TND6254JP/D
Rev. 3, June – 2020

ON Semiconductor®

直接ToF測距アプリケーションにおけるSiPM

本ホワイトペーパは、SiPM (Silicon Photomultiplier: シリコンフォトマルチプライヤ) をベースとしたLiDAR (Light Detection and Ranging: 光による検出および測距) システムの開発を支援することを目的としています。以下のセクションには、レーザ、タイミング、および光学パラメータの観点から直接ToF (Time-of-Flight: (光の)飛行時間) レンジファインダ(距離計)の設計と実装に関する情報、およびこのようなシステムにSiPMを組み込む場合に考慮しなければならない重要な側面の詳細分析について記載しています

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2016

June, 2020 – Rev. 3
Publication Order Number:
TND6254JP/D

ON Semiconductor®

直接ToF測距アプリケーションにおけるSiPM

はじめに

LiDARは携帯用距離計、車載用ADAS (先進運転支援システム)、ジェスチャー認識、および3Dマッピングなどのアプリケーションで採用が増えている測距技術です。フォトセンサとしてSiPMを使用すると、特に車載品や大量生産製品向けには、APD、PINダイオード、PMTなどの代替センサ技術より多くのメリットが得られます。オン・セミコンダクターのSiPMには、以下のような特徴があります。

- 波長250 nm〜1100 nmの単一光子検出
- 低電圧 – システムの実装が容易
- 低電力 – 低動作電圧でシンプルな読み出し回路により低消費電力設計が可能
- 高バンド幅および高速応答時間 – 測距時間を最短化
- 低レーザパワーによる直接ToF測距技術を活用可能
- 低ノイズおよび高ゲイン – 良好な信号対ノイズ比(SNR)を達成可能
- 標準的なCMOS製造プロセス – 低コストで均一性の高いスケーラブルな生産
- 小型SMTパッケージ – 1 mmのセンサが利用可能

SiPMセンサ技術への移行には、他のセンサとは異なる制限事項が発生します。本ホワイトペーパは、この技術のメリットを最大限に活かして、SiPMセンサを用いた実用的な設定を可能な限り早急に実現するための支援を目的としています。この目的に向けて、オン・セミコンダクターは、ユーザ支援のための3つのツール、すなわちシミュレーション用のMATLABの測距モデル、測距デモ機のハードウェア設定、および本書を作成しました。

- SiPMをベースとした測距アプリケーションのシミュレーションを容易に行うために、直接ToFシステムの詳細MATLABモデルを作成しました。このモデルは測距システムの設計を支援するのに使用でき、また修正して幅広いアプリケーションと実装のシミュレーションに使用することができます。
- SiPMベースのLiDARのデモ機システムを製作しました。この「第1世代」システムを用いて測定を行い、MATLABモデルによるシミュレーション結果を検証しました。
- 本書は、新規ユーザがSiPMベースの直接ToF測距システムを開発するのを支援することを目的としています。さまざまなシステムと環境要因が、結果として得られる信号対ノイズ比に与える影響について取り上げています。

直接ToF測距システムの設計

直接ToF測距システムに必要な基本構成要素は、Figure 1に示すように以下の通りです。

1. コリメーション光学系を備えたパルスレーザ
2. 検出光学系を備えたセンサ
3. タイミングおよびデータ処理回路

本書では、レーザ、センサ、読み出し回路のシステム設計とアプリケーションの環境に重点を置いています。本書で実施したシングルポイント直接ToFの基礎検討は、より複雑なスキャンニングやイメージングシステムに拡張することができます。

直接ToF技術では通常、目に安全なパワーと赤外領域の波長で、周期的なレーザパルスを目標物に向けます。目標物がレーザ光子を拡散および反射し、光子の一部が反射してセンサに戻ってきます。センサは検出したレーザ光子(および一部はノイズによる検出光子)を電気信号に変換し、タイミング回路によりタイムスタンプが押されます。この*飛行時間t*は、式$D=c\Delta t/2$を用いて目標物までの*距離D*を計算するのに使用できます。ここで、c = *高速*およびΔt = *飛行時間*です。センサは戻ってきたレーザ光子とノイズ(周囲光)を弁別しなければなりません。レーザパルスごとに少なくとも1つのタイムスタンプが取得されます。これはシングルショット測定として知られています。多数回のシングルショット測定のデータを結合して距離測定値を生成し、検出されたレーザパルスのタイミングをそこから高精度、高確度で抽出できれば、信号対ノイズ比を飛躍的に改善できます。検出されたレーザ光子パルスからタイミング情報を取得するための読み出し方法は、以下のとおり数種類あります。

測距用の読み出し方法

- LED (立ち上がりエッジ弁別) – 複数の光子信号の立ち上がりエッジを検出します。タイミング精度は、戻ってきた光信号の立ち上がりの弁別能力によって決まります。この方法はレーザパルス幅の影響を受けません。
- 全波形デジタル化 – 全波形をデジタル化し、また精度向上のためにオーバーサンプリングすることも可能です。短いレーザパルスや高繰り返しレート光源の実現が困難な場合があります。
- TCSPC (時間相関単一光子計数) – 最高精度と最大周囲光除去率を実現できます。この方法では、レーザパルスごとに 1 個未満の信号光子を検出する必要があります。この方法は周囲光に対する耐性がありますが、高速かつ高精度の測定を実現するには、短いパルス持続時間、高繰り返しレート、および高速タイミング回路が必要です。
- SPSD(単一光子同期検出) – 高周囲光除去率を実現できるTCSPCの一形式です。回路は距離の曖昧さを扱えるように設計しなければなりません。

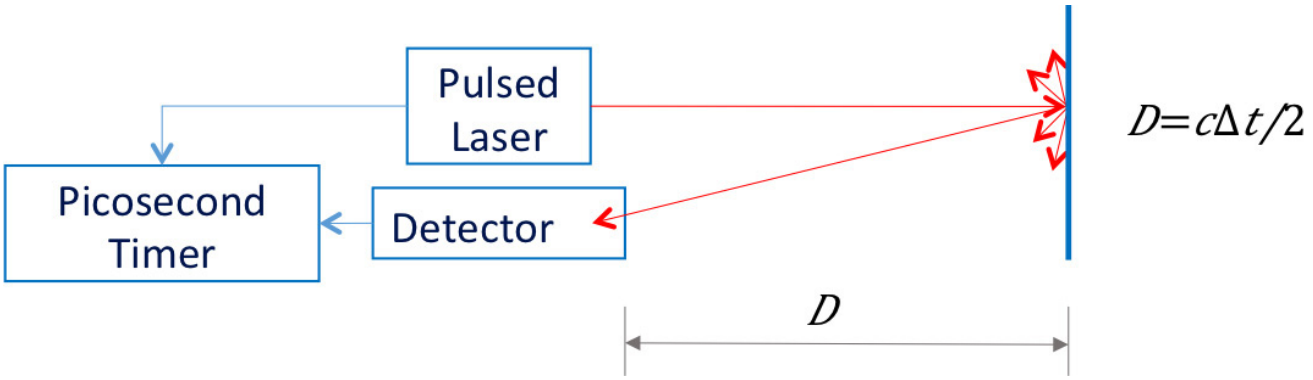

Figure 1. Direct ToF Ranging Technique Overview

直接ToF測距システムのモデル化

直接ToFシステムのMATLABモデルを作成しました。モデルのブロック図をFigure 2に示します。このモデルの目的は、Table 1に示すのと同様のシステムパラメータを前提として、システム全体の性能を予測することです。

