

VHF 雷达探测对流层风廓线的 数值模拟实验研究

马振骅

陈大任

周彪

(中国科学院大气物理研究所)

(北京市气象台)

(南京气象学院)

提 要

根据北京上空气象资料计算出的大气湍流结构常数(c_n^2)及风速矢量廓线,构成了 VHF 雷达的模拟回波信号。在技术要求适当的 VHF 雷达设计参数条件下,对模拟回波信号进行了相干积分和谱分析处理。结果表明,具备所给设计参数的 VHF 雷达,无论冬天或夏天,都可探测到上界达 20 公里以上的风速廓线。

一、引 言

VHF 雷达可以连续地、不受时间限制地测量高空风廓线,从而为无球探空系统提供了一种测量风要素的理想手段。对此, Balsley 等^[1]和 Röttger 等^[2]曾在各种刊物上作过多次介绍。目前国内有些单位也在探讨建立 VHF 雷达系统的方案。为了预先从理论上估计赋予一定参数的 VHF 雷达系统的探测能力,我们作了一系列的估算,本工作就是其中的一部分。

在此以前,我们利用 VanZandt 等人^[3]提出的方法,根据北京地区的常规探空(温、湿、压和风)资料,计算了自地面至约 20 公里高度间无线电折射率湍流结构常数(c_n^2)的垂直廓线^[4]。所用资料的日期有 1981 年 7 月 10、20、30 日的三天和 1982 年 1 月 10 日、20—26 日、30 日的九天,用它们分别代表夏天和冬天的情况。本文就是利用该工作中计算得到的 c_n^2 廓线和同时刻的风廓线作为基础数据,构成模拟雷达回波信号,经过预定的信号处理措施后,得到一定表达形式的探测结果。

二、模拟信号的构成

使用阵列天线时,简单的雷达气象方程可以表达为

$$P_r = \frac{P_t \sigma^2 A_p h}{8\pi r^2} \eta, \quad (1)$$

1983 年 10 月 6 日收到, 1984 年 2 月 9 日收到修改稿。

1) 这个工作记录在下列文献中: 马振骅, 陈大任 (1982), 根据探空资料计算北京上空无线电折射率湍流结构常数(c_n^2)的垂直廓线(未发表)。

Chang daoping

式中 P_r 是回波功率, P_t 是发射脉冲功率, α 是天线-馈线系统的单程传输效率, A_p 是天线有效面积, h 是发射脉冲空间长度, r 是距离, η 是大气连续反射介质的反射率。在大气湍流结构满足局地均匀各向同性的情况下, 如对入射波产生有效散射的湍流尺度处在惯性付区内, 则大气反射率与折射率结构常数有如下关系:

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

因而回波功率可表达为

$$P_r = \frac{0.38 P_t \alpha^2 A_p h}{8 \pi \lambda^{1/3} r^2} c_n^2. \quad (3)$$

假设这些回波功率是分布在中心频率为 f_0 , 方差为 σ 的正态型多普勒频谱上的, 则回波功率谱密度可表达为

$$P_r(f) = \frac{P_r}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(f-f_0)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (4)$$

设接收机的带宽为 B , 则接收机总噪声功率 P_N 为

$$P_N = k(T_r + \alpha T_e)B, \quad (5)$$

其中 k 是波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 瓦/赫·度, T_r 是接收机系统的噪声温度, T_e 是在雷达工作频段上的宇宙噪声温度。如果雷达发射脉冲重复频率为 PRF, 则极限的信号可分析频率(即 Nyquist 频率)为 $\pm \text{PRF}/2$, 分析带宽也是 PRF, 在此频带以外的噪声信号都将折叠到此区间内, 因而分析频带中的噪声功率谱密度为

$$P_N(f) = P_N/\text{PRF}, \quad (6)$$

由此得到(信号与噪声)合成的功率谱密度为

$$P(f) = P_r(f) + P_N(f) = \frac{P_r}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(f-f_0)^2}{2\sigma^2} \right] + P_N/\text{PRF}. \quad (7)$$

