

# 基于环境感知技术的高精度守时系统设计

古康 李鹏 王超 陈梅

(陕西黄河集团有限公司雷达设计研究所 西安 710043)

**摘要:** 对构成晶振时钟频率偏差的因素进行了分析,针对武器装备守时需求提出了环境感知技术,对其在高精度守时系统中的应用进行了介绍。该技术将武器装备使用环境温度范围划分为多个温度分区,在各温度分区内对晶振时钟频率偏差进行标定,构成先验知识。在无外部授时的情况下,守时系统通过环境感知实现自适应时钟频率偏差调整,能够长时间保持较高守时精度。在连续七天自然环境实装性能测试中,系统守时误差小于 17 ms,表明了该技术的有效性。

**关键词:** 守时系统;环境感知;武器装备;时钟频率偏差

**中图分类号:** TL824    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.4010

## Design of high precision time keeping system based on technology of ambient awareness

Gu Kang Li Peng Wang Chao Chen Mei

(Radar Design&amp;Research Department, Shaanxi Huanghe Group CO., LTD., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** In this paper, the factors that affect the accuracy of the clock frequency are analysed. For the need of time keeping ability in military equipment, the technology of ambient awareness is proposed, and its application in high precision time keeping system is introduced. This technology divide operating temperature range of military equipment into multiple ranges, and the parameter of local clock frequency deviation in every temperature range is measured and stored, so priori knowledge is obtained. Without external timing, the system can perform adaptive deviation adjustment of the clock frequency by the ability of ambient awareness, and maintain high clock precision for long time. After the natural environmental test for a week, the overall timing deviation is less than 17ms. Test results show that the application of this technology is effective.

**Keywords:** time keeping system; ambient awareness; military equipment; clock frequency deviation

### 1 引言

网络化作战要求武器装备必须具有互联互通能力,统一的时间信息成为装备之间信息交互的基础。目前我国武器装备均采用北斗导航系统授时,磁场、多径误差、电磁干扰等因素的存在,会影响授时精度和稳定性<sup>[1]</sup>,因此必须装备守时系统。

北斗、GPS等外部授时系统都具有很好的长期稳定性,但各种干扰因素的存在会影响其短期稳定性<sup>[2]</sup>,因此授时中心不能直接使用外部授时信号,必须使用高精度可控原子钟经驯服后实现精确计时输出<sup>[3]</sup>。在成本、功耗敏感的小型守时设备中,晶振得到了广泛应用,这类时钟源的特点是短期稳定性好但长期稳定性较差,通过测量外部授时与本地时钟之间的偏差,可获取晶振瞬时偏差参数和老化偏差参数,通过校准本地时钟,可在较短时间内保持较高的

计时精度<sup>[4]</sup>。

进行时钟偏差测量并对本地时钟做出反馈调整是守时系统的主要工作模式,时钟偏差的物理意义可使用式(1)表示:

$$e = f_{CS} / f_{BS} \quad (1)$$

式中:  $f_{CS}$  为晶振实际频率,  $f_{BS}$  为标称频率。

文献[5]及文献[6]采用 TDC 频率测量方法,使用专用脉冲相差测量芯片对外部授时和本地时钟 PPS 秒脉冲进行鉴相,通过电压反馈调整实现时钟同步。文献[7]及文献[8]使用本地时钟对外部授时系统 PPS 秒脉冲进行周期计数,获取计数偏差值,通过数字计时功能校正本地时钟 PPS 秒脉冲。

该对长时间无外部授时情况下武器装备守时的使用需求,本文旨在研究本地时钟偏差的优化测量及控制方法,克

服晶振长期稳定性差的缺点,使守时系统能够较长时间保持较高的守时精度。

## 2 影响守时精度的主要因素

守时精度是守时系统的重要性能指标,其定义是:本地时钟与标准时间的偏差与本地时钟运行时间之比<sup>[9]</sup>。影响守时精度的因素包括晶振选型、器件材料工艺因素、环境因素影响、线路设计等。使用各类原子钟进行驯服可达到高精度守时,基于武器装备守时需求限制,对此该文不做讨论;线路设计对时钟精度的影响可通过EMI/EMC优化设计进行消除或降低;环境因素和器件材料工艺因素涵盖范围比较广,包括环境温度、老化、品质都会影响晶振的准确度和稳定性。

