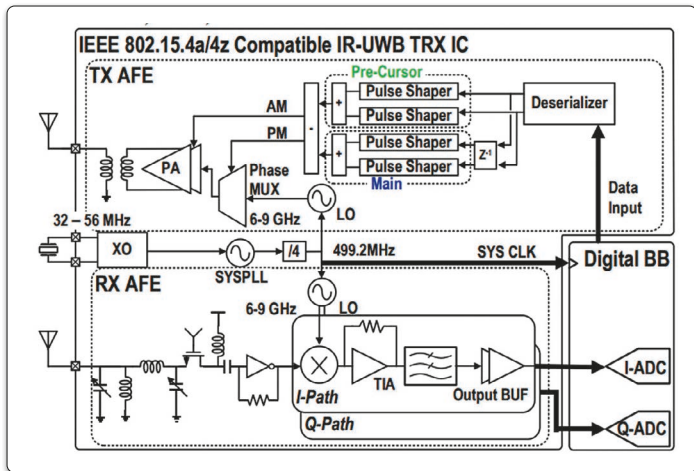


Mehr Sicherheit für Autos

# Fortschritte bei der UWB-Sensorik

Automobilhersteller erforschen und bewerten kontinuierlich innovative Technologien, die ihnen einen Wettbewerbsvorteil verschaffen könnten. Die Ultrabreitband-Technologie ist ein solches Beispiel. Sie unterstützt bereits Premiumfunktionen wie den sicheren schlüssellosen Zugang zum Auto.



Architektur des neuartigen energiesparenden IR-UWB-3Rx-1Tx-Transceivers (die Zeichnung zeigt nur einen der RX-AFE-Schaltungsblöcke)

Aber das Potenzial von UWB geht weit darüber hinaus. Dank seiner genauen Entfernungsmessung könnte die Technologie auch die Radar-Erfassung in der Kabine fördern, was UWB zu einer wichtigen Voraussetzung für die Gestenerkennung in der Kabine macht. Alternativ könnten die Radar-Erkennungsfähigkeiten im Innenraum genutzt werden, um die Anwesenheitserkennung von Kindern (CPD) zu unterstützen (Alarm, wenn ein Kleinkind in einem Fahrzeug zurückgelassen wird).

Forscher und Technologieanbieter untersuchen intensiv, was UWB braucht, um diese Funktionen zu ermöglichen. Federführend ist ein Team von Forschern bei imec. Sie haben kürzlich die Verfügbarkeit eines UWB-Chips mit rekordverdächtig niedrigem Stromverbrauch bekanntgegeben, der einen neuartigen Pulsformungsmechanismus verwendet, um die Messgenauigkeit der Technologie zu verbessern. Ergänzend dazu haben sie auch den Mehrwert fortschrittlicher Signalverarbeitungsalgorithmen für die hochpräzise Erkennung von Fahrzeuginsassen in Echtzeit und die Abschätzung deren Atemfrequenz demonstriert.

### UWB-Technologie: ein potenzieller Lebensretter

Automobilverbände warnen Erwachsene regelmäßig davor, kleine Kinder unbeaufsichtigt in geparkten Autos zu lassen, da sie besonders anfällig für Hyperthermie und Hitzschlag sind. Vor allem, wenn das Auto der Sonne ausgesetzt ist, kann die Temperatur im Innenraum innerhalb von nur fünfzehn Minuten ein kri-

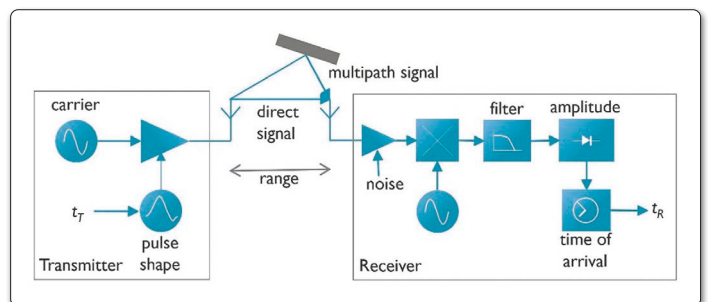
tisches Niveau erreichen. Leicht geöffnete Fenster vermindern dieses Risiko kaum.

