南京气象学院学报
一九八六年 第三期

天气雷达图像数字化传输系统

马舒庆　　蔡振新

（江苏气象局气象台）

提　要

天气雷达图像数字化传输系统对天气雷达回波信息进行数字化、视频积分、坐标转换等处理。采用普通音频电话线路作为传输信道。具有彩色显示、软盘记录、数字打印等功能。本文介绍了系统结构、原理和特点，并较详细地阐述了设计思想和处理方法。

天气雷达图像数字化传输系统（简称数传系统）对天气雷达对数视频信号进行数字化、积分、距离订正、坐标转换等处理，通过普通音频话路实现数字化图像远距离传输，彩色显示回波图像。本系统具有如下特点：1.采用软件完成方位积分。2.方位积分、距离订正、坐标转换、发送等处理一并由Z_{80}微处理机完成，使系统结构紧凑，性能价格比较高。3.采用普通音频线路传输信息。4.用户终端采用通用微型计算机。5.彩色显示回波图像，形象直观，强度层次分明。6.软盘记录器存贮文件资料，存取方便。

一、系统结构和原理

图1是数传系统结构框图。视频延时线积分器完成距离累加平均。6位高速A/D将模拟对数视频信号转换成数字信息，Z_{80}微处理机是雷达资料的处理中心，16K字节内存，时钟频率2兆赫，带有PIO、8位8通道低速A/D（转换时间为100微秒）口。输入Z_{80}的信号有来自高速A/D的经过延时线距离积分器处理的数字回波信息、200赫雷达主触发脉冲和来自雷达正、余弦电位器的角参数。Z_{80}微处理机将经过处理的数字化回波图通过电话线路向远程终端发送。

