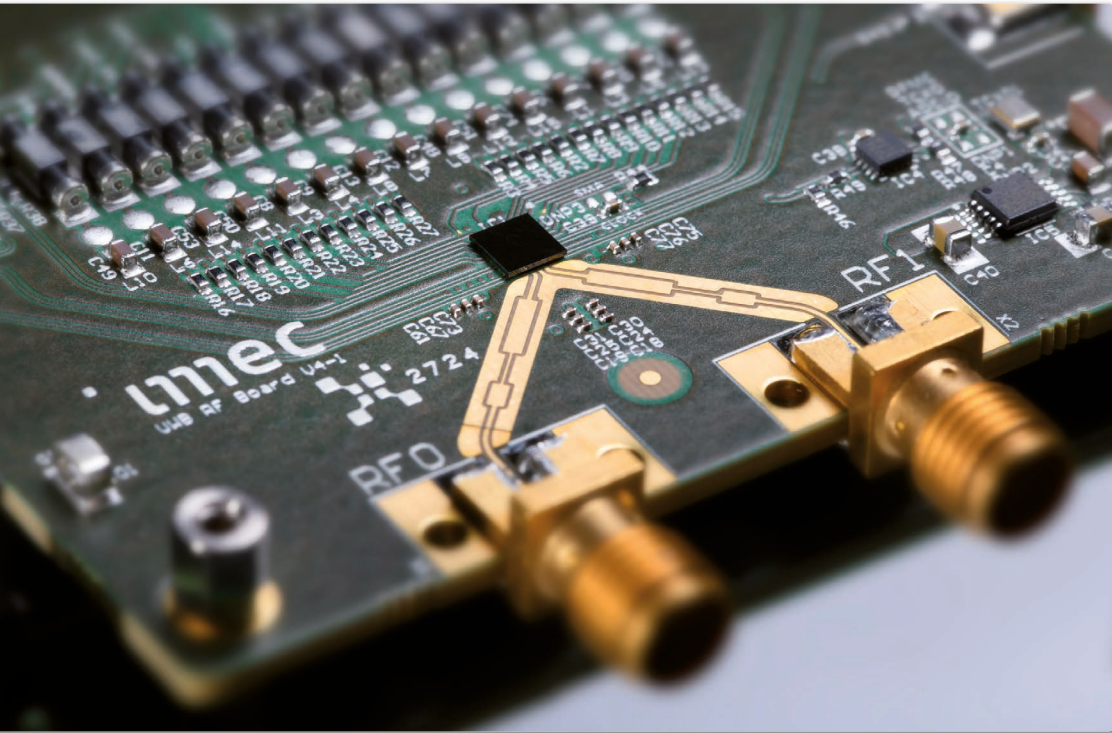


UWB-Funktechnologie der nächsten Generation für Radarsensorik und Daten-Streaming-Anwendungen

Ein neues Impulsfunk-UWB-System ist 802.15.4ab-konform, geeignet für Vollduplex-MIMO-Radarsensorik mit einer Reichweite von 30 cm bis 3 m bei geringem Stromverbrauch und einer Datenrate von 124,8 MHz.



Die Erfolgsgeschichte von UWB für sichere und präzise Distanzmessungen

Seit Anfang der 2000er Jahre hat die Ultrabreitband-Technologie (UWB) nach und nach Einzug in eine Vielzahl kommerzieller Anwendungen gehalten, die sichere und präzise Ortungsfunktionen erfordern. Bekannte Beispiele sind schlüssellose Zugangslösungen für Autos und Gebäude, die Ortung von Gegenständen in Lagerhäusern, Krankenhäusern und Fabriken sowie die Navigationsunterstützung in großen Räumen wie Flughäfen und Einkaufszentren.

