TND6254JP/D Rev. 5, December – 2024

Onsemí

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

onsemi

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
- 光子検出の確率が高い
- 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
- 小型パッケージ

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生かして、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Python波形シミュレーションツールを作成しました。

- 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システムの詳細なPython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=cAt/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At= 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Python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 2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。

Table 1. TYPICAL SiPM PERFORMANCEPARAMETERS USED IN SIMULATION

Para	ameter	MicroFC- 10020	RDM- 0112A20	Next Generation
	905 nm	1.8 %	15.3 %	30%
PDE	940 nm	1.2 %	10.3 %	21 %
N _{µcells}		1296	806	1500

рХТ		4 %	21 %	12 %
dXT		2.4 %	7 %	5 %
505	25°C	38 kHz	76 kHz	50 kHz
DCR	105°C	-	-	1 GHz

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波形です。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、SiPMの無相関および相関ノイズ(ダー クカウントレートDCR、即発および遅延光クロスト $- \rho \mathbf{x} \mathbf{T}, \mathbf{d} \mathbf{X} \mathbf{T}, \mathbf{r} \nabla \boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\gamma} \boldsymbol{\lambda} \mathbf{A} \mathbf{P})$ 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)が続く波形解析に渡されます。 TDCによりタイムスタンプのヒストグラムを発生さ せ、そこから距離を抽出することができます。 Table 1に示す主なパラメータを使用して、次世代オ ンセミSiPMデバイスのシミュレーションを実行しま した。



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

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.
θaser	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.
D _{lens}	Collection lens diameter	A plano convex lens is placed directly in front of the sensor. Effective aperture after mounting of the lens.
Flens	Collection lens focal length	
BP	Optical filter bandpass wavelength	Filter placed between sensor and collection lens.
FWHM _{BP}	Optical filter FWHM	
AoV	Sensor angle of view	The angle at which the field of view of the sensor diverges from a point source.
SiPM	SiPM	SiPM sensor.
N _{µcells}	Number of micro-cells	Number of micro-cells in SiPM device
PDE	Photon detection efficiency	SiPM Photon detection efficiency vs. wavelength
рХТ	Prompt optical crosstalk	SiPM prompt optical crosstalk probability
dXT	Delayed optical crosstalk	SiPM delayed optical crosstalk probability
AP	Afterpulses probability	SiPM afterpulses probability
А	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.
Ev	Ambient illuminance	The maximum illuminance on the sensor due to ambient light.

Table 2. VARIABLES IN AN SIPM DIRECT TOF RANGING SYSTEM

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ー式は、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。

$$SNR_{H} = \frac{Signal peak value}{Noise peak value}$$
 (eq. 1)

本モデルでは測定時間に以下の用語を適用します。

$$f = laser frequency$$
 (eq. 2)

(eq. 3)

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。

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。

frame rate = number of range measurements per second = $\frac{1}{t_{acq}}$ (eq. 4)



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 3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、次世代オンセミSiPMデバイス(詳細は Table 1を参照)に対して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5m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。







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	

Table 3. SUMMARY OF EFFECTS OF KEY PARAMETERS

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300mの場合、1 MHzの最大繰り返しレートが使用できます。100m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



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



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30%から約21%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の上昇です。もちろん、周 囲レベルを低くする別のシステムレベルのパラメー タ(つまり、小さくなるdet、短くなるFWHMBP) を使用した場合、逆効果になる可能性があります。 同様に、940 nmでのPDE減少傾向が大きい別のSiPM を選択した場合、結果として得られるヒストグラム 信号カウントは減少傾向にあり、SNR_Hは低下しま す。



Figure 7. Effect of Increased Wavelength on Histogram





Figure 8. Solar Irradiance Model



Figure 9. Return Laser Power (expressed in percentage and watts for initial laser power of 150, 100, 50 and 10 W) as a Function of Background Light Power (expressed in Watts and photons per second) for 905 and 1550 nm Systems. Results presented at different D_{lens} and AoV values and for two target distances of 200 m and 50 m.

5. 集光レンズの開口

レンズの開口が広くなると、Figure 9に示すとおり、検出される周囲光とレーザ光子数が多くなります。したがって、最適なSNR_Hを得るには、システムごとに開口サイズ(すなわち、Dlens)を最適化する必要があります。

Figure 10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 10. Effect of Increased Collection Lens Aperture



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1°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 11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 11. Effect of Increased Sensor Angle of View



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 12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 12. Effect of Wider Sensor Optical Bandpass



8. SiPM温度

LiDARの温度はSiPMの性能、特にダークカウント レートにも影響します。高温では、DCRは周囲光の 光子レートと同程度になる可能性があります。その 結果、センサにトリガを与えるDCRイベント数が増 加し、他のすべての条件が一定であれば、シングル ショット測定ごとにさらに多くのノイズイベントが 取得されます。それに伴い、フレーム全体のビンあ たりのノイズカウントが増加し、SNR_Hに悪影響を 及ぼします。Figure 13は、DCR = 1 Ghzにおける SiPMデバイスのToFを示しています。40 mでのピー クはまだ識別できるため、この光量でもこの構成で 測距は可能ですが、距離測定能力は低下します。



