

# SeruTek UltraTDC

## -- 基于 Ultrascale+ MPSoc 的多通道高精度 TDC

版本 1.1

2021 年 3 月 29 日

## 1 简介

SeruTek UltraTDC 是上海瑟如电子近期推出的高精度、多通道 TDC IP 核。该 IP 核适用于 Xilinx Ultrascale/Ultrascale+ 架构的多款 FPGA/SoC 器件。为了便于客户能够快速评估该 IP 核的性能，掌握 IP 核的使用方法，我们基于 Alinx 黑金的 ZU3EG 开发板，制作了 8 通道 TDC 的演示套件 ZU3D8。

ZU3D8 在 ZU3EG-1 MPSoc 上集成了 8 路时间戳单元、自校准模块、时间戳解析、时差计算模块以及用于测试的脉冲序列产生模块，使用开发板 PL 侧的 200MHz 差分时钟作为 TDC 部分的时钟源；利用 40pin 2.54mm 扩展接口上的 IO 接口作为测量脉冲输入接口，或使用脉冲序列模块产生的测试脉冲作为输入。测量得到的时间戳或时差数据为标准的 AXI Stream 接口。

ZU3D8 每个通道的时间戳精度典型值为 10ps，时差测量精度典型值为 10ps，每通道输入脉冲最小间隔 14ns（最小可定制为 6.25ns），相当于每个通道具有最大 70MSPS 的测量能力。SeRuTDC 能够提供几乎无限的时间戳测量范围，默认配置下时间戳的表示范围约为上电初始化后的 60 年，如有需要还可进一步扩展。

演示程序中通过，TDC IP 输出的测量数据缓存在 PL 侧的 AXI Stream FIFO 中，PS (Arm A53 ) 从 AXI Stream FIFO 读取测量结果，再通过串口打印输出。TDC 测量结果进行复杂的处理算法，用户可以在 PS 侧通过 C/C++ 实现，也可以在 PL 侧编写处理模块，实现低延迟的高速数据处理。当然，用户也可自行适配 UDP 或 PCIE 接口，实现测量数据的高速转发。

ZU3D8 TDC 演示方案提供了开箱即用的 ToF 快速验证评估平台，只需少量的修改，就可应用于客户的定制环境，可极大地加快 TDC 系统设计，加速产品上市。ZU3D8 的目标应用包括：多通道时间间隔计数、激光脉冲测距、质谱分析、医学图像、半导体自动化测试及精密时间同步等领域。

## 1.1 特点与优势

优势	特点
<b>集成化的多通道测量</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在 ZU3EG/CG 上可部署多达 12-14 通道，在 ZU4EG/CG 上可部署多达 20-24 通道</li> <li>● 在 ZU15EG 上可部署多达 64 通道</li> </ul>
<b>高精度高速率时间测量</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 时间戳精度典型值：10ps；</li> <li>● 时差精度典型值：10ps；</li> <li>● 同一通道最小脉冲间隔：14ns（标准版）</li> <li>● 同一通道最小脉冲间隔：6.25ns（高速版）</li> <li>● 不同通道间没有最小脉冲间隔限制。</li> </ul>
<b>强大的持续测量能力</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 默认配置下，每一路 TDC 年的时间戳范围高达约 60 年。</li> </ul>

- 默认配置下，时间戳的持续读出速率高达 33Msa/s（每秒 3 千 3 百万条，8 通道总合），最高配置下可达 250Msa/s。
- 配备 PL 侧的钟差计算模块，可在线实时计算 stop 脉冲与 start 脉冲之间的时间差。标准配置下，可达 50Msa/s 的持续输出速率。

### 片上校准

- 当 TDC 使用环境温度发生大幅变化，对延迟链的 BIN Size 进行校准有利于提高测量准确度。本演示方案利用片上集成的 PS 处理单元对 TDC 延迟链的 BIN Size 进行校准，无需借助外部校准信号、外部计算单元。