远程终端配备的是APPLE-Ⅱ，它带有5吋软盘驱动器和彩色显示器。可显示静止画面和不同时次组成的动画。

与Z_{80}微处理机相接的微型计算机负责记录、打印和显示，也可承担通讯任务。微

1984年10月8日收到，1985年11月25日收修改稿

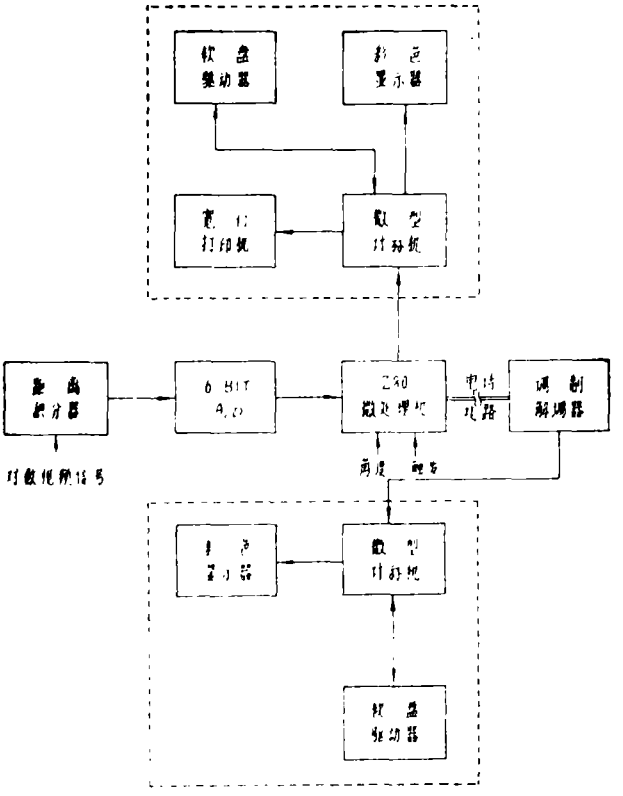

图 1　数传系统结构框图

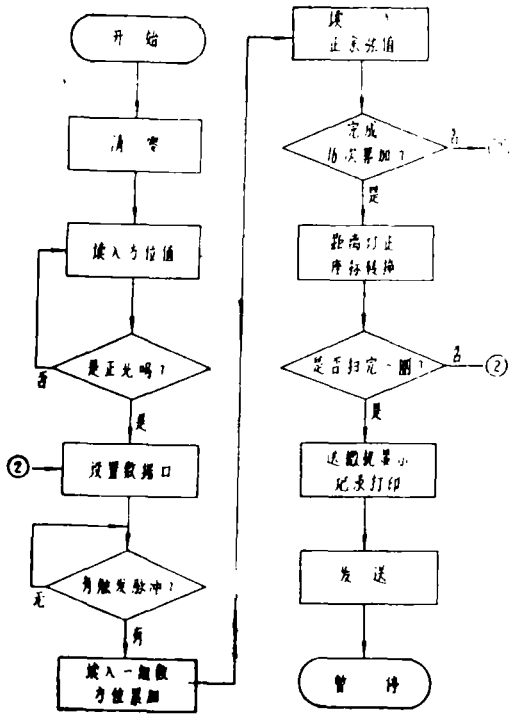

图 2　Z80微处理机的处理程序框图

型计算机与 Z_{80} 微处理机采用 IEE—488 标准方式接口。

图 2 是 Z_{80} 微处理机的处理程序框图。设置好天线仰角后，启动处理程序，将内存清零，不断读入方位值，检测天线是否扫到正北方向。当到达正北方向时，设置数据口，等待触发信号的到来，触发信号一到，就开始从高速 A/D 取数。取一组数(126个)后。进行方位累加，接着读入方位正、余弦角参数。完成十六次方位累加后，利用方位正、余弦值作坐标转换。天线扫完一圈后，Z_{80} 将图像资料交给微型计算机，由它执行显示、存盘和打印任务。Z_{80} 微处理机向远程终端发送。

图 3 是两次读数组之间的处理时间分布图。从读入数组到完成坐标转换需要的时间

$$T = 156\,200 + 3000 + 15\,000 = 174\,200\text{微秒}$$

T 包括十六次方位累加、距离订正、坐标转换的时间。

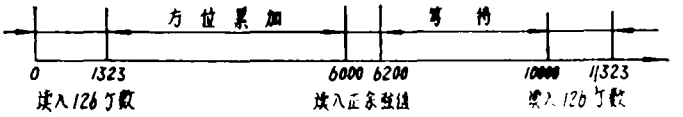

图 3　两读数组间的处理时间分布图

二、视频积分

雷达接收到的云、雨回波具有随机涨落特性，直接影响测量的正确性。为了消除或抑制这种随机涨落，必须作积分处理，即累加平均。本数传系统没有使用713雷达原配的模拟视频积分分层机，由 Z_{80} 微处理机和距离积分器作积分处理。从而避免了模拟积分分层机不稳定因素的影响。

1.距离积分器*

本数传系统采用一个独立的视频延时线距离积分器完成距离积分。它由22节视频延时线和5个累加器构成。设距离积分器输入为 $f(t)$，则任意时刻输出为 $V_{出}=\frac{1}{23}\sum_{n=0}^{22} f(t-n\Delta t)$，式中 Δt 是每节延时线的延迟时间，为0.3微秒。由该式可得到距离积分器在任意时刻的输出是23个时刻的平均值。由于距离积分器采用性能稳定的视频延时线，构成累加器的运算放大器又是工作在深度负反馈状态下，所以其稳定性和可靠性较高。与数字化距离积分器相比还具有取样多的特点(每公里取23个点)。

2.视频信号的数字化

信息数字化是由模数转换器(A/D)完成[1]。通常经A/D取入计算机一个数据的时间为 $T\geqslant T_1+T_2+T_3$，式中 T_1 为启动指令占有的时间，T_2 为A/D的转换时间，T_3 为读入数据指令占有的时间。而本系统中采用一种无需发出启动A/D转换指令，直接读入数据的处理方式。在连续取样时省去了 T_1 和 T_2，而取样时间由读入指令决定，即 $T=T_3$。这种方法可称为直接读入式。软件最简单，硬件也不复杂。

A/D是全并型，转换时间为75毫微秒的高速6比特模数转换器。当A/D的CP线变低时，A/D进行一次模数转换。Z_{80} CPU的RD与IORQ同时变低，CP线变低。图4是完成模数转换，CPU读入数据的时序图。给出了A/D转换与CPU输入周期的关系。t_1、t_2、t_w、t_3 均等于一个时钟周期[2]。从 t_1 到 t_3 是一个从I/O口输入周期，A/D转换是在 t_2 期间完成，只占用75毫微秒。CPU在 t_2 时钟周期内读入数据。读入数据指令为INIR，这是一条连续读入指令，占用21

