素的情况下, FSR 70 MHz及以下可以实现MHz频率精度的标定; 同时, FSR越小, 其对温度变化及探测噪声越敏感. 综合考虑模拟结果和制备难度, 最佳的扫描频率标定FP腔为自由光谱范围30–70 MHz的空心光纤FP腔.

关键词 仪器: 法布里珀罗腔, 仪器: 铷吸收池, 仪器: 外腔半导体激光器, 技术: 视向速度

中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

法布里珀罗(Fabry Perot, FP)腔是一种由两个反射面组成的光学谐振腔, 其对透过光的波长具有选择特性, 能够作为光谱滤波器件. 因此FP腔被广泛应用于频率滤波^[1–2]、传感^[3–4]、位移测量^[5]、波长定标^[6–8]等领域. FP腔的谐振频率取决于腔体折射率及长度, 当腔体材料的物理参数受环境温度及气压变化影响时, 谐振频率也会发生漂移. 传感应用正是基于谐振频率漂移来测量目标参数的变化, 而对于其他应用如波长定标来说,

谐振频率的漂移会导致定标精度降低. 视向速度法是一种通过测量行星围绕恒星运行导致恒星光谱发生多普勒频移来探测系外行星的方法, 在探测宜居行星时需要高精度的波长定标, 如探测围绕类太阳恒星运行的类地行星需要视向速度测量精度达到9 cm/s并保持一年. 高精度波长定标方法^[9]主要有使用天文光梳、连续光源配合FP腔、空心阴极灯等方法. 使用连续光源配合FP腔可以在频率域上产生一系列近似等间距分布的密集透射峰. 利用该方法进行定标具有系统简单、短时

2024-09-26收到原稿, 2025-02-18收到修改稿

^{*}国家自然科学基金项目(12273082、12293054), 中国科学院科研仪器设备研制项目(ZDKYYQ20220009), 中国科学院青年创新促进会项目(2023068)资助

[†] dxiao@niaot.ac.cn

间内定标精度比钡-氙灯高的优点,但由于FP腔易受环境影响发生谐振频率漂移,如具有良好温度及气压控制的空气间隙FP腔每日漂移在10 cm/s以上(对应频率百kHz)^[10],这会导致其长期定标精度下降.高精度(MHz)的跟踪FP腔的谐振频率漂移有助于提高长期定标精度,因此如何高精度地跟踪FP腔体谐振频率的漂移是一个重要的问题.使用外腔激光器扫描FP腔进行谐振频率跟踪是一种较为直接的方式.

外腔可调谐激光器是一类波长可调谐激光器,这种激光器利用衍射光栅和激光腔镜组成外谐振腔,并通过压电陶瓷调整衍射光栅的角度实现输出波长的调谐,具有输出功率高、窄线宽和可调谐范围宽的优点.这使得通过外腔激光器频率扫描获得高分辨率的FP腔透过光谱具备可能性.但外腔激光器面临着扫描频率随压电陶瓷驱动电压非线性变化的问题^[11],这主要是压电陶瓷磁滞和蠕变导致的.如果直接按照激光扫描频率随扫描时间为线性关系(驱动电压和扫描时间一般是线性关系)进行探测会存在误差,因此需要借助其他方法高精度地获得频率随扫描时间的变化关系.目前主要的方法是通过参考另外的频率标尺来获得扫描中各时刻的激光频率.比如有通过扫描几MHz到百MHz的小自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)的马赫曾德干涉仪^[12]、FP腔^[13]、光纤环形腔^[14]等干涉仪或谐振腔,利用干涉峰值标定频率随时间变化关系;也有通过与高精度光梳进行拍频^[15],利用光梳的各梳齿来标定扫描频率.这些方法中,FP腔或环形腔这类的谐振腔与光梳系统相比系统复杂度低,虽然频率精度低于光梳系统,但配合元素吸收池也可获得 10^{-9} 或更高的频率精度.而相

比于马赫曾德干涉仪来说,FP腔的谐振峰是由多次干涉生成,其峰值对比度更好,更适合作为频率参考标准.FP腔在频率域上的峰值间隔主要由其FSR决定,其FSR越小,对应的腔体光程就越大.过长的腔体对制备及环境稳定要求都会更高,因此选择合适参数的FP腔是实现高精度稳定外腔激光器频率标定的关键.

本文设计了一套基于外腔激光器、铷吸收池和扫描频率标定FP腔的高精度扫频系统,用以实现跟踪天文观测用波长定标FP腔谐振频率漂移,其频率精度MHz.通过实验和模拟,对系统关键组件扫频频率标定FP腔的参数进行了优化.首先通过实测以及参考其他文献确定了外腔激光器频率随扫描时间变化的关系,模拟了采用不同FSR和梳齿精细度的扫描频率标定FP腔时频率标定效果.在此基础上进一步考虑了温度及探测噪声的影响,模拟了两种不同材质FP腔在不同温度变化和不同探测噪声下的频率标定情况.综合这些结果并考虑到制备难度,确定了能满足设计目标的系统关键组件扫描频率,标定FP腔的材料及参数.本文第2节介绍了FP腔基本原理以及使用的模拟方法;在第3节介绍了系统组成,并模拟了在不同探测环境下使用不同参数频率标定FP腔的频率拟合情况;第4节进行了总结.

2 理论及模拟方法

2.1 法布里珀罗腔基本原理

FP腔的示意图如图1所示,腔体两端为反射率为 R 的平行镜面,光从其中一端输入后在镜面之间多次反射,每次光到达右端镜面后都会有一部分光透射.

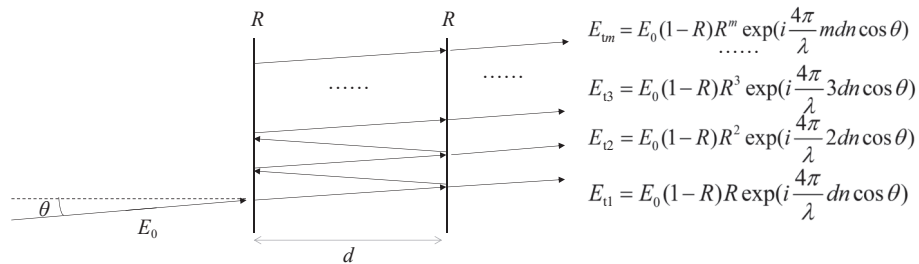


图 1 法布里珀罗腔示意图

Fig. 1 Diagram of Fabry Perot cavity

FP腔的总透过光为每一次透过光的相干叠加. 假设镜面反射率为 R , 透过率为 $(1 - R)$, 入射光初始电场为 E_0 , 波长为 λ , 入射角为 θ , 腔长为 d , 腔体折射率为 n , 不考虑镜面反射对光相位影响的情况下, 经过多次相干叠加的出射电场 E_t 可以表示为

$$E_t = E_0(1 - R) \sum_{m=1}^{\infty} R^m \exp\left(i \frac{4\pi}{\lambda} m d n \cos \theta\right), \quad (1)$$

式中 m 为光经过第2个镜面透射的次数. 通过(1)式获得了透过光的电场分布后则可以通过计算复电场的模来获得总的透过强度 I_t , 即

$$I_t = E_t E_t^*. \quad (2)$$

按(2)式计算获得设定参数下FP腔的透过强度, 改变(1)式中的波长参数则可以计算在一段波长或频率上的透过强度分布.

2.2 外腔激光器扫描FP腔及频率拟合的模拟方法

外腔激光器在无跳模模式下频率扫描分辨率为50 kHz或更高, 但由于压电陶瓷自身特性其频率随时间变化是非线性的. 假设其频率 ν 是一个随时间 t 变化的函数

$$\nu = f(t), \quad (3)$$

结合已知FP腔在频率域上的强度分布, 将该频率域上的强度分布对应到时间上, 即

$$I_t = g(\nu) = g(f(t)). \quad (4)$$

按(4)式计算获得外腔激光器扫描FP腔的结果. 对于频率随时间变化函数不能以解析函数形式进行表达的情况, 可采用数值一一映射的方式, 先确定每一扫描采样点时刻对应的频率值, 按照频率值获取此扫描点时刻对应的透过强度.

