

## 中小尺度天气监测雷达数字系统

葛文忠<sup>\*</sup> 李嗣春<sup>\*\*</sup> 金鸿祥<sup>\*\*\*</sup>

(南京大学) (南京14研究所) (武汉中心气象台)

## 提 要

中小尺度天气监测的雷达数字系统,要考虑时空分辨率及其运转的可靠性。在WSR-81S上增加辅助处理和控制系统是雷达监测上的新构思。它的独特的硬件结构和软件功能保证了上述性能的实现。

通常数字天气雷达大多包含以下三个部分

- 1) 天线扫描控制器
- 2) 信号处理器
- 3) 产品归档和传输

在信号处理部分常采用距离-方位积分式的数据平滑装置。一般在1公里距离库内采样4次,方位 $1^\circ$ 范围内独立采样8或16次。从而达到目标强度在对数尺度上测量的标准差为1dB。但是(1)天线转速受独立样本退相关时间的限制,增加了体积扫描的时间和扫描-扫描的时间间隔。(2)方位范围内的采样和平均,降低了角分辨率,使造价昂贵的大天线起了小天线的作用。因此对于水平范围很小,只有几公里到10多公里,维持时间只有几十分钟的雷暴单体以及灾害性对流天气过程的监测和预警是不利的。为了改进常规数字天气雷达的性能,在设计数字处理系统时,必须兼顾到扫描的时间分辨率和角度分辨率。这一点已为国外数字天气雷达制造商所重视。例如美国EEC公司最新推出的WSR-81数字天气雷达<sup>[1]</sup>,在数字视频积分处理器的设计中,天线转速每分钟3转,方位积分 $0.25^\circ$ 和 $0.5^\circ$ 可选,距离分辨率1公里和2公里可选。它对于提高累积降雨量估测的精度,回波的自动识别和回波运动的线性外推等也是重要的。

## 一、天线控制器

天线控制器是数字天气雷达必需的一个组成部分。控制器的核心是一个单片机系统。其结构如图1。在系统的EPROM中存有8031的工作程序,它接受主机286或386的

\* 参加本工作的还有 程贻荣、庄荫模、张学儒、吴祖芸

\*\* 参加本工作的还有 吴培南、宋良成、陶波

\*\*\* 参加本工作的还有 陈忠勇

命令，按照资料采集的要求驱动天线。通过SDC(同步角度数字变换器)获取天线当前方位和俯仰的位置。按其和要求的目标位置之差，由D/A输出误差电压，经放大后驱动天线到达目标位置。在作数据采集时使天线作匀速运动。

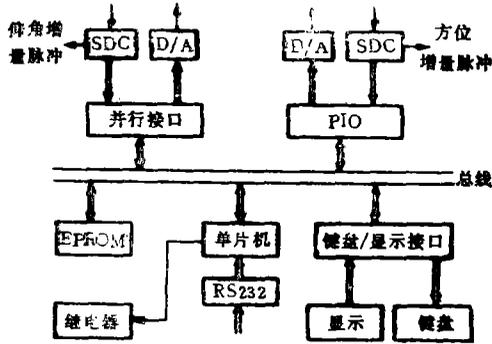


图1 天线控制处理器

用14位和12位二进制变换。

### 二、信号处理器

采用以距离积分方式的数据平滑装置。操作人员也可以根据自己的选择用软件进行方位平均，但是这以损失角分辨能力为代价的。

信号处理器的距离分辨率为0.5公里和1公里可选，一个径向方向有240个距离库。对回波视频信号进行量化的A/D变换器(模/数变换器)的分辨率为8位，转换速率为15MHz，采用通常的二进制输出。

为了增加距离平均的等效独立样本数，在0.5公里和1公里的距离库上采样16次，经A/D变换后的16个数字信息进行累加平均，然后通过DMA通道传输到计算机中进一步加工。图2为信号处理器框图。