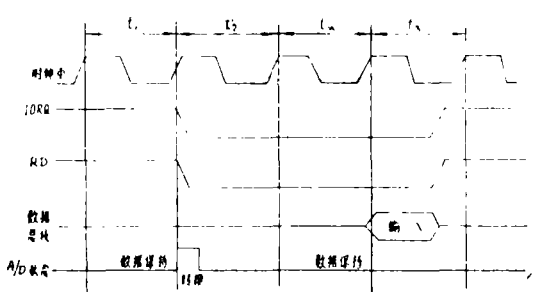

图 4　时序图

* 详细结构原理见中国科学院大气物理所，测雨雷达分层器说明书，油印本。

个时钟周期。在时钟频率为2兆时，$T=T_3=10.5$ 微秒。相当每1.57公里取一个数。如果采用时钟频率为6兆的Z_{80B} CPU，取样时间间隔为3.5微秒。对应的空间间隔为0.52公里。

3.方位积分

当雷达主触发脉冲产生时，Z_{80} 微处理机通过PIO向高速A/D取数，一连取126个数送入内存。读126个数共需 126×10.5 微秒。每个数代表1.57公里上的回波功率大小。接着Z_{80} 微处理机作方位累加处理，即将这次取的126个数与前几次取的几组数对应相加的和再对应相加。共作十六次方位累加，其结果可表示为

$$A_i=\sum_{n=0}^{15}V_i(t+2n\backslash T)\qquad i=0,1,2,\cdots125$$

ΔT 为雷达脉冲重复周期，$V_i(t)$ 是t时刻从A/D读入的数。

4.积分效果检验

通常用标准差来衡量积分处理的效果。处理后的标准差愈小，说明测值愈准确；处理前后的标准差之比愈大，说明独立取样次数愈多，积分效果愈好。为了检验本系统视频积分的效果，利用Z_{80} 微处理机分别对未经积分处理、经距离积分处理和经方位积分后的降水回波信号采样，然后根据

$$\overline{x}=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}x_n,\qquad \sigma^2=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}(x_n-\overline{x})^2$$

可求得标准差。1984年6月10日对层状云降水采样，样本数N都为64，计算得到未经积分处理、经距离积分处理和经方位积分(包括距离积分)后的降水回波分布标准差分别为4.51、2.5、0.66。积分前后标准差与积分独立取样数的关系为$\sigma_0=\frac{\sigma}{\sqrt{M}}$，M为积分独立取样次数，$\sigma_0$ 为积分后信号标准差，σ 为积分前标准差。根据此式可推出距离积分独立取样次数为3.24，方位积分独立取样次数为14.4。

三、距离订正

当雨滴充满雷达波束时，气象雷达方程可写成$\overline{P_r}=\frac{CZ}{r^2}$，$\overline{P_r}$是降水回波的平均功率，C是与雷达参数有关的常数，Z是降水的反射因子，r是降水离雷达的距离。当Z相同时，降水回波平均功率与距离平方成反比，这就是所谓距离效应。为了消除这种效应，本系统中设置了距离订正处理。距离订正采用相加方式，订正范围为10至200千米。以10千米为参考点，依照雷达方程算出各距离点上订正的分贝数，制成表存入Z_{80} 微处理机ROM中。订正值范围为0至26分贝。6比特高速A/D的模拟量输入范围为0至4.5伏，A/D的输出为64个等级，级间差对应的电压等于0.07伏。因此将对数视频信号调整在0.07伏/分贝*，这时高速A/D输入的二进制信息最低位代表1分贝。由于在十六次方位累加后，只除了8，所以待订正值的最低位代表0.5分贝。因此，26分贝的订正值要用0至52表示。从而保证实际订正值与理论订正值的偏差小于0.5分贝。只对大于噪声电平2分贝