最初のステップは、選択した光学系の状態(関連するシステムパラメータを変化させることによって変更可能)を前提として、センサでの光レベル(周囲光とレーザ光の両方)を解析的に計算することです。光レベルの計算値とセンサの飽和限界値を比較することにより、選択した設定が測距に適しているかどうかを確認できます。特定の設定が測距に不適切である場合、そのシステムパラメータを変化させることによって、設定自体の改善を評価できます。

モデルの2番目の部分は、センサの確率論的性質、主として光子検出効率(PDE)とタイミングジッタを再現するモンテカルロシミュレータです。このステップでは、現実的なセンサ出力がシミュレーションによって得られます。解析部分とは対照的に、このステップでは取得時間、レーザの繰り返しレート、レーザのパルス幅などのタイミング情報を考慮に入れます。モンテカルロシミュレーションの結果は通常、弁別器の後にTDC (時間–デジタル変換器)が続く読み出しモデルに渡されます。TDCによりタイムスタンプのヒストグラムを発生し、そこから距離を抽出することができます。

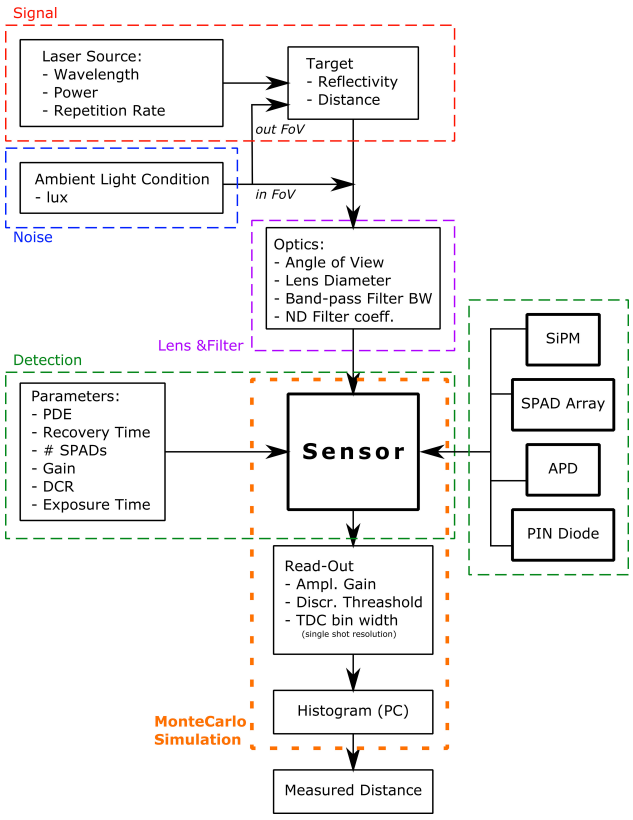

Figure 2. Calculations of Light Levels are Paired with a Monte Carlo Simulator so that a Full System Output can be Reproduced

Table 1. VARIABLES IN AN SIPM DIRECT TOF RANGING SYSTEM

Symbol	System Parameter	Definition
	Acquisition method	This could be leading edge detection (LED) or time correlated single photon counting (TCSPC).
f	Laser repetition rate	Clock rate of the laser. This is the same as the detector single-shot rate.
W_{laser}	Laser pulse width	
λ_{laser}	Laser wavelength	Wavelength of the laser beam.
$FWHM_{laser}$	Laser FWHM	Spectral FWHM of the laser beam.
P_{laser}	Laser peak power	Peak power of each laser pulse.
θ_{laser}	Laser beam divergence	The angle at which the laser beam diverges from a point source.
d	Laser-sensor distance	The perpendicular distance between the laser diode and the sensor limits the minimum range. Ideally this should be 0.
Ø	Collection lens aperture	A plano convex lens is placed directly in front of the sensor. Effective aperture after mounting of the lens.
F_{lens}	Collection lens focal length	
BP	Optical filter bandpass wavelength	Filter placed between sensor and collection lens.
$FWHM_{BP}$	Optical filter FWHM	
θ_{det}	Sensor angle of view	The angle at which the field of view of the sensor diverges from a point source.
SiPM	SiPM	SiPM sensor.
A	Amplifier gain	SiPM signal amplifier.
V_{th}	Threshold voltage	Comparator threshold. Dictates minimum light level required to be considered an event.
t_{acq}	Acquisition time	The total time during which samples are recorded by the sensor for inclusion in the data. = 1/frame rate.
LSB_{TDC}	TDC resolution	TDC bin size limits the single-shot resolution. The use of multiple single-shot measurements can yield resolution significantly better than the TDC bin size.
R	Target reflectivity	
D	Distance to target	Distance between the ranging module and the target.
E_v	Ambient illuminance	The maximum illuminance on the sensor due to ambient light.

測距ヒストグラム

レーザパルスが発射されるたびに、取得システムがシングルショット測定を実行します。レーザパワーや目標物までの距離など多くの要因によって、パルスごとに検出されるレーザ光子数が低い場合があります。理想的には、それぞれの検出光子にタイムスタンプが押されます。しかし、シングルショット測定ごとのタイムスタンプの数は、TDCの不感時間により制限される場合があります。通常、それぞれに1つ以上のタイムスタンプが含まれる多数のシングルショットタイミング測定結果を結合して、一つのフレームが生成されます。単一フレーム間に得られたタイミングデータ一式は、Figure 3に示すようにヒストグラムの形にプロットされます。システムの測距性能は、システムパラメータに影響を受けるヒストグラムデータの質によって制限されます。7ページにある**システム変数の変化の影響**セクションに詳述されたシステムパラメータの解析からわかるように、起こりうる制限要因とトレードオフがいくつかあります。以下で用いられている測距ヒストグラムも、さまざまなパラメータが取得データに与える影響を記述するのに有効な視覚的表現です。基本的なヒストグラムの信号とタイミングのパラメータについて以下に説明します。

このヒストグラムの信号対ノイズ比SNR_Hは、信号のピークと最大ノイズピークの比です。

$$SNR_H = \frac{\text{Signal peak value}}{\text{Noise peak value}}$$

本モデルでは測定時間に以下の用語を適用します。

$$f = \text{laser frequency}$$

レーザ繰り返しレートは、曖昧さを排除して測定可能な最大ToFを制限し、これによりシングルショット測定当たりの時間が規定されます。

$$\text{Single shot Measurement time, } t_{SS} = \frac{1}{f}$$

フレームのサイズは、ヒストグラム当たりのシングルショット測定数です。フレームサイズを大きくするとSNR_Hを改善でき、より良質のヒストグラムを生成できます。測距速度は次式のとおりフレームレートで規定されます。

$$\text{frame rate} = \text{number of range measurements per second} = \frac{1}{t_{acq}}$$

