

滤波器组在相干激光测风雷达信号处理中的应用

曹文勇¹, 马明², 赵彬¹, 何幸锴¹, 侯天晋¹, 周鼎富¹, 邓华荣¹

(1. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041; 2. 总参大气环境研究所, 北京 100029)

摘要: 首先简要介绍了相干激光测风雷达和数字滤波器组的工作原理, 然后重点分析了余弦调制滤波器组。余弦调制滤波器组具有实现简单、占用资源少等特点。信号通过滤波器组后可分解成若干个窄带子信号, 目标的多普勒频率将落入其中一个子带信号中, 针对这一子信号进行处理可获得较高的信噪比。利用 Matlab 设计出了 8 通道余弦调制滤波器组, 然后对回波信号进行处理, 从仿真结果和实测信号处理结果可以看出: 该方法可以判断并抽取出多普勒频率所在的子带信号。

关键词: 滤波器组; 激光雷达; 信号处理; 相干探测

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1179-05

Application of filter bank on signal processing of coherent wind lidar

Cao Wenyong¹, Ma Ming², Zhao Bin¹, He Xingkai¹, Hou Tianjin¹, Zhou Dingfu¹, Deng Huarong¹

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Atmospheric Environment, General Staff Department, Beijing 100029, China)

Abstract: The principle of coherent wind lidar and digital filter banks were introduced briefly at first, and then the theory of cosine modulated filter banks was analyzed. Cosine modulated filter banks have excellent characteristics such as simple realization and less resources occupying. Signal can be decomposed into several narrow sub-band by using cosine modulated filter banks. The Doppler frequency of the target will fall into one of sub-band and the higher SNR can be obtained by processing each sub-band. Based on this method, a 8-channel cosine modulated filter banks were designed with Matlab, which was used in coherent wind lidar signal processing simulations. The results of the simulation and measured signal prove the correctness of the method.

Key words: filter banks; laser radar; signal processing; coherent detection

收稿日期: 2012-09-10; 修订日期: 2012-10-15

作者简介: 曹文勇(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光测风雷达方面的研究。Email: caowenyong1985@126.com

导师简介: 侯天晋(1956-), 男, 研究员, 主要从事激光应用技术方面的研究。Email: tianjinhou@gmail.com

0 引言

相干激光测风雷达可对晴空湍流、涡流、小尺度风切变等进行实时高分辨率测量。它可用于战区风场监测,为武器系统精确打击目标提供实时气象保障;也可布置在机场周围,用于探测飞机起降航线上的湍流及风切变,保障飞机起降安全。因此,相干激光测风雷达技术已经成为各国研究的热点^[1]。

相干激光测风雷达的发射波长在微米量级,因而接收机输出的回波中频信号带宽可达几十兆兹。大中频带宽会引入较强噪声,降低信号信噪比,不利于多普勒频率检测;同时还意味着维持回波信号最小信噪比就必须提高激光发射功率,从而给激光器带来较大压力。

为解决以上问题,文中提出采用数字滤波器组,对相干激光测风雷达的回波信号进行预处理,从中判断并抽取出含多普勒频率的窄带信号,从而降低多普勒频率检测难度。

1 相干激光测风雷达原理

空气中存在大量的气溶胶粒子随风飘动,成为风场的示踪物^[2]。相干激光测风雷达向目标区域发射激光信号被大气中的气溶胶后向散射回来,由多普勒效应可知,雷达发射光与气溶胶粒子散射光回波有一频差,即多普勒频率。它与气溶胶粒子运动速度的关系如下:

$$\Delta f = 2 \frac{v f}{c} = 2 \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

式中: Δf 为多普勒频率; v 为投影在激光径向的气溶胶粒子运动速度; λ 为发射激光波长。

散射光经光学接收天线收集后与雷达本振光一起进入光电探测器进行相干混频,由探测器输出相干电中频信号。检测该中频信号中包含的多普勒频率即可计算出激光径向风速,再结合特定的扫描方式进行多点风速测量,相干激光测风雷达就能反演出测量区域的风场^[3]。

