

风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究

阮征 何平 葛润生

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 基于湍流散射理论, 构建了风廓线雷达 (WPR) 强度信息对大气折射率结构常数的估算方法。经过对 WPR 多种探测模式探测数据的估算分析, 发现雷达参数的确切选用、信噪比 (SNR) 测量方法的合理性以及信号累积得益的认定对大气折射率结构常数的准确估算有较大的影响, 为此提出适合 WPR 多种探测模式对该估算值规范化处理方法。利用北京两部对流层风廓线雷达五种探测模式于 2005 年获取的部分观测数据, 进行了规范化计算及对比分析。结果表明, 邻近时刻的不同风廓线雷达探测估算结果有较好的一致性, 其垂直分布结构合理, 呈指数形式, 统计结果与国内外的分析研究结果较为吻合。

关键词 风廓线雷达 大气折射率结构常数 探测模式 规范化处理

文章编号 1006-9895 (2008) 01-0133-08

中图分类号 P412

文献标识码 A

Determination of Refractive Index Structure Constant with Wind Profile Radar Data

RUAN Zheng, HE Ping, and GE Run-Sheng

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Based on the turbulent backscattering theory, the calculation method of the refractive index structure constant (RISC) is devised. Through analyzing the different data from Wind Profile Radar (WPR) with different observing modes, it is found that the result of the RISC depends on the adequacy of radar parameters, the method for determining the Signal-to-Noise Ratio (SNR) and the confirmation of the integral accumulated gain. The standardized processing method is put forward for the different observing modes of WPR. This method is used to process the data from two tropospheric WPRs with five observing modes in Beijing in 2005. After consistency checking for data, the vertical RISC profiles is obtained by using the processing method. The rationality analysis is conducted, including the vertical structure and seasonal change analysis and the comparison with results of other simplified models and radiosonde data. It is concluded: (1) The RISC vertical profiles from different tropospheric WPRs are identical by using the standardized processing method of considering the accurate return signal power and SNR. (2) The analysis of the RISC vertical profiles retrieved from the data of two tropospheric WPRs in Beijing in 2005 indicates that the RISC decreases as exponential function with altitude, and the vertical decrease rate is 2.6 dB/km in summer, similar to the results of other detecting methods home and abroad. The RISC simplified models in Beijing have been gotten. The result of vertical RISC distribution in winter of Beijing is close to the winter result of Doviak's in Denver. (3) There is obvious seasonal variation in the RISC vertical structure retrieved from WPRs at different altitudes. It is mainly because that RISC is one or two orders of magnitude larger in the warm and humidity season than in the dry and cold season in the middle layer of troposphere, but there is little difference between lower and upper layers. (4) A comparison case study was conducted with the output by using radiosonde data at the same location.

收稿日期 2006-06-09, 2006-10-12 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675019, 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418306, 中国气象局气象技术推广项目 CMATG2005M13

作者简介 阮征, 女, 1964 年出生, 研究员, 主要从事地基遥感资料处理方法研究。E-mail: ruanz@cams.cma.gov.cn

The structures of the profiles are similar and there is obvious discontinuous stratification at the same altitude.

Key words wind profile radar, refractive index structure constant, detection mode, standardized processing method

1 引言

风廓线雷达 (WPR) 主要通过返回信号的频移测量获取大气风的信息分布, 近年来对其强度信息的提取得到广泛的关注和应用。Bianco 等^[1] 和 Angevine 等^[2] 通过采用 WPR 获取的信噪比 (SNR) 经过距离订正后进行对流边界层 (CBL) 发展高度的研究; Raddy 等^[3] 利用风廓线雷达探测资料, 对梅雨期间对流层高度变化以及降水云特征进行研究; Muschiniski 等^[4] 利用边界层 WPR 垂直方向上返回信号的功率谱分析, 研究了大气湍流结构, 对当地的平均大气折射率湍流结构常数 (C_n^2) 垂直结构进行了分析; 马振骅等^[5] 利用北京测空资料计算 C_n^2 以及风矢量垂直分布, 用于模拟雷达回波信号, 进行 VHF 雷达参数设计。当有降水时, 短波长的 WPR 接收到的后向散射主要为降水质点的散射, 阮征等^[6] 利用风廓线雷达的返回信号功率对云雨的垂直结构及其演变进行了分析, White 等^[7] 利用返回信号功率及垂直速度的梯度变化, 对降水云的分类进行研究; Kitamura 等^[8] 近年来用风廓线雷达获得的返回信号功率谱分布进行反演雨滴谱的研究, 上述多方面的研究均建立在对大气返回信号功率及其功率谱密度分布较为准确估算的基础之上。

风廓线雷达主要用于对测站上空大气目标进行探测, 气象要素在垂直方向上有较大变化, 大气对电磁波的散射能力随高度变化较大, 综合考虑雷达探测高度和分辨率, 风廓线雷达针对不同探测高度区间, 设置不同雷达参数和信号处理参数, 形成了高、中、低等不同探测模式。

