

HIGH PRECISION W-BAND DISTANCE MEASUREMENT RADAR

W-BAND-RADAR FÜR HOCHPRÄZISE ABSTANDSMESSUNG

CHRISTIAN ZECH
christian.zech@iaf.fraunhofer.de

W-band radar



- 94 GHz carrier frequency, 15 GHz bandwidth
- Up to several 100 m range of coverage
- Resolution in the cm range for several targets
- Accuracy below 10 μm for single targets
- Small size (78 x 42 x 28 mm³) and low weight (160 g)

Millimeter-waves are getting increasingly important, as they offer unique properties which can be used for a various range of applications. Since the wavelength decreases linearly with frequency, the required size and volume of a millimeter-wave system decreases with quadratic and cubic relation, respectively. Thus, the development of modern, high-frequency technologies can pave the way for the realization of a new generation of precise and ultra-compact radar systems.

The automotive radar, working at 77 GHz, is the best example for a commercially successful application of millimeter-waves (mmW). However, high-frequency radars in general can offer new possibilities for many other measurement tasks. Compared to laser-based systems, radar can work even under harsh environmental conditions such as dust, smoke, or fog. Hence, radar can be used to address problems which cannot be solved with nowadays technology. Nevertheless, radar-based solutions still have a low market acceptance, as low-frequency systems are huge in size and high-frequency systems are still very expensive, due to the use of precision milled waveguides. In particular, precision short-range distance measurements are still a domain of laser measuring technology. Commercially available radar systems (such as at 24 GHz or automotive radars at 77 GHz) offer only a very limited bandwidth and are thus unsuitable for high-performance demands. The metamorphic high-electron mobility transistor (mHEMT) technology at Fraunhofer IAF can be used for monolithic millimeter-wave integrated circuits (MMICs), which address

Technology Readiness Level





1 *Harsh environmental conditions, like in steelworks, still often cause unsolved measurement scenarios for industrial process control.*

Raue Umgebungsbedingungen, wie in Stahlwerken, führen nach wie vor häufig zu ungelösten Messanforderungen in der industriellen Prozesskontrolle.

Millimeterwellen gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden können. Die Wellenlänge verkürzt sich proportional mit zunehmender Frequenz; Flächen- und Volumenanforderungen von Systemen sinken dabei sogar mit quadratischer bzw. kubischer Relation. Daher liefert die Entwicklung neuer Hochfrequenztechnologien die Grundlage für die nächste Generation kompakter und präziser Radarsysteme.

Automotive-Radarsysteme bei 77 GHz sind das beste Beispiel für einen kommerziell erfolgreichen Einsatz von Millimeterwellen (mmW). Dabei könnten Hochfrequenzradare in vielen anderen Anwendungen neue Möglichkeiten eröffnen. Im Vergleich zu optischen Lasersystemen arbeiten Radare auch unter widrigsten Umweltbedingungen wie Staub, Rauch oder Nebel zuverlässig. Dadurch können sie zukünftig für Problemstellungen eingesetzt werden, die mithilfe heutiger Technologien nicht gelöst werden können. Trotz ihrer Vorteile haben Radar-basierte Lösungen bislang nur eine geringe Marktakzeptanz, da niederfrequente Systeme zu groß und hochfrequente Systeme nach wie vor zu teuer in der Herstellung sind. Besonders der Bereich hochpräziser Abstandsmessungen im Nahbereich wird von Lasersystemen dominiert. Kommerziell erhältliche Radarsysteme (wie 24 GHz oder 77 GHz-Sensoren) decken nur eine geringe Bandbreite ab und sind daher ungeeignet für Präzisionsmessungen.

Die metamorphe High-Electron-Mobility-Transistor (mHEMT)-Technologie des Fraunhofer IAF kann dazu genutzt werden, monolithisch integrierte Millimeterwellenschaltungen (MMICs) herzustellen, welche speziell auf die Anforderungen hochleistungsfähige Anwendungen bei höchsten Betriebsfrequenzen abgestimmt sind. In Kooperation mit dem Fraunhofer IZM wurde eine kostengünstige Aufbau- und Verbindungstechnik auf Platinenbasis entwickelt, um zukünftig Hohlleiter-basierte Aufbauten in Hochfrequenzsystemen zu ersetzen und somit Kosten zu reduzieren.

