

武汉中层、低热层大气角谱中频雷达观测^{*}

胡 雄 曾 桢 张冬娅 熊建刚
李凤琴 黄泽荣 张训械

(中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

摘 要

武汉中频雷达是利用中层、低热层中电子密度不均匀体的散射来测量大气的水平风场和电子密度剖面。雷达在计算风场的过程中可得到一些该层大气中电子密度不均匀体的寿命和空间尺度等参量值。结合这些参量和大气风场值可计算得到大气的角谱。其计算方法包括全相关分析技术的谱宽法和空间相关法。前者计算的值被认为是大气角谱的上限值。应用这两种方法,利用2001年2月9日武汉中频雷达的观测数据,对武昌上空中层、低热层大气的角谱进行了计算。结果得到大气角谱随高度增加略微增加,如在68 km为 6° ,90 km达最大为 11° ,其平均值为 9.2° 。利用2001年2月4—10日86 km高度上的数据,得到一个7天平均的日变化曲线,发现大气角谱值在本地夜晚最小。

关键词 中频雷达; 大气角谱; 中层、低热层

1 引言

大气中存在折射指数不规则体,大气雷达正是利用这些不规则体对电波的后向散射特性开展大气的遥感探测。在对流层和平流层,这些不规则体产生于压强、温度和湿度的起伏;在中层和低热层,则是产生于电子密度的起伏。在60—100 km大气,对于MF和VHF大气雷达,湍流散射和Fresnel反射的贡献是主要的。Fresnel反射是指,该层大气由于其电子密度随高度迅速增加,可以被认为是水平分层的介质,对入射的电波可产生部分镜反射。湍流散射是指,该层大气含有丰富的大气波动成分,尤其是大气重力波在该层发生饱和破碎,产生湍流,这些湍流中波长为雷达电波波长一半的傅里叶分量对电波产生Bragg散射。在雷达回波中,湍流散射和Fresnel反射哪一个为主要贡献者一直是一个复杂的问题。

对于垂直向上入射的电波,其大气散射体散射信号的研究表明,其后向散射功率随天顶角的增大而减小,这种现象被称为角度敏感性,或角谱。一般将散射体的后向散射功率方向图表示为 $\exp[-\sin^2 \theta / \sin^2 \theta_s]$ 的形式^[1],其中参量 θ_s 为角谱的定量描述。角谱的存在,说明大气对电波散射是各向异性的,也被认为是Fresnel反射机制的体现。大气各向异性的角谱,使得原来基于各向同性湍流散射机制的大气雷达利用Doppler频移测量得到的径向速度值低于其真实值,需要利用 θ_s 对其所得速度值进行修正^[1],所以 θ_s 的特征研

^{*} 国家自然科学基金资助项目(40204011),中国科学院知识创新主要方向性项目(kjcx2-sw-t1)共同资助
2003-01-26 收到原稿, 2003-04-25 收到修定稿

究对于大气散射机制研究和大气雷达探测结果的解释等具有重要的价值. 一些描述散射体的模式被提出来研究和解释这种大气角谱^{[2],[3]}.

全相关分析技术 FCA^[4]、DBS 技术^[1] 和事后统计扫描技术 (Poststatistic Steering Techniques)^[5] 等被应用于 MF 和 VHF 大气雷达以测量大气角谱. 对流层和平流层的 VHF 雷达测量结果表明, FCA 技术和 DBS 技术测量得到的 θ_s 相符合; θ_s 一般小于 10° , 随时间、地点、天气条件不同而不同. 中层的测量结果表明, 不同技术、时间和地点的 θ_s , 一般在 10° 左右变化, 随高度增加有所增大^[6].

我国已开始应用中频雷达探测 60—100 km 的大气风场和电子密度^[7]. 在我国上空还没有大气角谱的观测报道. 本文利用武汉中频雷达观测实验数据, 来计算大气角谱参量, 分析其特征, 以丰富我们对大气角谱的了解.

