

ToF 简介

V1.0 - 4/26/20

Table of Contents

1 概述	2
2 ToF 基本原理	3
3 ToF 分类	3
3.1 直接 ToF	3
3.2 间接 ToF	4
3.2.1 脉冲调制 (PL-iToF)	5
3.2.2 连续波调制 (CW-iToF)	6
4 总结	8
5 修订记录	8

1 概述

3D 相机已经成为智能手机创新的趋势之一，结构光方案（Structured Light）随苹果（Apple）iPhone X 于 2017 年推出，为消费电子领域的 3D 成像和传感方案设定了技术和用例标准。之后，与苹果采用结构光方案的 3D 相机不同，安卓智能手机厂商将飞时测距（ToF, Time of Flight）广泛应用于高端智能手机的后摄模组之中，智能手机的后置 3D 传感应用案例已经显现，并成为新一轮增长驱动。除智能手机之外，ToF 方案在 AR/VR、智能安防、机器人视觉、驾驶监控、自动化医疗等领域都拥有广阔的发展前景。目前，ToF 技术在这些领域的应用还处于起步阶段。



(a) AGV避障



(b) 体感互动



(c) 机器人导航



(d) 体积测量

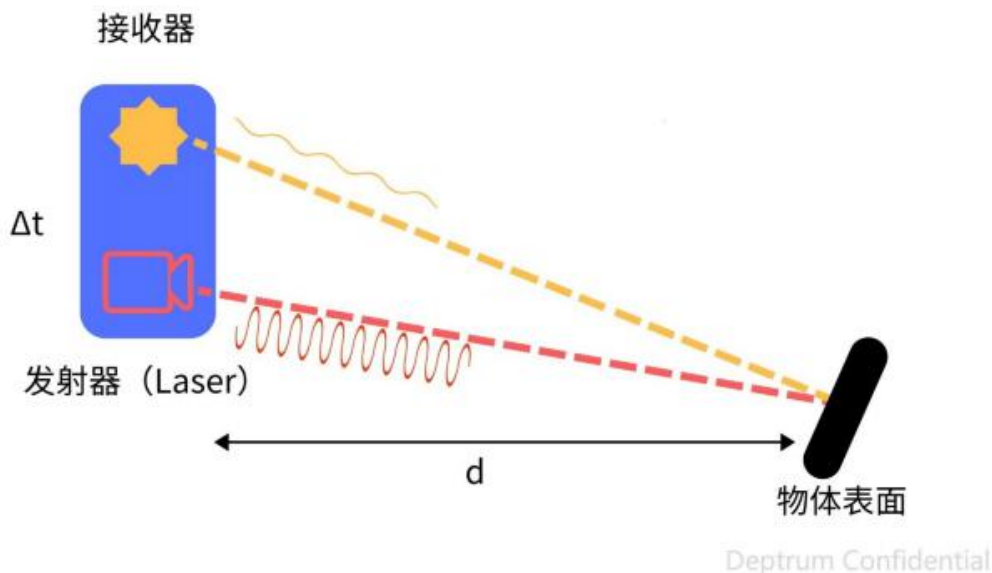
Deptrum Confidential

2-1.ToF 典型应用

知名行研机构 Yole Développement 最新发布的《3D Imaging and Sensing 2020》报告预测，ToF 3D 成像和传感产业在未来五年将有爆发式增长，其在 2019 年的市场收入为 6.46 亿美元，预计到 2025 年将达到 42 亿美元，年复合增长率高达 36.8%。2019 年越来越多的智能手机厂商选择在旗舰机中使用 ToF 摄像头，促进了 3D 成像和传感技术在智能手机行业的落地与发展。Yole 更是预测 ToF 的市场收入会在 2021 年超过结构光，5 年内将有过 6 亿部智能手机装配 ToF 传感器。