Trotz aller Aufklärungskampagnen sind allein in den USA seit 1998 fast 1000 Kinder an einem Hitzschlag im Auto gestorben. Diese Todesfälle hätten vermieden werden können, wenn es entsprechende Warnsysteme gegeben hätte. Die gute Nachricht ist, dass solche Warnmechanismen kurz davor stehen, Realität zu werden, da Initiativen wie das European New Car Assessment Program (Euro NCAP) die Automobilhersteller dazu anspornen, Systeme zur Anwesenheitserkennung von Kindern als Standard zu integrieren.

Bisherige CPD-Systeme basierten hauptsächlich auf Ultraschall, leiden aber unter den Einschränkungen der Genauigkeit, die durch externe Vibrationen und Lärm verursacht werden. Die Radar-Technologie bietet eine brauchbare Alternative, insbesondere die 60-GHz-Variante. Sie ist weniger anfällig für externe Störungen und liefert hochpräzise Ergebnisse. Auf der anderen Seite sind mmWave-Radar-Lösungen aufgrund ihrer erheblichen Kosten gegenwärtig kaum für den Masseneinsatz geeignet.

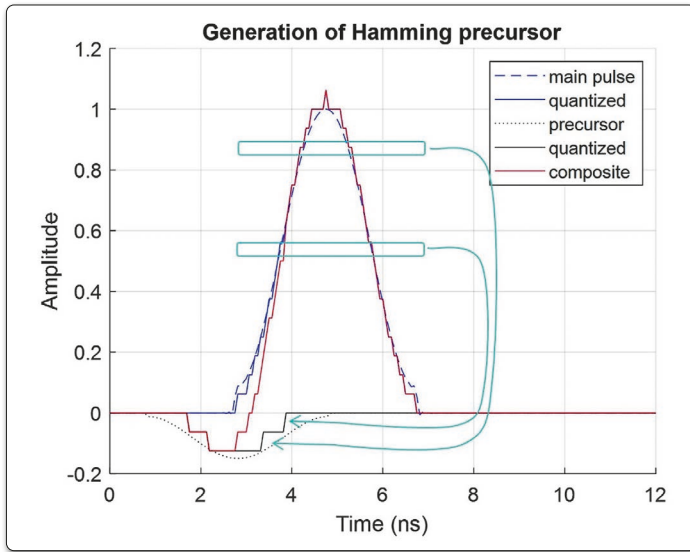
Hier tritt UWB-Radar auf den Plan. Zunächst einmal hat UWB den Vorteil, dass es bereits in (Premium-)Fahrzeugen integriert ist und dort Funktionen wie den schlüssellosen Zugang unterstützt. Mit anderen Worten, es handelt sich um eine Technologie, die im Automobilbereich nicht unbekannt ist. Da das UWB-Radar im Frequenzbereich von 6 bis 10 GHz arbeitet, durchdringt es außerdem problemlos die Autositze. Es ist auch in der Lage, selbst die kleinsten Bewegungen zu erkennen – wie das Heben und Senken des Brustkorbs eines Säuglings bei jedem Atemzug. Und zu guter Letzt ist es kostengünstiger als das mmWave-Radar.

