

相干激光测风雷达信号提取与仿真

徐 博 王春晖 张 健 王 骐

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 讨论了将脉冲信号积累应用于相干激光雷达的具体方法, 并利用 Simulink 软件平台对信号处理过程进行仿真。由仿真结果可知, 在相应的设定下, 进行 0.028 s 以上的相干积累, 信噪比(SNR)增益可达 22 dB 以上; 如果在 0.007 s 内先进行短时相干积累, 再进行非相干积累, 当积累总时间超过 0.020 s 时, 信噪比增益将达到 18 dB 以上。

关键词 信号处理; 激光测风雷达; 相干积累; 非相干积累

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

Signal Extraction and Simulation for Coherent Wind Lidar

Xu Bo Wang Chunhui Zhang Jian Wang Qi

(National key Laboratory of Tunable laser Technology Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract We discuss the methods to apply pulse integration in coherent lidar, and simulate the course of signal processing by Simulink softplat. According to the result of the simulation, under certain parameters set, signal-noise ratio (SNR) can achieve 22 dB at least, when the coherent integrated time is more than 0.028 s. If we process a shot-time coherent integration within 0.007 s at first, then process non-coherent integration, SNR can achieve 18 dB at least, when the total integrated time is more than 0.020 s.

Key words signal processing; wind lidar; coherent integration, noncoherent integration

1 引 言

相干多普勒激光测风雷达, 以大气中气溶胶的米氏散射为基础, 收发合置光学天线, 微脉冲外差探测体制, 能够直接从后向散射气象回波中提取多普勒频率信息, 经过数据反演, 获取大气二维或三维风场信息, 是目前研究中小尺度气象现象的最有效手段之一^[1,2], 由于受到相干激光测风雷达所探测目标、光波大气传输特性以及雷达发射功率等诸多因素的限制, 雷达回波的信噪比往往较低。特别是对于相干激光雷达, 单脉冲回波的信噪比最低可达 -40 dB。对于常规的雷达系统, 信号积累是一种提高回波的信噪比的有效方法。本文结合激光雷达的具体应用背景对信号积累的过程进行仿真^[3-7]。

仿真所选用的 Simulink 软件是一种基于 Matlab 平台的框图设计环境, 是目前在各领域进行动态系统建模、仿真和分析的有效工具^[8]。其框图式的建模可以方便地实现对实际系统的模拟。本文主要用到的模块库是信号处理模块库 (Signal Processing Blockset)。

2 信号积累在相干激光测风雷达中的应用

在测风雷达的具体应用背景中, 对风场速度的测量要求从回波信号中提取多普勒频移信息, 因此, 通过窄带多普勒滤波器组实现对信号的相干积累。

基金项目: 国家自然科学基金(60577032)资助课题。

作者简介: 徐 博(1984-), 男, 辽宁人, 硕士研究生, 主要从事激光雷达信号处理方面的研究。

E-mail: syxubo6618@163.com

导师简介: 王春晖(1965-), 男, 黑龙江人, 教授, 博士生导师, 主要从事相干激光成像雷达、激光大气遥感、微弱信号检测等方面的研究。E-mail: wangchunhui02@sohu.com

$$|H_k(f)| = \left| \sum_{i=1}^N \exp[j2\pi(i-1)(fT - k/N)] \right| = \frac{\sin[\pi N(fT - k/N)]}{\sin[\pi(fT - k/N)]}, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N s(i-1 \cdot T) \cdot \exp[-j2\pi(i-1)k/N] = s \frac{k}{NT}, \quad (2)$$

由于窄带多普勒滤波器组中第 k 个滤波器的频率响应幅值如(1)式,其完成的运算如(2)式,这等同于离散傅里叶变换(DFT),因此用其快速算法实现这一过程。从理论上讲, N 个横向滤波器可以使回波信噪比(SNR)提高 N 倍。式中 f 为频率响应函数的自变量,即信号的频率, T 为雷达回波信号的重复周期, s 为系统零时刻的输入信号,即 $s(0)$ 。如果回波由于各种原因不能保证长时间的相干而需要进行非相干积累,则首先在能够保证相干的短时间内进行单帧快速傅里叶变换,再对各帧快速傅里叶变换(FFT)的结果进行平均以实现非相干积累。其中单帧的长度对应于相干积累的时间长度,而进行平均的帧数对应于进行非相干积累的时间段数。相邻的两帧在时间点上应有一定长度的重合区域,这样既

