

一种新型高精度低功耗守时芯片*

陈亮¹, 咸德勇², 刘思慧^{1,3}, 田丰¹, 欧钢¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073;

2. 北京环球信息应用开发中心, 北京 100094;

3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要:以测时测距体制为基础的定位系统中,提高时间精确度是改善导航接收机性能的一个关键因素。然而,在便携或手持式导航设备中,现有的守时芯片难以在低功耗的条件下实现高计时精度。针对上述矛盾,本文提出了一种全新的守时芯片电路结构,通过直接温度补偿计时,以及低功耗连续工作和高功耗间歇突发工作相结合,实现了优于0.5ppm级别的守时精度和低于200 μ W待机功耗,可替换传统音叉型RTC芯片,提高便携或手持式导航设备性能。

关键词:导航接收机;守时芯片;高精度;低功耗;待机模式

中图分类号:TN751 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)03-0176-05

A novel high-precision, low-power time-keeping chip

CHEN Liang¹, XIAN Deyong², LIU Sihui^{1,3}, TIAN Feng¹, OU Gang¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Global Information Application and Development Center of Beijing, Beijing 100094, China;

3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In a positioning system based on calculating the distance by measuring the time delay, increasing the accuracy of the estimation of time delay is a key factor to improve the performance of navigation receivers. Generally, the off-the-shelf timekeeping chip cannot achieve the performance of high accuracy and low power consumption at the same time, which is especially required in portable and hand-held navigation receivers. A novel architecture of the timekeeping chip was presented to solve that contradiction. In this architecture, the time is compensated directly according to the temperature. And two circuit operation states, the low-power operation and the high-power bursty process, work alternately in turn. The chip can achieve the time accuracy of 0.5ppm and the stand-by power consumption of 173 μ W, which can replace state-of-art commercial RTCs to improve the performance of portable and hand-held navigation receivers.

Key words: navigation receiver; timekeeping chip; high-precision; low-power; stand-by state

精密时间在国防现代化、国民经济建设的诸多方面都有着广泛的应用。精密计时、现代通信、导航定位和计算机自动控制等都离不开精密时间尺度和时间频率测量技术。尤其是GPS、GLONASS、Galileo和北斗等卫星导航系统,都是采用测时测距体制,高精度的时间频率测量和同步是导航系统的关键和核心^[1]。在各导航系统中都能为用户提供标准定位服务和精密定位服务两种不同精度的定位服务^[2],其中精密定位服务为了提高测距精度和抗干扰能力,一般都采用高速长周期的伪随机码来进行精确测距^[3]。精密定位服务中的精确测距码的捕获是一个在时间轴和频率轴同时进行二维搜索的过程,时间上的很小误差会引来很大的码搜索范围。例如GPS中

精确测距码的速率是10.23Mbit/s,那么1ms的时间范围误差至少会增加 2×10^4 个时频搜索单元数。因此在以测时测距体制为基础的定位系统中,提高导航接收机的时间和频率精确度,减少时间及频率上的不确定性是一个关键因素^[4-5]。

当前,系统级的高精确守时基本采用商品原子频率标准(氢原子钟、铯原子钟、铷原子钟等)来组成。这类原子守时系统体积庞大、结构复杂、价格昂贵,无法在电子产品领域中的应用。

目前电子产品领域里,尤其是便携或手持型设备通常采用实时钟(RTC, Real Time Clock)集成电路来提供精密时间^[6-7],它在保持较高的守时精度的同时,具有小体积、低功耗的应用优势。本文结合目前主流的实时钟技术,提出了一种全

* 收稿日期:2012-12-07

作者简介:陈亮(1979—),男,福建漳州人,博士研究生,E-mail:liangchen@nudt.edu.cn;

欧钢(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:ougangcs@gmail.com

新的实时钟电路架构,兼顾低功耗的同时进一步提高实时钟电路的守时精度,以期替代传统的实时钟集成电路。

1 传统的守时电路

在电子系统中,目前应用最为广泛的是基于石英晶体振荡器的时间/频率源,其在精密计时/频率源领域占据主导地位已达 40 多年^[8]。即使精度最高的原子频标,其内部也需要高精度的石英晶体振荡器辅助工作。基于石英晶体振荡器的时间/频率源的核心是石英晶体及其配套电路,如图 1 所示。

