

最大似然频谱估计法与周期图最大值法的性能比较分析

郭贤斌 郭 磐 张寅超 陈思颖 陈 和

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 研究宽带信噪比(R_{SNW})和有效功率谱宽度对最大似然(ML)法多普勒频率估计结果的影响,采用探测概率和正确估计频率标准差来描述ML算法对仿真信号和实验数据的处理性能,并与周期图最大值(PM)法所得结果进行比较。经理论仿真和对中国科学院上海光学精密机械研究所1.5 μm 全光纤相干测风激光雷达实测数据的反演处理,结果表明,高谱宽度下,ML算法的正确估计频率标准差与相比PM可降低0.5 MHz,达到90%的探测概率所需宽带信噪比ML算法与PM算法相比低2 dB。表明ML算法的正确估计频率标准差能与PM算法相比不高于1.1 MHz,探测概率高9%。要获得风速精度小于1 m/s同时探测概率在80%以上,所需宽带信噪比大于-14 dB。

关键词 遥感; 相干多普勒测风激光雷达; 多普勒频率估计; 最大似然法; 周期图最大值法; 正确估计频率标准差; 探测概率

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0314001

Performance Analysis of Maximum Likelihood Spectral Estimator Compared with PM Estimator

Guo Xianbin Guo Pan Zhang Yinchao Chen Siying Chen He

School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The effect of the wideband signal-to-noise ratio (R_{SNW}) and the effective power spectral width on the Doppler frequency estimation performance using maximum likelihood (ML) estimator have been studied. The performance of the ML algorithm is applied to simulation signal. Experimental data are described by the detection probability and the standard deviation (SD), and also compare with periodogram maximum (PM) estimator. The data are acquired by 1.5 μm all fiber coherent Doppler lidar in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. The results indicate that ML's SD can enhance 0.5 MHz higher than PM's under the same spectral width. ML is close to PM under the narrow spectral width. To satisfy the 90% detection probability, the required R_{SNW} is 2 dB smaller than PM's. In the real-process, ML's SD can be 1.1 MHz lower than the PM, and the detection probability is 9% lower than PM. To obtain the wind speed accuracy less than 1 m/s while the detection probability is above 80%, the required R_{SNW} is larger than -14 dB.

Key words remote sensing; coherent Doppler wind lidar; Doppler frequency estimation; maximum likelihood estimator; periodogram maximum estimator; good estimate standard deviation; detection probability

OCIS codes 010.3640; 280.3640; 010.0280; 070.1170; 280.3340; 280.7060

1 引言

相干多普勒测风激光雷达(CDL)基于外差探测方式对大气风场进行探测,能探测微弱信号,灵敏度较高,

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-08-21

基金项目: 总装预研基金(513210604)

作者简介: 郭贤斌(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达大气风场测量方面的研究。E-mail:gxb20092378@163.com

导师简介: 郭 磐(1981—),男,博士,讲师,主要从事激光雷达信号获取和处理算法方面的研究。

E-mail: guopan@bit.edu.cn(通信联系人)

适合晴空探测,已经成功应用于遥感探测的诸多方面,如风轮廓线探测、风剪切和湍流等非平稳风场探测以及气溶胶的探测^[1]。

由于噪声和大气风场的运动,准确估计多普勒频率具有一定的难度。目前普遍的多普勒频率估计算法有脉冲对(PP)算法、多脉冲对(PPP)算法、周期图最大法(PM)算法、最大似然(ML)算法等。PP算法和PPP算法计算简单但误差较大,PM算法是最常用的算法。ML算法比上述算法精度更高,更接近克拉美罗下限(CRLB)^[2],是非常有效的无偏估计算法。

国际上相关学者已经对于频率估计的ML算法做了很多研究工作,ML算法研究的重要参数为信噪比、功率谱宽度、采样数和累计脉冲数等。1993年Rye等^[3-4]利用ML算法对相干测风激光雷达系统进行风速精度分析,得到风速精度与信噪比和累积脉冲数的关系并采用CRLB描述风速精度的极限,但是仿真参数是在已知的条件下进行分析。1999年Frehlich^[5]分析只有功率谱宽度已知、信噪比未知的条件下,进行信噪比估计,结果表明估计信噪比和已知信噪比两者的结果并没有显著差异,提高了ML算法的适应性。2014年Sobolev等^[6]总结了ML算法在激光多普勒雷达系统中的参数估计理论,并指出其未来的若干研究方向:复杂噪声条件下的参数估计的准确性;湍流影响下的ML算法性能。

