

Der „SamComp“-Algorithmus für eine schnelle und genaue Bestimmung der Phasenverschiebung

Amr Eltaher

dr.eltaher@gmail.com

Ulf Lezius, FH Lübeck

ulf.lezius@fh-luebeck.de

Zusammenfassung

Sensoren zur dreidimensionalen Erfassung der Umgebung spielen eine große Rolle für Anwendungen im Bereich der Automobilindustrie (z.B. assistiertes bzw. autonomes Fahren), für vernetzte und hochgradig automatisierte Anwendungen im Bereich der „Industrie 4.0“ sowie für verschiedenste Anwendungen in geschlossenen Räumen (Überwachung, Sicherheit, Navigation, etc.). Oft werden solche Sensoren als optische Lidar-Sensoren ausgeführt (*Lidar: Light detection and ranging*).

Basis solcher Lidar-Sensoren ist eine optische Entfernungsmessung, die wiederum als Laufzeitmessung eines ausgesendeten und reflektierten Lichtimpulses oder aber über die Bestimmung der Phasenverschiebung eines kontinuierlichen periodischen Signals durchgeführt werden kann.

Bislang benötigen die Signalverarbeitungsverfahren für solche Sensoren sehr hohe Abstraten und verursachen einen großen Rechenaufwand. Dies wiederum erzwingt die Verwendung kostenintensiver Hardware. Das Ziel des hier vorgeschlagenen Algorithmus ist die Entwicklung von 3d-Lidar-Sensoren, die mit Hilfe von innovativen Signalverarbeitungsalgorithmen einen deutlich reduzierten Rechenaufwand bei der Bestimmung der Phasenverschiebung verursachen. Die grundsätzlichen Ansätze für dieses Verfahren werden in dieser Veröffentlichung vorgestellt.

1 Stand der Technik

Verfahren zur Bestimmung des Phasenverschiebungswinkels zwischen einem emittierten Signal und einem reflektierten und empfangenen Signal gehören zum bekannten Stand der Technik. Es gibt viele verschiedene Verfahren zur Lösung dieses Problems [1, 5, 13, 18, 19]. Dabei werden sowohl hardware- als auch softwarebasierte Korrelationsverfahren verwendet, um die Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zu ermitteln. Üblicherweise benutzen diese Verfahren aufwendige elektronische Schaltungen und/oder komplexe Signalverarbeitungsalgorithmen zur Bestimmung der Phasenverschiebung.

Das Europäische Patent EP 2743724 beschreibt ein Verfahren zur Ermittlung der Phasenverschiebung zwischen zwei Signalen. Das Verfahren erfordert eine hohe Modulationsfrequenz (20 MHz) für das ausgesendete periodische kontinuierliche Signal und hohe

Abtastraten für die Datenerfassung (mind. 10-mal höher als die Modulationsfrequenz), um eine Genauigkeit unter 1 cm zu erreichen. Der Hauptnachteil dieser Vorrichtung besteht in der Notwendigkeit, eine hohe Modulationsfrequenz zusammen mit einer sehr hohen Abtastrate zu verwenden. Diese technischen Merkmale sind nur mit aufwendigen Entwicklungsphasen realisierbar. Außerdem wird die erreichbare Genauigkeit durch die Abtastrate des AD-Wandlers begrenzt.

Das Europäische Patent EP 0742 450 B1 legt ein Verfahren dar, bei dem die Phasenverschiebung mit Hilfe von Signalverarbeitungsalgorithmen bestimmt wird. Diese Realisierung benutzt die „Fast-Fourier-Transform“ (FFT) und „Inverse Fast-Fourier-Transform“ (IFFT). Weiterhin kommt hier ein softwarebasiertes Korrelationsverfahren zum Einsatz, das recht hohe Abtastfrequenzen braucht. Damit ist auch dieses Verfahren kein Kandidat für die preiswerte und einfache Bestimmung Phasenverschiebungsverfahren der Phasenverschiebung.

