

相干测风激光雷达微弱信号的频率估计

周永升, 马勋鹏, 赵一鸣, 李凉海

(北京遥测技术研究所, 北京 100076)

摘要: 相干测风激光雷达通过探测大气气溶胶的多普勒频移信息获取风速信息。其回波信号为微弱信号, 微弱信号中频率提取属于频率估计范畴。经补零处理后的快速傅里叶变换算法(补零 FFT 算法)应用于相干测风激光雷达频率估计, 具有算法简单, 运算速度快, 稳定性高等优点。与常用的频率估计算法脉冲对算法(PP 算法)和改进型脉冲对算法进行比较, 验证了补零 FFT 算法在相干测风激光雷达微弱信号频率估计方面的明显优势。通过仿真软件 MATLAB 仿真非相参积累脉冲 3 000 次的前提下检测微弱信号(距离门宽度为 128 采样点)信噪比可达 -26.6 dB。最后, 通过风场试验获取实测风速数据, 验证了补零 FFT 算法在相干测风激光雷达中应用的优越性。

关键词: 相干测风激光雷达; 频率估计算法; 补零快速傅里叶变换算法; 脉冲对算法; 改善型脉冲对算法

中图分类号: TN958.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0306002

Frequency estimation of the weak signal of the Coherent Wind Lidar

Zhou Yongsheng, Ma Xunpeng, Zhao Yiming, Li Lianghai

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Coherent Wind Lidar can obtain the atmospheric wind velocities through measuring the frequency shift of laser back from the atmospheric aerosol caused by Doppler effect. The scattered energy propagating back toward the receiver is very weak. So the frequency extraction from the weak signal belongs to the field of frequency estimation. The zero-padding Fast Fourier Transform (FFT) algorithm applied to the frequency extraction of the Coherent Wind Lidar has the advantage of algorithm simplicity, fast operation and high stability. Compared with the pulse-pair (PP) algorithm and the improved PP algorithm, zero-padding FFT algorithm was validated to have an obvious advantage in processing weak signal of Coherent Wind Lidar. In addition, the simulation with MATLAB shows that the measurable SNR of the weak signal can reach -26.6 dB by using the zero-padding FFT algorithm in the condition of 3 000 pulses non-coherent integration (128 samplings in one range gate). At last, the wind velocity test data gotten by the Coherent Wind Lidar was processed by improved PP algorithm and the zero-padding FFT algorithm, and through the processing results gotten by two algorithms, the advantage of zero-

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 中国科技部国家国际科技合作专项(2013DFA20600); “细微颗粒物空间监测激光雷达设备”项目

作者简介: 周永升(1990-), 男, 硕士生, 主要从事相干测风激光雷达方面的研究。Email: zrs_znn@126.com

导师简介: 李凉海(1965-), 男, 研究员, 主要从事雷达系统设计方面的研究。

赵一鸣(1983-), 女, 研究员, 主要从事激光雷达总体设计方面的研究。

padding FFT algorithm is verified the advantage again.

Key words: Coherent Wind Lidar; frequency estimation algorithm; zero-padding FFT algorithm; pulse-pair algorithm; improved pulse-pair algorithm

0 引言

相干测风激光雷达利用单频、窄线宽激光器发射激光脉冲,与大气中的气溶胶粒子发生米散射产生带有多普勒频移的回波信号,通过望远镜系统收集大气回波信号与本征激光信号相干拍频,完成多普勒频移信息提取,利用频率与径向风速关系式计算径向风速,最后通过矢量风速反演技术获得大气三维风场信息。