数字信息的累加平均由累加器处理，其组成见数据通路框图3。加法器是一个12位的全加器，它的两个加数分别为本次采样的数据和该距离库中前面各次采样的和，前而

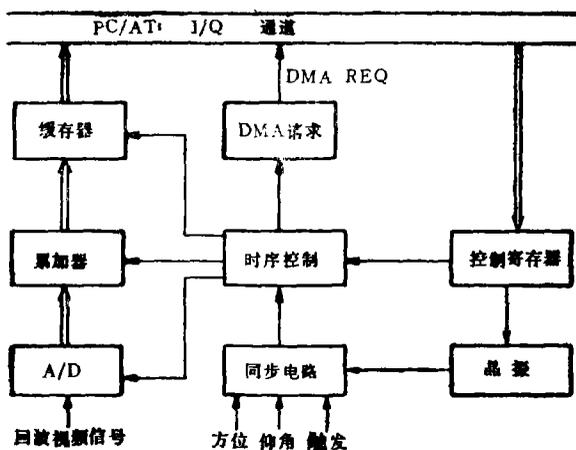


图2 信号处理器框图

为了提高资料的可靠性，减少由极坐标变换到直角坐标时的无数据点数。在作PPI扫描时，以0.352°的方位增量释放出1024个方位角增量脉冲。作RHI扫描时，仰角范围0~30°，以0.0879°的间隔释放出342个仰角增量脉冲。为了降低噪声的干扰，方位和仰角的SDC集成块分别采用14位和12位二进制变换。

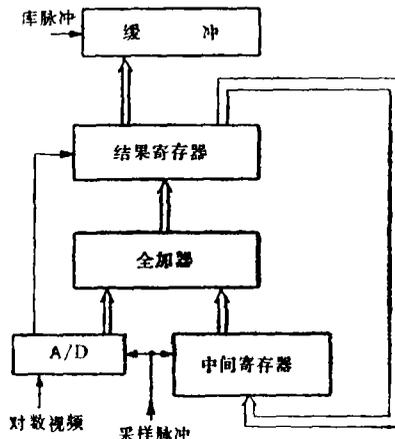


图3 数据通道框图

各次的和锁存在12位的中间寄存器中。每次采样时累加和也被锁存,当距离库内16次采样结束,累加和送结果寄存器,然后由库脉冲将平均值即累加结果的高8位存入缓存器。

控制寄存器的内容是可编程的,用以控制距离库的长度和径向方向上所取距离库的数目。在0.5公里距离库时,时序脉冲频率为15MHz,1公里距离库时为7.5MHz。这样最大距离误差为库长的2%。即分别为10米和20米。

径向方向上的距离库为240个,由计算器计数,每当一个径向采样结束,发出DMA请求,将缓存器的采样结果送入计算机。

同步电路的目的是保证天线转到预定位置后,当触发脉冲到来时就对信号进行采样。由于触发脉冲可能落后于方位(俯仰)增量脉冲 $\Delta t_1$ 时间,其引起最大方位误差为触发脉冲重复周期T和天线转速 $\omega$ 的乘积。对于713天气雷达 $T=5$ 毫秒,若 $\omega=360^\circ/12$ 秒,则最大可产生的方位误差为 $0.15^\circ$ 。由时序脉冲的同步时间为 $\Delta t_2$ ,它不会大于时序脉冲周期。它所引起的距离误差为库长的2%。

定时电路主要有两个分频器组成,一个1/3分频,形成采样脉冲。一个为1/50分频产生库脉冲。它们控制数据在数据通道中的传送。

数据的采集和处理是由一台DOS环境下工作的PC/AT或其兼容机进行的,也可以在386微机上进行。数据资料字长8位,可转贮于软盘,也可以通过数据压缩的形式传送到其他地方或用户单位。

### 三、精度和分辨率

距离平均的数学表示式为

$$\bar{X}_i^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N V_{i(g)}^{(j)} \quad (1)$$

