

文章编号: 2095-4980(2013)02-0250-05

一种基于高斯模型的自适应地物杂波滤波算法

孙召平, 张持岸, 张建云

(北京敏视达雷达有限公司, 北京 100085)

摘 要: 在天气雷达信号处理中地物杂波滤除非常重要, 地物杂波会造成有强烈回波的假象, 对预报造成干扰。提出了一种基于高斯模型的自适应频域地物杂波滤波算法, 并以天津站实际的雷达回波信号为例, 对 2 种滤波器的效果进行了分析和比较。仿真结果表明, 频域滤波算法能有效消除地物杂波和超折射, 最大限度地保留了天气信号。

关键词: 脉冲多普勒气象雷达; 自适应地物滤波; 异常传播

中图分类号: TN957; TP751

文献标识码: A

An adaptive ground clutter filter algorithm based on Gaussian model

SUN Zhao-ping, ZHANG Chi-an, ZHANG Jian-yun

(Beijing Metstar Radar Company Co Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: Ground clutter filter is very important in weather radar signal process. Ground clutter will generate strong echo that looks like weather signal, which will disturb weather forecast. The paper introduces the feature of weather signal and ground clutter, analyzes the ground clutter filter used in CINRAD/SA radar now. An adaptive frequency domain ground clutter filter algorithm is proposed based on Gaussian model. The results of two filters are compared based on real radar base data from Tianjin radar site, which show that the new algorithm can effectively remove normal ground clutter and anomalous propagation, and restore weather signal from clutter as much as possible.

Key words: pulse Doppler weather radar; adaptive ground clutter filter; anomalous propagation

地物杂波是静态或者接近静态的非气象目标产生的回波, 通常只发生在低仰角, 并且能达到 50 dBZ 以上的强度, 如果不能将其有效滤除会造成强烈回波的假象。地物杂波可以分为 2 种, 一种是普通地物杂波, 是由雷达站附近的地物和建筑产生, 特点是: 产生的仰角低, 位置距雷达站较近, 在大多数天气情况下都会存在; 第二种是超折射回波, 是由于大气中的温度反转, 导致雷达波束折向地面产生, 特点是: 发生的仰角低, 位置不定, 时间和强度也不定。由随机过程理论可以证明, 天气信号和地物杂波的谱都服从高斯分布^[1], 地物杂波的多普勒速度为零或者在零附近, 且谱宽很窄(小于 0.3 m/s), 而天气信号的多普勒速度则分布在零到最大不模糊速度之间, 天气信号的谱一般会比地物的谱宽一些, 一般对应于 1 m/s 以上的多普勒速度^[2]。地物滤波的算法是根据天气信号和地物杂波的这些特征来识别和滤除杂波的。

超折射回波是目前影响 CINRAD/SA(下简称 SA)雷达数据质量的主要因素之一^[3-4]。超折射的产生依赖众多的气象条件, 如大气的温度梯度及水汽等因素, 无法预测, 目前的杂波图加无限脉冲响应(Infinite Impulse Response, IIR)滤波的方式对其无能为力, 而且一旦产生, 强度会比较大, 对预报工作有很大的干扰。随着气象雷达数据的应用越来越广泛和复杂, 对数据质量的要求也越来越高, 迫切需要新的算法能够自动地识别并且滤除各种地物杂波。本文针对天气信号和地物杂波信号的特征, 分析了目前 CINRAD/SA 雷达滤波技术及其不足, 提出了一种基于高斯模型的自适应频域地物杂波滤波算法。

1 传统滤波算法

受限于硬件的处理能力, 传统上是综合杂波图和 IIR 滤波 2 种方法进行滤波, 在晴空时做好滤波图, 雷达运

收稿日期: 2012-05-10; 修回日期: 2012-06-14

基金项目: 气象行业专项基金资助项目(GYHY200906034); 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划)

行时只在杂波图上标识为地物处用 IIR 滤波器滤波。目前 SA 雷达使用这种方法^[5]。

所谓杂波图算法的原理是假设在晴空时雷达扫描得到的回波强度是地物杂波 C , 雷达实时运行过程中得到的回波强度为 T , T 减去杂波图的强度 C 就是真正的天气信号, $Z=T-C$ 。这种方法的优点是算法简单, 计算量很小, 缺点是有地物杂波的地区在晴空时, 当有天气回波特别是强天气回波的时候, 地物杂波会减弱甚至消失, 这时天气信号会被作为杂波滤除, 这个严重的缺陷, 使杂波图法在滤波中一般不会单独使用。