2 数字滤波器组原理

2.1 滤波器组的概念

通常,滤波器组是指有共同输入的一组滤波器,

其结构如图 1 所示。

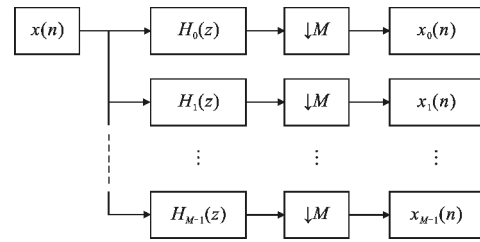


图 1 滤波器组

Fig.1 Filter banks

若滤波器 $H_0(z)$ 、 $H_1(z)$ 、 \dots 、 $H_{M-1}(z)$ 的频率特性如图 2 所示,那么输入信号 $x(n)$ 经过这些滤波器滤波后的输出信号为 $x_0(n)$ 、 $x_1(n)$ 、 \dots 、 $x_{M-1}(n)$ 。它们为 $x(n)$ 的子带信号,其频谱之间没有交叠。滤波器 $H_0(z)$ 、 $H_1(z)$ 、 \dots 、 $H_{M-1}(z)$ 起到了分解信号的作用,因此它们被称为分析滤波器组^[4]。

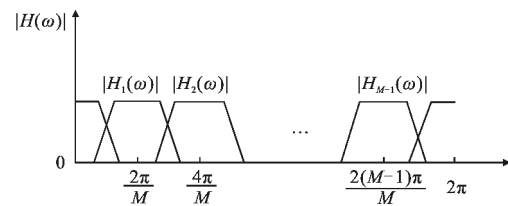


图 2 分析滤波器组的幅频响应

Fig.2 Amplitude frequency response of analysis filter bank

设中频信号 $x(n)$ 通过 M 通道滤波器组,第 k 个通道的传输函数为 $h_k(n)$,则第 k 个通道的输出为:

$$x_k(n) = x(n) * h_k(n) \quad (2)$$

式中: $*$ 表示卷积^[5]。

众所周知,除白噪声外,其他信号都不会均匀地分布在整个频带内^[6]。因此,多普勒信号的能量只集中在某个频段内,如果把中频信号分解成若干个窄带子信号,然后抽取出含有多普勒频率的窄带子信号进行处理,就可以滤除大部分噪声而获得高的信噪比。

2.2 余弦调制滤波器组

余弦调制滤波器组可以实现分析滤波器的系数是实的,并且子带信号也是实信号。它的实现比较简单,只需优化设计一个原型低通滤波器,然后利用余弦变换来实现。因此,它所需的乘法次数较少,如果用 FPGA 来实现,则硬件资源占用少,成本低。

设 M 通道余弦调制滤波器组中的原型低通滤波器为 $H(z)$,其冲激响应为 $h(n)$,即满足下式:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad (3)$$

分析滤波器可以通过调制原型滤波器来得到^[7-9],即

$$H_k(z) = a_k c_k H(zW_{2M}^{k+0.5}) + a_k^* c_k^* H(zW_{2M}^{-(k+0.5)}) \quad (4)$$

式中: $a_k = e^{j\theta_k}$, $\theta_k = (-1)^k \pi/4$; $c_k = W_{2M}^{(k+0.5)(N-1)/2}$; $k=0, 1, \dots, M-1$ 。

那么, $H_k(z)$ 的冲激响应为:

$$h_k(n) = 2h(n) \cos \left[(k+0.5)n \frac{\pi}{M} + (-1)^k \frac{\pi}{4} \right] \quad (5)$$

为了使 $H_k(z)$ 是因果的,需要将上式平移 $N/2$,因此最后所得到的 $H_k(z)$ 的冲激响应为:

$$h_k(n) = 2h(n) \cos \left[(k+0.5) \left(n - \frac{N}{2} \right) \frac{\pi}{M} + (-1)^k \frac{\pi}{4} \right] \quad (6)$$

在由 M 个滤波器组成的分析滤波器组中,每个滤波器的通带宽度应满足下式:

$$B_p < \frac{2\pi}{M} \quad (7)$$

式中: B_p 为单位为 rad 的数字频率。从以上分析可以看出,余弦调制滤波器组的设计归结为原型低通滤波器的设计。在实际应用中为了达到特定的指标要求,要用优化的方法来设计原型滤波器。滤波器优化逼近设计方法的基本思路就是选择目标函数,然后改变参数使目标函数最小化。参考文献[10]中给出了一种简单的设计方法,首先采用 Parks-McClellan 方法设计一个等波纹的滤波器,然后按照目标函数

$$\xi = \max_{0 < \omega < \pi < M} [|H(e^{j\omega})|^2 + |H(e^{j(\omega-\pi)/M})|^2 - 1] \quad (8)$$