国内也有部分针对基于ML算法对多普勒频率估计的研究,2008年王纪强等^[7]分析并推导多普勒频率和频率变化率估计方差的CRLB,并讨论了各参数的最大似然估计(MLE)。2012年靳笑晗等^[8]利用ML算法分别对仿真模型数据和系统实测数据进行多普勒频移反演,同时对ML和PM算法的实际处理效果进行对比。

本文基于Komogorov湍流仿真信号模型^[9],用有效功率谱宽度来等效湍流的作用,以信噪比和有效功率谱宽度两个关键参数来分析ML算法的性能,设定频率正确估计区间,利用蒙特卡罗仿真方法得到探测概率和正确估计频率标准差,并用ML算法对实验数据进行多普勒频率进行估计,与PM算法所得结果进行对比。

2 最大似然估计

相干测风回波信号是经过大气气溶胶粒子散射后产生的带有随机幅度和相位的信号。将多普勒频率参数作为估计量,对距离门内进行 M 个数据点样,采样间隔为 T_s ,得到 M 个信号采样序列 z_1, z_2, \dots, z_M ,其信号表达式为^[10]

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

式中 $s_k \exp(2\pi j f T_s k)$ 为信号成分, n_k 为信号非相关噪声成分,其统计特性为 $\langle n_k n_m \rangle = 0$, $\langle n_k n_m^* \rangle = N \delta_{k-m}$,平均噪声功率 $N = \langle |n_k|^2 \rangle = 1$, $|n_k|$ 为复噪声变量的模, δ 为克罗内克函数, f 为多普勒频率。

多普勒激光雷达信号是一个零均值圆型复高斯随机过程^[5,10],其概率密度函数(PDF)是联合高斯分布,由其协方差矩阵来描述为

$$R_{kl} = \langle z_k z_l^* \rangle. \quad (2)$$

假设大气状态在测量时间内是固定不变的,则 $R_{kl} = R_{k-l}$ 。则上述信号的自协方差可以表示为

$$R(kT) = R_{SN} \exp[-2(\pi w T_s)^2] \exp(2\pi j f k T_s) + \delta_k, \quad (3)$$

式中 w 为功率谱宽度, $R_{SN} = \langle |s_k|^2 \rangle / \langle |n_k|^2 \rangle$ 代表平均信号功率和噪声功率之比, $k=0$ 时, $\delta_k=1$; $k \neq 0$ 时, $\delta_k=0$ 。其PDF为

$$p(z|\Theta) = \pi^{-M} |\mathbf{R}|^{-1} \exp(-z^T \mathbf{R}^{-1} z), \quad (4)$$

式中 $\Theta = [f, w, R_{SN}]$ 为参数向量,可以得到其似然函数为

$$L(p|\Theta) = -z^T \mathbf{D} (\mathbf{R}_{SN} \mathbf{G} + \mathbf{I})^{-1} \mathbf{D}^* z - \ln(|\mathbf{R}|) - M \ln \pi, \quad (5)$$

式中 \mathbf{D} 为对角矩阵, $D_{kk} = \exp(2\pi j f k T_s)$, \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{G} 为信号 \mathbf{s} 的实协方差矩阵, $(\mathbf{R}_{SN} \mathbf{G} + \mathbf{I})^{-1}$ 为实协方差矩阵,它的逆矩阵为托普利兹矩阵。据此可将(5)式转化为二次形式为

$$L(p|\Theta) = - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{M-1-m} z_m^* \lambda_{m,m+k} z_k \exp[2\pi j f (m-k) T_s] - \ln(|\mathbf{R}|) - M \ln \pi, \quad (6)$$

式中 $\lambda_{m,m+k}$ 为逆矩阵 $(R_{SN}G + I)^{-1}$ 的组成元素。当多普勒激光雷达发射具有高斯时域分布的脉冲信号, w 可从信号的谱型得到准确的估计; 对于地基激光雷达, 通过计算多个连续的脉冲, 可以得到 R_{SN} 的有效估计。 w 和 R_{SN} 确定后, (6)式只有一个估计参数 f , 因此可以获得多普勒频率估计的似然函数为

$$L(p|f) = -\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{M-1-m} z_k^* \lambda_{m,m+k} z_k \exp[2\pi j f (m-k) T_s]. \quad (7)$$