Mit den oben gezeigten Beispielen soll dargestellt werden, dass die bekannten Realisierungen typischerweise die Verwendung eines kostenintensiven AD-Wandlers [3, 4] oder einer leistungsfähigen CPU voraussetzen.

Dabei soll noch bemerkt werden, dass die Preise von AD-Wandlern stärker von der Abtastrate als von der Auflösung abhängig sind. So hat eine Recherche ergeben, dass die Preise für AD-Wandler des Anbieters „Analog Devices“ [3], um ca. 25% steigen, wenn die Abtastfrequenz bei gleicher Auflösung verdoppelt wird. Außerdem brauchen die AD-Wandler Taktgeber, um zu arbeiten. Hier gilt: Der Preis der Taktgeber des Herstellers „Analog Devices“ verdoppelt sich in etwa, wenn die Frequenz der Taktgeber verdoppelt wird [23]. Diese Näherung ist gültig bis 2 GHz. Das gleiche Verhältnis ergibt sich auch bei anderen Herstellern, z.B. Texas Instruments [4]. Weiterhin spart man Halbleiterfläche, wenn die Abtastfrequenz niedriger ist [3], was die vorgeschlagenen Sensoren mehr kompakt und günstiger ist.

Hohe Abtastraten ziehen aber nicht nur höhere Kosten für den Sensor nach sich, sondern erfordern auch große Speichergrößen und rechenaufwändige Signalverarbeitungsalgorithmen, was sich wiederum im Preis des benötigten Prozessors und in einem höheren Leistungsverbrauch niederschlägt. Dies wiederum erschwert es, solche Verfahren in mobilen bzw. akkubetriebenen Anwendungen einzusetzen.

2 „SamComp“-Algorithmus

Der „SamComp“ Algorithmus basiert auf der wiederholten Abtastung eines periodischen Signals. Tastet man ein kontinuierliches und periodisches Signal, wie z.B. ein Sinussignal mit einem Vielfachen seiner Frequenz ab, so werden immer wieder die gleichen Werte ausgegeben. Voraussetzung ist hierbei, dass sich weder die Frequenz noch die Phase des Signals oder auch des Abtasters verändern. Tastet man also bspw. ein Sinussignal mit dem Vierfachen seiner Frequenz (*Shannon-Nyquist Limit* [2, 12]) ab, so erhält man immer dieselben vier aufeinander folgenden Abtastwerte.

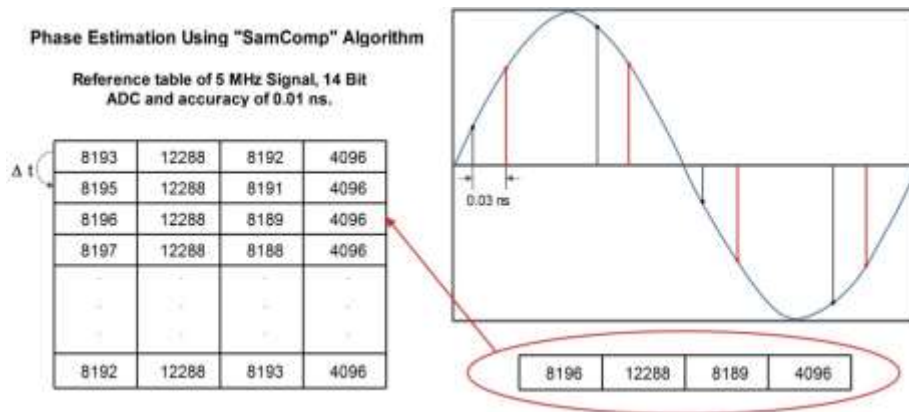


Abbildung 1 Gleichmäßig verteilte Abtastungen eines Sinus-Signals

Wird das abgetastete Signal etwas in der Phase verschoben, so werden sich die Abtastwerte verändern (siehe Abbildung 1). Jede Phasenverschiebung hat also ihre eigenen charakteristischen Abtastwerte [18, 19]. Wenn diese charakteristischen Abtastwerte bekannt sind, dann kann eine Nachschlagetabelle (engl. look-up table oder reference table) abgebildet werden, mit der die Abtastwerte einer Phasenverschiebung zugeordnet werden können. Diese Nachschlagetabelle könnte beispielsweise in einem Speicher gespeichert werden. Die Auflösung des verwendeten Analog-Digital Wandlers spielt dabei eine Schlüsselrolle [18], um die Abtastwerte eindeutig einer Phasenverschiebung zuzuordnen. Die Nachschlagetabelle kann z.B. basierend auf der folgenden Gleichung konstruiert werden (siehe Tabelle 1):