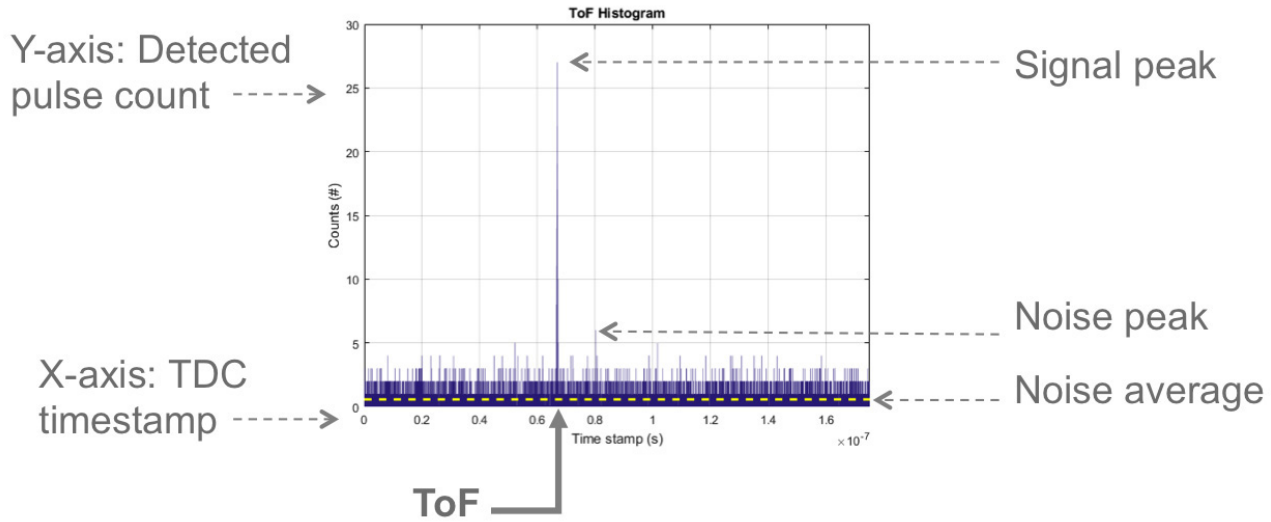

Figure 3. Histogram Example from Simulation Showing Signal, Noise and Time of Flight

システム変数の変化の影響

システム設計パラメータは、特定アプリケーションの要求事項に基づいて変わります。このセクションでは、直接ToF測距システムのモデルを用いて、取得データが7つの各主要パラメータによってどのように影響を受けるかを説明します。目標物までの距離と周囲光レベルの影響も示します。要点をTable 2にまとめています。

以下のセクションに示すヒストグラムは、シミュレーションによって得られるもので、各ヒストグラムには単一フレームで得られたデータセット全体が含まれていると考えられます。計算速度を考慮して、掲載したヒストグラムの取得時間は短くなっています。

1. 基準ヒストグラム

Figure 4に、右の青色コールアウトボックスの記載条件で実行したシミュレーションにより得られた基準ヒストグラムを示します。この設定は、別のシステムパラメータ値の影響を示すための基準点として使用されます。

以下の解析に使用したシステムパラメータは、代表的な5 mの測距アプリケーションの基準点を与えるために選択したものです。パラメータのいくつかは、シミュレーションを容易にし、最適化した設定を反映するのではなく、例を示すために選択しました。

以下の各セクションでは、1つのパラメータのみを変更して、パラメータが収集データに関してシステムに及ぼす影響を示すためにシミュレーションを再実行しています。

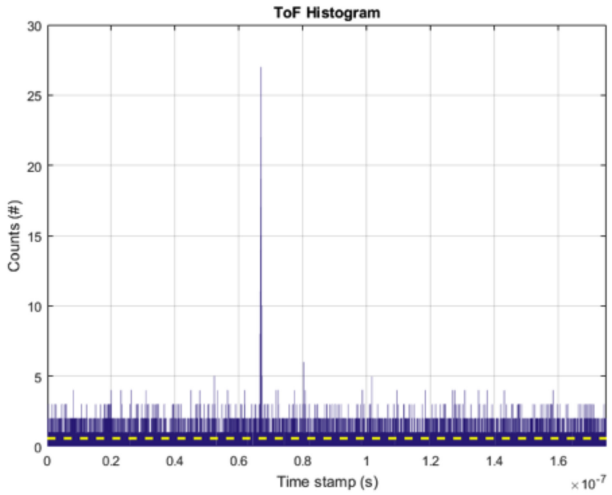

Figure 4. Reference Histogram

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 905 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = 4.5	

Table 2. SUMMARY OF EFFECTS OF KEY PARAMETERS

Parameter	Summary	Section
Laser Source Parameters		
Laser pulse repetition rate	Affects quality of data that can be collected in fixed time interval.	2
Laser pulse width	May be dictated by laser availability. Only the front edge of the laser is required for LED therefore shorter laser pulses are more efficient.	3
Laser wavelength	Optimal wavelength may be chosen in terms of solar irradiance model.	4
Sensor Parameters		
Collection lens aperture	Essential that this is limited to prevent sensor saturation in high ambient light conditions.	5
Sensor angle of view	Essential that this is limited to prevent sensor saturation in high ambient light conditions.	6
Optical filter bandpass	Should be as narrow as possible to eliminate all spurious noise.	7
SiPM microcell size	Spectral range, PDE, timing and dynamic range may be optimized but choice of SiPM is secondary to other system settings.	8
Conditions		
Distance to target	Dictates required laser power and achievable accuracy.	9
Ambient light	Limits achievable SNR and affects quality of data.	10

2. レーザパルスの繰り返しレート

レーザパルスの繰り返しレートを高くすると、シングルショット測定数が増加するため既定の取得時間で検出される戻りレーザ光子が多くなり、ヒストグラムの質が向上します。取得するノイズカウントが増えるため、最大ノイズピークも増加します。しかし、ノイズには相関性がないため、Figure 5に示すように全体のSNR_Hは増加します。

選択できる最大のレーザ繰り返しレートには、曖昧さなしで測距できる目標物までの距離がレートによって制限されるため上限があります。例えば、最大の測距目標距離が300 mの場合、1 MHzの最大繰り返しレートが使用できます。100 mが最大目標距離の場合には、3 MHzを使用することができます。

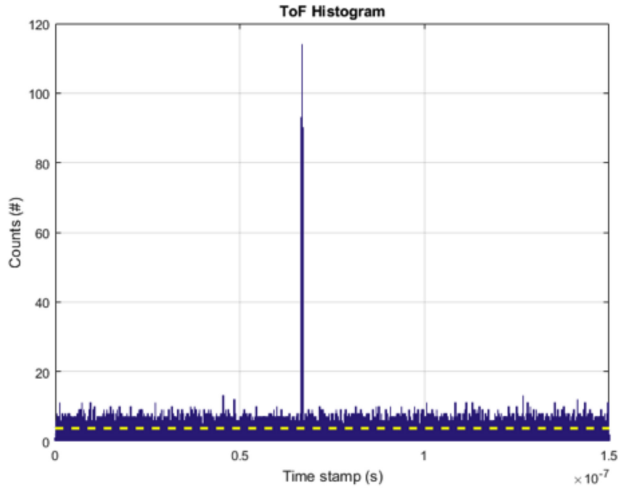

Figure 5. Effect of Laser Repetition Rate

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 1 MHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 905 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = 10.5	

3. レーザパルス幅

Figure 6に示すように、レーザパルス幅が広くなるとヒストグラムの信号のピークが広がります。矩形波パルスでは、最初の検出光子の飛行時間のみを特定するために、パルスの立ち上がりエッジを弁別する必要があります。後続の光子は、有用なToF情報を伝えません。このため、レーザパルスが短いほど適しています。しかし、実際の設定では、適切なレーザを利用できるかどうかが決定要因になる場合があります。