在获得了模拟的扫描结果之后, 为了评估标定频率的效果, 还需要利用该模拟结果进行频率标定, 拟合出频率随时间的变化关系, 并根据该拟合结果和设定值的差值大小评估拟合效果. 频率标定的依据是铷吸收峰处的绝对频率以及扫描频率标定FP腔的FSR在扫频范围内基本一致. 我们

按照图2的流程图进行频率拟合.

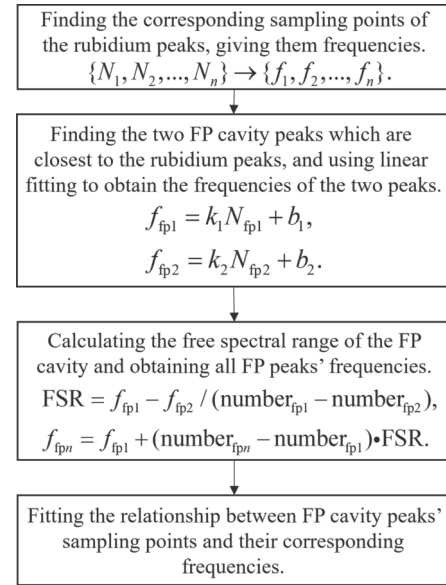


图2 使用铷吸收谱线配合FP腔透过峰获取外腔激光器一次扫描频率随时间变化关系流程图

Fig. 2 Flow chart of obtaining the relationship between frequency and time of laser diode in one frequency scanning using rubidium absorption spectral lines combined with FP cavity peaks

首先找到铷吸收峰的位置并根据其特征确定对应的频率值, 获得这几个扫描点 $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ 和绝对频率 $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 之间的一一对应关系. 之后找到离铷吸收峰最近的两个FP腔透过峰值对应扫描点 N_{fp1} 及 N_{fp2} , 并利用铷吸收峰扫描点和对应频率在局部进行线性拟合为这两个选定的FP腔透过峰赋予频率 f_{fp1} 及 f_{fp2} , 之后根据这两个峰值之间相差模式数及频率差值计算FP腔的FSR. 按照FP腔FSR在扫描波段均等的假设得到每一个FP腔的频率值. 最后使用一元样条拟合获得FP腔峰值频率 $\{f_{fp1}, f_{fp2}, \dots, f_{fpn}\}$ 与对应扫描点 $\{N_{fp1}, N_{fp2}, \dots, N_{fpn}\}$ 的关系. 在拟合后将拟合结果和设定值进行对比即可评估拟合效果.

2.3 温度变化及探测噪声对频率拟合影响的模拟方法

温度变化会影响FP腔的折射率以及腔体长度, 从而使得透过峰频率发生漂移. 外腔激光器是

通过频率扫描的方式获得FP腔的透过谱线,不同频率并不是同时获得的,这意味着如果在探测时间里发生温度变化,那么探测结果也会相应发生变化,这会在一定程度上破坏FSR在扫描范围内均等这一拟合假设,影响探测精度.为了模拟温度变化带来的影响,首先确定好温度范围及腔体材料,根据材料热膨胀系数及热光系数获得各温度下FP腔对应的腔体长度和腔体折射率,利用2.2节中的方法计算不同温度时的扫描结果组成数据矩阵,然后按照温度随时间变化关系在整个数据矩阵中选取对应数据,获得有温度变化时外腔激光器扫描FP腔的结果.从数据矩阵中选择对应数据的示意图如图3所示.

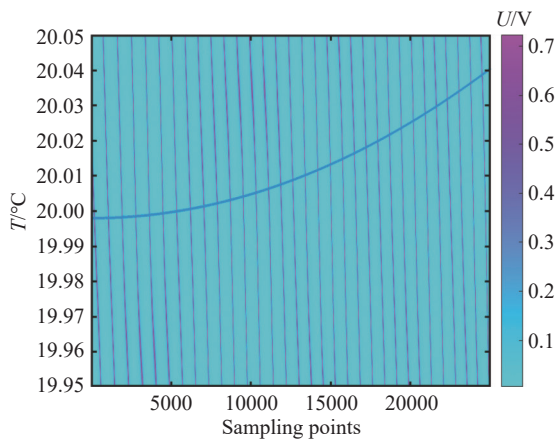


图 3 模拟扫描过程中有温度变化的FP腔透过谱线的方法,蓝色曲线为温度随采样时间变化曲线.

Fig. 3 The method of simulating the transmission of FP cavity with temperature changes during the scanning process, the blue curve represents the temperature variation with sampling time.

图3中蓝色曲线表示探测期间温度随着采样时间的变化关系曲线,背景矩阵则是根据2.2节中方法计算的不同温度下激光器扫描FP腔的结果.按照蓝色曲线各点温度选取其对应矩阵元素电压值即可获得当前温度变化下的扫描结果.

除了温度变化的影响,噪声也会在一定程度上影响拟合精度.而在整个探测系统中,噪声有各种来源,包括光源的光子噪声、探测器的暗电流、热噪声等.为了模拟噪声对该系统的影响,参

考文献[16]的做法,将噪声模型简化为两类噪声,分别是和探测信号强度相关的泊松分布噪声以及和探测信号强度无关的高斯分布噪声.其中泊松分布噪声代表光子噪声,而高斯噪声则代表光电探测器的一系列噪声.泊松噪声的大小可以根据实际光源参数进行估算,由于泊松噪声具有信号强度越大相对波动越小的特点,如按照探测器接收到FP腔最大透过率时的光功率为0.1 mW估计,此时泊松噪声相对于原始信号的波动小于1%,相比于添加的高斯噪声来说很小,因此噪声中占主要部分的是与强度无关的高斯噪声.在加入噪声后,噪声的大小按照信噪比(FP腔透过峰值相对于噪声的分贝值)进行评估.

3 系统设计说明及扫描频率标定 FP腔参数选择

3.1 系统设计说明

跟踪FP腔谐振频率漂移系统如图4所示.外腔可调谐激光器是系统中的扫频光源,无跳模扫频范围为40 GHz.激光输出后分为3路,分别经过铷吸收池、扫描频率标定光纤FP腔和波长定标FP腔,获得铷吸收谱线、光纤FP腔透过谱线以及待测FP腔透过谱线.波长定标FP腔将被用于天文学光谱仪同步定标,入射光源除了上述扫频激光外还有用于定标的白光光源,其中扫频激光在透过波长定标FP腔后被滤波片反射从而被分离探测,其余波长定标FP腔的透过光进入光谱仪进行波长定标.扫描频率标定光纤FP腔设计腔体结构由抗谐振空心光纤组成,制备方法参考文献[17],利用渐变折射率光纤与单模光纤进行高效率光传输,并在空心光纤两端的渐变折射率光纤上镀膜形成谐振腔,这种方法制备的FP腔具有实现较高精细度(>100)的可能性.通过前面两组谱线可以确定此次扫描各时刻激光频率,具体方法如2.2节中所述.在确定了此次扫描各时刻激光频率之后即可以此为依据获得此次扫描波长定标FP腔某个或某几个模式的中心频率、半高宽等信息.随着时间的多次扫描可以跟踪这几个透过模式中心频率随时间的漂移情况.

