

微型计算机在测速雷达中的应用

皇甫堪 洪喜明 李素芝

摘要 利用测速雷达对各类弹头产生的信号进行处理以达到精确快速地测速之目的,这是目前世界上各靶场的基本测速手段。当前我国的测速雷达在信号处理方面突出问题是功能不全、可靠性差、实时性差和没有把计算机应用到测速雷达之中。针对这些问题,我们对我国靶场的部分测速雷达利用现成的微机进行了更新改装。本文就是反映如何利用微机把雷达信号进行数据处理达到高速和精确测速的目的。

一、基本工作原理

设测速雷达发射机发射频率为 f_0 ,则接收机所接收到的回波信号频率为 $f_0 + f_d$,其中 f_d 为飞行弹头的多卜勒频率。发射弹头时产生的火光作用于红外启动器,从而产生一个启动脉冲(当然也有其它多种方法在弹头发射的瞬间产生启动脉冲)。此启动脉冲使计算机硬件接口电路开始工作。

接收机输出的频率为 f_d 的连续多卜勒正弦波经跟踪、倍频、峰化和整形电路而形成一串频率为 Nf_d 与TTL电路相匹配的矩形脉冲,其中 N 为倍频次数。在弹头飞行弹道的一些需要点上,由计算机接口电路产生的一系列波门脉冲控制对频率为 Nf_d 的脉冲计数。显然在一个波门内所计的脉冲个数 M 为

$$M = \tau \cdot N f_d$$

其中 τ 为波门宽度。飞行弹头相对于雷达的径向速度 V_R 与多卜勒频率 f_d 之间有如下关系:

$$f_d = \frac{2f_0 V_R}{C}$$

其中 C 为光速,因此得

$$V_R = \frac{CM}{2Nf_0\tau} \quad (1)$$

因此,在发射频率 f_0 和波门宽度 τ 固定的情况下,根据波门内所计得的脉冲个数 M ,就可确定飞行弹头的径向速度 V_R 。

基本原理的方框图和波形如图1和图2所示。

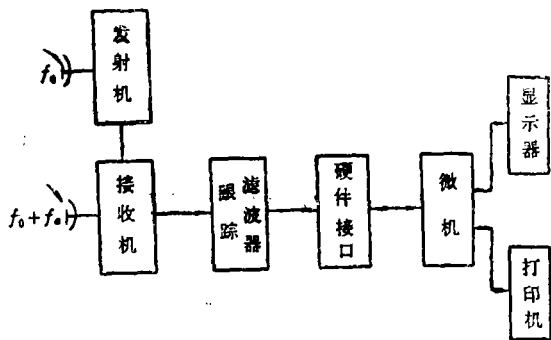


图 1 基本工作原理方框图

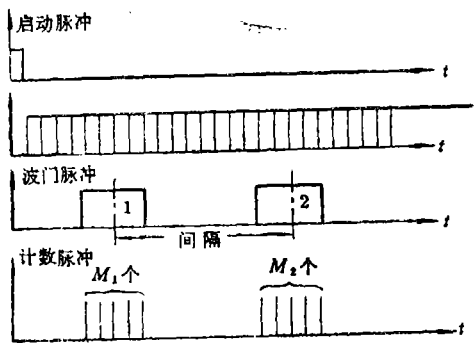


图 2 基本工作原理波形图

当每一个波门脉冲结束时，都将硬件接口中计数器所计的数 M 送入计算机内存中存贮起来。一发弹打完后，这些数据并立即存入磁盘，以便存档和必要时做事后处理用。

数据处理是通过计算机软件实现的。根据雷达相对于火炮的位置计算出弹头相对于炮口的径向速度 V_P ，火炮和雷达位置如图 3 所示。

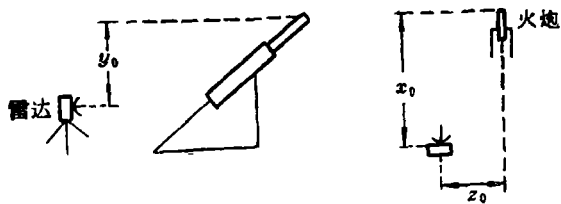


图 3 火炮和雷达的相对位置

将其投影到火炮方向和天线所组成的平面上，其投影图如图 4 所示。

$$A_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - (y_0 \cos \alpha - x_0 \sin \alpha)^2}$$

$$B_0 = \sqrt{z_0^2 + (y_0 \cos \alpha - x_0 \sin \alpha)^2}$$

其中 α 为火炮的仰角，则各点速度折算公式为

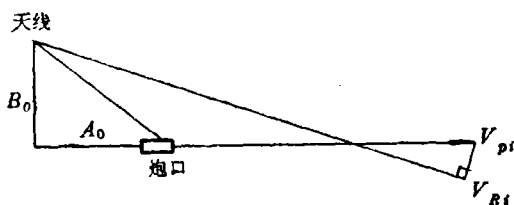


图 4 火炮和雷达投影图

$$V_{Pi} = V_{Ri} \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left[\frac{2B_0}{V_{Ri} \cdot (t_i + A_0/V_{Pi})} \right]^2} + 1 \right\}} \quad (2)$$

