

doi:10.3788/gzxb20164512.1207001

基于周期图最大似然算法的相干激光 测风多普勒频率估计

胡以华^{1,2}, 于磊^{1,2}, 徐世龙^{1,2}, 李乐^{1,2}, 郭力仁^{1,2}

(1 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:采用径向风速的估计不确定度和探测概率作为评价指标,研究了周期图最大似然(PML)算法的多普勒频率估计性能.基于大气分层激光回波模型,分别以PML和周期图最大值法(PM)对回波信号进行处理,验证了PML算法在相干激光测风中的可行性;分析比较不同信噪比条件下PML算法的风速估计不确定度与探测概率.仿真结果表明,在发射脉冲宽度为400 ns、采样点数为128时,PML算法适合在中等信噪比条件下使用,且风速估计的不确定度整体小于PM算法的,在信噪比为-13 dB时径向风速的估计不确定度为0.75 m/s,探测概率在90%以上,该研究为后续的外场试验提供了指导.

关键词:信号处理;测风;多普勒频率估计;周期图最大似然算法;估计不确定度;探测概率

中图分类号:TN958.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)12-1207001-6

Doppler Frequency Estimation of Coherent Doppler Wind Lidar Based on Periodogram Maximum Likelihood Algorithm

HU Yi-hua^{1,2}, YU Lei^{1,2}, XU Shi-long^{1,2}, LI Le^{1,2}, DONG Xiao^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Pulse Power Laser Technology, Anhui Province, Hefei 230037, China)

(2 Key Laboratory of Electronic Restriction, Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: Using the estimation uncertainty of the radial velocity and the detection probability as the evaluation index, the Doppler frequency estimation performance of Periodogram Maximum Likelihood (PML) algorithm was studied. Based on the stratified atmosphere laser echo model, the echo signal was processed by PML and Periodogram Maximum method (PM) respectively to verify the feasibility of PML algorithm. The uncertainties of estimated wind speed and detection probability were analyzed comparatively under the different signal-to-noise ratios condition with PML algorithm. The simulation results show that, with a transmitting pulse width of 400ns and the sampling points of 128, the PML algorithm is suitable for moderate signal-to-noise ratio, and the overall uncertainty of the estimated wind speed is lesser than PM algorithm. When the signal-to-noise ratio is -13 dB, the radial velocity estimation uncertainty is 0.75 m/s and detection probability is more than 90%. This study provides guidance for subsequent field trials.

Key words: Signal processing; Wind field detection; Doppler frequency estimation; Periodgram maximum likelihood algorithm; Estimation uncertainty; Detection probability

OCIS Codes: 070.0070; 070.1170; 010.1290; 280.3340

0 引言

大气风场的精确测量在气象、风能发电、机场风切

变预警、机场飞机尾涡监测等实际应用中有着极其重要的意义^[1-3].晴空条件下,全光纤相干多普勒测风激光雷达相比于微波雷达具有高准确度、高时空分辨率、

基金项目:国家自然科学基金(No.61271353)和安徽省自然科学基金(No.1308085QF123)资助

第一作者:胡以华(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为空间信息和光电信息处理. Email:skl_hyh@163.com

通讯作者:于磊(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电信息处理. Email:skl_yulei@163.com

收稿日期:2016-06-23;录用日期:2016-08-17

<http://www.photon.ac.cn>

高探测灵敏度、高信噪比等特点;由于能够获得精确的风场信息,目前其已成为大气风场探测可靠的技术手段和研究热点之一^[4].

为了能够实时掌握机场上空的风场及风场扰动信息,保障航空飞行安全,在前期工作中本课题组提出运用相干激光探测机场上空风场扰动的方法^[5-7].大气风场扰动主要是由于空中飞行目标引起的局部大气风场的变化,从而改变一定区域空间内的风场运动信息.空中目标产生的这些扰动会在周围环境中较大范围内扩散,从而使风场扰动探测成为可能^[8].由于机场上空背景风场的存在,获取高准确度的风场扰动信息成为研究的难点.相干激光测风雷达以大气中气溶胶粒子为作用对象,利用气溶胶粒子在探测光束方向上产生的多普勒效应进行径向风速测量,进而获取探测区域内的三维风场矢量速度信息^[9].高准确度风场信息的获取的实质是能够从含有噪声的大气气溶胶后向散射激光回波中精确提取多普勒频移信息^[10].