大气湍流、大气消光、大气散射等外部环境因素和探测器散粒噪声、热噪声等内部因素,造成相干测风激光雷达接收到的回波信号非常微弱,信噪比很低,因此在回波信号中提取频率信息属于微弱信号的频率估计问题^[1-2],成为相干测风激光雷达研制的关键因素之一。目前,常用频率估计算法有FFT、脉冲对(PP)技术、最大似然估计(ML)算法、改善型脉冲对算法(Improved PP algorithm)^[1,3]等。脉冲对算法是一种在时域进行频率估计的算法,尤其在处理正弦信号方面具有独特优势^[4],实现简单,运算速度快,频率估计精度高,被广泛用于雷达系统中^[4]。但脉冲对算法只适应于高信噪比情况下,如提取声速中的多普勒信息^[5],一般适用于-6 dB以上;改善型脉冲对算法在脉冲对算法的基础结合离散傅里叶变换加入了频率校正^[4],使其在低信噪比情况下频率估计精度更高,但同时损失了脉冲对算法的实现简单,运算速度快的优势;最大似然估计算法中频率的最大似然估计为无偏估计,可以达到克拉美罗限(CRLB),但其算法实现复杂,运算量大非常耗时,不利于风速实时探测,相对于在时域中进行频率估计的算法,FFT频率估计算法更精确更灵活^[5],运算量小,运算速度快,便于实时处理,综合了以上算法的所有优点,且在FFT频率估计过程中便于进行非相参积累,在相干测风激光雷达领域比其他频率估计算法更具有优势。

在将FFT运用到相干测风激光雷达中进行回波信号的频率估计过程中发现,FFT算法进行频率估计

得到的频率估计精度大于指标要求且采样点数必须选择 2^N 个的限制,所以采用适当补零的方法增加FFT的频率估计精度同时增加了采样点数选择的灵活性。

文中通过理论分析、软件仿真对补零FFT算法、脉冲对算法、改善型脉冲对算法进行了比较,验证了补零FFT算法在相干测风激光雷达中应用的优势,并通过改善型脉冲对算法和补零FFT算法对风场试验获取的风速数据进行处理,通过处理结果进一步验证了补零FFT算法的优越性。

1 算法原理及实现方法

1.1 补零快速傅里叶变换

对相干测风激光雷达回波信号进行采样得到离散信号,通过FFT将时域信号转换为频域信号,在频域进行信号处理。

但由于FFT得到的是离散频率值,只有当信号频率为FFT频率分辨率 Δf 的整数倍时,FFT得到的频率估计值才是准确的^[6],即FFT的“栅栏效应”针对FFT的“栅栏”效应,通常采用基于FFT幅度比值的频率插值方法、基于FFT相位差的频率估计算法、补零插值等方法^[1,6]对FFT粗测频率进行校正。其中补零快速傅里叶变换算法实现简单,运算量小,运算时间短,更适合应用于相干测风激光雷达的频率估计。

FFT的“栅栏”效应造成的频率泄露是频率估计不精确的主要因素,因此通过一定的措施减小回波信号经FFT后频谱中相邻谱线间的间隔 df ,即可有效提高FFT的频率估计精度。相邻谱线间的间隔 df 易与频谱分辨率 Δf 混淆。FFT的频谱分辨率 $\Delta f=1/T$ 仅仅与采样时间有关,当采样时间确定后,频谱分辨率便确定下来。由于回波信号采样长度确定,对采样后的回波信号进行补零处理并没有增加原始回波信号的采样时间,即没有改变采样的回波信号的信息量,因此并不改变频谱分辨率。在采样后的回波信号不进行补零处理的情况下,相邻谱线间间隔与频率分辨的值相等,即:

$$df=f_s/N=1/NT_s=1/T=\Delta f \quad (1)$$

式中: f_s 为采样频率; T_s 为采样间隔; T 为采样时间。

为了提高采样精度, 要减小频谱中相邻谱线间的间隔 df , 采取的方法有:

(1) 提高频率分辨率

提高频率分辨率的方式有: 1) 在采样点数不变的情况下, 降低采样频率 f_s , 但是 f_s 受到奈奎斯特采样定理的限制; 2) 增加采样点数 N , 这意味着计算机的存储量和计算量大大增加, 提高系统软、硬件方面的要求。以上两种方法提高频率分辨率的能力有限且灵活性差^[1]。

(2) 对采样的回波信号进行补零处理

在对采样后的回波信号进行 FFT 时, 要求采样长度满足 2^N 关系, 当采样长度不能满足该关系时, 通常采用补零法进行处理。对采样的回波信号进行补零处理后, 相对于原始回波信号, 采样长度增加, 即采样点数 N 变为 N' , 补零数量为 $N-N'$ 。补零后采样间隔 $df' = f_s/N' < f_s/N$, 即频谱中相邻谱线的间隔减小。因此, 使用补零法快速傅里叶变换算法使采样长度选择更加灵活, 同时也减小相邻谱线间的间隔, 提高了频率估计精度。

