

基于谱估计的 Fabry-Perot 标准具透过率曲线参数估计方法

蒋立辉^{1,2}, 章典¹, 陈星², 熊兴隆^{1,2}

- (1. 中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300;
2. 民航气象技术研究所, 天津 300300)

摘要: 直接探测多普勒测风激光雷达系统大多采用基于 Fabry-Perot(F-P)标准具的条纹技术和边缘技术测量多普勒频移。但激光器频率漂移会使得透过率曲线的估计出现一定误差, 为了抑制其影响, 提出了一种基于谱估计的 F-P 标准具透过率曲线参数估计方法。首先将标准具全量程扫描结果进行重构得到观测矩阵。之后使用 MUSIC 算法得到透过率曲线的伪谱。对伪谱进行谱峰搜索后, 将得到的谱峰位置进行线性拟合得到自由谱间距。然后将上步的拟合结果代入透过率函数, 利用非线性最小二乘法对其他参数进行估计。在仿真分析的基础上, 采用真实测量数据进行了实验验证。结果表明所提出的方法在扫描步点间隔达到 50、信噪比大于 10 dB 的情况下, 估计差小于 1%。该算法扫描时间短, 估计误差小, 具有实际应用价值。

关键词: Fabry-Perot 标准具; 激光雷达; 谱估计; 参数估计

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0906006

Parameter estimation method of Fabry-Perot etalon based on modern spectrum estimation

Jiang Lihui^{1,2}, Zhang Dian¹, Chen Xing², Xiong Xinglong^{1,2}

- (1. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Civil Aviation Meteorological Institute, Tianjin 300300, China)

Abstract: The Fabry-Perot(F-P) etalon was commonly used in direct detection Doppler wind lidar. As a considerable affect would be caused by laser frequency drift in transmittance curve estimation, a new transmission curve fitting algorithm based on spectrum estimation was presented. Firstly, the scan result of F-P etalon was reconstructed into observation matrix. The pseudo-spectrum by MUSIC algorithm was conducted. Then spectrum peak was searched and the FSR by linear least squares estimation method was calculated. Secondly, the else parameters by nonlinear least square estimation method was estimated with the estimation above. The performance of the proposed method was analyzed by simulation and verified through the real data, the results show that the proposed algorithm is more stable and accurate under limited amount of data. The relative error is less than 1% when SNR is 10 dB and sample interval is 50 step. This method has lower sweep time, less error and realty utility value.

Key words: Fabry-Perot etalon; lidar; modern spectrum estimation; parameter estimation

收稿日期: 2016-01-10; 修订日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1433202); 中央高校基本科研基金(3122016D007)

作者简介: 蒋立辉(1964-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事激光雷达探测、图像处理及光电子技术等方面的研究。

Email: jlhhit@163.com

0 引言

多普勒测风激光雷达相对于微波雷达具有杂波小、回波强、适用于晴空观测、时空分辨率高等优势,在对流层和低空风场的高时空分辨率探测、灾害天气预警^[1]等方面都有着非常重要的意义。

直接探测多普勒测风激光雷达系统大多采用基于 Fabry-Perot (F-P) 标准具的条纹技术和边缘技术^[2]。近年来随着加工技术的发展,已经可以加工性能稳定、分辨率高且可调谐的 F-P 标准具,这使标准具可以作为直接探测多普勒测风激光雷达的鉴频装置^[3]。F-P 标准具作为测风激光雷达的鉴频器,其参数的准确估计及透过率曲线的精准拟合将影响整个测风激光雷达系统的风场探测性能。

为了提高直接探测多普勒测风激光雷达探测精度和减小探测误差,近年来国内外相关学者在系统研发和硬件设计方面开展了大量研究工作。美国国家航天航空局(NASA)开发了 GLOW 系统^[4],采用三通道 F-P 标准具,通过参考光在锁定通道的透过率实现频率的监测和锁定,该系统可针对 30 km 高度的大气风场进行探测。德国、英国和挪威联合研制了 AIAMOR^[5-6]系统,采用 F-P 标准具与碘原子滤波相结合的技术,可针对北极圈附近 80 km 的中高层大气进行观测。欧空局(ESA)全面启动了全球第一台星载测风激光雷达计划(ADM-Aeolus 计划)^[7],该计划于 2015 年发射。在国内,中国科技大学对频域响应函数、分束比和发散角对测风误差进行了实验分析^[8-9],其分析重点仍以硬件设计为主。迄今为止,对于标准具透过率曲线拟合准确性的研究还未见文献报道。

