

用Z80单板机实现雷达观测数据 的卡尔曼滤波及数字式显示

季 良 招

摘 要 本文解决了用一个8位的单板机实现卡尔曼滤波所遇到的主要问题。同时,单板机本身也因具有进行高精度浮点算术运算的能力而得到了新的开发应用。本文主要包括两方面的内容:(1)在微型计算机上的模拟实验;(2)编制汇编语言程序并在单板机上实现卡尔曼滤波。

一、引 言

雷达的观测信号是混杂有噪声的随机信号,利用 Kalman 滤波对其进行处理是十分有效的。为了实现 Kalman 滤波,必须进行计算量很大的递推运算。因此,国内外已普遍使用计算机。但是,在一个只有8位字长的单板机上实现如此繁复的递推运算,目前还很少见。使用单板机的好处是显而易见的。例如,(1)单板机体积小、灵活性大、功耗低(Z80的功耗 $\leq 5W$)、可靠性高(平均无故障时间比一般计算机长)、对环境(温度、湿度)要求不高等;(2)价廉:即使是价格较便宜的微型计算机,至少也是单板机价格的若干倍;(3)为单板机编制的汇编语言程序一旦用在配有同类型汇编语言的一般计算机上,将比使用任何高级语言更加高速有效,因为它不需要任何的编译过程。可见,在单板机上如能实现Kalman滤波,这对普及和推广Kalman滤波技术,加速我军雷达、通信装备的现代化,必将起到极积的推动作用。另一方面,也将为单板机用于进行高精度的复杂运算,开辟广阔的前景。现在的问题是存在着若干困难。首先,在Kalman滤波的递推运算中,将碰到大小差异悬殊的各数据。例如,雷达的作用距离可在100KM以上,而均方误差的数据可出现 10^{-9} 的数量级。在一般计算机中,由于字长比较长,且使用浮点运算,问题并不难解决;而在单板机上要实现多字节的浮点算术运算,就需要编制一套加、减、乘、除浮点算法的汇编语言程序,这本身就是一件相当繁复的工作。此外,对机器的容量(递推运算的运算量是很大的)以及数据输入时对接口的要求,都有许多问题需要解决。(例如,Z80单板机的并行接口Z80PIO也只有8位,因此也要考虑如何保证输入数据精度的问题。)本文即是提供一种解决上述困难的方案,它不仅在Z80单板机上实现了高精度浮点运算,从而实现了Kalman滤波;而且实现了雷达输出数据的数字化显示。其递推运算的精度可与16位微型机(意大利的M20,CPU是

Z8000)相当, 数字式显示的精度可达小数点后第四位数字。

二、卡尔曼滤波

我们假定雷达已从噪声干扰和杂波中检测出有用的回波信号, 因此, 目标的状态便蕴含在它的回波信号之中。同时, 在雷达的观测数据中, 也不可避免地要混入各种噪声, 例如, 接收机的测量噪声, 它们通常都是加性噪声, 故雷达的观测数据可写为

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中 $s(t)$ 为目标的回波信号。由于目标状态的变化 (由目标本身的运动以及外界原因所引起), 这些状态数据是具有某一平均值的随时间变化的随机变量, 即随机过程。因此, 只能按一定准则对 $s(t)$ 作出“最佳”的估计, 记为 $\hat{s}(t)$ (如图 1)。通常用的多是最小均方误差准则, 即

$$E[\epsilon^2] = E\{[s(t) - \hat{s}(t)]^2\} = \min$$

$$x(t) = s(t) + n(t) \longrightarrow \boxed{\text{估计器}} \longrightarrow \hat{s}(t)$$

图 1 最佳估计器

这种估计器通常有滤波、外推 (预测) 和內插 (平滑) 三种工作方式。

作为估计用的滤波器, 可以是线性的或非线性的。目前更普遍使用的仍是线性估计, 如: 维纳 (Winer) 滤波、 $\alpha-\beta$ 滤波和卡尔曼 (Kalman) 滤波。特别是 Kalman 滤波, 它自 1960 年由 Kalman 提出后, 已得到广泛应用。这是因为它是波形的最佳线性估计器。不仅适用于平稳的随机过程, 而且也适用于非平稳的情形; 更重要的是, Kalman 滤波是采用递推的方法, 故特别适于使用计算机。此外, 它可以同时对各状态参量 (距离、方位角、高度角) 进行处理, 不仅可给出其估计值, 而且给出其一阶导数的估计值以及这些估计的均方误差, 必要时还可给出它们的一步预测值及其预测均方误差。