$$\Delta\varphi = 2\pi \times f \times \Delta t, \quad (1)$$

wobei Δt die Zeitauflösung und f die Frequenz des kontinuierlichen und periodischen Signals ist. Beim Erstellen der Wertetabelle wird die Abtastung immer weiter verschoben, bis die gesamte Periode des Signals abgedeckt ist. Dabei sollte die Schrittweite so gewählt werden, dass die Periode ein Vielfaches der Schrittweite ist. Je kleiner die Auflösung Δt gewählt wird, desto mehr Einträge werden für die Nachschlagetabelle benötigt. Für ein Beispiel mit $f = 5\text{MHz}$ und $\Delta t = 0.01\text{ns}$ zusammen mit einer Auflösung im AD-Wandler von 14bit ergibt sich so eine Auflösung in der Abstands-Messung von 3mm. Hierbei ist die Lichtgeschwindigkeit angenommen.

Eintrag #	erste Abtastung	zweite Abtastung	dritte Abtastung	vierte Abtastung
1	$\sin(0)$	$\sin(\pi/2)$	$\sin(\pi)$	$\sin(3\cdot\pi/2)$
2	$\sin(\Delta\varphi)$	$\sin(\pi/2 + \Delta\varphi)$	$\sin(\pi + \Delta\varphi)$	$\sin(3\cdot\pi/2 + \Delta\varphi)$
3	$\sin(2 \cdot \Delta\varphi)$	$\sin(\pi/2+2 \cdot \Delta\varphi)$	$\sin(\pi+2 \cdot \Delta\varphi)$	$\sin(3\cdot\pi/2 + 2 \cdot \Delta\varphi)$
...				
20000	$\sin(2\pi - \Delta\varphi)$	$\sin(2,5\pi - \Delta\varphi)$	$\sin(3\cdot\pi - \Delta\varphi)$	$\sin(3.5\cdot\pi - \Delta\varphi)$

Tabelle 1 – Referenztable zum Vergleich mit gleichmäßig verteilten Abtastungen eines Sinus-Signals

Basierend auf der Nachschlagetabelle und den abgetasteten Messwerten kann dann die Phasenverschiebung bestimmt werden. Weil der Algorithmus auf der Abtastung (engl. Sampling) und dem Vergleich (engl. Comparing) basiert, wurde der Name „SamComp“ gewählt. Der Vergleich selbst kann dann beispielsweise auf dem Prinzip der maximalen Wahrscheinlichkeit (engl. “Maximum Likelihood (ML)“) basieren.

Im Beispiel der Abbildung 1 und in der Tabelle 1 wird das kontinuierliches und periodisches Signal sinus-förmig implementiert, es sind aber auch andere Funktions-Formen denkbar.

