

用非相干的常规天气雷达提取多普勒 速度谱宽

——回波强度涨落谱分析

袁立功 曹彦*

提 要

通常非相干的常规天气雷达的应用仅仅是通过雷达回波强度的探测来提供天气目标物的位置和其反射率的信息。本文在国产的非相干的713天气雷达上,对某一固定地点的降水回波进行了离散取样,应用微机(APPLE II)对所获取的离散样本作傅立叶变换(FFT),得到回波强度的涨落谱和谱宽。然后根据涨落谱与多普勒谱之间的确定关系,计算出在气象上非常有用的多普勒速度谱宽和典型的多普勒谱形。

一、问题的提出

一般地说,雷达回波的涨落现象使人们很难精确地确定回波功率,给定量测量降水带来麻烦。因此现代的天气雷达几乎都增设了视频积分器来消除回波的涨落。但是另一方面回波涨落本身包含了值得提取的降水区中降水质点运动的信息——风场结构及其他特征。

气象多普勒雷达是从回波涨落中提取气象信息,得出滴谱分布和粒子运动情报最理想的探测工具,它能以比较高的检测灵敏度、空间分辨力和速度分辨力来探测降水体径向速度分布结构并且将结果实时地显示出来。由于气象多普勒雷达主要探测的对象是云雨粒子的运动和分布,因此它应能同时处理在许多距离门上分离出来的回波信号,并能对回波的多普勒谱作出分析,而不仅仅测量目标的平均运动速度。此外,由于降水粒子的运动速度很低,气象多普勒雷达必须具有很高的频率稳定性和很高的回波频率的鉴别能力,以便测出极微小的多普勒频偏。

目前,我国尚未制造出气象多普勒雷达,而国产的常规天气雷达价廉、量多。因此从常规天气雷达中提取多普勒信息是一个具有实用价值的课题。

本文利用常规天气雷达回波的离散取样,并进行快速的傅立叶变换(FFT)得到回波强度的涨落谱,计算其谱宽。再根据涨落谱和多普勒谱的关系,推断出多普勒谱的谱宽和谱形。

多普勒速度谱宽和涨落谱在气象上至少有如下的应用:

(1)根据速度谱宽值,可以判定雷达探测空间水凝物的种类:雨、雪、雹。这有利于灾害性天气的预告。

(2)可得到雷达脉冲体积内湍流的信息,尤其适用于作航空安全的天气预告。

(3)只要多普勒速度谱是对称的,多普勒谱的谱形可以从涨落谱计算出来。

(4)根据实测的多普勒频率或速度谱宽 σ_v ,可以较精确的得到对回波独立取样与非独立取样的比值^[1],由独立取样值可计算出视频积分器的精度,而不是通常设计视频积分器所作的假定 $\sigma_v=1$ 米/秒。

二、常规天气雷达中提取多普勒速度谱宽和谱形的原理

1. 多普勒谱与涨落谱

设有两个水滴,经向速度分别为 v_1 和 v_2 ,产生的多普勒频移分别为 f_1 和 f_2 。则 $F=f_2-f_1$ 定义为涨落频率。

雷达回波是由大量的散射体对电磁波散射的综合,回波值随时间的涨落是所有涨落频率 $F_{ij}=f_i-f_j$ 贡献的结果。对后向散射功率进行适当的处理,可得到一个以多普勒频率为自变量的后向散射功率。这个函数通常以 $S(f)$ 表示,称为多普勒谱。相应地,如以涨落频率为自变量则该函数称为涨落谱,以 $S(F)$ 表示。

2. 非相干雷达高频载波发射脉冲及回波信号的频谱特性

非相干雷达是以高频载波方脉冲序列作为发射信号,其时域、频域形式分别如图1(a)(b)所示。

对于雷达接收到的来自某一确定距离上的变化着的回波脉冲序列,相当于在有限时段内载波脉冲的幅度和相位受到了调制。这一调制过程当然是由于目标物的位置和散射特性的变化造成的。设调制函数为 $f(t)$ [见图1(c)], $f(t)$ 对应的频谱为 $F(f)$ 。当它对相位相干的高频波脉冲无限序列进行调制时,产生的频谱形状如图1(d)所示。可以看到,频谱中每条谱线具有 $F(f)$ 形状的精细结构。所以只要分析其中的一条谱线就可以得到调制函数的全部信息。如果滤掉高频载波部分,就可将中心谱线移到低频上来,从而对 $F(f)$ 谱形进行分析。

3. 回波强度涨落谱与多普勒谱的关系

使用常规雷达,对某一固定地点的回波信号,在相同的时间间隔上取样——回波涨落信号的离散样本,再对时域上的离散样本进行离散的傅立叶变换就可以将时域上的回波涨落信号转换成频域上的涨落谱。事实上,数字电子计算机也只能接受离散的回波数据也只能分析离散频谱。