我们就船上雷达 (二维) 进行了计算机模拟 (具体参数取自某快艇雷达的数据)。故以下只讨论二维的情形。

1. 目标状态的模型:

对船上雷达, 可采用极坐标 (方位角—斜距)。由于方位扫描的速度很低 (某快艇雷达是 10 转/分, 即每 6 秒钟采一个样。) 所以两次取得回波脉冲串所隔时间间隔 T 较长, 故我们可以近似地把各次取样时刻的加速度看成是统计无关的, 即认为它们纯粹是一种零均值的加性白噪声, 我们可将目标的状态模型设定为

$$\begin{cases} R(k) = R(k-1) + T \cdot \dot{R}(k-1) \\ \dot{R}(k) = \dot{R}(k-1) + u_R(k-1) \\ \theta(k) = \theta(k-1) + T \cdot \dot{\theta}(k-1) \\ \dot{\theta}(k) = \dot{\theta}(k-1) + u_\theta(k-1) \end{cases} \quad (2)$$

也可写成矩阵形式, 为

$$S(k) = \Phi S(k-1) + W(k-1) \quad (3)$$

式中 $S(k) = [R(k) \dot{R}(k) \theta(k) \dot{\theta}(k)]^T$ 是 kT 时刻的目标状态矢量;

$$W(k-1) = [0 \ u_R(k-1) \ 0 \ u_\theta(k-1)]^T$$

是 $(k-1)T$ 至 kT 时间内的扰动噪声阵;

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

是目标的状态转移矩阵。

如上所述, $u_R(k)$, $u_\theta(k)$ 是零均值的可加性白噪声, 且 $u_R(k)$ 与 $u_\theta(k)$ 也彼此不相关。故

$$\begin{cases} E[u_R(k) \cdot u_R(l)] = \sigma_{u_R}^2 \cdot \delta_{k,l} \\ E[u_\theta(k) \cdot u_\theta(l)] = \sigma_{u_\theta}^2 \cdot \delta_{k,l} \\ E[u_R(k) \cdot u_\theta(k)] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

设定目标的线性加速度 a 是在 $(-A, A)$ 间满足均匀分布 (如图 2), 则 a 的方差为:

$$\sigma_a^2 = 2A^2 P_1 + \int_{-A}^A a^2 \alpha da$$

式中:

$$\alpha = \frac{1 - 2P_1 - P_0}{2A}$$

设 $a = -A, A, 0$ 时出现的概率 P_1, P_0 均为零,

$$\therefore \sigma_a^2 = \frac{A^2}{3}$$

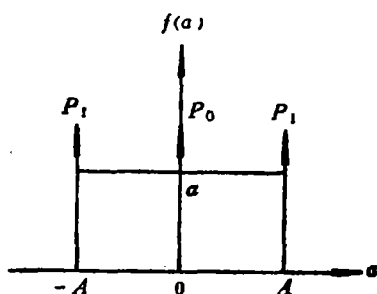


图 2 线性加速度的分布

故有

$$\begin{cases} \sigma_{u_R}^2 = T^2 \cdot \sigma_a^2 = \frac{A^2 T^2}{3} \\ \sigma_{u_\theta}^2 = \frac{\sigma_{u_R}^2}{R_{av}^2} = \frac{A^2 T^2}{3R_{av}^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $R_{av} = \frac{1}{2}[R(k) + R(k-1)]$ 是目标前后两次取样的平均值。由此即得动态噪声协方差矩阵为:

$$U_k = E[W(k) \cdot W(k)^T] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{u_R}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{u_\theta}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2. 雷达的观测方程和观测噪声协方差矩阵

观测方程

$$\begin{cases} x_R(k) = R(k) + n_R(k) \\ x_\theta(k) = \theta(k) + n_\theta(k) \end{cases} \quad (7)$$

写成矩阵形式

$$x(k) = HS(k) + n(k) \quad (8)$$

式中

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

是观测矩阵, 而观测噪声协方差矩阵为

$$R_{n_k} = E[n(k)n(k)^T] = \begin{bmatrix} \sigma_{n_R}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{n_\theta}^2 \end{bmatrix}$$