本地时钟频率模型可使用式(2)进行描述:

$$f_0 = f_{BS} + f_1(x_0) + f_2(T) + f_3(t) + Y_0 \quad (2)$$

式中: $f_0$ 为晶振真实频率; $f_{BS}$ 为晶振标称频率; $f_1(x_0)$ 为相位噪声引起的随机频率误差,服从正态分布规律,其中 $x_0$ 表示分布范围; $f_2(T)$ 为受外界环境温度影响产生的频率漂移,其中 $T$ 为环境温度; $f_3(t)$ 为晶振老化引起的不可逆频率偏差,其中 $t$ 为时间; $Y_0$ 表征晶振由于技术、材料、工艺制造因素造成的准确度偏差。

上述各种因素中晶振随机频率误差不具备累积效应,可以忽略。 $Y_0$ 对于晶振而言是基本固定的频率偏差,可以通过事前标定予以消除。晶振老化特性为单调线性缓变函数,其时间参数以年计,该曲线工艺、材料使用一致性较好,可通过定期标定或事前测定同品种晶振老化曲线的方法予以消除。对于 $f_2(T)$ 温度漂移误差,尽管温补晶振或恒温晶振能够对外界环境温度变化进行一定的补偿,但对武器装备使用环境( $-45\sim+65\text{℃}$ )而言很难做到完全补偿,由图1可知不同晶振品种、材料、制作工艺,其函数曲线差异较大,且为非线性函数,很难用数学模型进行拟合。

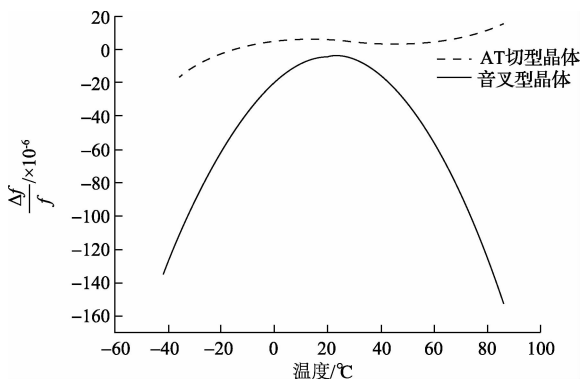


图1 不同类型晶振的典型频率偏移-温度曲线<sup>[10]</sup>

目前解决晶振因环境温度变化引起频率产生漂移问题的方法主要是进一步改进晶振小环境,例如采用精度更高的多槽恒温晶振或增加保温设备使守时系统处于稳定的环

境温度中。但该方案使得系统功耗加大,不利于武器装备电池供电状态长期守时。因此必须采用功耗较低的晶振,通过精确补偿消除影响本地时钟频率准确性的各种因素,提高守时精度。

环境感知技术针对构成晶振频率误差的各项因素,利用晶振输出频率-温度曲线时间一致性较好的特点,通过对本地时钟频率偏差与环境温度变化的数学关系进行标定,构建先验知识库。工作时通过感知系统对环境温度进行测量,获取该环境温度下的本地时钟频率偏差并进行补偿,从而提高时钟准确度。感知系统所提取的本地时钟频率偏差由晶振频率准确度误差、温度漂移误差、老化引起的频率漂移以及时钟相位噪声引起的随机误差等构成。由式(2)可知前3项误差可以准确表征本地时钟频率与标准时钟的偏差,对该偏差补偿可以提高守时精度,而随机噪声误差的引入则会降低守时精度,对于该误差量可通过增加样本量予以消除。该项技术的应用可使本地时钟能够在较宽的温度范围内精确同步于标准时钟,对环境变化适应能力较强,能够充分满足武器装备长时间守时的需求。