目前 SA 雷达的 IIR 数字滤波器是一个 5 椭圆阶高通滤波器, 该滤波器的变换函数为:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4} + b_5 z^{-5}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - a_3 z^{-3} - a_4 z^{-4} - a_5 z^{-5}} \quad (1)$$

式中 a_i 和 b_i 为滤波器系数。根据杂波的强度、谱宽和重复频率, 可以设计出不同的滤波器, SA 雷达系统中已经预设了若干组滤波器, 信号处理程序会根据当前的脉冲重复频率和用户设定的滤波强度等参数自动选择滤波器。

因为 IIR 数字滤波器是通过累加实现, 所以计算简单, 适合实时处理, 它的缺陷是:

1) 滤波能力有限。由于反馈的存在, 滤波器的稳定性不能得到保证, 不能达到设计的地物抑制的要求, 地物杂波不能完全滤除。

2) 不能滤除超折射回波。超折射的发生具有不可预测性, 杂波的强度和范围都是动态的, 在晴空时制作的杂波图无法应对这种情况。

3) 会滤除天气回波。当天气信号在零频附近时, IIR 滤波器会将天气信号滤除, 产生所谓“多普勒蛇”效果。

2 新型频域自适应滤波算法

随着 CPU 处理能力的提高, 以前只能在专用处理器中才能运行的信号处理程序, 可以移植到主机中完成, 这样不仅系统处理能力可以随着 CPU 升级(多核, 主频等)而提高, 而且软件开发的灵活性和可维护性也得到提高。在主机可以完成实时离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的前提下, 根据地物杂波频谱集中于零速度和谱宽窄的特点, 在频域设计出更加有效的算法, 以提高算法复杂性为代价, 实现自适应滤波, 即根据回波信号中地物杂波的强度, 自动选择不同的滤波窗口, 既能有效滤除地物杂波, 又能最大限度地保留天气信号^[6]。

新型频域自适应滤波算法(下简称频域滤波算法)有如下假设:

- 1) 雷达回波中地物杂波的谱宽小于天气信号。
- 2) 雷达回波中包含了天气信号和噪声, 并且可能有地物杂波。包含飞机和鸟、昆虫的回波不适用该假设。
- 3) 地物的谱宽是可知的。预设的谱宽决定删除多少内部杂波点。
- 4) 地物杂波和超折射的谱都是高斯型。算法会利用高斯模型计算需要删除的内部杂波点。
- 5) 天气信号的谱是高斯型。该假设用来恢复天气回波。

频域滤波的滤波能力由窗口决定^[7], 根据不同的地物强度, 算法预设了 3 种窗口: 正方形(Rectangular)窗口, 海明窗口(Hamming)和布莱克曼(Blackman)窗口(见表 1)。其中正方形窗口的最大滤波强度最差, 只有 13 dB, 但是由于正方形窗口保留了尽可能多的数据, 谱宽的计算误差最小, 布莱克曼窗口的最大滤波强度为 58 dB, 但是谱宽的计算误差最大, 海明窗口最大滤波能力和谱宽误差均居中。

表 1 窗口的参数和特征

Table1 Parameters and feature of windows

window	α_1	α_2	α_3	highest sidelobe level/dB
Rectangular	1.00	0	0	13
Hamming	0.54	-0.46	0	43
Blackman	0.42	-0.50	0.08	58

滤波窗口的公式定义如下:

$$w(n) = \alpha_1 + \alpha_2 \cos\left[\frac{2\pi(0.5+n)}{N}\right] + \alpha_3 \cos\left[\frac{4\pi(0.5+n)}{N}\right], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

回波信号中的地物杂波可以使用杂波信号比(Clutter Signal Ratio, CSR)度量, $CSR = C/S$, C 表示杂波, S 即前面的天气信号。自适应滤波的基本思路是首先用海明窗口滤波, 如果得到的 CSR 低于海明窗口的下门限, 换成正方形窗口; 如果高于海明窗口的上门限就换成布莱克曼窗口, 这样就可以动态地适应各种强度的地物杂波。频域滤波算法流程如下:

- 1) 加海明窗并进行 DFT 变换

对时序(IQ)复信号用海明窗口处理, 接着进行离散傅里叶变换, 计算出功率谱, 公式如下:

$$V_w(m) = V(m)d(m), m = 0, 1, \dots, M-1; \quad \hat{S}(k) = \left| \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} V_w(m) e^{-j \frac{2\pi mk}{M}} \right|^2, \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