目前常用的多普勒频移估计算法主要有脉冲对算法(Pulse Pair, PP)^[11-12]、递归自适应滤波频率估计法^[13]、周期图最大值法(Periodogram Maximum, PM)^[14]、最大似然估计法(Maximum Likelihood, ML)^[15].其中脉冲对算法计算简单不需要掌握信号谱宽和信噪比等先验信息,但是这种算法在低信噪比时估计性能会严重下降,限制了该算法在相干测风激光雷达中的应用;递归自适应滤波频率估计法是一种在低信噪比条件下先剔除数据异常值然后进行频率优化估计的方法,此方法在一定程度上提高了数据的可靠性和频率估计的准确度;周期图最大值法是常用的频率估计方法,通过多脉冲周期图非相干累加平均来消除噪声的影响,能够达到很好的估计准确度,但在采样数据长度较小时,会降低频谱分辨率,当采样数据长度较大时,又会降低风速估计的时间分辨率.最大似然估计法相比于以上算法,在高信噪比和采样数据序列很大时,其估计性能最接近克拉美罗界(Cramer-Rao Bound, CRB),但当采样数据序列很大时,增加了计算量,从而限制了风速数据更新率.

本文详细介绍了周期图最大似然估计算法的原理,并基于大气分层激光回波模型,分别以PML和PM算法对回波信号进行处理,验证PML算法的可行性,比较分析不同信噪比条件下PML算法估计风速的不确定度和探测概率.

1 周期图最大似然估计算法

1.1 常规相干激光回波信号模型

相干激光雷达系统接收的回波信号是探测距离范围内大量气溶胶粒子后向散射信号的叠加,可以简单地将其描述为一个零均值的复高斯随机过程.后向散

射信号与本振光混频后经平衡探测器转换为电信号并进行采样,采样得到 M 个采样数据序列,第 k 个数据序列可以表达为^[16-17]

$$z_k = s_k \exp(2\pi i f T_s k) + n_k \quad (1)$$

式中,第一项为回波中的信号, f 为多普勒频率, T_s 为采样间隔, n_k 为接收的回波中不相关噪声,其统计特性为 $\langle n_k n_l \rangle = 0$, $\langle n_k n_l \rangle = N_0 \delta_{k-l}$, N_0 为平均噪声功率, δ 为Kronecker delta函数, k, l 为采样数据序列序号.回波信号的统计特性由其协方差矩阵描述

$$\mathbf{R}_M = \langle z_k z_l^* \rangle \quad (2)$$

假设在每发脉冲探测时间内大气运动状态不变,即回波信号和噪声是平稳随机过程,则有 $\mathbf{R}_M = \mathbf{R}_{k-l}$,则回波信号的自协方差可以表示为

$$\mathbf{R}_k = S_{NR} \exp[-2\pi^2(\omega k T_s)^2 + 2\pi i f k T_s] + \delta_k \quad (3)$$

式中, ω 为后向散射信号谱宽, S_{NR} 为信噪比.在协方差矩阵为非奇异阵时,信号 z 的联合概率密度函数为

$$p(z|\boldsymbol{\theta}) = \pi^{-M} |\mathbf{R}|^{-2} \exp(-z^H \mathbf{R}^{-1} z) \quad (4)$$

式中, $\boldsymbol{\theta} = [f, \omega, S_{NR}]$ 为估计的参量向量,这里信号谱宽和信噪比作为先验信息假设已知,仅对多普勒频率 f 进行估计,参量 $\boldsymbol{\theta}$ 最大似然估计的似然函数可以表示为

$$L(z, \boldsymbol{\theta}) = -z^H \mathbf{R}^{-1} z - \ln(|\mathbf{R}|) - M \ln \pi \quad (5)$$