与天气多普勒雷达不同, 风廓线雷达对返回信号功率的估算是通过对返回信号信噪比的测量及系统的噪声功率计算得到的^[6], 不同探测模式对风场的估算影响不大, 但返回信号功率的估算, 则与雷达参数和信号处理参数的设置有关。为了确切地反映大气对电磁波返回信号的散射能力, 有必要根据 WPR 设置的不同参数和信号处理参数对回波信号进行规范化处理, 得到表征大气实际散射能力的特征参量。对返回信号功率的规范化处理主要是选择适用于对大气湍流散射的雷达方程对不同探测模式

时的雷达参数进行规范处理, 以及对于信号处理的得益进行确认, 从而得到 C_n^2 的正确估算结果。

本文在分析 2005 年两部对流层风廓线雷达同期多模式探测资料的基础上, 建立了规范化的处理方法, 并对处理后的资料进行对比检验分析, 表明规范化处理是合适的、必要的。

2 基于 WPR 参数的 C_n^2 计算方程

理论上, 在局地均匀、各向同性湍流的惯性子区内, 描述晴空大气湍流运动对电磁波的后向散射能力用折射率结构常数 (C_n^2) 表示, 当雷达波处于湍流惯性子区时, Ottersten^[9] 给出散射截面 (η) 与大气折射率结构常数之间的关系式:

$$\eta = 0.38 \times C_n^2 \times \lambda^{-1/3}, \quad (1)$$

其中, λ 为电磁波波长, 单位为 m; C_n^2 的单位为 $\text{m}^{-2/3}$; η 的单位为 m^{-1} 。大气湍流对电磁波的散射类似于云雨对电磁波的散射, 为弥散目标, 为方便对大气湍流返回信号功率的估算, 引进了大气湍流散射的等效反射率因子 Z_c ,

$$Z_c = \frac{\eta \times \lambda^4}{\pi^5 |K|^2} = \frac{0.38 \times C_n^2 \times \lambda^{11/3}}{\pi^5 |K|^2}. \quad (2)$$

将 (2) 式代入适用于云雨目标的雷达气象方程^[10]:

$$P_r = \frac{P_t G L^2 \lambda^2 \theta^2 h \eta}{1024 \pi^2 (\ln 2) R^2}, \quad (3)$$

进而导出风廓线雷达探测大气折射率结构常数的估算方程:

$$C_n^2 = \frac{P_r R^2}{7.3 \times 10^{-4} P_t G (c \tau / 2) L^2 \lambda^{5/3}}, \quad (4)$$

其中, P_t 为发射功率, G 为天线增益, θ 为雷达水平、垂直波束宽度, h 为发射脉冲对应的空间长度, R 为目标物距离, P_r 为返回信号功率, c 为光速, τ 为脉冲宽度, L 为馈线损耗。

风廓线雷达是在频域估算信号功率谱密度分布的参数, 通过对真实大气的信噪比 (S_{NR_0}) 的估算来对未作积累时的返回信号功率 P_r 进行估测:

$$P_r = S_{NR_0} P_n. \quad (5)$$

噪声功率 P_n 可由实测的系统噪声系数 N_f 来近似估算:

$$P_n = K T_0 B_0 N_f, \quad (6)$$

式中, K 是波尔兹曼常数, 取值为 $K = 1.38 \times 10^{-23}$

(单位: J/K), T_0 是用绝对温度表示的雷达接收机系统噪声温度, P_n 是风廓线雷达接收机的噪声功率, B_0 为接收机的带宽, 因此, 对大气折射率结构常数 C_n^2 的估算方程描写为

$$C_n^2 = \frac{S_{NR_0} K T_0 B_0 N_f R^2}{7.3 \times 10^{-4} \lambda^{5/3} P_t (h/2) G L^2}. \quad (7)$$

转换后,

$$C_n^2 = C S_{NR_0} R^2, \quad (8)$$

其中,

$$C = \frac{K T_0 B_0 N_f}{7.3 \times 10^{-4} \lambda^{5/3} P_t (h/2) G L^2}.$$

(7) 式表明, C_n^2 与风廓线雷达的发射功率 (P_t)、电磁波波长 (λ)、脉冲宽度 (τ)、天线增益 (G)、系统馈线损耗 (L)、噪声系数 (N_f)、接收机带宽 (B_0)、天线噪声温度 (T_0) 等参数有关, 引入系数 C 对雷达参数进行综合描述, 将 C_n^2 估算方法转换为公式 (8), 因此, C_n^2 的估算主要建立在信噪比 (S_{NR_0}) 的估测上, 对返回信号信噪比 (S_{NR_0}) 的正确估测是对 C_n^2 估算的基础。