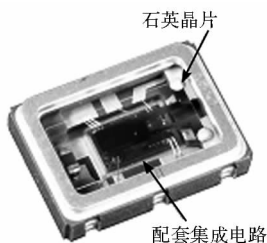


图 1 石英晶体振荡器内部结构
Fig.1 Structure of crystal oscillator

由于石英晶体的 Q 值很高,因此石英晶体自身特性变化对振荡器精度的影响才是关键因素。特别是温度变化对石英晶体的频率特性的影响最为突出。目前有两种方法可以消除温度影响,提高石英晶体频率源的输出频率精度。第一种是实时检测环境温度,根据频率随温度变化规律改变与晶体串联的电容,从而微调谐振频率,使之稳定,如图 2 所示。常见的 TCXO^[9]、DTCXO^[10] 和 MCXO^[11] 都是采用这样的温度补偿方式。尤其是 MCXO,由于以特殊的 SC 切晶体为核心,温度检测极为精确^[11-12],因此补偿后的频率稳定性也最高。

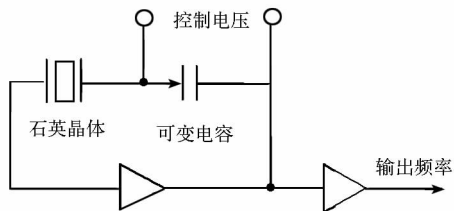


图 2 温度补偿型石英晶体振荡器电路结构
Fig.2 Architecture of TCXO

第二种是通过恒温槽隔热的方法使石英晶体保持恒温来稳定输出频率。采用此温度补偿方式的石英晶振被称为 OCXO。由于 OCXO 采用非常复杂的恒温措施,如图 3 所示,因此它的频率稳定性比 MCXO 更高。



图 3 恒温型石英晶体振荡器电路结构
Fig.3 Structure of OCXO

便携或手持型电子设备内部使用的都是基于上述两类石英晶振为核心的守时芯片。表 1 为各款温度补偿守时芯片的特性对比。

表 1 几种温补晶振芯片的特性

Tab.1 Comparison of TCXO, MCXO and OCXO

类别	频率范围 Hz	频率-温度稳 定性 ppm	功耗 mW
音叉晶体 TCXO	32.768k	>1	<1
AT 晶体 TCXO	2M ~ 30M	≥0.1	>1
SC 晶体 MCXO	8M ~ 70M	≥0.01	>10
OCXO	2M ~ 40M	>0.001	1000

从表 1 中可以看出,音叉晶体型 TCXO 由于工作频率低,因此具有最低的功耗,但精度也是最低的;OCXO 具有最高的精度,但由于隔热系统是有源方式,因此功耗是最高的;AT 切型晶体 TCXO 虽然精度较高,但因为工作频率高,所以功耗也比音叉晶体型大两个数量级。

由于石英晶体自身特性是影响频率/时间精度的核心因素,音叉晶体 TCXO 相比于 AT 切型晶体 TCXO,虽然功耗很低,但音叉晶体的频率-温度的最大变化率却是 AT 切型晶体的 4 倍,如图 4 所示,因此要达到高频率精度,会比 AT 切型晶体 TCXO 困难得多。如果能简化电路设计,取消频率调谐,就可以有效降低 AT 切型晶体 TCXO 电路的功耗,实现高精度低功耗的守时电路。

2 全新的守时电路结构

如前所述,要实现高守时精度和低功耗的守时电路,可行的方法是降低 AT 切型晶体 TCXO 电路的功耗。TCXO 和 MCXO 守时电路都具有类似图 5 的补偿结构,都是先解决输出频率的稳定