### 基于 IP 的设计

#### 便于用户增加自定义逻辑

- 本演示方案包括了 PS 控制单元、8 通道 TDC、时间戳解析单元、时差计算单元。并预留了多个 clock region，用户可利用这些资源实现用户自己的逻辑，如在 PL 侧实现高速的时差分析处理单元，或实现基于 UDP 或 PCIE 的高速转发模块。
- 除了输出时差数据，用户还可以选择输出时间戳数据，以实现更多应用。

### 灵活配置，按需定制

- 可定制 TDC 通道数、时间戳量程、数据吐

出速率、最小脉冲间隔等参数。

## 1.2 应用领域

车载多线激光雷达

激光测距

医学成像 (PET)

半导体自动化测试

单光子计数

质谱分析

高能物理

精密时间同步

## 1.3 时间戳格式

默认时间戳长度为 12 字节，最高位的一个字节为通道标识，用来表示产生该时间戳的通道编号。在 ZU3D8 中，通道编号范围是 1-8。在时差计算模块中，通道 1 为作为 start 信号，通道 2-8 作为 stop 信号。

时间戳的低 9 个字节用来表示时间戳的值，数据类型为无符号整型。最小位 LSB 对应的单位是皮秒 ps。

[95:88]	[87:72]	[71:0]
通道号	无定义	时间戳，无符号整型，LSB ps

## 1.4 时差数据格式

时差数据在这里指通道 2-8 测得的时间戳相对通道 1 测得的时间戳的差值。时差数据长度可配置为 32bit 或 64bit。其中 8bit 用来表示时差数据的通道号。时差计算模块默认通道 1 为 start 信号，并计算通道 2-32 相对于通道 1 的时间差。如果通道号为 2，那表示该时差是通道 2 的时间戳-通道 1 时间戳得到的。

当时差数据长度为 32bit 时，剩余的 24 bit 数据用来表示实际的时间差，数据格式为有符号的整型，单位是 ps。能够表示的时间差范围约为 8.38 微秒，用真空中的光速换算得到对应的测距范围大约为 2500 米。

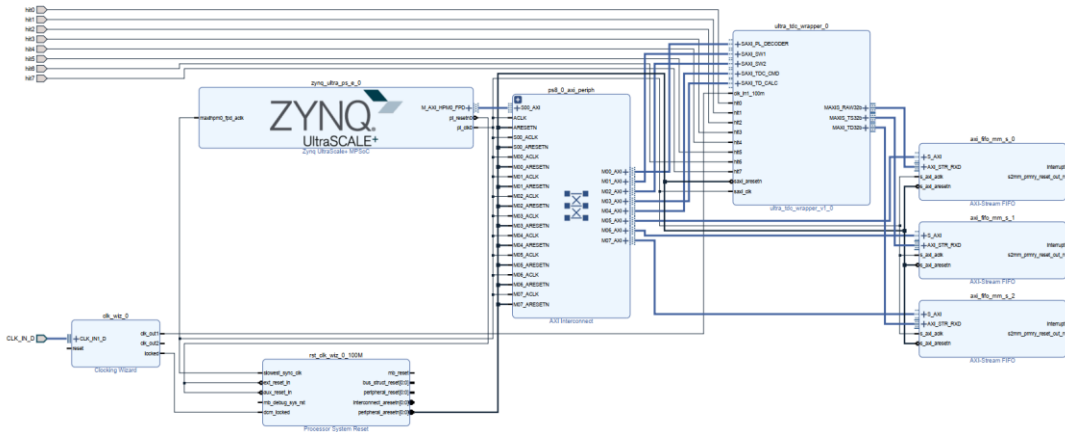
[31:24]	[23:0]
通道号	时间差，有符号整型，LSB ps

当时差数据长度为 64bit 时，剩余的 56bit 数据用来表示实际的时间差，数据格式为有符号的整型，单位是 ps。能够表示的时间差范围约为 36000 秒，用真空中的光速换算得到对应的测距范围大约为 10 亿公里。