Ein Merkmal der drahtlosen UWB-Signalübertragung ist die Aussendung sehr kurzer Impulse im Zeitbereich. Bei der Impulsfunk-UWB-Technologie (IR) wird dies auf die Spitze getrieben, indem Impulse im Nanosekunden- oder sogar Pikosekundenbereich gesendet werden. Folglich belegt sie im Frequenzbereich eine Bandbreite, die viel größer ist als bei drahtlosen „Schmalband“-

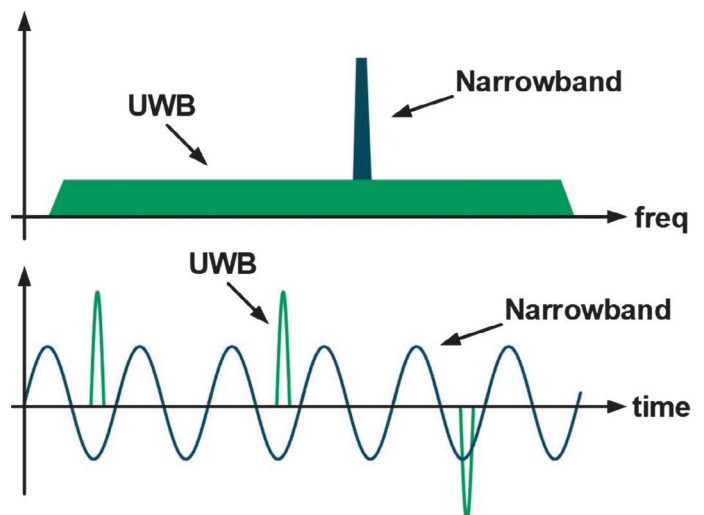
In den letzten Jahren hat die UWB-Technologie dank ihrer sicheren und präzisen Entfernungsmessung zahlreiche Anwendungen in der Automobilindustrie, der Smart-Industry-Branche und im Bereich Smart Home ermöglicht. Die erwartete Einführung des neuen Standards IEEE 802.15.4ab wird den Anwendungsbereich weiter ausdehnen und UWB-Geräte um Radar-Funktionalität und verbesserte Entfernungsmessung ergänzen.



Autor:
Christian Bachmann
Portfolio Director
Wireless and Edge
Imec
www.imec-int.com

Die neueste Generation der 802.15.4ab-konformen Impulsfunk-UWB-Technologie (IR) von Imec bietet hervorragende Radarsensorik-Fähigkeiten. Dies wird durch Experimente zur Überwachung im Fahrzeuginnenraum demonstriert, darunter die Erkennung von Insassen und die Schätzung der Atemfrequenz für die Feststellung der Anwesenheit von Kindern (CPD). Das energiesparende IR-UWB-Funksystem

bietet einen zweiten Vorteil: Es sendet und empfängt Signale mit rekordverdächtigen Datenraten und eröffnet damit neue Anwendungsmöglichkeiten wie energiesparendes Audio- und Videodaten-Streaming.



Darstellung der UWB- und Schmalbandsignalübertragung im (oberen) Frequenz- und (unteren) Zeitbereich

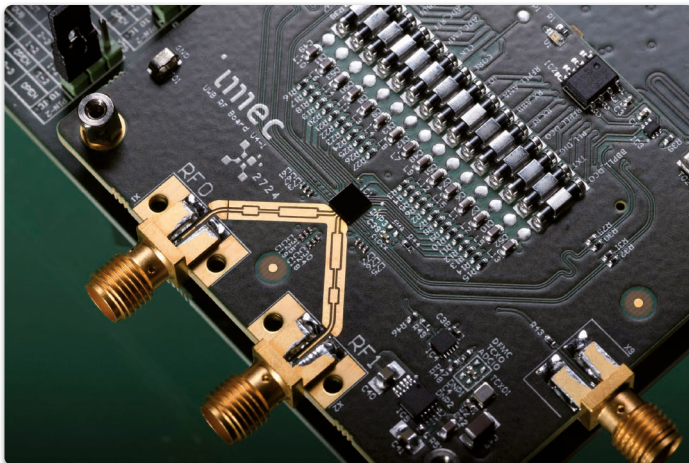


Abbildung des IR-UWB-Funksystems der Generation 4 von imec. Vollduplex-2x2-MIMO-Architektur für energiesparende Radarsensorik in einem Bereich von 30 cm bis 3 m

Kommunikationstechniken wie WiFi und Bluetooth.

Die UWB-Technologie arbeitet in einem breiten Frequenzbereich (typischerweise von 6 bis 10 GHz) und nutzt Kanalbandbreiten von etwa 500 MHz und mehr. Aus diesem Grund ist ihre Entfernungsmessgenauigkeit viel höher als die von Schmalbandtechnologien. Heute kann UWB Standortinformationen im cm- bis sogar mm-Bereich zwischen einem Sender (TX) und einem Empfänger (RX)

liefern, die in der Regel 10 bis 15 m voneinander entfernt sind.