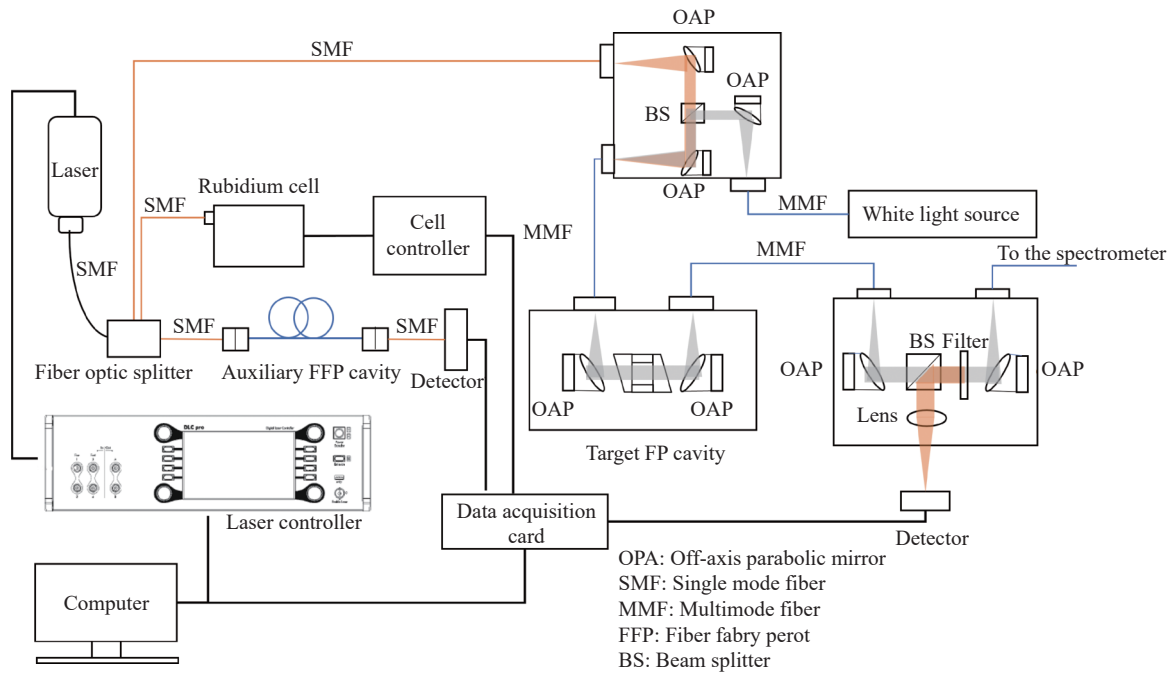


图 4 跟踪FP腔谐振频率漂移系统示意图

Fig. 4 Diagram of Fabry Perot cavity resonate frequency tracking system

系统的目标精度是在扫频范围内单次扫描获得的频率精度达到MHz. 为了满足这一目标, 需要选择合适的光纤FP腔. 下面3.2节中我们通过实验实测和参考其他文献的方式确定了外腔激光器扫频非线性的大小及表现形式; 3.3节中模拟了不同FSR和不同精细度的FP腔配合铷吸收池进行频率拟合的效果; 3.4节中则进一步在模拟中考虑了探测中的温度变化、噪声大小对结果的影响, 最后根据目标精度和模拟结果选择了扫描频率标定FP腔的参数.

3.2 扫频非线性大小确定

为了确定系统中扫描频率标定FP腔的参数, 需要首先获取外腔激光器扫频随时间变化关系. 使用Toptica公司的外腔激光器DL pro对1.5 GHz FSR的FP腔(Thorlabs SA200-5B)和Toptica公司的Cosy铷吸收模块进行扫描, 分别获得了扫描的FP腔透过峰及铷D2吸收谱线, 扫描结果如图5(a)所示. 根据铷元素谱线特性从铷吸收谱线里面选择了前两组峰值中比较明显的峰值作为特

征点赋予频率, 按照频率从小到大的顺序分别对应 $^{87}\text{Rb } 5^2\text{S}_{1/2} \text{ F}=2$ 跃迁至 $^{87}\text{Rb } 5^2\text{P}_{3/2}$ CO13 CO23 $\text{F}=3$ (CO表示跃迁到两个能级的交叉吸收峰)以及 $^{85}\text{Rb } 5^2\text{S}_{1/2} \text{ F}=3$ 跃迁至 $^{85}\text{Rb } 5^2\text{P}_{3/2}$ CO24 CO34 $\text{F}=4$ 的峰值.

根据这些峰值的电压频率关系对压电陶瓷驱动电压和外腔激光器激光频率之间的关系进行了线性拟合, 其结果如图5(b)所示, 其中直线是线性拟合结果, 米字形标记的是选取的铷峰位置. 按照2.2节中的方法通过铷峰频率及FP腔峰值间频率间隔相等的假设获得了FP腔峰值对应频率, 在图5(b)中以圆点表示. 其频率值逐渐偏离线性拟合结果, 通过这些峰值点的分布情况即可估计出大范围下的扫频非线性大小及形式. 在图5(c)中展示的是FP腔峰值频率与图5(b)中线性拟合频率的差值的大小. 从结果中可以发现, FP腔的峰值在接近10 GHz扫频范围内(20 V驱动压电陶瓷驱动电压变化大致对应10 GHz频率范围)偏移这条线性拟合结果大小达到500 MHz, 且差值分布接近二次函数分布. 因此我们计划使用二次函数来模拟大范

围内的扫频非线性. 同时根据文献[12]报道, 外腔激光器还存在着更小范围内局域的扫频非线性, 该参考文献分别使用了1.5 GHz FSR FP腔及5 MHz FSR马赫曾德干涉仪对外腔激光器扫频非线性进行了表征. 其中马赫曾德干涉仪的表征结果可以认为反映了外腔激光器局域非线性的特点. 这种局域非线性还没有明确的理论模型, 我们根

据已有表征结果中局域非线性的表现特点(局域非线性波动大小在几十到百MHz不等, 且没有明确的周期)选择了三角函数的叠加来模拟具有这一特征的局域非线性. 三角函数叠加能够在变化幅度和变化大致规律上与实测贴近. 通过该方法调整参数获得了与参考文献中实际测量的局域非线性大小形式接近的结果, 如图6所示.

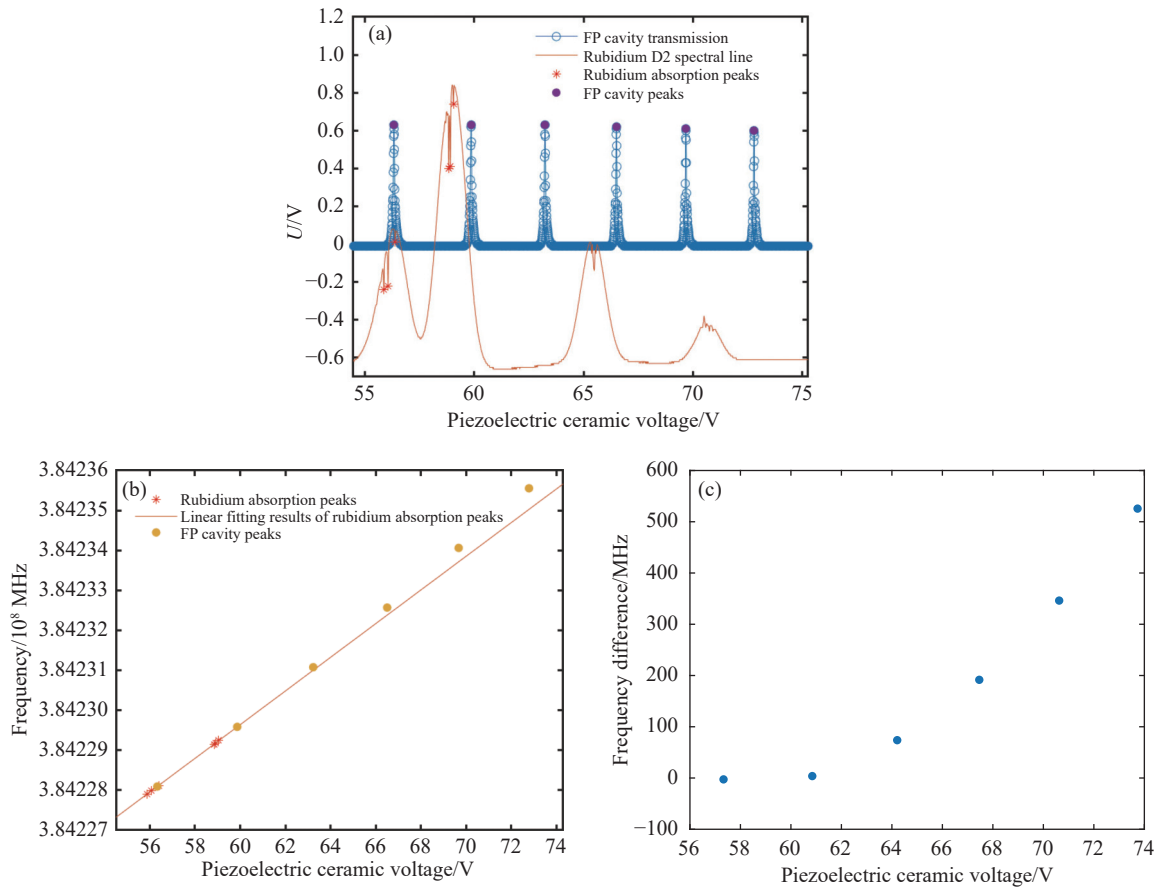


图 5 实验扫描Cosy铷吸收池及1.5 GHz FSR FP腔结果. (a)扫描结果; (b)线性拟合结果及FP腔峰值频率; (c) FP腔峰值频率与线性拟合结果的差值.