1.2 频率估计算法

周期图最大似然估计利用周期图用来计算变换后信号的谱密度,然后构造新的似然函数估计定位周期图的最大值.当采样样本数很大时,对于 M 个采样数据序列样本做离散傅里叶变换有^[18-19]

$$\mathbf{u} = \mathbf{U} z^* \quad (6)$$

式中, \mathbf{U} 为酉矩阵,其矩阵元素可以表示为 $U_M = M^{-1/2} \exp(-2\pi i k l / M)$,因此信号 z 经离散傅里叶变换后第 k 个样本序列可以表示为

$$u_k = M^{-1/2} \sum_{l=0}^{M-1} z_l \exp(-2\pi i k l / M) \quad (7)$$

变换后的协方差矩阵可以描述为

$$\mathbf{R}' = \langle \mathbf{u} \mathbf{u}^H \rangle = \langle \mathbf{U} z z^H \mathbf{U}^H \rangle = \mathbf{U} \langle \mathbf{U} z z^H \rangle \mathbf{U}^{-1} = \mathbf{U} \mathbf{R} \mathbf{U}^{-1} \quad (8)$$

假设随机变量 u_k 统计独立且互不相关,因此其协方差矩阵 \mathbf{R}' 为一对角阵,即

$$\mathbf{R}' = \langle u_k u_l^* \rangle = \mathbf{Q}(k, \boldsymbol{\theta}) \delta_{k-l} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{Q}(k, \boldsymbol{\theta})$ 为向量 \mathbf{u} 的自相关函数,可以描述为

$$\mathbf{Q}(k, \boldsymbol{\theta}) = \langle u_k u_k^* \rangle = \sum_{n=-(M-1)}^{M-1} \mathbf{R}_n (1 - |n|/M) \cdot \exp(-2\pi i k n / M) \quad (10)$$

将式(8)代入式(5)可得周期图的最大似然估计的似然函数为

$$L(\mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}) = - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{M-1} (u_k^* u_m \mathbf{R}'^{-1} \exp[2\pi i f(k-m)T_s]) = - \sum_{m=0}^{M-1} (u_m^* u_m / \mathbf{Q}_m) = - \sum_{m=0}^{M-1} (\mathbf{Q}_m / \mathbf{Q}_m) \quad (11)$$

式中, $\hat{\mathbf{Q}}_m = u_m^* u_m$ 为信号经过离散傅里叶变换后的周期

图估计,所以多普勒频率的周期图最大似然估计为

$$\hat{f}_{\text{PML}} = \max L(\mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}) \quad (12)$$

2 大气分层回波信号仿真模型

在激光信号模型中常用的有高斯自协方差信号模型、Komogorov 湍流机制的离散信号模型和大气分层回波信号仿真模型^[17,20].高斯自协方差信号模型比较简单,没有考虑发射光脉冲、本振光以及大气湍流等参量,一般用于原理讨论. Komogorov 湍流机制的离散信号模型只是考虑了湍流对信号功率谱展宽的作用,没有考虑大气衰减的因素. 大气分层回波信号仿真模型则考虑了相应的实际参量弥补了以上两个模型的不足,使仿真结果更加准确. 因此采用大气分层回波信号仿真模型进行信号仿真.

相干激光外差探测中接收的后向散光来自大气中大量的气溶胶粒子后向散射信号,大气中单个气溶胶粒子的回波信号幅度和相位有很强的随机性,无法直接对每一个粒子的散射回波进行数值模拟来近似计算整个外差系统的回波信号,文献[21]中提出了一种物理模型即大气分层激光回波信号模型. 假设在可探测范围内,将大气沿光束传输路径进行分层,并认为光脉冲探测体积内每一层的气溶胶粒子运动状态相同,每一层的散射场服从高斯分布且相互独立,将每一层的回波信号进行非相干积累,得到整个系统的回波信号 $S(t)$ 为

$$S_M(t) = 2P_L^{1/2} \exp(j2\pi\Delta f t) \sum_{m=1}^M \left[P_T \left(t - \frac{2r_m}{c} \right) \right]^{1/2} \times \exp \left[j\varphi \left(t - \frac{2r_m}{c} \right) \right] \kappa_m \exp \left(-j4\pi f \frac{v_m t}{c} \right) \quad (13)$$