3 数据处理方法

风廓线雷达对功率谱密度的绝对定标十分困难, 对返回信号功率的定标采用了从功率谱分布中估算信噪比 (S_{NR}), 通过对雷达系统噪声功率 (P_n) 的测量来计算返回信号 (P_r)。由于风廓线雷达得到的功率谱密度分布是经过信号在时域的累积、频域的谱平均后得到的, 由它估算的信噪比通过进行时域累积及谱平均的修正, 才能得到返回信号真实的信噪比 (S_{NR_0})。 C_n^2 的估算需针对不同探测模式雷达参数和信号处理参数进行规范的处理, 对探测得到 S_{NR} 的估算方法也有必要进行规范, 才能得到 C_n^2 准确的估算值。而从功率谱密度分布中求取平均速度、速度谱宽则不受其定标的影响。

3.1 信号累积得益

风廓线雷达采用对信号进行相干累积的方法提高系统的探测能力, 对信号累计处理有三部分: (1) 时域中信号的累加, (2) 频域中信号的累加, (3) 功率谱密度分布的累加^[11]。时域的累加通常为相干累加, FFT 对信号的相干累加, 常不为全相干累加, 多个功率谱密度分布的累加则是非相干累加, 三者提高信号信噪比得益的估算方法是不相同的。通过累加提高信号的信噪比称为雷达信号累积

得益, 时域信号经历的 m 个相干积分次数之后, 信号功率提高了 m^2 倍, 噪声功率被提高了 m 倍, 因此, 经过 m 次相干积分次数之后 S_{NR} 的得益为 m 。当信号为全相干时, 谱分析将信号功率集中到一根频谱线间隔内, 则其最大谱线的 S_{NR} 得益为 F_0 (也就是作 FFT 变换前的采样点数), 与信噪比得益是相同的; 当返回信号为非全相干积分时, 频域中返回信号在频域中不呈谱线状, 而具有一定的谱宽, 其得益需根据信号谱宽所对应的谱线数 B 进行订正, 修正后的谱分析得益为: $F = F_0 / B$, 当返回信号为全相干信号时, $F = F_0$ 。谱分布的累加是非相干积分处理, 经过 n 次谱平均之后 S_{NR} 的得益为 $\sqrt{n}$ ^[11, 12]。信号经过积分处理后估算的最大谱线信噪比 (S_{NR}) 与原始信噪比 (S_{NR_0}) 的关系 (单位为 dB) 如下:

$$S_{NR} = 10 \lg \left(m \frac{F_0}{B} \sqrt{n} \right) + S_{NR_0}. \quad (9)$$

使用不同模式探测时选用信号积分处理参数 (m, F, n) 不同, 信号处理后的累积得益也不同, 应视生产厂家提供的 S_{NR} 提取方法的不同, 根据上述三种累积得益进行分别处理, 直接使用厂家提供的 S_{NR} 计算 C_n^2 会出现误差。

3.2 探测参数规范化处理

风廓线雷达探测大气获得返回信号的原始信噪比 (S_{NR_0}) 后, 直接估算出返回信号的功率 P_r , 由 P_r 估算 C_n^2 时必须考虑雷达的各项参数, 公式 (8) 给出了雷达各项参数对 C_n^2 的影响。在雷达系统进行探测前和进行探测中间有必要对其参数进行标测, 对其易变参数, 如发射功率 P_t 和系统的噪声系数 N_f , 需经常进行检测, 某些风廓线雷达设有对 P_t 、 N_f 自动检测的能力。雷达参数规范化处理就是依据公式 (8), 由雷达的各项指标计算综合系数 C , 由雷达测得的信号信噪比 S_{NR} 规范处理到大气真实信噪比 S_{NR_0} , 并根据信号所在距离 R 联合估算 C_n^2 。同一部雷达常用不同探测模式对不同探测高度区间进行探测, 变化探测模式时, 其雷达参数进行相应调整, 也需要依据公式 (8) 对雷达参数进行规范化处理, 再由雷达综合系数 C 、信号的位置 R 和信号的信噪比 S_{NR_0} 来估算 C_n^2 。

4 资料处理分析

4.1 资料

分析数据采自北京大气探测试验基地两部对流

层风廓线雷达 2005 年进行的探测试验,其中对流层 I 型 WPR 试验资料时间为 2005 年 7 月至 12 月,对流层 II 型 WPR 试验资料时间为 9 月至 10 月,由于两部雷达采用同一频段,为避免同频干扰,进行对比探测时采用交替观测的方式。

