

Radarinterferenzbasierte Höhenschätzung von Objekten des Fahrumfeldes

Fabian Diewald*

Jens Klappstein†

Jürgen Dickmann‡

Klaus Dietmayer§

Zusammenfassung: Künftige aktive Sicherheitssysteme im Fahrzeug erfordern eine stetige Verbesserung der Qualität und Zuverlässigkeit der Fahrumfelderfassung. Radarsensoren sind hierbei ein wesentlicher Bestandteil. Es wird ein Ansatz vorgestellt, wie aus einem Radarbild indirekt Höheninformationen von Objekten gewonnen werden können. Bei bekannter Höhe können die Klassifikation und die Relevanzentscheidung von Objekten verbessert werden. Die vorgestellte Höhenschätzung basiert auf der Interferenz von Radarwellen, welche detailliert erläutert wird. Die Interferenzmuster führen während der Fahrzeugannäherung an ein Objekt zu einer oszillierenden Rückstreuamplitude. Aus der Frequenz der auftretenden Schwingung kann eine Objekthöhe geschätzt werden. Simulationsergebnisse sowie Messdaten aus Verkehrsszenarien zeigen die praktische Anwendbarkeit.

Schlüsselwörter: Höhenschätzung, stehende Hindernisse, Radarsensorik

1 Einleitung

Die Entwicklung künftiger Fahrerassistenzsysteme stellt immer größere Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Fahrumfelderfassung. So benötigen kollisionsverhindernde Fahrerassistenzsysteme Informationen zu Position, Geschwindigkeit und Relevanz anderer Verkehrsteilnehmer. Als Sensoren kommen hierbei aufgrund ihrer Wetterrobustheit und der Möglichkeit der direkten Geschwindigkeitsmessung Radarsensoren zum Einsatz. Jedoch stellen stillstehende Objekte nach wie vor eine Herausforderung bei der radarbasierten Fahrumfelderfassung dar. So unterscheidet sich die Geschwindigkeit stehender Hindernisse (z. B. Stauenden) relativ zum

Egofahrzeug nicht von der irrelevanten Objekte (z. B. Brücken). Darüber hinaus ist auch bei bildgebenden Radarsensoren verglichen mit sonstigen Systemen wie Laserscanner oder Kamera die azimutale Winkelauflösung schlechter (siehe Abbildung 1).

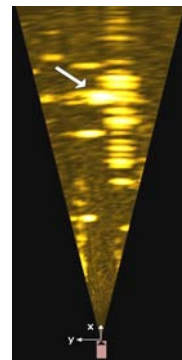


Abbildung 1: Brücke in einem Radarbild bei einer Entfernung von ca. 150 m

Da sich Brücken in größerer Höhe über der Fahrbahn befinden als relevante stehende Fahrzeuge, ist die Objekthöhe ein mögliches Merkmal zur Relevanzentscheidung. Diese kann durch ein indirektes Verfahren geschätzt werden. Hierbei wird die Mehrwegeausbreitung von Radarwellen durch Reflexion an der Fahrbahn genutzt, die zur Interferenz von Radarwellen führt. Dadurch entsteht ein abstands- und höhenabhängiges Interferenzmuster, das von Objekten während einer Annäherung durchlaufen wird. Es kann gezeigt werden, dass der Intensitätsverlauf eines hohen Objektes, wie der einer Brücke, hochfrequent ist. Eine Annäherung an einen stehenden PKW hingegen führt zu einem Signal geringerer Frequenz.

2 Radarinterferenzmuster

Die von einem Radarsensor emittierten Radarwellen erreichen Orte des Fahrumfeldes über verschiedene Wege. Zum einen geschieht dies auf dem direkten Weg und zum anderen indirekt über eine Reflexion an der Straßenoberfläche (siehe Abbildung 2). Da sich die Wegstrecken $l_{d/i}$ der beiden Pfade unterscheiden, sind die Radarwellen des direkten und

*Fabian Diewald promoviert bei der Daimler AG, Forschung Umfelderfassung, Wilhelm-Runge-Str. 11, 89081 Ulm (e-mail: fabian.diewald@daimler.com).