Darüber hinaus haben Verbesserungen des Physical Layer von UWB – als Teil der Einführung der IEEE 802.15.4z-Ergänzung zum IEEE-Standard für drahtlose Netzwerke mit niedriger Übertragungsrate – maßgeblich zur Realisierung sicherer Entfernungsmessfunktionen beigetragen.

Im Laufe der Jahre hat imec wesentlich zur Weiterentwick-

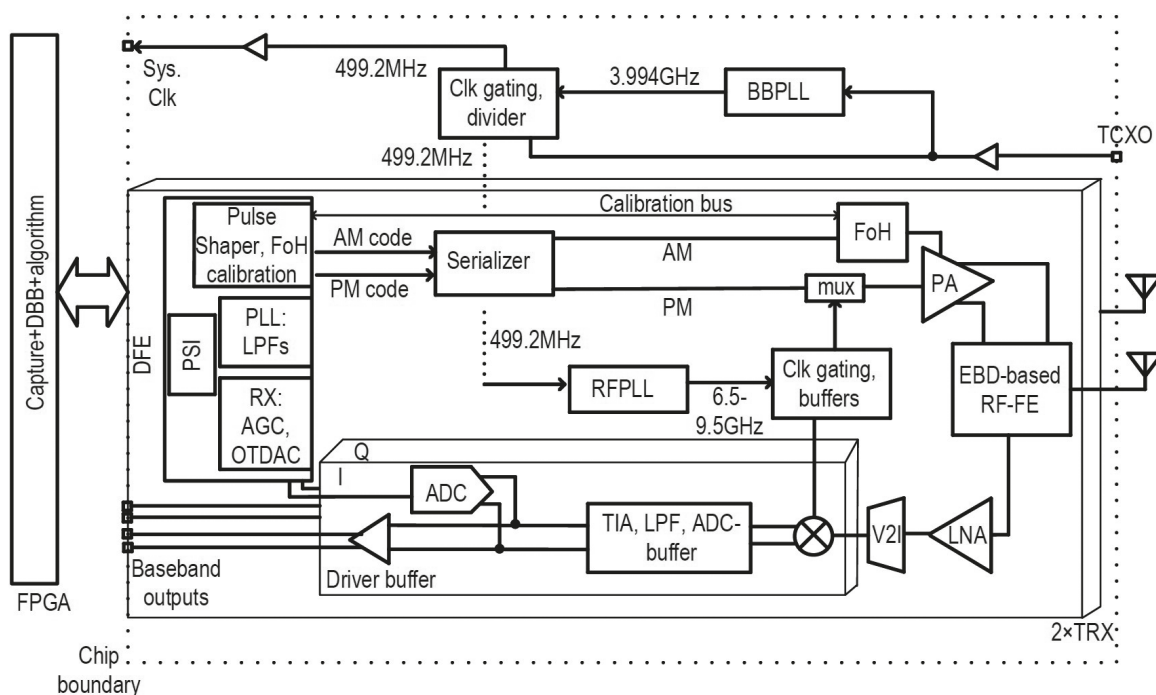
lung der UWB-Technologie und zur Überwindung der Hürden beigetragen, die einer breiten Einführung im Wege standen: Senkung des Stromverbrauchs, Erhöhung der Bitrate, Verbesserung der Messgenauigkeit, Erhöhung der Störfestigkeit des Empfängerchips gegenüber anderen drahtlosen Technologien, die im gleichen Frequenzband arbeiten [1], und Ermöglichung kostengünstiger CMOS-Siliziumchip-Implementierungen.

Die Forscher von imec haben mehrere Generationen von UWB-Funkchips entwickelt, die dem IEEE 802.15.4z-Standard für Entfernungsmessung und Kommunikation entsprechen. Die Senderschaltungen von imec arbeiten mit innovativen Pulsform- und Modulationstechniken, die durch fortschrittliche Polar-Sender, digitale Phasenregelkreise (PLL) und ringoszillatorbasierte Architekturen ermöglicht werden und eine Entfernungsmessgenauigkeit im Millimeterbereich bei geringem Stromverbrauch bieten. Auf der Empfängerseite haben Innovationen im Schaltungs-Design zu einer hervorragenden Störfestigkeit bei minimalem Stromverbrauch beigetragen.