Fig. 5 Experimental results of scanning Cosy rubidium absorption cell and 1.5 GHz FSR FP cavity. (a) scanning result; (b) linear fitting result and frequencies of FP cavity peaks; (c) the difference between frequencies of FP cavity peaks and linear fitting result.

图6对应的频率范围是1.5 GHz, 虚线是根据1.5 GHz FSR的FP腔结果生成的采样点和频率关系, 而实线是加入一系列三角函数模拟局域扫频非线性的结果. 可以发现添加了局域非线性的结果相比添加前其数值会有几十MHz大小不等的上

下起伏, 与参考文献中的实测结果较为接近, 因此可以认为设置的模拟参数是合理的. 总的来说, 我们通过实验测量的大范围扫频非线性分布加上根据文献模拟的局域非线性模拟了外腔激光器激光频率随时间的变化关系. 其中大范围的非线性

性利用1.5 GHz FSR的FP腔进行了实际测量, 而对于更小范围内的局域非线性(以目前实验条件测量不到)则参考了文献中的测量结果通过模拟生成。

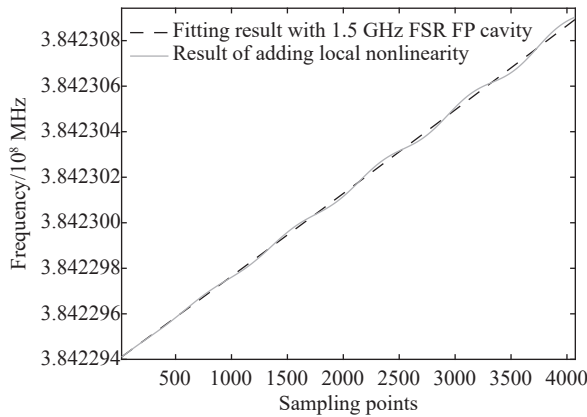


图6 按参考文献[12]在测量基础上添加局域扫频非线性的结果

Fig. 6 The result of adding local frequency scanning nonlinearity on the measurement according to Ref.[12]

3.3 模拟不同参数扫描频率标定FP腔拟合结果

在3.2节中通过参考文献及实测获得了外腔激光器扫频非线性的分布情况. 在此基础上, 为了确定光纤FP腔的参数, 按照2.2节中的方法分别生成了模拟的外腔激光器扫描FSR 10、30、70、150、300、750和1500 MHz的FP腔的透过谱线, 在近10 GHz扫频范围内的采样点为25000个, 对应的频率扫描分辨率在400 kHz, 符合外腔激光器的扫描能力. 设置的扫描频率标定FP腔的精细度大致约为20, 按此设定生成的1500及150 MHz FSR的扫描结果如图7(a)所示. 图中150 MHz FSR FP腔透过谱线峰值之间间隔的采集点并不一致, 这是外腔激光器频率随各采样时间并不是线性变化导致的. 利用这些模拟扫描的结果配合铷吸收线按照流程图2中的方法, 可以获取激光频率随时间(各扫描点)的关系. 频率拟合使用的拟合方法是一元样条拟合.

利用不同FSR FP腔谱线配合铷吸收谱线进行频率拟合结果误差大小如图7(b)所示. 从图7(b)可以发现, 在FP腔FSR较大的情况下, 如FSR为1500、750 MHz等, 此时无法拟合出局域的扫频

非线性, 设定值之间的差值在40 MHz左右, 无法满足绝对频率精度MHz的要求. 而随着FP腔FSR的降低, 误差值开始变小, 直到FSR到70 MHz及以下时已经能较好地拟合出结果, 能够符合目标精度要求. 这说明在当前扫频非线性设置条件下, 想要实现目标频率精度, FP腔的FSR需要达到70 MHz及以下. 这个结果可以与图7(b)中设置的局部非线性大小及波动特性对应. 因为按照奈奎斯特采样定理, 采样点达到原始信号最高频率两倍以上时, 可以通过离散采样点将原始信号复原, 局域非线性的近似周期在百MHz左右, 所以FSR只有在70 MHz及以下时才能拟合出局域非线性. 这也意味着如果局域非线性的形式发生变化, 对应的适宜的扫描频率标定FP腔的FSR也将发生改变.

除了FP腔的FSR, 其精细度也可能会影响最终拟合的精度. 假设相同FSR的FP腔拥有相同材质和长度, 此时精细度主要由FP腔两端腔镜决定. 按照不同的反射率 R 生成了精细度4~60不同的结果, 其中不同精细度10 MHz FSR FP腔模拟结果和拟合误差如图7(c)、(d)所示. 从图中可以发现, 精细度在4到20的情况下, 拟合误差基本一致. 精细度到60以上时, 由于单峰半高宽过于窄, 而激光扫描分辨率有限导致最后拟合峰值时拟合存在误差, 影响拟合精度. 所以选择扫描频率标定FP腔精细度需要配合外腔激光器的扫描性能, 不宜在FSR较小的情况下选择过高的精细度.

3.4 温度波动及噪声影响

根据3.3节中的模拟结论, 在当前设置且不考虑其他因素的情况下使用FSR小于70 MHz的扫描频率标定FP腔能够获得MHz精度的频率结果. 但在实际情况下, 越小的FSR对应着越长的腔长, 其对环境变化越敏感, 因此将扫描过程中的温度变化加入考虑是有必要的. 外腔激光器扫描一次的时间一般小于1 s, 所以温度变化值不会很大. 假设在一次扫描中, 温度以293 K (20 °C)为基准发生了3、10和40 mK的波动, 不同扫描点对应的温度如图8所示, 图中温度值的最小变化量设置为 10^{-4} K.