表 1 给出两部风廓线雷达系统的性能参数指标和技术参数,其相邻时间间隔约 15 分钟,对流层 I 型探测波束为三波束指向探测,最大探测高度为 12~16 km,对不同的高度层分别采用高、中、低三种探测模式进行探测,距离库长分别为 120 m、240 m、480 m;对流层 II 型为五波束指向探测,最大探测高度为 6~8 km,采用高、低两种探测模式,高探测模式采用宽脉冲和脉冲压缩探测方式,在增强探测能力的同时保持了较高的距离分辨率,距离库长均为 240 m,两部雷达给出探测数据是多个模式探测的综合。

资料处理包括观测期内两个探测系统五种探测模式的探测结果,共对 183 个观测日、约三万余次的探测数据进行了处理,涵盖夏季、秋季以及部分冬季时期。应用规范化处理方法对两部雷达相邻时次资料进行了 C_n^2 估算值的对比分析和 C_n^2 垂直结构的季节变化统计研究。

4.2 资料处理

对 WPR 探测获取的数据经过两个处理过程才能得到 C_n^2 的确切估算值,首先对 S_{NR_0} 的确认,WPR 生产厂家受信号处理方案的制约,对 S_{NR_0} 的估算方法并不规范,公式 (9) 给出规范化处理后的 S_{NR_0} 和 S_{NR} 的关系,而生产厂家给出的信噪比估算值,需根据它的估算方法进行必要的修正,有的需要进行时域得益订正,有的则需进行时域和频域谱宽的订正,才能得到确切的 S_{NR_0} 值。时域中估算信噪比方法的不同,可能造成 C_n^2 估算值的差异,因此有必要对生产厂家 S_{NR} 提取方法进行规范。

对 WPR 探测资料的规范化处理,还应包括雷达参数的规范化处理,根据不同雷达不同探测模式采用的各项参数,应用公式 (8) 求出各自的 C 系数,根据 C_n^2 与 S_{NR_0} 、 R 的关系式,由上述处理得到的 S_{NR_0} 联合 R ,即可导出 C_n^2 的估算值。

4.3 C_n^2 估算值一致性检验

由于 C_n^2 对大气湿度、温度、云等气象要素较为敏感,在进行资料对比分析时,选择晴朗、少云的观测日探测资料进行对比分析。为检验处理方法的合理性,应选择探测时间相近、探测高度范围内数据可信用度较好的资料进行对比,由于对流层 II 型系统设计最大探测高度为 8 km,为避免探测最大高度附近信息提取结果可信用度不稳定造成的影响以及低探测模式各项参数的不确定带来的误差,对比分析垂直高度范围确定为 2640~7160 m。

4.3.1 标校误差

由于相控阵雷达的天线增益、系统馈线损耗的定标较为困难,两部风廓线雷达投入运行前虽然进行过系统的静态测试,但由于没有进行统一标校,探测结果出现一定的偏差。为确定两部 WPR 系统的定标差异,采用标准化方案计算了两部对流层风廓线雷达 9 月 20~23 日连续四个晴朗日 1260 组样本 C_n^2 在不同高度上的分布,得到如图 1 所示的 C_n^2 估算累计平均值随高度的垂直分布,图中表明两者在垂直方向上有较好的一致性分布,对流层 II 型估算结果较对流层 I 型估算结果偏大,总平均值相差 2 dB,此值可以近似认为是两部探测系统之间的标校误差。通常新一代天气雷达经过仔细标校后的强度标校误差控制在 ± 1 dB 范围内,受测量仪表和测量方法的制约,两部相控阵风廓线雷达的标校误差为 2 dB 被认为是合理的。图 1 中所示的对流层 II 型 C_n^2 估算值与对流层 I 型相比较,在高度上表现出较大的起伏,可能是由于两部风廓线雷达系统对

表 1 两部风廓线雷达系统典型参数表

Table 1 Typical parameters of two Wind Profile Radar (WPR)

型号	波长/ mm	发射频率/ MHz	探测 模式	脉冲重复 周期/ μ s	脉冲宽 度/ μ s	发射功 率/dB	天线增 益/dB	相干积 分次数	谱平 均数	谱变 换数	距离库 长/m
对流层 I 型	674	445	低	40	0.8	20	28	300	4	256	120
			中	72	1.6	23	33	160	6	512	240
			高	198	9	23	33	32	16	512	480
对流层 II 型	674	445	低	60	1.6	6	25	16	32	512	240
			高	156.8	12.80	6	25	16	17	512	240

SNR 的提取方法不同所致。

4.3.2 两部 WPR 估算 C_n^2 的对比

为进一步检验两部 WPR 探测资料 C_n^2 估算值的一致性, 对 9 月 20~23 日内两部 WPR 获取每 3 小时一次交替观测的相邻时刻探测结果进行规范化处理, 然后将不同脉冲长度的输出插值到相同距离库长的垂直高度上, 建立 581 组比较对数据进行对比分析, 图 2a 为 29 个相邻时刻 C_n^2 平均输出的垂直分布, 5 km 高度以下两部 WPR 的 C_n^2 估算值离差表现为较好的一致性。在剔除了标校误差的影响后, 两部 WPR 在相同高度上的 C_n^2 离差统计分析结果如图 2b 所示, 图中的离差概率分布基本符合高斯正态分布图形, 分布结果基本合理, 其中有 10% 的比较对样本离差出现在零附近, 但仍有一些比较对的离差值较大, 由于比较对数据的探测时间相差 1.5 分钟左右, 大气湍流运动的快速随机变化导致在短时间内 C_n^2 值出现不一致; 同时两部系统 SNR 信息提取方法的不同会导致 C_n^2 估算结果的差异,

