

文章编号: 2096-1618(2016)02-0152-04

一种改善双极化多普勒天气雷达弱回波发现能力的方法

史万里¹, 史朝², 郑晓庆¹, 余代辉³

(1. 中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307; 2. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 3. 贵州省黔东南州气象局, 贵州 凯里 556000)

摘要: 由于双极化天气雷达使用“双发双收”体制, 即同时发送和接收水平、垂直通道的电磁波, 这会导致双极化雷达在两个通道接收到的回波功率较单极化雷达至少小 2 倍(或 3 dB)。一些信噪比较低的弱回波可能淹没在噪声里, 不易被发现。为改善双极化多普勒天气雷达弱回波的发现能力, 提出基于双通道信号相关性联合估测回波功率方法, 并结合双极化雷达 IQ 数据进行相关的算法试验分析。结果表明, 用基于信号相关求和算法能提高双极化天气雷达的回波信噪比 3.77 dB, 从而使雷达探测到更多的弱回波。

关键词: 气象雷达; 相关求和法; 弱回波; 探测能力; 信噪比

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

0 引言

当前, 国内外的双极化多普勒天气雷达普遍采用“双发双收”工作体制, 即发射输出经功分器与极化器分为水平极化输出与垂直极化输出, 各自通道的发射功率占总发射功率的 50%, 双极化回波再经双通道接收机同时接收与处理^[1-3]。与常规多普勒天气雷达相比, 其探测云和降水的能力有显著的提高, 可以明显提高雷达观测降水强度的精度和识别降水粒子相态的能力^[4-6]。

但是双极化雷达两个极化通道接收到的回波功率相对于传统单极化雷达小 2 倍或低 3 dB^[7], 可视为双极化雷达探测弱回波的灵敏度相比单极化雷达至少降低了 3 dB, 在单极化体制下高于噪声门限几个 dB 的目标回波在“双发双收”体制下将有可能淹没在噪声里, 无法被发现, 进而会导致一些重要的存在于弱回波中的天气过程就很难发现并确认^[8]。

雷达系统探测弱回波能力的降低, 直观上是导致整个回波覆盖面积收缩, 特别在一些强回波的边界或者距离雷达较远处回波的边缘。可能这对小范围强降水的探测影响不大, 但是对于弱的大面积层状降水或小雪等天气过程的影响比较显著^[9]。随着中国传统单极化雷达系统逐渐向着双极化方向升级改造, 增强双极化天气雷达的发现弱回波的能力显得尤为迫切和重要。

事实上, 弱回波是一个宽泛的概念^[10]。既可以指由于各种原因导致雷达本身就没有探测到的回波, 也

就是信噪比较低的回波, 这个属于狭义的弱回波; 也可以指那些已经探测到的信噪比较低的回波, 如探测到的毛毛雨或者小雪, 这个就属于广义的弱回波。

增强双极化天气雷达的探测能力, 主要是为了探测到那些原来没有探测到的回波, 同时也设法使原本探测到的回波更加准确。所以主要目的就是要寻找一种适合增强双极化天气雷达探测能力的方法, 增强雷达对弱回波的探测能力, 使雷达探测到更多的弱回波^[11]。

1 信号相关求和算法的原理

云或者降水的雷达回波具有较高的相关系数, 比如 $\rho_{hv} > 0.95$ 。这种条件非常适合用于水平(H)和垂直(V)通道的信号做相关求和算法^[12]来增强雷达的探测能力。水平和垂直通道回波信号的相关和 E 为

$$E_{\text{sum}} = e_h + e_v = s_h + n_h + s_v + n_v \quad (1)$$

其中 s 和 n 分别代表相应通道的信号和噪声。这个和信号的平均功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{sum}} &= (e_h + e_v)(e_h^* + e_v^*) \\ &= S_h + S_v + \langle s_h^* s_v \rangle + \langle s_h s_v^* \rangle + \langle n_h^* n_h \rangle + \langle n_v^* n_v \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

其中 S_h 和 S_v 代表天气回波信号的功率, n_h 和 n_v 代表噪声功率, “*” 代表复共轭。用这个公式前提是信号和噪声的值是零均值并且不相干。这个公式可以进一步改写成:

$$P_{\text{sum}} = S_h + S_v + 2(S_h S_v)^{\frac{1}{2}} \rho_{hv} \cos(\varphi_{dp}) + N_h + N_v \quad (3)$$