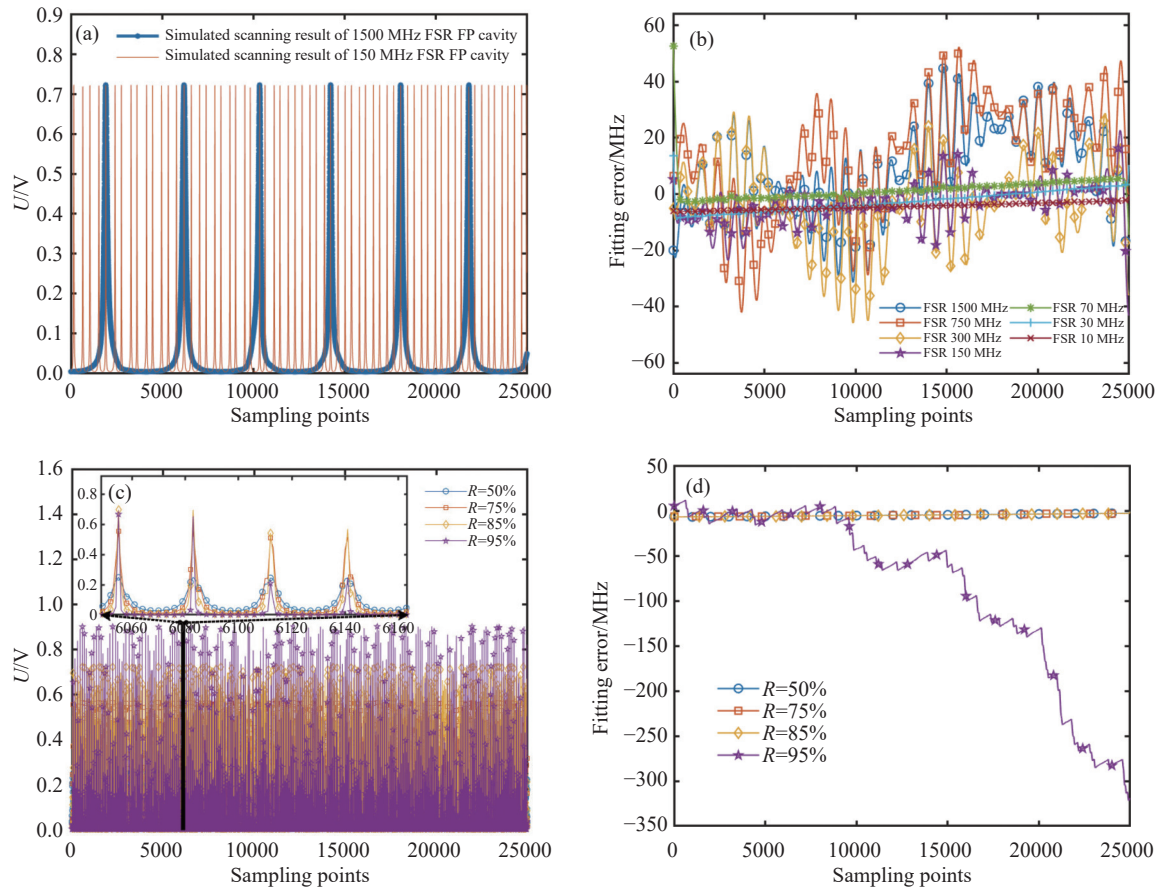


图 7 模拟扫描不同自由光谱范围不同精细度FP腔结果及拟合误差. (a) 1500 MHz及150 MHz FSR FP腔扫描结果; (b)不同FSR FP腔谱线拟合误差; (c)不同精细度10 MHz FSR FP腔模拟结果; (d)不同精细度10 MHz FSR FP腔谱线拟合误差.

Fig. 7 Simulated scanning results and fitting errors of different FSR FP cavities. (a) simulated scanning results of 1500 MHz and 150 MHz FSR FP cavity; (b) fitting errors of different FSR FP cavity; (c) simulated results of 10 MHz FSR FP cavities with different fineness; (d) fitting errors of 10 MHz FSR FP cavities with different fineness.

光纤腔易于实现较长的腔长, 而光纤腔一般有普通二氧化硅单模光纤FP腔以及空心光纤(Hollow Core Fiber, HCF) FP腔. 对这两种光纤FP腔分别进行了模拟, 其中空心光纤按照抗谐振空心光纤进行模拟, 这种空心光纤纤芯中热光系数主要由光纤中的气体成分决定^[18], 所以在计算其热膨胀系数时按二氧化硅的参数进行计算, 热光系数按照空气计算. 单模光纤都按二氧化硅的参数进行计算. 空气和二氧化硅在293 K (20 °C)时热膨胀系数及热光系数等数据的具体数值如表1所示.

结合上述参数按照2.3节中的方法生成了图8中3种温度变化情况下, 不同FSR (同3.3节中参

数)、两种材质FP腔的模拟扫描结果并组成了数据矩阵, 按照图8中的温度变化关系从矩阵中选取了数据. 300 MHz FSR空心光纤和单模光纤FP腔在40 mK温度变化下的结果作为例子展示在图9中.

从图9中可以发现, 由于存在温度变化, 当激光频率扫描时, FP腔的各透过峰值的中心频率发生了漂移, 这导致获得的透过峰值之间的间隔发生了改变, 同时峰值的半高宽变化不大. 而单模光纤由于材料对温度更敏感, 漂移量比空心光纤腔漂移量高一个量级, 这和已有的实验测量结果相符^[17]. 存在漂移的谱线在一定程度上破坏了峰值之

间频率间隔相同的假设, 会影响最后频率时间关系的拟合精度. 为了更好的对比, 我们将对比有温度波动与无温度波动拟合结果, 只选择了FSR 70 MHz 及以下的结果进行展示. 10、30和70 MHz FSR 光纤FP腔在不同温度波动下的拟合误差如图10所示. 图10中的拟合结果两端有拐点是样条拟合本身的特性导致的, 其分布仅在两端少数采样点, 这对于实际跟踪有一定峰值宽度的FP腔透过峰影响较小, 所以我们主要关注非边缘区域的拟合差异. 从图中可以发现, 在相同材料、相同FSR的情况下, 即只关注某一子图的情况下, 一次扫描过程中, 温度变化越大, 其带来的拟合误差越大. 而纵向对比3幅子图, 如图10 (a)、(c)和(e), 即相同材料不同FSR情况下, 可以发现自由光谱越小, 也就是腔长越长, 在相同温度影响下其受到的影响越大. 而横向对比两幅子图, 即相同FSR、不同材料FP腔, 可以发现在相同温度变化下, 抗谐振空心光纤腔受到的影响更小. 以70 MHz FSR空心光

纤FP腔为例, 要使得温度对拟合结果的影响接近或小于MHz, 需要保证在一次扫描时间内温度变化值接近或小于10 mK, 而单模光纤腔对于温度变化的要求更高, 同样70 MHz FSR情况下3 mK的温度变化亦无法满足要求.

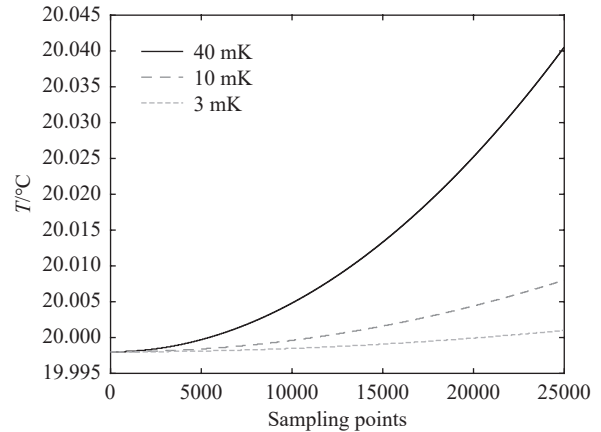


图 8 一次扫描中温度变化设定值

Fig. 8 Temperature change set value during one scan

表 1 二氧化硅及空气在293 K时的参数
Table 1 Parameters for silicon and air at 293 K

Parameters	Silicon	Air
Coefficient of thermal expansion $dL/(LdT)$	$5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1[19]}$	—
Thermal optical coefficient dn/dT	$8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1[20]}$	$-9.31 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1[21]}$
Pressure sensitivity dn/dP	—	$2.69 \times 10^{-7} \text{ mbar}^{-1[21]}$

在模拟了温度变化的影响之后, 还对探测噪声带来的影响进行了模拟, 噪声的组成和添加方法如2.3节中所述. 采用信噪比(FP腔峰值相对于噪声的分贝数)评估噪声大小, 从40 dB到小于10 dB不等. 10、30和70 MHz FSR FP腔谱线不同探测噪声情况下的拟合结果和设定值之间的差值如图11所示. 从图11中可以发现除了10 MHz FSR FP腔谱线的结果, 其他FSR的结果在信噪比小于10 dB (具体值为8 dB)时才会出现明显的拟合误差. 而10 MHz FSR的情况下对噪声会更敏感一些, 信噪比小于20 dB时就会出现明显的拟合误差. 我们还进一步将10 MHz FSR FP腔模拟的采样点增加到10万, 也就是目前采样点的4倍, 其拟合结果如图12

所示. 对比图11 (a)和(b)可以发现采样点更多的情况下, 能够容忍更大的噪声. 这说明更小FSR FP腔对噪声更敏感的主要原因是FP腔FSR越小, 每个峰采样点数就越少, 而噪声主要影响单个FP透过峰识别及拟合. 所以单个峰样点越少, 其对噪声的容忍程度越差. 实际情况下, 采样点受到激光扫描分辨率、计算量等一系列限制, 不能无限制提高, 所以对于FSR很小且采样点有限的情况下需要保证探测时的信噪比才能实现目标精度. 综合温度和探测噪声的影响来看, FSR越小对环境及探测的要求就越高. 再考虑到腔长越长制备难度也越大, 我们认为FSR 30–70 MHz的抗谐振空心光纤FP腔较为适合作为系统的扫描频率标定工具.