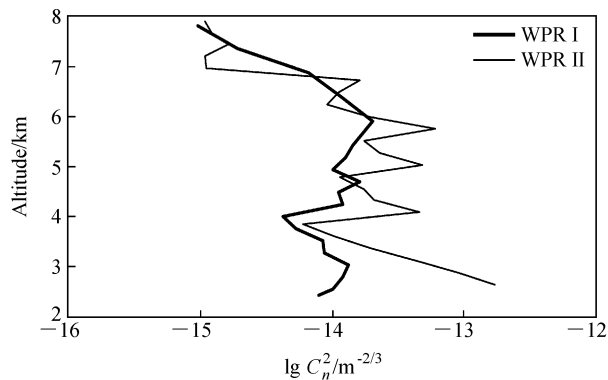


图 1 C_n^2 估算值平均输出垂直分布对比

Fig. 1 Comparison of vertical distributions of C_n^2 mean results retrieved from two WPR's data

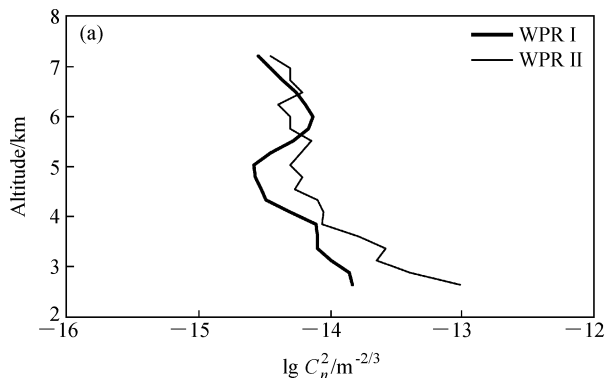


图 2 相邻时刻 C_n^2 平均输出垂直分布 (a) 和离差概率分布 (b) 图

Fig. 2 Two mean profiles of (a) C_n^2 retrieved with WPR data and (b) the frequency distribution of C_n^2 deviation at adjacent time

以上原因均可能导致估算结果的离差。从两部 WPR 垂直分布的基本图形以及离差分布结果, 认为采用规范化处理方案得到的两部 WPR 探测资料对 C_n^2 的估算结果较为一致。

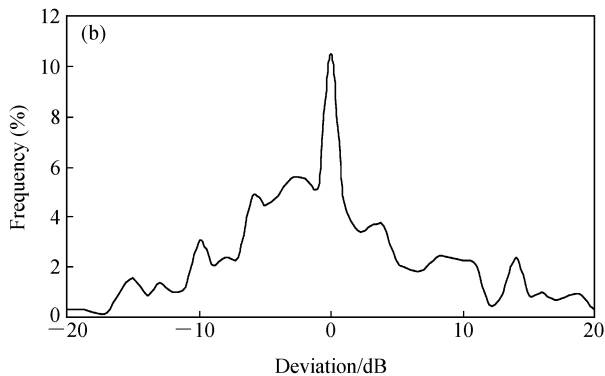
4.4 C_n^2 估算值合理性分析

4.4.1 C_n^2 垂直结构

为进行 C_n^2 垂直结构的分析, 对风廓线雷达对流层 I 型 7 月 24 日全天 252 次探测、三个模式共计 756 个输出文件进行计算处理统计, 由于数据处理中发现近地面层的信号检测输出稳定性较差, 与探测系统采用的地物杂波对消方法有关, 为便于分析, 将 1 km 高度作为数据分析起始高度。图 3 为规范化处理后的三个模式 C_n^2 合成分布图以及指数拟合函数曲线, 指数拟合函数为