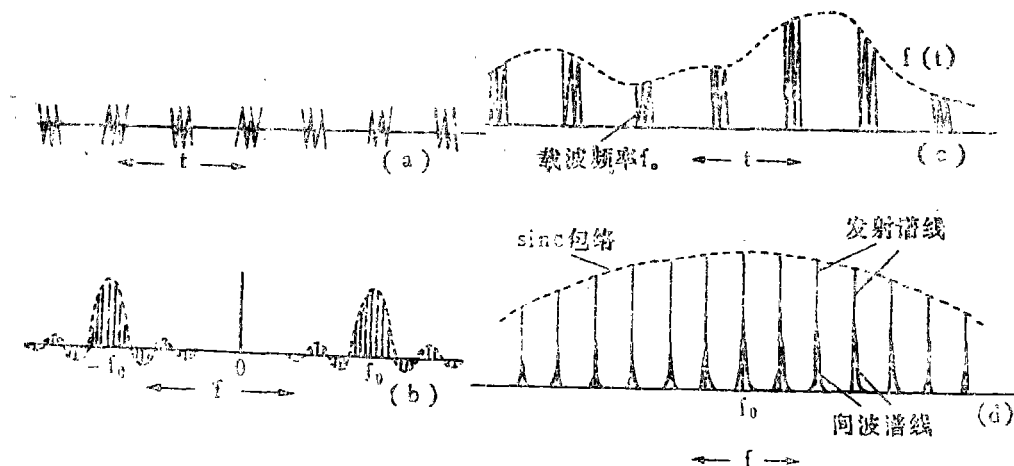


图1 雷达发射高频脉冲和回波信号的时域和频域表示

文献[2]得出: (1)回波强度涨落谱为

$$S(F) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f+F)S(f)df$$

式中 $S(f)$ 是多普勒谱, f 是多普勒频率, F 是强度涨落谱频率。(2)涨落谱方差等于多普勒谱方差的两倍: $\sigma_F^2 = 2\sigma_f^2$ 。

我们将涨落谱取为单边高斯谱型, 亦即只对正频率 F 定义涨落谱, 原因是在对涨落信号进行频谱分析时负频率没有物理意义。

三、快速离散傅立叶变换及回波样本的采集

离散傅立叶变换是利用数字计算机将离散的时域信号变换成频域信号的一种常用方法。

设离散的时域信号为 $f(nT_s)$, T_s 为取样间隔, N 为取样总数, n 为取样点的序号, 则离散傅立叶变换为

$$F(k\omega_i) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_s) e^{-j2\pi nkT_s\omega_i} \quad (k=0, 1, 2, \dots, N-1)$$

式中 $\omega_i = \frac{2\pi}{NT_s}$ 是频域上离散信号的谱线间隔, K 是谱线的序数。

由图2利用A/D模数转换电路和微机(APPLE II)按713雷达的脉冲重复频率200周/秒, 对雷达回波进行离散取样, 即每隔 $T_s = 5$ 毫秒取一个样本, 共取 $N = 128$ 个样本, 相应的取样截断函数共同作用之后的离散时域信号(取样程序见附录1)如图2右上角所示。然后通过计算机软件(FFT程序见附录2)进行FFT变换可直接得到离散频域信号(图2右下角)。

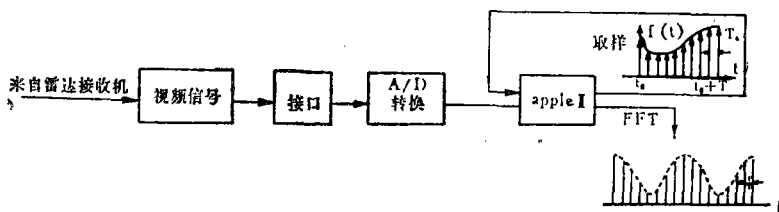


图2 对雷达回波离散取样的方框图

取样间隔 $T_s = 1/200 = 5$ 毫秒, 总的取样时间 $T = N \times T_s = 128 \times 0.005 = 0.64$ 秒

四、实测结果分析

我们对1985年6月6日一次层状云降水的回波信号进行了谱分析。

开雷达, 在线性中放的状态下, 观看PPI, 选择适合的降水区和取样点: 方位为 210° , 距离为100千米, 对该点的降水回波取样, $T_s = 0.005$ 秒, $N = 128$, 谱线的间隔

$\omega_f = \frac{2\pi}{NT_s}$, $f_f = \frac{\omega_f}{2\pi} = 1.56\text{Hz}$ (赫)。取样时间 $T = 0.64$ 秒。利用软件对取样序列进行