3 Demonstrator und Ergebnisse

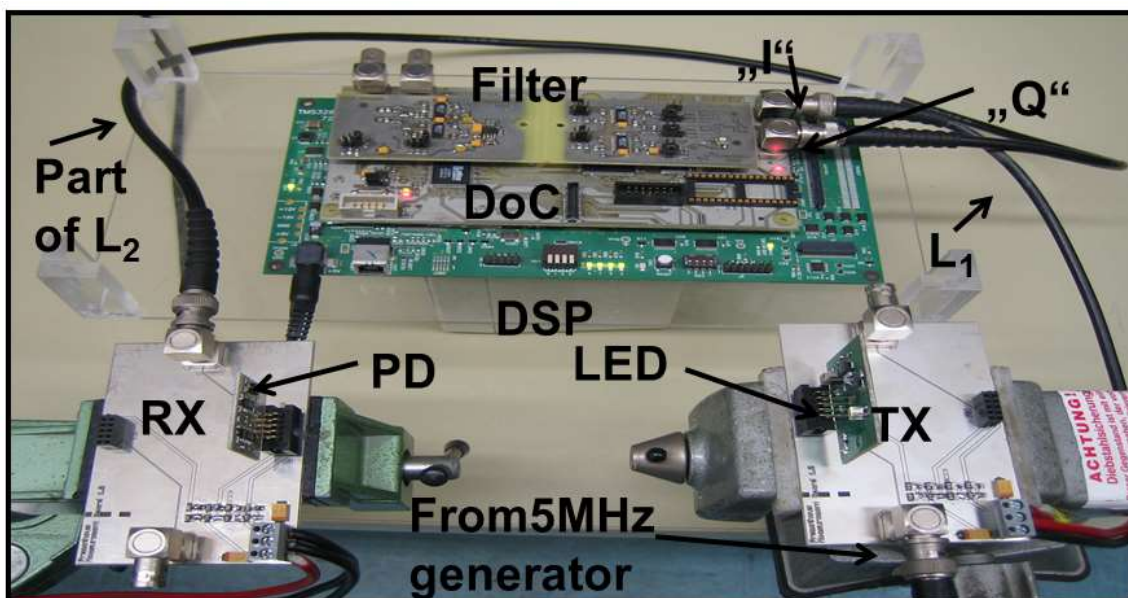


Abbildung 2 Demonstrator

Die Abbildung 2 zeigt einen Aufbau zur Demonstration des SamComp-Algorithmus in einem Abstandsensor. Die Aufgabe des Demonstrators ist die Bestimmung des Abstandes zwischen dem Sender „TX“ und dem Empfänger „RX“. Der Aufbau des Demonstrators wird etwas detaillierter in [1] beschrieben.

Aufbau:

- Sender („TX“) als Lichtquelle (LED), der ein kontinuierliches und periodisches Signal - z.B. ein Sinussignal – emittiert
- Ein 5MHz Sinus-Signalgenerator speist gleichzeitig den „I-Kanal“ und den Sender „TX“ .
- Der Empfänger („RX“) mit einer Photodiode (PD) empfängt das optische Signal nach einer gewissen Laufzeit durch die Luft.
- Die Signale werden von einer Tochterkarte (engl. Daughter Card oder „DoC“) mit einem AD-Wandler erfasst. Die Tochterkarte ist ein Interface-Modul für den verwendeten DSP.
- Der **I-Kanal** ist hier ein koaxiales Kabel mit bekannter Länge (L_1), welches den den Signalgenerator direkt mit der Tochterkarte (DoC) des DSP verbindet.
- Der **Q-Kanal** ist die Verbindung zwischen „RX“ und der Tochterkarte des DSP (DoC)“. Die Länge dieses Kanals ist unbekannt (L_2), weil der Abstand zwischen „TX“ und „RX“

unbekannt ist.

Verfahren:

- Beide Kanäle werden ständig und gleichzeitig mit einer Abtastfrequenz von $f_s = 20\text{MHz}$ mit Hilfe eines A/D-Wandlers (8bit Auflösung) abgetastet, welcher in der Tochterkarte des DSP verbaut ist
- Die Abtastungen werden über mehrere Perioden gemittelt, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern.
- Die abgetasteten Messwerte werden mit den Einträgen der Nachschlagetabelle im **DSP** abgeglichen, so dass sich mit Hilfe des SamComp-Algorithmus für beide Kanäle jeweils ein Phasenwinkel ergibt.
- Wenn für beide Kanäle ein Phasenwinkel bekannt ist, dann kann die Phasenverschiebung zwischen den „I“- und „Q“-Kanälen $\Delta\phi_{IQ}$ berechnet werden. Aus dieser Phasenverschiebung kann ein Laufzeitunterschied für die beiden Kanäle Δt_{IQ} bestimmt werden
- Danach wird die gesuchte Wegstrecke des optischen Signals durch die Luft berechnet. Dabei müssen insbesondere bei unterschiedlichen Kabellängen im I- und Q-Kanal auch die Unterschiede zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale in Luft und in den Koaxialkabeln berücksichtigt werden.