令似然函数取得最大概率的频率即是多普勒频率的最大似然估计 f_{MLE} 。 (7)式可以简化为

$$\begin{cases} f_{MLE} = \max \left\{ -T^{-1} \operatorname{Re} \left[\sum_{m=0}^{M-1} d_m \exp(-2\pi j f m T_s) \right] \right\} \\ d_m = \sum_{k=0}^{M-m-1} z_k^* \lambda_{k,k+m} z_{k+m} \end{cases}. \quad (8)$$

3 基于 Komogorov 湍流机制的离散信号仿真模型

目前常采用的信号仿真模型有 Gaussian 自协方差近似信号模型^[10], 基于大气分层的时域仿真模型^[11-12]和基于湍流模型的随机离散信号模型^[9]。基于湍流模型的随机离散信号模型^[8]既能分析平稳风场也能分析湍流随机风场产生的随机风场, 且形式简单, 易于仿真, 并通过仿真证明该模型比 Gaussian 自协方差近似信号模型结果更加准确。故采用该模型进行信号仿真。

该模型基本原理也是对大气进行分层, 累加距离门内的非相干后向散射信号和随机探测噪声。信号模型为

$$S(m, n, i) = \sqrt{R_{SNW}} \cdot \sqrt{\frac{2\sqrt{\ln 2} T_s}{\sqrt{\pi} \Delta t}} \cdot \sum_{k=-P}^P \left\{ x(k, n, i) \exp \left\{ j \left[\frac{4\pi v(k, i)}{\lambda} (m-1) T_s \right] \right\} \cdot \exp \left[-2 \ln 2 \frac{(m-M/2+k) T_s^2}{\Delta t^2} \right] \right\} + N_{noise}(m, n, i), \quad (9)$$

式中 m 为距离门内的采样序号, n 为累积脉冲数, i 为蒙特卡罗仿真序号, k 为对距离门进行分层的层序列数, 大气分层总数为 $2P+1$, 该值应该大于采样总数 M 。 Δt 是 Gaussian 型发射脉冲的脉宽, λ 为激光发射波长, R_{SNW} 为频域内宽带信噪比 (探测带宽内平均信号功率与平均噪声功率之比), 与 (3) 式中 R_{SN} 的关系为

$$\sqrt{R_{SN}} = \sqrt{R_{SNW}} \sqrt{\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi} \Delta t}}. \quad N_{noise} \text{ 为功率归一化后的高斯白噪声的复振幅, } x(k, n, i) \text{ 为距离门内单元信号的复振幅, 其统计特性与 } N_{noise} \text{ 相同, 该变量描述信号的散斑特性, } v(k, i) \text{ 是距离门内每个距离单元处的径向风速, 它描述的是风场信息, 基于 Komogorov 湍流机制建立该随机风场}^{[13]}. \text{ 由于湍流的作用, 使得信号的功率谱宽度产生展宽, 其展宽后的有效功率谱宽度为}^{[9,13]}$$

其统计特性与 N_{noise} 相同, 该变量描述信号的散斑特性, $v(k, i)$ 是距离门内每个距离单元处的径向风速, 它描述的是风场信息, 基于 Komogorov 湍流机制建立该随机风场^[13]。由于湍流的作用, 使得信号的功率谱宽度产生展宽, 其展宽后的有效功率谱宽度为^[9,13]

$$w = \sqrt{\frac{4}{\lambda^2} \sigma_{urb}^2 + \left(\frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{2} \pi \Delta t} \right)^2}, \quad (10)$$

即是 ML 算法中 (3) 式的 w , 式中 σ_{urb}^2 是距离门内随机风速的方差。

为了统一两个算法的参数, 本文使用有效功率谱宽度 w 和宽带信噪比 R_{SNW} 来衡量湍流强度和信噪比对相干激光雷达信号和风速反演结果的影响 (后文中所提到的谱宽度 w 都是指有效功率谱宽度, 信噪比是指宽带信噪比 R_{SNW})。

4 仿真分析和数据处理

4.1 湍流随机风场仿真

图 1 给出了一组风速均值为 0、方差 σ_{urb}^2 为 $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的由 Komogorov 湍流模型产生的弱湍流随机风场的仿真结果, 距离门 $\Delta L=75 \text{ m}$, 距离门分层数为 513 层。图 2 展示了一组单距离门的外差探测实信号, 信号采样点数为 128 个。

对仿真产生的信号分别使用 PM 和 ML 算法进行频率估计, 频谱带宽为 100 MHz, 快速傅里叶变换 (FFT) 点数为 128, 频率分辨率为 0.78 MHz。两种算法的处理结果如图 3、4 所示, 得到的估计频率 (50 MHz) 一致, 上

