

## 使用 PolarFire® 元件實現釐米級的飛時測距

Microchip Technology Inc.  
Martin Kellermann

本篇文章展示了如何使用我們的 PolarFire® FPGA 實現對飛時測距的測量。

### 如何使用我們的 PolarFire® FPGA 實現對飛時測距的測量

現代自主機器人、無人機和車輛需要精確瞭解周圍環境才能實現安全導航和移動。

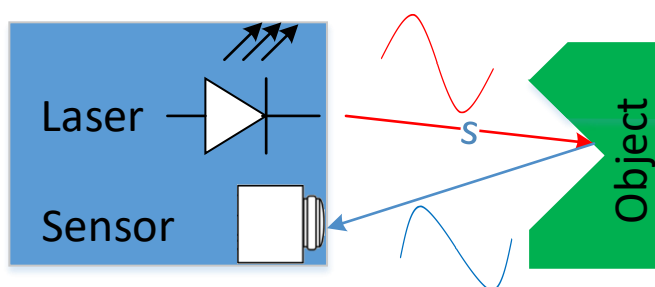
為此，通常採用光感測距（LiDAR）感測器，該感測器透過雷射掃描周圍環境並測量光脈衝的行程時間（即，從光脈衝發向每個測量點到反射回來的時間）。此外，也可以使用現成的飛時測距感測器，但需要在電路板上佔用額外的空間，而且耗時耗力，與減少系統內部元件數量的趨勢相違背。

若論及將多個功能整合到一個元件中，現場可程式設計閘陣列（FPGA）是當之無愧的理想之選，特別是用於實現基於各個測量結果創建點雲（point of cloud）所需的計算。

本篇文章展示了如何使用 Microchip [PolarFire FPGA](#) 以 100 ps 或更高的解析度（相當於大約 3 cm 或更高的距離解析度）對飛時測距進行測量。這是透過使用 FPGA 中的大量進位元鏈的各個元素與內部自由運行的時鐘訊號的已知時間基礎進行比較來實現的。

### 飛時測距測量的基本原理

測量飛時測距時，借助旋轉鏡或[微電子機械系統](#)（MEMS）定向發射雷射脈衝。透過測量反射回來的時間，可以計算出到反射物體的距離。由於測量的是雷射發向物體再返回的行程時間，因此計算距離時需將測量時間減半。



$$s = c * \frac{t}{2}; c = \text{lightspeed} = 3 * 10^8 \frac{m}{s}$$

根據不同的系統要求，可能需要以幾釐米的距離精度測量幾米到幾百米的距離。這將導致測量時間達到微秒級，精度達到百皮秒級。例如：

最小測量範圍： 0.2m

最大測量範圍： 300m

距離解析度： 3 cm

最終測量時間：

最小測量時間：  $t_{min} = \frac{2 * 0.2m}{3 * 10^8 \frac{m}{s}} = 1.33 \text{ ns}$

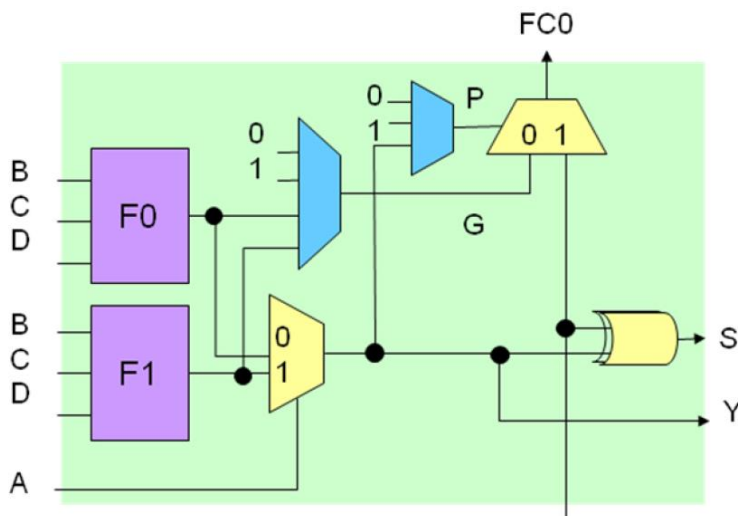
最大測量時間：  $t_{max} = \frac{2 * 300m}{3 * 10^8 \frac{m}{s}} = 2000 \text{ ns}$