In den Veröffentlichungen [1, 18] wurde gezeigt, dass mit einem 5MHz Sinus-Signalgenerator und einer A/D-Wandler Auflösung von 8bit keine bessere Abstandsauflösung als 3cm erreicht werden kann. Mit dem hier gezeigten Demonstrator wurden die Messungen für einen gegebenen Abstand ($L_2 - L_1 = 50\text{cm}$) 1000-mal wiederholt. Die Ergebnisse zeigen [1], dass 80% der Versuche eine Genauigkeit vom 3,3cm haben. Auch ist die Genauigkeit von 95% der Versuche unter 5cm.

4 Zusammenfassung

Es besteht ein Bedarf an verbesserten Techniken zur Realisierung von einfachen, preisgünstigen und genauen Phasenverschiebungsverfahren für verschiedene wichtige Anwendungen. Insbesondere besteht ein Bedarf an Verfahren, die den Einsatz von komplexer Schaltungstechnik oder rechenintensiven Signalverarbeitungsverfahren vermeiden.

Das hier vorgestellte Verfahren zur Bestimmung der Phasenverschiebung kann zur Entfernungsmessung eingesetzt werden. So lassen sich genaue und einfache Sensoren realisieren. Die Kostenvorteile im Vergleich zum Stand der Technik ergeben sich im Wesentlichen aus den erheblich geringerem Rechen- und Schaltungsaufwand. Folgenden aufwändige und kostenintensive Komponenten können vermieden werden:

- komplexe Phasenmessschaltungen oder sehr schnelle Taktgeber,
- kontinuierliche periodische Signale in den VHF¹ - und UHF²-Frequenzbereichen
- Signale und Logikschaltungen mit hoher Bandbreite,
- hohe Abtastraten oder Überabtastraten, d.h. Abtastraten oberhalb des Shannon-Nyquist-Limits,
- große Speicherressourcen,
- komplexe Signalverarbeitungsverfahren, die nur auf speziellen Computern oder anspruchsvollen digitalen Signalprozessoren implementiert werden können.

¹ VHF: Very High Frequency

² UHF: Ultra High Frequency

Dies alles bedeutet auch eine Reduktion des Energieverbrauchs was gerade bei mobilen, akkubetriebenen Anwendungen einen ganz wesentlichen Vorteil darstellt.

Der SamComp-Algorithmus zur Ermittlung der Phasenverschiebung kann besonders effizient und wenig rechenintensiv bzw. zügig durchgeführt werden. Deswegen wird der Algorithmus bereits in verschiedenen industriellen Erfindungen eingesetzt [18, 19].

