

TECHNISCHE MITTEILUNG

Einsichten in Berechnungen, Grenzen und Möglichkeiten zur Verbesserung der LiDAR-Reichweite für Anwendungen in Fahrerassistenz-Systemen und autonomes Fahren

Ein Überblick

Die vorliegende technische Mitteilung soll die Rolle der Wellenlänge in der LiDAR-Technologie die ihre Auswirkungen auf Reichweite, Laserleistung und Signal-Rausch-Verhältnis erläutern. Das Dokument beginnt mit einigen grundlegenden Konzepten der Physik, gefolgt von einer Erklärung von Wellenlänge, Reichweite und Augenschutz. Anschließend werden einige wesentliche Faktoren der LiDAR-Reichweite erläutert und Lösungen vorgestellt, mit denen sich diese im Bereich des autonomen Fahrens verbessern lässt.

Einführung in die Grundlagen

Folgende mathematische Gleichungen sollen ein grundlegendes Verständnis der Beziehung zwischen verschiedenen Eigenschaften von Licht und LiDAR bieten. Diese Gleichungen werden in zukünftigen Dokumenten immer wieder zuhelfe genommen, um Konzepte zu veranschaulichen.

- **Berechnung des Objektabstands (bei einem Laufzeit-LiDAR):**

$$R = c * (\Delta t / 2)$$

- R = Objektabstand (m)

***Hinweis:** Die maximale Distanz, in der ein LiDAR ein Objekt erfassen kann, ist die LiDAR-Reichweite.*

- c = Lichtgeschwindigkeit (m/s)

- Δt = Laufzeit (s)

Hinweis: Die Laufzeit ist die Zeit, die verstreicht, bis der Laserimpuls zum Sensor zurückkehrt und die Zeit, die der Impuls braucht, um das Objekt zu erreichen.

- **Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge:**

$$f * \lambda = c$$

- f = Frequenz (Hz oder 1/s)
- c = Lichtgeschwindigkeit (m/s)
- λ = Wellenlänge (m)

- **Berechnung der Energie:**

$$E = h * f$$

- E = Energie eines Photons (J)
- h = Plancksches Wirkungsquantum = $6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$
- f = Frequenz (Hz oder 1/s)

- **Berechnung der Leistung:**

$$P = E/t$$

- P = Leistung (Watt oder J/s)
- E = Energie eines Photons (J)
- t = Zeit (s)

- **Berechnung der Bestrahlungsstärke:**

$$E = P/A$$

- E = Bestrahlungsstärke (W/m²)
- P = Leistung (W)
- A = Fläche (m²)

Wie wirkt sich die LiDAR-Wellenlänge auf Reichweite und Sicherheit aus?

Die maximal zulässige Belastung (MZB) ist die maximal zulässige Strahlenbelastung für die menschliche Haut oder die Augen, ohne dass biologische Schäden entstehen. Die MZB ist in der Norm ANSI Z136 und in der IEC 60825-1 definiert. Die MZB gibt die maximal zulässige Strahlungsenergie je nach Wellenlänge des Strahls und Emissionsdauer vor. Nachstehend ein Beispiel: Wie viel Energie enthält ein Laser, der mit einer Wellenlänge von 700 nm arbeitet?

$$\begin{aligned} E &= h * f = h * c / \lambda \\ E &= 6.63 \times 10^{-34} * \left(3 \times 10^8 / 700 \times 10^{-9} \right) \\ &= 2.84 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

Der aus dem obigen Beispiel abgeleitete Wert wird mit der Norm IEC 60825-1 (Zeit und Wellenlänge) abgeglichen, um den sicheren Betrieb eines Lasers zu gewährleisten. In der IEC-Norm ist die maximal zulässige Strahlenbelas-

tung für den Menschen bei einem Laser mit 700 nm vorgegeben. Die maximal ausgegebene Leistung (maximale Übertragungsleistung) wird durch die MZB eingeschränkt. In praktischen Anwendungen für das autonome Fahren sind 905 nm und 1550 nm die gebräuchlichsten Wellenlängen, die mit Laserimpulsen von sehr kurzer Dauer (Nanosekunden) verwendet werden.

Ein Nebenprodukt hochenergetischer Impulse ist Wärmebildung, welche zudem das Signal stört und die Signalverarbeitung im LiDAR verkomplizieren kann. Die Dauer der Laserimpulse wird von der Lasertreibplatine in einem LiDAR gesteuert.