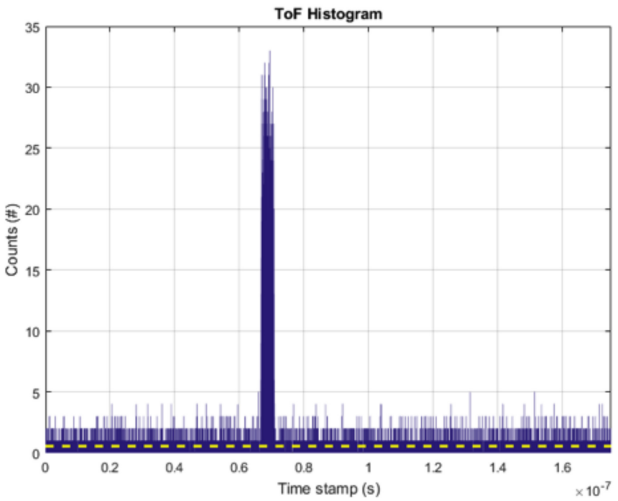

Figure 6. Effect of Wider Laser Pulse Width

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 905 nm	**W_{laser} = 4 ns**
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = 6.2	

4. レーザ波長

レーザ波長の選択は、目の安全性や特定波長の低コストレーザの入手可能性など、多くの要因に左右されます。レーザ波長の選択は、さまざまな波長での太陽の放射照度やセンサの検出効率のため、測距性能にも影響を与えます。

太陽ノイズを受けるシステムに対しては、太陽放射強度が長波長になるほど低くなることを利用して、より長い波長を選択することができます。この影響はFigure 8に示す太陽放射強度のモデルから確認できます。

940 nmのレーザ波長では、モデル化したSiPMのPDEは、約1%から0.3%に低下します。他のパラメータがすべて一定であれば、レーザ光子と周囲光光子の検出効率はどちらも低下します。この特別な設定では、正味の影響はFigure 7に示すように、全カウント低下によるSNR_Hの低下です。もちろん、対象とする波長でのPDEを改善した別のSiPMを選択すれば、結果のヒストグラムの信号カウントは高くなり、SNR_Hが向上します。同様に、他のパラメータを変化させて低下したPDEを補うこともできます。

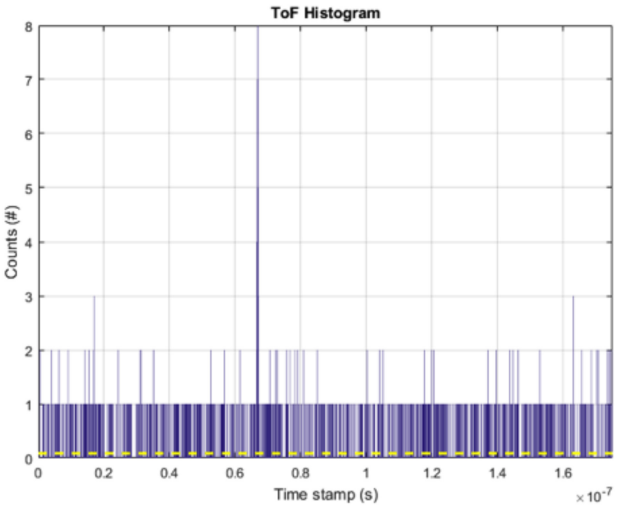

Figure 7. Effect of Increased Wavelength on Histogram

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 940 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = 2.7	

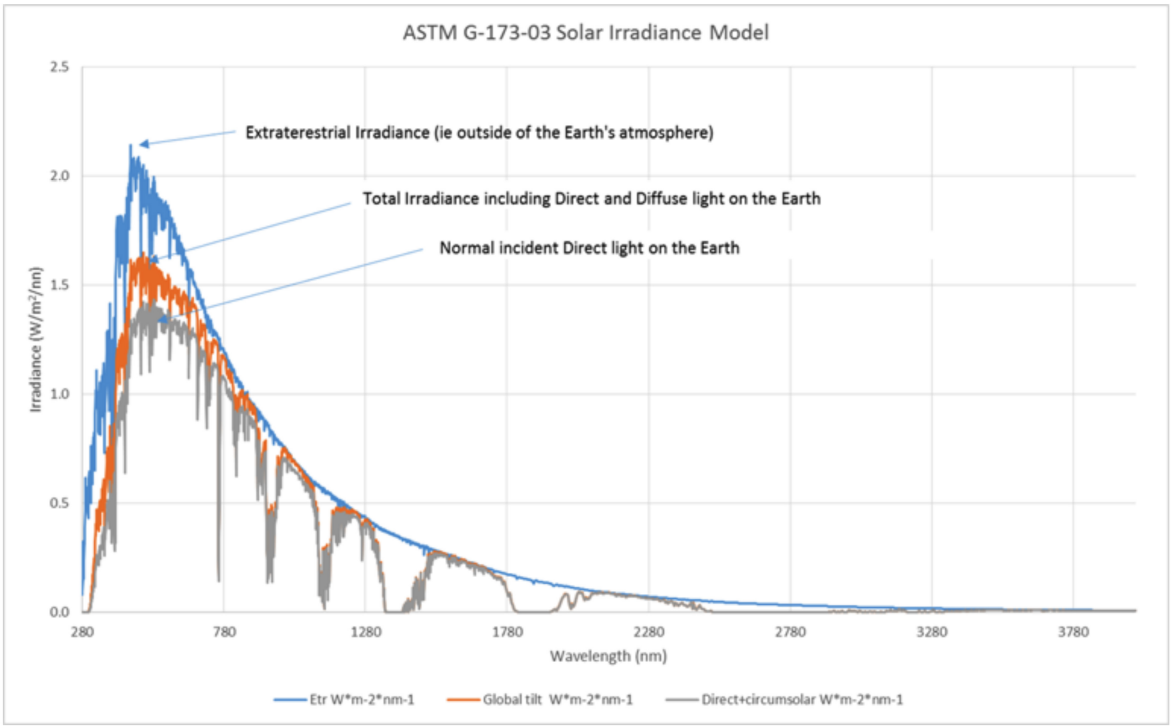

Figure 8. Solar Irradiance Model

5. 集光レンズの開口

レンズの開口が広くなると、戻りレーザ光子数は一定のまま、検出される周囲光が多くなります。

Figure 9に示すヒストグラムのウィンドウの開始部分に大きなオーバーシュートがあることから明らかなように、SiPMは飽和しやすい傾向があります。センサが飽和すると、SiPMでレーザ光子をそれ以上検出できず、信号検出率とSNR_Hが低下します。

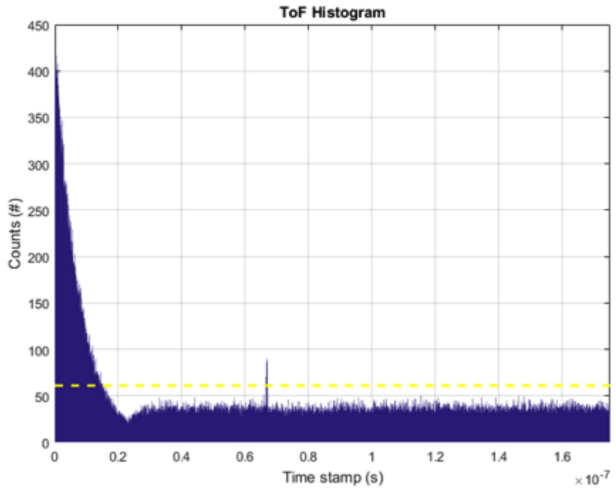

Figure 9. Effect of Increased Collection Lens Aperture

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 905 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 20 cm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = 0.2	

6. センサの画角

センサの画角は、センサのサイズと集光レンズの焦点距離によって決まります。センサの画角が20°まで増加すると、SiPMに入射する周囲光が著しく増加します。そして、Figure 10に示すケースのように、SiPMはレーザパルスが識別できないほどにまで飽和します。