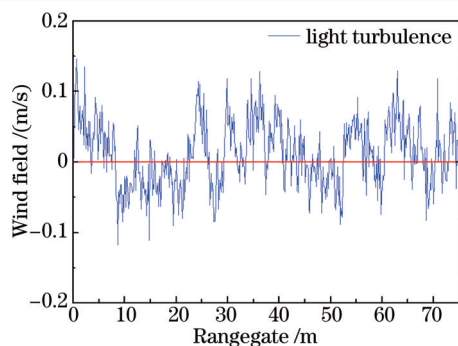


图1 平均风速为0的弱湍流随机风场

Fig.1 Weak turbulence wind field with mean velocity 0 m/s

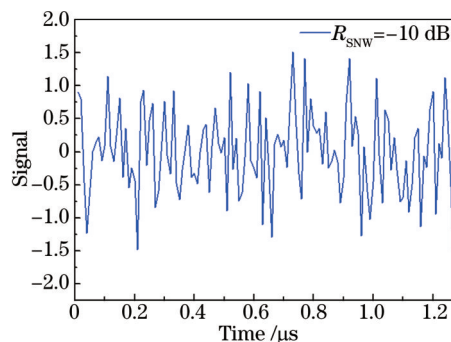


图2 外差探测实信号

Fig.2 Heterodyne-detected real signal

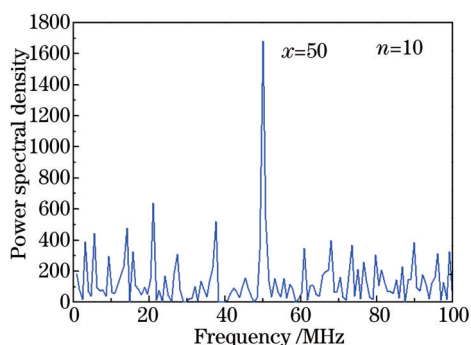


图3 累积10个脉冲PM算法所得功率谱

Fig.3 Power spectrum density by PM estimator with 10 pulses accumulation

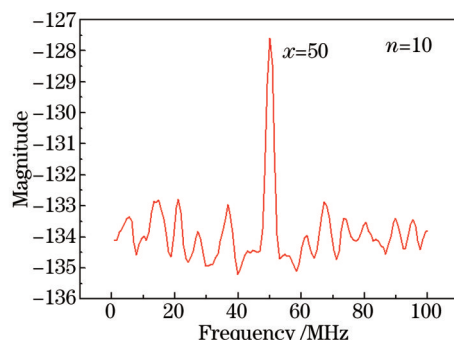


图4 累积10个脉冲ML算法的似然函数分布

Fig.4 Probability function by ML estimator with 10 pulses accumulation

述结果表明该模型产生的仿真信号是有效和可行的。

4.2 基于仿真信号的两算法性能的比较

Hardesty^[14]指出用标准差作为算法估计结果的精度其效果并不十分有效。因受噪声的影响,在低信噪比下,一部分信号淹没在噪声里面,使得多普勒频率峰值估计的结果会很大概率上对应于噪声的峰值^[15],而远远偏离真实频率。将该频率计入多普勒频率的结果,显然会提高频率的方差,并使多普勒频率估计的平均值偏离真实频率。多次测量的频率分布结果与正态分布相近,Frehlich等^[10,16]使用多普勒频率的PDF模型来描述算法的性能,很好地解决了上述问题,并被广泛使用^[8,13],具体模型为

$$f_{\text{PDF}}(\hat{f}) = \frac{1-b}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left[-\frac{(\hat{f}-f)^2}{2\sigma_f^2}\right] + \frac{b}{B}, \quad (11)$$

式中 σ_f^2 为“好”的多普勒频率的方差, b 为“坏”的多普勒频率的百分比($0 < b < 1$), f 为统计分布的中心频率, \hat{f} 为实际处理的频率。根据上述方法,进行多次测量,获得多普勒频率的统计分布,使用数据分析软件 Origin 对统计结果进行高斯拟合,获得中心频率 f 和标准差 σ_f 。根据 3σ 法则,以 $f \pm 3\sigma_f$ 频率区间作为可接受的正确估计频率区间。该区间内的频率统计次数与总的测量次数之比定义为有效探测概率,标准差 σ_f 定义为正确估计频率标准差。该结果相比于所有估计频率的标准差,减弱了噪声的影响,使得结果具有统计意义且描述算法的性能更为准确,具体意义将在 4.3 节实际处理部分分析。