将公式(2)迭代一定次数（一般不超过 3 次）后，得到 V_{Pi} 。

通常情况下，在发射弹头时，发射器或炮口的强大发光、发热使其周围空气产生电离层，它往往对雷达电磁波起屏蔽作用，也产生较强的噪声，所以弹头刚脱离发射器或炮口时的初速是测不出或测不准的。它需要由平滑、外推来得到，我们采用最小二乘拟合理原理进行外推的。

实践证明，实际火炮炮弹径向速度的运动 $V(t)$ 可以假设为二次曲线，

$$V(t) = V_0 + at + \beta t^2 \quad t \geq 0$$

在 $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$ 时刻，得到的速度测量值为 $V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n$ ，则

$$V_i = V_0 + at_i + \beta t_i^2 + e_i, \quad 1 \leq i \leq n \quad (3)$$

其中 e_i 为测量误差，它是一个随机变量，假定 e_i 服从零均值、相互独立、方差为 σ_e^2 的高

斯分布，则概率密度函数

$$P(e_1, e_2, \dots, e_n) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_e} e^{-\frac{e_i^2}{2\sigma_e^2}}$$

因为 e_i 为随机量，则 V_i 也是随机量，由(3)式可知，在给定 V_0, α, β, t_i 的条件下， V_i 服从均值为 $V_0 + \alpha t_i + \beta t_i^2$ ，相互独立，方差为 σ_e^2 的高斯分布，

$$\begin{aligned} p(V_1, V_2, \dots, V_n | V_0, \alpha, \beta) &= \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_e} e^{-\frac{1}{2\sigma_e^2} [V_i - (V_0 + \alpha t_i + \beta t_i^2)]^2} \\ &= \left(\frac{1}{2\pi\sigma_e^2} \right)^{\frac{n}{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma_e^2} \sum_{i=1}^n [V_i - (V_0 + \alpha t_i + \beta t_i^2)]^2} \end{aligned} \quad (4)$$

在测得 V_1, V_2, \dots, V_n 后，可做出对 V_0, α, β 的估计。若其估计值为 $\hat{V}_0(V_1, V_2, \dots, V_n)$ ， $\hat{\alpha}(V_1, V_2, \dots, V_n)$ ， $\hat{\beta}(V_1, V_2, \dots, V_n)$ ，为求最大似然估计，取 $\hat{V}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta}$ 使概率密度函数 $p(V_1, V_2, \dots, V_n | \hat{V}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 得到最大值。若把(4)式的指数项记作 $F(V_0, \alpha, \beta)$ ，即

$$F(V_0, \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n [V_i - (V_0 + \alpha t_i + \beta t_i^2)]^2$$

则最大似然估计取 $\hat{V}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta}$ ，使 $F(\hat{V}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 得到最小值。这正是最小二乘估计。分别令

$$\frac{\partial F(\hat{V}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta})}{\partial V_0} = 0$$

$$\frac{\partial F(\hat{V}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta})}{\partial \alpha} = 0$$

$$\frac{\partial F(\hat{V}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta})}{\partial \beta} = 0$$

则分别得到：

$$\begin{cases} n\hat{V}_0 + \hat{\alpha} \sum_{i=1}^n t_i + \hat{\beta} \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n V_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \hat{V}_0 \sum_{i=1}^n t_i + \hat{\alpha} \sum_{i=1}^n t_i^2 + \hat{\beta} \sum_{i=1}^n t_i^3 = \sum_{i=1}^n V_i t_i \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \hat{V}_0 \sum_{i=1}^n t_i^2 + \hat{\alpha} \sum_{i=1}^n t_i^3 + \hat{\beta} \sum_{i=1}^n t_i^4 = \sum_{i=1}^n V_i t_i^2 \end{cases} \quad (7)$$