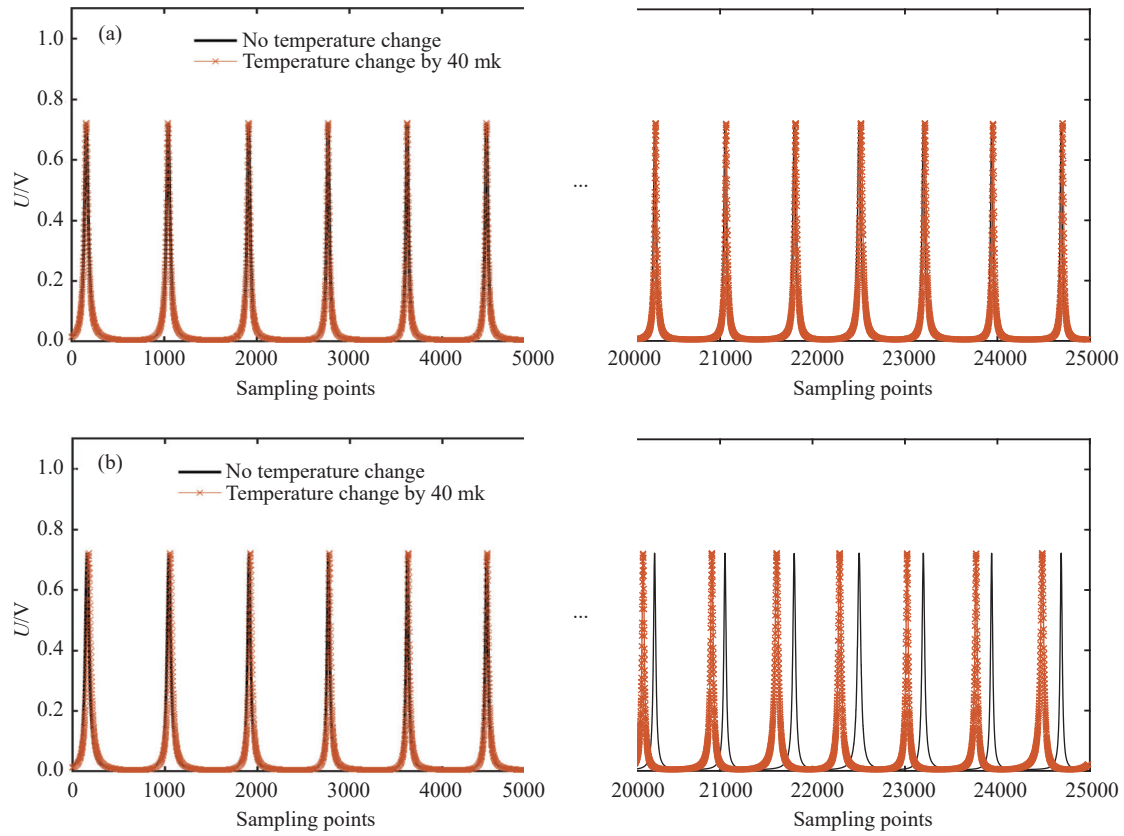


图 9 扫描空心光纤及单模光纤FP腔过程中有温度变化的模拟结果. (a) 300 MHz FSR空心光纤FP腔; (b) 300 MHz FSR单模光纤FP腔.

Fig. 9 Simulated scanning results of HCF and SMF FP cavity with temperature change. (a) HCF FP cavity with FSR 300 MHz; (b) SMF FP cavity with FSR 300 MHz.

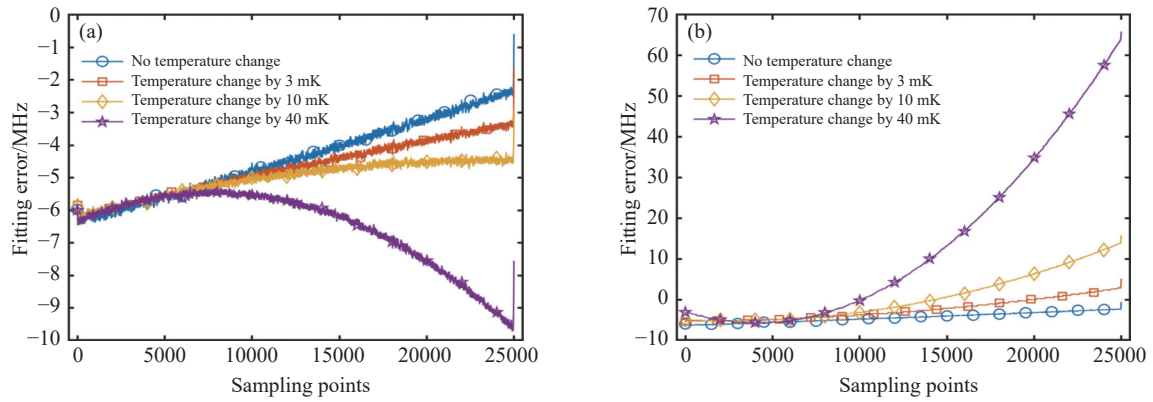


图 10 抗谐振空心光纤和普通单模光纤FP腔在不同温度波动情况下的拟合误差. (a) FSR 10 MHz HCF FP腔; (b) FSR 10 MHz SMF FP腔; (c) FSR 30 MHz HCF FP腔; (d) FSR 30 MHz SMF FP腔; (e) FSR 70 MHz HCF FP腔; (f) FSR 70 MHz SMF FP腔.

Fig. 10 Fitting error of anti-resonant HCF and SMF FP cavities under different temperature fluctuations. (a) FSR 10 MHz HCF FP cavity; (b) FSR 10 MHz SMF FP cavity; (c) FSR 30 MHz HCF FP cavity; (d) FSR 30 MHz SMF FP cavity; (e) FSR 70 MHz HCF FP cavity; (f) FSR 70 MHz SMF FP cavity.