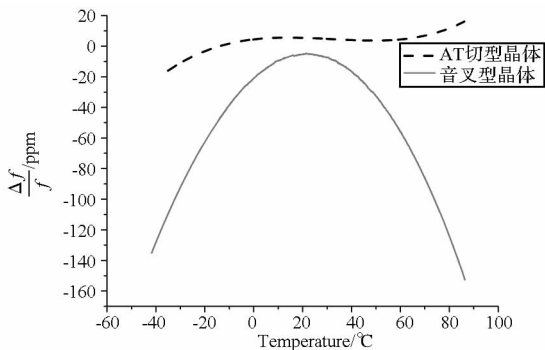


图 4 温度对典型石英晶体频率特性的影响^[13-14]

Fig. 4 Frequency versus temperature characteristics of crystals

性,再用稳定的频率去计时以达到高精度守时。因为频率随温度连续变化,所以温补电路也必须连续工作。复杂的补偿电路是 TCXO 和 MCXO 功耗大的关键因素,尤其是 MCXO,双模起振电路加上 AT 切晶体振荡器专用于调谐输出频率^[11],导致其功耗是 TCXO 的 10 倍以上。

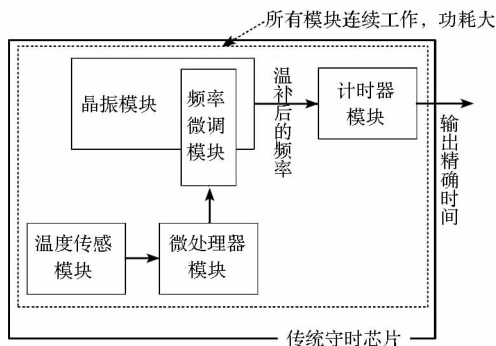


图 5 TCXO 和 MCXO 电路结构

Fig. 5 Architecture of conventional TCXO and MCXO

实际在便携或手持设备的使用中,关键是计时结果的精确,同时计时结果并不需要连续输出,守时电路大多数情况处于无对外通信的待机状态。在两种工作状态下的功耗需求也不一样:待机状态要求功耗尽可能低,以延长后备电池供电时间;需要对外提供计时结果时因为其他外部元器件也处于工作状态,实时钟的功耗限制可以放宽。针对以上情况,我们对传统守时电路结构提出如下修改:

①为保证高守时精度,采用 AT 切型石英晶体作为频率源;

②放弃电路结构复杂的直接频率补偿,改为绕过频率直接对计时结果进行温补运算,即由硬件级的频率调谐变为软件级的时间值加减修正,简化计时电路,如图 6 所示;