Eine Erklärung der Reichweite anhand der LiDAR-Gleichung

Im Grunde genommen hängt die LiDAR-Reichweite von Folgendem ab:

- Grundrauschen
- Vom Photodetektor empfangene Photonen (Signal)

Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) ist ein wichtiger Parameter, mit dem zwischen dem vom Objekt zurückgeworfenen Signal und dem Grundrauschen unterschieden wird. Die maximale LiDAR-Reichweite kann als maximale Distanz ausgedrückt werden, in der das SNR hoch genug ist, um zwischen Signal und Grundrauschen unterscheiden zu können. Grundrauschen bei LiDAR für autonomes Fahren besteht aus jeder Lichtquelle, die nahe genug an der Betriebswellenlänge des Sensors liegt und mit dem Signal selbst verwechselt werden kann (Sonnenlicht, Autoscheinwerfer, Straßenbeleuchtung usw.). Die von der Sonne ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen beispielsweise haben ein breites Spektrum und sind die Hauptquelle des Umgebungsrauschens während des Tages. Das Grundrauschen wird mit Hilfe von Schmalbandfiltern gefiltert, d. h. mit Geräten, die Frequenzen innerhalb eines bestimmten Bereichs durchlassen, während andere Wellenlängen blockiert werden. Nachstehend zur Information die Gleichung für das Signal-Rausch-Verhältnis¹:

$$SNR(r) = \frac{P_r * S_\lambda * M}{\sqrt{2 * e * B * [(P_r + P_B) * S_\lambda + I_D] * F * M^2 + \frac{4 * k * T * B}{R_0}}}$$

- P_r = Empfangene Leistung
- S_λ = Empfindlichkeit des Empfängers
- M = Intrinsische Verstärkung des Empfängers
- I_D = Dunkelstrom des Empfängers
- F = Rauschfaktor des Empfängers
- B = Erfassungsbandbreite
- T = Temperatur
- e = Elementarladung; k = Boltzmann-Konstante

¹ Hamamatsu Photonics. "Lidar, Radar, and Cameras: Measuring Distance with Light in the Automotive Industry." YouTube, 12 Feb. 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=D5Hh8EuOD2Q>.

Wie weiter oben erklärt, ist das SNR direkt proportional zur empfangenen Leistung, der Eigenverstärkung des Empfängers und der Empfindlichkeit. Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit Empfängertechnologien; die empfangene Energie wird in den folgenden Abschnitten erklärt. Manche für LiDAR-Systeme verwendete Technologien sind Lawinenphotodioden (APDs), Einzelphotonen-Lawinendioden (SPADs) und Silizium-Photomultiplier (SiPM). Die Empfindlichkeit des Empfängers hängt von der Photonenerfassungskapazität ab. Eine SPAD erfasst einzelne Photonen, ein SiPM ist parallel zu SPADs geschaltet und erfasst die Gesamtzahl der von allen SPADs erfassten Photonen. SPADs werden aufgrund ihrer höheren Sensitivität am häufigsten zur Photonendetektion eingesetzt.

Eine Variation der grundlegenden LiDAR-Gleichung wird nachfolgend vorgestellt¹:

$$P_r = P_t * \rho * \frac{A_o}{\pi R^2} * \eta_o * \exp(-2R\gamma)$$

- P_r = Empfangene Leistung
- P_t = Übertragene Leistung
- ρ = Zielreflexion
- A_o = Aperturfläche eines Empfängers
- R = Distanz zwischen Objekt und Sendereinheit
- η_o = Optische Übertragung
- γ = Atmosphärischer Extinktionskoeffizient

Diese LiDAR-Gleichung setzt einen normalen Einfall, Lambertsche Reflexion, ein flaches Strahlprofil und eine vernachlässigbare Divergenz aus. Wie aus der Gleichung hervorgeht, ist die empfangene Leistung direkt proportional zur Sendeleistung und zur Aperturfläche, aber umgekehrt proportional zum Objektabstand. Der maximal mögliche Objektabstand ist die LiDAR-Reichweite.

Erhöhen der LiDAR-Reichweite bei autonomem Fahren durch Erhöhen der LiDAR-Leistung

Die LiDAR-Gleichung zeigt, dass eine höhere Übertragungsleistung zu einer höheren empfangenen Leistung führt. Allerdings ist die maximal zulässige Übertragungsleistung durch die IEC-Norm zur MZB limitiert. Wie erwähnt, trägt Licht mit kürzerer Wellenlänge (kosmische Strahlung, Gammastrahlen) mehr Energie als Radio- und Radarwellen.