レーザの領域だけを狙うようにセンサの画角を制限し、この飽和を避けることが不可欠です。

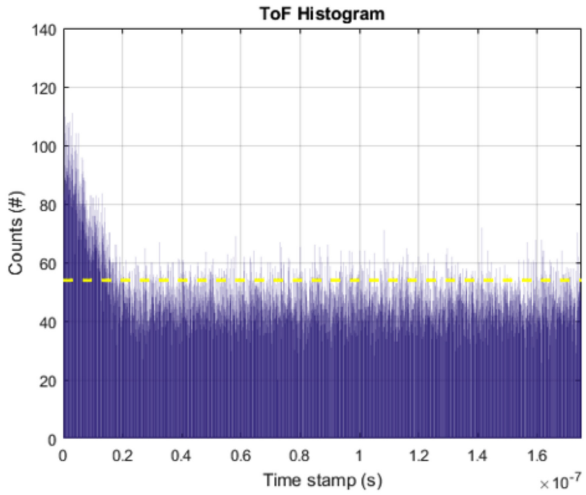

Figure 10. Effect of Increased Sensor Angle of View

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 905 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 20°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = (no signal)	

7. 光学フィルタの通過帯域

光学バンドパスフィルタは、レーザの波長範囲以外の波長の光によって生じる周囲ノイズを制限するのに使用されます。

今回の場合では、光学フィルタの通過帯域範囲は、FWHM (半値全幅)が50 nmです。このため、SiPMに幅広い波長の周囲光が入って測定される背景ノイズが増加し、Figure 11に示すようにSNR_Hが悪化します。このモデルでは、レーザ波長はちょうど905 nmであり、取得したレーザ信号は通過帯域のFWHMに影響されません。実際のシステムでは、レーザの中心波長は比較的広い範囲で変動する可能性があり、これがバンドパスフィルタの選択に影響する場合があります。

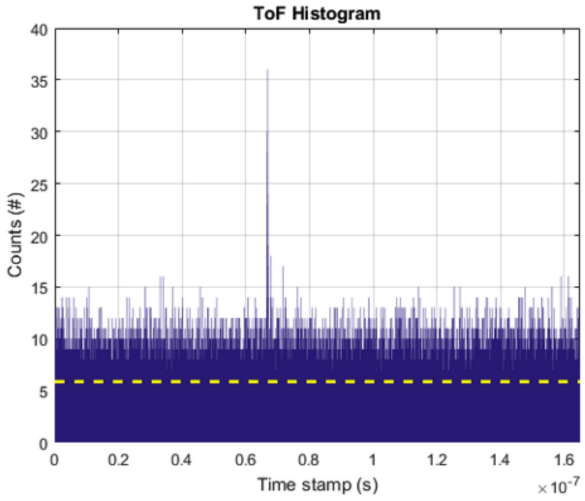

Figure 11. Effect of Wider Sensor Optical Bandpass

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 905 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	**$FWHM_{BP}$ = ±25 nm**
SNR_H = 2.3	

8. SiPMのマイクロセルサイズ

Figure 12のヒストグラムは、MicroFC-10020ではなくMicroFC-10035というSiPMの性能シミュレーション結果を示しています。主な影響は、対象の波長におけるPDEが若干向上していることで、わずかに高い信号が得られることになり、それに伴ってノイズは多少増加します。この測距距離と構成において、SiPMのこの変化がシミュレーション結果のヒストグラムに大きな影響を与えることはありません。

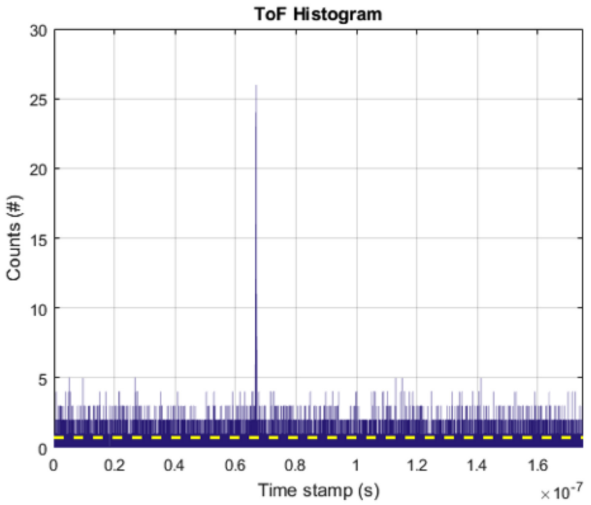

Figure 12. Effect of Changing SiPM Microcell Size

t_{acq} = 1 ms	**MicroFC-10035**
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 905 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = 5.2	

9. 目標物までの距離

Figure 13のプロットは、目標物までの距離が10 m、15 m、20 m、25 mの測距ヒストグラムを重ね合わせたものです。x-軸上での信号ピークの間隔は、*ToF = 2*distance/c*となります。距離が大きくなると、センサでのレーザ光子が$1/d^2$ (ここで、dはセンサ-目標物間距離)のファクタで減少するため、レーザからの取得カウント数が減少します。しかし、目標物から拡散して戻ってくる周囲光の光子数は距離によって変化しないため、周囲光ノイズは一定のままです。30 mでは、この構成による測距はもはや不可能です。もちろん、構成を最適化してこの距離での測距を行うことも可能です(長距離測距用モデルの設定については、3ページのセクション15の**100 m向けにモデル化した測距デモ機**を参照)。

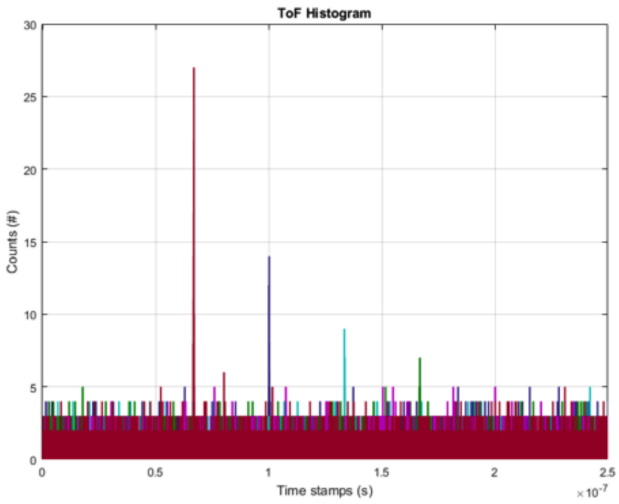

Figure 13. Effect of Increasing Target Distance

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 10 klux	**D = 10/15/20/25 m**
λ_{laser} = 905 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = 4.5/2.8/1.8/1.4	

10. 周囲光

ここでは、周囲光を10倍の100 kluxに増加させています。センサに入射する周囲光の光子数を増加させ、その他の条件はすべて一定のままにすると、シングルショット測定ごとに取得される周囲光の光子が増加します。その結果、ビンごとのノイズカウントはフレーム全体にわたって増加し、SNR_Hは悪影響を受けます。Figure 14から、10 mにおけるピークは依然として弁別可能で、この光レベルではこの構成でまだ測距可能なことがわかりますが、この場合は測距能力は低下します。