式中

$$\sigma_{n_R}^2 = E[n_R^2]; \quad \sigma_{n_\theta}^2 = E[n_\theta^2]$$

3. 递推公式

如上所述, Kalman滤波具有递推的形式, 即: 估计 kT 时刻的目标状态仅取决于 $(k-1)T$ 时刻的估计结果及 kT 时刻的测量值。前者给出过去时刻的全部信息量, 后者给出 kT 时刻新的信息量, 从而对原估计值进行修正。这种递推运算大大减小了计算容量, 缩短了计算时间。

根据某快艇雷达的数据, 我们取 $T=5s$, $A=1m/s^2$, 测距精度 370m, 测角精度 2 度。

基本的递推公式是

(1) 一步预测误差的协方差矩阵

$$P(k+1/k) = \Phi V(k/k) \Phi^T + U_k \quad (9)$$

(2) 时变增益系数矩阵

$$K_k = P(k/k-1) H^T [H P(k/k-1) H^T + R_{n_k}]^{-1} \quad (10)$$

(3) 估计误差的协方差矩阵

$$V(k/k) = [I - K_k H] \cdot P(k/k-1) \quad (11)$$

(式中 I 是单位阵)

(4) 实时估计输出:

$$\hat{S}(k) = \Phi \hat{S}(k-1) + K_k [x(k) - H \Phi \hat{S}(k-1)] \quad (12)$$

为了启动滤波器的递推过程, 必须首先得到初始的估计 (第一估计)。通常, 我们选用 $\hat{S}(2)$ 作为初始估计, 我们的思路是:

(a) 首先输入雷达测量值: $x(1)$, $x(2)$;

(b) 作出准最佳的估计 (第一估计), 这种估计有直观的合理性, 即

$$\hat{S}(2) = \begin{pmatrix} \hat{R}(2) \\ \hat{\dot{R}}(2) \\ \hat{\theta}(2) \\ \hat{\dot{\theta}}(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(2) + n_R(2) \\ \frac{R(2) - R(1) + \frac{n_R(2) - n_R(1)}{T}}{T} \\ \theta(2) + n_\theta(2) \\ \frac{\theta(2) - \theta(1) + \frac{n_\theta(2) - n_\theta(1)}{T}}{T} \end{pmatrix} \quad (13)$$

(c) 算出第一估计的估计误差矢量

$$\varepsilon(2) = \hat{S}(2) - S(2)$$

由(13)式易得:

的估计均方根误差和预测均方根误差的曲线（如图3至图6所示）。

在与雷达联机实验之前，计算机模拟的随机数可作为雷达的测量数据输入，供实验室实验之用。

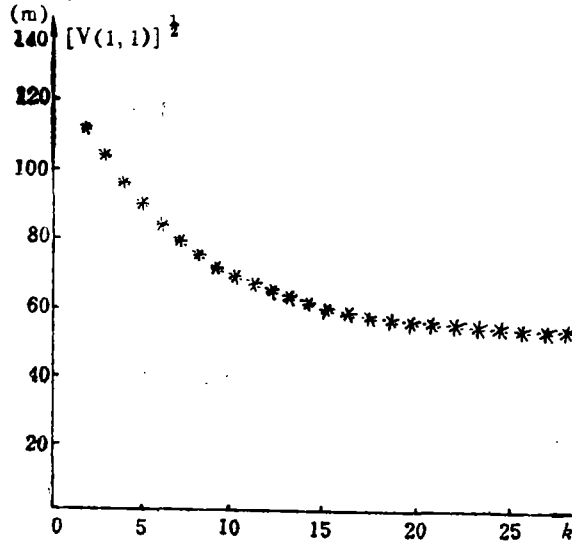


图3 距离的估计均方根误差曲线

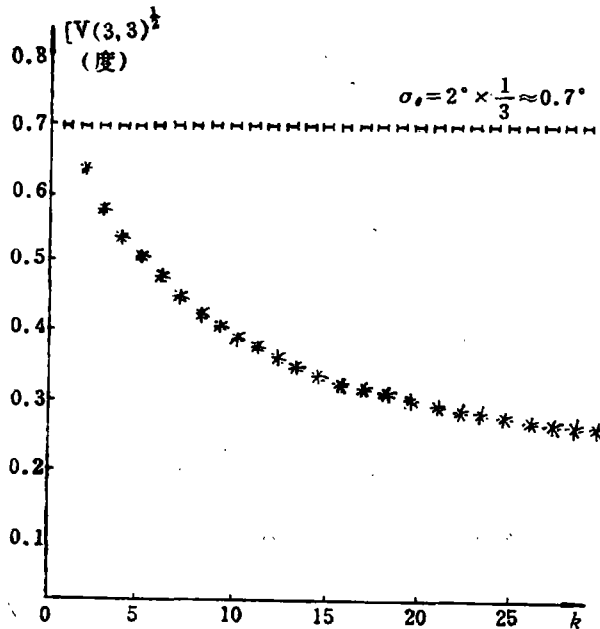


图4 方位角的估计均方根误差曲线

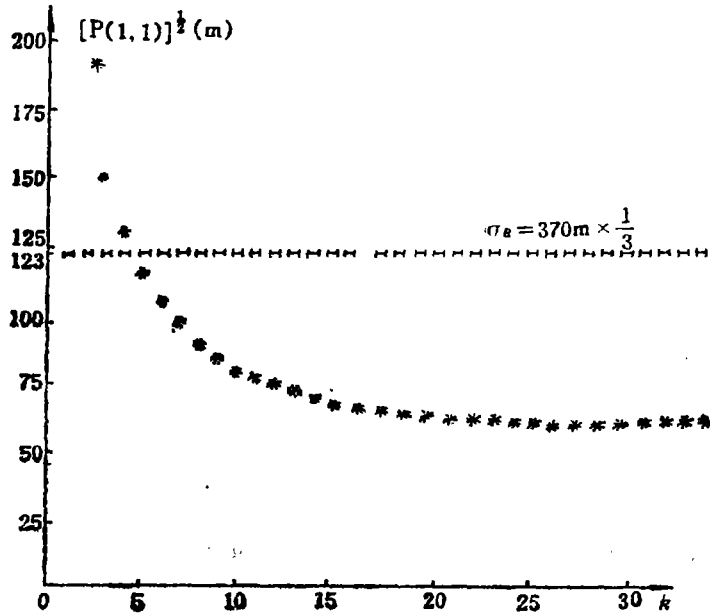


图 5 距离预测均方根误差曲线

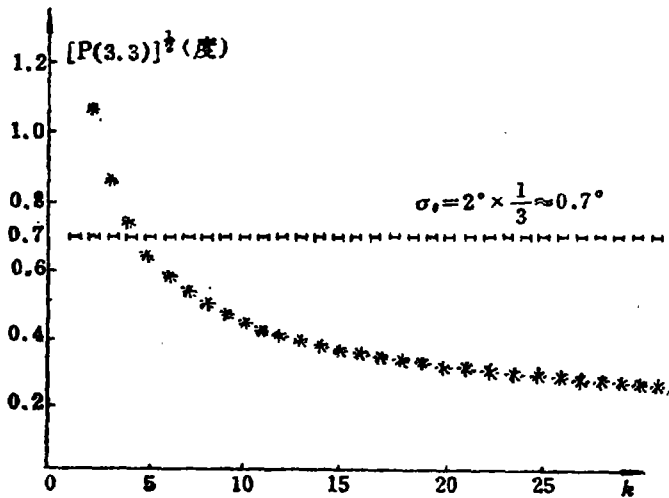


图 6 方位角预测均方根误差曲线

四、用单板机实现卡尔曼滤波

Kalman滤波的递推运算是一系列的矩阵运算。如上所述，其中数值大小的跨度很大，精确度要求高。因此，我们采用规格化的浮点数表示法，每个数据均用40bit二进制数表示，其中：①尾数为已规格化的32位二进制小数（“模4”补码，即占用2bit作为符号位。）因此，

正数表示为 $\underbrace{00}_{\text{符号位}}. \underbrace{1 \times \dots \times}_{\text{共30位}}$

负数表示为 $\underbrace{11}_{\text{符号位}}. \underbrace{0 \times \dots \times}_{\text{共30位}}$

②阶码采用8位二进制整数表示，也有两个符号位。因此，阶码可取(-64, 63)之间的整数。

正阶码表示为 $\underbrace{00}_{\text{符号位}} \underbrace{\times \times \dots \times}_{\text{共6位}}$

负阶码表示为 $\underbrace{11}_{\text{符号位}} \underbrace{\times \times \dots \times}_{\text{共6位}}$