透过率曲线的拟合在工程上是使用最小二乘法^[10],使拟合曲线和测量曲线残差最小,但是受到激光器漂移的影响,这样得到的透过曲线其自由谱间距和谱宽比实际的要大,并有可能陷入局部最优解使得估计得到的参数脱离其物理意义。文中提出了一种基于拟合参数的数学特性,分别使用谱估计和非线性估计的方法来抑制激光器漂移对透过率曲线的影响,减少估计误差。

1 双边缘多普勒测风激光雷达原理

利用双边缘技术,激光后向散射信号通过 F-P

标准具的透过率变化可以反演出信号的多普勒频移^[11-13]。标准具的两个边缘通道的透过率边缘分别位于激光线谱的两翼,如图 1 所示。

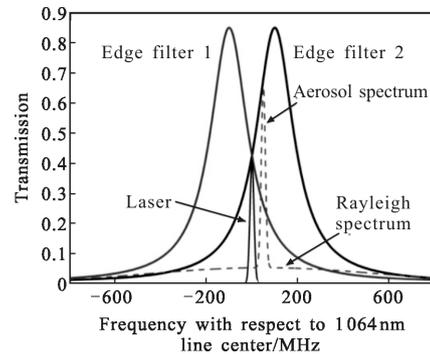


图 1 双边缘技术原理图

Fig.1 Schematic of double-edge technique

双边缘技术使在激光频率处有斜率相反的两条对称边缘。激光频率锁定在每个鉴频器透过率的半宽处。相对于初始值,多普勒频移将使得一个边缘滤光器的透射信号产生变化。对另一个性能相同的边缘滤光器,对应的信号变化大小近似相等,符号相反。根据这个差异的大小可以反演出频率移动的量,即多普勒频率^[9-12]:

$$v_D = \frac{R_D(v_D) - R_D(0)}{R_D(0)(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1)$$

式中: v_D 为多普勒频率; θ_1 、 θ_2 为边缘通道 1、2 的速度灵敏度; $R_D(v)$ 为对应多普勒频率的响应函数^[10]。则探测径向速度为:

$$v = \frac{\lambda}{2} \frac{R_D(v_D) - R_D(0)}{R_D(0)(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2)$$

2 F-P 标准具透过率曲线拟合方法

理想的 F-P 标准具是由两个完全平行的平板组成^[10],平板外侧的透过率较高,内侧反射率较高,使得入射光线在平板间多次震荡。若前 k 个透射光束相叠加,则透射光电矢量振幅可以表达为:

$$A^{(k)} = t't' (1 + r'^2 e^{i\delta} + \dots + r'^{2(k-1)} e^{i(k-1)\delta}) A^{(i)} \quad (3)$$

式中: $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nd \cos \theta$ 为透射光束之间的相位差; t 、 t' 分别为上平板和下平板的透射系数; r 为上下平板的反射系数; d 为平板间距; k 为透射光束序号; n 为平板间空气折射率。当 $k \rightarrow \infty$ 时,标准具的透过率函数是一个经典的 Airy 函数^[10]:

$$h(\nu, d, \theta) = T_p \left[1 + \frac{4F_e^2}{\pi^2} \sin^2 \left(\frac{\pi \nu}{\nu_{FSR}} \cos \theta \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

式中： $T_p = [1 - A/(1-r)^2]$ 为峰值透过率； R 为准具的吸收和散射损耗； F_e 为对应波长的反射率； ν 为有效精细度； θ 为入射光的频率； $\nu_{FSR} = \frac{c}{2nd}$ 为光束入射角，表示自由谱间距，定义为相邻两条透射条纹透过率峰值之间的间隔。从公式可以看出：在扫描标准具时，由于会驱动平板间距变化，自由谱间距会发生改变，但是扫描时的间距变化是纳米级，其改变量相对激光频移可以忽略不计^[13]。