2 大气角谱的计算方法介绍

测量角谱参量 θ_s 的技术大致分类为全相关分析技术 FCA、DBS 技术和事后统计扫描技术. 本文采用 FCA 技术, 利用中频雷达观测数据来计算角谱参量.

FCA 是分布天线模式大气雷达计算风场的一种技术. 大气不均匀体对雷达垂直入射电波产生后向散射, 这些散射信号在地面形成衍射图案. 这种地面衍射图案具有时间上和空间上相关的特性, 这些特性反映了媒质不均匀体本身的相关或随机起伏特性. 通过统计在地面上不同位置的天线记录信号的时间序列的自相关函数和互相关函数的特性, 可以得到地面衍射图案的时间和空间相关度、时间衰减参量和空间尺度参量等, 以及估计出大气的风场^[8]. 而利用 FCA 计算得到的这些与不均匀体有关的统计参量如空间尺度、衰减时间和大气风场, 可以进一步得到大气媒质的角谱信息.

利用 FCA 技术计算大气角谱的方法有两种, 一是谱宽法, 一是空间相关法. 在谱宽法中, FCA 的衰减时间 $\tau_{0.5}$ (即自相关函数值降为 0.5 时的时间延迟) 和有效方向图 $1/e$ 半宽 $\theta_{sb} (^\circ)$ 由下式联系^{[4],[9]},

$$\theta_{sb} = 7.6\lambda / (|v|\tau_{0.5}), \quad (1)$$

其中, λ 是雷达波长, v 是大气水平风速.

空间相关法则是将 FCA 估计的衍射图案空间尺度 $S_{0.5}$ (相关函数值降为 0.5 时的空间尺度) 和长短轴比 R_{ax} 与 $1/e$ 半宽 $\theta_{sb} (^\circ)$ 联系起来^{[9],[10]}

$$\theta_{sb} = 15.2\lambda R_{ax}^{1/2} / S_{0.5}. \quad (2)$$

大气角谱可从下式计算得到,

$$\sin^{-2} \theta_s = \sin^{-2} \theta_{sb} - \sin^{-2} \theta_b. \quad (3)$$

其中, θ_b 是雷达波束 $1/e$ 半宽. 对于宽波束的雷达, $\theta_b \gg \theta_s$, 则 $\theta_s \approx \theta_{sb}$.

一般认为, 谱宽方法没有计入衍射图案随机变化的影响, 或者是将由于随机运动导致的谱展宽计入了大气运动导致的谱展宽之中, 所以该方法估计的角度敏感性可认为是角谱的上限值. 衍射图案的随机变化趋向于减小衰减时间参量. 当随机运动较大时, 谱宽方法将过高估计 θ_s . 空间相关法得到的 θ_s 较接近于真实值.

3 中频雷达实验

武汉中频雷达 (30°N, 114°E) 的工作频率为 2 MHz 附近, 峰值功率为 25 kW, 主要用于测量大气 60—100 km 的风场, 其数据的高度分辨率为 2 km, 时间分辨率可达 2 min, 是全天候工作雷达. 该雷达采用的是分布天线 (Spaced Antenna) 模式, 应用 FCA 分析计算大气的水平风场 [7].

雷达的发射天线阵由 4 个排成正方形的偶极天线组成, 如图 1. 雷达分布式接收天线阵由 3 个子天线阵组成, 每个子天线阵含两个正交偶极天线, 子天线阵中心之间的距离为 185 m. 地面每个子天线阵接收雷达回波、采样得到复数的时间序列, 利用 FCA 分析这些复数时间序列的自相关和互相关特性, 可得到衍射图案的衰减时间、空间尺度、大气风速等参量, 利用这些数据通过 (1), (2), (3) 式进一步计算得到大气各高度上的角谱.