* 详见南京气象学院大气探测教研组，天气雷达原理与应用，P552—564

的值才予以订正。

四、坐标转换

从雷达获得的回波信息的空间位置由方位和距离表示，即极坐标表示。所谓坐标转换就是将它们的位置表示由极坐标转换成直角坐标。

1.角度信息

通常用数字码盘提供角度信息[3]，精度很高。713雷达上有一对正弦、余弦电位器，它们为RHI显示提供正、余弦信号。由于PPI显示时，正、余弦电位器也随同天线一起旋转。所以可利用它们提供方位的正、余弦信号。在用它们提供方位参数时，切断原来加在正、余弦电位器上的锯齿波信号，而加上正5伏直流电压，正、余弦电位器活动臂分别接到Z_{80}微处理机的低速A/D的两个通道上。由Z_{80}微处理机根据程序控制读取正、余弦值。

设从正、余弦电位器读入的数分别为a和b，那么 $\sin\theta=\frac{a}{255}$，$\cos\theta=\frac{b}{255}$，若天线方位角为α，则$\alpha=\mathrm{arctg}\frac{a}{b}$ 它与天线实际的方位角的差就是角度误差。表1列出了实测得到的0—80度范围内角度误差情况。该误差可看成是正、余弦电位器制造工艺造成的固定误差和A/D取数误差的综合结果。本系统根据表1做一个订正表存入微处理机内ROM中，用软件予以订正，使误差降至0.5度以下。小伺服系统存在跟踪滞后误差，经测算，在天线每分钟两圈转速条件下为0.4度。本系统工作时天线转速为每分钟一圈，因此滞后误差还会小些。

表1

天线方位γ(度)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
误差α-γ(度)	41.	1.3	0.9	0.5	0.0	-0.1	-0.3	-0.3	0.0	-0.3	0.7	0.9	1.1	1.3	1.2	1.4	1.3

2.坐标转换

直角坐标与极坐标的关系是 $x=r\cos\theta$，$y=r\sin\theta$，r是经向距离，θ是方位角。坐标转换后某个信息在内存中的地址为 $A=B\pm Cy+n$，B、C是常数，分别为十六进制数32A3、44。正负号由所在象限确定，第一、二、三、四象限的正负号分别为＋、＋、－、－。

在同一个直角坐标网格中可能会有几个不同的回波强度，本系统采用取最大值方式，即用强度最大的值表示这个网格中的回波强度，这种取值方式可以满足实时显示的需要，适合对强烈天气警戒的要求。

3.直角坐标网格

经过积分处理的极坐标回波资料距离分辨力为1.57千米，方位分辨力为1.2度。

这种资料作坐标转换后的直角坐标网格取6.4×6.4千米、4.8×4.8千米、3.2×3.2千米、1.6×1.6千米，它们分别对应半径为200千米、150千米、100千米、50千米的画面。这种网格尺度与画面尺度的取法考虑了资料的切向和经向分辨力的对应性。

五、数字图像传输

图像传输实际上是微型计算机之间的远程数字通信。

1.电话线路用于传输人的话音，信道频带在300～3400赫之间。本系统使用的话路包括市内公用话路和长途话路。

在一定的带宽内，数字通信速率是有限制的。如果太高，就会信号混乱，无法译解。音频话路的最大传输速率可由香农定律给出。该定律指出，一个带宽为W赫的信道其最大传输量经证明为

$$Q=W\log_2(1+\frac{S}{N})$$

式中S是信号强度，N是热噪声强度。用音频话路的参数套进上式得最大理论值是每秒25 000至30 000位[4]。但实际上要达到每秒9600位也得付出艰苦的努力。错码率就是出错位数与传输的总位数之比，传输速率(指单位时间内传输的位数)愈高，错码率愈高。据国外统计资料[4]传输速率为9600位/秒时，错码率最大值为千分之一。根据国内现有线路的实际状况，为了保证错码率低，本系统用300位/秒的速率在市内电话和南昌至赣州(距离310千米)的长途电话线路上传输图像信息。错码率均低于10^{-5}。

2.发送

发送处理包括量化编码、删字符、调制三部分。处理均由Z_{80}微处理机承担。

若某点的回波强度值为I，将I与a_7、a_6、a_5…a_0($a_7>a_6>\cdots>a_0$)八个数进行比较。若$I>a_7$，回波定为7；当$a_i>I>a_{i-1}$，i=1、2、…7，则回波等级定为i-1。然后将等级值用ASCⅡ码表示。这就是量化编码。