N_h 和 N_v 代表是功率, ρ_{hv} 是相关系数, φ_{dp} 是双极化产品中的差分相位。正如前面提到的, 云或降水等回

波 H、V 通道间信号的相关性较高, $|\rho_{hv}| \approx 1$ 。

在做相关求和前,对 H 通道信号数乘 $\exp(j\Phi_{dp})$, SNR 对应的相关求和表达式可以写成:

$$SNR_{sum} = \frac{S_h + S_v + 2 (S_h S_v)^{\frac{1}{2}}}{N_h + N_v} \tag{4}$$

由于两个通道间的噪声功率相等,并且在两个通道中 $SNR_h = S_h / N_h$, $SNR_v = S_v / N_v$,又由于 $Z_{dr} = S_h / S_v$,因此 SNR_{sum} 改写成 Z_{dr} 组成的函数形式:

如果 $Z_{dr} \approx 1$,那么

$$SNR_{sum} = \frac{1}{2} SNR_h (1 + Z_{dr}^{-\frac{1}{2}})^2$$

或 $SNR_{sum} = \frac{1}{2} SNR_v (1 + Z_{dr}^{\frac{1}{2}})^2 \tag{5}$

在这种情况下 $SNR_{sum} \approx 2SNR_h \approx 2SNR_v$ 。这样一来,信号的信噪比大概可以提高 2 倍,也就是 3 dB。如果 $Z_{dr} < 1$,那么

$$SNR_{sum} = \frac{1}{2} SNR_v (1 + Z_{dr}^{\frac{1}{2}})^2 \tag{6}$$

这种情况下, $SNR_{sum} < 2SNR_v$ 。如果 $Z_{dr} > 1$,那么

$$SNR_{sum} = \frac{1}{2} SNR_h (1 + Z_{dr}^{-\frac{1}{2}})^2 \tag{7}$$

这种情况下, $SNR_{sum} < 2SNR_h$ 。总之,相关求和算法在一定程度上可以改善回波的信噪比,从而增强雷达对弱回波的发现能力。

2 实验分析

实验中用到的数据,均来自学校的 X 波段双极化多普勒天气雷达所采集到的 IQ 数据,雷达波长为 3 cm,详细参数见表 1。

表 1 X 波段雷达系统技术规格

参数	指标
发射脉冲功率	70 kW
脉冲宽度	1 ~ 2 μs
噪声系数	≤ 3 dB
天线直径	2.4 m
波束宽度	1°
天线增益	45 dB
天线转速	12°/s

当时存在大范围的层状性降水,伴随着局部对流性降水。扫描仰角为 1.5°,数据在 270° ~ 280° 有遮挡,在 180° ~ 215° 也存在遮挡。由于仰角较低,且没有对地物杂波进行抑制,故图中存在地物杂波,如图 1 (a) 圆框所示。总的 sweep 个数为 15288 个,每个 sweep 含有的距离库数为 2400。实验中所用的数据均为同一 IQ 数据。