†Jens Klappstein ist Entwicklungsingenieur bei der Daimler AG, Forschung Umfelderfassung, Wilhelm-Runge-Str. 11, 89081 Ulm (e-mail: jens.klappstein@daimler.com).

‡Jürgen Dickmann ist Teamleiter bei der Daimler AG, Forschung Umfelderfassung, Wilhelm-Runge-Str. 11, 89081 Ulm (e-mail: juergen.dickmann@daimler.com).

§Klaus Dietmayer ist Leiter des Instituts für Mess-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm (e-mail: Klaus.Dietmayer@uni-ulm.de).

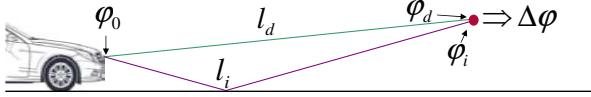


Abbildung 2: Mehrwegeausbreitung von Radarwellen

des indirekten Pfades an erreichbaren Orten im Allgemeinen nicht gleichphasig. So findet je nach Phasendifferenz $\Delta\varphi$ des direkten (φ_d) und indirekten (φ_i) Pfades

$$\Delta\varphi = |\varphi_d - \varphi_i| \quad (1)$$

eine konstruktive oder destruktive Überlagerung der Wellen statt. So liegt mit $n \in \mathbb{Z}$ bei

$$\Delta\varphi \approx 2n\pi \quad (2)$$

konstruktive Interferenz vor, bei

$$\Delta\varphi \approx (2n + 1)\pi \quad (3)$$

destruktive Interferenz. Hierdurch entsteht ein Interferenzmuster wie in Abbildung 3.

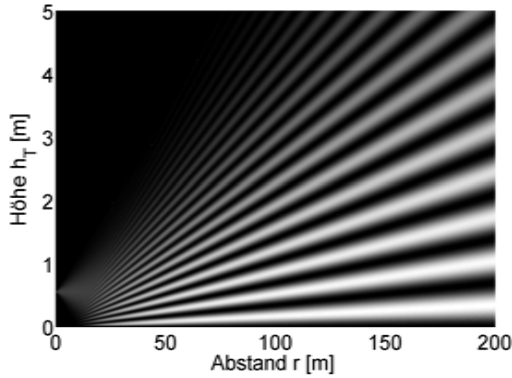


Abbildung 3: Beispiel eines Radarinterferenzmusters

Die Phasenlage $\varphi_{d/i}$ der Radarwelle bei der Wegstrecke $l_{d/i}$ des direkten bzw. indirekten Pfades ergibt sich zu

$$\varphi_{d/i} = \varphi_0 + 2\pi f_0 \frac{l_{d/i}}{c} \quad (4)$$

mit der emittierten Frequenz f_0 , der Phasenlage an der Antenne φ_0 und der Lichtgeschwindigkeit c . Diese Betrachtungen gelten für eine konstante Frequenz f_0 . Es existieren jedoch verschiedene Radarmessverfahren, die eine Frequenzmodulation nutzen. So wird unter anderem beim Verfahren „Frequency Modulated Continuous Wave“ (FMCW) sowie beim Pulskompressionsverfahren die Frequenz

der emittierten Welle verändert. Somit unterliegt die Phasenlage der Welle neben der Wegstrecke auch der Frequenzmodulation. Die Frequenz f wird nun eine Funktion der Wegstrecke l und der Frequenzrampensteigung \dot{f} :

$$f(l) = f_0 - \dot{f} \frac{l}{c} \quad (5)$$

Somit wird die Phasenlage $\varphi_{d/i}$ zu

$$\varphi_{d/i} = \varphi_0 + \int_0^{l_{d/i}} \frac{2\pi f(l)}{c} dl \quad (6)$$

$$= \varphi_0 + \frac{2\pi}{c} (f_0 l_{d/i} - \dot{f} \frac{l_{d/i}^2}{2c}). \quad (7)$$