逆に周囲光が低い場合、ノイズカウントが減少するためSNR_Hは向上します。

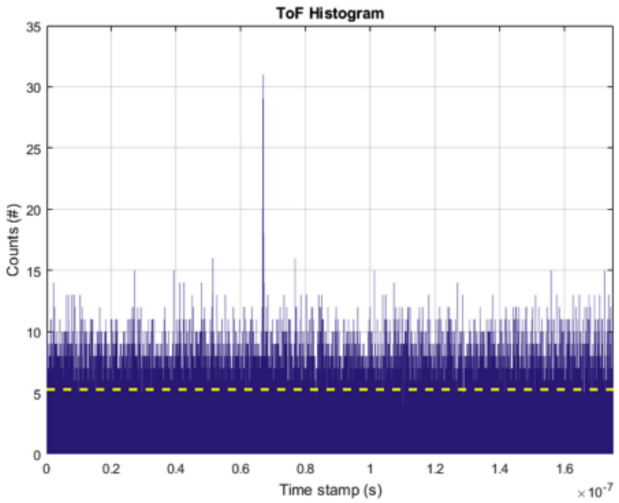

Figure 14. Effect of Increased Ambient Light

t_{acq} = 1 ms	MicroFC-10020
f = 150 kHz	P_{laser} = 1 W
E_v = 100 klux	D = 10 m
λ_{laser} = 905 nm	W_{laser} = 250 ps
Ø = 12 mm	R = 92%
θ_{det} = 1.4°	$FWHM_{BP}$ = ±2 nm
SNR_H = 1.9	

第1世代測距デモ機の概要

第1世代測距デモ機は、SiPMセンサを用いた直接ToF測距を紹介するために設計された評価システムです。第1世代測距デモ機は、以下の機能を備えています。

- レーザコリメーションレンズ、センサ集光レンズ、およびバンドパスフィルタを含む光学インタフェース
- レーザダイオードおよびドライバ回路
- SiPMセンサおよび弁別器回路
- FPGAベースの時間-デジタル変換器(TDC)、読み出し回路、および通信インタフェース
- PCベースのソフトウェア

Figure 15にシステムのブロック図を示します。

本デモ機には、パルス幅が150 psでピークレーザパワーが最大2 Wの905 nmレーザダイオードを使用しています。レーザパルスの繰り返しレートは150 kHzです。レーザの出力信号光は、レンズによって0.06°の発散角にコリメートされています。

受信機では、直径11.4 mmの口径で焦点距離40 mmの集光レンズを用いて、反射信号光の焦点をセンサに合わせています。センサの画角は、1.4°です。信号光はまたFWHMが10 nmの光学バンドパスフィルタでフィルタされてもいます。

検出信号チェーンは、SensLのMicroFC-10020-SMT SiPM、ゲイン段、立ち上がりエッジを弁別する高速コンパレータ、パルス発生回路で構成されています。結果として得られるパルスには、独立型のTDCまたはFPGAベースのTDC、データ取得システムを用いてタイムスタンプが押されます。取得データは高速USBリンクを介してPCソフトウェアに送られます。

システムソフトウェアは、取得データからヒストグラムを構築し、解析のためにプロットします。6ページの「測距ヒストグラム」のセクションで説明したように、カーブフィッティングアルゴリズムでToFを抽出します。

ソフトウェアで設定を調整できるため、システムをさまざまなアプリケーション向けに最適化するために、幅広い設定を選択できます。

デモ機は持ち運び可能で6 V電源で動作します。

第1世代のシステムパラメータの全リストをTable 3に示します。

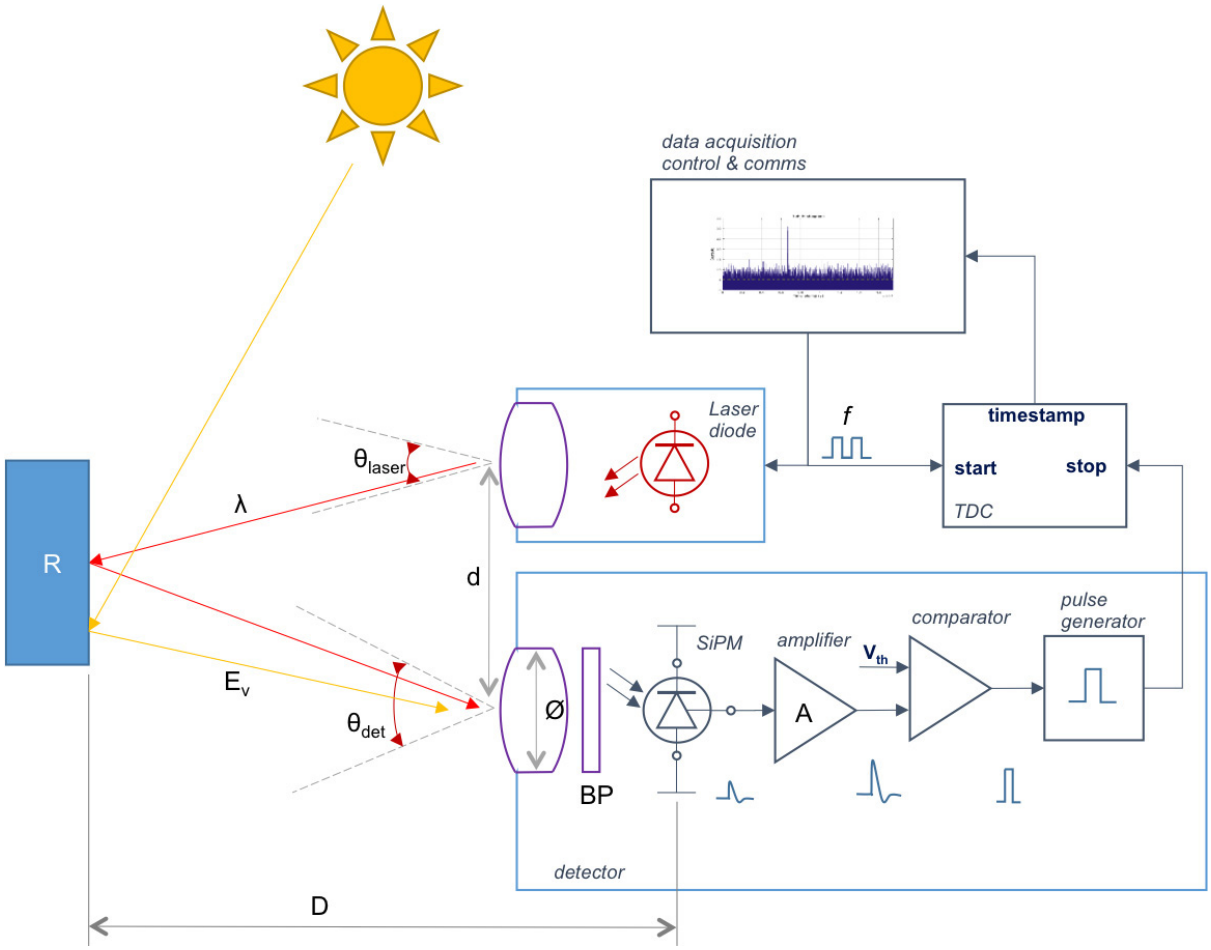

Figure 15. The Gen1 Ranging Demonstrator Schematic Block Diagram

Table 3. GEN1 SYSTEM PARAMETERS FOR SENSOR-TARGET DISTANCES UP TO 5 M

Symbol	System Parameter	Value
	Acquisition method	LED
f	Laser repetition rate	150 kHz
W_{laser}	Laser pulse width	150 ps
λ_{laser}	Laser wavelength	905 nm
$FWHM_{laser}$	Laser FWHM	7 nm
P_{laser}	Laser peak power	1.39 W
θ_{laser}	Laser beam divergence	0.0573° (1 mrad)
d	Laser-sensor distance	2.35 nm
Ø	Collection lens aperture	11.4 nm
F_{lens}	Collection lens focal length	40 mm
BP	Optical filter bandpass wavelength	905 nm
$FWHM_{BP}$	Optical filter FWHM	10 nm
θ_{det}	Sensor angle of view	1.4°
SiPM	SiPM	MicroFC-10020
A	Amplifier gain	34 dB
V_{th}	Threshold voltage	40 mV
t_{acq}	Acquisition time	400 ms
LSB_{TDC}	TDC resolution	15.625 ps
R	Target reflectivity	5% – 95%
D	Distance to target	0.1 m – 5 m
E_v	Ambient illuminance	Office lighting: 250 lux