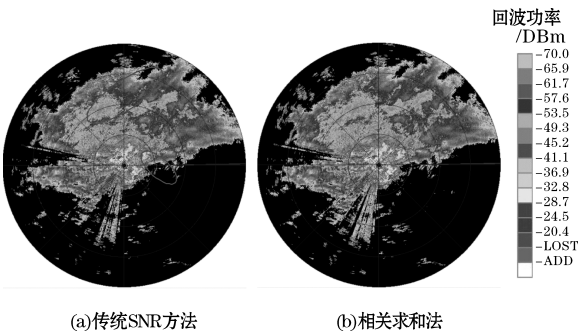


图 1 传统 SNR 方法和相关求和法估算出的回波功率之间的对比

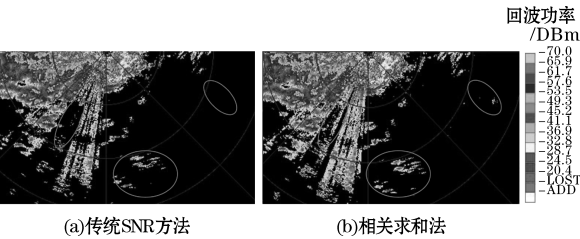


图 2 局部放大后的回波图

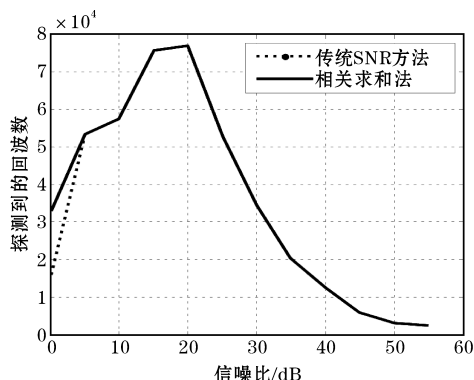
表 2 两种方法探测到的回波总数、弱回波数的对比

	传统 SNR 方法	相关求和法
总数	36691200	36691200
探测到的总数	417640	435334
探测到的弱回波数	0	13795

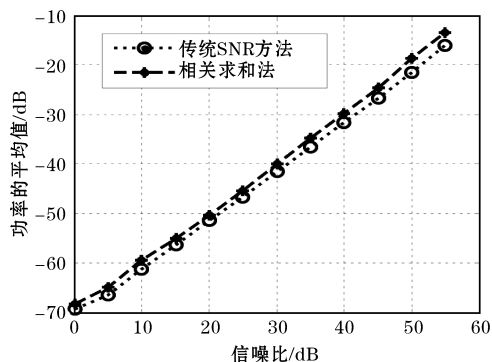
图 1 是两种方法估算出的回波功率图,可以看出,图 1 (b) 在 0° ~ 90° 径向内回波边缘较图 1 (a) 相同位置处有明显的扩大。为方便观察对比,把两图中径向在 90° ~ 180° 内的回波进行放大处理,得到图 2。可以明显看出:图 2 (b) 圆框中回波较图 2 (a) 相同位置处回波有着明显的增加(图 2 中 a、b 两图的放大倍数一样)。在实验过程中,也发现存在着部分回波的减少,减少的点可能是噪声,而被 SNR 方法误当作回波信号^[13]。因为减少的点很多都是杂散的相对孤立的点。

对实验中增加的点和减少的点进行统计,得出相关求和法比 SNR 方法多探测到 18448 点的回波,减少了 754 点(文中提到的点均指距离库)。从表 1 可以看出,SNR 方法探测到的弱回波为 0,但是用相关求和法可以探测到 13795 点的弱回波。这说明了相关求和方法可以增强双极化天气雷达探测弱回波的能力。

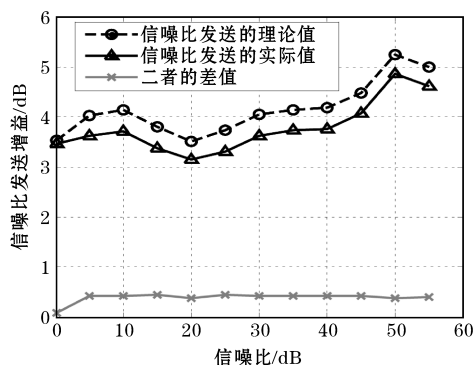
上面提到的弱回波的信噪比阈值 ($SNR < 3.5$ dB) 是参照文献[14]得出,计算方法仍是用信号功率比上噪声功率,这里的噪声功率根据 IQ 数据的不同而不同。因为在采集 IQ 数据时,所设定的参数或标定不会相同。文中噪声功率的计算方法,是选取无气象回波且距雷达足够远处的点计算噪声功率^[15]。为更加准确,可以多选几处计算再取平均值。



(a) 两方法探测到的回波点数随信噪比变化的情况



(b) 两方法探测到的回波功率的均值随信噪比变化的情况



(c) 信噪比改善增益随信噪比变化的情况

图3 两种方法的定量对比分析

从图3(a)中的点数指标可以看出,在信噪比较低($0\text{ dB} < \text{SNR} < 5\text{ dB}$)时,两种方法探测到的回波数有很大的差异;但是当信噪比较强甚至很大时($\text{SNR} > 5\text{ dB}$),两种方法探测到的回波数目几乎完全一样。从图3(b)功率的平均值这个指标可以看出,相关求和方法得到的回波功率要高于传统SNR方法。

为了更进一步对比分析两种方法的差异,对两种方法得到的实际信噪比改善值、信噪比改善的理论值以及二者的差值。其中信噪比改善的理论值是根据公式(7)计算得来,所用的 Z_{dr} 值是根据同一IQ数据计算得出。

从图3(c)可以看出,当回波信噪比大于5 dB时,信噪比改善实际值同信噪比改善的理论值的差值基本

维持在0.41 dB左右;当回波信噪比小于5 dB时,二者的差值在0.07 ~ 0.41 dB。进一步的分析发现这个差值是由于噪声功率的改变引起的。也就是说相关求和法在改善回波功率的同时,也对噪声功率有一定的改善作用。通过上面的分析可以得出,相关求和法可以改善回波的信噪比,增强雷达对弱回波的探测能力。