通过以上分析, 通过补零法提高了频率估计精度, 同时也提高了选取采样长度的灵活性; 另一方面, 非相参积累只利用回波信号的幅度信息, 因此, 通过对回波信号的频谱进行累加, 便可实现非相参积累过程, 非常适合相干测风激光雷达实时监测风速。

利用软件 MATLAB 验证补零 FFT 算法频率提取精度, 具体步骤如下。

(1) 假设回波信号表达式为正弦信号:

$$s(t) = a \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) + b n_0 \quad (2)$$

式中: a 为回波信号的幅值; b 为随机噪声幅值; f_0 为目标频移, 即待测频率估计; θ_0 为回波信号相位信息; n_0 为随机噪声。

对信号幅值进行归一化后得:

$$s'(t) = \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) + A n_0 \quad (3)$$

通过改变 A 值即可调整回波信号的信噪比。模拟回波信号中模拟频率设置频移值为 85 MHz;

(2) 通过调整随机噪声的幅值改变模拟信号的信噪比情况;

(3) 利用 FFT 进行回波信号频移估计, 采样频率 f_s 设置为 500 MHz, 采样长度设置为 128, 根据实

际情况, 对回波信号进行补零处理, 这里选择补零数量为 896;

(4) 对回波信号进行补零 FFT 后得到对应回波信号频谱, 重复计算 M 次并累加, 实现非相参积累;

(5) 对非相参积累得到的频谱进行坐标变换, 利用高斯曲线对得到的频谱信息进行高斯拟合, 搜索频谱最大值即为补零 FFT 算法频率估计值 f_0 。

1.2 脉冲对技术

脉冲对技术是在时域上估计多普勒频移的算法, 算法简单, 计算量小, 并且在后向散射信号的频谱对称的条件下是风速的无偏估计^[2,4-5]。

脉冲对技术主要是基于复自相关算法原理, 可以消除观测信号 (设观测信号为回波信号和随机噪声的和) 中的随机噪声。脉冲对技术针对复数信号, 因此需对公式(3)进行希尔伯特变换。

为方便理解, 回波信号中先不加入噪声, 公式(3)经希尔伯特变换后, 合成复数信号为^[6-7]:

$$S(t) = \frac{1}{2} e^{-j2\pi f_0 t} e^{-j\theta_0} \quad (4)$$

复函数进行自相关后:

$$R(\tau) = E[S^*(t) \times S(t+\tau)] = \frac{T}{4} \exp(j2\pi f_0 \tau) \quad (5)$$

由上式可以看出实信号的复信号自相关后, 自相关结果的角频率为回波信号的角频率。回波信号中加入了白噪声后,

$$s(t) = S(t) + n_w(t) \quad (6)$$

观测信号的自相关函数可以表示为:

$$R(\tau) = E[S^*(t) \times s(t+\tau)] \quad (7)$$

通常回波信号与白噪声不相关, 则有:

$$R(\tau) = R_s(\tau) + R_n(\tau) \quad (8)$$

而白噪声的特点是:

$$R_n(\tau) = \begin{cases} R_n(0), & \tau=0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

把公式(9)代入到公式(8)中, 有:

$$R_n(\tau) = R_s(\tau), \tau \neq 0 \quad (10)$$

这说明通过对观测信号进行自相关运算后, 可以得到回波信号的自相关函数, 与噪声无关, 而前面讲到回波信号的自相关函数中的角频率为原始信号的角频率值, 因此, 对观测信号进行自相关运算后, 求结果的相角便可以得出回波信号的频率值, 也就是多普勒频移。

把自相关函数表示为极坐标形式:

$$R(\tau)=A(\tau)\exp(j\Phi(\tau)) \quad (11)$$

所以自相关函数的相角为:

$$\Phi(\tau)=\arctan\frac{R_{im}(\tau)}{R_{real}(\tau)} \quad (12)$$

公式(13)的约束条件为: $\Phi(\tau) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 转换