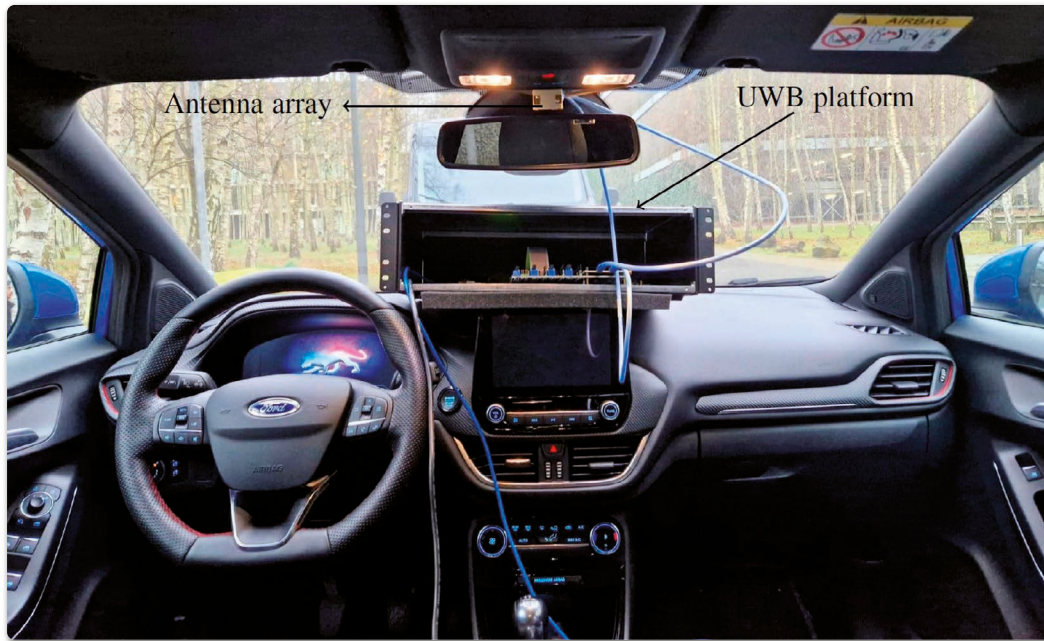
Die verschiedenen Generationen von UWB-Prototyp-Sender- und Transceiver-Chips wurden alle mit kostengünstigen CMOS-kompatiblen Verarbeitungstechniken hergestellt und zeichnen sich durch kleine Siliziumflächen aus.

Das Potenzial der UWB-Technologie für die Radarsensorik

Durch die herausragende Leistung der UWB-Technologie ermutigt, behaupten Experten seit einiger Zeit, dass das Potenzial von UWB weit über „genaue und sichere Entfernungsmessung“ hinausgeht. Sie sehen Chancen in radarähnlichen Anwendungen, die im Gegensatz zur Entfernungsmessung ein einziges Gerät verwenden, das UWB-Impulse aussendet und die reflektierten Signale analysiert, um „passive“ Objekte zu erkennen. In Kombination mit den präzisen Entfernungsmessfunktionen von UWB könnte dies die Anwendungsmöglichkeiten auf den Automobilbereich ausweiten, beispielsweise zur Anwesenheitserkennung im Fahrzeuginnenraum und zur Überwachung der Gesten und der Atmung der Insassen – mit dem Ziel, deren



Architektur des 2TRX (wie auf der VLSI 2025 vorgestellt)



Demonstration des IR-UWB-Radars im Fahrzeuginnenraum (vorgestellt auf der PIMRC 2025)

Sicherheit zu erhöhen. Oder denken Sie an Smart Homes, wo UWB-Radarsensoren eingesetzt werden könnten, um die Beleuchtung entsprechend der Anwesenheit von Personen anzupassen. In Pflegeheimen könnte die Technologie eingesetzt werden, um bei Stürzen einen Alarm auszulösen, ohne dass eine aufdringliche Kameraüberwachung erforderlich ist.

Die Umsetzung solcher UWB-Anwendungsfälle wird durch IEEE 802.15.4ab erleichtert, den Standard der nächsten Generation für drahtlose Technologien, der voraussichtlich Ende des Jahres offiziell verabschiedet wird. 802.15.4ab bietet zahlreiche Verbesserungen, darunter Radar-Funktionalität in IR-UWB-Geräten, wodurch diese zu Sensoren werden.