以上所述可参见表2。其中每个数据中均采用两个符号位将具有以下优点：①允许尾数“溢出”，若发生这种情况，本程序将会使尾数自动右移一位(同时阶码加1)、重新实现规格化；因此，本程序仅当阶码溢出时，才显“8”字告警。这对提高滤波器的稳定性无疑是有好处的。②具有2个符号位的补码(小数)通常称为“模4”补码，它和“模2”补码(具有一个符号位)一样，作加(减)法运算时无需考虑各数绝对值的大小，一律作加法即可。

表2 数据表示法

	32位尾数	8位阶码
正数	00.1 × ×	00 × × (或 11 × ×)
负数	11.0 × ×	00 × × (或 11 × ×)

本程序主要包括以下三大部分：

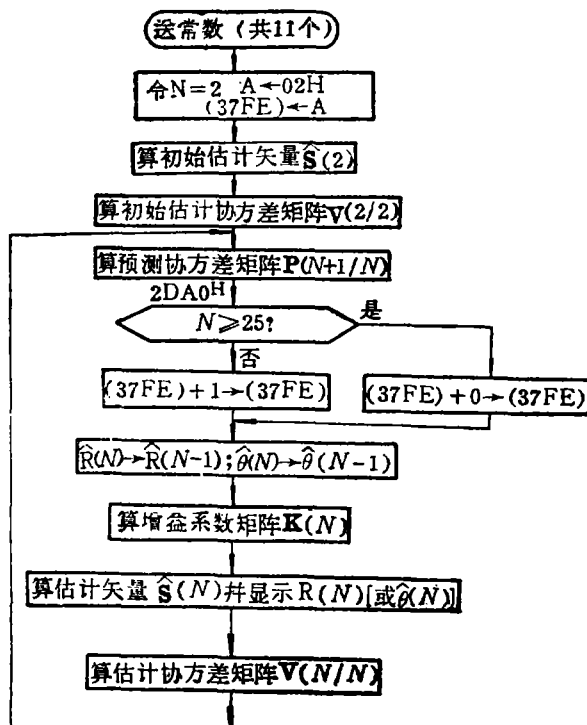
1. 子程序库：它包括加、减、乘、除浮点算法的子程序以及规格化、数字显示等子程序；
2. Kalman滤波算法程序(主程序)；
3. 接口程序。

由于整个汇编语言程序很长，也比较枯燥，故本文均已略去。另外，因限于篇幅，我们只在图7中给出“Kalman滤波算法程序”。“接口程序”、“浮点加法运算子程序”和“32位×32位浮点乘法运算子程序”四个程序的框图及其它各程序的框图均已略去。

五、关于接口和数字化显示

1. 接口问题

雷达送出的测量信号通常是模拟信号，因此，在送入单板机处理之前必须经过模一数转换。对模一数转换器的速度和精度的要求应根据实际需要来确定。我们曾在某机场雷达上进行试验。该雷达方位扫描速度是4转/分($T=15$ 秒)，因此，对模一数转换器



说明：实际使用时，应首先启动接口程序（首地址，2400H）送入R(1)R(2)并分别显示约14.5秒之后，转入本程序从2915H执行，执行到2DA0H时，又转至接口程序(2405H)以便送入R(N)(N≥3)再从2DA4H开始执行（即是说，不受N为何数的影响）。

图7 Kalman滤波算法框图

速度的要求并不高。其测距精度为2km，测角精度为2度，最大作用距离是250km（相当于二进制要用8位整数表示。）因此，为保证精度，我们采用13位二进制数来表示测距数据（其中8位为整数，5位为小数，故可精确到 $2^{-5} \approx 0.03\text{km}$ ）。对于精度较高的雷达，应适当增加位数。由于Z80单板机所带的A-D转换器只有8位，故一般不能满足精度要求，应另外配置。

信号经数字化后，仍不宜直接送给单板机的CPU，否则会打乱原来正在执行的程序。为此，可通过中断方式予以控制，即是说，必须经过接口电路的缓冲寄存。Z80单板机的并行接口Z80PIO也是8位的，为满足精度要求，可将PIO的A口和B口合起来（16位）表示一个数据。这样，如果要处理船上雷达（二维）的观测信号，还必须再扩展一个Z80PIO接口。