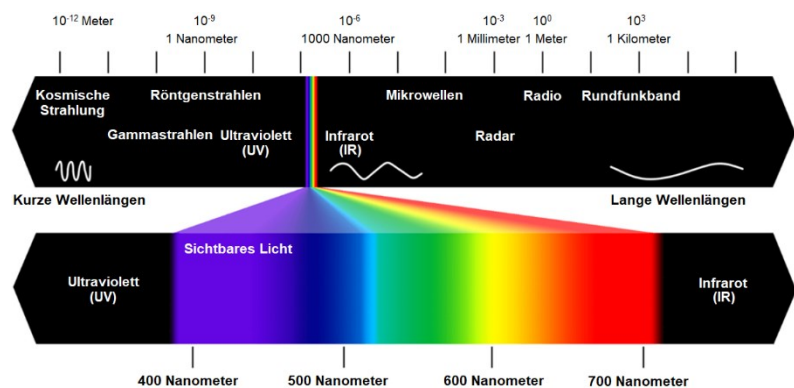


Abbildung 1 – Lichtspektrum

Verbessern von LiDAR-Leistung, Kosten und Formfaktor bei Fahrerassistenz-Systemen und autonomem Fahren

In den vorangegangenen Abschnitten dieser technischen Mitteilung wurden die Grenzen der maximalen Energie, die Laserstrahlen übertragen können, erläutert. Aus der obigen Gleichung ergibt sich, dass eine Vergrößerung der Aperturfläche der Empfängerlinse die LiDAR-Reichweite erhöhen kann. Dies ist jedoch mit drei erheblichen Nachteilen verbunden:

- Größerer Formfaktor des LiDAR-Systems (Größe)
- Höhere Kosten für das LiDAR-System aufgrund teurerer und größerer Linsen
- Stärkeres Rauschen

Eine Alternative, um die Reichweite zu erhöhen, ist die Strahlsteuerung.

Bei der Strahlsteuerung wird der Laserimpuls auf Teilbereiche innerhalb des Sichtfeldes umgelenkt, wodurch die Sendeleistung, die Empfangsleistung und das SNR erhöht werden. Strahlsteuerungskomponenten ermöglichen die Erfassung des vom Objekt reflektierten Lasersignals durch die Empfängerlinse, indem sie die Impulse umleiten, so dass der Empfänger das Lasersignal aus einem großen Sichtfeld erfassen kann, ohne dass physische Veränderungen an der Empfängereinheit vorgenommen werden müssen.

Weitere Vorteile der Strahlsteuerung:

- Verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis und größere LiDAR-Reichweite
- Kompaktere, kostengünstigere und weniger komplexe LiDAR-Komponenten
- Das LiDAR-System kommt mit einem kleineren optischen Modul aus
- Festkörpertechnologie ohne bewegliche Teile für eine längere Betriebsdauer
- Vergrößertes Sichtfeld und Azimut; bis zu 120° pro Achse

Videos, Bilder und das technische Datenblatt zur digitalen Strahlsteuerung sowie weitere Informationen zur Rolle in der Entwicklung von autonomen Lösungen finden Sie auf leddartech.com/solutions/leddarsteer-digital-beam-steering/.

LeddarTech[®]

KANADA – USA – ÖSTERREICH – FRANKREICH – DEUTSCHLAND – ITALIEN – ISRAEL – HONGKONG – CHINA

Hauptgeschäftssitz

4535, boulevard Wilfrid-Hamel, Suite 240
Québec (Québec) G1P 2J7, Kanada
leddartech.com

Tel. + 1-418-653-9000

Gebührenfrei: 1-855-865-9900

© 2022 LeddarTech Inc. Alle Rechte vorbehalten. Die Leddar™-Technologie ist durch mindestens eines der folgenden US-Patente geschützt: 7855376B2, 7554652, 8319949B2, 8310655, 8242476, 8908159, 8767215B2 oder deren internationale Entsprechungen. Weitere Patente stehen aus. Die aktuellste Version dieser technischen Mitteilung finden Sie auf unserer Website. Leddar, LeddarTech, LeddarSteer, LeddarEngine, LeddarVision, LeddarSP, LeddarCore, LeddarEcho, VAYADrive, VayaVision, XLRator und die dazugehörigen Logos sind Marken oder eingetragene Marken von LeddarTech Inc. und dessen Tochterunternehmen.

Der Inhalt dieses Dokuments kann sich unangekündigt ändern.

20220429 / TF ID 043367