首先分别仿真分析信噪比 R_{SNW} 对于两种算法结果的影响。信噪比范围在 $-25 \text{ dB} \sim 0 \text{ dB}$ 之间,两种有效功率谱宽度窄谱宽 $w=0.75 \text{ MHz}$ 和宽谱宽 $w=2.5 \text{ MHz}$, 分别对应弱湍流和强湍流。根据(9)式的时域信号模型生成仿真复信号。对信号分别使用 ML 和 PM 算法进行 5000 次估计,依据蒙特卡罗原理得到统计结果。仿真参数如表 1 所列,激光发射波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$,声光移频量 $f_{\text{AOM}}=50 \text{ MHz}$,累积脉冲数 $n=10$,采样频率为 $F_s=100 \text{ MHz}$,数据长度为 128 个点,FFT 点数 $M=128$,频率分辨率 0.78 MHz ,脉冲宽度 $\Delta t=400 \text{ ns}$,仿真次数 $i=5000$,信噪比

和频谱宽度均具有实际意义。仿真结果如图5和图6所示。

由图5可知,ML算法的正确估计频率标准差相比于PM更加小。在低信噪比区域(-25 dB~-15 dB),ML算法与PM算法接近;在中高信噪比区域($R_{SNW} > -15$ dB),ML算法的结果可比PM算法低0.3~0.5 MHz。由图6(b)可知,两种算法的多普勒频率探测概率随着信噪比 R_{SNW} 的增加而增大。要使得探测概率大于90%,在窄谱宽度下,PM算法所需信噪比 $R_{SNW} > -15$ dB,ML算法所需信噪比为 $R_{SNW} > -16$ dB。在宽谱宽度下,ML算法在 $R_{SNW} > -15$ dB时达到90%的探测概率,而PM算法则需 $R_{SNW} > -13$ dB。由此可知ML算法整体比PM算法效果更好,且在宽谱宽度下提升更多。

表1 算法对比仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameters	$\lambda / \mu\text{m}$	f_{AOM} / MHz	$\Delta t / \text{ns}$	R_{SNW} / dB	M	n	F_s / MHz	i
Values	1.55	50	400	-25 dB~0 dB	128	10	100	5000

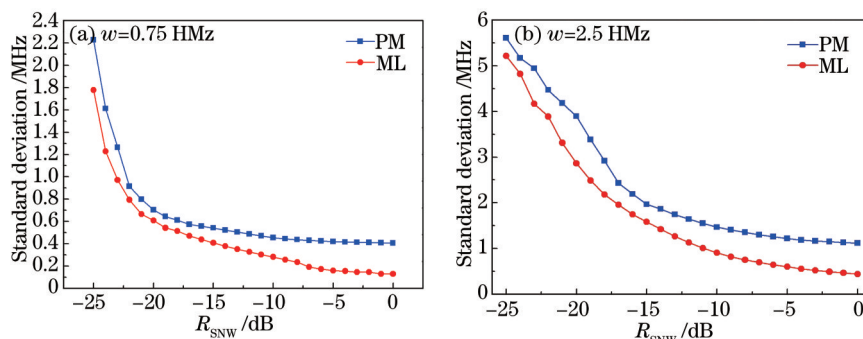


图5 多普勒频率标准差与信噪比的关系

Fig.5 SD of Doppler frequency versus wideband R_{SNW}

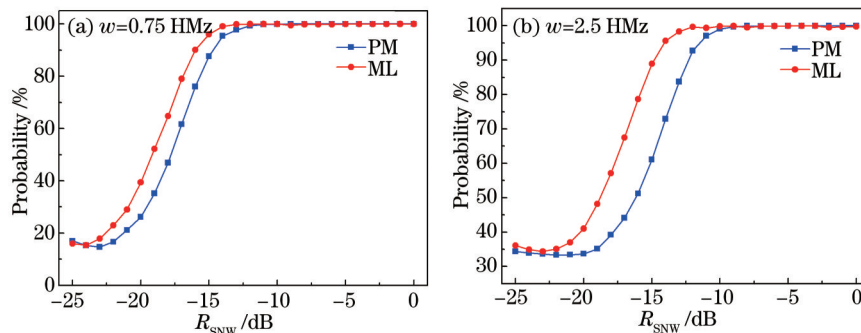


图6 探测概率与信噪比的关系

Fig.6 Detection probability versus wideband

分析两种算法结果与有效功率谱宽度 w 的关系,设定信噪比值 $R_{SNW} = -5$ dB。有效功率谱宽度变化范围 w 为0.5~3 MHz,仿真结果如图7所示。随着信号谱宽度的增大,频率标准差逐渐增大,探测概率减小。在高谱宽度 $w=3$ MHz时,ML算法比PM算法频率标准差低0.8 MHz,探测概率高5%。(7)式中可以看出,在极限情况下,谱宽度 $w \rightarrow 0$,逆矩阵元素 $\lambda_{ij} = -1$,ML算法即是PM算法,最大似然函数(7)式即是功率谱分布函数为