Abbildung 4 zeigt die Phase φ als Funktion von der Wegstrecke l für verschiedene Frequenzrampensteigungen \dot{f} . f_0 beträgt hier $76,5 \text{ GHz}$. Aus Darstellungsgründen sind hier große Werte für \dot{f} visualisiert. Aufgrund der Veränderung der Frequenz wird aus einer linearen Funktion eine Parabel. Für die bei Pulskompressionsradaren übliche Größenordnung der Frequenzrampensteigung von $\dot{f} = 10 \frac{\text{MHz}}{\mu\text{s}}$ [3] sollen die Phasenwerte für einen direkten sowie einen indirekten Pfad und hieraus die für die Interferenz maßgeblichen Phasendifferenzen bestimmt werden. Für eine Worst-Case-Betrachtung muss als Wegstrecke jeweils ein Wert im Bereich der maximalen Reichweite gängiger Radarsensoren $l = 200 \text{ m}$ verwendet werden. Als Einbauhöhe des Radars werden 63 cm angenommen, somit liegt die maximal mögliche Wegstreckendifferenz bei $\Delta l = 1,26 \text{ m}$. In diesem Fall liefert Gleichung 7 für ein Radar konstanter Frequenz ($\dot{f} = 0 \frac{\text{MHz}}{\mu\text{s}}$), eine direkte Wegstrecke l_d von $197,74 \text{ m}$ sowie eine indirekte Wegstrecke l_i von 199 m eine Phasendifferenz von $\Delta\varphi = 642,60\pi$. Für $\dot{f} = 10 \frac{\text{MHz}}{\mu\text{s}}$ ergibt sich eine Phasendifferenz von $\Delta\varphi = 642,54\pi$. Somit un-

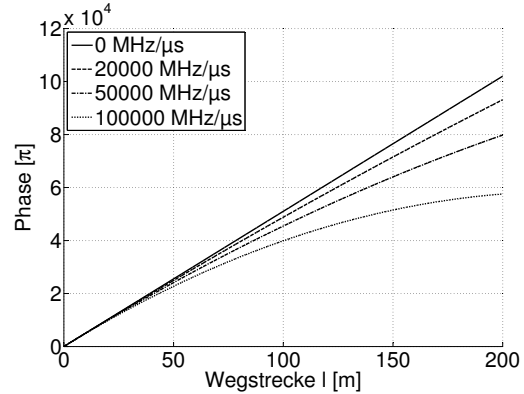


Abbildung 4: Phase am Radarziel in Abhängigkeit von der Wegstrecke für verschiedene \dot{f}

terscheidet sich die Phasendifferenz bei einem Radar mit variabler Frequenz ($f = 10 \frac{MHz}{\mu s}$) um nicht mehr als $0,06\pi$ von einer Betrachtung mit konstanter Frequenz. Die Orte maximaler konstruktiver und destruktiver Interferenz verschieben sich somit, die Phasendifferenzänderung beträgt jedoch deutlich weniger als π . Hierdurch ist die Wanderung der Orte maximaler Interferenz verglichen mit den Abständen zwischen den Orten konstruktiver und destruktiver Interferenz klein. Eine weitere Bedingung für die Annahme eines quasistationären Interferenzmusters ist neben einer hinreichend kleinen Frequenzrampensteigung ein geringer Frequenzhub. Bei üblichen Frequenzhüben von $< 200MHz$ [3], die sehr klein gegenüber der Mittenfrequenz sind, ist dies jedoch erfüllt.

3 Signalverarbeitung

Das Interferenzmuster führt zu einer schwankenden Empfangsleistung während einer Annäherung. Dies ist oftmals störend, jedoch zeigen die Empfangsleistungen je nach Höhe des Radarziels über der Fahrbahn unterschiedliche charakteristische Verläufe [1]. Werden diese während der Annäherung an ein Radarziel aufgezeichnet, können diese verwendet werden, um auf die Höhe eines Radarzieles zurückzuschließen. Hierzu muss der mathematische Zusammenhang zwischen der Höhe des Radarzieles h_T und dem aufgezeichneten Verlauf der Empfangsleistung bekannt sein. Nach [2] kann die interferenzbeeinflusste Empfangsleistung P_r durch

$$P_r = \frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \cdot 16 \sin^4 \left(\frac{2\pi h_T h_S}{\lambda r} \right) \quad (8)$$