94 GHz FREQUENCY / FREQUENZ

Output frequency of the radar module, ideally suited for high-precision measurements.

Sendefrequenz des Radarmoduls, ideal geeignet für präzise Abstandsmessungen.

Hochfrequenz-Platinentechnologie für kosteneffiziente Systeme

Das gesamte Radar-Front-End konnte auf einer Platine integriert werden (Abb. 2). Um die W-Band-Signale direkt auf dem Board verteilen zu können, wurde ein spezieller Lagenaufbau, aus der Kombination eines 50 µm dünnen Flüssigkristall-Polymersubstrats (LCP) und einem FR-4-Kern, entwickelt. Der in unserer 100 nm mHEMT-Technologie realisierte Radar-MMIC enthält alle erforderlichen Hochfrequenzkomponenten (wie Frequenzvervielfacher, Verstärker und Mischer) und ist in einer Laserkavität im LCP eingelassen, wodurch kurze Bondverbindungen mit geringer parasitärer Induktivität ermöglicht werden. Zudem ist auf dem LCP eine antipodale Vivaldi-Antenne mit 23 dBi Gewinn und 11° Öffnungswinkel integriert. Im Bereich der Antenne wird der FR-4-Kern ausgefräst, sodass eine freischwebende LCP-Membran entsteht. Darauf wird ein dielektrischer Konus mit integrierter Linse platziert, um den Öffnungswinkel der

high-performance applications at highest frequencies. In cooperation with Fraunhofer IZM, a cost-efficient printed circuit board (PCB)-based mounting and interconnecting technology has been developed to replace waveguides and reduce costs for high-frequency systems.

High-frequency printed circuit board technology for cost-efficient front-ends

The high-frequency front-end has been integrated on a single PCB (Fig. 2). In order to handle W-band signals directly onboard, a special layer setup, consisting of a 50 µm thin layer of liquid crystal polymer (LCP) on top of a FR-4-based core has been developed. The PCB consists of 7 metallization layers, where only the top one is used for the routing of analog and high-frequency signals.

the receiver chain by highly reflective nearby targets, the output driver is realized as a variable gain amplifier, providing a dynamic range of 30 dB. High-performance phase operation is ensured by use of a phase-locked loop circuitry to stabilize the system reference. The total size of the front-end is only 40 mm x 36 mm.

High-precision distance measurements

The module is powered by a single 7 – 18 V external power supply and can be accessed via universal asynchronous receiver/transmitter (UART), Universal Serial Bus (USB), or Ethernet connection. The integrated digital signal processor (DSP), running an embedded µCLinux kernel, handles the digital interfaces of the module as well as the internal components. All system-relevant parameters can be controlled by software,

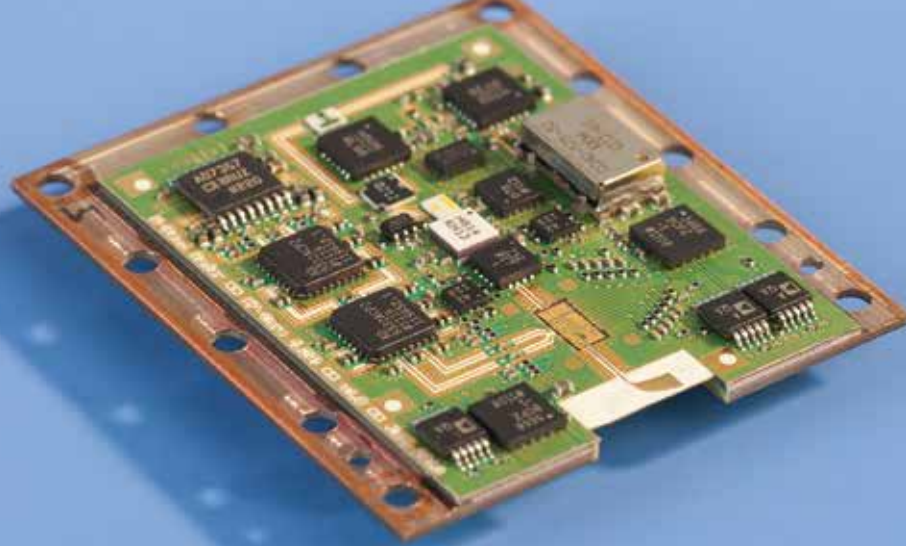
» Our high-end millimeter-wave technology enables the development of high-precision radar sensors, which can be used to address up to now unsolved measurement demands.«

Christian Zech, group »Sensor Systems«.