式中, P_L 为本振光功率, P_T 为发射的激光脉冲功率, Δf 为声光移频量, r_m 为分层到接收中心的距离, φ 为相位函数, f 为发射光频率, v_m 是沿光束传播方向的径向风速, 层数 $M = c \times \tau / (2\Delta r)$, $\Delta r = c\Delta T / 2$ 为分层厚度, ΔT 为采样时间. κ_m 是一个零均值的高斯随机变量, 包含单个粒子运动引起的散斑效应和大气湍流引起的大气折射率变化, 其均值为

$$\langle |\kappa_m|^2 \rangle = \exp \left[-2 \int_0^{z_m} \alpha(r) dz \right] \beta(r) \pi R_p^2 \gamma_m \Delta r / r_m^2 \quad (14)$$

$$\alpha(r) = 4.2 \times 10^{-2} \exp(-r/2) + 8.7 \times 10^{-5} \cdot \exp \left[-(r-20)^2 / 36 \right] + 1.67 \times 10^{-4} \exp(-r/7) \quad (15)$$

$$\beta(r) = 0.8398 \times 10^{-3} \exp(-r/2) + 1.74 \times 10^{-6} \cdot \exp \left[-(r-20)^2 / 36 \right] + 2 \times 10^{-5} \exp(-r/7) \quad (16)$$

式中, $\exp \left[-2 \int_0^{z_m} \alpha(r) dr \right]$ 为大气消光系数, $\beta(r)$ 为后向散射系数, R_p 为望远镜接收半径, γ_m 为系统效率.

大气分层模型考虑到激光束在大气中传输及其与大气粒子之间的相互作用,可结合实际系统参量和实际大气情况,合理地对待向风速进行取值,对相干激光探测风场扰动下的回波信号进行时域仿真用于后续的数据处理与验证.

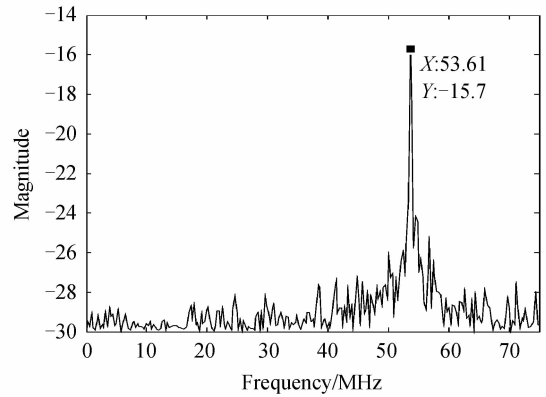
3 算法性能分析

3.1 基于回波信号 PML 估计风速的可行性分析

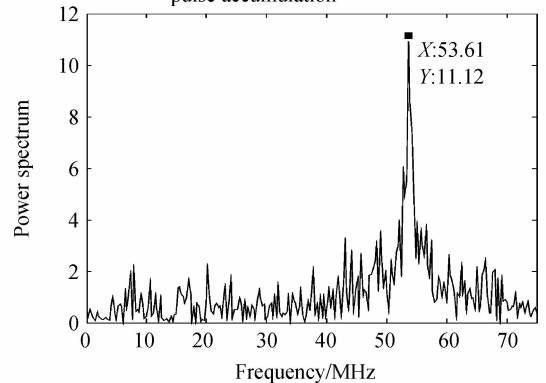
根据课题组设计的 $1.55 \mu\text{m}$ 飞机尾涡激光探测系统参量^[22],要求系统在机场探测距离为 5 km,距离分辨率为 60 m,测速范围为 $\pm 30 \text{ m/s}$,为了能够捕捉足够精细的风场速度信息,要求径向速度分辨率 1 m/s ,对应多普勒频移 $< 1.29 \text{ MHz}$. 假设单个距离门内风速为常风速,下面利用回波信号模型通过 PML 和 PM 算法估计出多普勒频移,仿真实验参量见表 1. 假设探测系统在扫描过程中,激光脉冲在某时刻以某一仰角与方位角对机场上空风场进行探测,在此探测方向上第一距离门内各分层的径向风速均为 1 m/s . 在脉冲积累数为 20,采样点数 512 点,信噪比为 -10 dB 的情况下对加入高斯白噪声的多组脉冲回波进行非相干累加,利用快速傅里叶变换算法降低计算量,减少计算时间,得到单个距离门内风场回波信号的似然函数和功率谱,如图 1.