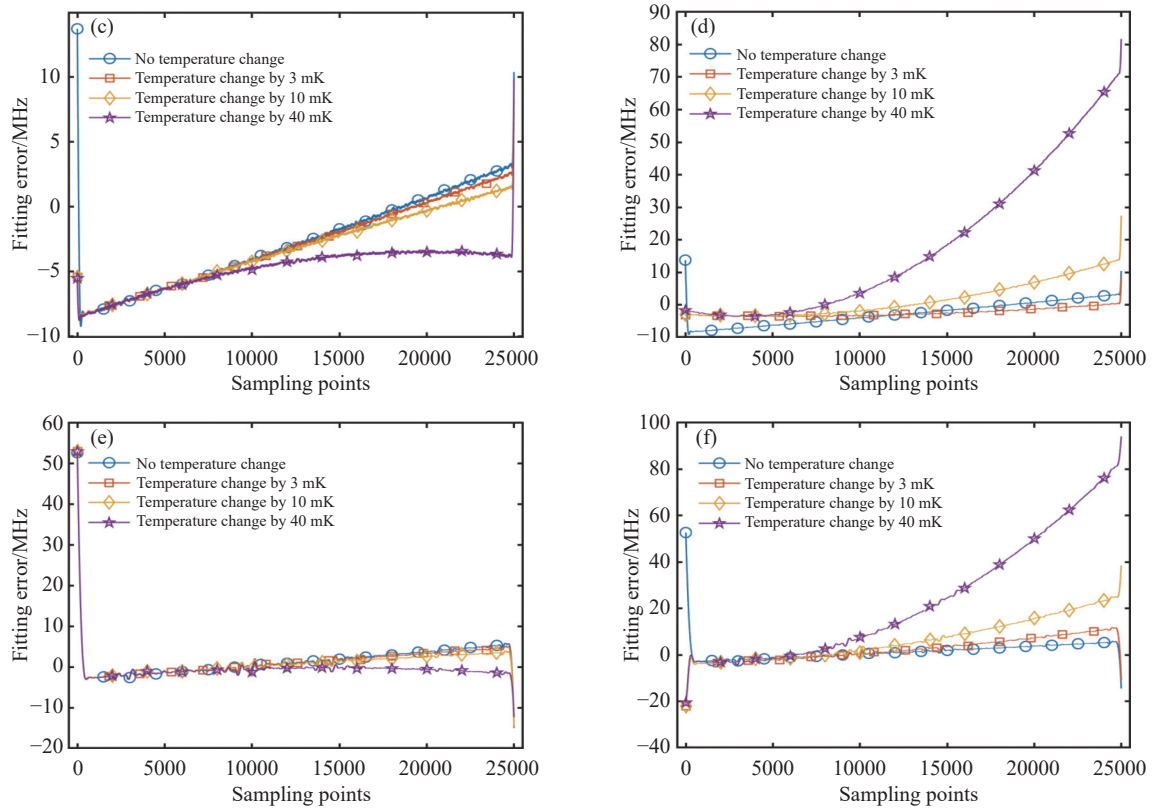


图 10 续

Fig. 10 Continued

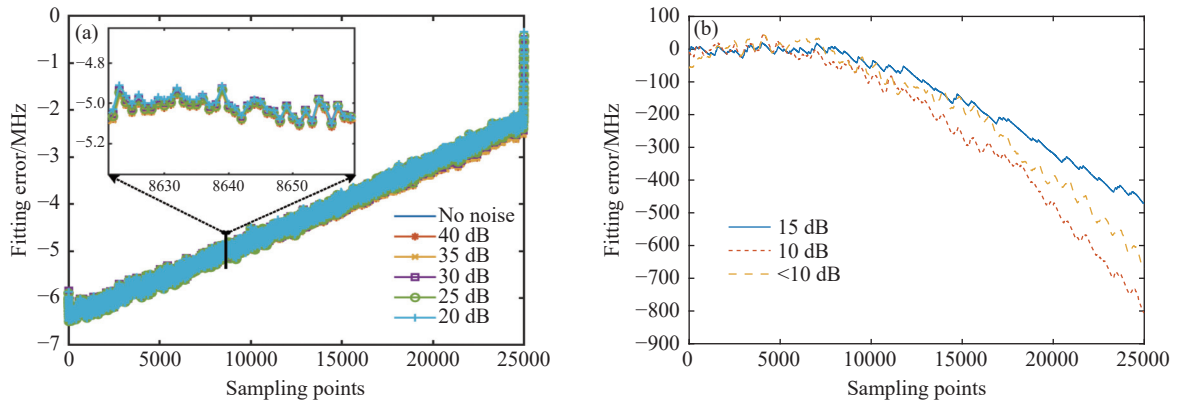


图 11 不同FSR FP腔在不同探测噪声情况下的拟合误差. (a) 10 MHz FSR FP无噪声及信噪比20–40 dB; (b) 10 MHz FSR FP信噪比15 dB、10 dB、8 dB; (c) 30 MHz FSR FP无噪声及信噪比10–40 dB; (d) 30 MHz FSR FP信噪比8 dB; (e) 70 MHz FSR FP无噪声及信噪比10–40 dB; (f) 70 MHz FSR FP信噪比8 dB.

Fig. 11 Fitting errors of different FSR FP cavities with noises. (a) 10 MHz FSR FP with no noise and peak-to-noise ratio of 20–40 dB; (b) 10 MHz FSR FP with peak-to-noise ratio of 15 dB, 10 dB, 8 dB; (c) 30 MHz FSR FP with no noise and peak-to-noise ratio of 10–40 dB; (d) 30 MHz FSR FP with peak-to-noise ratio of 8 dB; (e) 70 MHz FSR FP with no noise and peak-to-noise ratio of 10–40 dB; (f) 70 MHz FSR FP with peak-to-noise ratio of 8 dB.