A single-chip radar MMIC, based on our in-house 100 nm mHEMT technology, contains all the required high-frequency components (such as frequency multiplier, amplifiers and mixer). The MMIC is embedded into a laser cavity in the polymer substrate, enabling short zero-tail bond-wire connections without a parasitic inductive loop. An onboard, anti-podal Vivaldi antenna is realized on the LCP substrate, featuring a gain of 23 dBi as well as an aperture angle of 11°. Therefore, the FR-4 core is milled out in the area of the antenna, resulting in a free-standing LCP membrane. A dielectric cone with integrated lens is placed on the antenna to modify the aperture angle of the radar beam. To adjust the transmitted power of the module to the current scenario, e. g. to avoid overdriving

allowing a flexible use and easy customization. To investigate the precision of the module, a set of 200 measurements was performed in series for a target at a fixed distance of 57 cm. A bandwidth of 15 GHz and a ramp duration of 2.5 ms was chosen, resulting in a chirp rate of 6 THz/s. The maximum deviation of the measurements is $\pm 0.8 \mu\text{m}$, the standard deviation (σ) is $0.3 \mu\text{m}$. As a result, the measurement error is below $1 \mu\text{m}$ for 99.7 % (3σ) of all measurements.

In conclusion it can be stated that radar is an excellent candidate to supplement laser systems for high-precision distance measurements in harsh environments to address new fields of sensor applications.



2 *The high-frequency radar front-end is realized on a single printed circuit board with a size of 40 mm x 36 mm.*

Das gesamte Hochfrequenz-Front-End ist auf einer Platine von 40 mm x 36 mm integriert.

Radardecke anzupassen. Die Leistung des Sendeverstärkers kann über einen Dynamikbereich von 30 dB variiert und somit auf das Szenario abgestimmt werden. Dadurch wird zum Beispiel ein Übersteuern des Empfängers bei nahen und stark reflektierenden Zielen verhindert. Zur Gewährleistung der erforderlichen Phasenstabilität des Sendesignals ist die Systemreferenz mithilfe einer Phasenregelschleife stabilisiert. Die Größe der Hochfrequenzplatine beträgt 40 mm x 36 mm.

Hochpräzise Abstandsmessungen

Das Modul kann mit einer externen Spannungsquelle von 7 – 18 V betrieben werden. Der Datenaustausch erfolgt über Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART), Universal Serial Bus (USB) oder Ethernet-Schnittstelle. Im Modul läuft ein eingebetteter μ Linux-Kernel auf einem digitalen Signalprozessor, der sowohl die digitalen Schnittstellen betreibt, als auch die internen Komponenten ansteuert. Alle systemrelevanten Parameter können per Software variiert werden, wodurch eine einfache und flexible Anpassung des Radarmoduls möglich ist. Zur Untersuchung der Messgenauigkeit wurde eine Serie von 200 Messungen in einer statischen Szenerie durchgeführt. Die dabei verwendete Bandbreite beträgt 15 GHz, die Rampendauer 2,5 ms. Die maximale Abweichung der Messungen vom Mittelwert ist $\pm 0,8 \mu\text{m}$, die Standardabweichung (σ) $0,3 \mu\text{m}$. Somit liegt der Messfehler für 99,7 % (3σ) der Messungen bei unter $1 \mu\text{m}$.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Radare ideal dazu geeignet sind, Lasersysteme für hochpräzise Abstandsmessungen, besonders unter widrigen Umgebungsbedingungen, zu ergänzen und zukünftig neue Messanwendungen zu adressieren.

0.3 μm

**DEVIATION /
ABWEICHUNG**

Standard deviation of the measured distance for a series of 200 measurements.

Standardabweichung des gemessenen Abstands für eine Reihe aus 200 Messungen.