再分别令 $t_{a1} = \sum_{i=1}^n t_i, t_{a2} = \sum_{i=1}^n t_i^2, t_{a3} = \sum_{i=1}^n t_i^3, t_{a4} = \sum_{i=1}^n t_i^4$

$$V_a = \sum_{i=1}^n V_i, V_{ta} = \sum_{i=1}^n V_i t_i, V_{ta2} = \sum_{i=1}^n V_i t_i^2$$

这样，方程组(5)、(6)、(7)变为

$$\begin{cases} n\hat{V}_0 + t_{a1}\hat{\alpha} + t_{a2}\hat{\beta} = V_a \\ t_{a1}\hat{V}_0 + t_{a2}\hat{\alpha} + t_{a3}\hat{\beta} = V_{t_a} \\ t_{a2}\hat{V}_0 + t_{a3}\hat{\alpha} + t_{a4}\hat{\beta} = V_{t_{a2}} \end{cases}$$

这是一个三元一次线性方程组。可见，根据测得的 V_1, V_2, \dots, V_n 和 t_1, t_2, \dots, t_n 的值，求出方程组的各个系数和系数矩阵，然后通过解三元一次方程组就可以计算出估计值 $\hat{V}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta}$ ，其中 \hat{V}_0 就是平滑外推得到的炮口初速值。

方程的系数矩阵是

$$A \triangleq \begin{pmatrix} n & t_{a1} & t_{a2} & V_a \\ t_{a1} & t_{a2} & t_{a3} & V_{t_a} \\ t_{a2} & t_{a3} & t_{a4} & V_{t_{a2}} \end{pmatrix}$$

如果测试中发现有异常点要剔除，例如第 m 点， $1 \leq m \leq n$ ，只要将原来的 $m+1$ 至 n 这些点变成新的 m 至 $n-1$ 点，构成新的系数矩阵，再调用三元一次线性方程组的子程序，就可完成新的拟合运算。新的系数矩阵可以由原系数矩阵算得，

$$A_{new} = \begin{pmatrix} n-1 & t_{a1}-t_m & t_{a2}-t_m^2 & V_a-V_m \\ t_{a1}-t_m & t_{a2}-t_m^2 & t_{a3}-t_m^3 & V_{t_a}-V_m t_m \\ t_{a2}-t_m^2 & t_{a3}-t_m^3 & t_{a4}-t_m^4 & V_{t_{a2}}-V_m t_m^2 \end{pmatrix}$$

测试时，通常发射一组弹，求其组平均炮口初速

$$V_{cp} = \frac{1}{F_A} \sum_{K=1}^{F_A} \hat{V}_{oK}$$

其中 F_A 为一组弹发数， \hat{V}_{oK} 为第 K 发炮口初速。

进行各种必要的修正，得到当日标准状态的初速 V_{ocpo} 。

$$V_{ocpo} = V_{cp} + \Delta V_t + \Delta V_{wo} + \Delta V_q + \Delta V_k$$

其中 ΔV_k 为当日修正量， ΔV_t 为药温修正量， ΔV_{wo} 为药室容积修正量， ΔV_q 为弹重修正量，则或然误差为

$$R_{V_o} = 0.6745 \cdot \sqrt{\frac{F_A}{\sum_{K=1}^{F_A} (V_{cp} - \hat{V}_{oK})^2} (F_A - 1)}$$

二、更新后测速雷达终端的硬件电路

硬件接口的原理框图如图5所示。

译码器共采用了三级译码形式，经IBM微机手册中查到未使用尚保留的地址 $3A0 \sim 3AF$ 共16个地址作为硬件接口的地址。

100kc信号产生器是对计算机系统时钟分频后得到的。利用100kc信号当作 Nfa 给多路计数器并送计算机。如果都工作正常的话，计算机显示器上将给出对应的“自检”时的速度输出。这样以达到检查硬件接口、计算机和跟踪滤波器各部分工作是否正常的目的。

跟踪延迟信号产生器是针对打脱壳弹的情况而设置。对于打脱壳弹来讲，弹壳要在

距炮口一定距离后才脱离弹头，且弹壳较弹头的有效反射面积要大得多。为了避免跟踪上弹壳而丢掉弹头，需要产生一个跟踪延迟信号给跟踪滤波器，使其在一个可以控制的延迟时间之后再行跟踪，在这个延迟时间之内足以保证弹壳脱离雷达波束。

波门产生器用于产生一串数目可以控制的方波波门脉冲。当然，测速可以是对单发弹也可以是对连发弹。对于单发弹而言，波门脉冲波形如图 6。起始延迟时间、间隔时间、波门宽度和波门脉冲数目皆可由人一机对话形式装定输入给计算机。