解析度  $t_{Resolution} = \frac{0.3 \text{ m}}{3 * 10^8 \frac{m}{s}} = 100 \text{ ps}$

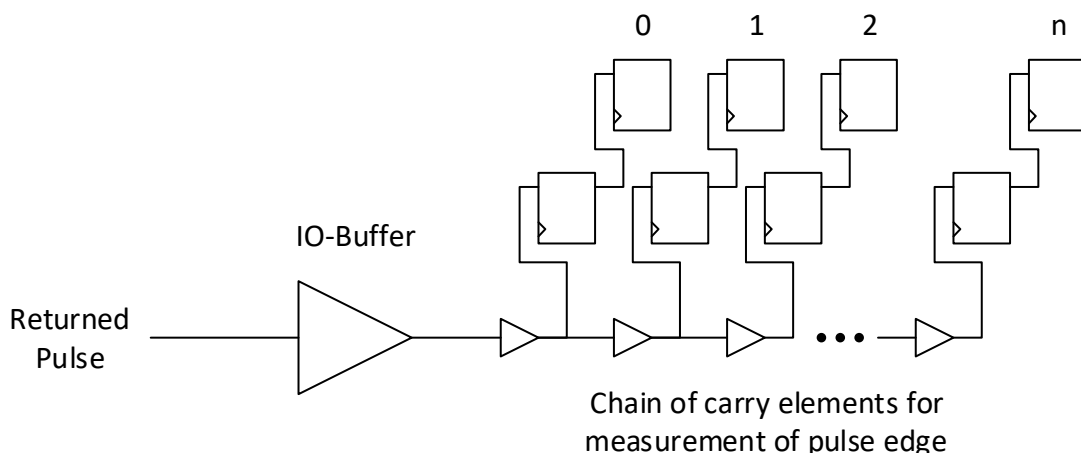
若要在 FPGA 中達到 100 ps 的即時精度，通常使用數十億位元收發器來實現——在本例中，運行速度為 10 Gbps。但是，收發器在 FPGA 設計中屬於高成本元件，最好優先採用其他測量方案。

### 使用進位鏈進行測量

Microchip FPGA 架構中具有非常快速的進位鏈。各個元素可進行多種配置，其中一種是直接將傳入訊號 FCI 轉發到 FCO。在未經校準的情況下，傳播延時在 10 ps 至 30 ps 範圍內。



由於進位元元素非常規則且支援級聯，因此可實現低延時的規則長鏈。使用這種級聯進位鏈實現的溫度計方案能夠以更精細的解析度對傳入訊號進行測量：



反射脈衝的返回光子在 FPGA 之外放大成數位訊號，以便供 FPGA 進行處理。數位脈衝透過統一進位元鏈進行傳輸。在採樣時鐘的上升沿，相關觸發器將暫存延時鏈各個抽頭的值，形成某種溫度測量模式：持續時間越長，值“1”在延時鏈中傳播得越遠。採樣是非同步交叉進行的，因此在某些觸發器處會違反建立時間。在採樣時鐘的下一個上升沿，第一級觸發器的值被讀入第二級觸發器，以清除非同步資料交叉。第二組觸發器必須盡可能靠近其驅動源放置。為了保證這一點，需要在物理位置上加以約束，即把這些觸發器對放在固定位置上。