表 1 仿真实验参量
Table 1 Parameters of simulation experiment

Parameters	λ /nm	P_L /mW	Δf /MHz	τ /ns	R_p /mm	γ_m	Δz /m	E /mJ
Specification	1 550	1	55	400	300	0.12	0.1	10



(a) Likelihood function distribution with pulse accumulation



(b) Power spectrum distribution with pulse accumulation

图 1 脉冲累积后的似然函数分布和功率谱
Fig. 1 Likelihood function distribution and power spectrum with pulse accumulation

在系统移频 55 MHz 的情况下,距离门内风速为 1 m/s 时,根据多普勒测风原理曲线峰值对应的多普勒频率理论值为 53.71 MHz,多普勒频为曲线峰值与系统移频的差值,对应的多普勒频移为 1.29 MHz. 图(a)和图(b)曲线峰值对应的峰值频率均为 53.61 MHz,与理论的多普勒频移相差 0.1 MHz,对应径向风速误差为 0.077 5 m/s,小于 0.1 m/s. 为了进一步说明 PML 估计算法的可行性,对同一个距离门任意选取不同的径向速度值,进行蒙特卡洛仿真,信噪比为 -10 dB,分别使用 PML 和 PM 算法进行 1 000 次估计,将估计得到的结果进行了对比,给出了线性拟合曲线,仿真结果如图 2.

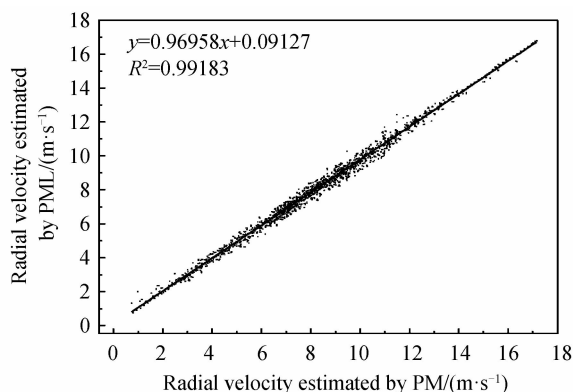


图 2 PML 和 PM 估计的径向风速值

Fig. 2 Estimated radial velocity with PML and PM algorithm

仿真结果表明两种算法估计的径向风速值相关系数优于 0.99,其中估计的径向风速大小偏差的平均值为 0.070 86 m/s,标准差为 0.376 9 m/s,总体来看,两种算法估计的径向风速的偏差小于 0.1 m/s,因此两种算法估计的结果具有很好的 consistency,并且运用 PML 算法能够估计出相干激光回波中的多普勒频移信息.

3.2 PML 风速估计不确定度分析

对于一个特定的估计子性能评价的基准可以用无偏性和克拉美罗界来描述,考虑 PML 是无偏估计的情况下,由 Fisher 信息矩阵,PML 估计风速的标准差可以表示为^[23]

$$v_{\text{PML}} = \frac{\lambda}{2} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \left[\frac{d_m^2(f)}{Q_m^2(f)} \right] \right\}^{-1/2} \quad (17)$$

式中, $d_m(f) = \partial Q_m(f) / \partial f$, 风速无偏估计的精确 CRB 可以表示为^[19]

$$v_{\text{CRB}} = \frac{\lambda}{2} \left(-4\pi^2 T_s \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{L-1-k} (l-k)^2 Z_{kl} (Z^{-1})_{lk} \right)^{-1/2} \quad (18)$$

式中, $Z_{kl} = S_{\text{NR}} \exp[-2\pi^2 T_s \omega^2 (k-l)^2] + \delta_{k-l}$, $\omega = \sqrt{\ln 2} T_s / \sqrt{2} \pi \tau$ 为发射激光脉冲的谱宽, τ 为发射光脉冲的脉宽. 在一个探测回波距离门内利用快速傅里叶变换得到多发脉冲的 L 个采样点的累积平均周期图即功率谱分布为^[24]

$$W_l(f) = N^{-1} \sum_{n=1}^N \frac{1}{L} \left| \sum_{l=0}^{L-1} z_l \exp(-j2\pi fl/L) \right|^2 \quad (19)$$