$$I_m(f) = \frac{1}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} z_m \exp(-j2\pi fm/M) \right|^2, \quad (12)$$

式中 I_m 为功率谱分布, m 为采样点序号。因此从仿真和理论两方面证明ML算法相比于PM算法估计多普勒频率更加准确和有效,且ML算法对强湍流风场即宽谱宽度的正确估计频率标准差相比于PM算法的更小。

4.3 实验数据的ML估计

将上述两个算法应用到实验数据中,2013年6月4日晚上22点在上海使用上海光机所的全光纤测风激光雷达系统^[7],安置在六层楼顶的平台上进行测风实验,天气为晴,东南风4~5级(对应的东南方向,风速为5.5~10.7 m/s),激光发射方向与风向相对,频谱带宽为31~81 MHz。探测范围从500 m到4500 m,脉冲宽度有

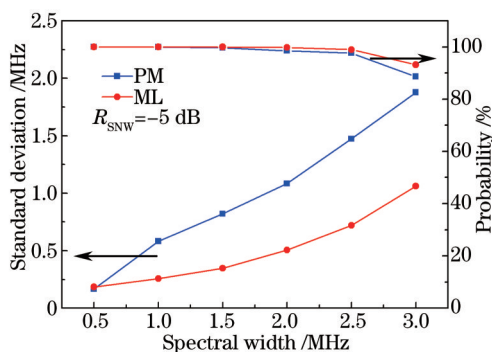


图7 频率标准差和探测概率与谱宽度的关系

Fig.7 SD of Doppler frequency and detection probability versus spectral width

三组, 每组总计 4000 个脉冲数据, 每组数据采样时间为 20 s(包含存储时间), 采样频率 550 MHz, 总共采集 10 次, 每次 400 个脉冲, 单次采集时间平均 150 ms, 有效采集时间 1.5 s, 可认为风速变化不大。系统关键参数如表 2 所示。

表2 系统关键参数

Table 2 System key parameters

Parameters	$\lambda / \mu\text{m}$	$\Delta t / \text{ns}$	$f_{\text{AOM}} / \text{MHz}$	n	M	F_s / MHz
Values	1.54	200/350/500	55	40	1024	550

对脉冲宽度 $\Delta t=200 \text{ ns}$ 的数据进行分析, 采用 Smalikhov 等^[18]所提出的方法进行 R_{SNW} 的估计, 如图 8 所示。由于不易获得弱信号下的实际谱宽度和实际信号展宽较小, 有效功率谱宽度 w 采用脉冲信号对应的谱宽度来描述^[5]。试验的数据量较少, 故对 4000 个脉冲数据, 以 75% 的重叠依次截取 40 个脉冲进行累加处理, 获得 400 组估计结果。算法性能比较基于(11)式的 PDF 模型, 得到的多普勒频率标准差和统计概率如图 9 所示。

图 9 中在信噪比较高的区域($R_{\text{SNW}} > -15 \text{ dB}$), 可以证明整体上 ML 算法相对更好, 频率标准差能比 PM 算法