多路计数器用于对多卜勒信号计数。它分别对来自多路跟踪滤波器的多卜勒信号的 N 次倍频 Nf_{d1} 、 Nf_{d2} 、... 在波门作用期间进行计数，并把计数结果送给计算机指定内存单元存贮。设多路计数器计得

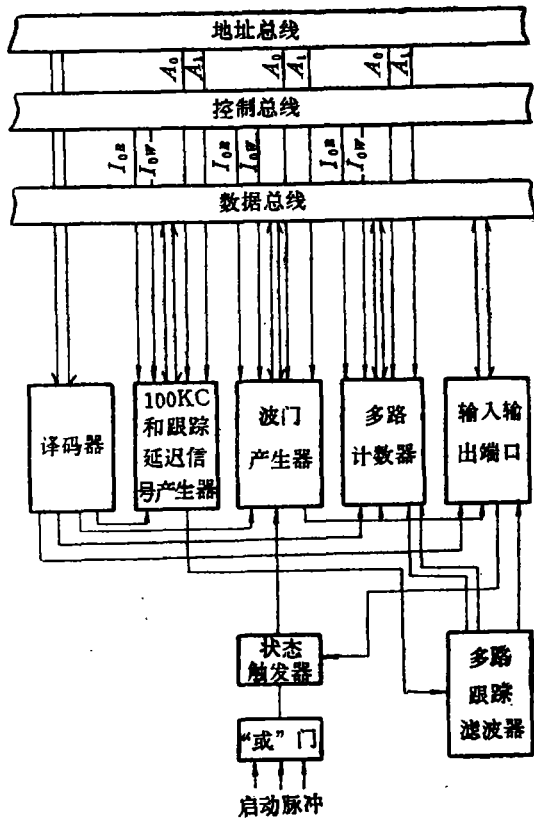


图 5 硬件接口原理框图

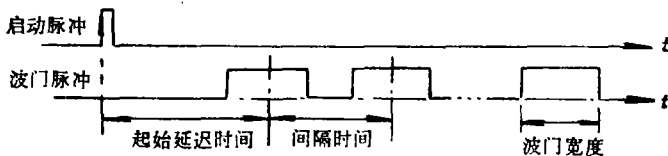


图 6 波门脉冲

的结果值分别为 M_{1i} 、 M_{2i} 、...、 $i=1, 2, \dots, n$ ，其中 n 为波门脉冲个数、并设波门脉冲宽度用 τ 表示，光速用 C 表示，多部雷达的发射频率分别用 f_{01} 、 f_{02} 、... 表示，根据公式(1)得

$$V_{1Ri} = \frac{C \cdot M_{1i}}{2Nf_{01}\tau}, \quad V_{2Ri} = \frac{C \cdot M_{2i}}{2Nf_{02}\tau}, \quad \dots$$

这样，计算机依靠来自多路计数器计数结果值 M_{1i} 、 M_{2i} 、... 就可计算出炮弹弹道上指定若干点弹头相对于雷达的径向速度值。

输出端口的主要用途是计算机通过数据总线经过该口输出给状态触发器的异步置零端，使其为复位状态，即其输出为零(低电平)，以及在当要求产生的波门脉冲结束之后，触发器也为复位状态。

输入端口的主要用途是将波门产生器所产生的波门脉冲状态经过该口输入给计算机数据总线 D_0 ，以便计算机查询时用。还分别将来自跟踪滤波器的两路判别信号经过该口输入给计算机数据总线，以便计算机作出是否跟踪得上的处理。

状态触发器的状态标志着是否弹头已经发射。在未发射前其状态为零；当发射瞬间，其状态即刻变为1，直至录取数据完毕后，其状态被计算机又置零，等待下发弹的发射。

雷达终端的启动方式根据需要有三种；第一为人工启动，用于未发射弹头前的终端机器“自检”时用；第二红外信号启动，来自雷达头部的红外信号经过硬件接口变换为适合TTL电平要求的正脉冲，作为标志发射弹头的启动信号；第三炮口线启动，发射弹头时，弹头将炮口线击断后，通过硬件接口电路产生一个正脉冲作为启动信号，它类似于发射弹头时来的红外启动信号。还可以有其它多种启动方式。这些启动方式是“或”的关系，通过“或门”实现。