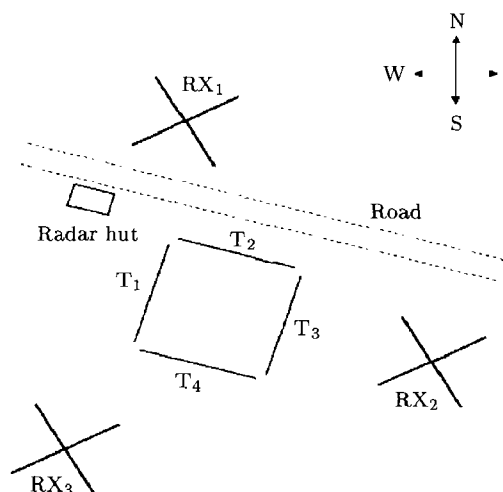


图 1 武汉中频雷达示意图

Fig.1 Scheme of the MF radar at Wuhan

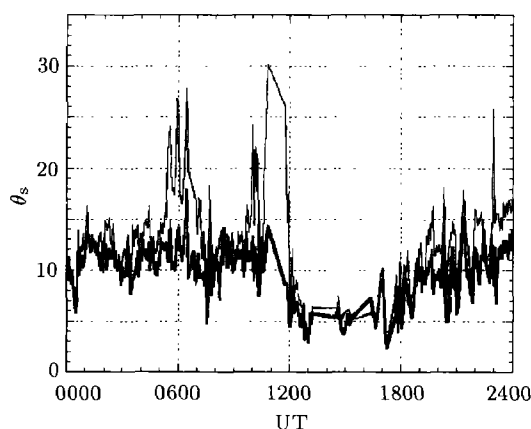


图 2 2001 年 2 月 9 日 86 km 高度
大气角谱的日变化

Fig.2 Daily variations of the atmospheric angular
spectrum at 86 km level on Feb. 9, 2001

由于该中频雷达具有较宽的波束, 可认为计算得到的有效波束宽度 θ_{sb} 近似等于大气角谱 θ_s . 下面利用 2001 年 2 月 4—10 日的中频雷达常规观测实验数据来估计 60—100 km 大气角谱 θ_s , 以首次揭示出武汉上空大气角谱的特性.

4 观测结果

不失一般性, 下面以 2001 年 2 月 9 日的观测结果来说明大气角谱的一般特点. 图 2 给出了 86 km 高度的 θ_s 的估计值. 其中细实线是采用谱宽法计算得到的角谱, 表示为 $\theta_{s(sw)}$; 粗实线是采用空间相关法计算的角谱, 表示为 $\theta_{s(sc)}$. 如上所述, $\theta_{s(sw)}$ 反映了 θ_s 的上限, 普遍高于 $\theta_{s(sc)}$. 图 2 中, $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 的日平均统计值分别为: $12.7^\circ \pm 4.3^\circ$ 和 $9.8^\circ \pm 2.6^\circ$.

图 2 中 $\theta_{s(sw)}$ 与 $\theta_{s(sc)}$ 偏离较大时, 说明此时大气不均匀体的随机运动较强, 导致 $\theta_{s(sw)}$ 的估计值偏高. 当 $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 的值同时较大时, 说明此时大气的角度敏感性较小、湍流散射对回波的贡献较大.

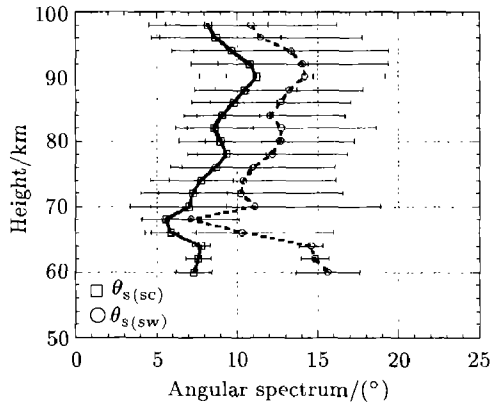


图 3 2001 年 2 月 9 日大气角谱日均值及其标准偏差随高度的变化

Fig.3 Mean angular spectra and their standard deviations versus heights on Feb. 9, 2001