$\bar{X}_i^{(j)}$  是第*i*个径向,第*j*个距离库的视频信号平均输出。

*N* 是距离库*j*中的离散样本数。

$V_{i(g)}^{(j)}$  是距离库*j*中的第*g*个视频样本。

对于对数接收机,*N*个离散的距离样本,样本之间的空间距离为 $\Delta r$ ,则可从附录给出的等式(1)计算出其相应的等效独立样本数 $N_i$ 。如713雷达,脉冲宽度 $\tau=2\mu\text{s}$ ,若 $N=16$ , $\Delta r=62.5$ 米,则可求得 $N_i \approx 6.58$ 。 $\tau=1\mu\text{s}$ , $N_i \approx 11$ 。

#### (1)距离平均极坐标资料精度

对于*k*个独立样本,对数尺度目标强度的概率分布的标准差<sup>[2]</sup>为

$$\sigma = \frac{5.57}{\sqrt{k}} \quad (2)$$

因此对于1公里距离库,采样16次, $k=6.58$ 。意味着在大多数情况下测量到的目标强度电平的标准差在2dB量级(脉冲宽度 $\tau=2\mu\text{s}$ )。表1例举 $N=16$ 时,不同脉冲宽度和

不同距离库长的情况下, 等效独立样本数和标准差 $\sigma$ 的分布。

从雷达最小可探测雨强到最高可发生的雨强之间的范围大约是1000倍, 相对于雷达反射率的范围为48dB。因此32个数字电平等级已满足常规天气雷达测雨精度的要求。例如WSR—81S数字雷达, 降雨强度的数字电平只分成7个等级。

表1  $N=16$ ,  $\tau=1, 2 \mu s$ ,  $k$ 和 $\sigma$ 随  
不同距离库长的分布

	$\tau=1\mu s$			$\tau=2\mu s$		
距离库长 (公里)	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
$k(=N_i)$	6.5	11	22	3.7	6.6	11
$\sigma$ (dB)	2.13	1.7	1.2	2.89	2.16	1.5

### (2) 距离平均直角坐标精度

从雷达视频信号量化到累加平均输出都是以极坐标形式表示的。但是在进一步处理以及以图象形式在监视器上显示时, 又是以直角坐标形式出现的。因此在坐标变换后, 直角坐标中每个网格的精度由于变换时产生的数据叠加或无数据而发生变化。如果直角坐标网格的分辨率相对的低( $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ ,  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ ), 那末在坐标的转换阶段将有广泛的极坐标数据相结合, 从而降低了回

波平滑时大量样本的要求。坐标变换时, 为了减少无数据的空洞数, 增强资料的真实性和精度。方位样本的间隔为 $0.352^\circ$ 即1024个方位采样。

因散射粒子间相对运动的变化, 在天气雷达波长范围内, 连续脉冲之间独立时间在1毫秒至100毫秒范围内变化。雷达波长 $\lambda=5.6 \text{ cm}$ , 粒子间相对平均径向运动速度 $V_r=2 \text{ m/s}$ , 脉冲间独立时间 $t \approx 10$ 毫秒。对于天线转速 $\omega=5$ 转/分, 间隔为 $0.352^\circ$ 的样本是独立的。

若在一个直角坐标网格内有 $n$ 个极坐标数据, 每个极坐标数据均具有相同的标准差 $\sigma$ , 并且相互独立, 那么这时 $n$ 个数据平均强度的标准差按(2)式可降低为

$$\sigma_a = \frac{5.57}{\sqrt{k}} / \sqrt{n} = \frac{5.57}{\sqrt{n \cdot k}} \quad (3)$$

对于雷达估测降雨, 常用 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 和 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 网格的分辨率, 且在以雷达站为中心的150km范围内, 则平均回波强度电平的标准差均小于1 dB<sup>[3]</sup>。满足水文应用的要求。

### (3) 时间和空间分辨率

基于这一系统在处理资料时的独立样本由距离积分的等效独立样本, 和坐标变换时方位独立样本的叠加所决定。因此天线的转速可高达5转/分, 体积扫描(20个仰角组成)的时间小于5分钟。而对于距离-方位式积分的系统, 因样本独立时间的需要, 天线的转速不能大于2转/分。体积扫描的时间超过10分钟, 就 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 每小时累积降雨量的计算, 10分钟的采样周期较之5分钟采样间隔, 其百分误差最大可增加15%, 随着采样间隔的增加误差将增长<sup>[3]</sup>。

