

一种基于时间数字转换器的瞬时测频技术

凌祥 张树森

(海军航空工程学院 烟台 264001)

摘要: 为了提高数字计数式瞬时测频的精度,提出了一种采用时间数字转换器(TDC)进行瞬时测频的新技术。通过对脉内的被测信号脉冲个数进行计数,并利用 TDC 测量输入信号的脉宽,可得到被测信号频率。在 FPGA 中设计了测频的基本时序,并完成了对 TDC 的控制和数据计算。为了提高瞬时测频机工作的稳定性,设计了 TDC 的校准方法,通过在测量间歇期插入标准脉宽信号进行测量,以修正 TDC 的漂移。经测试表明,对于脉宽 $1\ \mu\text{s}$ 、载频频率为 $1\sim 2\ \text{GHz}$ 的输入信号,该技术的测量精度约为 $0.3\ \text{MHz}$,测量时间小于 $1\ \mu\text{s}$ 。

关键词: 瞬时测频; 测频精度; 时间数字转换器; 测量校准

中图分类号: TM935.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

The echnology of instantaneous frequency measurement based on TDC

Ling Xiang Zhang Shusen

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To improve the accuracy of digital counting instantaneous frequency measurement (IFM), a new technology with time frequency converter (TDC) is presented. The measured signal frequency can be obtained by counting the number of the signal in the pulse and using the TDC to measure the pulse width. In FPGA, the basic sequence of frequency measurement is designed, and the control of TDC and the calculation of the data are achieved. In order to improve the stability of the IFM, the calibration method of TDC is designed, with the measurement of a standard pulse inserted to correct the drift of TDC. The experiment shows that the measurement accuracy of this new method is about $0.3\ \text{MHz}$ for the input signal with pulse-width of $1\ \mu\text{s}$ and the carrier frequency of $1\sim 2\ \text{GHz}$, while the measurement time is less than $1\ \mu\text{s}$.

Keywords: IFM; measurment precision; TDC; measurement calibration

1 引言

瞬时测频是一种能在脉冲持续时间内完成脉内载频测量的频率测量技术^[1-3],瞬时测频的技术难度比较高,体现在3个方面:1)脉内被测频率通常为微波波段的射频信号;2)由于脉冲持续时间通常只有 $0.1\sim 1\ \mu\text{s}$,测量时间非常短暂;3)测频精度要求很高,要达到 $1\ \text{MHz}$ 以内,即测频精度乘以测频时间要远小于1。

瞬时测频常用的技术主要是干涉仪比相法,通过对频率一相位一幅度的转化,最后由测量到的幅度信息反推得到频率值,该技术在工程中得到了广泛应用,但其缺点是体积大、测频精度不高^[4-6]。

数字计数瞬时测频技术利用数字方法,能达到较高的测频精度,通过测量脉冲包络时间和脉冲包络内的被测信

号脉冲个数,计算得到频率值。为了提高测频精度,需要有更高频率的时钟作为标准去测量脉冲包络时间,目前通常采取对标准时钟进行多路移相,得到等效时钟,例如将 $2\ \text{GHz}$ 时钟分成4路,相互之间移相 90° ,然后让每路时钟都对脉冲包络时间 τ 进行计数测量,将每路计数值相加,则等效于 $8\ \text{GHz}$ 时钟对脉冲包络时间 τ 的计数测量,这样能将标准时钟降下来,降低了电路设计难度^[7-9]。但当要求更高的测频精度时,难以将时钟进行更精确地移相,等效时钟频率也难以提升。

针对上述问题,本文利用时间数字转换器测量得到了脉冲包络时间 τ ,其精度可达 $125\ \text{ps}$,与采用 $8\ \text{GHz}$ 标准时钟的测频电路等效,为了保证测频精度不受温度影响,还设计了校准电路,使得瞬时测频机具有较高的稳定度。

2 总体设计方案

本文设计的数字瞬时测频机的总体框图如图 1 所示,包括微波前端电路、FPGA、时间数字转换器和单片机。微波前端电路能将输入的 1 000~2 000 MHz 波段信号进行放大、八分频、滤波和检波,得到脉冲包络信号和 125~250 MHz 之间的被测信号,送给 FPGA 进行处理和计算。单片机主要完成对时间数字转换器和 FPGA 的初始化设置,并用于调试和测试。

