北京大学学报(自然科学版),第47卷,第1期2011年1月

Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis , Vol. 47 , No. 1 (Jan. 2011)

风廓线雷达去地杂波方法研究

张雯雯[†] 刘黎平 阮征 葛润生

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081; † E-mail: zww8348@163.com

摘要 针对传统的回波模拟方法不能很好的模拟高斯白噪声的分布,也不利于反应真实的回波信号的问题,改进 了回波信号的模拟方法,同时为了减小地杂波对信号参数估计的影响,在静态小波变换的基础上,提出了一种抑制 风廓线雷达地杂波的方法,由于采用提升实现方式,其运算量并没有明显增加。相对于传统的基于 DWT 去地杂波 的方法,新方法更加适用于较低信杂比的情况。仿真结果验证了新方法的有效性。 关键词 风廓线雷达;验证系统;地杂波;静态小波变换 中图分类号 TN957; P412

Ground Clutter Suppression of Wind Profiler Radar

ZHANG Wenwen[†] ,LIU Liping ,RUAN Zheng ,GE Runsheng

National Key Laboratory of Severe Weather , Chinese Academy of Meteorological Sciences , Beijing 100081; † E-mail: zww8348@163.com

Abstract Aimed at the problems that the traditional echo simulation methods cannot well simulate the distribution of Gaussian white noise, and is not conducive to react the real echo signal as well, the authors improve the echo signal simulation method, and propose a method to removing ground clutter from wind profiler radar based on static wavelet transforms (SWT). The new methods can be applied to lower signal to clutter ratio (SCR) whose calculation amount is little more than traditional method based on discrete wavelet transforms (DWT). The simulation results show the validity of the algorithm.

Key words wind profiler radar; validate system; ground clutter; static wavelet transform

风廓线雷达是利用大气湍流对电磁波的散射作 用,对大气进行探测的一种遥感设备,发展于20世纪60年代。经过二十多年的探测实践,探测技术逐 步发展完善,日趋成熟,气象工作者通过分析雷达的 回波资料信息,已经可以对天气的变化情况做出很 好的分析和判断^[12]。

但是由于大量的地物杂波以及噪声的存在,严 重地影响回波参量估计的正确性,也限制了算法在 比较恶劣环境中的使用。为了解决这一问题,出现 了很多杂波抑制方法,比如非相参 MTI 对消器、IIR 滤波器、频域滤波法和小波滤波法等^[36]。前两种 滤波器设备量要求大,会产生多普勒频率偏移,因此 限制了其推广和应用。频域滤波法则是考虑到地物 杂波在频域中的特点而提出的,包括零频附近回波 谱对称消法,以及 NOAA 风廓线雷达业务运行网采 用的均值替代中心对称谱法等。这些方法对于风速 较大时(地物杂波谱与大气谱分离的情况下)杂波 抑制效果较好,而风速较小(杂波谱与大气回波谱 交叠)情况下往往容易将零频附近的部分大气谱消 去,导致多普勒频移计算产生偏差,从而影响了雷达 的测量精度。1997 年,Jordan 等^[5]提出了基于小波 变换去地物杂波干扰的方法,把经过相干积分后的 时域信号变换到小波域中,在小波域中可以区分杂 波和晴空大气回波,将杂波成分去除,再将信号重构

国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906039)和863计划(40775021)资助

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2010-04-15; 网络出版日期: 2010-12-28

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2442.N.20101228.1339.003.html

即得到已抑制杂波的大气回波。本文也在这方面进 行探索和研究,在改进以往的回波模拟方法的同时, 还在传统的小波滤波方法的基础上,提出一种基于 提升静态小波变换的抑制地杂波的方法,并通过仿 真验证了此方法的有效性。

1 风廓线雷达回波参量估计验证系统
 1.1 传统的雷达回波信号模拟方法

风廓线雷达信号包括大气湍流的散射回波、均 匀背景噪声和或多或少的地杂波和间歇性杂波。由 于本文主要研究地杂波信号的去除,所以暂时不考 虑间歇性杂波。

地杂波是由于雷达附近的静止目标如树、建筑 物或电力线等散射的信号进入雷达天线旁边造成 的,它产生的多普勒功率谱在零频移附近。为了模 拟天气回波功率和地杂波的统计谱型,假设其统计 谱型形式^[7]为

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_f}} \exp\left[-\frac{(f-\bar{f})^2}{2\sigma_f^2}\right], \quad (1)$$

其中 \overline{f} 为多普勒平均频率 ,通常对于地杂波信号而 言 , \overline{f} = 0 σ_f = $2\sigma_v/\lambda \sigma_v$ 为速度谱宽 λ 为波长。