最小的优化准则,反复调整滤波器的通带边界频率使其达到最小。

当激光径向风速不同时,即多普勒频率不同,它将落入到不同的窄带滤波器中。

3 仿真实验

利用 Matlab 设计一个 8 通道余弦调制滤波器组,带宽为 60~100 MHz,其中每个子滤波器带宽为 5 MHz,然后对含有高斯白噪声的正弦信号进行滤波降噪处理。设采样率 $f_s=400$ MHz,信号中频为 $f_0=80$ MHz,多普勒频率为 $f_d=2$ MHz,信号带宽为 60~100 MHz,加入高斯白噪声,信号的信噪比为 -20 dB。即

$$x(t) = \sin [2\pi (f_0 + f_d)t] + \text{noise}(t) \quad (9)$$

图 3 所示为加噪信号的时域图形。

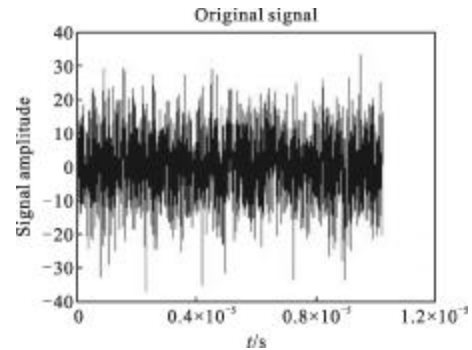


图 3 加噪信号

Fig.3 Signal with noise

在 Matlab 中利用上面所设计的滤波器组对上述信号进行滤波处理,滤波后的输出信号的频谱如图 4 所示。

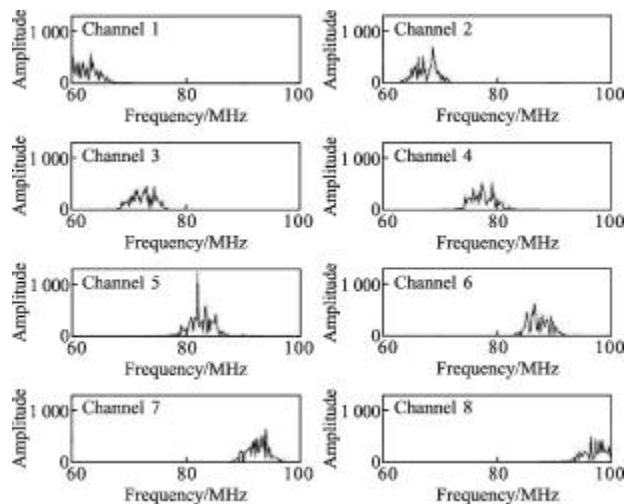


图 4 滤波器组的输出

Fig.4 Output of the filter banks

可以看出,在滤波器组的第五通道输出中有一峰值叠加在噪声频谱上,而其他通道则是比较平坦的噪声频谱。因此,可以判断在第五通道中存在多普勒频率。在仿真实验中滤波前信号的信噪比为 -20 dB,窄带滤波器组第五通道输出信号的信噪比为 -10.5 dB,其他通道输出信号的信噪比均低于该值,通过窄带滤波器组滤波后信号的信噪比得到了提高。