angenähert werden. Der erste Faktor stellt die nach P_r aufgelöste Radargleichung dar. Hierbei sind P_s die Sendeleistung, G der Antennengewinn, λ die Wellenlänge, σ die effektive Rückstrahlfläche und r die Distanz zum Radarziel. Der zweite Faktor beschreibt die interferenzbedingte Modulation, wobei h_S die Sensorhöhe ist. Die Empfangsleistung stellt auf der $\frac{1}{r}$ -Achse näherungsweise eine Sinusschwingung dar. Die dominierende Kreisfrequenz ω beträgt hierbei

$$\omega = \frac{4\pi h_T h_S}{\lambda}. \quad (9)$$

Somit kann durch eine Aufzeichnung von P_r über der $\frac{1}{r}$ -Achse und einer nachfolgenden Frequenzanalyse die dominierende Kreisfrequenz ω bestimmt werden. Hieraus ergibt sich direkt die Höhe des Radarziels h_T . Abbildung 5 zeigt das oszillierende Verhalten der Empfangsleistung nach einer Reflexion durch ein Radarziel der Höhe $h_T = 5m$ über der r -Achse bzw. über der $\frac{1}{r}$ -Achse.

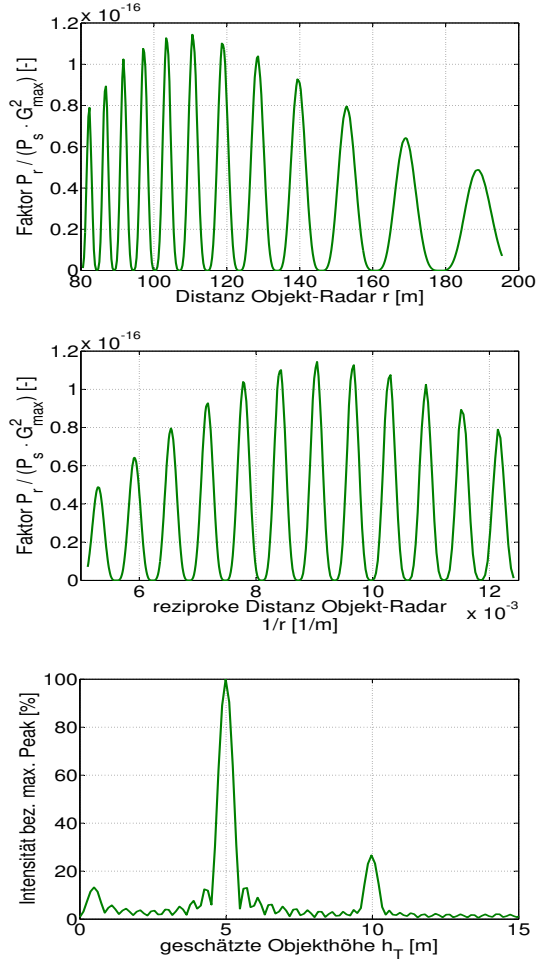


Abbildung 5: Simulierter Verlauf des Leistungsfaktors $\frac{P_r}{P_s G_{max}^2}$ eines Punktzieles mit $\sigma = 1m^2$ und $h_T = 5m$, aufgetragen über dem Abstand r (oben) und dem reziproken Abstand $\frac{1}{r}$ (Mitte). Unten ist das Resultat einer FFT des mittelwertbereinigten Leistungsfaktorverlaufs dargestellt. Die Simulation berücksichtigt das Verschwinden des Punktzieles aus dem Elevationsöffnungswinkel bei geringer werdender Distanz.

Abbildung 5 unten zeigt das Ergebnis einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) des Signals über der $\frac{1}{r}$ -Achse nach einer Mittelwertbereinigung. Das Maximum liegt hier bei der Höhe des Radarziels h_T .

Eine stark variierende, jedoch messbare Höhe des Radarsensors h_S kann auch als Variable behandelt werden. So kann nach

$$P_r = \frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \cdot 16 \sin^4 \left(\frac{2\pi h_T h_S}{\lambda r} \right) \quad (10)$$

P_r auch über der $\frac{h_S}{r}$ -Achse aufgetragen und die modifizierte Kreisfrequenz

$$\omega_m = \frac{4\pi h_T}{\lambda} \quad (11)$$

bestimmt werden. Auch hieraus ergibt sich direkt die Höhe des Radarziels h_T .