考虑到回波信号中不可避免地包含噪声,根据 式(1)将统计谱加噪并随机化,即可模拟出天气回 波功率的统计谱型:

$$S(f) = -\ln(1 - \operatorname{rand}) \left[\frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \cdot \exp\left[-\frac{(f - \overline{f})^2}{2\sigma_f^2} \right] + c \right], \quad (2)$$

其中, *P*为信号功率, *c*为噪声功率谱密度, rand为 (0,1)之间均匀分布的随机数序列。

同时再假设其相位谱随机分布在 $(0, 2\pi)$ 区间, 即 $\Psi(f) = 2\pi \cdot \text{rand}$,即可模拟出与实际回波相近 的复频谱:

$$S' = A_n + \mathbf{j} \cdot B_n , \qquad (3)$$

其中, $A_n = \sqrt{S(f)}\cos\Psi(f)$, $B_n = \sqrt{S(f)}\sin\Psi(f)$ 。 对其进行傅立叶反变换,即可得到与雷达接收机 I 通道、Q 通道相对应的测试值。

1.2 改进的雷达信号模拟方法

上述方法对统计谱随机化时采用的是均匀分布 序列,虽然也能在一定程度上模拟回波信号的统计 谱型,但是具有以下两个缺点:1)不能很好的模拟 高斯噪声的分布情况;2)对于回波信号的模拟,采 用等概率的形式对其进行随机化,不利于反应真实 的回波信号。为了避免上述现象,这里采用均值为 1的高斯随机序列来代替式(2)中的均匀分布的随 机序列,其统计谱型如下所示:

$$S(f) = 1 + \operatorname{sqrt}(0, 5) \cdot \operatorname{randn} \cdot \left[\frac{P}{\sqrt{2\pi\sigma_f}} \exp\left[-\frac{(f-\overline{f})^2}{2\sigma_f^2}\right] + c\right], \quad (4)$$

randn 表示均值为 0,方差为 1 的高斯白噪声序列。

图1给出了分别采用这两种不同方法模拟回波 信号时,与原来没有随机化的统计谱之间的对比图 形。从图1可以看出,传统方法在真值附近的震荡 程度要大于改进的方法。





2 基于提升 SWT 的地杂波抑制方法

观察雷达接收到的回波信号,可以看到回波的 多普勒功率谱不仅包含具有均匀噪声背景的净空信 号谱峰,还附加有地杂波谱峰,而且这种杂波谱很有 可能与净空信号交叠在一起,其能量常常比净空回 波信号能量高出几个数量级。当这种地杂波谱与净 空信号谱交叠时,就会淹没净空信号,在这种情况 下,难以区分多普勒功率谱中净空信号和地杂波。 下面首先根据上一节所述方法,模拟出任意信杂比 的信号和地杂波信号后,再讨论一种基于提升 SWT 的地杂波抑制方法。这里的小波变换采用静态小波 变换(SWT)^[8-9]代替了传统的离散小波变换 (DWT)。 滤波的第一步是选择合适的小波基,使得信号 能量分布在少数几个基底上。通常为了兼顾滤波的 实时性和效果,都希望所选的小波能同时具有下列 性质^[10]:1)对称性或反对称性,以避免信号失真; 2)较短的支撑,以减小运算时间;3)正交性; 4)较高的消失矩,以更好的匹配待分析的信号。然 而实际上同一个小波基不可能同时具有上述所有性 质,就第一条性质来说,在所有小波基中,仅有 Haar 小波是满足条件的,但它却由于消失矩阶数过低而阻 止了在实际中的应用;而且较短的支撑和较高的消失 矩本身就是一对矛盾,所以在选取小波基时应折中的 考虑上述性质。考虑到 db 小波的高阶原点矩等于 零,并综合计算量以及上述因素,这里选择 db3 小波。

图 2 给出了采用几种不同小波基对信号进行滤波 的小波系数图 ,从图中可以看出 ,当采用 db3 小波的时候 ,可以最大程度的区分地杂波信号与回波信号。

为了能够更好地去除地杂波信号 ,最好能够使得 分解后信号的最低层低频系数中不仅包含了地杂波 信号的所有成分 ,而且还尽可能少的包含回波信号成 分 ,即能够保证将地杂波信号和回波信号很好的分离 开来的同时 ,使得地杂波信号集中在小波分解域的最 低层 ,以便将其集中去除。一般来说 ,地杂波信号强 度较回波信号强很多 ,所以经分解后在各层小波系数 上的值也要大很多 ,为了确定最佳分解层数 ,可以计 算信号在各层小波系数上的二阶原点矩:

$$D = \sum_{i=1}^{N} X_{ji}^{2} / N , \qquad (5)$$

式中,X"为第j层分解的小波系数,N为SWT点数。

依次增加信号的分解层数,并计算各层系数的 二阶原点矩以及相邻层原点矩的差分值,即可找到 使信号能量刚好在最低层发生明显跃变的最大分解 层数,即为最佳分解层数。表1给出了对信号进行 不同层的 SWT 后,各自对应的每一层的原点矩。这 里, $a_2 \sim a_5$ 和 $d_1 \sim d_5$ 分别表示信号经过 SWT 分解 后的低频和高频系数。从表1 可以看出,当信号分



wavelet filtering

表1 对信号进行不同层的 SWT 后, 各层对应 D 值 Table 1 Value of D after making SWT

小油石粉	D				
小波杀致	2 层 SWT	3 层 SWT	4 层 SWT	5 层 SWT	
d_1	6. 3337×10^{-5}	1.0468×10^{-4}	7.2779×10^{-5}	7. 7204 $\times 10^{-5}$	
d_2	4. 4605 $\times 10^{-4}$	5.6001 $\times 10^{-4}$	4. 3228×10^{-4}	4. 9333 $\times 10^{-4}$	
d_{3}/a_{2}	0.0262	1.8269 × 10^{-4}	2. 2643 $\times 10^{-4}$	1. 5640 $\times 10^{-4}$	
d_4 / a_3	_	0.0582	2.0030 $\times 10^{-4}$	3.0125×10^{-4}	
d_5 / a_4	-	-	0.0716	0.0073	
a_5	-	-	-	0. 0888	

解层数小于4 层时,虽然能保证地杂波信号能量均 集中在其对应的最低层低频系数上,但是由于分解 层数过少,所以不能很好地将回波信号与地杂波信 号分离,也就是说其最低层也含有大量的有用回波。 为了达到信杂分离的目的,只能增加分解层数,但是 如果对其分解过多,比如进行5 层小波分解的话,又 会由于分解层数过多而导致杂波信号被同时分解到 信号最低层的高频和低频系数上,造成计算量的 浪费。

3 仿真分析

表 2 给出了采用不同方法模拟回波信号时,在 不同信噪比情况下,两种方法模拟出来的信号功率 值以及相对于未随机化前的功率值之间的相对误差 (为了更好的评价这个方法的优越性,这里引入了 功率差最小的概念,即使得模拟输出的回波信号的

表 2 两种方法模拟回波信号的性能比较

 Table 2
 Performance contrast whose echo signals are simulated by two different methods

SNR/	西达体	原方法		改进方法		
$^{\mathrm{dB}}$	理论值	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差	
20	516.7433	437.5565	0.1532	528.1972	0.0222	
10	56. 2823	48.6550	0.1355	57.718	0.0255	
0	10. 2362	9.0625	0.1147	10.5673	0.0323	
- 5	6.7379	7.4167	0.1007	7.0175	0.0415	
- 10	5.6316	6.2180	0.1041	6.0477	0.0739	

功率尽可能的接近未随机化前的信号功率)。实验 中 模拟回波信号和地杂波信号的噪声谱都是采用 高斯随机序列,且所有数据都是通过对100次实验 结果取均值得到。

从表 2 可以看出,采用改进方法模拟出来的信 号功率更接近于没有随机化前的信号功率,所以较 传统方法能更好的模拟回波信号。

图 3 给出了信杂比为 - 50 dB, 信噪比为 20 dB,



82

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

 \bar{f} = 200 Hz σ_f = 62.5 , c = 0.01 ,发射机重复频率为 1280 Hz时,对信号进行 SWT 处理前后的对比。从 图 3 (a) 和 (b) 可以看出 ,由于地杂波信号很大 ,风 廓线雷达的回波信号已经完全被其掩盖 ,此时信号 的特征主要表现为地杂波的特征 ,若对其进行 SWT 处理 ,使得地杂波信号均集中在 SWT 的最低层的低 频信号上 ,并选择合适的阈值对其滤波 (见图 3 (c) 和(d)) ,从图 3 (e) 和 (f) 可以看出 ,此时可以将大 部分地杂波信号剔除 ,并还原风廓线雷达回波信号。

图 4 给出了在相同情况下,对信号进行 DWT 处 理后小波系数和去杂波后的信号的频谱,与图 3 对 比可以看出,经 DWT 重构后的信号会发生频谱的 折叠,而且由于处理的点数较少,且有少量失真,去 杂波效果明显不如 SWT,这也说明了本文所述方法 的优越性。