③将电路分为待机模式和正常模式:待机模式下晶振输出时钟不再温度补偿,直接计时,环境

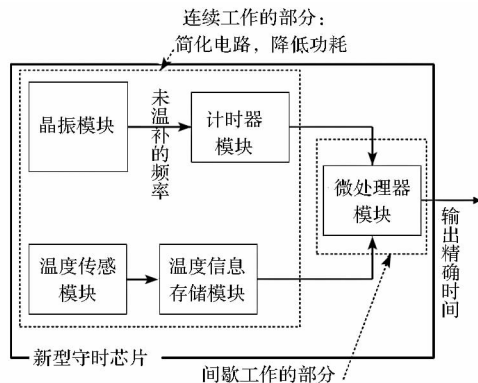


图 6 全新结构的守时电路

Fig. 6 Novel architecture of the proposed RTC

温度信息则保存在存储器中;当需要对外提供计时结果或到达定时修正周期,才进入正常模式,启动微处理器进行计时修正运算,运算完成即可重新转入待机模式,如图 7 所示。

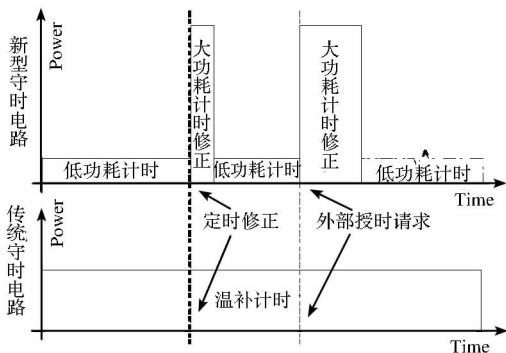


图 7 新型守时和传统守时工作模式对比

Fig. 7 Operational method comparison of conventional and novel RTCs

图 8 为新型守时电路的详细电路结构,包括电源管理、晶振、计时器、温度信息存储器、温度传感器、微处理器、系统总线、I2C 总线控制器等 8 个子电路。

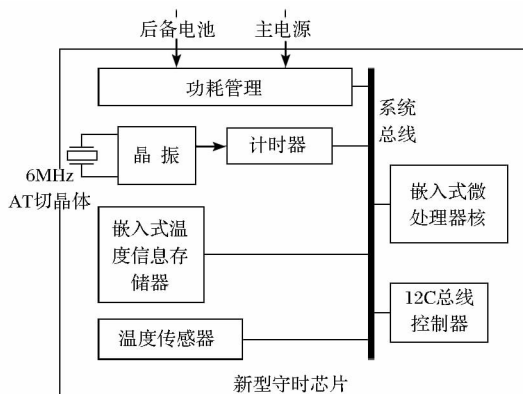


图 8 守时芯片详细电路结构

Fig. 8 Detail SOC structure of novel RTC

其中,功耗管理模块负责实现给全芯片供电

的主电源和备用电池电源之间的无缝切换,并将输入电源电压转换至内核工作电压,最后还需要根据工作模式转换策略,控制其他子电路模块的电源开/关。

晶振、计时器、温度信息存储器和温度传感器是待机守时的核心电路,功耗管理模块将保证这些子电路始终供电。

微处理器子电路负责对计时结果进行温度补偿修正。待机模式下,功耗管理模块将为其定时供电,正常模式下,则改为始终供电。

I2C 总线子模块仅在正常模式下需要工作,因此功耗管理模块将在待机模式下完全关闭其供电,节约功耗。

3 软件化温度补偿计时

传统守时电路基于如式(1)所示的石英晶体频率-温度特性,通过微处理器控制可变电容方式对晶振输出频率进行微调。

$$\Delta f(T) = a_3(T - T_0)^3 + a_2(T - T_0)^2 + a_1(T - T_0) + a_0 \quad (1)$$

式中, Δf 表示相对参考频率偏移, T 表示当前时刻温度, T_0 是基准温度,一般为 25℃。

在新型守时电路中,石英晶体频率-温度特性被转换为如式(2)所示的计时差-温度特性:

$$\Delta t(T) = n_0 \left(\frac{1}{f_0 + \Delta f(T)} - \frac{1}{f_0} \right) \quad (2)$$

式中, Δt 表示计时差, n_0 是计数器计数值, f_0 是晶振参考频率, Δf 表示相对参考频率偏移。按式(2),只需要温度变化历史和未温补的计时值就可以计算出温补后的精确时间,整个操作不再需要可变电容等复杂硬件电路,在微处理器中依靠软件即可完成。软件工作流程如图9所示。

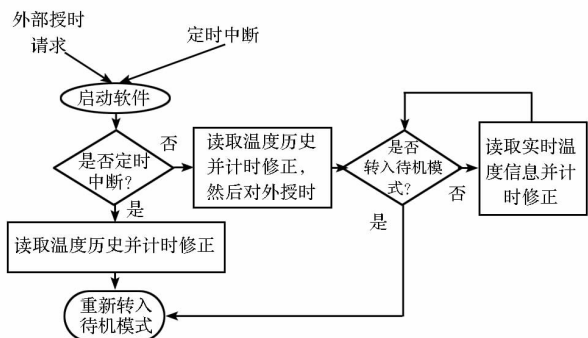


图9 新型守时芯片软件工作流程图
Fig.9 Software workflow of novel RTC

4 新型守时芯片主要性能

新型守时芯片的设计目标是替代传统基于

32kHz 晶体的 RTC 芯片^[15],因此其主要管脚功能兼容传统 RTC 芯片^[15],如表2所示,并提供精确 1PPS 信号输出和外部 1PPS 校准功能。