但是这样得到的谱密度值只是从统计意义上来讲的。由于天气回波信号和噪声本身具有幅度的随机性, 使得信号样本的任一组现实所对应的谱密度分布并不具有如(7)式那样的光滑特性。根据对天气回波和噪声特性的研究, 可以知道, 任一组现实信号样本所对应的谱密度是一概率分布密度为指数形式的随机数, 可表达为^[4]

$$P_i(f) = -P(f) \ln(x_i), \quad (8)$$

其中 $P_i(f)$ 是一组现实信号样本的功率谱密度函数, x_i 是一在 0 与 1 之间具有均匀分布概率密度的随机数。与(8)式的功率谱密度相对应, 可以得到复振幅谱的实部和虚部为^[5]

$$\begin{aligned} \text{Re}(f) &= \sqrt{P_i(f)} \cos(2\pi\theta_i), \\ \text{Im}(f) &= \sqrt{P_i(f)} \sin(2\pi\theta_i), \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\text{Re}(f)$ 和 $\text{Im}(f)$ 分别是复振幅谱的实部和虚部, θ_i 是另一个在 0—1 之间均匀分布的随机数, 它独立于 x_i 。对复振幅谱的一个现实求富氏逆变换, 就得到一组时域复信号, 它可以代表回波信号的复调制函数^[7], 包含有天气回波信号的信息特征。以 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 表示复时间信号的实部和虚部, 则时域信号与复振幅谱可通过下列离散富氏逆变换公式联系起来,

$$I(t_n) + jQ(t_n) = \sum_i (\text{Re}(f_i) + j\text{Im}(f_i)) \exp \left(j2\pi \frac{t_n}{N} \right), \quad (10)$$

上式中 t_n 是时域上的离散点, f_l 是频域上的离散点, N 是一组信号的样本数, 也即谱的点

数。
为了定量地计算出所需的模拟信号, 我们根据草拟的雷达系统设计初步方案, 选择雷达参数如表 1 所示。表中也给出了当前世界上几个主要的 VHF 大气探测雷达系统的参数, 以作比较。

表 1 几个主要的 VHF 雷达系统参数表

	波 长 (米)	发射脉冲功率 (瓦)	天线面积 (米 ²)	脉冲长度 (微秒)	脉冲重复频率 (次/秒)
本文中系统设计参数	4	10^6	10^4	2	4000
Sunset (美)	7.36	10^6	1.8×10^3	1	6250
Platteville (美)	6.01	1.5×10^6	10^4	15/30	667/1000
Pokev Flat (美)	6.01	3.2×10^6	4×10^4	2—17	1333
SOUSY (西德)	5.61	5×10^6	10^3	1	8000

在脉冲重复频率为 4000 次/秒的设计参数下, 令取样时间为 4.096 秒, 则每组取样包含的信号样本数为 16384 个, 信号样本间隔为 0.25 毫秒。在对应的频域上, 谱线间隔为 0.244 赫, 频率界限为 ± 2000 赫。

以 1981 年 1 月 30 日上午 07 时 20 公里高度上的气象数据为例, 该处风速为 7 米/秒, 风向 299° , 设天线波束指向天顶偏东 15° , 因而径向风速为 -1.57 米/秒, 对应的中心多普勒频率为 -0.785 赫。根据前面注 1 所引文献中的计算, 该处折射率结构常数 C_N^2 为 3.68×10^{-14} 米⁻²; 设天线-馈线系统的单程传输效率为 0.25, 则由(3)式可算出回波功率为 2.96×10^{-17} 瓦(在计算天线的有效面积时, 考虑到波束非垂直指向的影响)。假设由于大气中存在湍流运动的缘故, 回波的多普勒频率不是单一的, 回波功率分布在方差为 0.5 赫的正态型多普勒频谱上(相应于径向风速分布方差为 1 米/秒)。此外, 假设在 4 米波长上, 接收机噪声温度为 400°K , 宇宙噪声温度为 4000°K , 接收机带宽为 0.5 兆赫, 则由(5)式可计算得噪声功率为 9.66×10^{-15} 瓦, 即信噪比为 3.06×10^{-3} 。在信号分析中, 这些噪声功率将均匀地分布在 -2000 — $+2000$ 赫的频带内。噪声与信号合成的统计功率谱如

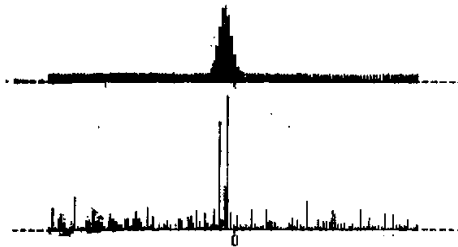


图 1 上图是信号与噪声合成的统计功率谱, 下图是随机化后的一个功率谱。谱线间隔为 0.244 赫, 共有 16384 条谱线。信噪比为 3.06×10^{-3} , 信号的中心多普勒频率为 -0.785 赫。纵坐标为线性相对值