Technologieanbieter demonstrieren und bewerben bereits den Mehrwert des UWB-Radars als lebensrettende Technologie, auch wenn praktische Implementierungen noch nicht kommerziell verfügbar sind. Dennoch ist bereits erkennbar, dass jede praktikable Lösung über eine Transceiver-Architektur verfügen muss, die gleichzeitiges Senden und Empfangen ermöglicht. Außerdem sollte sie einen extrem niedrigen Stromverbrauch haben, um die problemlose Unterstützung von CPD-Systemen zu gewährleisten,



Blockdiagramm eines UWB-Senders und -Empfängers zur Messung der ToA eines HF-Pulses in einer unübersichtlichen Umgebung, die durch Mehrwegsignale gekennzeichnet ist

Autoren:  
Christian Bachmann  
Amirashkan Farsaei  
Chris Marshall  
Imec  
www.imec-int.com



**Die Erzeugung einer Pulsform mit einem Vorläufer für einen Hamming-Puls unter Verwendung eines gegenphasigen, teilweise überlappenden Hilfspulses**

die mit Autobatterien betrieben werden. Auch die hohe Präzision der Entfernungsmessung wird ein entscheidender Erfolgsfaktor sein.

**IR-UWB-Transceiver mit beispiellos niedrigem Stromverbrauch**

Als wichtigen Meilenstein für die Realisierung von UWB-Radar-on-Chip-Anwendungen im Fahrzeug haben Forscher von imec vor kurzem einen IEEE 802.15.4z-kompatiblen Impulsradio (IR) UWB-Transceiver mit beispiellos niedrigem Stromverbrauch vorgestellt.

Auf der Grundlage einer kostengünstigen Siliziumimplementierung verbraucht ihr wegweisender 6...9-GHz-IR-UWB-Transceiver lediglich 8,7 mW bzw. 21 mW im kontinuierlichen Tx/Rx-Modus1. Dies ist der niedrigste Stromverbrauch aller aktuellen IEEE 802.15.4z-Funkgeräte.

Der niedrige Stromverbrauch des in 28-nm-CMOS-Technologie gefertigten Chips, der eine Siliziumfläche von 1,33 mm<sup>2</sup> einnimmt, resultiert aus einer hochoptimierten, stromsparenden und interferenzunempfindlichen Rx-Architektur in Verbindung mit einer innovativen digitalen Polarsenderarchitektur. Eine verteilte, zweistufige, vollgigi-

tale PLL reduziert den Stromverbrauch des Chips weiter und trägt zu einer verkürzten Messzeit für die Lokalisierung bei.

**Pulsformung verbessert UWB-Entfernungsgenauigkeit**

Eine stromsparende Lösung ist für die Realisierung von Systemen zur Erkennung der Anwesenheit von Kindern (und anderer Funktionen in der Fahrgastzelle) von entscheidender Bedeutung, aber ebenso wichtig ist die Messgenauigkeit dieser Technologie.

Um die Lokalisierung von Objekten und die Entfernungsmessung zu unterstützen, verlassen sich Ultrabreitband-Positionierungssysteme auf die Laufzeit von RF-Pulsen (ToF). Nach der Aussendung eines Impulses (bei einer Kanalmitfrequenz von ca. 6 GHz) filtert und misst ein Empfänger die Ankunftszeit (ToA) des Signals, um die Entfernung zwischen Sender und Empfänger abzuschätzen.

Die Herausforderung besteht jedoch darin, dies auch im Inneren eines Fahrzeugs zu ermöglichen, d.h. in einer Umgebung, die anfällig für Signalverzerrungen ist, die durch Reflektionen vom Fahrzeugboden, dem Dach, den Fenstern, den Sitzen usw. verursacht werden. Diese Reflexionen führen zu Mehr-

wegsignalen, die eine genaue Messung des direkten Signals und eine zuverlässige Schätzung des Standorts und der Entfernung des Ziels erschweren.

In einer Multipath-Umgebung gibt es nicht nur ein LOS-Signal (Line of Sight), das gemessen werden sollte, um die Entfernung und den Standort eines Ziels zu bestimmen, sondern auch NLOS-Signalkomponenten (Non-Line of Sight), die von Oberflächen reflektiert und von Objekten gestreut werden. Diese Mehrwege-Komponenten erschweren die Messung des direkten Pfads und die zuverlässige Schätzung der Entfernung und des Standorts eines Objekts. Quelle: imec.