$$C_n^2 = 7.0 \times 10^{-14} e^{-0.5356H},$$

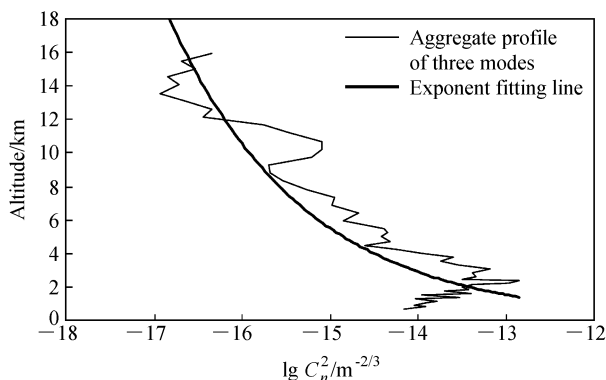
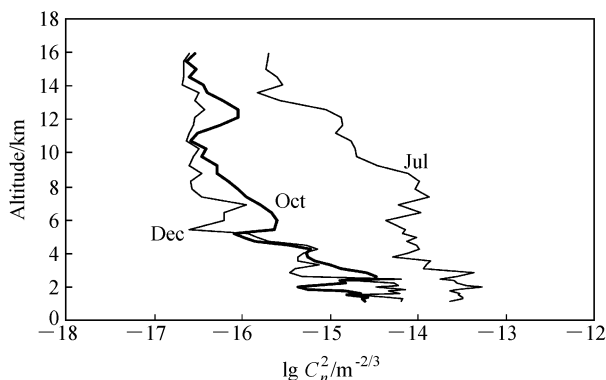
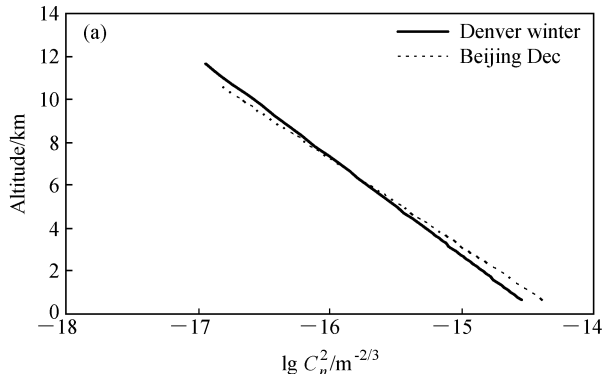
拟合曲线的相关系数为 0.9, 表明三个模式 C_n^2 合成估算结果在垂直方向上的连续性较好, C_n^2 从低层到高层值域分布范围为 $10^{-13} \sim 10^{-17}$, 在 2~15 km 高度范围内 C_n^2 垂直递减率约为 2.6 dB/km, 其垂直分布结构随高度变化的连续性以及值域分布范围均较为合理, 与张旭等^[13]于 1994 年得到的北京地区 C_n^2 随高度 2.4 dB/km 的递减率基本接近。从图 3 中不难发现 C_n^2 有明显的层结结构, 在整个高度上会出现不规则的湍流较强及湍流较弱的层次, 这种成层结构的 C_n^2 在观测中普遍存在, 这是由于大气要素的垂直结构以及湍流的间歇性引起的, 与孙刚等^[14]使用温度脉动探空仪获取的资料计算北方地区 C_n^2 垂直分布结果较为接近, 但倾斜率偏大, 两者的差异可能是由于使用温度脉动探空仪获取的资料计算 C_n^2 没有考虑湿度影响的原因造成。



4.4.2 季节变化

为进一步分析 C_n^2 处理计算结果的合理性, 对时间连续性较好的对流层 I 型探测资料进行统计平均分析, 得到不同季节 C_n^2 估算值月平均分布, 将 7 月、10 月、12 月 C_n^2 统计平均结果作为夏季、秋季、冬季的代表值在图 4 中进行绘制, 并计算各代表月的垂直分布曲线的指数拟合函数, 其中, 7 月为

$$C_n^2 = 3.0 \times 10^{-14} e^{-0.21H},$$

图 3 C_n^2 三模式合成输出及指数拟合曲线图Fig. 3 C_n^2 aggregate profile of three modes and exponent fitting line图 4 C_n^2 月平均分布Fig. 4 Distributions of C_n^2 mean monthly profiles图 5 (a) 北京与丹佛冬季 C_n^2 简化模型对比图; (b) 北京 12 月 C_n^2 估算值平均分布及拟合函数图Fig. 5 (a) C_n^2 simplified models in Beijing Dec and Denver winter; (b) distributions of C_n^2 mean output and exponent fitting line in Beijing Dec

10 月为

$$C_n^2 = 2.0 \times 10^{-15} e^{-0.39H},$$

12 月为

$$C_n^2 = 6.0 \times 10^{-15} e^{-0.56H}.$$

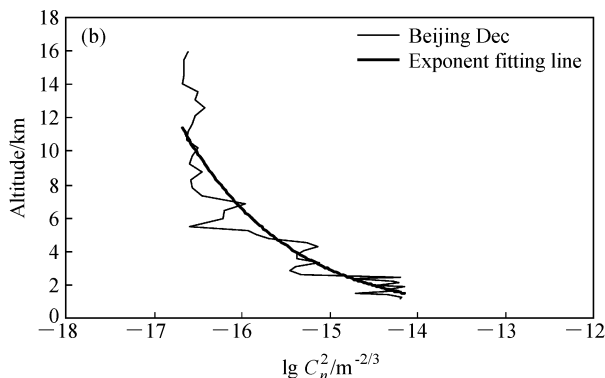
从夏季到冬季 C_n^2 随高度的倾斜变化逐渐增大, 表明夏季 C_n^2 从低层到高层的垂直变化略小于冬季, 秋冬两季 C_n^2 的分布比较接近, 尤其在 2~4 km 高度范围内一致性表现更为良好; 夏季由于温度较高、湿度较大, C_n^2 在垂直方向上的分布比秋冬季高出一个数量级, 尤其是在 5~9 km 中高层范围内尤其明显。