式中: $V(m)$ 为 IQ 数据; $d(m)$ 为窗口函数; M 为累积数。

2) 根据需要计算噪声功率

SA 雷达在每个体扫结束时进行系统标定, 包括计算系统噪声, 确定雷达常数等, 并将其作为下个体扫信号处理的参数。然而在地物杂波比较强的时候, 谱实际的噪声功率和测量的噪声功率并不相同^[8]。这是由于在所有频率上都出现了噪声, 导致谱噪声功率升高, 其主要原因是当地物很强的时候, 即使很小的相噪也会提高谱噪声电平。所以在 CSR 超过 40 dB 必须使用布莱克曼窗进行滤波时, 应该重新计算噪声功率。

3) 删除杂波点

在已知多普勒信号功率谱、杂波宽度和噪声电平的前提下, 利用以零频为中心的 3 个点拟合出一条标准的高斯曲线, 将所有在噪声电平和高斯信号之间的谱点都标识为噪声并删除。

当谱的中间 3 个点的功率之和低于噪声时, 认为该信号不包含地物杂波, 所以这时选择矩形窗计算矩。如果该 3 个点的功率仅仅比噪声电平略高, 那么只会删除中心点的数据。

4) 替换杂波点

根据结果检查窗口是否合适, 如有必要重新进行谱计算。从 3) 可知杂波功率, 从 4) 可知天气回波功率和噪声, 由此可以计算杂波信号比 CSR。

如果 $CSR > 40$ dB, 则使用布莱克曼窗口并重新计算噪声。

如果 $CSR > 20$ dB, 使用布莱克曼窗口重新滤波计算 CSR, 如果新的 $CSR > 25$ dB, 算法结束。

如果 $CSR < 2.5$ dB, 使用正方形窗口重新滤波计算 CSR, 如果新的 $CSR < 1$ dB, 算法结束。

其他接受海明窗口的结果。

3 实例分析

3.1 地物和超折射实例分析

图 1 为 2011 年 5 月 12 日 12:42(UTC)天津 SA 雷达滤除地物杂波前后的回波强度图, 此时为晴空并且出现超折射现象。

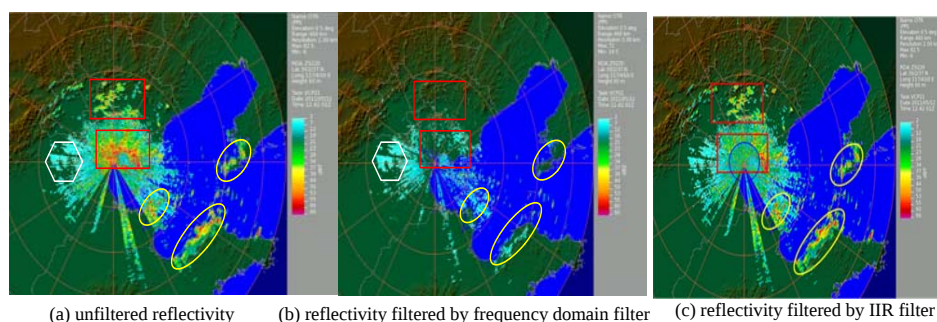


Fig.1 Reflectivity by different filters under clear air with anomalous propagation

图 1 不同滤波算法下包含超折射的晴空回波强度图

对比 3 幅图可以看出:

- 1) 对于椭圆形区域内超折射引起的强回波, 频域滤波算法能够将其有效抑制。
- 2) 对于矩形区域内的地物杂波, 频域滤波算法能够有效地过滤。
- 3) 对于六边形区域内的天气回波数据, 滤波前后数据没有变化。
- 4) 传统 IIR 滤波器只能处理 50 km 内的地物杂波, 对超折射无能为力。

3.2 降水实例分析

图 2(a),(b)为 2011 年 5 月 12 日 12:42(UTC)天津雷达在晴空条件下对地面位置不同点地物杂波过滤前后的回波强度图。图 2(c),(d)为 2011 年 5 月 8 日 14:12(UTC)天津雷达在大面积降水天气下地物杂波过滤前后的回波强度图。图 2(a),(c)为未过滤地物杂波的反射率, 图 2(b),(d)为使用新的频域滤波过滤后的回波强度图, 对比可见, 频域滤波算法能够自动判别降水和地物, 在过滤地物杂波的同时, 基本上不会对降水回波产生影响。