Mie 散射信号经过标准具的透过率函数为激光发射谱线与标准具的透过率函数的卷积：

$$T(\nu) = \int_0^{\theta_0} h(\nu) * f(\nu) d\theta + n_0 \quad (5)$$

式中： $f(\nu) = \frac{\sqrt{4 \ln 2}}{\sqrt{\pi} \sigma} e^{-\frac{4 \ln 2 \cdot \nu^2}{\sigma^2}}$ 为激光器频谱； n_0 为观测噪声。为了对透过率曲线进行精确绘制，需要进行估计的参数有：有效反射率 R_e 、峰值透过率 T_p 、峰值位置 x_c 、对应步长 ν_{FSR} 。为方便之后反演多普勒频率，令 $q = \frac{\nu_{FSR}}{s_{FSR}}$ 表示频率和标准具压电陶瓷进步步长的比值， s_{FSR} 表示扫描得到的透过率函数峰峰值间距。

图 2 表示实验中三个测量通道分别得到各自通道的透过率曲线图，可以发现主要的测量误差来源于激光器自身频率抖动以及测量系统热噪声。那么将其分别设置为 n_1 和 n_0 ，整理得到最终的透过率曲线公式为^[12-13]：

$$tr(x) = T_p \left[\frac{1 - R_e}{1 + R_e} \right] \left\{ 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} R_e^k \cdot \cos \left[\frac{2\pi k(x - x_c + n_1)}{\nu_{FSR}} \frac{1 + \cos \theta_0}{2} \right] e^{-k^2 \left[\frac{\pi \cdot \Delta \nu (1 + \cos \theta_0)}{2 \cdot \nu_{FSR}} \right]^2} \cdot \text{sinc} \left[\frac{2n\nu_0}{\nu_{FSR}} \frac{1 - \cos \theta_0}{2} \right] \right\} + n_0 \quad (6)$$

式中： ν_0 表示激光频率； $\Delta \nu$ 表示激光线宽； θ_0 表示耦合光纤发散角； k 表示接收到的透射光束序号； n_1 表示激光频率抖动。可以这样表示的原因在于激光频率的抖动相对于激光频率非常小，其对透过率曲线形状的影响可以忽略不计。因此激光频率的漂移和抖动在进行透过率扫描时仅仅表现为透过率曲线的平移。

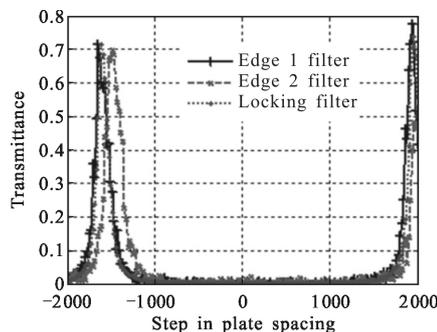


图 2 实际测量得到的透过率曲线

Fig.2 Profile of transmittance in experiments

2.1 估计方法描述

在观测过程中，由于激光器存在频率漂移和抖动，直接使用最小二乘估计会使得估计得到的自由谱间距仅对应于在扫描到第二个峰值时的激光频率。而为了消除激光器的频率抖动，在对标准具进行扫描时需要在每个测量步点进行时间积累，所以在扫描到透过率曲线的第二个峰值时，激光频率已经有较大漂移。

从图 2 可以看出，Mie 散射的透过率曲线带宽窄，透过率曲线的带宽不超过自由谱间距的 1/10，这样在扫描时大部分的扫描数据是背景噪声，因此仅从时域进行拟合估计会导致使用信息量过少。自由谱间距是反应透过率曲线周期的参量，时域上的估计会由于激光器频率漂移而产生偏差，因为在时域曲线上可以看到气溶胶后向散射信号谱宽较窄，大量扫描得到的点为噪声，这是标准具的选择透过性，使得从时域进行逼近的最小二乘拟合实际只使用了两个峰值附近的数据，得到的结果由真实自由谱间距以及扫描到两个透过率尖峰时激光频率的差值决定。在频域上观察，激光频率抖动将只影响透过率曲线的相位谱，不影响频率估计；激光频率的漂移是关于时间的函数，其漂移的速率将会成为透过率曲线频率估计的干扰项，激光频率若正向漂移将使得频率估计值偏大，若负向漂移将使得频率估计值偏小，但是必然小于时域估计时激光频率的差值。因此可以将参数估计过程分为谱估计和非线性估计两部分。