Um die Auswirkungen von Multipath-Komponenten zu neutralisieren, werden Pulsformungsstrategien verwendet, die darauf abzielen, den Puls so kurz wie möglich zu machen. Einerseits verbessert die schnelle Änderung der Amplitude die Genauigkeit, mit der die Ankunftszeit des Signals gemessen werden kann. Andererseits hilft die kurze Dauer des Pulses bei der Messung des direkten LOS-Pfads, bevor die NLOS-Mehrwegesignale eintreffen.

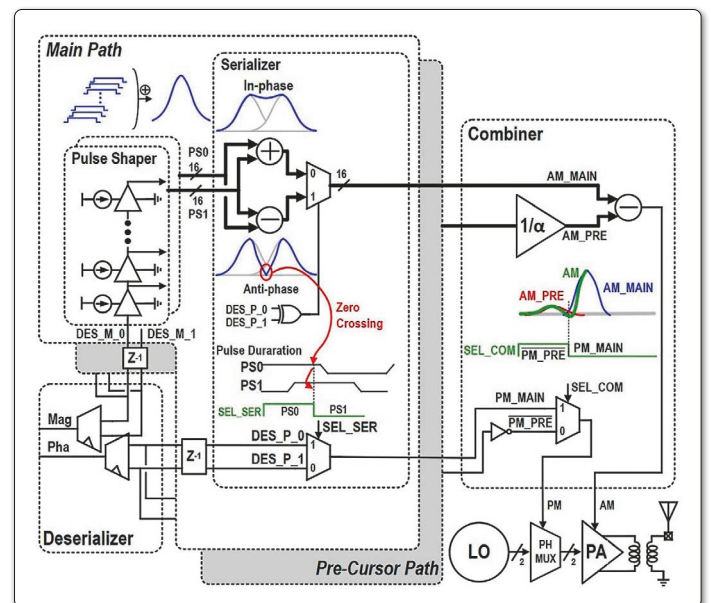
Im Allgemeinen ist die Gestaltung der Impulsform recht flexi-

bel: Solange die UWB-Standards und -Spezifikationen eingehalten werden, bleibt es den System- und Produktentwicklern weitgehend überlassen, die Impulsform sowie das Design der Sender- und Empfängerschaltungen zu optimieren.

Ein wichtiges Element ist jedoch, dass der Frequenzbereich von UWB in Kanäle unterteilt wurde, um Interferenzen zwischen den Nutzern zu vermeiden. Der Sender muss daher eine Spektrummaske einhalten, die die Bandbreite begrenzt und das Signal und die ToA-Messung einschränkt. Der Empfänger verfügt ebenfalls über einen Kanalfilter mit begrenzter Bandbreite, um potenzielle Störungen in benachbarten Kanälen zu entfernen. Mit anderen Worten, die Notwendigkeit einer kurzen Pulsdauer muss gegen das belegte Spektrum abgewogen werden - je kürzer der Puls, desto breiter das Spektrum. Die Mechanismen zur Impulsformung müssen diese wichtige Einschränkung berücksichtigen.

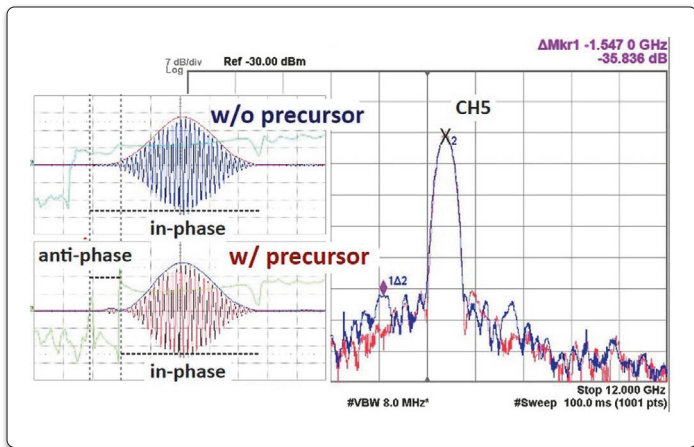
Ein innovativer Ansatz zur Pulsformung unter Verwendung eines Vorläufers mit der entgegengesetzten Trägerphase