表2 新型守时芯片管脚功能说明

Tab.2 IO list of novel RTC

管脚	说明	I/O
1	1PPS_OUT:1PPS 信号输出	O
2	VCC:主电源(3.3V)	I
4	RST:芯片复位(低电平有效)	I
12	1PPS_IN:1PPS 输入	I
13	GND:地	I
14	VBAT:后备电池(3V)	I
15	SDA:I2C 总线输入输出	IO
16	SCL:I2C 总线时钟	IO

在 0.18μm 半导体集成电路工艺下,采用 Cadence Ultrasim 电路仿真软件对新型守时电路进行了数模混合仿真功耗评估,并与现有 RTC 芯片对比如表3所示。

表3 新型守时电路的功耗情况

Tab.3 Power consumption comparison of novel and conventional RTCs

功耗	新型守时芯片	音叉晶体 RTC ^[15]	10MHz AT 晶体系 TCXO ^[14]
待机 /mW	0.1728 (1.8V)	0.198 (1.8V)	26.4 (3.3V, 不含计时功能)
正常 /mW	37.8 (1.8V)	0.36 (1.8V)	

新型守时芯片的晶振和温度传感器子电路已经在 0.18μm 半导体集成电路工艺下完成流片验证。如图8所示,新型守时芯片除了晶振、温度传感器和功耗管理模块外,其他均为数字电路,因此我们在已独立流片的晶振、温度传感器模块基础上增加功耗管理元件和 FPGA 就可以实现完整的守时芯片原型平台。在该验证平台上,还可以通过引入外部精确参考时钟,在 FPGA 上直接实现温补计时结果和标准参考时间的实时比对,并可以通过串口对外输出比对结果。

将上述原型验证平台放置于 Espec SETH-Z-031U 型高低温箱内,设定以 0.1℃/分钟的变温速率持续进行 -40℃ ~ 85℃ 变温循环一个月。通过定时串口输出,获得了实验期间新型守时芯片原型平台的计时精度如图10所示,并与其他类型 RTC 芯片精度对比如表4所示。

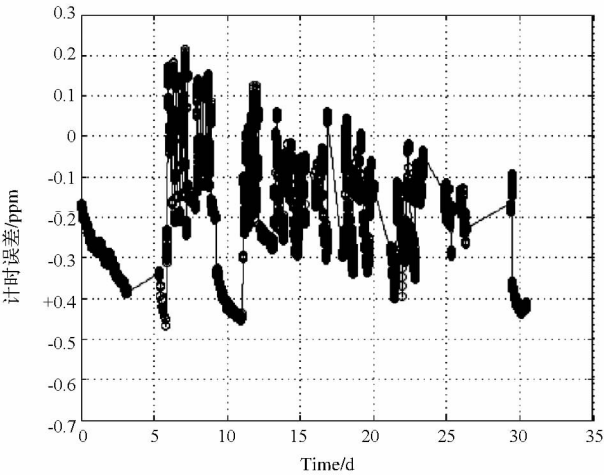


图 10 守时精度

Fig. 10 Time-keeping accuracy of novel RTC

表 4 新型守时电路与传统守时电路精度对比

Tab.4 Timekeeping accuracy comparison of novel and conventional RTCs

	新型 AT 晶体 守时电路	音叉晶体 RTC	AT 晶体 TCXO ^[14]
精度 (-40℃ ~ 85℃)	±0.5ppm (-40℃ ~ 85℃)	±3ppm (-40℃ ~ 85℃) ^[15]	±0.3ppm (-40℃ ~ 85℃)

从表 3 和表 4 可以看出,采用新型守时电路结构后,待机功耗达到商用音叉晶体 RTC 水平,守时精度保持 AT 切温补晶振水平,有利于在便携及手持型导航设备中替代传统 RTC 芯片。