[63:56]	[55:0]
通道号	时间差，有符号整型，LSB ps

## 2 演示方案与测试

### 2.1 ZU3D8 示例方案设计：



模块图设计主要的组成部分为 PS, 8 通道 TDC IP, Clock Wizard 以及 AXI Stream FIFO。其中 Clock Wizard 将外部时钟信号转化为 TDC 所需的 100MHz 时钟, 用户可以根据所用开发板的时钟, 更改 clk wiz 的设置和输入时钟的管脚。TDC IP 的 8 路脉冲输入引出为外部接口, 用户可以根据实际情况修改管脚约束。TDC IP 具有 5 路 AXI-Lite 配置总线, 用来对内部各个模块进行配置, 这些总线通过 AXI Interconnection 连接到 PS。

示例中配备了 3 个 AXI Stream FIFO, 用来将不同的测量数据读到 PS 中。FIFO0 用来读取原始测量数据, 原始测量数据的格式不开放, 但提供 SDK 软件包, 可以调用解码函数, 在 PS 中完成对原始数据的解码, 从而得到 96bit 的时间戳。同时, IP 内部的自校准模块也需要用到 FIFO0, 与 PS 配合, 一起完成自校准 bin size 的功能。

FIFO1 用来读取 PL 直接解码输出的 96bit 时间戳。相比较 PS 软件码的方式,

PL 解码延迟极低 (约 10 个 clock) ,适合超高速应用。用户也可自行编写 PL 中的模块, 替代 FIFO1, 对时间戳进行高速处理。

FIFO2 读取时间差的输出结果, 也就是 2-8 通道相对于通道 1 的时间戳的时间差。

## 2.2 测试数据

这里以示例工程为基础, 对通道 1、2 进行简单的测试, 以验证其高速测量能力, 并验证其测试精度。

TDC IP 的时钟为 100MHz, 是黑金开发板上的 200MHz 差分晶振, 经过 clock wiz 生成。测试信号使用 Silicon labs 的 Si5341 时钟产生器开发板生成, 生成信号的频率可以通过 ClockBuilder Pro 在上位机进行配置。测试信号通过 SMA 转杜邦线接入开发板的 2.54mm 扩展口。

由于输入脉冲与 TDC 时钟源为不同源信号, 为了避免两个晶振的频率差、频率稳定度、频率漂移过大地影响测试精度, 输入通道 1、通道 2 的两路信号设置为同相信号 (相位基本一致), 从而使得通道 2 相对于通道 1 的时间差较小, 减小晶振对通道间时差测量的影响。当测量时间时间较大时, TDC 的时钟源必须是高稳时钟, 否则将导致测量结果包含较大的抖动和误差。

