

# 风廓线雷达估算大气返回信号功率方法研究

马建立<sup>1,2</sup> 阮征<sup>3</sup> 葛润生<sup>3</sup> 何建新<sup>1</sup>

(1 成都信息工程学院, 成都 610225; 2 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089;

3 中国气象科学研究院, 国家灾害天气重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 基于风廓线雷达大气返回信号功率谱中噪声电平的估算方法, 统计分析了北京延庆对流层风廓线雷达 (CFL-08) 2006 年 10~12 月的探测数据。对该频段风廓线雷达环境噪声的空间和时间变化进行了分析, 观测期间环境噪声在 5 km 以下随高度递减, 10 月的平均环境噪声大于 11 月、12 月的平均分布。给出目前风廓线雷达用信噪比估算大气返回信号功率的两种方法, 并对两种方法进行了环境噪声的剔除, 经过修正后的大气返回信号功率输出结果趋于一致。

**关键词** 风廓线雷达 噪声电平 信噪比 功率修正

## 引言

风廓线雷达是通过大气湍流对电磁波的散射而对大气风结构探测的电子设备, 目前已在大气探测中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。大气返回信号非常微弱, 风廓线雷达采用对返回信号的相干累积、非相干累积等处理方法, 以延长信号采集时间, 提高对信号的探测能力和信噪比<sup>[2]</sup>。风廓线雷达对大气返回信号功率的估算是通过对返回信号的信噪比的估测及雷达系统的噪声功率而得到。返回信号的信噪比估算在频域中进行, 功率谱密度分布中求取信噪比时, 功率谱中的噪声电平对信噪比的估算有较大影响。在对实际观测资料谱分析中发现, 功率谱中的噪声电平在低空时比高空有所增加, 说明在低空, 除了雷达接收系统的噪声外, 还可能环境噪声<sup>[3]</sup>, 其值受温度、通信及工业干扰的影响。

风廓线雷达获取噪声电平常用的方法是利用无回波信号远距离库的功率来确定噪声电平<sup>[4]</sup>。由于大气无线电噪声的影响, 这种方法确定噪声电平在估算信噪比时存在不足, 在低空时大气无线电噪声将影响返回信号功率的估算, 进而影响基于返回信号功率的其他参量的估算, 如大气折射率结构常数<sup>[5,6]</sup>等。导致环境噪声的因素很多, 大气无线电

噪声就是其中的一种。王聚杰<sup>[7]</sup>等对比分析了我国大气无线电噪声与国际无线电委员会报告书 CCIR-322-3<sup>[8]</sup>给出的我国大气无线电噪声参考值, 指出大气无线电噪声在我国不同区域、不同季节是不一样的。因此有必要对不同地区的风廓线雷达, 在不同的季节、不同的环境电噪声的干扰情况下, 对风廓线雷达大气返回信号功率估算值进行修正。本文提出了一种确定噪声电平的方法, 并利用此方法获取的噪声电平对返回信号功率的估算进行了修正, 为我国即将布网的风廓线雷达对返回信号功率的估算提供参考。

## 1 资料

分析资料选自北京延庆(115°58'E, 40°27'N)对流层风廓线雷达(CFL-08)2006 年 10 月、11 月和 12 月晴空探测资料。该雷达采用脉冲压缩技术, 有高低两种探测模式, 因低模式采用了地物对消技术, 对统计噪声电平有影响, 所以本文仅对高模式晴空探测资料进行分析。高模式基本探测参数为: 发射波长是 674 mm, 脉冲重复周期频率 10000 Hz, 相干积分次数 50 次, 非相干积分次数 12 次, 谱变换数 512, 距离库长 240 m, 噪声系数为 2 dB, 脉冲宽度为 4  $\mu$ s, 发射功率 7.7 kW, 天线增益 29 dB, 设计有效探空高度 8 km。10 月晴空探测次数 8404 次, 11 月为 9185 次, 12 月为 9578 次。