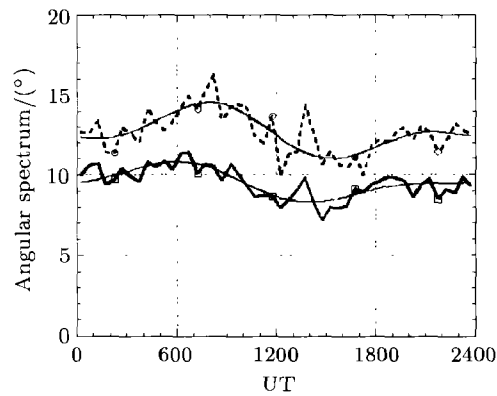


图 4 2001 年 2 月 4—10 日 86 km 高度大气角谱平均日变化曲线

粗实线表示 $\theta_{s(sc)}$, 虚线表示 $\theta_{s(sw)}$, 细实线为他们的拟合曲线

Fig.4 Mean daily variations of angular spectrum at 86 km level within Feb. 4—10, 2001

thick solid line denotes $\theta_{s(sc)}$, dashed line denotes $\theta_{s(sw)}$, and thin solid lines are their fitting curves

图 3 给出了各个高度上的 $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 的日平均值及其标准偏差. 在 70 km 以下, 用于统计的数据数目较少 (< 50), 且数据主要分布在白天的时刻; 其他的高度用于统计的数据数目为 200 左右, 基本上均匀分布在全天.

图 3 表明, $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 随高度变化的趋势相同, 都大致随高度增加而增加; 在各个高度上 $\theta_{s(sw)}$ 较 $\theta_{s(sc)}$ 大; $\theta_{s(sc)}$ 的日平均值在 68 km 最小, 大约为 6° ; 在 90 km 最大, 达 11° .

统计所有高度上的 $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$, 得到 $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 的平均值分别为 $12.4^\circ \pm 5.4^\circ$ 和 $9.2^\circ \pm 3.2^\circ$.

从图 2 还可发现角谱日变化的一个特点, 即在当地时的夜间 (1000—2000 UT), 角谱的值较小, $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 都在 5° 左右变化; 在白天其值较夜间要大, 为 10° 左右变化; 在其他高度也有类似的变化特征. 为进一步分析大气角谱的日变化特点, 利用 2001 年 2 月 4—10 日 86 km 高度上的连续数据计算大气角谱, 利用这些计算结果给出其半小时格点上的平均值, 最后得到角谱的平均日变化. 图 4 给出了半小时平均 $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 的日变化曲线.

图 4 中的曲线也存在日夜变化的现象, $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 的最小值出现在当地夜晚, 但变化幅度没有 2 月 9 日那么大. 为了分析大气角谱这种变化的周日振荡现象, 对图 4 的日变化曲线作下式拟合,

$$\theta_s = \theta_{s0} + A_1 \cos[2\pi/24(t - P_1)] + A_2 \cos[2\pi/12(t - P_2)]. \quad (4)$$

其中, θ_{s0} 为日平均值, $A_1(P_1)$ 表示周期为 24 h 振荡的振幅 (相位), $A_2(P_2)$ 表示周期为 12 h 振荡的振幅 (相位), t 为 UT. 图 4 给出了上述拟合曲线, 拟合参量见表 1.

表 1 拟合参量表
Table 1 List of fitting parameters

	$\theta_{s0}/(^{\circ})$	$A_1/(^{\circ})$	P_1/h	$A_2/(^{\circ})$	P_2/h
$\theta_{s(sw)}$	12.63	1.14	6.22	0.88	8.51
$\theta_{s(sc)}$	9.50	0.97	4.17	0.50	6.95

表 1 中 $\theta_{s(sw)}$ 和 $\theta_{s(sc)}$ 的拟合日平均值与从图 2 中得到的日平均值基本一致.

5 结论

中频雷达观测表明, 大气角谱一般小于 10° , 大致随高度增加而增加, 在 90 km 处最大为 11° , 68 km 处最小为 6° ; 这些结果与其他有关文献的结果基本符合. 角谱在当地时夜间较小, 而白天较大, 其物理解释有待于深入研究.