## 3 守时系统设计

基于环境感知技术的高精度守时系统功能框图如图2所示,该系统由MCU单片机、CPLD、晶振、温度传感器、FLASH存储器以及充电电池组成。其中MCU控制CPLD、温度传感器完成晶振工作温度采集、本地时钟计数值读取、PPS秒脉冲输出控制及本地时钟偏差调整计算等功能;FLASH存储器存储环境感知标定参数及环境感知现场参数,该数据表按照武器装备使用环境温度( $-45\sim+65\text{℃}$ )平均划分为22个区间,每区间 $5\text{℃}$ ,分别存储事前测定和工作现场测定的时钟频率偏差参数。

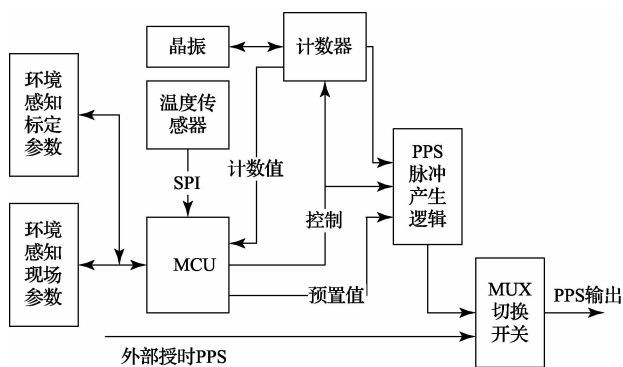


图2 高精度守时系统功能

环境感知标定可在恒温箱和工作现场2种状态下进行,系统首先采集环境温度并确定当前温度分区,当该温度分区持续时间超过预定门限时读取前后计数值及外部授时时刻,按照式(3)计算该温度分区环境感知标定参数 $e$ ,理论上当温度恒定时随着计数区间的延长 $e$ 无限趋近式(1)本地时钟偏差系数 $e$ 。式中 $\Delta n$ 为标定结束时刻计数值增

量,  $\Delta t$  为相应时区外部授时时差,  $f_{BS}$  为晶振标称频率值。

$$\epsilon' = \frac{\Delta n \times (1/f_{BS})}{\Delta t} \quad (3)$$

由于现场标定与武器装备使用环境一致性更好, 使用现场标定参数调整本地时钟可以获得更高的守时精度。但由于无法覆盖全温度范围, 因此环境感知现场参数只是环境感知标定参数的子集, 系统工作时优先使用环境感知现场参数, 如果该参数不存在则使用标定参数。

在正常工作模式下, MCU 按照 100 ms 工作周期检测环境温度, 确定当前温度分区, 提取相应环境感知参数, 并记录时钟计数值, 按照式(4)计算该温度分区守时时间增量。

$$\Delta t = \frac{\Delta n \times (1/f_{BS})}{\epsilon'} \quad (4)$$

当环境温度进入其他温度分区时, 守时系统记录本温度分区保持时间并进行积累, 同时将计数器清零, 开始新温度分区的检测计算。在每周期的计算中, 守时系统需要判断下一检测周期是否会跨越整秒, 并计算守时钟 PPS 秒脉冲输出时刻对应计数值并将其输出至比较器, 用于产生守时钟 PPS 秒脉冲信号。当外部授时有效时, 系统响应外部授时控制, 记录当前外部授时刻, 控制 MUX 开关输出外部授时 PPS 秒脉冲; 当外部授时失效时系统将 MUX 开关切换为输出守时 PPS 脉冲, 内存守时时间开始积累, 并按照式(5)将最后一次外部授时时刻值、各温度分区时间调整积累值以及当前温度分区时间调整结果相加形成当前守时刻。

$$t_{KT} = t_{BD} + \sum_{i=0}^m \Delta t_i + \Delta t_c \quad (5)$$

在守时系统设计中, 温度分区的划分是比较关键的一项因素, 区间跨度太大会因标定参数偏差而增加守时误差; 区间跨度太小, 当环境温度变化较快时, 会造成温度分区内停留时间较短, 由于环境感知标定参数基本都为  $10^{-6} \sim 10^{-8}$  量级, 如果温度区间计数值达不到相应量级则会产生计算舍入误差, 长时间积累后同样会增加守时误差。经过多次试验, 温度分区跨度选用  $5^\circ\text{C}$  相对比较合适。