式中, N 为发射的激光脉冲数, $l=0,1,2,\dots,L-1$. 因此周期图最大值法估计的径向风速为

$$v_{\text{PM}} = \frac{\lambda}{2} [\text{argmax } W_l(f)] \quad (20)$$

风速估计的不确定度可以用风速估计标准差来描述,在发射脉冲谱宽已知的情况下,分析两种算法估计风速的标准差以及风速估计的精确 CRB 随信噪比变化的关系. 为了减少计算精确 CRB 的时间,仿真选取 128 的采样点,发射激光波长 1.55 μm ,脉宽为 400 ns,信噪比变化范围在 -30 dB~15 dB,采样频率 500 MHz,累积脉冲数为 20,仿真结果如图 3.

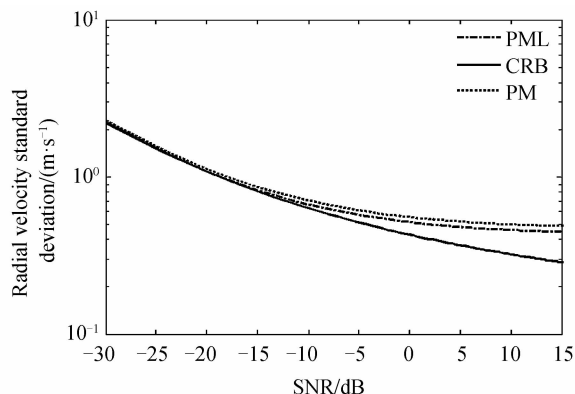


图 3 风速估计标准差与信噪比的关系

Fig. 3 Relationship between standard deviation of estimated radial velocity and signal-to-noise ratio

由图中可看出,在低信噪比时(-30 dB~-15 dB),PML 估计性能与精确 CRB 非常接近,当信噪比低于 -15 dB 时,PML 估计风速的误差下限为 0.8 m/s,当信噪比大于 -15 dB 时,随着信噪比的增加,PML 估计风速的标准差逐渐高于精确 CRB,但在高信噪比区域估计的不确定度降低的幅度并不是很明显. 同时随着信噪比的增加,PML 估计风速性能比 PM 估计整体较好,PML 估计的风速标准差比 PM 估计风速的标准差低 0.040 6 m/s. 由以上仿真结果可知,在信噪比为 -15 dB 时,运用 PML 估计可达到径向速度分辨率 1 m/s 的指标要求,由此可以用来提取远场回波的多普勒信息,但由于在高信噪比条件下估计的不确定度降低的范围不大,因此 PML 估计适合用于中等信噪比条件.

3.3 PML 风速估计的探测概率仿真分析

在探测过程中,由于噪声的影响,一部分信号会被噪声淹没,因此使得在估计多普勒频率时会得到错误的估计,因此可以将探测概率定义为估计算法能够正确估计出多普勒频率的概率. 在多次估计中,会得到多普勒频率的统计分布,用相应的概率密度函数模型拟合频率分布,概率密度函数用单高斯模型来描述,具体模型为^[16-17]

$$\text{PDF}(f) = \frac{b}{B_f} + \frac{1-b}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{f_e - f_m}{2\sigma^2} \right] \quad (21)$$

式中, b 为“坏”的多普勒频率估计的百分比($0 \leq b \leq 1$), σ 为“好”的多普勒频率估计的标准差, f_e 为估计的频率, f_m 为距离门内的平均多普勒频率即统计分布的中心频率, B_f 为多普勒频率搜索范围,将 $1-b$ 定义为探测概率.对估计得到的多普勒频率分布进行拟合后获得中心频率 f_m 和标准差 σ ,设定 $f \pm 3\sigma$ 为正确估计频率的区间即为“好”的多普勒估计区间.假设单个距离门内的平均风速为0,蒙特卡洛仿真次数为1 000次,相应的仿真参量与3.1节相同.根据算法估计多普勒频率的仿真结果,探测概率随着信噪比变化的曲线如图4.