表3给出了相同信号在不同信杂比下采用不同 方法滤波后,估计出来的谱宽及其中心频率值,这里 谱宽理论值为2,平均多普勒频率理论值为200。可 以看出,当信杂比降低到-30 dB以后,本文方法仍 然是有效的,而此时普通的采用离散小波变换去地 杂波的方法已经失效,无法正确估计信号参数,因此 也说明这个方法可以很好的抑制地杂波。

另外,图5给出了采样点数和中心频率估计误 差的关系曲线。可以看出,随着处理点数的减少,估



|--|

表 3 不同方法去杂波后估计的系统性能对比 Table 3 Estimation system performance contrast

after the clutter filtering

SCR/	DWT	方法	SWT 方法	
$d\mathbf{B}$	σ_v	\overline{f}	σ_v	\overline{f}
20	2.0143	201.398	2.0008	200.002
0	2.0302	203.745	2.0086	201.963
- 20	2.0876	207.538	2.0233	203.275
- 30	-	-	2.0574	205.1298
- 50	-	-	2.0987	208. 5324

说明 "-"表示由于产生的误差过大,已经无法正确估计参 数值。



图 5 采样点数和中心频率估计误差关系曲线 Fig. 5 Curve between sampling points and center frequency estimation error

计精度会随之降低,且这种情况在点数较少时,表现 尤为明显。当处理点数小于64以后,系统性能会大 大降低,这主要是由于:1)当每次处理的样本点数 比较少时,randn不能很好地模拟高斯信号,其均值 可能偏离零值较远,即此时信号分布不服从高斯分 布;2)当信号点数较少时,进行相应的各种估值的 误差会变大;3)信号点数越少,则参与进行 SWT 的点数也越少,那么其滤波效果也会随之变差。

4 结论

本文改进了回波信号的模拟方法,并提出了一种去风廓线雷达地杂波的方法,采用 SWT 代替了 DWT,克服了 DWT 不具有平移不变性的缺点,提高 了信号的重构精度,也使其能应用于更低信杂比的 情况。本文还提出了一种有效的确定最优分解层数 和阈值的方法。本工作仅仅是一个开端,如何更好 地统计雷达回波各种信息的特征以更好的模拟回波 信号,如何降低算法的计算量,以及如何寻找一种更 加智能的选择最优小波基的方法,都将是今后研究 的重点。

参考文献

- [1] 何平.相控阵风廓线雷达.北京:气象出版社,2006
- [2] 马建立,阮征,葛润生,等.风廓线雷达估算大气返回信号功率方法研究.气象科技,2009,37(1): 89-92
- [3] Passarelli R E, Romanik P, Geotis S G, et al. Ground clutter rejection in the frequency domain // 20th Conference on Radar Meteorology. Boston, MA: Amer Meteor Soc, 1981: 295-300
- [4] Barth M F, Chadwick R B, Van de Kamp D W. Data processing algorithms used by NOAA's wind profiler demonstration network. Ann Geophys , 1994 , 12: 518– 528
- [5] Jordan J R , Lataitis R J , Carter D A. Removing ground

and intermittent clutter contamination from wind profiler signals using wavelet transforms. J Atmos Oceanic Techonl , 1997 , 14: 1280-1297

- [6] 丁敏,黄登才,宋金雷.小波变换去风廓线雷达地杂 波技术.中南大学学报:自然科学版,2007,38(1): 949-953
- [7] 刘艳. 多普勒天气雷达地物杂波时域和频域抑制研 究[D]. 成都:成都信息工程学院,2007
- [8] 孟晋丽.基于邻域相关性的小波域滤波算法研究[D].西安:西北工业大学,2006
- [9] 张雯雯,司锡才,柴娟芳,等.基于提升静态小波变换的自适应消噪方法研究.系统工程与电子技术, 2008,30(11):2103-2107
- [10] 成礼智,王红霞,罗永.小波的理论与应用.北京: 科学出版社,2004

北京大学物理学院聚焦表面等离激元研究取得重要进展

表面等离激元研究是纳米光学研究的重要组成部分。北京大学物理学院朱星教授课题组在对聚焦表面等离激元(SPP)的研究工作中,利用扫描近场光学显微术(SNOM)通过引入对称性破缺的概念,成功实现了在线性偏振光激发下对 SPP 干涉 条纹的调制,并且快速获得表面等离激元垂直分量的亚波长单点聚焦。这项工作研究了纳米金属围栏分别在径向偏振光和 线性偏振光激发下的 SPP 干涉现象,通过数值模拟和解析计算相结合,建立了 SPP 在围栏内部的波动模型,很好地解释了 SPP 聚焦的形成机制,这一工作为今后基于 SPP 应用的微纳光电器件的发展提供了新方法。

(摘自北京大学新闻网 2010-12-31)