改变不同的多普勒频率再进行仿真,所设计的滤波器组均能给出正确判断,这一结果验证了文中方法的正确性和普适性。

下面利用该滤波器组对实测信号进行预处理,找到多普勒频率所在的子带。首先对采集的回波进

行距离门划分, 每个门的距离宽度设定为 75 m, 分成 4 个距离门。图 5 为采用传统方法处理的结果。图 6~9 为滤波器组对各个距离门信号处理的结果。

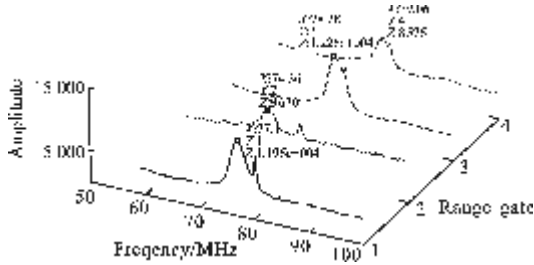


图 5 传统方法处理结果

Fig.5 Result of traditional method

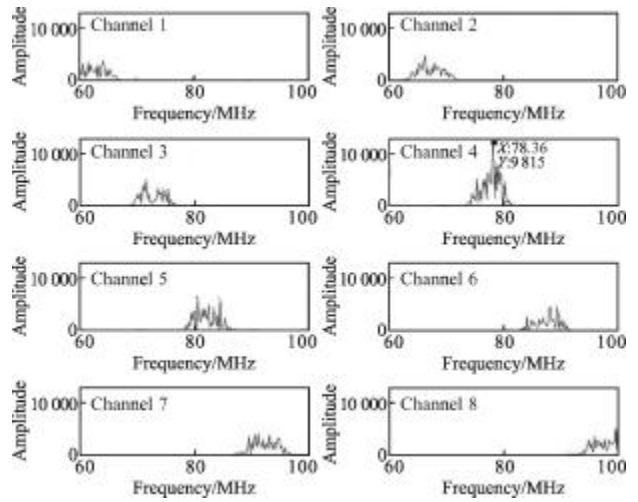


图 8 第三个距离门处理结果

Fig.8 Result of the third range gate

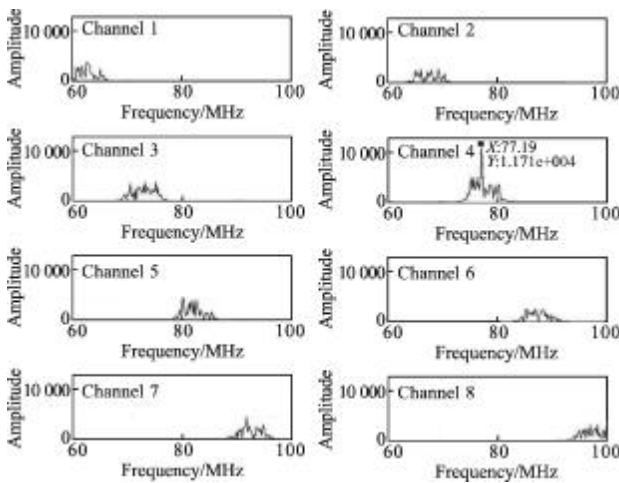


图 6 第一个距离门处理结果

Fig.6 Result of the first range gate

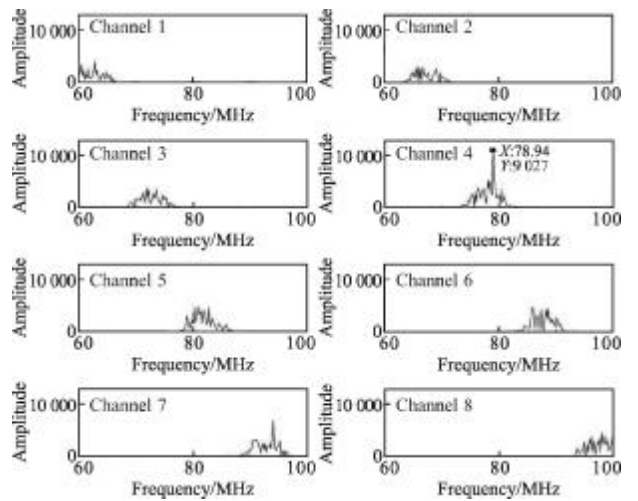


图 9 第四个距离门处理结果

Fig.9 Result of the forth range gate

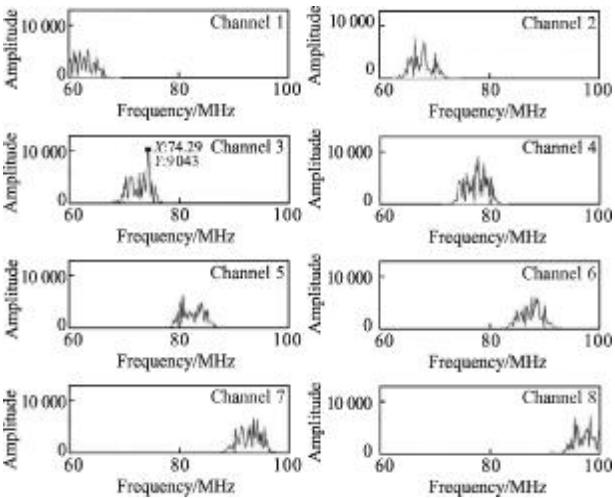


图 7 第二个距离门处理结果

Fig.7 Result of the second range gate

从图 6~9 中可以看出, 每个距离门信号的多普勒频率都落入了滤波器组中相应的通道中。对于第 1、3、4 个距离门, 滤波器组在第四个通道中有一峰值输出, 每个距离门所得到的频率值分别与用传统方法处理对应距离门信号得到的结果一致, 其他通道都是信噪比较低的噪声频谱, 从而抽取出含有多普勒频率的子带为 75~80 MHz; 而第二个距离门, 滤波器组在第三个通道中有一峰值输出, 其频率值也与用传统方法处理得到的结果一致, 从而判断出含有多普勒频率的子带为 70~75 MHz。由此可以看出利用滤波器组对多普勒信号进行预处理的正确性。

4 结 论

文中首先介绍了相干激光测风的原理, 然后对滤波器组的原理及其信号预处理进行了分析。由于余弦调制滤波器组的实现比较简单, 占用资源少并且滤波器的系数是实的, 所以文中采用余弦调制滤波器组来对信号进行处理。在 Matlab 中设计了一个八通道余弦调制滤波器组对信号进行处理, 所做仿真的结果和实测信号处理结果充分说明了利用滤波器组对多普勒信号进行窄带提取预处理是可行的。

参考文献:

- [1] Zhang Fangpei, Xue Haizhong, Hu Yongzhao, et al. Coherent Doppler wind lidar[J]. Applied Optics, 2009, 30(5): 1045-1050. (in Chinese)
张芳沛, 薛海中, 胡永钊, 等. 相干多普勒测风激光雷达[J]. 应用光学, 2009, 30(5): 1045-1050.
- [2] Li Dongmei, Zheng Yongchao, Pan Jingyan, et al. Index system of coherence Doppler wind lidar [J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 880-884. (in Chinese)
李冬梅, 郑永超, 潘静岩, 等. 相干多普勒激光测风雷达系统研究[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 880-884.