从频域看频率步长映射比与透过率曲线频谱峰值位置为线性关系。进行频谱分析就可以直接获得，故可以先进行谱估计部分。

2.2 谱估计-MUSIC 多重信号分类方法

这里考虑一种采样点较少、精度高、分辨率高、对噪声有一定抑制作用的估计方法——多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)方法对其进行频域分析。谱分析所考虑的问题是,通过非参数化或参数化的技术从有限测量数据中确定数据的谱内容,即功率随频率的分布情况。

若以透过率函数中扫描位置 x 为自变量对其进行频谱分析,可以发现产生的峰值实际为光束在标准具中每次反射的透射光束,谱峰位置即为透射光束的相位差、透射光束序号和频率步长映射比的乘积,如图 3 所示。

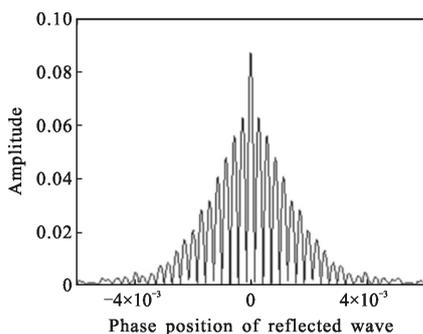


图 3 透过率曲线频谱图

Fig.3 Spectrum of transmittance curve

线性递增的各谱峰位置为:

$$\delta_k = k \cdot \delta \cdot q \quad (7)$$

式中: k 为谱峰序号。通过线性最小二乘拟合,最终获得 q 频率步长映射比。

MUSIC 算法的基本思想是将任意阵列输出数据的协方差矩阵进行特征分解,从而得到与信号分量相对应的信号子空间和与信号分量正交的噪声子空间,然后利用这两个子空间的正交性来估计信号参数。MUSIC 算法具有很高的分辨率、估计精度和稳定性,可以实现多信号同时测量^[14]。

将扫描得到的透过率曲线序列构建 $N \times M$ 观测矩阵 X ,然后求取其协方差矩阵:

$$R_x = \frac{1}{N} X \cdot X^H \quad (8)$$

通过协方差矩阵的奇异值分解,将获得的特征向量矩阵按照特征值大小分解为信号子空间和噪声子空间。构造方程 $a^H(\omega)E_N E_N^H a(\omega) = 0$,使得透过率曲

线的空间频率 $\frac{q}{V_{FSR}}k$ 为该方程的解,即得到透过率曲线的空间伪谱:

$$P_{MU}(\omega) = \frac{1}{a^H(\omega)E_N E_N^H a(\omega)} \quad (9)$$

式中: $a(\omega) = [1, \dots, e^{-j2\pi\omega(M-1)}]$ 为阵列导向矢量,表示观测矩阵的大小。通过扫描频率 ω 对谱峰进行搜索,得到各光束相位差,代入线性最小二乘公式,求得其斜率即为 $\frac{q}{V_{FSR}}$,反演出 q 频率步长映射比。

2.3 非线性估计-非线性最小二乘算法

峰值透过率和有效反射率与透过率曲线呈非线性关系,因此将谱估计部分获得的自由谱间距代入透过率曲线公式,使用非线性最小二乘方法对透过率曲线的峰体部分进行拟合,使残差最小,得到最终的参数估计结果。MUSIC 算法只能得到透过率曲线的伪谱,无法得到各透射光束的幅值,而幅值只与有效反射率 R_e 、峰值透过率 T_p 有关,且与透过率呈非线性关系,这里使用非线性最小二乘算法对曲线进行拟合,获得参数的估计值。

非线性最小二乘问题可以使用 Newton 法和拟 Newton 法求解^[15]。

令残向量为:

$$R(x) = (r_1(x), r_2(x), r_3(x), \dots, r_N(x))^T \quad (10)$$

式中: $x = (T_p, R_e, x_c)$ 称之为决策变量,也就是需要进行估计的参量; $r_i(x) = \hat{t}r_i - tr(x_i)$ 代表真值和测得数据的差值。

得到目标函数:

$$\min f(x) = \frac{1}{2} R(x)^T R(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [r_i(x)]^2 \quad (11)$$