Literatur

- [1] A. Eltahir, "Electro-Optical Ranging for Short Range Applications Design and Realization Aspects", Ph.D. Dissertation, Department of Electrical and Information Engineering, University of Duisburg-Essen, ISBN 978-3-8322-8262-2, Aachen: Shaker-Verlag, Germany, 15 April, 2009.
- [2] H. Bernstein, „Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung“, ISBN 978-3-658-00549-8, Springer, 2014
- [3] www.analog.com/, 10 August, 2017
- [4] www.ti.com/, 10 August, 2017
- [5]: "Leddar-Optical-Time-of-Flight-Sensing-Technology", Pierre Olivier (vice President LeddarTech Inc.), personal information, 25th June, 2016
- [6] J. Hoffmann, „Handbuch der Messtechnik“, ISBN 978-3-446-40750-3, Carl Hanser Verlag München, 2007
- [7] Die Zeitschrift: "Technology Review: 2016 und seine Bedeutung für unsere Zukunft", 01 Januar, 2017
- [8] Die Zeitschrift: „Made in Germany“, mi verlag moderne industrie, 2016/2017
- [9] Die Zeitschrift: „Der Spiegel-Wissen: Das Auto von Morgen“, 05 März, 2014
- [10] Die Zeitschrift: „Focus-Money“, 15 Oktober, 2016
- [11] Die Zeitschrift: „Automobiltechnische Zeitschrift“, 25 April, 2015
- [12] Proakis, „Digital Communications“, Fourth Edition, New York, NY:Mc-Graw-Hill, 2000
- [13] T. Kaiser, Amr Eltahir, Christiane Senger, and Bamrung Tau Sieskul, „Ultra Wideband: Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging“, Wiley, ISBN 0-470-032553, 2006
- [14] A. Eltahir, Th. Kaiser, "A Novel Approach based on UWB Beamforming for Indoor Positioning in None-Line-of-Sight Environments", RadioTeCc, Berlin, Germany, October 26-27, 2005
- [15] A. Eltahir, Th. Kaiser, "Positioning of Robots using Ultra-wideband Signals", IAR workshop on Advanced control and Diagnosis, Karlsruhe, Germany, 24 November, 2004
- [16] A. Eltahir, I. Ghalayini and T. Kaiser, "Towards UWB Self-Positioning for Indoor Environments Based on Electrical Field Polarization", Signal Strength and Multiple Antennas, Wireless Communication Systems, 2005
- [17] A. Eltahir, T. Kaiser, „Hybrid Shape, Amplitude, and Position Modulation for UWB Communication Systems“, WSEAS Journal on Communications, Vol. 2, pp. 241-244, 2005
- [18] [DE 102016217683.8](https://patents.google.com/patent/DE102016217683.8): „Synchronisation von Übertragungsknoten“, Erfinder: Amr Eltahir und Norbert Kleber, Oktober, 2016, Patentträger: Zumtobel AG
- [19] [D102012021053.1](https://patents.google.com/patent/D102012021053.1): „Klopfortbestimmungsverfahren und Klopfortbestimmungsvorrichtung für Brennkraftmaschinen“, Erfinder: Amr Eltahir und Thomas Boehme, Oktober 2012, Patentträger: IAV automotive GmbH, erteilt in Dezember 2014
- [20] [A50608/2016](https://patents.google.com/patent/A50608/2016): „Vorrichtung zur Erfassung des Drehwinkels“, Erfinder: Amr Eltahir, Mai 2016, Patentträger: Zumtobel AG
- [21] Scott R. Eliason, J. L. Bucher, "Maximum Likelihood Estimation ", ISBN-0- 8039-4107-2, Sage, Newbury Park, 200
- [22] J. L. Bucher, "Calibration hand book", Verlag: Westkreuz-Verlag, ISBN-13: 978-0873897044, November 2006
- [23] R. Kories, "Electrical Engineering A pocket Reference", Springer, Leipzig, Germany, 2003
- [24] I. N. Bronshtein, "Handbook of Mathematics", Springer (Verlag), 4th edition, Berlin, Germany, 2004
- [25] T. Zimmermann, „Elektrooptische Entfernungsmessung mit Bandspreizverfahren“, Ph.D. thesis, Kaiserslautern, 1991
- [26] G. Beheim and K. Fritsch, "Range finding using frequency-modulated laser diode", Applied Optics, Vol. 25, pp. 1439-1442 (1986)
- [27] Koskinen M., Kostamovaara J., Myllylä R., "Comparison of the continuous wave and pulsed time-of-flight laser rangefinding techniques", Optics, Illumination and Image Sensing for Machine Vision VI, Proc. SPIE Vol. 1614, pp. 296-305, 1992
- [28] A. Kilpelä, "Pulsed Time-of-Flight Laser Range Finder Techniques for Fast, High Precision Measurement Applications", Department of Electrical and Information Engineering, University of Oulu, 2004
- [29] Philip C. D. Hobbs, "Building Electro-Optical Systems", ISBN 0-471-24681-6, John Wiely & Sons, Canada, 2000