缩短了总的信号积累时间,又增强了各帧信号的连续性。

在实际应用中,由于激光雷达发射波具有较高的频率,其多普勒频率一般很高。此时,执行一个脉冲重复周期内的单个距离门需要一组采样点,而信号积累时,单次距离门的各组采样点是否具有较好的连续性将影响到快速傅里叶变换后的频域效果,这在频域上体现为在多普勒频率所对应的滤波器两侧出现大量的边带,造成了信噪比增益损耗,降低了积累效率。

3 信号积累过程的仿真

在 Simulink 环境下建立相干激光雷达的基本系统模型如图 1 所示。

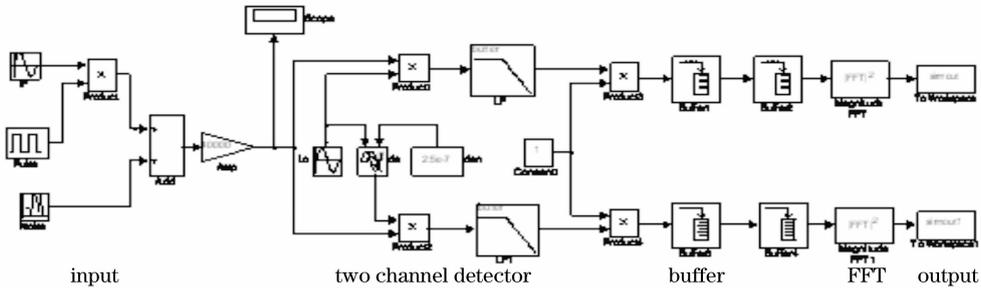


图 1 Simulink 仿真的系统模型

Fig. 1 Systematic model of the Simulink simulation

对模型中信号的输入端按实际的中频信号进行设定,载波频率(中频+多普勒频率)为 60 MHz,脉冲重复频率为 500 Hz,脉宽为 500 ns。同时在输入端还加入了高斯白噪声。其中,信号的功率设定为 3.16×10^{-5} mW,噪声的功率设定为 6.66×10^{-4} mW,输入信号的信噪比为 -13.24 dB;之后通过正交双通道混频模块,本振光频率设定为 100 MHz,得到的多普勒频率为 -40 MHz;双路信号分别通过两个缓存,第一个缓存的作用是实现距离门的选取,帧长度即为所选距离门的大小,负的重叠区长度对应于跳过的其他距离门,模型中距离门的长度设定为 100 点。模型中第二个缓存的作用是对缓冲区重新界定以实现相干积累与非相干积累。通过设定不同的帧长度以观察不同长度下的相干积累,将帧间重叠区的长度统一设定为单帧长度的 50%;最后,将数据以帧的形式进行快速

傅里叶变换,观察积累效果。

3.1 相干积累过程的仿真

首先利用图 1 所示的系统模型仿真观察信号的

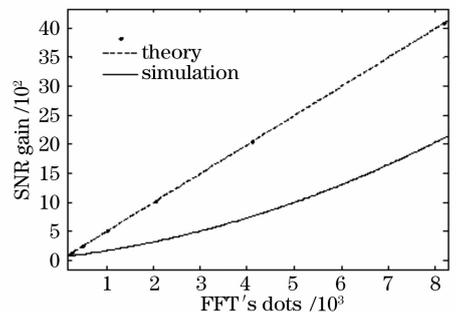


图 2 信噪比增益关于快速傅里叶变换点数的理论曲线与仿真拟合曲线

Fig. 2 Theoretic curve and fitting curve showing the relationship between SNR gain and numbers of FFT

相干积累。分别选取快速傅里叶变换的点数为 256, 512, 1024, 2048, 4096 和 8192, 观察不同长度上的相干积累输出的频谱图。据图确定各点数快速傅里叶变换下的信噪比增益, 并利用 Matlab 软件拟合出信噪比增益关于快速傅里叶变换点数的曲线, 将其与理论上的曲线进行比较, 比较的结果如图 2 所示。可以明显看出相干积累时信噪比增益存在损耗。这种损耗应该是由于同一距离门各组采样点间的不连续性和进行相干积累信号的长度有限性造成的。信噪比增益关于快速傅里叶变换点数的仿真拟

合曲线的函数表达式为

$$G = 1.95 \times 10^{-5} X^2 + 0.09X + 57.88, \quad (3)$$

式中 G 表示回波信号的信噪比增益, X 表示相干积累的点数。通过示波器模块观察相干积累前时域上信号的波形图如图 3 所示。

在对信号进行了不同长度的相干积累后可以从频谱图明显地观察到信号的信噪比得到不同程度的改善。分别给出 512 点和 8192 点快速傅里叶变换后的频谱输出如图 4 所示。