1. 第1世代測距デモ機の性能

第1世代測距デモ機の性能は、目標物までの距離や周囲光の条件を変化させて、多くのユースケースで測定されました。

0 mから5 mで実際に測定した測距データをまとめたものを、測距データヒストグラム、距離の測定結果と実際の距離の関係、および関連する距離の誤差の形式でFigure 16に示します。

Table 4. PERFORMANCE SUMMARY FOR THE GEN1 SYSTEM UP TO 5M

Range	0.3 m – 0.8 m	5 m
Accuracy	<3 mm	<3 mm
Resolution	<1 mm	<1 mm

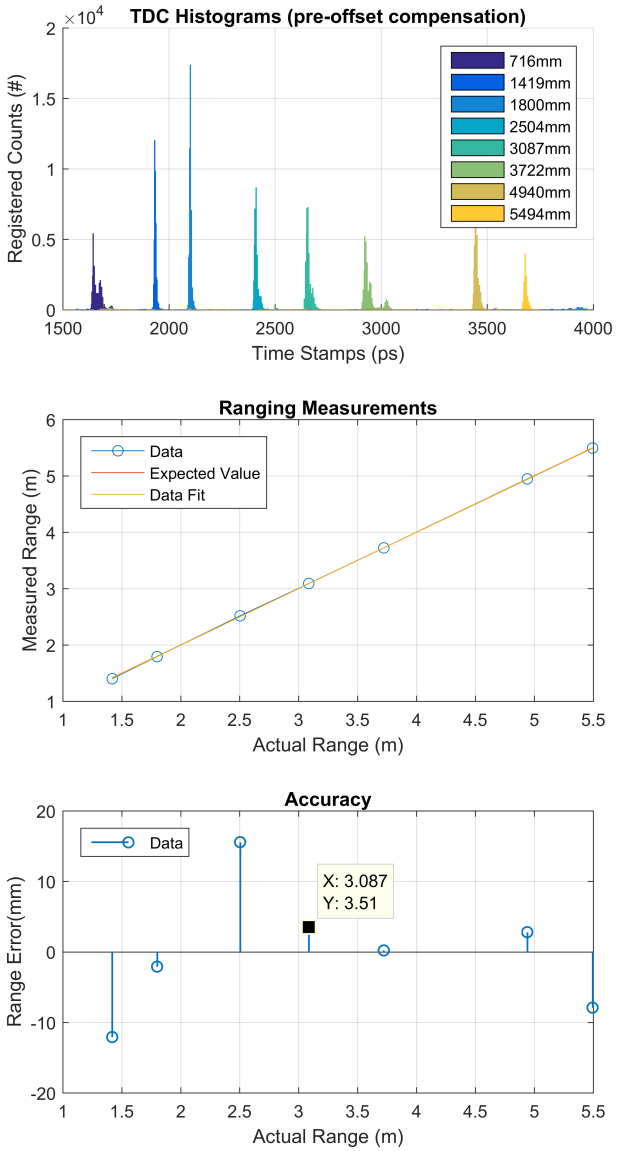

Figure 16. Baseline Performance Data from the Gen1 System up to 5 m

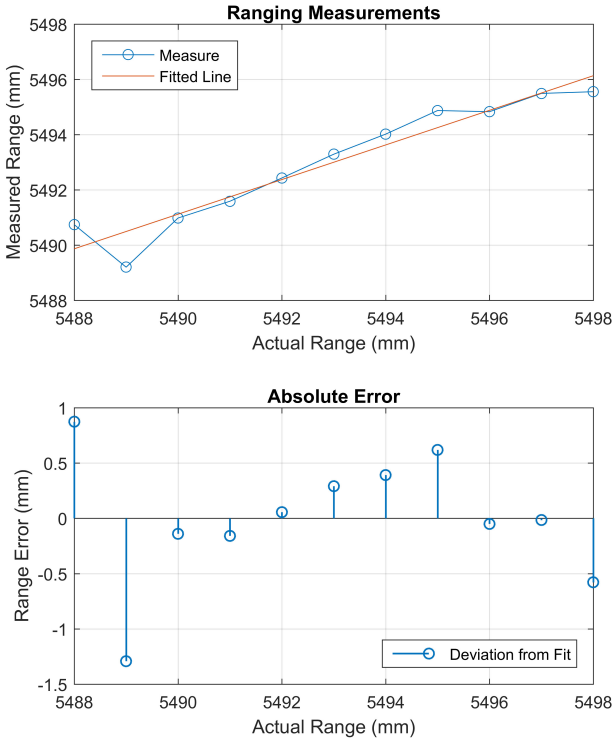

Figure 17. Data taken with the Gen1 Ranging Demonstrator

2. 第1世代システムによる測定値を用いたモデルの検証

本モデルはデモ機のシステムパラメータで構成し、目標物までの距離と周囲光条件を同一にしてシミュレーションしました。シミュレーション結果を測距デモ機の測定結果と比較したところ、Figure 17とFigure 18に示すように良好な相関を得ました。これにより、本モデルの正当性が確認され、さまざまなユースケースに対するシステムの設計手段とすることができます。

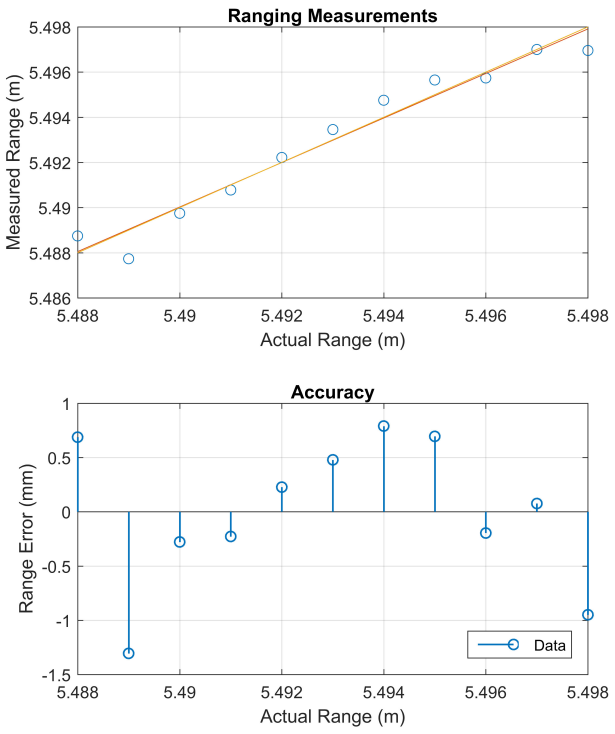

Figure 18. MA TLAB Model Simulated Data

3. 第1世代システムから100 mまでの第2世代へのアップグレード

次に本モデルを使用して、第 1 世代システムをアップグレードして100 mの測距が可能になるシステムパラメータを開発しました。このシステムアップグレードを第2世代と呼びます。これらのパラメータ変更をTable 5に示します。Figure 19に、シミュレーション結果のヒストグラム、Figure 20にシミュレーション結果の100 mでの測距分解能、Figure 21に良好な直線性を示す10 m～100 mの全範囲に渡る測距データを示します。結果として得られたシステム性能をTable 6にまとめています。このビデオで、第2世代が動作している様子を見ることができます。