为频率表示为 $\mu_1(f) \in \left(-\frac{1}{2\tau}, \frac{1}{2\tau}\right)$ 。

公式(12)与公式(5)比较, 得出:

$$2\pi f_0\tau=\Phi(\tau) \quad (13)$$

将公式

$$f_0=\frac{2\nu}{\lambda} \quad (14)$$

代入公式(13)得:

$$\nu=\frac{2}{\lambda} \frac{1}{2\pi kT_s} \arctan^{-1} \frac{R_{im}(\tau)}{R_{real}(\tau)} \quad (15)$$

式中: T_s 为数据卡采样率。

利用软件 MATLAB 验证 PP 算法频率提取精度, 程序编写过程为:

(1) 由于 PP 算法适用于复数信号, 所以用复数信号模拟信号, 模拟复信号中模拟频率设置频移值为 85 MHz;

(2) 将模拟复信号中加入随机噪声, 通过调整噪声的幅值改变模拟信号的信噪比情况;

(3) 利用公式(16)计算模拟信号的自相关值 $S(m)$;

$$S(m)=\frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-1-m} Z_{n+m}Z_n^* \quad (16)$$

(4) 利用公式(13)即可对模拟回波信号进行频率估计;

(5) 使用脉冲对算法得出的结果为单点, 不能进行非相参积累。同样运行 3 000 次, 运用条形图对得出的结果进行统计, 使用高斯曲线进行拟合, 得出回波信号的频率估计值 f_0 。

1.3 改善型脉冲对算法

在数字信号处理中, 信号的互相关和自相关函数的计算可利用 FFT 实现。利用 FFT 计算信号的离散傅里叶变换, 得到离散傅里叶函数 $X(k)$, 进而得到其共轭函数 $X^*(k)$, 两者相乘后作逆傅里叶变换 IFFT, 则求得信号的自相关序列^[1]。

通过以上方法求得自相关序列后, 利用最大值搜索得出回波信号的粗频率估计值 \hat{f}_0 ; 利用粗频率

估计值 \hat{f}_0 和回波信号的真实频率值 f_0 重新构造函数 $z(t)$, 其函数 $z(t)$ 的频率 $\Delta f=f_0-\hat{f}_0$, 利用 FFT 和逆 FFT 再一次计算构造函数 $z(t)$ 的粗频率估计值 $\Delta \hat{f}$ 作为 \hat{f}_0 的校正频率。

经过公式推导得构造函数的自相关可由公式(17)计算得出:

$$Z(m)=S(m)e^{\frac{-i2\pi\hat{f}_0m}{f_s}} \quad (17)$$

式中: $Z(m)$ 为构造函数的自相关值; $S(m)$ 为回波信号的自相关值; f_s 为采样频率;

改善型 PP 算法进行频率估计的具体算法步骤为:

(1) 通过 FFT 和逆 FFT 计算回波信号的自相关函数 $S(m)$ 。

(2) 通过 FFT 频谱最大幅值搜索回波信号的最大值, 即为粗测频率估计值得到 \hat{f}_0 , 并重新构造函数 $z(t)$ 。

(3) 利用公式(17)计算构造函数的自相关值 $Z(m)$, 并对新信号加 Hanning 窗, 将加窗信号所有值相加取平均作为校正频率 $\Delta \hat{f}$, 则回波信号频率估计值为 $f_0=\hat{f}_0+\Delta \hat{f}$ 。

2 仿真结果分析

通过 MATLAB 7.12.0 对算法进行仿真计算。仿真中, 采样率定为 $f_s=500$ MHz, 采样点数为 $N=128$ 。设定模拟信号的频率为 $f_0=85$ MHz, 对理想信号加入随机噪声模拟相干测风激光雷达获取的回波信号。