距离积分式处理系统容有天线最大角分辨能力。对于距离-方位积分方式的处理系统, 方位平均的角宽度为 $1^\circ$ , 天线3dB的波束宽度为 $1.2^\circ$ (713天气雷达)。从而使天线的角分辨能力降低到 $2.2^\circ$ 。掩盖了小系统的存在。例如1989年7月14日一次暖式切变强对流天气过程。江苏扬州地区出现了龙卷, 在距离积分式系统的数字化图象上可以明显见

到钩状回波，从图上测量龙卷涡旋的直径(5公里CAPPI)约5公里，周围有强核。经用软件对方位 $1^\circ$ 范围内三个径向样本平均，钩状回波的特征已经消失，龙卷涡旋位置已不能辨认。

#### 四、辅机系统(WMSS)

由美国引进的WSR—81S数字天气雷达，作为一个较大型的数字化系统，其控制和处理具有灵活、快捷和容量大的优点。但是一旦出现故障时恢复的时间长，屏幕上的图资比较单一，系统的资源不能充分利用。为了不致重要的灾害性中小尺度天气系统漏测，保持资料的完整性，和扩展原系统的功能。设计了WMSS系统，它作为原系统的一个备份独立地进行工作，也可作为原系统的一个扩展与其协同工作。

辅机系统独立工作时，实际上是由它替换了原来的数据采集和处理部分，和雷达组成一个完整的系统进行工作。

辅机系统置于从属工作方式时，主系统对雷达天线进行控制，辅机系统的天线控制器根据已知的天线控制方式，监视天线的运动，适时地把天线转动的起始方位角数据送信号处理器锁存。由于起始方位角是任意的，因此必须录取和锁存，其录入接口框图如图4所示。当WMSS的天线控制器监测到天线扫描开始时，便产生一个“初始方位”信号，将当前天线方位角数字锁存。同时启动字节控制计数器，并依次将初始方位角的低8位，高4位和标识起始方位角的标志字经由选择器(多路)送入计算机。继“初始方位”之后，天线控制器释放方位角增量脉冲，通过同步和时序电路将量化后的视频信号经选择器送入计算机。完成PPI扫描。对于体积扫描，包含不同仰角的PPI，只是上述过程的重复。数据进入计算机之后，参照初始方位，图象产品将正确地显示回波位置，并将其标准化存到数据文件中去。