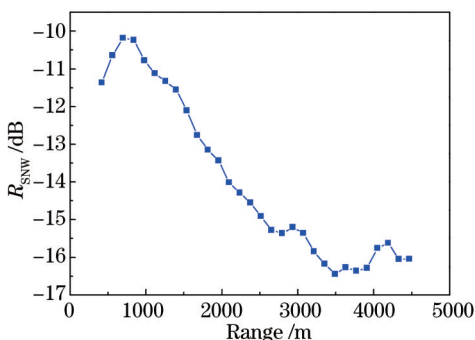


图8 宽带信噪比 R_{SNW} 与探测距离的关系

Fig.8 Wideband R_{SNW} versus range

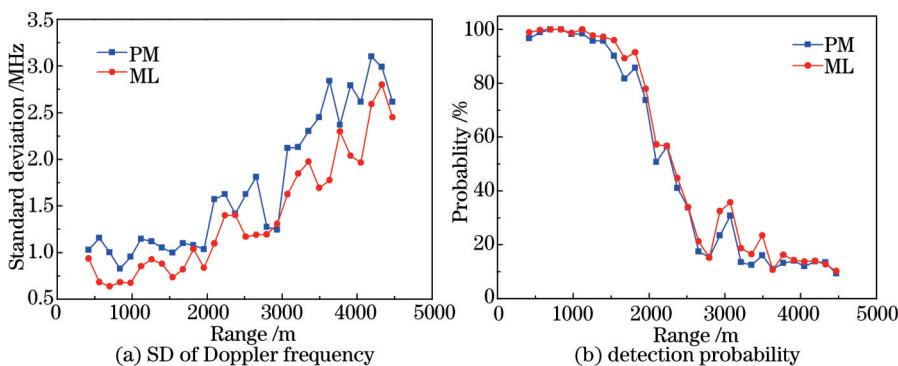


图9 多普勒频率标准差和探测概率与探测距离的关系

Fig.9 Range dependence of SD of Doppler frequency and detection probability

最多能低 1.1 MHz,探测概率最多能高 9%。要获得风速精度小于 1 m/s($\Delta f < 1.29$ MHz)同时探测概率在 80%以上,所需信噪比达到 $R_{SNW} > -14$ dB,与仿真分析大致范围相符。但在信噪比较低的区域($R_{SNW} < -15$ dB),曲线抖动明显,主要由于信号变弱,噪声的影响增加,曲线拟合效果下降,标准差出现浮动。

图 10 为 $R_{SNW} = -14$ dB,探测距离为 2.1 km 处的多普勒峰值频率统计分布结果,纵坐标是多普勒频率的次数与总次数 400 之比。在 400 次处理结果中,ML 的正确频率结果比 PM 更加集中,因此其标准差也相对较小。由于存在噪声,右侧高频部分的峰值频率出现次数较多,采用(11)式的高斯拟合方法获得的标准差降低右侧噪声频率的干扰,仅与集中的频率聚集程度有关,使得理论和实际分析结果相一致,从而体现采用概率分布模型描述算法性能的意义和作用。

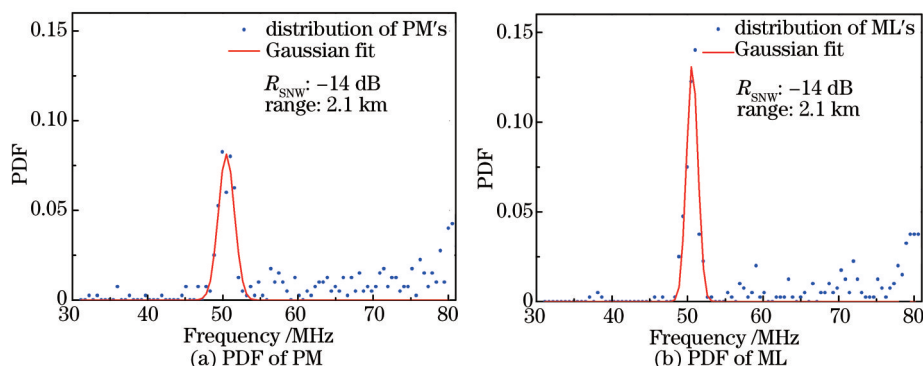


图 10 多普勒频率的概率分布

Fig.10 Probability distribution function of Doppler frequency

分析两种算法在不同脉冲宽度即不同有效功率谱宽度下的表现,选取三组数据中信噪比接近-14 dB 的距离门,两种算法结果见表 3。由(10)式可知脉宽越窄对应的有效功率谱宽度越宽,ML 比 PM 的算法提升更多,脉宽 200 ns 时 ML 的标准差比 PM 小 0.5 MHz,而脉宽 500ns 时仅提升 0.1 MHz,结果与理论(12)式的关系相符合。

表 3 Performance of two estimator with different pulse widths with $R_{SNW} = -14$ dB

Table 3 信噪比为-14 dB 时不同脉宽下的两种算法的表现

Parameter		$\Delta t=200$ ns	$\Delta t=350$ ns	$\Delta t=500$ ns
Standard deviation/MHz	PM estimator	1.571	1.0469	0.4910
	ML estimator	1.098	0.7145	0.4888
Probability/%	PM estimator	50.75	59.25	70.00
	ML estimator	57.25	64.50	74.00