分别利用补零 FFT 算法, PP 算法和改进型 PP 算法对模拟信号进行频率提取, 计算不同信噪比情况下频率提取情况如图 1 所示。

图 1(a)为在 3 000 次非相参积累的前提下, 对不同信噪比情况下补零 FFT 算法的频率估计性能进行了仿真, 通过仿真结果可得出在 3 000 次非相参积累时, 补零 FFT 算法可提取出信噪比达 -26 dB 模拟信号的频率值。仿真可验证, 增加非相参积累的次数可提取信噪比更低的微弱信号的频率, 但同时增加了频率提取的时间, 因此可根据实际需求选择合适的非相参积累次数; 图 1(b)为利用蒙特卡罗法模拟 3 000 次补零 FFT 算法处理 -23.5 dB 信号(3 000 次非相参积累)测试结果分布情况, 其测试结果平均值为 84.998 MHz, 方差为 1.5574×10^{10} Hz²。

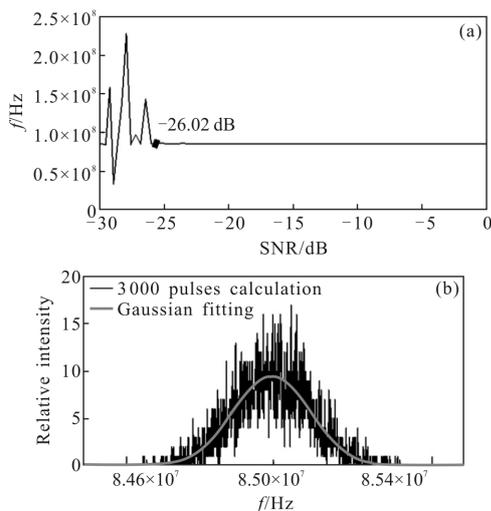


图 1 补零 FFT 算法频率提取性能示意图

Fig.1 Diagram of frequency extraction performance by zero padding FFT

图 2 中,PP 算法最小可提取信噪比为 -6 dB 左右模拟信号的频率,在信噪比较低时,PP 算法的性能明显逊于补零 FFT 算法。

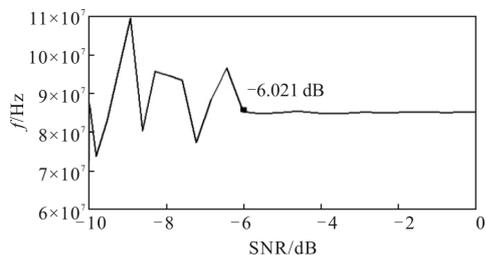


图 2 PP 算法频率提取性能示意图

Fig.2 Diagram of frequency extraction performance of PP algorithm

图 3 为改善型 PP 算法处理 -23.5 dB 模拟信号计算 3 000 次后频率分布情况。由于改善型 PP 算法每次计算取频率谱最大值作为粗测频率,然后对粗测频率进行校正获取改善型 PP 算法的模拟信号频

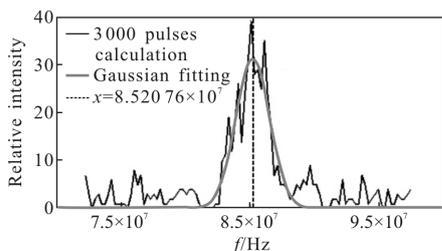


图 3 改善型 PP 算法频率提取分布图

Fig.3 Frequency extraction distribution gotten by improved PP algorithm

率值,不能进行非相参积累,为了与补零 FFT 性能进行对比,采取计算 3 000 次后统计频率分布的方法与进行高斯拟合的方法进行对比。从图 3 中可以看出,利用对于同一模拟信号,利用改善型 PP 算法得到的频率值分布在 73~98 MHz 的很大的区间内,频谱分布范围较大,造成的误差也较大。

图 4 中,由图(a)得改善型 PP 算法可对信噪比达 -26 dB 的模拟信号进行频率提取,图 4(b)为利用蒙特卡罗法模拟 3 000 次改善型 PP 算法处理 SNR=23.5 dB 信号(3 000 次非相参积累)后测试结果分布情况,其测试结果平均值为 85.077 MHz,方差为 $4.2756 \times 10^{14} \text{ Hz}^2$ 。通过与补零 FFT 的情况进行对比,可知改善型 PP 算法频率估计误差偏大,同时改善型 PP 算法输入为复信号,同时需要 Hanning 窗对频谱进行处理,算法实现更复杂。