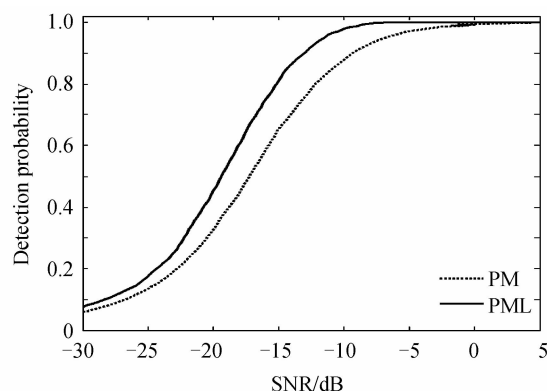


图4 探测概率与信噪比的关系

Fig. 4 Relationship between detection probability and signal-to-noise ratio

从图中可看出,运用PML算法和PM算法若要达到90%的探测概率,则分别至少需要的信噪比为-14 dB和-9 dB,并在-13 dB时两者之间的探测概率相差最大,PML算法的探测概率比PM算法高9.6%,由图3的仿真结果可知,在-13 dB时,PML算法估计风速的不确定度为0.75 m/s,因此可得出运用PML算法在信噪比为-13 dB风速估计的不确定度为0.75 m/s并能够达到90%以上的探测概率.

4 结论

在相干激光探测的实际应用中,参量的精确估计是需要解决的重要问题.文中验证了周期图最大似然估计算法在相干激光探测风场应用中的可行性,并采用风速估计的不确定度和探测概率来评价算法的性能,仿真结果表明,PML算法适用于中等信噪比条件下,风速估计的不确定度整体优于PM算法,在中等信噪比为-13 dB的条件下能够达到满足风速小于1 m/s的估计不确定度并且探测概率在90%以上,这对不同的探测指标需求选择合适的发射激光脉冲能量具有重要指导意义,同时为获取机场上空的风场及风场扰动信息提供了理论支持.针对不同的估计算法都有其相应的适用条件,因此对于不同的探测指标需求,如何自适应选取最优的估计算法还有待进一步研究.

参考文献

- [1] HU Shen-sen, LIU Ji-qiao, DIAO Wei-feng, *et al.* Study of wind profile inversion based on airborne Doppler wind lidar[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2016, **36**(1): 96-101. 胡申森, 刘继桥, 刁伟峰, 等. 机载多普勒激光测风雷达风场反演研究[J]. *气象科学*, 2016, **36**(1): 96-101.
- [2] DOLFI-BOUTEYRE A, CANAT G, VALLA M, *et al.* Pulsed 1.5- m LIDAR for axial aircraft wake vortex detection based on high-brightness large-core fiber amplifier[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(2): 441-450.
- [3] ANDO T, KAMEYAMA S, HIRANO Y. All-fiber coherent Doppler LIDAR technologies at Mitsubishi electric corporation[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2008, **1**: 12011.
- [4] BAI Xue, GUO Pan, CHEN Si-ying, *et al.* Simulation in the time domain and time-frequency analysis for coherent doppler wind lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(1): 0114003. 白雪, 郭磐, 陈思颖, 等. 相干多普勒测风激光雷达时域信号仿真及时频分析[J]. *中国激光*, 2015, **42**(1): 0114003.
- [5] WU Yong-hua, HU Yi-hua, DAI Ding-chuan, *et al.* Research on the technique of aircraft wake vortex detection based on 1.5 μm Doppler lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 811-817. 吴永华, 胡以华, 戴定川, 等. 基于1.5 μm 多普勒激光雷达的飞机尾涡探测技术研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 811-817.
- [6] XU Shi-long, HU Yi-hua. Extrication of wake vortex parameters based on lidar echo[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 54-58. 徐世龙, 胡以华. 基于激光雷达回波的飞机尾涡参量提取[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1): 54-58.
- [7] XU Shi-long, HU Yi-hua, WU Yong-hua. Identification of aircraft wake vortex based on Doppler spectrum features[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(12): 1826-1830. 徐世龙, 胡以华, 吴永华. 基于多普勒谱特征的飞机尾涡识别[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(12): 1826-1830.
- [8] WU Yong-hua, HU Yi-hua, GU You-lin, *et al.* Research on a new air moving target information acquisition algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100510. 吴永华, 胡以华, 顾有林, 等. 一种新型的空中运动目标信息获取算法的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): s100510.
- [9] LI Lu, GUO Pan, ZHANG Yin-chao, *et al.* Application of smoothness prior approach for coherent doppler wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(7): 0728001. 李路, 郭磐, 张寅超, 等. 先验平滑方法在相干测风激光雷达中的应用[J]. *光学学报*, 2015, **35**(7): 0728001.
- [10] WANG Guo-cheng, SUN Dong-song, DUAN Lian-fei, *et al.* Analysis of factors affecting the data accuracy of Doppler wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(09): 0901003. 王国成, 孙东松, 段连飞, 等. 多普勒测风激光雷达风场数据影响因素分析[J]. *光学学报*, 2015, **35**(09): 0901003.
- [11] ABEYSEKERA S. Performance of pulse-pair method of Doppler estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1998, **34**(2): 520-531.
- [12] ABEYSEKERA S. Efficient frequency estimation using the pulse-pair method at various lags[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, **54**(9): 1542-1546.
- [13] DABAS A M, DROBINSKI P, FLAMANTI P H. Adaptive filters for frequency estimate of heterodyne Doppler lidar