5 结 论

最大似然法是一种有效的相干多普勒频率估计的方法,利用仿真信号对影响该算法性能的关键参数进行比较分析,使用多普勒频率的概率密度分布模型对算法进行评价,采用探测概率和正确估计频率标准差来衡量算法性能。仿真结果表明 ML 算法相比于 PM 算法,估计多普勒频率更加准确和有效,且对强湍流风场即宽谱宽的正确估计频率标准差更小,性能更好。

实际数据处理结果表明,整体上 ML 算法相对 PM 算法更好,正确估计频率标准差最多低至 1.1 MHz,探测概率最多能高 9%。要获得风速精度小于 1 m/s($\Delta f < 1.29$ MHz)同时探测概率在 80%以上,宽带信噪比需达到 $R_{SNW} > -14$ dB。但由于试验数据较少,低信噪比条件下概率分布模型拟合效果较差,后续改进可采用滤波抑制噪声的方法^[19]提高数据结果的质量,因此 ML 算法对实际数据的处理方法还需进一步研究和分析。

参 考 文 献

1 Fujii T, Fukuchi T. Laser Remote Sensing[M]. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2005: 472-700.
 2 Jia Xiaodong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng, 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.

- 3 Rye B, Hardesty M. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar I spectral accumulation and the Cramer-Rao lower bound[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 16-27.
- 4 Rye B, Hardesty M. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar II correlogram accumulation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 28-35.
- 5 Frehlich R. Performance of maximum likelihood estimators of mean power and Doppler velocity with a priori knowledge of spectral width [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 16(6): 1702-1709.
- 6 Sobolev S V, Timokhin S A. Maximum likelihood estimates of signal parameters of laser Doppler systems[J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2014, 50(6): 566-576.
- 7 Wang Jiqiang, Zhang Chunxi, Ma Zongfeng, *et al.*. Cramer-Rao lower bounds of parameter estimation from laser Doppler velocimetry[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(9): 1419-1422.
王纪强, 张春熹, 马宗峰, 等. 激光多普勒测速参数估计的 Cramer-Rao 下限[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1419-1422.
- 8 Jin Xiaohan, Wang Yuefeng, Zhu Xiaopeng, *et al.*. Performance of maximum likelihood estimators of Doppler frequency for coherent Doppler lidar[J]. Optical Instruments, 2012, 34(5): 28-33.
靳笑哈, 汪岳峰, 竹孝鹏, 等. 最大似然法在多普勒激光测风雷达中的应用研究[J]. 光学仪器, 2012, 34(5): 28-33.
- 9 Kameyama S, Ando T, Asaka K, Hirano Y. Performance of discrete-Fourier-transform-based velocity estimators for a wind-sensing coherent Doppler lidar system in the Kolmogorov turbulence regime[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(10): 3560-3569.
- 10 Frehlich R, Yadlowsky M. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar[J]. J Atmos Ocean Technol, 1994, 11(5): 1217-1230.
- 11 Salamiou P, Dabas A, Flamant P H. Simulation in the time domain for heterodyne coherent laser radar[J]. Appl Opt, 1995, 34(3): 499-506.
- 12 Bai Xue, Guo Pan, Chen Siying, *et al.*. Simulation in the time domain and time-frequency analysis for coherent Doppler wind lidar[J]. Chinese J 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.
- 13 Frehlich R. Effects of wind turbulence on coherent Doppler lidar performance[J]. J Atmos Ocean Technol, 1997, 14(1): 54-75.
- 14 Hardesty R M. Performance of a discrete spectral peak frequency estimator for Doppler wind velocity measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986, GE-24(5): 777-783.
- 15 Banakh V A, Brewer A, Pichugina E L. Measurements of wind velocity and direction with coherent Doppler lidar in conditions of a weak echo signal[J]. Atmospheric and Oceanic Optics, 2010, 23(5): 381-388.
- 16 Rye B J, Hardesty R M. Detecting techniques for validating Doppler estimates in heterodyne lidar[J]. Appl Opt, 1997, 36(9): 1940-1951.
- 17 Diao Weifeng, Xin Zhang, Jiqiao Liu, *et al.*. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(7): 072801.
- 18 Smalikho I, Rahm S. Measurement of atmospheric turbulence by 2- μm Doppler lidar[J]. J Atmos and Ocean Technol, 2005, 22(11): 1733-1747.
- 19 Li Lu, Guo Pan, Zhang Yinchao, *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.

栏目编辑: 何卓铭