为了缩短发送时间，发送前作删减处理。在每行数字最右的有回波点后面设置一个识别字符，发送时以这个字符作为一行的最后一个字符，省去一行最右一个有回波点以后的若干个“0”字符。为避免识别字符出错引起部分回波位置错动，远程终端接收软件给出了提示、检查、修改识别字符的机会。一旦识别字符出错，可进行修改或重新接收。根据概率统计方法计算，在错码率为10^{-5}时，大约传送100幅图可能错一个识别字符。实际试验结果约传送80幅就错一个识别字符。这对于用户来说是可以接受的。如果进一步删减字符，识别字符增多，出错的机会也相应增多，用户修改或重收的次数也将增多。为此，删减至此为止。

在音频话路上有两种数字通信方式。一种是不预先改变原来脉冲形状而直接进行传输，这叫基本频带通信。还有一种是调制解调通信。前者用于很短的信道，大部分信道采用后者，本系统采用的是后者。所谓调制就是将数据脉冲信号的频带移到电话线路的频带范围。解调就是将调制后的信号还原成数据脉冲信号。本系统没有采用专门的调制解调器进行调制，而是由Z_{80}微处理机完成，是一种软件调制。这种形式使系统性能价

格比有所提高，且灵活性较大，能方便地改变调制频率、传送速率、发送格式。传送一幅图的时间在20～120秒之间。

3.接收

远程终端采用通用微型计算机。经解调后的数字脉冲信息经过RS—232标准通信卡送入微型计算机。图5是接收处理流程图。接收的信息存入内存。收完一幅图后，如果识别字符未出错，就自动将接收的信息存入软盘。一旦识别字符出错，微机显示问号，要求人工干涉、修改或重收。作图以后是图像存盘，以便制作多时次动画。终端采用APPLE-Ⅱ微型计算机时，可用四种颜色显示强、中、弱、无回波四个层次，层间间隔可根据收到的八层数字资料任意选择。当网格点取6.4×6.4千米时，画面半径为200千米。

六、功能开发

与Z_{80}微处理机接口的是通用微型计算机。在本数传系统中完成显示、记录、打印等任务。在进行功能开发时，通用微型计算机承担进一步的数值化处理。从而与Z_{80}微处理机形成流水作业，处理速度大大加快。进一步数值化处理包括以下几方面：

1.利用合适的Z—I关系和雨量计订正，计算降水强度、降水量，给出降水量分布图。

2.三维扫描后，计算各高度特定强度的面积、体积，以及回波平均高度、最高顶高。给出等高度回波图。

3.计算回波强度变化、移向、移速。

4.结合天气资料、卫星云图，采用人机对话形式作降水和强对流天气的短时、临近预报。

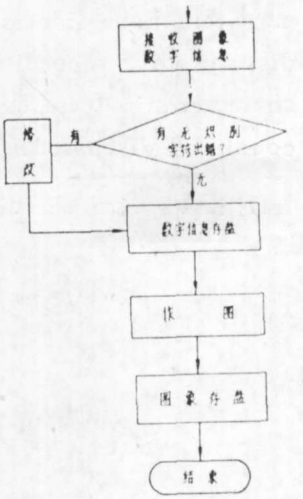

图5 接收程序框图

本文蒙袁立功、葛润生两位老师审阅、修改，在此表示感谢。

参考文献

〔1〕 朱绍庐主编，微型计算机，353—356，人民交通出版社，1983。

〔2〕 中国科学技术情报研究所重庆分所，微型计算机Z80，20—21，科学技术文献出版社重庆分社，1983。

〔3〕 戴树荪著，数字技术在雷达中的应用，13—19，国防出版社，1981。

〔4〕 丁.马丁著，霍欣廉译，远程信息处理导论，30—31，102—103，科学出版社，1983。

DIGITAL TRANSMISSION SYSTEM FOR WEATHER RADAR IMAGES

Ma Shuqing* Cai Zhenxin*

ABSTRACT

A digital transmission system of weather radar images is developed for signal digitization, video integration and coordinates transformation. Ordinary telephone line is used for transmission. The output consists of color display, disc recording and digital printout. Its construction, principle and characteristic features are discribed and the design idea and problems encountered discussed.

Affiliated with the Jiangxi Provincial Meteorological Center