- returns; recursive implementation and quality control[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1999, **16**(3): 361-372.
- [14] JIA Xiao-dong, SUN Dong-feng, SHU Zhi-feng, *et al.* Optimal design of the telescope in coherent lidar and detection performance analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 0301001.
贾晓东, 孙东松, 舒志峰, 等. 相干激光雷达中望远镜的优化及探测性能分析[J]. *光学学报*, 2015, **35**(3): 0301001.
- [15] FREHLICH R. Performance of maximum likelihood estimators of mean power and Doppler velocity with A priori knowledge of spectral width[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1999, **16**(11): 1702-1709.
- [16] JIA Xiao-dong, SUN Dong-feng. Maximum likelihood discrete spectral peak estimation in coherent wind lidar and Monte Carlo simulation[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2015, **27**(6): 69-74.
贾晓东, 孙东松. 相干激光雷达中最大似然离散谱峰值估计及 Monte Carlo 仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2015, **27**(6): 69-74.
- [17] GUO Xian-bin, GUO Pan, ZHANG Yin-chao, *et al.* Performance analysis of maximum likelihood spectral estimator compared with PM estimator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(3): 0314001.
郭贤斌, 郭磐, 张寅超, 等. 最大似然频谱估计法与周期图最大值法的性能比较分析[J]. *中国激光*, 2016, **43**(3): 0314001.
- [18] FREHLICH R. Effects of wind turbulence on coherent Doppler lidar performance[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1997, **14**(1): 54-75.
- [19] FREHLICH R. Cramer-Rao bound for Gaussian random processes and applications to radar processing of atmospheric signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1993, **31**(6): 1123-1131.
- [20] KAMEYAMA S, ANDO T, ASAKA K, *et al.* Performance of discrete-fourier-transform-based velocity estimators for a wind-sensing coherent Doppler lidar system in the Kolmogorov turbulence regime[J]. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2009, **47**(10): 3560-3569.
- [21] SALAMITOU P, DABAS A, FLAMANT P H. Simulation in the time domain for heterodyne coherent laser radar. [J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(3): 499-506.
- [22] XU Shi-long, HU Yi-hua, GUO Li-ren. Design and performance analysis of aircraft wake vortex coherent laser detection system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(8): 100-105.
徐世龙, 胡以华, 郭力仁. 飞机尾涡相干激光探测系统设计与性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, **51**(8): 100-105.
- [23] FREHLICH R. Simulation of Coherent Doppler lidar performance in the weak-signal regime [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1996, **13**(3): 646-658.
- [24] IGORS, FREHLICH K, STEPHAN R. Measurement of atmospheric turbulence by $2 \mu\text{m}$ Doppler lidar[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2005, **22**(11): 1733-174.