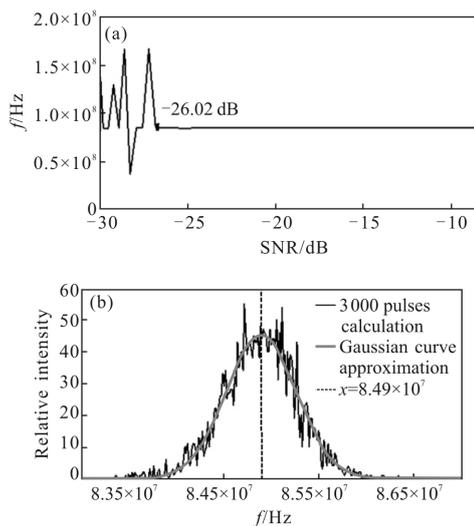


图 4 改善型 PP 算法频率与信噪比关系图

Fig.4 Frequency gotten by improved PP under different SNR

如表 1 所示,综合三种频率估计算法性能比较

表 1 三种频率估计算法性能比较

Tab.1 Comparisons of performance among threes algorithms

Algorithm	Complexity	Operation	Stability	Precision	Processing weak signal ability
Zero-padding FFT algorithm	Simple	Small	Stable	High	Strong
PP algorithm	Simple	Small	Stable	Higher	Weak
Improved PP algorithm	Complex	Big	Instability	High	Strong

得出补零 FFT 算法相对于另外两种算法性能更优越。另外,补零 FFT 算法可根据实际情况调节非相参积累数量,具有更大的灵活性,因此,补零 FFT 算法更适合于相干测风激光雷达频率估计。

3 试验验证

系统调试完成后,利用 MATLAB7.12.0 对采集到的相干测风激光雷达探测硬目标的数据进行处理,验证频率估计算法的频谱提取效果。

经验证 PP 算法可以进行 -5 dB 左右的回波信号处理,对于 -30 dB 左右的微弱信号是无能为力的,因此,此处不对 PP 算法验证进行表述。

系统中激光器 AOM 的频移量为 80 MHz,假设系统测量风速范围为 ± 30 m/s,则由公式(1)可得系统回波信号的频率波动范围为 41.3~118.7 MHz;利用系统收集静止硬目标(圆盘)回波信号,其回波信号和对应的频谱如图 5 所示,虚线表示测得的频移为 80.08 MHz,接近于激光器 AOM 频移 80 MHz。

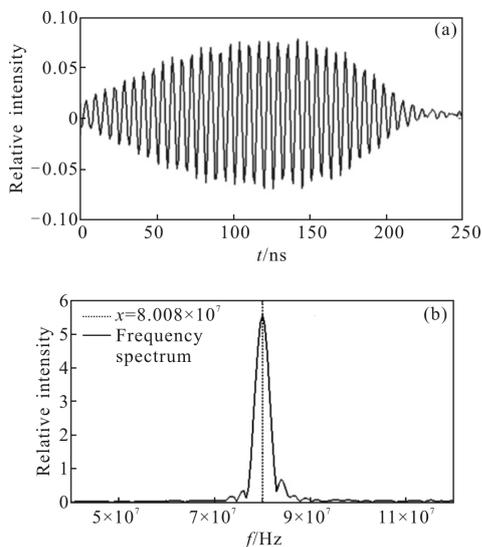


图 5 补零 FFT 对静止硬目标回波信号的频率谱

Fig.5 Frequency spectrum of the backscattering signal of static and hard targets gotten by zero padding FFT

2017 年 3 月 8 日下午 17:45 通过激光雷达对北京市某地风速进行测量,通过调整数据采集卡时间延迟,收集 450 m 附近距离门内回波信号进行补零 FFT 频率估计,得到的回波信号和对应的频谱图如图 6 所示。