2 ToF 基本原理

飞时测距 (ToF: Time of Flight) : 顾名思义就是通过测量光飞行的时间来计算距离。ToF 传感器通过光源驱动芯片调制信号, 调制信号控制激光发射器 (Laser) 发射高频调制的近红外光, 这些红外光照射到物体表面漫反射后, 接收器通过发射光与接收光的相位差或者时间差来计算深度信息。现大部分 ToF 传感器采用背照式 CMOS 工艺技术, 该工艺大幅度提高了感光面积, 提升了光子收集率和测距的速度, 响应时间能够达到纳秒级, 在远距离情况下也能保证高精度。



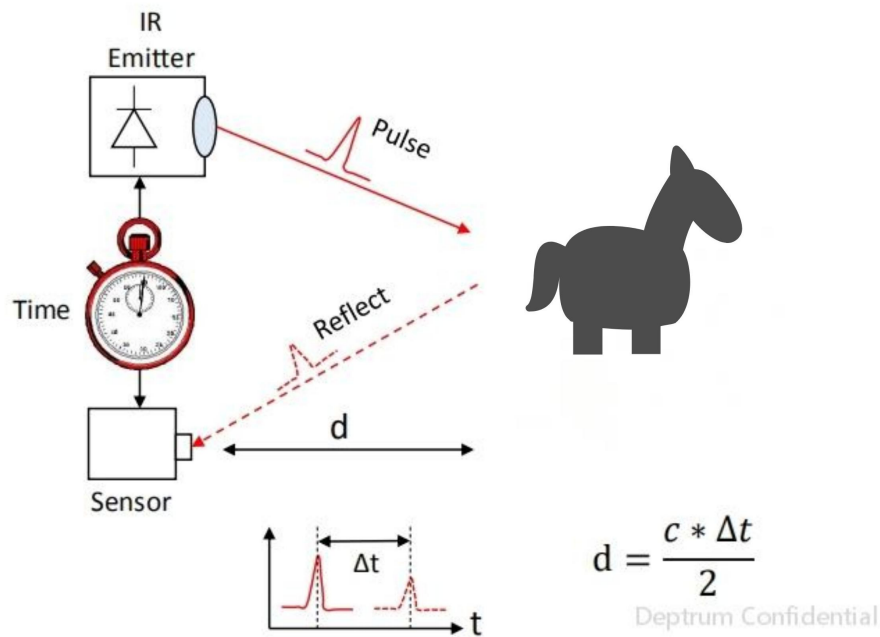
2-2.ToF 原理图

3 ToF 分类

3.1 直接 ToF

dToF (direct Time-of-Flight) : 顾名思义, 就是直接测量光脉冲的发射和接收飞行时间差, 从而计算出实际距离。

光速 (v) 已知, 可以用接收传感器测算物体位置反射回来的时间差 (Δt), 根据 $d = \Delta t \cdot c / 2$, 就可以计算出物体不同位置的距离 d (深度信息 Z)。即测算出时间差 Δt , 就得到了距离 d 。如何精准测量 Δt 是技术实现的关键。