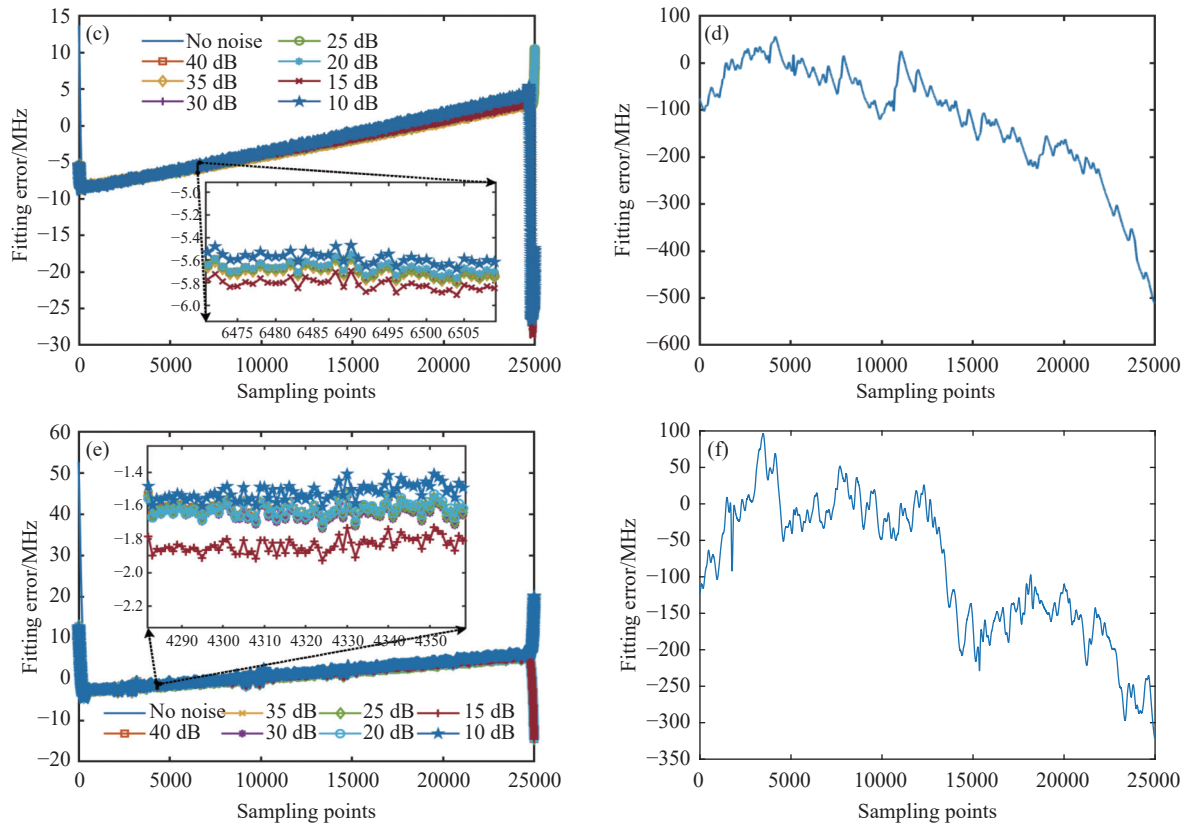


图 11 续

Fig. 11 Continued

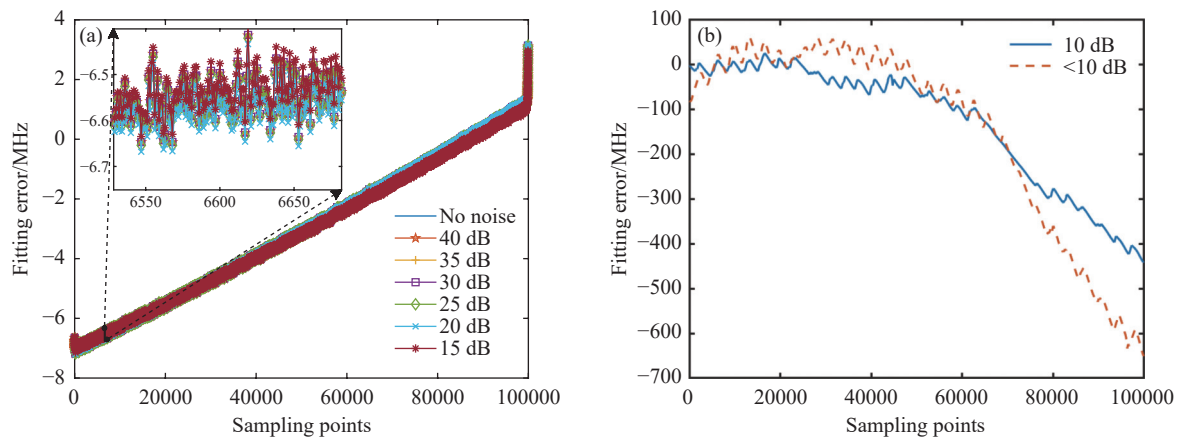


图 12 10 万采样点情况下 10 MHz FSR FP 腔在不同噪声情况下的拟合误差. (a) 无噪声及信噪比 15–40 dB; (b) 信噪比 10 dB 及 8 dB.

Fig. 12 Fitting errors of 10 MHz FSR FP cavity under different noise with 100000 sampling points. (a) the fitting results of no noise and peak-to-noise ratio of 15–40 dB; (b) the fitting results of peak-to-noise ratio of 10 dB and 8 dB.

4 结论

为提高FP腔波长定标长期精度, 本文设计了一套基于外腔激光器的FP腔谐振频率漂移跟踪系统. 系统使用铷吸收池配合空心光纤FP腔标定外腔激光器频率随时间的变化关系, 以此为依据高精度地跟踪波长定标FP腔谐振频率漂移. m/s级的视向速度测量精度大致需要MHz级别的频率精度. 为了实现这一精度目标, 我们进行了一系列模拟以确定系统关键组件扫描频率标定FP腔的参数. 当不考虑温度及探测噪声的影响, FSR在70 MHz及以下, 精细度不影响单峰拟合的FP腔可以配合铷吸收池完成频率精度MHz级别的频率标定, 符合系统的设计目标. 进一步考虑温度波动及探测噪声影响时, 从腔体材料选择上来看, 抗谐振空心光纤腔由于其腔体材料热光系数相对较小, 更适宜作为扫描频率标定FP腔. 对于FSR的选择来说, FSR越小其受温度影响相对会更大, 对环境控制要求更高, 所以最终选择的FSR不宜太小. 而对于噪声来说, 由于外腔激光器频率扫描分辨率存在极限, 扫描频率标定FP腔FSR越小峰值越密集, 单峰采样点越少拟合时受噪声的影响会更大. 综合温度及噪声因素并考虑到实际制备难度, 要实现MHz级别的频率精度, 在具有一定的温控情况下, 扫描频率标定FP腔的最佳选择是FSR在30–70 MHz、精细度在10–30的抗谐振空心光纤FP腔. 该高精度扫描频率系统可以被应用到高精度波长定标FP腔谐振频率的跟踪, 并为研究FP腔的谐振频率长期漂移提供基础. 除此之外由于该系统具备高频率精度的特点, 还可以被应用到对太阳滤波FP腔的透过频率确定、高精度光谱测量、高精度扫描频率干涉测距等对绝对频率或相对频率变化有较高精度要求的应用中.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高.

参考文献

- [1] Milne J S, Dell J M, Keating A J, et al. JMemS, 2009, 18: 905
- [2] Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, et al. ApPhB, 2009, 96: 251
- [3] Islam M R, Ali M M, Lai M H, et al. *Senso*, 2014, 14: 7451
- [4] Costa G K, Gouvêa P M, Soares L M, et al. OExpr, 2016, 24: 14690
- [5] Lawall J R. *JOSAA*, 2005, 22: 2786
- [6] Wildi F, Pepe F, Chazelas B, et al. Proceedings of Conference on Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. San Diego, California, United States: SPIE, 2010, 7735: 1853
- [7] Bauer F F, Zechmeister M, Reiniers A. A&AC, 2015, 581: A117
- [8] Cersullo F, Coffinet A, Chazelas B, et al. A&AC, 2019, 624: A122
- [9] 刘桐君, 叶慧琪, 唐靓, 等. 光子学报, 2023, 52: 0552203
- [10] Terrien R C, Ninan J P, Diddams S A, et al. *AJ*, 2021, 161: 252
- [11] Yüksel K, Wuilpart M, Mégret P. OExpr, 2009, 17: 5845
- [12] Deng Z, Liu Z, Gu S, et al. OptCo, 2020, 455: 124556
- [13] Stürmer J, Seifahrt A, Schwab C, et al. JATIS, 2017, 3: 025003
- [14] Zhao S, Suo L, Xu H, et al. OptCo, 2022, 508: 127737
- [15] Fredrick C, Olsen F, Terrien R, et al. *Optic*, 2022, 9: 221
- [16] Foi A, Trimeche M, Katkovnik V, et al. ITIP, 2008, 17: 1737
- [17] Ding M, Komanec M, Suslov D, et al. JLwT, 2020, 38: 2423
- [18] Michaud-Belleau V, Numkam Fokoua E R, Horak P, et al. PhRvA, 2022, 106: 023501
- [19] Wakaki M, Shibuya T, Kudo K. Physical Properties and Data of Optical Materials. Boca Raton: CRC Press, 2018: 399
- [20] Leviton D B, Frey B J. Proceedings of Conference on Optomechanical Technologies for Astronomy. Orlando, Florida, United States: SPIE, 2006, 6273: 800
- [21] Ciddor P E. ApOpt, 1996, 35: 156673

Simulation Study on Key Device Parameters of High-precision Fabry Perot Cavity Resonant Frequency Drift Tracking System

LIU Tong-jun^{1,2,3} YE Hui-qi^{1,2} TANG Liang^{1,2} XIAO Dong^{1,2}

(1 *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(2 *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT Broadband Fabry Perot (FP) cavities have been widely used in high-precision astronomical spectral calibration in recent years. Achieving calibration accuracy better than 1 m/s requires the stability of the FP cavity to be better than 10^{-9} (<MHz). However, coating aging, phase transition of spacer materials, and long-term environmental changes can cause a slow drift of the FP cavity, affecting the long-term repeatability and accuracy of wavelength calibration. To track the drift of the FP cavity and improve its long-term calibration accuracy, a high-precision laser scanning tracking system was designed using a rubidium absorption cell as the absolute frequency reference. Theoretically, the frequency accuracy can reach 10^{-9} or even higher near the rubidium absorption line. However, the FP etalon FSR (Free Spectral Range) used for wavelength calibration is usually 15 to 60 GHz, which means the peaks are likely far away from the rubidium lines. Therefore, accurately calibrating the scanning frequency of the laser is the key to expanding the measurement range and maintaining measurement accuracy. We use a small FSR auxiliary FP cavity with rubidium absorption cells for precisely calibrating laser scanning frequency. To select the parameters of the system's key components, the laser scanning frequency calibration of two materials, and different FSR auxiliary FP cavities under different detection conditions (temperature changes, noise levels) are simulated. The simulated results show that the auxiliary FP cavity with FSR below 70 MHz can achieve calibration of MHz frequency accuracy without considering environmental and detection factors; meanwhile, the smaller the FSR, the more sensitive it is to temperature changes and detection noise. Taking into account the simulated results and fabrication difficulty, the optimal FSR for the auxiliary FP cavity is 30–70 MHz. Since the temperature drift coefficient of the anti-resonant hollow core fiber FP cavity is much smaller than that of the traditional fiber FP cavity, it is also more suitable for high-precision frequency calibration.

Key words instrumentation: Fabry Perot cavity, instrumentation: rubidium absorption cell, instrumentation: external cavity diode lasers, techniques: radial velocities