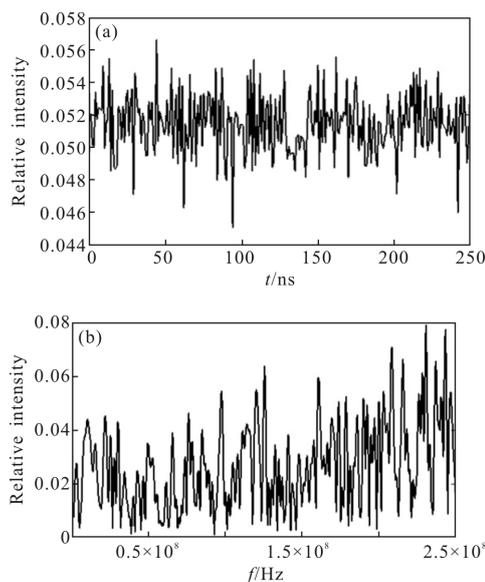


图 6 获取的回波信号及对应的频率谱

Fig.6 Backscattering signal gotten by lidar and the relative frequency spectrum

回波信号经过不同数量的非相参积累,取频谱中 41.3~118.7 MHz 区域进行高斯拟合,得到结果图如图 7 所示。

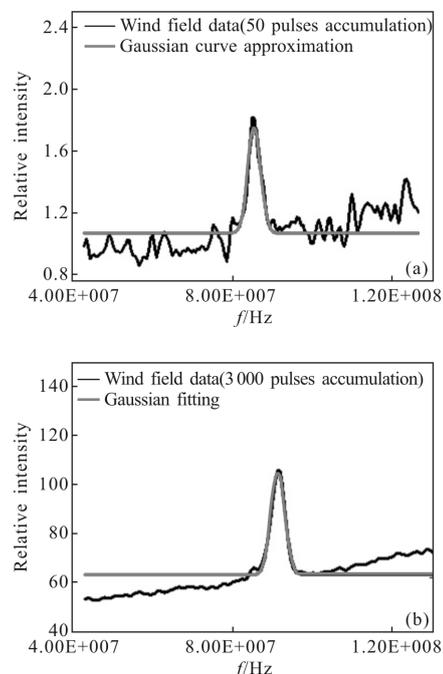


图 7 不同脉冲数经非相参积累后频谱图

Fig.7 Frequency spectrum for different numbers of pulses accumulation

由图 7 得出结论:通过单次补零 FFT 算法很难

在回波信号的频谱中找到回波信号的频率, 经过若干次非相参积累后, 信号的信噪比明显改善。

图 8 显示的是利用改善型 PP 算法对 3 000 个脉冲中同一距离门内的风场数据频率提取后获取的频率分布情况。图(a)为改善 PP 算法进行频率估计后获取的 3 000 个频率分整体分布图, 图(b)为信号集中区域处频率分布图。图中曲线表示为高斯拟合曲线的中心线, 即频率估计量。可以看出, 利用改善型 PP 算法对风场回波信号进行处理后测得的频率值为 86.646 6 MHz。

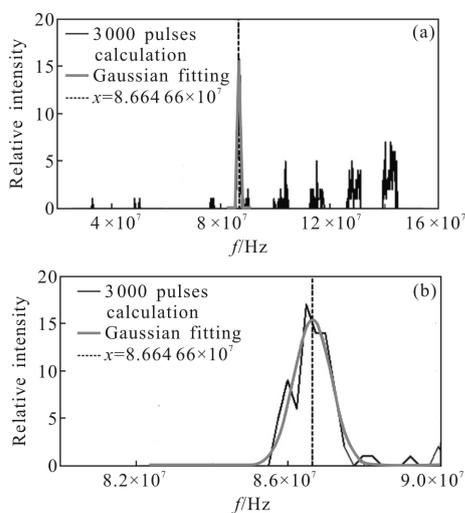


图 8 改善型 PP 算法频率提取分布图

Fig.8 Frequency distribution gotten by improved PP algorithm

通过系统试验验证了补零 FFT 算法通过调节非相参积累数量来调节信噪比的结论, 通过补零 FFT 算法和改善型 PP 算法同时处理相同风场数据, 可以得出补零 FFT 算法比改善型 PP 算法在频率估计方面更具有优势。

4 结论

相干测风激光雷达中捕获的回波信号为微弱信号, 信噪比甚至可达 -30 dB, 因此, PP 算法只适用于相干测风激光雷达近距离信号处理; 改善型 PP 算法对粗测频率进行频率校正, 极大地提高了 PP 算法频率提取性能, 但同时由于该算法输入为复信号, 即对回波信号进行希尔伯特变换, 同时需加窗处理, 使算法实现变得复杂, 且由于信噪比较低情况下, 利用改善型 PP 算法测得的频率在整个频谱分布不集中, 使得高斯拟合变得不稳定, 且运行时间长, 因此不利于