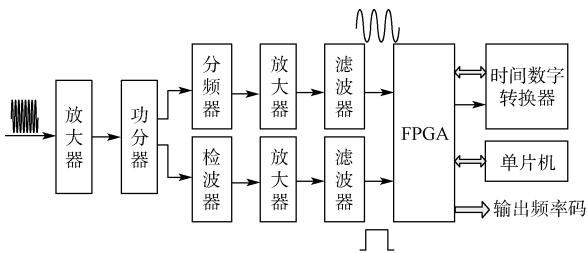


图 1 系统总体框图

在设计微波前端时,没有采用混频器,而是将收入射频信号作分频处理,这样既有效扩大了瞬时测频的工作带宽,又能使分频后的信号与 FPGA 器件的工作频率匹配。

3 时间数字转换器

时间数字转换器(TDC)能把时间间隔直接转化为高精度的数字值,在航空、航天、精确制导以及核物理等领域有着广泛的应用,是导航通讯、工业生产和电力等应领域不可缺少的关键技术。德国 Acam 公司研制的时间数字转换器基于延迟线技术,可达 30~300 ps 的分辨率,其中 TDC-GP1 的组成框图如图 2 所示^[10]。

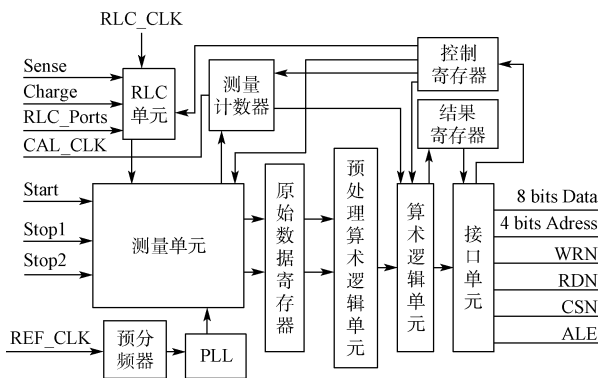


图 2 TDC-GP1 的组成

该芯片采用双通道测量时,其时间分辨率为 250 ps,而当进行单通道测量,其分辨率为 125 ps。每个通道可进行四次采样,其时间间隔测量范围为 3 ns~7.6 μs,当具备前置配器时,可扩展至 60 ns~200 ms。双通道的 8 个事件可

进行任意测量,且没有最小时间间隔限制,时间间隔也有可能是负值。芯片内部具有内置的 16 位运算器,测量结果可被校正,并与 24 位的整数相乘得到测量结果,该芯片的测量的时序如图 3 所示。当采用高分辨率模式时,TDC-GP1 能把两个通道连接起来,因此其分辨率能达到单通道时的两倍。通过设置模式寄存器可激活此工作模式,在此模式下,TDC 以大约 125 ps 的分辨率可在通道 1 进行 4 次采样^[11]。

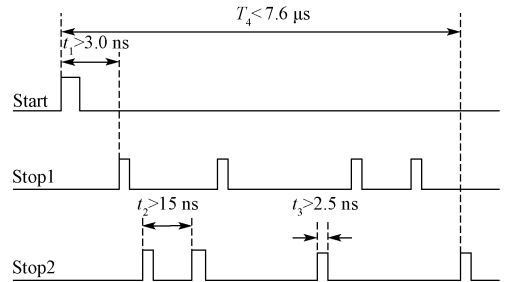


图 3 测量时序图

由于 TDC-GP1 采用并口数据总线,可通过外部硬件进行非常快的读写操作,最短读取操作的间隔时间为 0.25 μs,满足了瞬时测频对测量时间的苛刻要求。

4 FPGA 中的测频流程

FPGA 是瞬时测频机的时序控制、脉冲测量和数据处理的核心,它能与单片机进行数据通信,并对来自微波前端的被测信号和脉冲包络进行计数,得到脉冲个数 n ,将与被测信号同步的脉冲包络转换为起始脉冲和关闭脉冲送给时间数字转换器,精确测量脉冲包络的宽度 T ,从而计算得到准确的测频值^[12-13]。

FPGA 中的测量时序图如图 4 所示,单次测频时间可控制在 1 μs 之内。

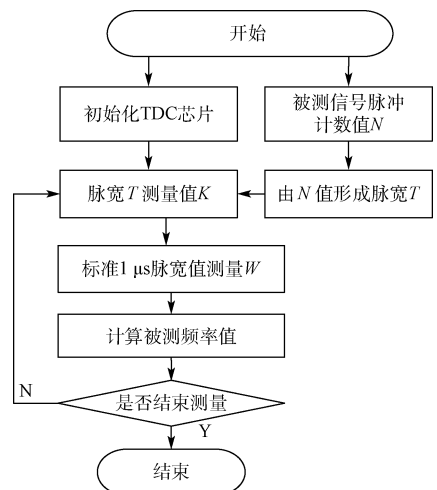


图 4 FPGA 中的测量时序图

根据测量时序图可知,测量时被测信号脉冲计数值固定为 N ,如图 5 所示,被测信号在脉冲包络下计数时可能出现 ± 1 的偏差,而导致测量值出现较大的抖动,为此先根据 N 值形成脉宽 T ,即用被测信号去同步脉冲包络^[14]。由时间数字转换器芯片完成对 T 的精确测量。采用这种方法时,当被测信号频率较高,会导致 T 变窄,使得测频精度下降,但这样有利于瞬时测频保持较高的稳定性。