Die vierte Generation der IR-UWB-Funktechnologie von imec, kompatibel mit 802.15.4z/ab

Auf dem VLSI Technology and Circuits Symposium 2025 (VLSI 2025) stellte imec seinen UWB-Transceiver der vierten Generation vor, der in den vorläufigen Versionen von 802.15.4ab [2] definierten Grundanforderungen für die Radarsensorik

erfüllt. Zu den grundlegenden Eigenschaften gehören u.a. eine verbesserte Modulation, die durch hohe Datenraten unterstützt wird. Darüber hinaus verfügt die UWB-Radarsensorik von imec über einzigartige Funktionen, die verbesserte Radarsensorikfunktionen (z.B. erweiterte Reichweite) und eine rekordverdächtige Datenrate von 124,8 Mb/s bieten – integriert in einem System-on-Chip. Der neue Funkstandard entspricht auch dem aktuellen 802.15.4z-Standard und kombiniert seine Radarsensorikfunktionen mit Kommunikation und sicherer Entfernungsmessung.

Eine Besonderheit des IR-UWB-Radarsensorsystems von imec ist die 2x2-MIMO-Architektur mit zwei Sendern und zwei Empfängern, die im Vollduplexmodus konfiguriert sind. In dieser Konfiguration steuert ein Duplexer, ob der Transceiver im Sende- oder Empfangsmodus arbeitet. Außerdem sind die TXs und RXs miteinander gekoppelt (TX1-RX1, TX1-RX2 und TX2-RX2) und über den Duplexer verbunden. Dadurch kann das Radar gleichzeitig im Sende- und Empfangsmodus betrieben werden, ohne dass RF-Schalter zum Umschalten zwischen den beiden Modi erforderlich sind.

Diese Arbeitsweise ermöglicht es, die kürzeste Entfernung, über die das Radar betrieben werden kann, zu reduzieren – eine Größe, die bisher durch die Zeit begrenzt war, die zum Umschalten zwischen beiden Modi benötigt wurde. Das Vollduplex-basierte Radar von Imec kann in einem Bereich zwischen 30 cm und 3 m betrieben werden – eine bahnbrechende Leistung. In dieser Vollduplex-MIMO-Konfiguration wird die kürzeste Entfernung nur durch die Bandbreite des Radars von 500 MHz begrenzt.

Das IR-UWB 2TRX-Radar verfügt physisch über zwei Antennenelemente, wobei jede Antenne von einem TX und einem RX gemeinsam genutzt wird. Die 2x2-MIMO-Vollduplex-Konfiguration ermöglicht jedoch ein Array mit virtuell drei Antennen, was die Winkelauflösung und den Flächenverbrauch des Radars erheblich verbessert. Im Vergleich zu modernsten Single-Input-Single-Output-Radargeräten (SISO) benötigt das Radar 1,7-mal weniger Fläche und 2,5-mal weniger Antennen, was es zu einer leistungsstarken, kompakten und kostengünstigen Lösung macht. Es werden fortschrittliche Techniken eingesetzt, um die TX- von den

RX-Signalen zu isolieren, was zu einer Isolation von >30 dB über eine Bandbreite von 500 MHz führt.

Die Signalübertragung basiert auf einem hybriden analog/digitalen Polarsender, der Filtereffekte im analogen Bereich für die Signalmodulation einführt. Dies führt zu einem sauberen Sendesignalspektrum, das die gute Leistung und den energiesparenden Betrieb des UWB-Radarsensors unterstützt.

Schließlich verfügt das UWB-Radarsensorgerät zusätzlich zum MIMO-basierten Analog-/HF-Teil über eine fortschrittliche digitale Basisband- (oder Modem-)Komponente, die für die Signalverarbeitung zuständig ist. Diese Komponente extrahiert relevante Informationen wie die Entfernung zwischen dem Radar und dem Objekt sowie eine Schätzung des Eintrittswinkels.