4.4.3 与简化模型对比

大气折射率结构常数 C_n^2 值域变化范围很大, 随地域、季节的不同有很大的差异, Doviak 等^[15] 根据美国科罗拉多州丹佛冬半年探测资料得出 C_n^2 中值随高度变化的简化模型为

$$C_n^2 = 3.9 \times 10^{-15} e^{-H/2}.$$

图 5a 为北京地区 C_n^2 估算值 12 月平均计算结果的简化模型 (实线) 与美国科罗拉多州丹佛冬半年 C_n^2 中值随高度变化的简化模型比较 (图中虚线), 表明采用规范化处理方法获取的北京 12 月 C_n^2 随高度的变化率与丹佛冬季的简化模型一致性较好, 两地 C_n^2 量级一致, 计算结果非常接近; 随高度的倾斜率变化略有不同, 12 月北京地区 C_n^2 随高度变化的倾斜率为 -0.56, 丹佛简化模型倾斜率为 -0.5, 可能由于两地的大气垂直结构状况有所不同所致。图 5b 为北京地区 12 月 C_n^2 平均计算结果及指数拟合函数, 图中表明在 12 km 以上, WPR 估算 C_n^2 值随高度变化倾斜率变小, C_n^2 随高度很少变化, 不符合指数分布规律, 与 Sterenborg 等用探空资料估算



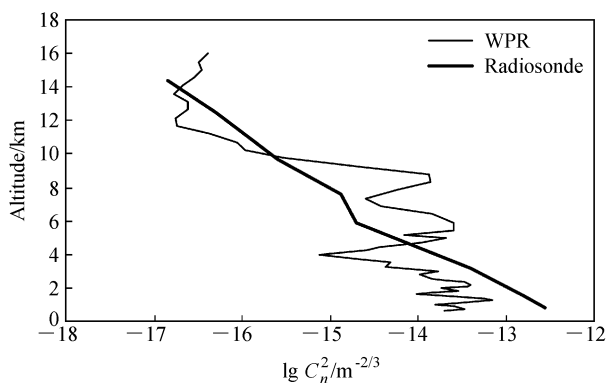


图 6 WPR 反演 C_n^2 廓线与常规探空资料计算 C_n^2 廓线对比

Fig. 6 Comparison of two profiles of C_n^2 by using WPR data and radiosonde data at the same location

C_n^2 得到的变化规律相似。

4.4.4 与探空资料计算结果对比

利用探空资料, 通过计算平均折射率的垂直梯度^[16, 17]也可估算 C_n^2 廓线。计算时使用相同地点的业务探空资料, C_n^2 廓线估算采用的北京地区数值常数 α^2 是李双喜等^[18]得到的计算结果, 由于业务探空资料垂直分辨率较低, 难以得到 C_n^2 廓线较为详细的描述, 但是其廓线结构与利用风廓线雷达资料反演得到的结构基本接近。图 6 为 7 月 24 日 08 时(北京时, 下同)探测资料计算得到的 C_n^2 垂直廓线与当日 07~08 时 WPR 探测值计算的 C_n^2 平均输出的对比分析图, 两种计算方法得到的廓线在 6~8 km 处均出现不连续层结的现象。

5 结束语

(1) 通过对多部 WPR 探测系统用不同探测模式同时获取的资料进行对比分析, 提出对返回信号功率估算及信号处理规范化处理方案, 规范化处理后不同 WPR 估算的 C_n^2 及其随高度的分布较为一致, 表明规范化处理方法是合理、必要的。

(2) 对北京地区两部对流层 WPR 部分观测数据的规范化处理分析得出, C_n^2 垂直分布呈指数递减, 与国内外探测导出的 C_n^2 垂直结构模型倾斜率相似, 冬季观测得出的 C_n^2 分布与 Doviak 利用丹佛冬季观测资料得出的结果较为相近, 表明 WPR 应用此方案估算的 C_n^2 是合适的。