图 1 中的上图所示(相应于(7)式)。随机化后的一个功率谱(相应于(8)式),则如图 1 中的下图所示。通过相应的复振幅谱及其变换运算,可以得到复时间信号,其实部和虚部分别与信号载波的两个相位相差 $\pi/2$ 的幅度分量相对应。在实际雷达观测工作中,这两部分正交信号分量是通过将雷达回波信号经过两路正交相位检波而得到的。

三、信号的处理与结果

在实际大气中,对流层水平风速很少超过 100 米/秒;由此可知,在波长为 4 米,波束天顶角为 15° 的情况下,径向风速引起的多普勒频移很少超过 12.5 赫。也就是说,远远低于信号取样的 Nyquist 频率。因此,我们可以对信号序列作相干积分处理,也即对复时间信号的实部和虚部分别进行逐段平均,这样作的结果,一方面提高了信噪比(提高到的倍数,等于相干积分的样本数),另方面大大地压缩了进一步处理的数据量。在这个实验中,取相干积分次数为 128。这样,每一组时间序列的复信号样本数减少到 $16384/128 = 128$ 个。最高可分析频率为 $\pm 2000 \text{ 赫}/128 = \pm 15.625 \text{ 赫}$,相应的最高不模糊径向风速为 31.25 米/秒,因此仍可以满足对测量最高风速的要求。由于信号的取样时间为 4.096 秒,

对应的径向风速分辨率为 0.488 米/秒。

复时间信号 (16384 个点),经相干积分后,得到的压缩了的信号序列 (128 个点) 如图 2 所示。通过对后者作谱分析,即可得到对应的功率谱,其谱密度值也具有随机性。

为了进一步提高从功率谱中鉴别信号的能力,可以将多次观测分析得到的谱进行平均;信噪比的改善,正比于被平均谱的个数的平方根。在图 3 中画出了一个在信噪比为 0.0005 的个例中,对随机功率谱进行不同次数平均时得到的结果。可以看出,信号的可鉴别性随着被平均谱数的增加而提高。即使在信号比噪声低三个量级的情况下,仍可望通过相干积分、谱分析和多谱平均等措施将信号频谱鉴别出来。

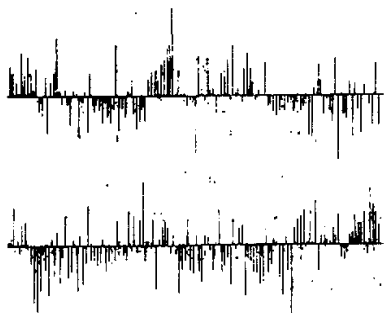


图 2 16384 个点的复信号序列。经相干积分后,得到的 128 个点的复信号序列。上图为复信号的实部,下图为虚部。纵坐标为线性相对值

我们应用上述方法,对 1981 年 7 月的三天(代表夏天)和 1982 年 1 月的三天(代表冬天)的资料进行了数值模拟试验。得到的结果如图 4 所示。图中各谱形都是对 8 个谱的平均,并按谱密度极大值作了归一化。图中的谱线间隔,相当于雷达对径向风速的分辨率 (0.488 米/秒)。在图中,除了 1 月 30 日外,都是由于缺乏更高高度上的探空数据,而没有能给出相应高度上的计算结果。此外,在 7 月 10 日的个例中,由于 7—12 公里高度间是稳定层结,根据 VanZandt 等人给定的方法,湍流概率为零,因而无法求出适当的折射率湍流结构常数值,也不能作出相应的模拟试验,在图 4 中的相应位置上留以空白。

从图可以看出,在信噪比远远小于 1 的情况下,仍可以鉴别出大气目标的平均径向速

度。通过仔细的分析可以发现,在绝大多数情况下,谱中出现极大值的位置,与实际径向速度值之差,不超过雷达的速度分辨率。

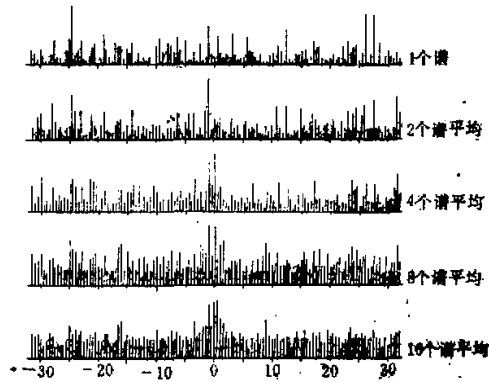


图 3 在信噪比为 0.0005 时,通过相干积分、谱分析和多谱平均得到的信号-噪声合成功率谱密度随谱平均次数的变化。横坐标单位为米/秒,纵坐标是按极大值归一化后的相对值