测速精度是以硬件电路为基础，以软件程序中采用先进的算法为保证的。我们这里是采用固定波门宽度 τ ，在 τ 时间内对频率为 Nf_d 的脉冲计数，设计数数目为 M ，然后计算在波门宽度 τ 期间的平均径向速度 V_R 。若产生的波门宽度 τ 的误差为 $\Delta\tau$ ，那么引起的计数误差 $\Delta M = \Delta\tau \cdot Nf_d$ ，则导致径向速度的误差 $\Delta V_R = (\Delta\tau/\tau) \cdot V_R$ 在 $(\Delta\tau/\tau) < 10^{-4}$ 和 $V_R = 2000$ 米/秒时， $\Delta V_R < 0.2$ 米/秒。在软件的编程中也严格注意了如何减小误差的措施。

经过更新后的测速雷达终端不但测速精度高（根据需要精度可以作得更高）而且可以快速测速，既能够实时处理数据，打印出需要的汉字报表，又能够保留存档，任何时候都可以作事后处理。

测速雷达终端所用的计算机是通用IBM—XT微机，它为测速雷达将需要的其它功能的进一步开发创造了前提。平时该计算机也可以独立地作为一台计算机使用。

三、结束语

1985年我国已经进口了国际靶场正在使用的 $\times \times \times$ 测速雷达，与我们更新后的测速雷达相比较测弹头初速的结果非常靠近。

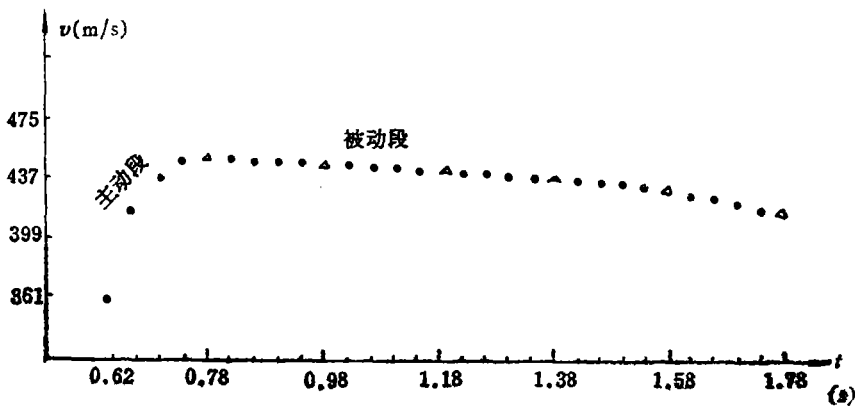
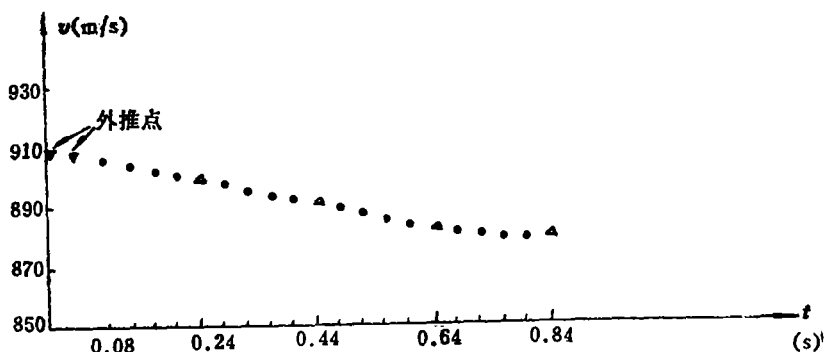


图7 $\times \times \times$ 火箭弹道实测速度曲线

图 8 $\times\times\times$ 大口径火炮实测速度曲线

下面给出两组实测数据的事后处理的速度曲线。图 7 为 $\times\times\times$ 火箭弹的实测速度曲线；图 8 为 $\times\times\times$ 大口径火炮的实测和外推速度曲线。

对于火箭弹来讲，如果主动段与被动段的分界点即最大速度值不在时间的离散点上，计算机能够计算出最大的速度值和对应的时间。

对于其它大口径火炮的炮口初速可以由外推给出。

The Utilization of Microcomputer in Measuring Speed Radars

Huang Fukan Hong Ximing Li suzi

Abstract

In order to measure the speed of a projectile accurately and rapidly, a measuring speed radar is often used to process the signals produced by the projectile nose. It is a main method for measuring speed widely used in the world. In the aspect of signal data processing, the domestic measuring speed radar lacks some functions and has poor reliability and low speed. So we have developed some measuring speed radars in our shooting range with microcomputer.

This paper illustrates how the microcomputer is used to process the radar signals so as to measure the speed of a flying projectile rapidly and accurately.