快速傅立叶变换, 得到图3所示的降水回波的涨落谱。

由于雷达的脉冲重复频率为200周/秒, 取样频率 f_s 也只能是200Hz, 无法提高, 根据取样定理规定 $f_s \geq 2F$, F 载波调制信号中最高的频率分量。这意味着如果降水信号 $f(t)$ 中的最高频率超过100Hz, 频谱就会产生重迭现象, 实际上 $f(t)$ 中的

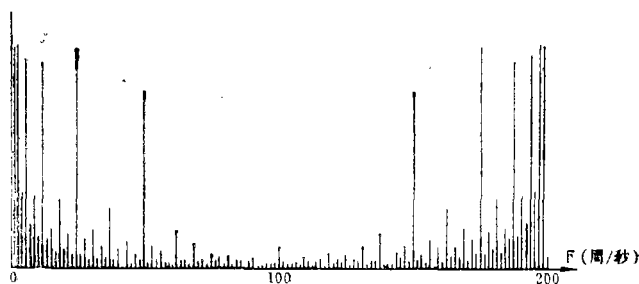


图3 降水回波的涨落谱

高频分量是可能大于100Hz的。变换后的频谱重迭将造成涨落谱的失真, 因此要精确地获得与 $f(t)$ 相应的涨落谱, 提高雷达的脉冲重复频率是一个有待解决的问题。

从图3可以发现: 频谱成份大部分都集中在中心谱线的两旁, 即集中在 $f = 0$ 的右边和 $f = 200\text{Hz}$ 的左边, 谱线的幅度随着频率的增加很快地降低, 因此可以推断由取样频率不够高而造成的谱线重叠只发生在谱线幅很小的区域内, 对我们进行的分析影响不大, 图3所示的涨落谱呈高斯型, 由前面的讨论可以肯定多普勒谱也是高斯型的。

前已提到, 在正常的情况下, 只要对中心谱线进行分析就可以得到涨落谱的全部信息。并指出, 对于涨落谱的负频率是没有意义的, 因此只需对 $0 - 100\text{Hz}$ 频率范围内的频谱(共64根谱线)进行研究就行了。

经FFT变换后:

$$\text{幅度涨落谱 } F(kf) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_s) e^{-j2\pi n k T_s},$$

而

$$S(F) = |F(kf)|^2$$

平均频率为

$$\bar{f} = \frac{\sum_{K=0}^{63} K f S(F)}{\sum_{K=0}^{63} S(F)} = 53.7 (\text{Hz})$$

涨落谱方差为

$$\sigma_F^2 = \frac{\sum_{K=0}^{63} (Kf - \bar{f})^2 S(f)}{\sum_{K=0}^{63} S(F)} = 384.6 (\text{Hz})$$

多普勒方差为

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{2} \sigma_F^2 = \frac{1}{2} \times 384.6 = 192.3 (\text{Hz})$$

多普勒频率标准差为

$$\sigma_f = 21.1 (\text{Hz})$$

多普勒速度标准差为

$$\sigma_v = \frac{\lambda \sigma_f}{2} = \frac{5 \text{厘米} \times 21.1}{2} = 0.53 (\text{米/秒})$$

式中 λ 为波长, 713雷达 $\lambda = 5$ 厘米。

五、结 语

本文对实测的离散回波信号进行涨落谱的分析后, 得到多普勒速度谱的标准差 $\sigma_v = 0.53$ 米/秒。罗杰斯(1957年)*指出: $\sigma_v = 0.6$ 米/秒是一个较为普遍的数值。可见, 这两个 σ_v 值是颇为接近的。此外, 实测的回波涨落谱是高斯型的, 可以推断出回波的多普勒谱也是高斯型的。上述情况客观地说明了应用常规天气雷达, 通过回波涨落谱的分析能提取多普勒信息: 速度谱宽和谱形, 这种方法能充分发挥我国现有的、为数众多的常规天气雷达的潜力, 有一定的实用价值。

*[美]巴顿, L. J. 著, 张培昌、戴铁还译, 雷达探测大气, 165页, 南京气象学院, 1982

为了改善测量多普勒谱宽和谱形的精度, 有必要提高雷达的脉冲重复频率。

附录1 雷达视频信号取样程序(汇编)