## 2 功率谱噪声电平的高低空变化规律

### 2.1 功率谱噪声电平确定的方法

风廓线雷达得到的大气返回信号经过相干积分、非相干积分、谱变换、谱平均后,得到返回信号的功率谱  $D(f_i)$  ( $i$  值范围:  $0 \sim N-1$ ,  $N$  是 FFT 点数)。功率谱分布没有经过统一定标,各个厂家得出的谱分布  $D(f_i)$  是一个相对值,即在功率谱中得到的电平值不是真正意义上的电平,二者是正比关系,比例系数因厂家不同而不同。本文对功率谱中噪声电平的确定方法如下:由远距离无返回信号的距离库,确定出噪声的涨落比,利用涨落比确定出有返回信号功率谱中噪声电平与信号的分布拐点,进而确定信号分布区间。

### 2.2 噪声电平统计及环境噪声功率随高度的变化

对北京延庆风廓线雷达 2006 年 10、11、12 月探测数据分别进行统计,对每一次观测资料都作了噪声电平的获取及其随高度的变化。图 1a 给出了这 3 个月噪声电平随高度的变化。由图 1a 噪声电平的分布,利用功率谱中无返回信号的远距离库功率 ( $\bar{D}_N$ ) 与雷达接收该库的实际噪声功率 ( $P_n$ ) 是成正比的关系,可以得出环境噪声功率随高度的变化,图 1b 给出了环境噪声功率随高度的变化规律。求取环境噪声功率随高度变化的具体方法如下:以每次统计的最后 5 个无返回信号距离库的噪声电平的平均值作为参考电平,从第 1 个距离库 (1950 m) 开始逐个与参考电平相比,找出从第 1 个距离库开始有几个库的噪声电平大于参考电平,直到某个库的噪声电平小于或等于参考电平为止,则所找的库有环境噪声的影响;  $P_n$  可由  $P_n = K T_0 B_0 N_f$  得到,式中  $K$  是波尔兹曼常数,取值为  $K = 1.38 \times 10^{-23}$  (J/K),  $T_0$  是

用绝对温度表示的雷达接收机系统噪声温度,  $B_0$  为接收机的带宽,  $N_f$  是噪声系数。由雷达探测参数知:  $B_0 = 2.5 \times 10^5$  (Hz),  $N_f = 2$  dB, 取  $K = 1.38 \times 10^{-23}$  (J/K),  $T_0 = 290$  (K), 可得雷达接收机的噪声功率  $P_n = 2.001 \times 10^{-12}$  (mW), 将  $P_n$  转换为相对于 1 mW 的分贝计数值 ( $P'_n$ ) 为  $-117$  dBmW。从图 1a 的统计结果知噪声在低空包含雷达接收系统噪声和环境噪声两部分;功率谱线分布中系统噪声功率用  $\bar{D}_N$  表示,环境噪声功率用  $\bar{D}_{N1}$  表示;由  $\bar{D}_N$  与  $P_n$  正比关系,可以用式(1)求出环境噪声对应的功率值 ( $P_A$ ) (对应分贝计数值  $P'_A$ ) 的大小:

$$P_A = \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} P_n \quad (1)$$

图 1 表明:①噪声电平随高度的降低逐渐增大,在一定高度之上,噪声电平几乎无变化,说明环境噪声只在一定高度范围内存在,且随着高度的增加逐渐衰减;②环境噪声随时间变化,在低空 10 月环境噪声比 11 月和 12 月要大,具体原因可能是:① 10 月气温比 11、12 月高,工业用电和电器设备(如电扇,空调等)用的较多,导致人为的大气无线电噪声<sup>[8]</sup> 偏高;② 10 月的大气环境温度比 11、12 月高,10 月温度噪声比 11、12 月要大;③ 由于环境噪声随高度增加逐渐趋于一定值,因此用最远无返回信号的距离库获得的噪声电平作为风廓线雷达接收系统噪声在功率谱中所表现的噪声电平是合理的。