Figure 13. Effect of SiPM Temperature (DCR)



9. 目標物までの距離

Figure 14のプロットは、目標物までの距離が 10 m、20 m、30 m、40 m、50 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/d² (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17 の 100 m向けにモデル化した測距デモ機を参照)。



Figure 14. Effect of Increasing Target Distance



10. 周囲光

ここでは、周囲光を1/10の10k luxに低下させてい ます。センサに入射する周囲光の光子数を減らし、 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減 少します。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減少し、SNR_Hが改善され ます。Figure 15は、40 mにおけるピークは依然とし て同じ位置にあるが、平均およびピークノイズ値は 大幅に低下することを示しています。逆に周囲光が 高い場合、ノイズカウントが増加するためSNR_Hは 低下します。したがって、周囲光レベルは常に、可 能な限り低く維持しなければなりません。これは FWHMBP、AoF、およびDlens最適化によって行うこ とができます。



Figure 15. Effect of Reduced Ambient Light



11. SiPMの選択

長距離LiDARアプリケーションでは、広いFoV (120°×20°) と小さな解像度(AoV = 0.05°× 0.05°)、30 FPSの高フレームレートのため、各距離 測定には通常シングルショットしか取得されませ ん。したがって、ヒストグラムよりも波形のシミュ レーションの方が適しています。Figure 16の波 形は、3種類のオンセミ SiPM デバイス(詳細につい てはTable 1を参照)のシミュレーション応答を示し ており、10%(上)と90%(下)の反射率ターゲッ トで、200 mの距離から100 Wのレーザを5 nsのパル ス幅で照射した場合のものです。この測距距離と構 成では、SiPMの変化はSNR_Hに大きな影響を与えま す。

<i>t_{acq}</i> = 2 μs	Next Gen/RDM/C-series		
<i>f</i> = 500 kHz	$P_{laser} = 100 \text{ W}$		
$E_v = 100 \text{ klux}$	<i>D</i> = 200 m		
λ _{laser} = 905 nm	<i>W_{laser}</i> = 5 ns		
<i>D_{lens}</i> = 10 mm	<i>R</i> = 10% / 90%		
$AoV = 0.05^{\circ}$	<i>FWHM_{BP}</i> = ±5 nm		
SNR _H (10%) = 5.3/2.6/0.5			
SNR _H (90%)	= 9.6/6.3/2.1		



Figure 16. Example of Simulated Waveforms for Three SiPM Devices

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 17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、オンセミの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TD C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6V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 4 に示します。



Figure 17. The Gen1 Ranging Demonstrator Schematic Block Diagram

Table 4. 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
Plaser	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
Flens	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
А	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。

0mから5m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 18に示します。

Table 5. 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 18. Baseline Performance Data from the Gen1 System up to 5 m



Figure 19. 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 19 とFigure 20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 20. MA TLAB Model Simulated Data

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100m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 6に示します。Figure 21に、シミュレ ーション結果のヒストグラム、Figure 22にシミュレ ーション結果の100mでの測距分解能、Figure 23に良 好な直線性を示す10m~100m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 7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。

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	

Table 6. SYSTEM PARAMETERS FOR THE GEN2 UPGRADED RANGING DEMONSTRATOR SYSTEM



Figure 21. Simulated Histogram for 100 m Distant Target using the Gen2 System Parameters



Figure 22. Ranging at 100 m, Using the Gen2 System Parameters in Table 6 and Giving <10 cm Resolution



Figure 23. Simulated Ranging Data for 10 m up to 100 m using the Gen2 System Parameters and Showing Good Linearity

Table 7. 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

- <u>Ranging Demonstrator Description</u> 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. <u>Introduction to SiPM</u> This document introduces the basic concepts of the Silicon Photomultiplier for those who are new to this type of sensor.
- 3. <u>How to Evaluate and Compare SiPM Sensors</u> This document discusses some of the primary factors to be considered in the selection of the optimum SiPM.
- 4. <u>C-Series Datasheet</u> The datasheet for the sensors used in this document.

onsemi, ONSEMI, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "onsemi" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. onsemi owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of onsemi's product/patent coverage may be accessed at <u>www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf</u>. onsemi reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and onsemi makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does onsemi assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using onsemi products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by onsemi. "Typical" parameters which may be provided in onsemi data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. onsemi does not convey any license under any of its intellectual property rights or the rights of others. onsemi products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use onsemi products for any such u

ADDITIONAL INFORMATION

TECHNICAL PUBLICATIONS:

Technical Library: www.onsemi.com/design/resources/technical-documentation onsemi Website: www.onsemi.com

ONLINE SUPPORT: <u>www.onsemi.com/support</u> For additional information, please contact your local Sales Representative at www.onsemi.com/support/sales