守时系统设计的另一个关键因素是温度分区判断, 如果守时系统检测的环境温度在分区边界上下浮动时, 会由于温度分区停留时间较短而产生守时偏差。为了解决该问题, 采用  $\alpha, \beta$  二阶平滑滤波模型进行环境温度预测, 该模型见式(6)~(9)。

误差测量:

$$\Delta T = T_{cs} - \hat{T}(n+1, n) \quad (6)$$

温度平滑滤波:

$$\tilde{T}(n/n) = \hat{T}(n/n-1) + \alpha \times \Delta T(n) \quad (7)$$

温度变化率滤波:

$$\hat{T}(n/n) = \hat{T}(n-1/n-1) + \beta \times \Delta T(n)/t \quad (8)$$

温度预测:

$$\hat{T}(n+1/n) = \tilde{T}(n/n) + \hat{T}(n/n) \times t \quad (9)$$

上述公式中  $\alpha, \beta$  为滤波参数;  $t$  为检测周期。如果连续三周期温度平滑值均跨越温度分区, 则结束本分区守时时间计算, 开始新的温度分区计算, 该算法可有效避免由于环境温度在温度分区边界附近浮动造成的守时偏差。

## 4 试验结果分析

守时系统随武器装备在野外自然环境下进行了为期 7 d 的守时性能试验, 试验过程中每 30 min 测量一次守时时间与外部标准授时时间的偏差, 形成图 3 所示偏差曲线, 其中 X 轴为测量点序号, Y 轴为以 ms 表示的守时时间与授时时间偏差值。

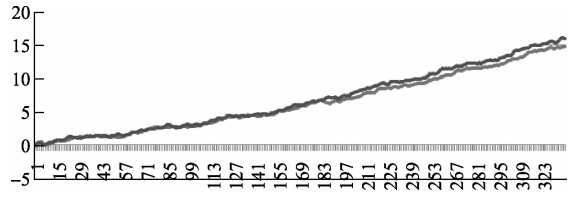


图 3 守时时间偏差测量曲线

图 3 中 2 条曲线中偏差值较大的曲线为使用事前标定参数进行守时的偏差曲线, 另一曲线为使用了现场感知参数进行守时的偏差曲线。可以看出, 2 种情况下连续 7 d 系统守时累计误差均小于 17 ms, 其中使用现场感知参数守时精度更高, 由于试验场所环境所限, 晶振温度仅在  $3 \sim 42^\circ\text{C}$  范围内波动, 该范围内晶振具有相对较好的温度稳定性, 2 条曲线差距不大, 如果在更为极端的使用环境下, 使用现场感知参数守时精度将会有更大的优势。

图中还可以看出曲线随时间的推移存在周期性阶跃现象, 即周期性出现在一段时间内守时时间偏差快速增加, 之后增速又减缓的特点。经分析, 原因是由于武器装备定期进行功能检查, 开机后温度由  $0^\circ\text{C}$  附近快速增加至较高的工作温度, 温升过程较快, 这期间守时时间计算舍入误差相对平时较大而造成的, 这与前述理论分析的结果相一致。

## 5 结 论

对影响晶振时钟精度的各种因素进行了分析, 对采用环境感知方式对本地时钟偏差实现精确调整的技术进行了描述, 对该项技术在武器装备守时系统中的应用进行了介绍。测试结果表明, 利用现场环境感知获取本地时钟频率偏差, 形成先验知识库, 守时状态下通过感知外界环境温度提取先验知识对本地时钟进行自适应频率偏差修正, 能够在较宽的温度范围内长时间保持较高的守时精度。基于该项技术的守时系统具有晶振选型范围宽, 线路规模较小以及系统功耗较低的特点, 非常适合于体积、功耗及环境要求较为苛刻的精确守时需求。

(下转第 36 页)