函数 $f(x)$ 的一阶和二阶导数分别为:

$$\nabla f(x) = \sum r_i(x) \nabla r_i(x) = J(x)^T r(x) \quad (12)$$

$$\nabla^2 f(x) = \sum r_i(x) \nabla^2 r_i(x) = J(x)^T J(x) \quad (13)$$

式中: $J(x)$ 为 $r(x)$ 的雅克比矩阵。

$$J(x) = [\nabla r_1(x), \nabla r_2(x), \dots, \nabla r_N(x)] =$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial r_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_N}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial r_N}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (14)$$

采取 Gauss-Newton 法对目标函数进行求解,具体步骤如下。

步骤 1:首先给定 x_i 的初始值,这里将初始值设置为系统设计值,即 x_0 为峰值透过率,有效反射率和峰值位置理想设计值组成的向量;

步骤 2:判断 x_i 是否满足对目标函数的精度要求,达成则停止迭代;

步骤 3:代入公式(15)进行迭代计算;

$$x_{i+1}=x_i-(J_i^T J_i)^{-1} J_i^T r_i \quad (15)$$

步骤 4:将迭代标志位顺延;重复步骤 2~4。

3 仿真分析及实验对比验证

仿真参数与实验使用三通道 F-P 标准具设计参数相同。由于三个通道性能参数基本一致,原理相同,故只对信号 1 通道进行仿真分析。标准具可调腔长为 2 000 nm,最小进步距离为 0.5 nm,可测量数据点位置为-2 000~2 000,实验以较低的采样频率进行扫描,每 40 步进行一次采样,共 81 个采样点。为了仿真激光器频率漂移,在产生仿真信号时,激光频率漂移项 n_1 的参数根据实验统计数据得到。为了仿真激光频率变化可以设置为随机抖动和三角峰的叠加,然而三角窗的叠加并不影响透过率曲线的频率谱,所以这里设置为抖动大小为均值+2、标准差为 5 的随机序列。设置信噪比为 10 dB。蒙特卡罗实验次数为 500 次。

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Parameters for simulation

Parameters	Value
R_e	0.977
T_p	0.8
q	9.34×10^{-4}
x_c	-1 600
λ/nm	1 064
$\Delta\nu/\text{rad}$	0.001 3
θ_0/GHz	0.03

图 4 为使用 MUSIC 算法获得的透过率曲线伪

谱图。横轴表示透过率曲线的频率,纵轴表示伪谱幅值。由于透过率曲线具有线谱的形式,且物理意义为多透射光束,每条透射光纤将在频谱上产生一个尖峰,可以看出第 13 次震荡透射出的光束已经淹没于噪声之中,MUSIC 算法通过信号子空间和噪声子空间的隔离,将较强的信号很好的分离出来。

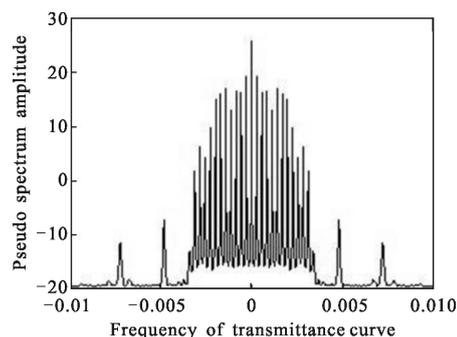


图 4 信噪比为 10 dB 时透过率曲线伪谱

Fig.4 Pseudo-spectrum of transmittance curve with 10 dB SNR

图 5 为谱峰位置的拟合结果,横轴表示搜索获得的谱峰序号,纵轴表示透过率曲线的频率,叉点表示从图 4 中获得的谱峰位置。由公式(7)可知,该拟合结果应该为一条过零点的直线。可以看出 MUSIC 算法对投射波相位差的估计波动小,拟合残差小,估计精度较高。