溫度計測量的初始讀數如下所示：

超前脈衝： 11111...111110000

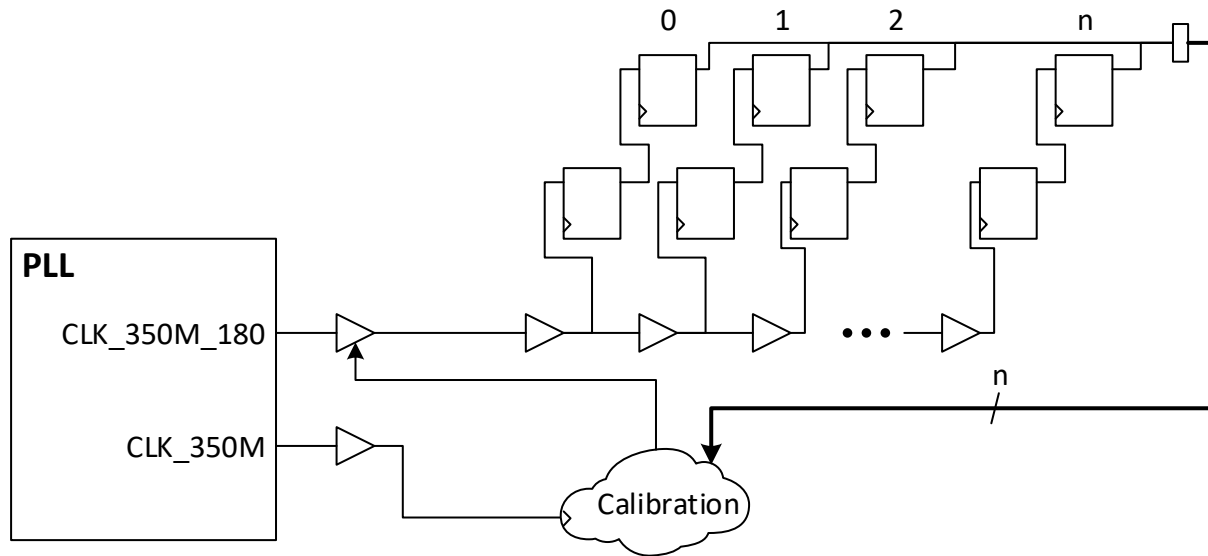
滯後脈衝： 11100...000000000

## 校準和精度

進位元元素未經校準，因為其本身的傳播延時就很短。由於進位元元素的延時很短，需要使用多個元素才能達到奈秒級的測量延時。因此，需要更準確地瞭解每個元素的資料手冊規範值（即 10-30 ps）才能發揮更好的測量效果。

在半導體元件中，規範值在生產範圍內可能有很大差異。但是，使用單個元件時，差異通常要小得多。該特性也用於降低單個進位元鏈元素的延時。

將已知頻率的時鐘訊號發送到延時鏈中，並記錄設置的延時抽頭數量。根據抽頭數量和已知的時鐘持續時間，可以計算出單個抽頭的平均延時。

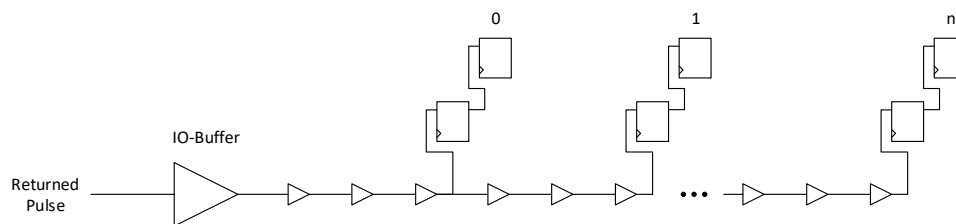


示例：

- 測試時鐘：350 MHz，即週期約為 2.86 ns，半週期約為 1.43 ns
- 抽頭延時：
  - 最小值：10 ps / 延時/抽頭 => 1.43 ns / 10 ps/抽頭 => 143 個抽頭
  - 最大值：30 ps / 延時/抽頭 => 1.43 ns / 30 ps/抽頭 => 48 個抽頭

根據延時鏈中值“1”的數量，可以計算出單個抽頭的平均延時。室溫下的測量結果顯示，單個抽頭的延時約為 18 ps。

非常高的精度需要使用大量的抽頭，這通常是不必要的，較低的解析度便已足夠。為了適應這一點，在設置了一定數量的抽頭後，將用於校準和測量傳入訊號的延時鏈在沒有抽頭的情況下分接到觸發器。