这些 θ_s 的观测结果, 对于我国今后开展大气雷达探测时在设计和解释风场方面具有重要的参考价值. 对于某个大气角谱 θ_s , Doppler 大气雷达的某窄波束的有效方向将偏离原设计的方向 θ_b , 由于方向的偏离其测量得到的 Doppler 径向速度值需要进行修正. Hocking 曾给出该修正因子^[1]:

$$R = [1 + (\theta_b/\theta_s)^2]. \quad (5)$$

为了解我国上空 θ_s 的长期变化特点、及其与风场和地磁场等因素之间可能的关系, 需要长期的中频雷达观测实验和分析研究工作.

参 考 文 献

- [1] Hocking W K, Ruster R, Czechowsky P. Absolute reflectivities and aspect sensitivities of VHF radio wave scatterers measured with the SOUSY radar. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1986, **45**:131—144
- [2] Hocking W K. Seasonal variation of turbulence intensities in the upper mesosphere and lower thermosphere measured by radar techniques. In: Handbook for MAP. SCOSTEP: Secretaries, Univ. of Ill., Urbana, USA, 1989, **27**:427—438
- [3] Woodman R F, Chu Y Y H. Aspect sensitivity measurements of VHF backscatter made with the Chung-Li radar: plausible mechanism. *Radio Sci.*, 1989, **24**:113—119
- [4] Lesicar D, Hocking W K. Studies of seasonal behaviour of the shape of mesospheric scatterers using a 1.98 MHz radar. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, **54**:295—309
- [5] Vandepeer B G W, Reid I M. On the spaced antenna and imaging Doppler interferometer techniques. *Radio Sci.*, 1995, **30**(4):885—901
- [6] Reid I M. Radar observations of stratified layers in the mesosphere and lower thermosphere (50—100 km). *Adv. Space Res.*, 1990, **10**(10):7—19
- [7] Li Fengqin, Hu Xiong, Zhang Xunxue et al. Preliminary observations results of the middle atmospheric MF radar at Wuhan. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(1):65—71. in Chinese (李凤琴, 胡雄, 张训械等. 武汉中层大气中频雷达及其初步观测结果. 空间科学学报, 2002, **22**(1):65—71)
- [8] Briggs B H. The analysis of spaced sensor records by correlation techniques. In Handbook for MAP. SCOSTEP: Secretaries, Univ. of Ill., Urbana, USA, 1984, **13**:166—186

- [9] Holdsworth D A. Signal analysis with applications to atmospheric radar. Doctorate thesis, Univ. of Adelaide, Australia, 1995, 63—70
- [10] Hobbs B G, Reid I M, Holdsworth D A. A comparison of tropospheric VHF Doppler beam steering and full correlation analysis measurements of aspect sensitivity. *Radio Sci.*, 2001, **36**(5):955—964

OBSERVATIONS OF THE MESOSPHERE AND LOWER THERMOSPHERE ANGULAR SPECTRUM WITH AN MF RADAR AT WUHAN

HU Xiong ZENG Zhen ZHANG Dongya XIONG Jiangang
LI Fengqin HUANG Zerong ZHANG Xunxie

(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract

Atmospheric angular spectrum is one of the significant features of the atmospheric radio scatterers. Echoes scattered from the electron irregularities in the mesosphere and lower thermosphere can be used to measure horizontal winds and electron densities with the MF radar at Wuhan. Configured with spaced antenna mode and full correlation analysis techniques, Wuhan MF radar can measure the life time and scale of the irregularities routinely as well. Using these data, the atmospheric angular spectrum can be estimated with both a spectral width method and a space correlation method. The former method gives the upper limit of the angular spectrum, while the latter gives estimations close to the true angular spectrum. The observational data on February 9, 2001 are used to estimate the angular spectrums with these two methods. Results show that the angular spectrum increase slightly with increasing height with a minimum of 6° at 68 km and a maximum of 11° at 90 km. Its mean value is 9.2° . Data at 86 km level from Feb. 4 to 10, 2001 are used to give mean daily variations that have a maximum in the daytime and minimum in the nighttime.

Key words MF radar, Atmospheric angular spectrum, Mesosphere and lower thermosphere