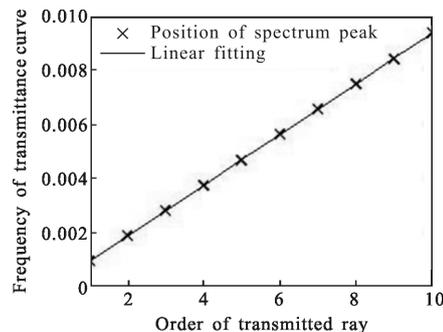


图 5 透射光束相位差线性拟合曲线

Fig.5 Linear fitting curve of transmitted beam phase difference

表 2~5 给出了文中算法和直接使用最小二乘方法的估计误差对比结果。可以看出,文中算法相对直接使用最小二乘法,估计准确性有了很大程度的提升,估计误差皆小于 0.1%,其中步长频率映射比的估计误差小于 0.01%,且估计值总是小于真值,即自由谱间距估值较大。

表 2 步长频率映射比的估计结果

Tab.2 Estimate result of q

Method	Estimate value	Estimate error	Relative error
LSM	9.3156×10^{-4}	0.0244×10^{-4}	0.26%
Proposed in this paper	9.3367×10^{-4}	0.0033×10^{-4}	0.0035%

表 3 有效反射率的估计结果

Tab.3 Estimate result of R_e

Method	Estimate value	Estimate error	Relative error
LSM	0.9281	0.0489	5%
Proposed in this paper	0.9779	0.0009	0.092%

表 4 峰值透过率的估计结果

Tab.4 Estimate result of T_p

Method	Estimate value	Estimate error	Relative error
LSM	0.7889	0.0111	1.3862%
Proposed in this paper	0.8009	0.0009	0.1124%

表 5 峰值位置的估计结果

Tab.5 Estimate result of x_c

Method	Estimate value	Estimate error	Relative error
LSM	-1588.9	11.1	6.9%
Proposed in this paper	-1599.4	0.6	0.00375%

图 6~9 给出了两种估计方法在不同信噪比情况下,四个参数的估计均方根误差。实线表示文中提出的方法,虚线表示直接使用最小二乘法。从图中可

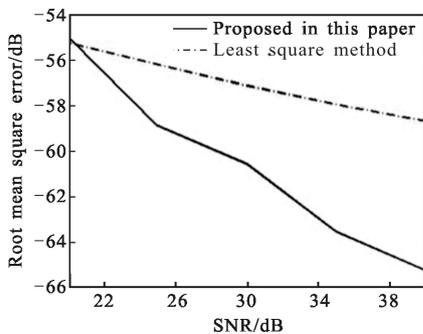


图 6 不同信噪比条件下步长频率映射比估计均方根误差

Fig.6 RMSE of q in different SNR

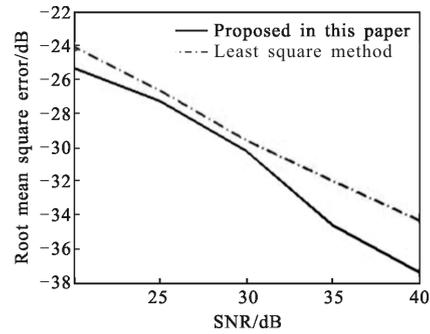


图 7 不同信噪比条件下峰值透过率估计均方根误差

Fig.7 RMSE of T_p in different SNR

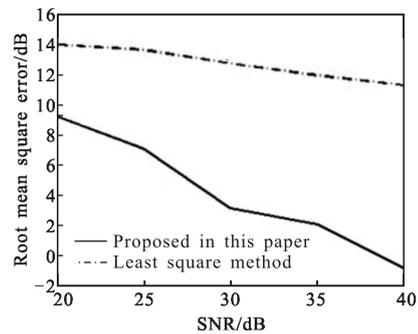


图 8 不同信噪比条件下有效反射率估计均方根误差

Fig.8 RMSE of R_e in different SNR

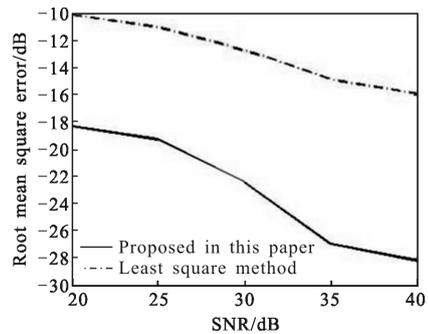


图 9 不同信噪比条件下步长峰值位置估计均方根误差

Fig.9 RMSE of x_c in different SNR

以看出,不同方法得到的参数估计性能均随着信噪比的提高而逐渐提高。在信噪比低于 0 dB 时,由于较多透射光束被噪声淹没,MUSIC 算法获得透射光束相位差信息变少,估计性能不高。但是随着信噪比的提高,估计性能有较大提升,且文中提出的方法性能提升更快,尤其是对自由谱间距的估计,由于引入了谱估计的方法,估计性能大幅提高。对峰值透过率的估计性能并未明显提升,因为文中提出的方法可以在一定程度上抑制激光器频率漂移对透过率曲线