## 3 环境噪声对返回信号功率估算的影响

### 3.1 返回信号功率估算的方法

风廓线雷达在频域中估算信号功率谱密度分布的参数,通过在频域对真实大气的信噪比 ( $R_{snr}$ ) 的估算来对返回信号功率  $P_r$  进行估测:

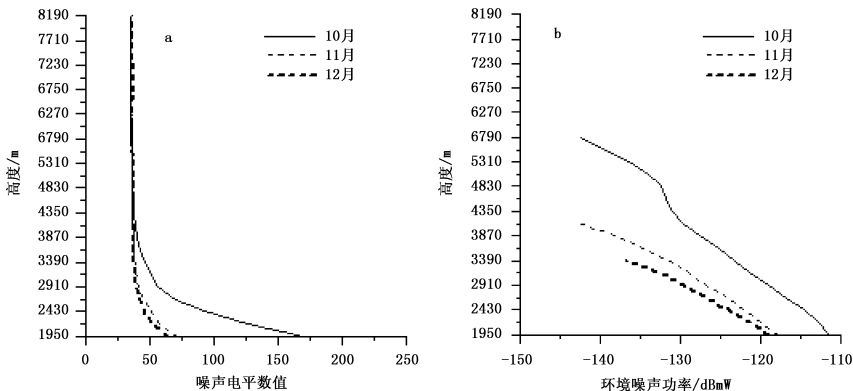


图 1 噪声电平和环境噪声功率随高度的变化:(a)噪声电平,(b)环境噪声功率

$$P_r = R_{\text{snr}} P_n \quad (2)$$

式中  $R_{\text{snr}}$  是信号与噪声的比值,  $P_n$  是雷达接收系统的噪声功率, 与功率谱线中最远距离库无返回信号的噪声功率 ( $\bar{D}_N$ ) 成正比。目前风廓线雷达在频域中估测  $R_{\text{snr}}$  通常有 2 种方法, 由于环境噪声的影响, 需要对 2 种估算信噪比的方法得出的值进行修正。下面分别介绍估算信噪比的方法及其修正。用  $\bar{D}$  表示功率谱分布中返回信号的功率, 用  $\bar{D}_n$  表示功率谱噪声功率, 用  $\bar{D}_s$  表示功率谱信号功率, 则有:

$$\bar{D} = \bar{D}_n + \bar{D}_s \quad (3)$$

方法 1: 对每一个距离库的分别估算其信噪比 ( $R_{\text{snr1}}$ ), 即:

$$R_{\text{snr1}} = \bar{D} / \bar{D}_n - 1 \quad (4)$$

由于环境噪声的影响,  $\bar{D}_n$  实际包含系统噪声  $\bar{D}_N$  和环境噪声  $\bar{D}_{N1}$ , 即  $\bar{D}_n = \bar{D}_N + \bar{D}_{N1}$ , 因此按式 (4) 计算的信噪比不是式 (2) 要求的信噪比, 式 (2) 要求的信噪比是:

$$R_{\text{snr}} = \bar{D}_s / \bar{D}_N \quad (5)$$

由式 (3)(4)(5) 可知, 方法 1 得到的信噪比应该按如下方式进行修正:

$$R_{\text{snr}} = R_{\text{snr1}} \left( 1 + \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} \right) \quad (6)$$

因此式 (2) 变为:

$$P_r = R_{\text{snr1}} P_n \left( 1 + \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} \right) \quad (7)$$

式 (7) 表明: 目前风廓线雷达若按方法 1 估算返回信号功率, 则其值偏小, 应该在估算的返回信号功率的基础上乘上修正因子  $\left( 1 + \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} \right)$ 。由于环境噪声随高度增加逐渐减小, 因此在高空修正因子作用不明显, 在低空修正因子作用显著。