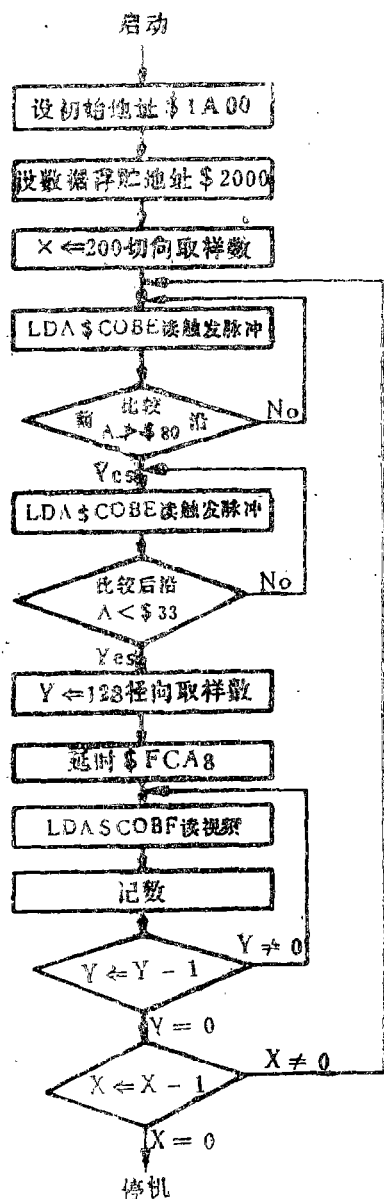
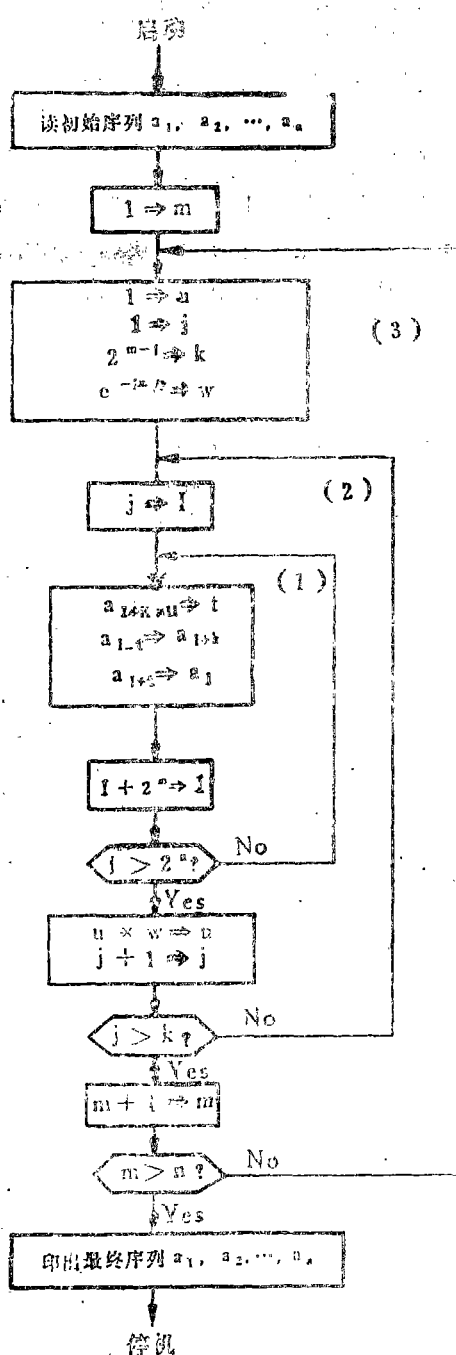


图4 雷达视频信号取样程序流程图

注解

取样地点由延时子程序中的延时时间决定。由A的给定值确定延时时间。

附录2 快速傅立叶变换(FFT)程序

图5 FFT的程序流程图
(注解见下页)

注 解

(1) N 为总样本数, I 为循环变量, 用 N 除每一项之后, 按二进制颠倒次序写出的序列。

(2) m —第 n 排蝶形线路。

(3) k —每排的“蝶形”的宽度。

(4) j —在第一排中重复进行

$$a_i \pm a_{i+k} \cdot W^j$$

(5) t 、 u 是工作单元。

(6) 环(1)是一排中从一块蝶形线路到另一块蝶形线路的计算。

(7) 环(2)是一排内, 一块蝶形线路中, 从一个元素到下一个元素的计算。

(8) 环(3)从一排到另一排的循环计算。

参 考 文 献

- [1] 马振骅等, 气象雷达回波信息原理, 74—75, 科学出版社, 1986.
- [2] Atlas, D., Advances in radar meteorology, advances in geophysics, 400—402, Academic Press, New York, 1964.

EXTRACTION OF THE DOPPLER VELOCITY SPECTRAL WIDTH FROM CONVENTIONAL INCOHERENT WEATHER ECHOES — AN ANALYSIS OF THE FLUCTUATING SPECTRUM OF ECHO INTENSITY

Yuan Ligong

Cao Yan

ABSTRACT

Usually, conventional incoherent weather radar is used to provide only the information on the position of a weather target and its radar reflectivity by detecting echo intensity. In this paper the fluctuating spectrum and its spectral width are estimated by fast Fourier transformation of the discrete sample of precipitation echoes at a specified position with a microcomputer(Apple II) connected with a home-made incoherent weather radar 713. Based on the relation between fluctuating spectrum and Doppler spectrum, calculation has been performed for the width and shape typical of the Doppler velocity spectrum, which are very useful in meteorology.