频谱的影响，但是激光器频率漂移对峰值透过率影响较小，文中提出的方法对估计性能仍有一定提升但提升程度有限。

实验使用三通道 F-P 标准具以及 Innolas 公司的 Spotlight_Hybrid II 脉冲 Nd:YAG 激光器。图 10 为 2015 年 4 月的某次实际测量获得的数据。标准具各项设计参数如表 6 所示。扫描时，每个扫描点积累 1 000 发脉冲，采样间隔 20 步，总测量时间为 35 min。拟合时，对扫描得到的数据采样，只使用扫描得到的数据，使得实际拟合数据采样间隔为 40 步，拟合结果和传统方法相一致。

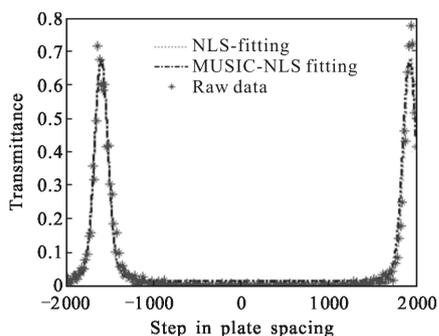


图 10 利用脉冲光扫描标准具得到的透过率曲线拟合结果图
Fig.10 Transmittance curves of F-P etalon by using impulse laser

表 6 三通道 F-P 标准具设计参数

Tab.6 Parameters of three channel FPI

Parameters	Design value
Wavelength/nm	1 064
FSR/GHz	3.3
FWHM/MHz	200
Edge channel separation/MHz	120
Etalon peak transmittance	>60%

从图 11 和图 12 可以看出，峰值中心位置附近两种拟合方案相近，有一定的区别，拟合残差相近，传统方法拟合残差为 0.070 6，文中提出的方法为 0.085 2，而且从图 12 可以看出，文中提出的拟合曲线看似拟合残差大。

图 13 为实验完成之后，利用标准具锁定通道对激光信号的跟踪锁定结果，横轴为时间，纵轴表示透过率曲线半高位置，对应为图 12 的横轴，锁定时间间隔为 10 s。可以看出激光频率对应位置是随时间