Chain of carry elements for measurement of pulse edge

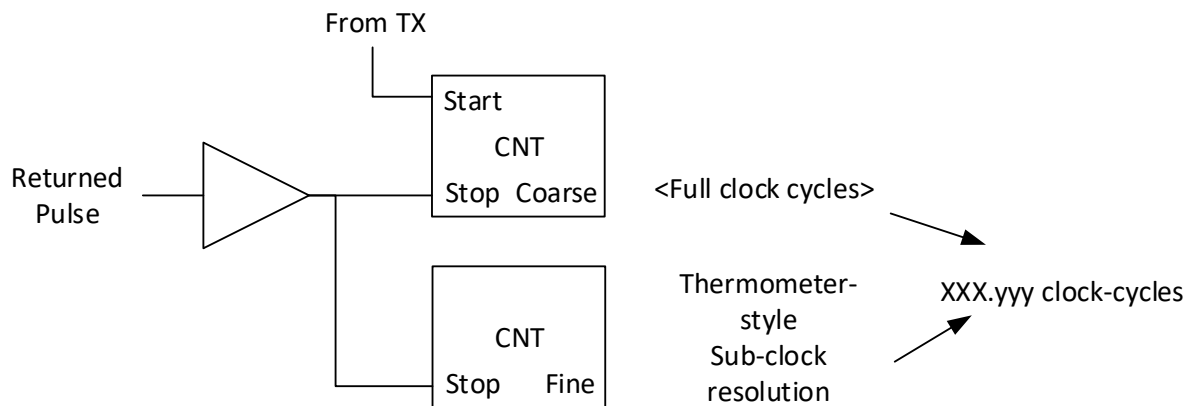
在觸發器之前設置六個抽頭時，原本測量校準時鐘半週期所需的 143 個抽頭縮減為 24 個可見位，簡化了處理和測量。

## 飛時測距測量

在前面的飛時測距測量工作原理部分，計算出了以所需精度測量給定距離範圍所需的最小時間和最大時間。

為實現這些目標，測量分為兩個部分：

- 對測量範圍的粗略測量
- 精細測量，使粗略測量結果達到最終所需的解析度。



粗略測量本質上是使用所需大小的計數器來完成的。該計數器在脈衝發出時啟動，並在脈衝反射回來時停止。

FPGA 極具靈活性，可以輕鬆構建所需解析度的計數器。

以我們上面給出的資料為例，即最大測量時間為 2000 ns，350 MHz 時鐘的時鐘週期為 2.86 ns，對應的計數器大小如下：

$$2000 \text{ ns} / 2.86 \text{ ns/計數} = 700 \text{ 個計數}$$

計數值達到 700 需要使用 10 位元數目器，該計數器可達到的最大值為 1023。

精細測量是使用進位元鏈的第二個實例進行的，反射脈衝將在該實例中傳播。顯示訊號“1”的進位元元素數量相當於反射脈衝的到達時間（與粗略測量時鐘相比）。

由於透過晶片上校準已知進位元元素的平均抽頭延時，因此可以計算出精細測量延時：

$$\text{精細延時} = (\text{可見抽頭總數}) * \text{延時/抽頭}$$

精細測量的結果加到粗略計數器的時鐘週期數中。例如：

- 粗略結果：最終計數器值 = 119
- 精細結果：24 個可見抽頭
- 4 個進位元鏈元素/捕捉觸發器
- 校準結果：20 ps/抽頭

$$\begin{aligned} \text{Total delay } t_{total} &= (119 * 2.86 \text{ ns}) + \left( (24 * 4) * 20 \frac{\text{ps}}{\text{tap}} \right) = 340.34 \text{ ns} + 1920 \text{ ps} \\ &= 342.26 \text{ ns} \end{aligned}$$

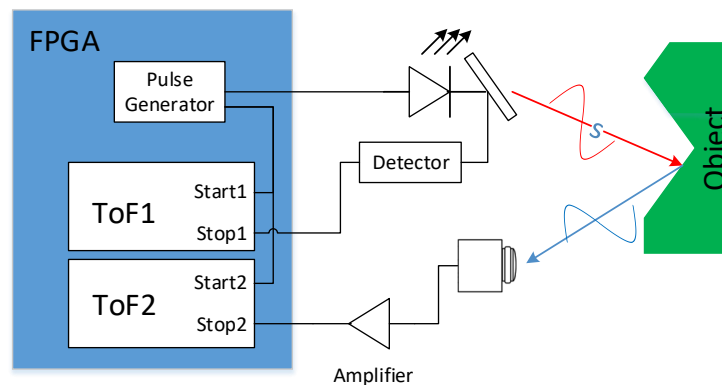
$$\text{Measurement accuracy} = 4 * 20 \text{ ps} = 80 \text{ ps}$$

$$\text{Measured distance } s = c * \frac{t_{total}}{2} = 3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 342.26 * 10^{-9} \text{ s} = 102.678 \text{ m}$$

$$\text{Accuracy distance } s_2 = c * \text{accuracy} = 3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 80 * 10^{-12} \text{ s} = 0.024 \text{ m} = 2.4 \text{ cm}$$