2. 数字式显式

雷达显示的数字化，有助于克服由于雷达员目测所产生的误差，这本身即可提高雷达观测数据的精度。我们利用Z80单板机的6个显示器来实现十进制的数字显示。我们让左边的两位显示整数，右边的四位显示小数，故数字显示的误差不超过 ± 0.0001 （例如，当显示测距估值时，最大误差是 $\pm 0.0001\text{km} = \pm 0.1\text{m}$ ）。另外，为了扩大读数的范

围,我们让最左边的显示器显示十六进制数(其余的五个显示器只允许显示十进制数),这样,可显示的最大数将达到(十进制)159.9999(六个显示器的显示为:159.9999)。如果需要显示更大的数,则可考虑用左边三位显示整数,而余下的右边三位显示小数,这时显示数据的最大误差是0.001。总之,可根据实际要求灵活处理。

由于Z80只配备有六个七段显示器,因此,为了同时显示距离和方位数据,还需要再扩展六个显示器。此外,也可以配上适当的打印设备,使数据打印输出。

六、结 论

综上所述,作者认为,在一个8位的单板机上实现Kalman滤波是切实可行的。本程序所占存贮容量约为5.5K,每递推一个点约需300ms左右。为了和雷达设备接口之用,还必须配置一些外围的硬件。此外,我们的试验表明:雷达天线对单板机内的大规模集成电路(即MOS场效应器件)的影响很厉害,必须采取严密的屏蔽措施。由于单板机价格低廉,体积小,常常是专机专用,因此,可以把程序“烧”到单板机的固定存贮器(ROM)内,这对用户无疑会更加方便。

目前,16位的单板机已日渐增多。如被使用,则不仅可使程序大为简化,而且运算速度也可进一步提高。由此看来,其潜力还是很大的。

参 考 文 献

1. Surface Search Radar Tracking By A Microcomputer Kalman Filter
By Charles Howard Wilson (美) AD-A028 857 1978.6
2. 楼宇希,雷达精度分析,国防工业出版社,1978.
3. [美]M.D.Srinath P.K.Rajasekaram著,朱正中、田立生等译,统计信号处理及其应用导论,国防工业出版社,1982.
4. Z80汇编语言程序设计,科学技术文献出版社重庆分社,1981.4.

A Z80 Single Board Computer Used to Accomplish Kalman Filter of Measured Radar Data and Digital Display

Ji Liangzhao

Abstract

This paper has solved the main problems encountered in using an 8-bit single board computer to accomplish kalman filter. Meanwhile, the

single board computer itself has developed and found new applications because of its ability to make high precision operations of floating point arithmetic. The paper mainly consists of two parts, that is, (1)simulating experiments on a microcomputer; (2)compiling assembly program and accomplishing kalman filter in the single board computer.

我校研制成功我国第一台全数字仿真计算机

我校最近研制成功全数字仿真机和银河超级小型计算机。由全国七十一个单位的九十八位计算机专家和工程技术人员组成的国家技术鉴定组，从九月十七日至十月十一日对仿真机进行全面考核和测试。国家鉴定委员会听取我校计算机研究所所长陈福接关于研制“银河仿真机”的报告，认真讨论了国家技术鉴定报告，检查了各项文件和有关技术资料、对该机作出评价，认为：该机是我国自行研制成功的第一台全数字仿真计算机系统。系统稳定可靠，技术指标先进，软件配套，具有八十年代初的国际先进水平，是一项重大科技成果。国家鉴定委员会主任委员、国防科工委副主沈荣骏在鉴定会上高度赞扬我校科技人员是一支专业配套，训练有素，勇于进取，能打硬仗的队伍，并希望今后更好地走教学、科研、生产相结合的道路，为我国计算机事业的发展做出更大的贡献。会上还宣读了国防科工委等单位的贺电。与仿真机同时鉴定的还有我校研制成功的“银河超级小型机”。一九八二年十二月，国家给我校下达了研制全数字仿真计算机的任务。我校计算机研究所科技人员，在银河亿次机还没有完成，许多同志还没有来得及修整一下，就投入战斗，努力克服技术上和研制条件上的种种困难，在最紧张的时刻，夜以继日，顽强奋斗，在两年多的时间内，出色完成了任务。全数字仿真机的研制为我国武器系统、航天系统的设计、试验、定型、部队训练、战斗标备和作战模拟，以及发展我国航空、航天、能源事业提供了极为重要的手段。参加研制工作的除我校计算机研究所外，还有我校自动控制系等单位；航天工业部和电子工业部有关院、所给予了技术支持和参加了有关工作。

(学报室)