有正向的漂移和随机的抖动。

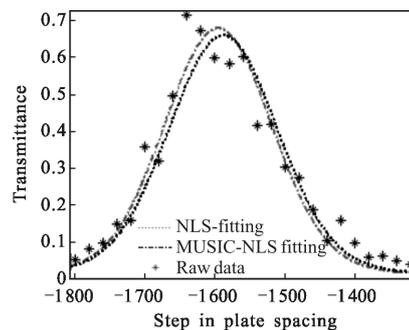


图 11 拟合结果图峰值细节图

Fig.11 Transmittance curves around the first peak area

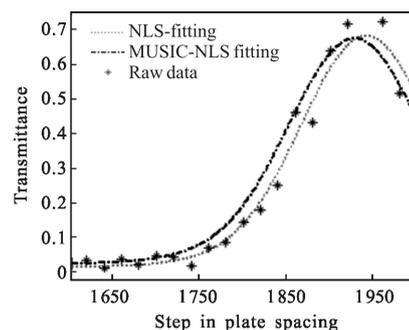


图 12 拟合结果图第二峰值细节图

Fig.12 Transmittance curves around the second peak area

但事实上，由于存在激光频率漂移，扫描得到的结果积累了长时间的激光频率漂移，使得扫描得到的透过率曲线周期变长如图 13 所示。由于实验设备

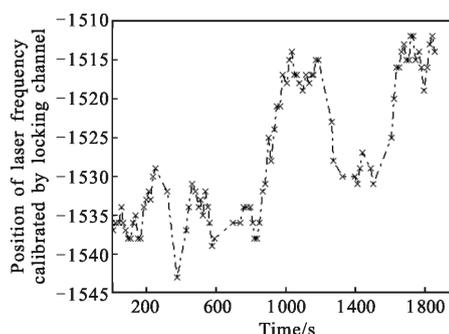


图 13 锁定通道标定的激光频率位置随时间变化图

Fig.13 Position of laser frequency calibrated by locking channel

限制，在扫描标准具透过率曲线时无法实时监控激光频率，实验提供了进行标准具透过率曲线之后对激光频率的检测。因为标准具扫描不影响激光器的工作状态，而且激光器的频率漂移是一个周期较长的现象，故认为在标准具扫描之后的检测可以说明

实验时激光漂移的基本趋势,所以直接使用最小二乘法估计得到自由谱间距会略大于真值。文中算法准确反映出了激光器频率漂移对透过率曲线的影响,验证了其有效性。

4 结 论

文中根据标准具透过率曲线方程的数学形式,提出了一种基于现代谱估计的标准具透过率曲线拟合算法。算法可以在扫描数据较少的情况下获得较高的估计准确性,信噪比为 10 dB 以上时,误差不大于万分之一。同时对比最小二乘法,对激光器频率漂移有一定的抑制。实验使用实际测量数据验证了算法的有效性和必要性,对 F-P 标准具在测风激光雷达中的应用具有重要意义。由于该算法可以使用较少的采样点,因此可以将透过率曲线的估计控制在激光器频率的平稳期,以减少激光频率大幅度抖动带来的误差。该算法将在实践中进一步论证及通过实验对其进行修正改进。

参 考 文 献:

- [1] Diao Weifeng, Zhang Xin, Liu Jiqiao, et al. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 072801.
- [2] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1720-1724. (in Chinese)
- [3] Shu Zhifeng, Tang Lei, Wang Guocheng, et al. Application of triple Fabry-Perot etalon for Rayleigh wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1474-1480. (in Chinese)
- [4] Gentry B, Chen H. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW): validation and performance [C]//Proceedings of the International Symposium on Optical Science and Technology, 2001: 74-81.
- [5] Rees D, Vyssogorets M, Meredith N P, et al. The Doppler wind and temperature system of the ALOMAR lidar [J]. *Atmos Terr Phys*, 1996, 58(16): 1827-1842.
- [6] Zhang Feifei, Dou Xiankang, Sun Dongsong, et al. Analysis on error of laser frequency locking for fiber optical receiver in direct detection wind lidar based on Fabry-Perot interferometer and improvements [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(12): 124102.
- [7] ESA. ESA official announcement of approval and funding of the AEOLUS Project (Space-based Doppler Wind Lidar)[Z]. Paris: ESA, 2002.
- [8] Shen Fahua, Yu Aiai, Dong Jihui, et al. Dual-frequency quad-edge frequency discrimination photoelectric detection technique based on single Fabry-Perot etalon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0312005. (in Chinese)
- [9] Wang Guocheng, Sun Dongsong, Duan Lianfei, et al. Analysis and design of Fabry-Perot etalon of Doppler Wind Lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0301001. (in Chinese)
- [10] Shanguan Mingjia, Xia Haiyun, Hua Zhengyu, et al. Frequency calibration for Rayleigh Doppler wind lidar [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(1): 019001. (in Chinese)
- [11] Flesia C, Korb C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(3): 432-440.
- [12] Xia Haiyun. Direct detection Doppler wind lidar based on aerosol backscattered signal with twin-channel Fabry-Perot etalon [D]. Suzhou: Soochow University, 2006: 29-38. (in Chinese)
- [13] Xia H, Dou X, Shanguan M, et al. Stratospheric temperature measurement with scanning Fabry-Perot interferometer for wind retrieval from mobile Rayleigh Doppler lidar[J]. *Opt Express*, 2014, 22(18): 21775-21789.
- [14] Wang Hongxi, Yang Weidong, Tian Wei, et al. Roll eccentricity harmonic parameter estimation based on Root-MUSIC of HOC and Prony method [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2014, 42(11): 2213-2218. (in Chinese)
- [15] Meng Fanxue. A hybrid algorithm for solving nonlinear least squares problems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 11-14. (in Chinese)