Table 5. SYSTEM PARAMETERS FOR THE GEN2 UPGRADED RANGING DEMONSTRATOR SYSTEM

Parameter	Specification
Laser peak power	10 W
Laser pulse width	667 ps
Ambient illuminance	100 klux
Acquisition time	100 ms
Optical filter FWHM	50 nm
Detector Angle of View	0.2°
TDC resolution	100 ps

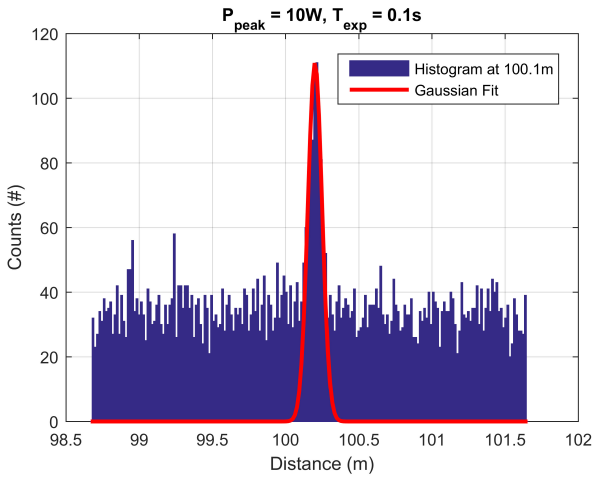

Figure 19. Simulated Histogram for 100 m Distant Target using the Gen2 System Parameters

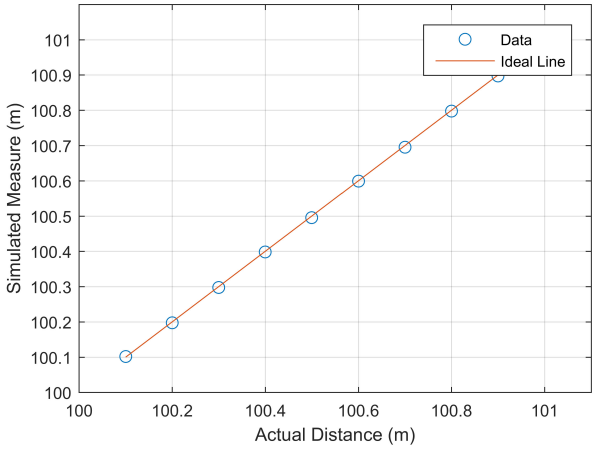

Figure 20. Ranging at 100 m, Using the Gen2 System Parameters in Table 5 and Giving <10 cm Resolution

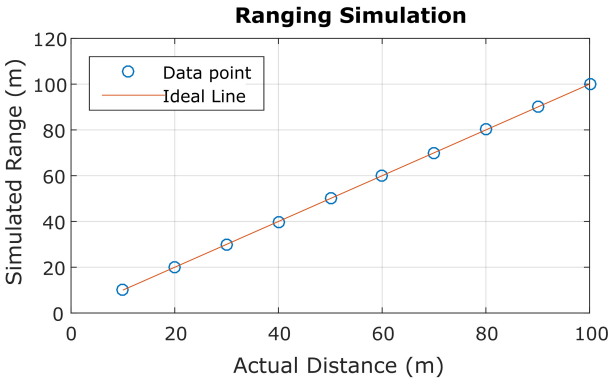

Figure 21. Simulated Ranging Data for 10 m up to 100 m using the Gen2 System Parameters and Showing Good Linearity

Table 6. SIMULATED PERFORMANCE OF THE GEN2 RANGING DEMONSTRATOR FOR RANGING TO 100 M (100 KLUX, AMBIENT LIGHT, LED, 150 KHZ).

Long Range	
Range	100 m
Accuracy	<10 cm
Resolution	<10 cm

その他の詳細情報

1. Ranging Demonstrator Description – This document describes the specification and operation of the Ranging Demonstrator. This demonstrator is an engineering prototype. Its purpose is to demonstrate SiPM technology in ranging applications and to provide feedback for modelling of future designs.
2. Introduction to SiPM – This document introduces the basic concepts of the Silicon Photomultiplier for those who are new to this type of sensor.
3. How to Evaluate and Compare SiPM Sensors – This document discusses some of the primary factors to be considered in the selection of the optimum SiPM.
4. C-Series Datasheet – The datasheet for the sensors used in this document.

ON Semiconductor及びON Semiconductorのロゴは ON Semiconductorという商号を使うSemiconductor Components Industries, LLC 若しくはその子会社の米国及び/または他の国における商標です。ON Semiconductorは特許、商標、著作権、トレードシークレット(営業秘密)と他の知的所有権に対する権利を保有します。ON Semiconductorの製品/特許の適用対象リストについては、以下のリンクからご覧いただけます。www.onsemi.com/site/pdf/Patent−Marking.pdf. ON Semiconductorは通告なしで、本書記載の製品の変更を行うことがあります。ON Semiconductorは、いかなる特定の目的での製品の適合性について保証しておらず、また、お客様の製品において回路の応用や使用から生じた責任、特に、直接的、間接的、偶発的な損害など一切の損害に対して、いかなる責任も負うことはできません。お客様は、ON Semiconductorによって提供されたサポートやアプリケーション情報の如何にかかわらず、すべての法令、規制、安全性の要求あるいは標準の遵守を含む、ON Semiconductor製品を使用したお客様の製品とアプリケーションについて一切の責任を負うものとします。ON Semiconductorデータシートや仕様書に示される可能性のある「標準的」パラメータは、アプリケーションによっては異なることもあり、実際の性能も時間の経過により変化する可能性があります。「標準的」パラメータを含むすべての動作パラメータは、ご使用になるアプリケーションに応じて、お客様の専門技術者において十分検証されるようお願い致します。ON Semiconductorは、その特許権やその他の権利の下、いかなるライセンスも許諾しません。ON Semiconductor製品は、生命維持装置や、いかなるFDA (米国食品医薬品局)クラス3の医療機器、FDAが管轄しない地域において同一もしくは類似のものと分類される医療機器、あるいは、人体への移植を対象とした機器における重要部品などへの使用を意図した設計はされておらず、また、これらを使用対象としておりません。お客様が、このような意図されたものではない、許可されていないアプリケーション用にON Semiconductor製品を購入または使用した場合、たとえ、ON Semiconductorがその部品の設計または製造に関して過失があったと主張されたとしても、そのような意図せぬ使用、また未許可の使用に関連した死傷等から、直接、又は間接的に生じるすべてのクレーム、費用、損害、経費、および弁護士料などを、お客様の責任において補償をお願いいたします。また、ON Semiconductorとその役員、従業員、子会社、関連会社、代理店に対して、いかなる損害も与えないものとします。ON Semiconductorは雇用機会均等/差別撤廃雇用主です。この資料は適用されるあらゆる著作権法の対象となっており、いかなる方法によっても再販することはできません。

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Email Requests to: orderlit@onsemi.com

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

TECHNICAL SUPPORT
North American Technical Support:
Voice Mail: 1 800−282−9855 Toll Free USA/Canada
Phone: 011 421 33 790 2910

Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 00421 33 790 2910
For additional information, please contact your local Sales Representative

◊