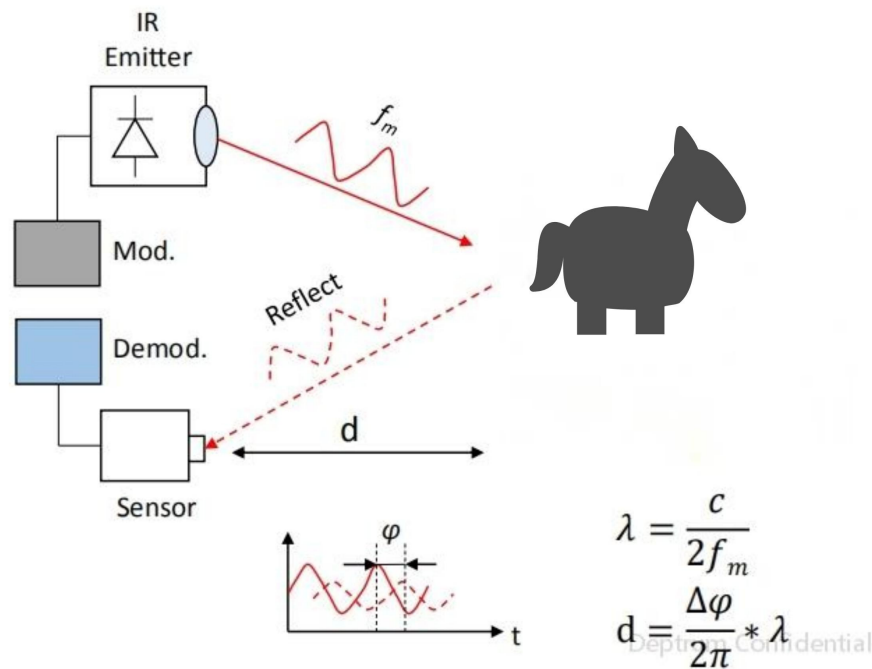
2-3.直接 ToF 示意图

由于激光安全的限制以及消费类产品的功耗限制，ToF 摄像头发射的脉冲能量有限，但是需要覆盖完整的视场区域。光脉冲在经过反射回到接收器时，能量密度降低了超过一万亿倍。于此同时，环境光作为噪声，会干扰接收器对于信号的检测和还原。在这种情况下，探测器获取的信噪比不足以直接还原脉冲的模拟信号，进而导致直接测量深度存在很大的误差。因此，d-ToF 方法需要有灵敏度极高的光探测器来检测微弱的光信号，可使用具有探测单个光子的灵敏度的单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)，技术难度较高。

目前主流的方式是发射经过一定手段调制的光波，测算反射回来的光波的相位偏移 $\Delta\phi$ ，间接计算出时间差 Δt ，从而得到距离 d。即间接 ToF，iToF (indirect Time-of-Flight)。

3.2 间接 ToF

iToF (indirect Time-of-Flight)：间接测量时间差，来计算出实际距离。即发射经过一定手段调制的光波，通过传感器在不同时间窗口采集到能量值的比例关系，解析出信号相位偏差 $\Delta\phi$ ，间接测量发射信号和接收信号的时间差，间接求计算距离。发射调制光波，相位差 $\Delta\phi$ 的获取是关键。



2-4.间接 ToF 示意图

调制的方法，又可以分为脉冲调制（Pulsed Modulation）和连续波调制（Continuous Wave Modulation）。

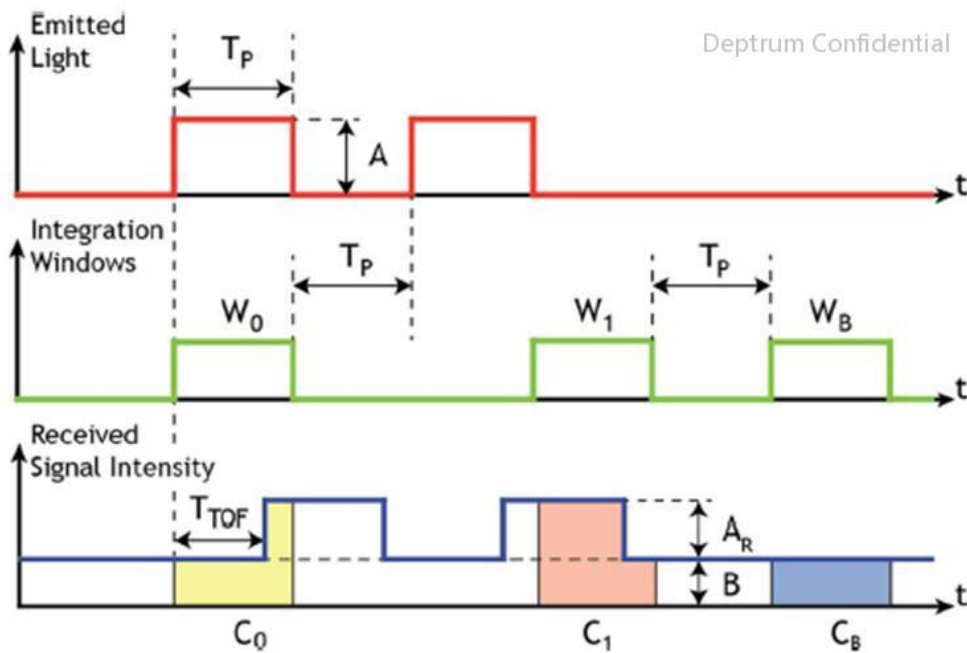
3.2.1 脉冲调制 (PL-iToF)