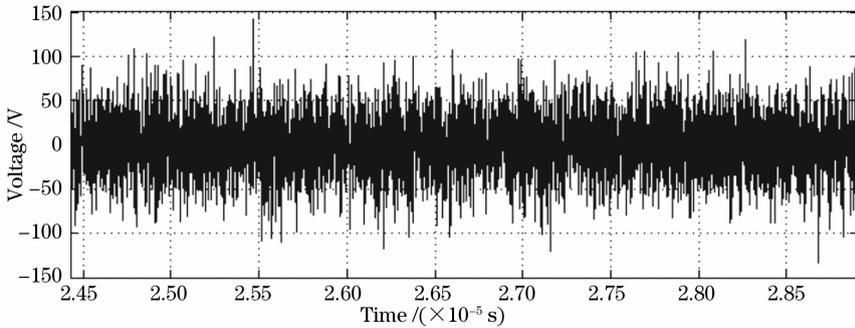


图 3 相干积累前信号时域上的波形图

Fig. 3 Waveform in time domain before coherent integration

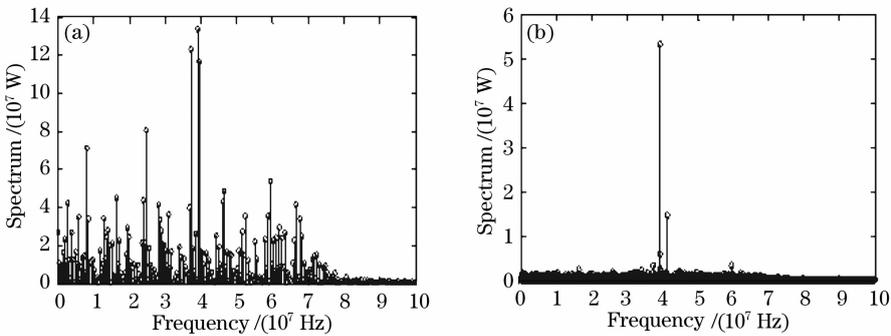


图 4 不同长度相干积累的输出频谱图。(a) 512 点, (b) 8192 点

Fig. 4 Output spectrum in different coherent integrated lengths. (a) 512 dots'CI, (b) 8192 dots'CI

根据图 2 所示的关系, 当只对信号进行相干积累时, 进行 1024 点相干积累所得到的信噪比增益可达 22 dB 以上。再由回波的脉冲重复频率和脉宽可得对应的信号积累时间为大于 0.028 s。

3.2 非相干积累过程的仿真

以 256 点快速傅里叶变换的短时相干积累结合多帧非相干积累为例, 观察非相干积累对信噪比的进一步改善状况。积累前信号在时域上的波形图即图 3。只进行 256 点相干积累的情况下, 信号在频域的输出如图 5 所示。可以看出此时的输出仍不能满足从噪声当中提取信号的要求。

利用函数对多帧的相干积累输出进行平均。分别选取进行平均的帧数为 2 到 13, 并拟合出信噪比

增益关于帧数的曲线如图 6 所示。

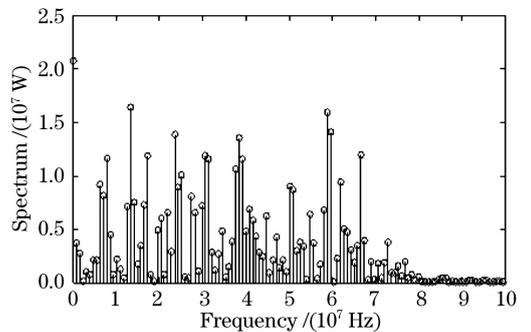


图 5 256 点长度下只进行相干积累的输出频谱图

Fig. 5 Output spectrum only after coherent integration in 256 dots

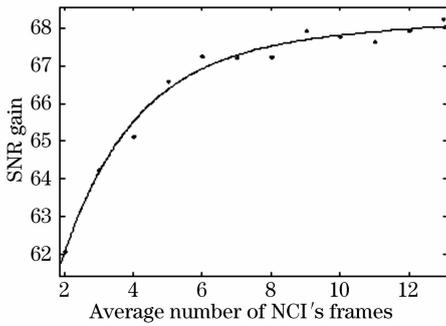


图6 信噪比增益关于非相干积累平均帧数的仿真拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve showing the relationship between SNR gain and number of frames in noncoherent integration
设 M 为非相干积累平均的帧数, 则图 6 所示的