相干测风激光雷达的实时观测; 补零 FFT 算法继承了 FFT 的优点, 通过补零处理增加了 FFT 算法的灵活性, 有效抑制了 FFT 算法的“栅栏效应”。同时基于非相参积累数量的调整可以改善回波信号信噪比, 算法实现简单。

同时, 也注意到, 随着信噪比的恶化, 回波信号的低频区域起伏会变差, 可以预见, 当该起伏进入到频谱中有效频率区域范围内即 41.3~118.7 MHz 范围内时, 势必会影响到有效频率区域内频率的提取, 因此, 还需要对补零 FFT 算法进行进一步的优化。

参考文献:

- [1] Jia Xiaodong. Development of 1.55 μm coherent lidar for wind sensing [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
贾晓东. 1.55 μm 相干测风激光雷达样机的研制[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2015.
- [2] Rod Frehlich, Robert Sharman. Maximum likelihood estimates of vortex parameters from simulated coherent doppler lidar data [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(2): 117-130.
- [3] Liu Yin'en. The study of high-precision frequency estimation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
刘银恩. 高精度频率估计算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] Saman S Abeysekera. Efficient frequency estimation using the pulse-pair 'method at various lags' [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(12): 1542-1546.
- [5] Saman S Abeysekera. Performance of pulse-pair method of Doppler estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(2): 520-531.
- [6] Qi Guoqing, Jia Xinyue. Accuracy analysis of frequency estimation of sinusoid based on interpolated FFT [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(4): 625-629. (in Chinese)
齐国清, 贾欣乐. 插值 FFT 估计正弦信号频率的精度分析 [J]. 电子学报, 2004, 32(4): 625-629.
- [7] Zhang Jian. Signal extraction and simulation for 2 μm coherent wind lidar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
张健. 2 μm 相干激光测风雷达信号提取与仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

- [8] Thomas Grandke. Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1983, 32(2): 350–355.
- [9] Hu Yang, Zhu Heyuan. 1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130001. (in Chinese)
胡杨, 朱鹤元. 1.55 μm 全光纤相干多普勒测风激光雷达 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S130001.
- [10] Zhu Hao, Liu Wenyao, Hao Yongjie, et al. Study on pulse-to-pulse algorithm for measuring acoustic frequency offset [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 18(1): 195–200. (in Chinese)
朱昊, 刘文耀, 郝永杰, 等. 脉冲对实现回波频偏测量的算法研究[J]. 传感器学报, 2005, 18(1): 195–200.
- [11] Zhu Hao, Liu Wenyao, Wang Xiaodong, et al. Implementation of pulse-to-pulse algorithm on ADCP for measuring velocity [J]. *Computer Engineering*, 2005, 31(21): 48–50. (in Chinese)
朱昊, 刘文耀, 王晓东, 等. 脉冲对技术在 ADCP 测速系统的实现[J]. 计算机工程, 2005, 31(21): 48–50.
- [12] Zhai Shenghua. Study of a high-precision frequency estimation algorithm [J]. *Space Electronic Technology*, 2004 (1): 64–67. (in Chinese)
翟盛华. 一种高精度的频率估计算法 [J]. 空间电子技术, 2004(1): 64–67.
- [13] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1721–1724. (in Chinese)
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测试技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1721–1724.
- [14] Jia Xiaodong, Sun Dongsong. Maximum likelihood discrete spectral peak estimation in coherent wind lidar and Monte Carlo simulation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 061013. (in Chinese)
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): 061013.
- [15] Li Li, Wang Canzhao, Xie Yafeng. Wind field inversion technique for scanning wind lidar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 251–258. (in Chinese)
李丽, 王灿召, 谢亚峰. 扫描式测风激光雷达的风场反演 [J]. 中国光学, 2013, 6(2): 251–258.
- [16] Zhang Qingyuan. Comprehensive information processing system of helicopter anticollision laser radar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 80–87. (in Chinese)
张清源. 直升机防撞激光雷达综合信息处理系统[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 80–87.