在 PL-iToF 系统中，激光光源发射带有振幅信息 A 和 T_p 的光脉冲，根据光的飞行速度 C ，可计算得到最远探测距离 $d_{MAX} = T_p * C/2$ 。发射光信号，背景光以及探测器的噪声集成在三个不同时间段内。PL-iToF 通过双采样技术提高精度，同激光脉冲同步的第一个窗口 W_0 ，同激光信号正交的第二个窗口 W_1 ，是累积反射光信号的两部分，且每个窗口与目标距离成比例；第三个窗口 W_B 在没有光脉冲发射时开启，仅收集背景光信号。如果 C_0 ， C_1 ， C_B 分别表示在窗口 W_0 ， W_1 ， W_B 的光子数，目标距离 D ，接收到的有效光强度 A_R ，背景光 B 可由以下公式得到

$$D = \frac{c * T_p}{2} * \left(\frac{C_1 - C_B}{C_0 + C_1 - 2 * C_B} \right)$$

$$A_R = \frac{C_0 + C_1 - 2 * C_B}{T_p}$$

$$B = \frac{C_B}{T_p}$$



2-5.PL-iToF 示意图

3.2.2 连续波调制 (CW-iToF)

通常采用正弦波调制方式。接收和发射端正弦波的相位偏移和物体距离摄像头的距离成正比，通过相位偏移来测量距离

$$\varphi_{ToF} = a \tan\left(\frac{C_1 - C_2}{C_3 - C_4}\right)$$

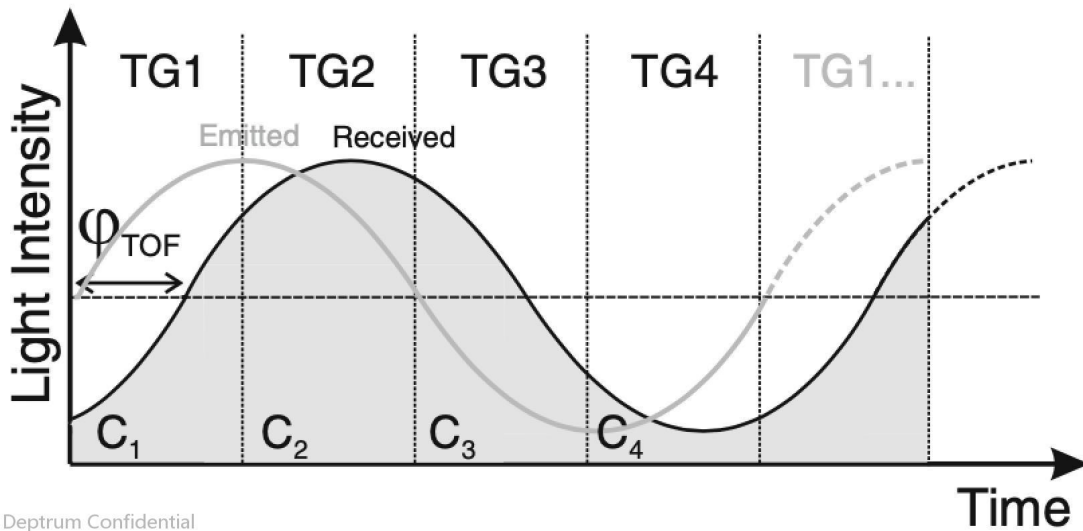
相位偏移 (φ) 和深度 (D) 是由积分能量值 C_1, C_2, C_3, C_4 从上述公式解析得到，这几个积分能像值，是四个不同相位延迟的接受窗口采集到的能量，分别对应于在相位采样点 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 采样，即：

$$\begin{aligned} C_1 &= A \sin(\varphi) \\ C_2 &= A \sin(\varphi + 90^\circ) = A \cos(\varphi) \\ C_3 &= A \sin(\varphi + 180^\circ) = -A \sin(\varphi) \\ C_4 &= A \sin(\varphi + 270^\circ) = -A \cos(\varphi) \end{aligned}$$