Abbildung 7 zeigt durch einen bildgebenden Radarsensor aufgezeichnete reale Daten ohne gemessene Höhe des Radarsensors. Hierbei ist eine Zufahrt auf eine Autobahnbrücke sowie das Heck eines stehenden Fahrzeuges (siehe Abbildung 6) dargestellt. Zu jedem neuen Radarscan wird die aktuelle Objektposition im Sensorkoordinatensystem durch Koppelnavigation aus Geschwindigkeit und Gierrate ermittelt. Die objektbezogenen Empfangsleistungen ergeben sich durch Interpolation des Radarbildes. Abbildung 7 unten zeigt einen signifikanten Unterschied in der ermittelten Höhe für die beiden Objektklassen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den gezeigten Ansatz ist es prinzipiell möglich, die Höhe von Radarzielen über der Fahrbahn zu schätzen. Die ermittelte Höhe kann Grundlage oder Unterstützung für eine Klassifikation darstellen. So kann eine Brücke bereits nach kurzer Beobachtungsdauer als solche erkannt werden. Darüber hinaus können Brücken im Radarbild von der Randbebauung unterschieden werden, wodurch sich der störende Einfluss von Brücken bei einer radarbasierten Spurschätzung verringert.



Abbildung 6: Szenarien für den Höhenschätzalgorithmus – oben eine Zufahrt auf eine Autobahnbrücke, unten auf einen stehenden PKW

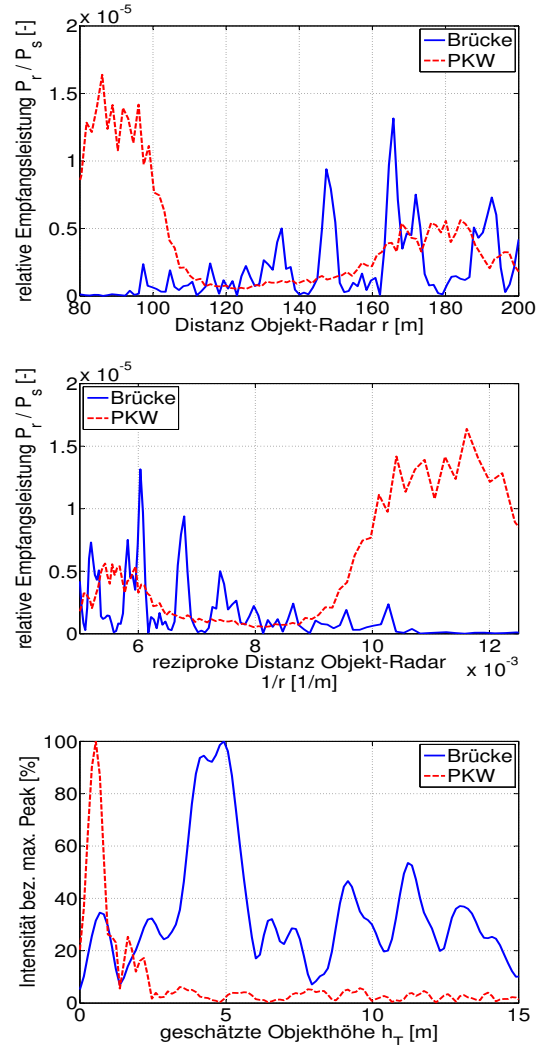


Abbildung 7: Verläufe der Empfangsleistung während einer Annäherung an eine Autobahnbrücke und einen stehenden PKW (siehe Abbildung 6), aufgetragen über dem Abstand r (oben) und dem reziproken Abstand $\frac{1}{r}$ (Mitte). Unten sind die jeweiligen Resultate einer FFT der mittelwertbereinigten Leistungsverläufe dargestellt.

Literatur

- [1] R. Schneider: Radarsignal-Verarbeitungsverfahren (Höhenbestimmung aus Signalverarbeitung); Patentanmeldung beim Deutschen Patentamt, Nr. P 198 01 617.4, Januar 1998
- [2] M. I. Skolnik: *Introduction to Radar Systems*, 3rd edition; McGraw-Hill Book Company, New York, 2001
- [3] H. Winner (Hg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*; Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009