->示例中測得的距離介於 102.666 cm 與 102.690 m 之間

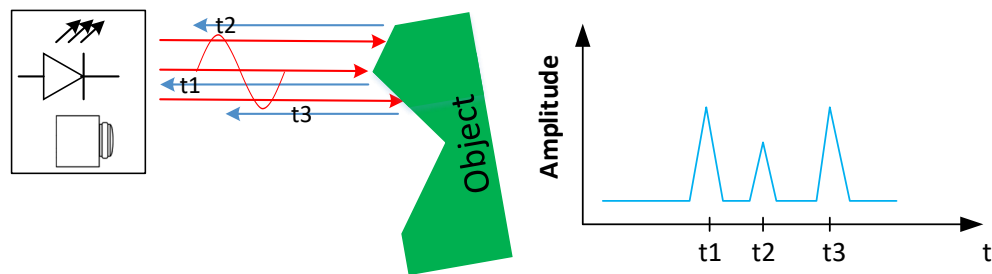
由於 FPGA 中的非數位元件也會導致物理測量延時增加，因此通常建議執行能夠抵消這些額外延時的測量。這可以透過同時進行兩次測量來實現——一次在光脈衝離開系統時停止，另一次在脈衝返回時停止。



## 多重回聲檢測

發射的雷射脈衝具有一定的物理直徑，所引起的反射可能不是 100% 統一的——也就是說，發射一個脈衝可能會有多個回聲返回。這些回聲可能相對靠得很近，需要非常快速地重新啟動精細測量結構。

這是透過將檢測到的值傳輸到獨立的 FPGA 暫存器中進行進一步處理來實現的。採用這種方法，延時線可以在下一個時鐘週期再次接收下一個回聲。



## 進一步處理

LiDAR 應用需要生成所謂的點雲，其中包含雷射掃描器測量點的海拔、水準角度和距離資訊。基於此，每個測量點都被計算為一個具有 X、Y 和 Z 座標的 3D 點。

這些計算涉及的數學運算不在本篇文章的討論範圍之內，但非常適合在 FPGA 結構上並行實現。因此，創建 3D 模型的延時相對較短。

在某些應用中，向測量元件中增添嵌入式處理能力，無論是從性能、成本還是尺寸的角度來看都是有益的。而 [PolarFire® 片上系統 \(SoC\) FPGA](#) 自帶增強型 RISC-V 處理系統，簡直就是為這些應用量身打造的。

## 結論

本篇文章展示了如何使用 Microchip FPGA 以高達釐米級的解析度對飛時測距進行測量。Microchip FPGA 不僅具備高解析度，還兼具高可靠性、業界領先的能效比以及軍事級別的安全性，是能夠實現可靠測量的優秀平臺。這些元件可滿足每個專案通常都會關注的“三大”要求：

### 1) 降低風險



憑藉 PolarFire FPGA 和 SoC 結構的靈活性與高能效比，可以打造面向未來的設計，即當前的架構能夠滿足未來的需求。儘管本篇文章中沒有明確說明，但高可靠性和對單個事件的抗干擾能力使得這些元件成為了高要求應用的理想之選。

### 2) 節省成本



將多項功能整合到較少的元件中可以減少電路板上的元件數量，以便打造外形小巧的系統。

### 3) 實現盈利



FPGA 平臺極具靈活性，能夠輕鬆適應不同的應用需求或最終用戶。因此，使用極低的開發投資成本即可打入更多的市場。

總而言之，Microchip PolarFire SoC 和 FPGA 能夠滿足“三大”應用要求，是面向汽車和工業應用的理想之選。