从上面的处理中可以看出相关求和算法对弱回波处理的改善效果。由于相关和 P_{sum} 是把两个通道的相关功率进行叠加,改变了回波处理增益,若后续对反射率因子进行定标时,应该结合公式(5)~(7)对雷达常数进行修正,以免出现回波强度变大的问题。

3 结束语

双极化雷达在没经过改善前,没有探测到的回波并不是真正的不存在,而是由于噪声的干扰引起回波的强度低于噪声判定阈值,导致回波被判定为噪声,没有在反射率图上显示出来。经过信号相关求和法的处理,实际上是对回波信号进行了功率计算和噪声抑制相关的处理,从而把一些低于噪声阈值很小的回波重新检测了出来,直观上看就是回波图上的回波信息更加丰富了。信号相关求和法处理水平和垂直通道的信号,使得回波的信噪比提高了3.77 dB,雷达能够探测到更多的弱回波。

参考文献:

- [1] 梁海河,徐宝祥,刘黎平,等. 双偏振天气雷达同时收发模式的一种改进方法[J]. 大气科学, 2006, 30(4): 635-644.
- [2] Doviak R J, Bringi V, Ryzhkov A, et al. Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-88D radars[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(3): 257-278.
- [3] 丁青兰,刘黎平,葛润生,等. 双线偏振多普勒雷达测量精度的理论分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 30-38.
- [4] 王致君,楚荣忠. 偏振天气雷达在气象中的应用简介[J]. 甘肃气象, 2004, 22(2): 62-68.
- [5] 史朝,史万里,何建新,等. 双极化天气雷达差分反射率的标定[J]. 现代雷达, 2013, 35(1): 6-10.
- [6] Ryzhkov A V, Zrnicek D S. Discrimination between rain and snow with a polarimetric radar[J]. Journal of Applied Meteorology, 1998, 37(10): 1228-1240.

- [7] Scharfenberg K A, Elmore K L, Forren E, et al. Estimating the impact of a 3-dB sensitivity loss on WSR-88D data [C]//32nd Conference on Radar Meteorology. 2005.
- [8] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications [M]. Cambridge University Press, 2001:636.
- [9] 吴海英,曾明剑,蒋义芳,等. 多普勒天气雷达资料在一次雨雪天气过程中的应用分析[J]. 气象科学,2007,27(2):208-213.
- [10] Ivic I R, Zrnica D S, Yu T Y. The use of coherency to improve signal detection in dual-polarization weather radars [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(11): 2474-2487.
- [11] Keranen R, Chandrasekar V. Enhanced detection capability for dual polarization weather radar [C]. The 35th Conference on Radar Meteorology. 2011.
- [12] Melnikov V M, Schlatter P T. Enhancing sensitivity on the polarimetric WSR-88D [C]. Preprints, 27th Conf. on Interactive Information Processing Systems (IIPS), Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc. 2011, 14.
- [13] 吕江津,王彦. WSR-98D与WSR-81S天气雷达应用对比分析[J]. 气象科学,2008,28(5): 573-576.
- [14] Igor R Ivic, Valery M Melnikov. Enhancing signal detection in dual-polarization weather radars by combining the coherency based detection and 2D despeckling [J]. 35nd Conference on Radar Meteorology, 2011.
- [15] 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[J]. 气象科技, 2009,37(1):89-92.

An Arithmetic to Enhancing the Detecting Ability of Dual Polarization Weather Radar for Weak Echoes

SHI Wan-li¹, SHI Zhao², ZHENG Xiao-qing¹, YU Dai-hui³

(1. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 2. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 3. Qian Dong Nan Meteorological Administration, Kaili 556000, China)

Abstract: Because the dual polarization weather radar use polarimetric configuration with simultaneous transmission and reception of horizontally and vertically polarized electromagnetic waves. It lead to the transmitted power in each polarimetric channel two times or 3 dB lower than in the “legacy” single polarization channel. It is means that the weakest signals just above the noise level are lost in the polarimetric system. In order to improve the detecting ability of dual-polarization Doppler weather radar for weak echoes, this paper estimate the echo power based on coherent summation of two channel signals to enhance the detecting ability for dual polarization weather radar. And also do some experiment by using IQ data of dual polarization weather radar and analysis according to the coherent summation arithmetic. The result shows that using coherent summation arithmetic can enhance the SNR of weak echoes by 3.77dB for dual polarization weather radar. In this way, the radar can detect more weak echoes.

Key words: weather radar; coherent summation; weak echoes; detecting ability; SNR