其中 A 为接收到正弦信号的幅度。

精度方面，CW-iToF 精度主要受制于随机噪声和量化噪声，前者与接收光信号信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 成反比，后者与正弦波调制频率成反比。因此，为了提升精度，CW-iToF 一般采用大功率段积分时间采样，提高接收光信号 SNR；同时提高调制频率以抑制量化噪声。

量程方面，CW-iToF 可解析的相位范围为 $[0\sim 2\pi]$ ，一次其最大量程为 $D_{\max} = c/2f_m$ 。即，频率越高，精度越高，量程也越小。超过量程的深度，将出现周期性的相位卷绕 (Phase wrap)，侧脸值错误落在 $[0\sim D_{\max}]$ 内。



Deptrum Confidential

2-6.CW-iToF 示意图

光鉴科技的 ToF 摄像头就是采用的 cwToF 的方案，且在此基础上，使用 WFP 光子芯片 (纳米光子芯片) 调制光场，自研高性能 mToF 算法计算深度信息，结合多传感融合技术，可实现深度图效果的进一步优化。

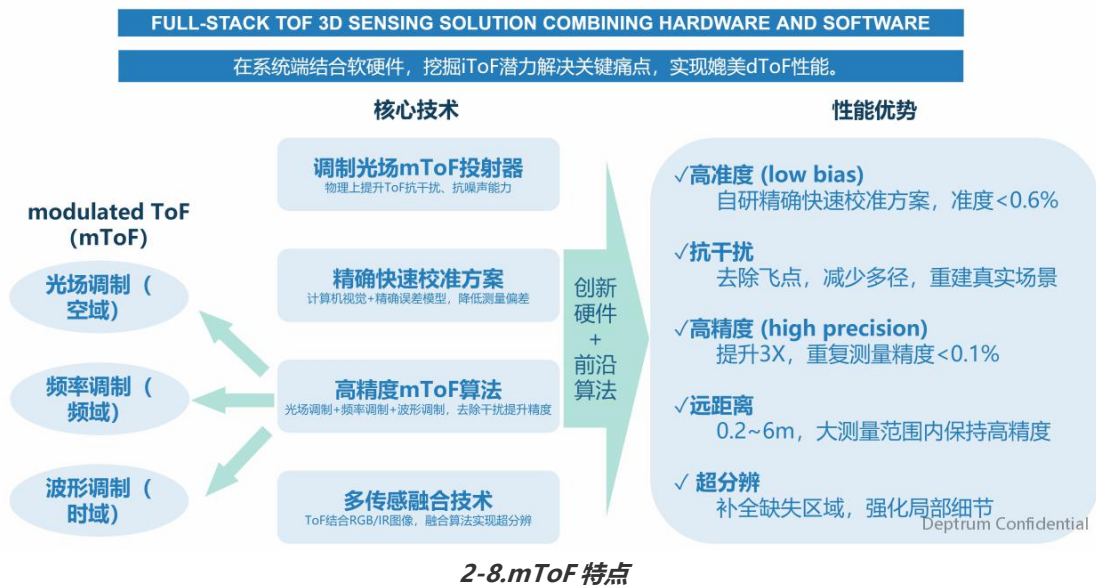


Deptrum Confidential

2-7.Deptrum Stellar 200

4 总结

与结构光方案相比，ToF 方案模组方案复杂度低，没有基线（Baseline）限制，更利于小型化。其次具备抗干扰性强，帧率高的特性，因此在动态场景中能有较好表现。在成熟的3D 相机供应链生态系统中，ToF 方案也拥有成本优势。这些也是 ToF 赢得安卓智能手机厂商青睐的主要原因。



光鉴科技独家光场调制 ToF (modulated Time-of-Flight) 方案，通过核心技术的应用，进一步提升了 ToF 摄像头的性能。

5 修订记录

版本	描述	日期	修订者
V1.0	最初版本	4/26/20	T