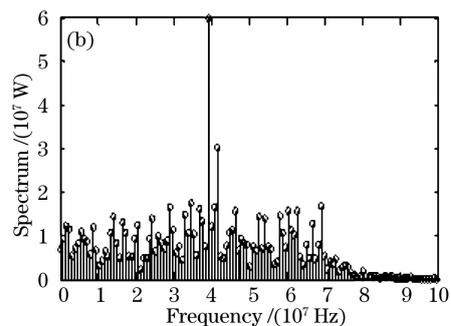
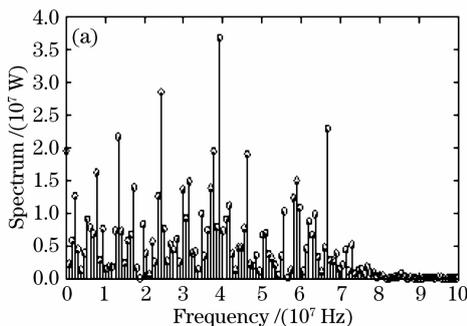


图7 256点相干后不同平均帧数非相干积累的输出频谱图。(a) 2帧, (b) 8帧

Fig. 7 Output spectrum of different frames in noncoherent integration after 256 dots' coherent integration.

(a) 2 frames, (b) 8 frames

4 结 论

通过对信号积累过程的仿真观察,对于脉冲重复频率为 500 Hz,脉宽为 500 ns 的信号,多普勒频率-40 MHz 的信号,当只进行相干积累时,信号积累时间在 0.028 s 以上,信噪比增益可达 22 dB 以上;对于非相干积累,当相干积累时间为 0.007 s,总的信号积累时间在 0.020 s 以上时,信噪比增益可达 18 dB 以上。信号积累的方法对于相干激光雷达有效可行。

参 考 文 献

- Xia Haiyun, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Design of verifying attachment for calibration of wind lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1412~1416
- 夏海云,孙东松,钟志庆等. 应用于测风激光雷达的多普勒校准仪[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1412~1416
- Liu Jiqiao, Bu Lingbing, Zhou Jun *et al.*. Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection Doppler wind lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1339~1344
- 刘继桥,卜令兵,周军等. 车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1339~1344

拟合曲线函数表达式为

$$G = 67.49 - 14.26\exp(-0.47M). \quad (4)$$

图 7 给出了 2 帧和 8 帧非相干积累后的信号输出频谱图,可以看出,随平均帧数的增加输出效果明显改善。这是由于平均帧数增加可以提高信号检测的灵敏度。另外,非相干积累对同一距离门各组采样点间的不连续性造成的信噪比增益损耗有一定的改善效果,但这种对信号信噪比的改善是有限的。

根据图 7 所示的关系,当对 256 点相干积累后的信号再进行非相干积累时,进行 6 帧以上非相干积累所得到的信噪比增益可达 18 dB 以上。对应的相干积累时间为 0.007 s,总的信号积累时间为 0.020 s 以上。

- Wang Mingjun, Wu Zhensen, Li Yingle *et al.*. Modeling and measuring the pulse laser scattering echo power from whole dimension target[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1557~1561
- 王明军,吴振森,李应乐等. 全尺寸目标激光脉冲后向散射回波功率测定和建模[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1557~1561
- Ma Yong, Liang Kun, Lin Hong *et al.*. Model of atmosphere detection in based on Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 963~966
- 马泳,梁坤,林宏等. 基于布里渊散射信号检测的大气探测模型[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 963~966
- Zhou Yu, Zhang Linrang, Tian Hui. Simulation of radar system based on Matlab/Simulink [J]. *Computer Simulation*, 2004, **21**(11): 235~238
- 周宇,张林让,田慧. 基于 Matlab/Simulink 的雷达系统仿真[J]. *计算机仿真*, 2004, **21**(11): 235~238
- Hu Haimang, Yang Wanghai. Modeling and simulation of a pulse-Doppler radar system based on Simulink[J]. *J. Systems Engineering and Electronics*, 2005, **27**(10): 1692~1693
- 湖海莽,杨万海. 基于 Simulink 的脉冲多普勒雷达系统建模与仿真[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, **27**(10): 1692~1693
- Xia Guifen, Zhao Baojun. Detection of air target based on multifractal analysis in a laser radar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 51~53
- Li Ying, Zhu Boli, Zhang Wei. Modeling and Simulation Basis of Simulink Dynamic System[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. 1~128
- 李颖,朱伯利,张威. Simulink 动态系统建模与仿真基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004. 1~128