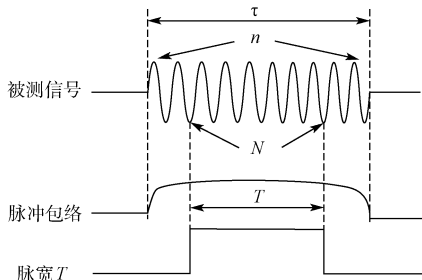


图 5 脉冲包络形成脉宽 T 的示意图

5 频率校准设计

TDC 采用延迟线技术,易受环境和温度影响,在不采取任何措施的情况下,其测量值会随时间发生较大漂移。TDC-GP1 内部能对测量结果进行自动校准,存入 32 位的结果寄存器中,整个校准循环持续约 $2.2 \mu\text{s}$,这难以满足瞬时测频时间的要求。为此在设计时由外部频率源在测量的间歇期,送出标准的 $1 \mu\text{s}$ 脉宽信号给 TDC-GP1 进行测量,测到测量值 W ,根据图 5 数据可在 FPGA 中计算校准后的测频值 f_1 (单位 MHz)^[15]。

$$f_1 = N \cdot W / K$$

6 测试结果

根据上述方案,设计了新型的基于时间数字转换器的瞬时测频机,并对其进行了测试,测试条件如表 1 所示。

表 1 测试条件

输入频率范围/GHz	输入脉宽范围/ μs	输入功率范围/dBm
1.0~2.0	0.5~1.0	-40~0

通过对系统进行实际测量表明,由于该瞬时测频对脉冲包络的时间分辨率约为 130 ps ,等效标准时钟频率为 7.7 GHz ,从而确保了测频的高精度。

在测试中利用通过固定脉冲计数值固定为 N ,从而形成脉宽 T 。利用 TDC 测量 T 的时间,从而计算出被测频率。由于低频段的脉宽 T 要大于高频段的脉宽 T ,因此低频段信号的测频精度要优于高频段信号^[16]。表 2 列出了脉宽 $1 \mu\text{s}$ 、载频频率为 $1 \sim 2 \text{ GHz}$ 的输入信号的实测结果。

表 2 实测结果

输入频率/MHz	测频精度/MHz	动态范围/dB
1 000.0	0.13	31
1 200.0	0.21	28
1 400.0	0.25	32
1 600.0	0.33	33
1 800.0	0.40	29
2 000.0	0.48	30

同时还测量了该瞬时测频机的反应时间,即从被测脉冲输入到频率码输出的延时,该延时主要受 TDC 测量时间、FPGA 计算时间、脉冲检波延时等因素影响,其中 TDC 测量时间较长,根据实测约为 $0.25 \mu\text{s}$,整个系统的延时约为 $0.3 \mu\text{s}$,可满足在频率跟踪、频率引导等方面的应用。

7 结 论

本文利用时间数字转换器对数字计数式瞬时测频电路进行了改进,并设计了校准方法以保证时间测量的稳定性,经实际测试表明,该方法具有较高的测频精度,原理样机工作时动态范围可达 30 dB ,这种新的瞬时测频技术具有很强的工程应用前景。

参 考 文 献

- [1] 周晓青,李合生,陶荣辉. 数字测频算法研究综述[J]. 微型机与应用,2010,29(7): 1-9.
- [2] 李卫兵,李道通. 基于 FPGA 的多功能频率计的设计[J]. 电子设计工程,2012(20): 164-167.
- [3] 闫浩,赵国庆,秦国栋. 基于光采样的瞬时测频技术研究[J]. 电波科学学报,2014,29(1): 72-78.
- [4] 杨骏,冯起,袁乃昌. 一种具有温度补偿的瞬时测频接收机的设计与实现[J]. 电子设计工程,2014,22(16): 74-76.
- [5] 唐龙. 一种超小型化瞬时测频接收机设计[J]. 信息通信,2015(2): 71-72.
- [6] 薛明军,孔宪辉,张红梅. 一种比相法瞬时测频接收机的工程实现[J]. 电子科技,2014,27(7): 103-105.
- [7] 李宏圆,王坤达,黎仁刚. 一种基于 FPGA 的宽带瞬时高精度测频算法[J]. 舰船电子对抗,2014,37(5): 14-17.
- [8] 朱军,王武华. 专用捷变频信号源校准系统研制[J]. 宇航计测技术,2014(1): 29-32.
- [9] 程遥. 基于 FPGA 的全相位 FFT 和相位推算法频率测量[J]. 电子科技,2015,28(1): 143-146.
- [10] 李滨玉,许洁静,魏波. 基于相位差分的 FPGA 瞬时测频的实现[J]. 现代电子技术,2013(18): 118-120.
- [11] 张学成. 宽带大动态瞬时测频接收机的设计与实现[J]. 舰船电子对抗,2011,34(4): 29-31.

(下转第 25 页)