方法 2: 利用远距离无气象回波信号的距离库来确定平均噪声功率  $\bar{D}_N$ , 进而信噪比  $R_{\text{snr2}}$  估测值为:

$$R_{\text{snr2}} = (\bar{D} - \bar{D}_N) / \bar{D}_N \quad (8)$$

由于环境噪声的作用, 功率谱中回波功率值实际由噪声功率、环境功率、信号功率 3 部分组成, 即:  $\bar{D} = \bar{D}_N + \bar{D}_{N1} + \bar{D}_s$ , 因此式 (8) 变为:

$$R_{\text{snr2}} = \bar{D}_s / \bar{D}_N + \bar{D}_{N1} / \bar{D}_N \quad (9)$$

所以信噪比  $R_{\text{snr}}$  与方法 2 估算的信噪比  $R_{\text{snr2}}$  的修正关系如下:

$$R_{\text{snr}} = R_{\text{snr2}} - \bar{D}_{N1} / \bar{D}_N \quad (10)$$

由式 (8)、(9)、(10), 式 (2) 变为:

$$P_r = R_{\text{snr2}} P_n - \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} P_n \quad (11)$$

式 (11) 表明: 目前风廓线雷达若用远距离无回波信号的距离库来估算返回信号功率, 应该在得出的返回信号功率的的基础上减去  $\frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} P_n$ 。当信噪比大时, 修正值  $\left( \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} P_n \right)$  对真实的返回信号功率的影响不大, 但是信噪比低时, 本身  $(R_{\text{snr2}} P_n)$  就比较小, 因此修正值  $\left( \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} P_n \right)$  对真实的返回信号功率影响就比较大, 即在高空修正作用显著, 在低空修正作用不明显。

### 3.2 返回信号功率估算修正个例

以北京延庆 2006 年 10 月 1 日 00:08 的探测资料作为分析的个例。图 2a 给出该时刻按方法 1 估算返回信号功率及其修正后结果对比。图 2b 给出了按方法 2 估算返回信号功率及修正后结果对比, 图 2c 给出了按方法 1 和方法 2 修正之后的结果对比。图 2a 表明, 在约 4000 m 以上的高空, 修正前后 2 根线基本上是重合的, 在约 4000 m 以下, 随着高度的降低, 2 根线相差越来越大, 原因是环境噪声随高度的降低逐渐变大。由图 2b 知, 在约 5000 m 高度以上, 两种方法的结果表现出不一致性, 主要原因是返回信号信噪比很小时, 修正因子  $\left( \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} P_n \right)$  对返回信号功率的修正变得显著。而在低空, 返回信号信噪比较强, 修正因子  $\left( \frac{\bar{D}_{N1}}{\bar{D}_N} P_n \right)$  对返回信号功率的修正不明显。从图 2c 可以看出, 2 种方法修正后, 曲线基本重合, 即修正的结果趋于一致。

## 4 结语

(1) 利用远距离无返回信号的距离库, 确定出噪声的涨落比, 利用涨落比对定出有返回信号的距离库功率谱中噪声电平与信号的分离点, 进而得出噪声分布区间和信号分布区间, 用这种方法来确定噪声电平, 可以在谱分布中有效地确定出信号的谱线分布区域, 使得估算信噪比准确度提高。

(2) 本文得出的环境噪声分布是根据北京延庆风廓线雷达 (CFL-08) 所在频段 (445 MHz) 得出的, 在其他频段的风廓线雷达及天气雷达也有可能存在环境噪声的影响, 不同地点的环境噪声分布可能有所不同。