Proof-of-Concept: Demonstration des MIMO-Radarsystems für die Überwachung im Fahrzeuginnenraum

Die Eigenschaften der IR-UWB-MIMO-basierten Radartechnologie sind besonders attraktiv für Anwendungsfälle im Automobilbereich, wo das UWB-Radar nicht nur dazu verwendet werden kann, um festzustellen, ob sich jemand im Auto befindet (z. B. Erkennung der Anwesenheit von Kindern), sondern auch, um die Belegung des Fahrzeugs zu erfassen und Vitalfunktionen wie die Atmung zu überwachen. Diese Funktion steht derzeit auf der Roadmap mehrerer Automobilhersteller und Tier-1-Zulieferer. Derzeit gibt es jedoch keine Radartechnologie, die diese Funktionalität mit der erforderlichen Genauigkeit bieten kann. Eine besondere Herausforderung ist es, die Winkelauflösung zu erreichen, die erforderlich ist, um zwei Ziele in derselben (kurzen) Entfernung vom Radar zu unterscheiden. Darüber hinaus müssen für die Atemüberwachung kleine Bewegungen des Ziels innerhalb weniger Sekunden erkannt werden.

Auf dem IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC 2025) präsentierten Forscher von imec einen ersten Proof-of-Concept, der die Fähigkeit des neuesten IR-UWB-MIMO-Radarsystems von imec zur Durchführung von zwei Sensing-Aufgaben im Fahrzeuginnenraum demonstrierte: Belegungserkennung und Schätzung der Atemfrequenz [3]. Die Messungen im Fahrzeuginneren wurden in einem Kleinwagen durchgeführt. Die UWB-Plattform wurde vor einer Anordnung von zwei selbst entwickelten Antennenelementen platziert, die in der Mitte des Fahrzeugdachs in der Nähe des Rückspiegels angebracht waren. Der Abstand zwischen den Antennen und der Mitte des Fahrer- und Beifahrersitzes betrug 55 cm. Die Versuchsergebnisse bestätigen, dass eine hohe Genauigkeit bei der Schätzung des Ankunfts winkels und der Atemfrequenz erreicht wurde. In einem Szenario, in dem sowohl der Beifahrer- als auch der Fahrersitz besetzt sind, erreicht das UWB-Radarsystem von imec beispielsweise eine Standardabweichung von weniger als 1,9° für die Schätzung des Ankunfts winkels und von 2,95 Atemzügen pro Minute für die Schätzung der Atemfrequenz.

In ihrem Beitrag heben die Autoren von imec einen weiteren Vorteil der Verwendung der UWB-Technologie für die Überwachung im Fahrzeuginnenraum hervor: Die TRX-Architektur, die bereits in einigen Fahrzeugen für die schlüssellose Zugangskontrolle verwendet wird, kann für Radaranwendungen umfunktioniert werden, wodurch die Gesamtkosten gesenkt werden.

Rekord-Datenrate eröffnet neue Möglichkeiten für Daten-Streaming-Anwendungen

Neben seinen hervorragenden Radarsensorik-Fähigkeiten bietet der neueste IR-UWB-Transceiver von imec eine weitere Funktion, die ihn von bestehenden UWB-Lösungen unterscheidet: Er liefert eine Rekord-

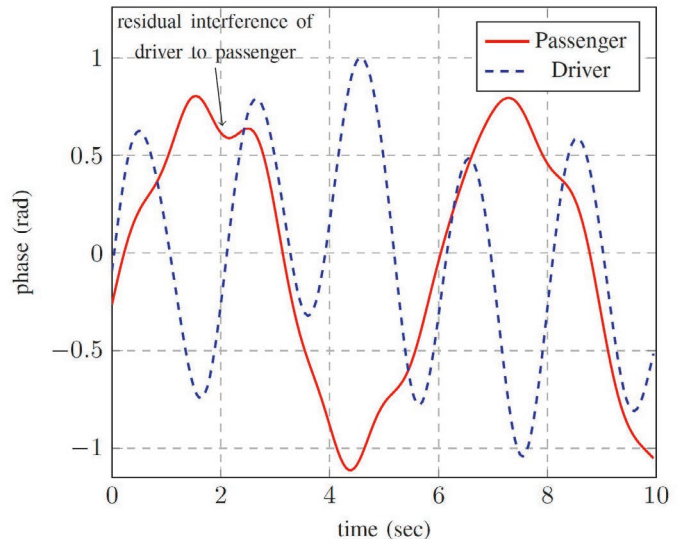
Datenrate von 124,8 Mb/s – die höchste Datenrate, die noch mit dem kommenden Standard 802.15.4ab [2] kompatibel ist. Dies ist etwa 20-mal höher als die derzeit in Entfernungsmessungs- und Kommunikationsanwendungen verwendete Datenrate von 6,8 Mbit/s und resultiert aus einer Optimierung sowohl des analogen Frontends als auch des digitalen Basisbands. Die hohe Datenrate geht auch mit einem geringen Energieverbrauch pro Bit einher – deutlich geringer als beispielsweise bei WiFi –, insbesondere auf der Sendeseite.