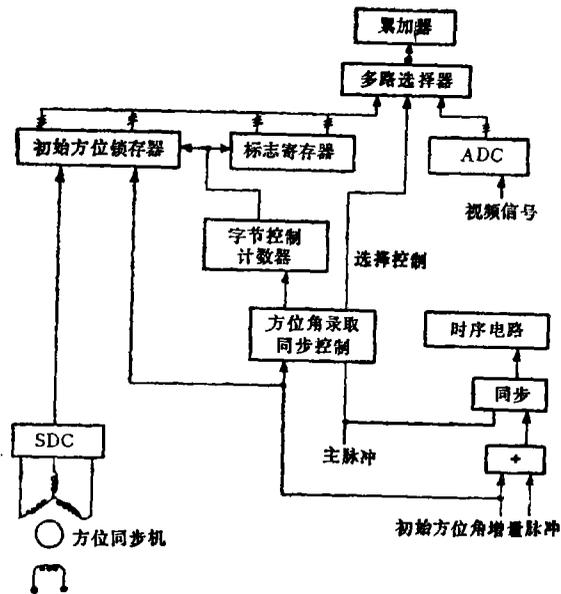


图4 辅机状态时数据录取接口框图

WMSS结构简单，可维护性强，有丰富的图象产品和多种应用软件的支持。

#### 五、数据采集和处理

数据采集是由程序控制的，主要有以下几种扫描方式

1. PPI; 2. ZPPI 有5个仰角组成; 3. RHI; 4. CAPPI; 5. 体积扫描。

数据处理大部分是准实时的，可以分为三个部分

- |   |   |
|---|---|
| <p>1. 预处理</p> <p>(1) 视频数字化</p> <p>(2) 平均</p> <p>(3) 距离订正</p> <p>(4) 雷达参数修正</p> <p>2. 自动后处理</p> <p>(1) 质量控制</p> <p>(2) 杂波文件生成</p> <p>(3) 坐标变换</p> <p>(4) CAPPI</p> <p>(5) ETPPI</p> <p>(6) dBZ—R(雨强)变换</p> <p>(7) 动画</p> <p>(8) 局部放大</p> <p>(9) column max</p> | <p>3. 特殊后处理</p> <p>(1) 多幅显示</p> <p>(2) 任意方向垂直剖面</p> <p>(3) 雨量计调整</p> <p>(4) 累积降雨量</p> <p>(5) 风暴总降雨量</p> <p>(6) VIL</p> <p>(7) 时空线性外推</p> <p>(8) 风暴内风场推演</p> |
|---|---|

## 六、结 论

天气雷达在监测中小尺度灾害性天气中的作用是十分明显的。它也是天气雷达的主要任务。因此作为近代雷达的一个组成部分的数字系统, 需要考虑数据采集的时间和空间分辨率。利用高速A/D变换器和集成度较高线路, 保证了距离库内16个样本的采集和精度, 加密径向方向的采样, 增强了坐标变换时的叠加效应从而增加了平均的独立样本数, 并满足水文上降雨估测和累积降雨量的精度要求。

为了保持WSR—81S运转的可靠性, 在雷达上增加WMSS系统是一个新的构想。它的潜力会在业务应用中得到证实, 是WSR—81S数字雷达功能的一种扩展。

附录:

对于对数接收机, 距离平均等效独立样本数 $N_i$ 的计算公式如下

$$N_i^{-1} = \begin{cases} \frac{1}{N} + \frac{12}{N^2 \pi^2} \sum_{k=1}^{K_u} \sum_{m=1}^{m-1} (N-K) m^{-2} \left(1 - \frac{KL_r}{h}\right)^{2m} & K_u \leq \frac{h}{L_r} \\ \frac{1}{N} & L_r > h \end{cases}$$

见: Walker, Gene B., P.S. Ray, D. Zrnic and R. Doviak, 1980: Time, angle and range averaging of radar echoes from distributed targets. J. Appl. Met., 19, P.315—323.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Enterprise Electronic Corp., New Generation meteorological radars.
- [ 2 ] Smith, P.L.Jr., 1964, Interpretation of the fluctuating echo from randomly distributed scatterers, Part 3, Sci. Rept. NW-39, Stormy Weather Group, McGill University, Montreal, p.70.
- [ 3 ] Peter R. Ahnert, Michael D. Hudlow, Edward R. Johnson, and Douglas R. Greene and Manuel P. Rosa Dias, Proposed "on-site" Precipitation processing system for Nexrad. 21st conference on radar meteorology 1983, p.378-385.
- [ 4 ] Ge Wenzhong, Zhuang Yinmo, Zhang Xueru, Cheng Zhenrong and G.L. Austin., A design of digital processing system by using microcomputer for meteorological radars in China. 24th conference on radar meteorology 1989, p.637-639.

## A DIGITIZED RADAR SYSTEM FOR MONITORING MESO- AND MICRO-SCALE WEATHER

Ge Wenzhong\*    Li Sichun\*\*    Jiu Hongxiang\*\*\*

### ABSTRACT

Good temporal and spacial resolutions and operational reliability should be taken into consideration in the digitized radar system for monitoring meso- and micro-scale weather. In this paper, a novel idea is suggested that a new auxiliary processing and controlling system should be added to the WSR-81S radar. Its unusual hardware structure and software function make the above properties possible.

- 
- \* Affiliated with Nanjing University. The co-workers: Cheng Zhenrong, Zhuang Yinmo, Zhang Xueru and Wu Zhuyun
  - \*\* Affiliated with The 14th Research Institute, Nanjing. The co-worker: Wu Peinan, Zhu Liangcheng and Tao Bo
  - \*\*\* Affiliated with the Wuhan Central Meteorological Observatory. The co-worker: Chen Zongyong