- [3] Igor Smalikho. Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent doppler lidar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 20: 276-291.
- [4] Hu Guangshu. Modern Signal Processing Tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
胡广书. 现代信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] Li Guangzhu, Cai Delin, Chen Shaoying. Radar wind profiler signal processing based on filter bank[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(6): 465-469. (in Chinese)
李广柱, 蔡德林, 陈少应. 基于滤波器组的风廓线雷达信号处理技术[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(6): 465-469.
- [6] Wan Fu, Ma Rui, Cai Min. An adaptive processing of echo signals for pulse lidars[J]. Radar & Ecm, 2010, 30(1): 27-29. (in Chinese)
万福, 马锐, 蔡敏. 一种脉冲激光雷达回波信号自适应处理[J]. 雷达与对抗, 2010, 30(1): 27-29.
- [7] Yao Tianren. Digital Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
姚天任. 数字信号处理[M].北京: 清华大学出版社, 2011.
- [8] Fan Hong, Meng Qingfeng, Zhang Youyun, et al. Signal feature detection based on filter bank and higher order cumulants [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(2): 29-32. (in Chinese)
范虹, 孟庆丰, 张优云, 等. 基于滤波器组和高阶累积量的信号特征检测[J]. 振动与冲击, 2007, 26(2): 29-32.
- [9] Zhang Z J, Yang Y. Efficient iterative design of modified DFT filter banks [J]. Electronics Letters, 2011, 47(15): 846-847.
- [10] Selesnick I W, Burrus C S. Exchange algorithms that complement the Parks-McClellan algorithm for linear-phase FIR filter design [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems, 1997, 44(2): 137-143.
- [11] Rehman Nur, Mandic D P. Filter bank property of multivariate empirical mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(5): 2421-2426.