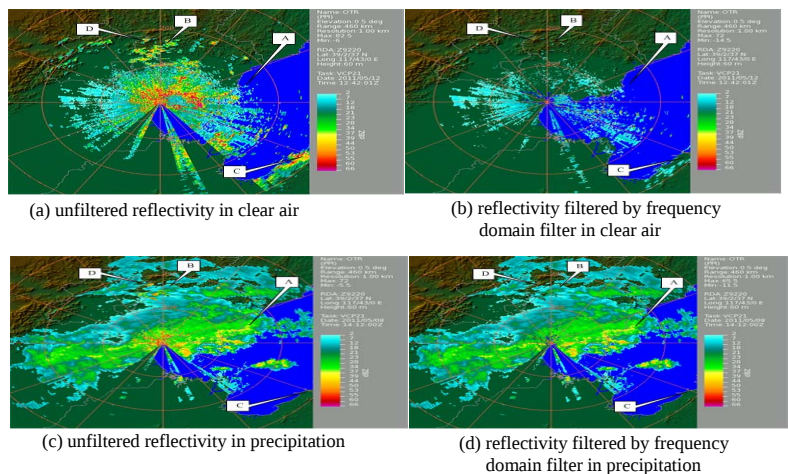


Fig.2 Comparison of frequency domain filters between clear air and precipitation
图 2 频域滤波算法降水和晴空滤波效果对比

表 2 为从图上选取 4 个地面点滤波前后的回波强度值，可以看到新地物杂波过滤算法对降水回波影响很小。

表 2 图 2 频域滤波算法在不同天气条件下对不同回波的滤波效果
Table2 Apply frequency domain filter to different types of echo in Fig.2

type of echo	label	azimuth/(°)	range/km	Fig.2(a)/dBZ	Fig.2(b)/dBZ	Fig.2(c)/dBZ	Fig.2(d)/dBZ
precipitation	A	66	160	NA	NA	31.0	31.0
precipitation and ground clutter	B	6	162	22	NA	17.0	16.5
anomalous propagation	C	122	275	67	NA	NA	NA
ground clutter	D	354	174	48	NA	48.5	NA

4 结论

本文描述了一种基于高斯模型自适应滤波器的算法,并利用雷达站的实际回波数据,对其滤波效果做了分析。数据的分析可以说明:本文描述的滤波算法,既能有效滤除固定的地物杂波,也能自动检测并滤除超折射,即使进行全程滤波对天气信号的损伤也很小,并且完全可以实时运行,该算法已经在全国包含广东全省的 20 多部 SA 雷达上投入业务运行^[9],取得了很好的效果。

由于算法的自适应特性,该算法不能直接用于双极化雷达,如果同时对于 H 和 V 通道的数据滤波,可能损失信号的相关性。这是未来要研究的方向。

参考文献:

[1] Doviak R,Zrnic D. Doppler Radar and Weather Observations[M]. 2nd ed. New York:Academic Press, 1993.

[2] Fang M,Doviak R J,Melnikov V. Spectrum width measured by WSR-88D:Error sources and statistics of various weather phenomena[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004,21(6):888-904.

[3] 刁秀广,朱君鉴,杨传凤,等. CINRAD/SA 雷达超折射回波抑制技术分析与应用[J]. 气象科技, 2006,34(5):620-623.

[4] 钟红蕾,柴常春. 雷达的杂波特性及杂波抑制技术[J]. 信息与电子工程, 2005,3(1):66-71. (ZHONG Honglei,CHAI Changchun. Study on Radar Clutter Characteristics and Clutter Suppression Technique[J]. Information and Electronic Engineering ,2005,3(1):66-71.)

[5] 王贤勤,卢土金. 气象雷达地物杂波抑制器[J]. 成都信息工程学院学报, 1986(2):42-47.

[6] Siggia A D,Passarelli Jr R E. Gaussian model adaptive processing(GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation[C]// Proceedings of ERAD. Visby,Island of Gotland,Sweden:[s.n.], 2004:67-73.

[7] Harris F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1978,66(1):51-83

[8] Hildebrand P H,Sekhon R S. Objective determination of the noise level in Doppler spectra[J]. Journal of Applied Meteorology, 1974,13(7):808-811.

[9] 张建云,张持岸,孙召平. 用频域滤波和双 PRF 技术提高新一代天气雷达数据质量[J]. 气象科技进展, 2012,2(1):6-11.