Diese Eigenschaften eröffnen neue Anwendungsmöglichkeiten sowohl im Audio- als auch im Videodaten-Streaming. Mögliche Anwendungsfälle sind Smart-Brillen der nächsten Generation oder VR/AR-Geräte, für die der kleine Formfaktor des UWB-TRX ein zusätzlicher Vorteil ist.

Fazit und Ausblick: Erweiterung des Technologieportfolios von UWB um hochentwickelte Entfernungsmessung

In den letzten zwei Jahrzehnten hat die IEEE 802.15.4z-konforme UWB-Technologie ihre Eignung für den Einsatz in massentauglichen Anwendungen zur sicheren Entfernungsmessung und Lokalisierung unter Beweis gestellt und Anwendungsfälle in den Bereichen Automobil, Smart Industry, Smart Home und Smart Building ermöglicht. Unterstützt durch den kommenden Standard IEEE 802.15.4ab können neu entwickelte UWB-Geräte nun auch mit Radar-Funktionalität ausgestattet werden.

Die vierte Generation der IR-UWB-Technologie von Imec ist das erste (öffentlich vorgestellte) 802.15.4ab-konforme Radarsensorgerät, das sich durch hervorragende Radarsensorik auszeichnet und sich sowohl für den Einsatz im Automobilbereich als auch im Smart Home eignet. Die rekordverdächtige Datenrate zeigt auch das Potenzial von UWB für die Erschließung neuer Märkte: Low-Power-Datenstreaming



Ausgelesene Atmungssignale für Fahrer und Beifahrer (vorgestellt auf der PIMRC 2025)

für intelligente Brillen oder AR/VR-Geräte.

Der IEEE 802.15.4ab-Standard unterstützt noch eine weitere Funktion: Advanced Ranging. Dies verbessert das Link-Budget für die Signalübertragung und führt zu einer Vervielfachung der Reichweite – bis zu 100 m bei freier Sichtverbindung. Diese Funktion wird voraussichtlich das Benutzererlebnis für schlüssellose Zugangslösungen für Autos und Smart Buildings erheblich verbessern. Sie kann nicht nur die Reichweite verbessern, sondern auch schwierige Umgebungen besser bewältigen, beispielsweise wenn das Signal durch ein anderes Objekt (z. B. einen Körper) blockiert wird. Laufende Entwicklungen werden diese erweiterte Entfernungsmessung als neue Funktion in der fünften Generation der UWB-Technologie von imec ermöglichen.

Die Zukunft der UWB-Technologie sieht also vielversprechend aus. Nicht nur, dass sich die technologischen Fortschritte in rasantem Tempo vollziehen, auch die laufenden Standardisierungsbemühungen tragen dazu bei, aktuelle und zukünftige UWB-Anwendungen zu gestalten.

Wer schreibt:

Christian Bachmann ist Portfolio Director Wireless & Edge

und leitet die Forschung und Entwicklung des Forschungszentrums im Bereich Wireless und Edge Computing. Dazu gehören UWB- und Bluetooth-Programme, die eine energiesparende Konnektivität der nächsten Generation für Automobil-, Medizin-, Verbraucher- und IoT-Anwendungen ermöglichen. Christian kam 2011 zu imec, nachdem er bei Infineon Technologies und der Technischen Universität Graz gearbeitet hatte. Im Laufe seiner Karriere hat er sich mit einem breiten Spektrum an drahtlosen Kommunikationslösungen für 802.11ah Wi-Fi, Bluetooth LE, 802.15.4 (Zigbee) und Ultrabreitband-Impulsfunk befasst.

Literaturhinweise

- [1] The future of UWB: reconciling sensing with low energy consumption and high bitrates, C. Bachmann et al., Microwave Journal 2023
- [2] An IEEE802.15.4ab/a/z compatible IR-UWB 2TRX with dual-antenna full-duplex 1x3 SIMO radar sensing and aliasing suppressing semi-synchronous TX, A. Narajan Bhat et al., IEEE VLSI 2025
- [3] An IEEE 802.15.4z/Ab-Compatible IR-UWB MIMO Radar System for in-Cabin Monitoring, A. Farsaei et al., IEEE MIMRC 2025 ◀