5 结论

针对便携或手持型电子设备尤其是卫星导航设备的应用环境,如何实现高精度守时和低功耗的平衡,提出基于 AT 切晶体采取非传统可变电容调谐进行温度补偿的电路结构。该结构通过将长时间连续操作的硬件电路功耗大幅降低,并间歇性集中突发处理功耗大的软件温补操作,从而使新型守时芯片在保持 AT 切型晶体频率源高精度的同时,降低至仅有传统守时电路 1% 的功耗,达到音叉型晶体守时电路水平,有利于提高便携式电子设备尤其是导航设备性能。

参考文献 (References)

[1] 董绍武. 守时中的若干重要技术问题研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2007.
DONG Shaowu. Study on several important technical issues in time-keeping [D]. Xi' an: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2007. (in Chinese)

[2] Kaplan E D, Hegarty C. Understanding GPS: principles and

applications[M]. New York: Artech House Publishers, 2005.

[3] 任亚安, 马文平, 王新梅. CDMA 体制长周期测距码的编码方法与相关特性[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2003, 30(3): 331-334.
REN Yaan, MA Wenping, WANG Xinmei, Coding and correlations of the long peiod ranging codes applied to CDMA systems[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(3): 331-334. (in Chinese)

[4] 任亚安, 王鹏, 许卫东, 等. GPS 中 P(Y) 直接捕获技术的研究进展[J]. 全球定位系统, 2003. (2): 2-7.
REN Yaan, WANG Peng, XU Weidong, et al. Development and techniques of direct GPS P(Y)-code acquisition [J]. GNSS World of China, 2003. (2): 2-7. (in Chinese)

[5] 宫二玲, 王跃科, 杨俊. 直接序列扩频码元同步的快速捕获及跟踪[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(5): 76-80.
GONG Erling, WANG Yueke, YANG Jun. Fast code acquisition and tracking for DS/SS [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(5): 76-80. (in Chinese)

[6] 王祖强, 葛敏, 王照军. 并行实时时钟芯片 DS12887 及其应用[J]. 电测与仪表, 2001, 38(6): 53-55.
WANG Zuqiang, GE Min, WANG Zhaojun, The parallel real time clock DS12887 and its application [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2001, 38(6): 53-55. (in Chinese)

[7] 李浩, 兰铁岩. 实时时钟芯片 RTC4553 原理及应用[J]. 电测与仪表, 2003, 40(8): 38-41.
LI Hao, LAN Tiejian. Principle and application of real time clock chip RTC4553 [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2003, 40(8): 38-41. (in Chinese)

[8] Hsu W T. The new heart beat of electronics-silicon MEMS oscillators [C]//Proceedings of Electronic Components and Technology Conference, ECTC07, 2007: 1895-1899.

[9] Rokos G H S. Precision, Low Power, Analogue TCXO Using a Single Integrated Circuit [C]//Proceedings of Tenth European Frequency and Time Forum, EFTF96: 515-519.

[10] Kosykh A V. Low cost DTCXO structure based on modern microcontroller [C]//Proceedings of Advanced Optoelectronics and Laser, 2003:265-267.

[11] Jackson E. The microcomputer compensated crystal oscillator-practical application of dual-harmonic mode quartz thermometry [C]//Proceedings of IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, 2004:401-405.

[12] Schodowski S. Resonator self-temperature sensing using a dual-harmonic-mode crystal oscillator [C]//Proceedings of the 43rd Frequency Control Symposium, 1989: 2-7.

[13] Micro Crystal AG. OV-7604-C7, low power clock oscillator 32.768 kHz datasheet (version 3.5/08.2010) [R/OL]. Micro Crystal datasheet, 2010-08 [2011-10]. <http://www.microcrystal.com/CMSPages/GetFile.aspx?nodeguid=2220bbb2-2c47-47bc-96e0-d4077d97a844>.

[14] C-MAC MicroTechnology Inc. Frequency product data book [R]. C-MAC MicroTechnology datasheet, 2004.

[15] Maxim Integrated Products, Inc. DS3232, extremely accurate I2C RTC with integrated crystal and SRAM (rev 3, 7/2010) [R/OL]. Maxim integrated products datasheet, 2010-07 [2011-10]. <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS32B35-DS32C35.pdf>.