(3) 风廓线雷达观测得到的北京地区 C_n^2 随高度分布存在较为明显的季节变化, 其变化主要表现在中层暖湿季节 C_n^2 比冬天干冷季节要高一到两个

量级, 而低层和高层变化相对较小, 其原因有待于进一步研究。

(4) 对 2005 年观测资料的分析发现, 接近地面的几个高度距离上的 SNR 探测结果, 常因地物信号的干扰而难以得到较为确切的 C_n^2 估算。

(5) 由返回信号的功率谱密度分布中对 SNR 的正确提取直接影响了风廓线雷达对 C_n^2 的准确估计, 有必要进一步规范风廓线雷达在谱分布中对 SNR 的提取方法。

(6) 利用 WPR 对 C_n^2 的反演输出与探空资料 C_n^2 计算结果进行个例比较, 廓线结构大致相近, 廓线中一些明显不连续层结的表现较为一致。

致谢 对航天科工集团第二十三研究所以及信息产业部第三十八研究所提供的帮助表示真挚的感谢。

参考文献 (References)

- [1] Bianco L, Wilczak J M. Convective boundary layer depth: Improved measurement by Doppler radar wind profiler using fuzzy logic methods. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2002, **19** (11): 1745~1758
- [2] Angevine W M, White A B, Avery S K. Boundary layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler. *Bound. -Layer Meteor.*, 1994, **68**: 375~385
- [3] Raddy K K, Gen Biao. The Meiyu precipitation cloud system studies using wind profiler in China. 32nd Conference on Radar Meteorology. 2005. P7R. 2
- [4] Muschinski A, Sullivan P P, Wuertz D B, et al. First synthesis of wind-profiler signals on the basis of large-eddy simulation data. *Radio Sci.*, 1999, **6** (12): 1437~1459
- [5] 马振骅, 陈大任, 周彪. VHF 雷达探测对流层风廓线的数值模拟试验研究. *大气科学*, 1985, **9** (2): 113~118
Ma Zhenhua, Chen Daren, Zhou Biao. The numerical simulation on the tropospheric wind profile sounding by VHF radar. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1985, **9** (2): 113~118
- [6] 阮征, 葛润生, 吴志根. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. *应用气象学报*, 2002, **13** (5): 170~179
Ruan Zheng, Ge Runsheng, Wu Zhigen. The reach of a method for the rain cloud structure with wind profiler. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (5): 170~179
- [7] White A B, Gottas D J, Ralph F M, et al. An automated brightband height detection algorithm for use with Doppler radar spectral moments. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2002, **19** (5): 687~697
- [8] Kitamura Y. Vertical profile of raindrop size distribution by

- using 400MHz wind profiler in stratiform rainfall. 32nd Conference on Radar Meteorology, 2005. P7R.10
- [9] Ottersten H. Atmosphere structure and radar backscattering in clear air. *Radio Sci.*, 1969, **4** (10): 1179~1193
- [10] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001. 70~93
Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. *Radar Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 70~93
- [11] 何平. 相控阵风廓线雷达. 北京: 气象出版社, 2006. 63~103
He Ping. *Phased Array Wind Profile Radar* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2006. 63~103
- [12] 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社, 1995. 216~253
Zhang Peichang, Wang Zhenhui. *Basis of Atmospheric Microwave Remote Sensing* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1995. 216~253
- [13] 张旭, 周秀骥. 大气折射率结构系数 C_n^2 的观测实验. 应用气象学报, 1994, **15** (1): 19~26
Zhang Xu, Zhou Xiuji. The observation experiment of atmospheric refractive index turbulent structure constant C_n^2 . *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1994, **15** (1): 19~26
- [14] 孙刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 不同地区大气折射率结构常数分布特征及分析. 强激光与粒子束, 2005, **17** (4): 485~490
Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, et al. Profile and character of atmospheric structure constants of refractive index. *High Power Laser and Particle Beams* (in Chinese), 2005, **17** (4): 485~490
- [15] Doviak R J, Rabin R M, Koscielny A J. Doppler weather radar for profiling and mapping wind in the pre-storm environment. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1983, **21** (1): 25~33
- [16] van Zandt T E, Green J L, Gage K S, et al. Vertical profiles of refractivity turbulence structure constant: Comparison of observations by the Sunset radar with a new theoretical model. *Radio Sci.*, 1978, **13**: 819~829
- [17] Gossard E E, Wolfe D E, Moran K P. Measurement of clear gradients and turbulence properties with radar wind profilers. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1997, **15** (2): 321~342
- [18] 李双喜, 付元芬, 黄寅亮, 等. 利用兴隆站所测的 Fried 参数 r_0 确定湍流折射率结构系数 C_n^2 中的数值常数 α . 天津理工学院学报, 2000, **16** (1): 63~65
Li Shuangxi, Fu Yuanfen, Huang Yinliang, et al. Deciding the constant of refractive-index structure coefficient C_n^2 by way of the Fried parameter r_0 at Xinglong station. *Journal of Tianjin Institute of Technology* (in Chinese), 2000, **16** (1): 63~65