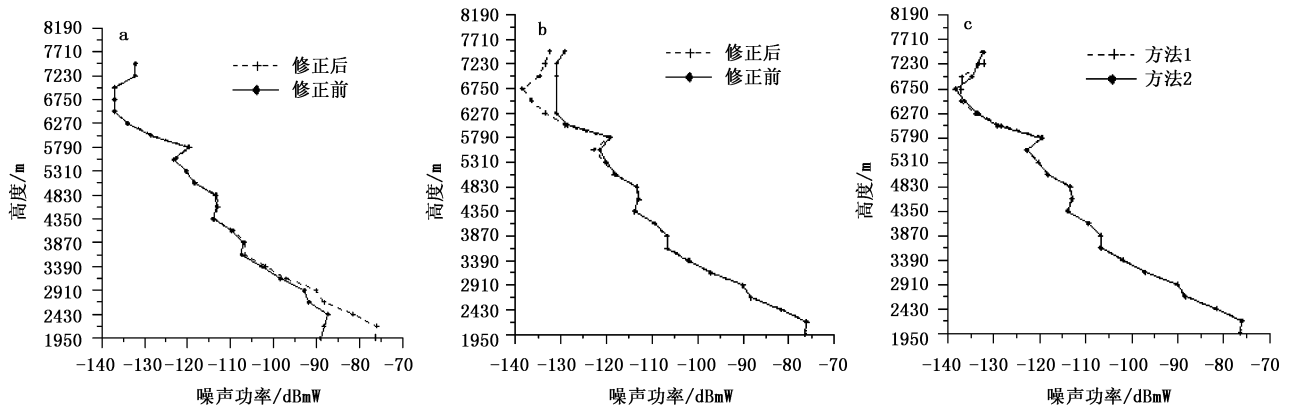


图2 修正结果比较:(a)方法1,(b)方法2,(c)方法1和方法2修正结果对比

(3) 在某一观测时刻,环境噪声的电平值有可能远大于雷达系统的噪声电平,在这种情况下,利用本文介绍的方法对大气返回信号功率的修正就很有必要。

#### 参考文献

- [1] Beran D W, Wilfong T L. US windprofilers: A Review [R]. FCM-R14-1998, Washington DC, 1998.
- [2] 何平. 相控阵风廓线雷达[M]. 北京:气象出版社, 2006:63-103.
- [3] CCIR. World distribution and characteristics of atmospheric

radio noise [R] // International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Report 322-3, 1986.

- [4] 葛润生. 风廓线雷达功能规格需求书(试行)[S]. 中国气象局监测网络司, 2000.
- [5] 张旭, 周秀骥. 大气折射率结构系数  $C_n^2$  的观测实验[J]. 应用气象学报, 1994, 5(1): 19-26.
- [6] 阮征, 葛润生, 吴志根. 风廓线雷达探测降水云体结构方法的研究[J]. 应用气象学报, 2002 13(5): 170-179.
- [7] 王聚杰, 张添益. 大气无限电噪声测量与分析[J]. 通信学报, 2000, 21(11): 86-90.
- [8] CCIR. Characteristics and applications of atmospheric radio noise data [R] // CCIR report 322-3. Geneva, 1988.

## Estimation Method of Atmospheric Return-Signal Power with Wind Profile Radar Data

Ma Jianli<sup>1,2</sup> Ruan Zheng<sup>3</sup> Ge Runsheng<sup>3</sup> He Jianxin<sup>1</sup>

(1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225;

2 Weather Modification Office, Beijing Municipal Meteorological Bureau, Beijing 100089;

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Based on the method for estimating the noise-level in power spectrum from wind profiler radar, the spatial-temporal variation of the environmental noise-level for the WPRs (CFL-08) radar at Yanqing, Beijing, is studied statistically by means the sounding data of October to December 2006. During the observation, the environmental noise decreased with the increase of height under 5 km altitude, and the average environmental noise in October was stronger than those in November and December. Two methods for calculating the atmospheric return-signal power for wind profile radar by SNR (Signal-to-Noise Ratio) are presented, and the corrected results are almost the same.

**Key words:** wind profile radar, noise level, SNR (Signal-to-Noise Ratio), power correction