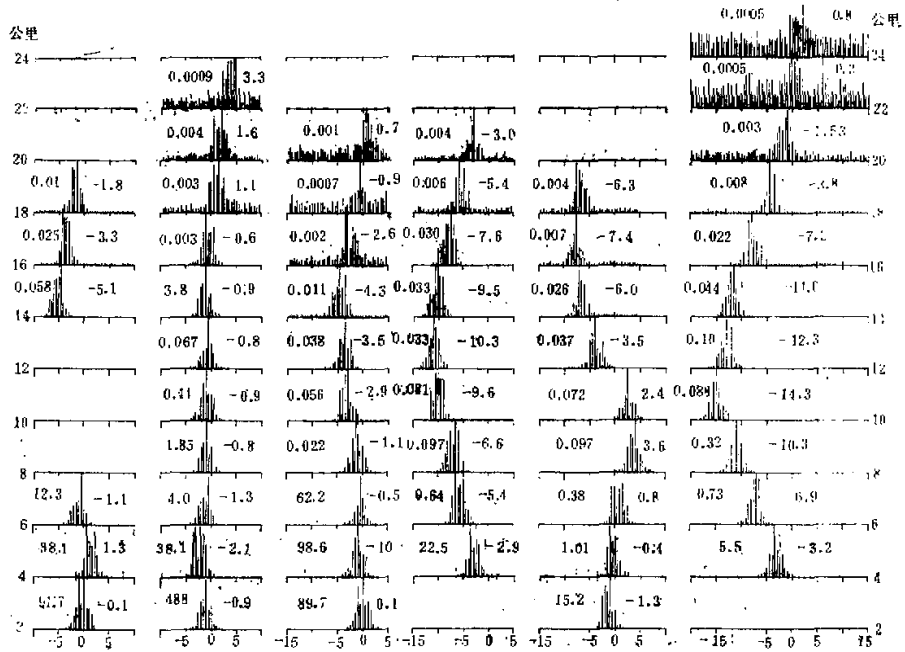


图 4 数值模拟试验得到的各日各高度上的多普勒速度谱。各个谱左侧的数字表示信噪比,右侧的数字是原始的径向速度值,单位为米/秒。横坐标单位也是米/秒。自左向右日期分别为 7 月 10 日, 20 日, 30 日, 1 月 10 日, 20 日, 30 日。

四、结 论

通过上述有限次数的数值模拟试验,可以得出下列初步结论:

1. 在现在的设计参数下,无论在夏天或冬天,VHF 雷达系统可以探测到上限至少达 20 公里的风速廓线。
2. 在本工作中所用的信号处理参数下,雷达对平均径向风速的测量精度不低于风速分辨率,即约 0.5 米/秒。

参 考 文 献

- [1] Balsley, B. B. and K. S. Gage, The MST radar technique: Potential for middle atmosphere studies, *Pure and Applied Geophysics*, 118, 452—493, 1980.
- [2] Röttger, J. and G. Schmidt, High resolution VHF radar Sounding of the troposphere and stratosphere, *IEEE Trans. Geosci. Elec.*, Vol. GE—17: 182—189, 1979.
- [3] VanZandt, T. E., J. L. Green, K. S. Gage and W. L. Clark, Vertical profile of refractivity turbulence structure constant: comparison of observations by the Sunset radar with a new theoretical model, *Radio Science*, 13, 819—829, 1978.
- [4] Zrnic, D. S., Simulation of weatherlike Doppler spectra and Signals, *J. Appl. Meteor.*, 14, 619—620, 1975.
- [5] Sirmans D. and B. Burgarner, Numerical Comparison of five mean frequency estimators, *J. Appl. Meteor.*, 14, 991—1003, 1975.

THE NUMERICAL SIMULATION ON THE TROPOSPHERIC WIND PROFILE SOUNDING BY VHF RADAR

Ma Zhenhua

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Chen Daren

(Beijing Meteorological Observatory)

Zhou Biao

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

VHF radar echo signals are simulatedly formed by using the atmospheric turbulence structure constant (C_n^2) and wind profiles, which were calculated based on the radiosonde data in Beijing. The simulated signals are then processed by coherent integration and spectrum analysis. The results show that, with the parameters under consideration, the VHF radar may effectively detect the wind up to 20 km above the ground, irrespective of that it is in summer or winter.