### 2.2.1 70.321M 测试

测试脉冲频率: 70.321MHz

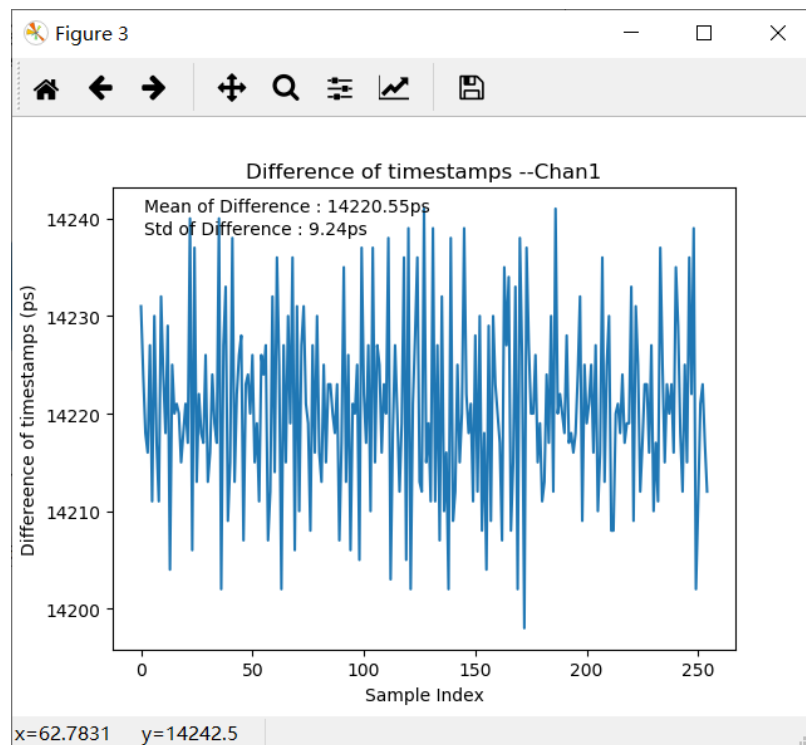
测试目的: 验证高速测量能力, 评估测量精度

通道 1:

根据通道 1 测量得到的 256 个时间戳, 计算两个时间戳的前后时间差, 得到以下结果:

平均时间间隔: 14220.55 ps, 对应的脉冲频率测量结果为: 70.3207M

时间间隔测量的 RMS 为 9.24 ps



通道 2:

根据通道 2 测量得到的 256 个时间戳, 计算两个时间戳的前后时间差, 得到以下结果:

平均时间间隔: 14220.51 ps, 对应的脉冲频率测量结果为: 70.3209M

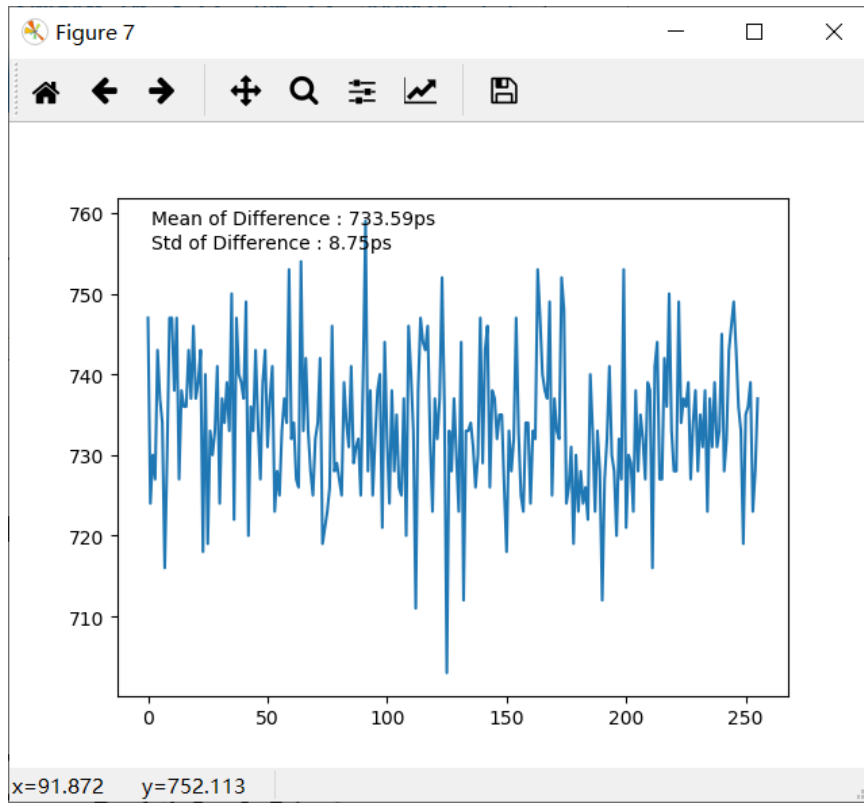
时间间隔测量的 RMS 为 10.03 ps

通道 2-通道 1:



将通道 2 与通道 1 的时间差——对应地相减，得到两通道间脉冲信号的时间差，  
如下图

时间差的 RMS 为：8.75ps。



## 3 ZU3D8 资源利用

### 3.1 资源利用报告