Um die Ankunftszeit eines Pulses genau abschätzen zu können, muss vor allem die



**TX-Schaltungsentwurf zur Erzeugung eines Pulses mit einem gegenphasigen Vorläufer**





**Ausgangssignal und Spektrum des Senders, mit und ohne Vorläufer bzw. die durch den Sender erzielte Leistungsverbesserung (unter Beibehaltung der spektralen Konformität)**

Anstiegsflanke der Pulsform berücksichtigt werden. Dies gilt vor allem in Innenräumen (und in Fahrgastzellen), in denen es häufig zu Mehrwegeeffekten kommt, die die hintere Flanke – und in gewissem Maße sogar die Spitze – des Pulses verfälschen können.

In einem Fachbeitrag, der vor kurzem auf der Konferenz Indoor Positioning & Indoor Navigation (IPIN) vorgestellt wurde, schlagen die Forscher von imec daher vor, eine asymmetrische Pulsform mit einer steilen Vorderflanke zu erzeugen, um die Mehrwegkomponenten vom Hauptsignal zu trennen – unter Verwendung eines phasenverschobenen Vorläuferpulses mit entgegengesetzter Trägerphase. Die Schaffung einer solchen asymmetrischen Pulsform ermöglicht die Schärfung der Anstiegszeit des Pulses, verbessert die Präzision der ToA-Messung und verringert die Störungen durch nahe Mehrwegkomponenten – und bleibt dabei mühelos innerhalb der spektralen Maske für die Einhaltung der kanalisierten Signale.

Als Ausgangspunkt wählten die Forscher von imec eine Pulsform, die auf einer Hamming-Wellenform basiert, deren Spektrum eine gute Marge zur UWB-Spektrummaskenanforderung aufweist. Die übertragene Pulsform besteht aus einem Hauptpuls und einem Hilfspuls

gegen die Phase, der 2 ns vor dem Hauptpuls übertragen wird. So entsteht ein kurzer, negativ verlaufender Vorläuferimpuls, der den Beginn des Hauptimpulses abschwächt und die Steigung der ansteigenden Flanke bis zur Spitze erhöht – und das alles innerhalb der Grenzen der Spektralmaske.

**Erzeugung eines Impulses mit einem Gegenphasen-Vorläufer**

Um das Konzept der Pulsform voll auszuschöpfen, haben die Forscher von imec eine Senderschaltung entwickelt, die die Erzeugung eines Pulses mit einem gegenphasigen Vorläufer ermöglicht. Das Design basiert auf der Implementierung des Ultrabreitband-Transceivers von imec.

TX und RX werden von einer stabilisierten Frequenzquelle versorgt, die eine kaskadierte PLL-Topologie mit einem Quarzoszillator verwendet, um den Systemtakt von 499,2 MHz und die Frequenz des LOs von 6 bis 9 GHz zu erzeugen. LO-PLLs der zweiten Stufe dienen dann TX und RX getrennt, wodurch der Stromverbrauch reduziert und die Taktverteilung vereinfacht wird.

Die größten Herausforderungen bei der Entwicklung moderner UWB-Sender sind der Kompromiss zwischen Spektrum und niedriger Leistung sowie

der Umgang mit Inter-Pulse-Interference (IPI). Die IEEE 802.15.4a/z-Standards definieren die Kanalbandbreite und die Chip-/Impulsrate von 499,2 MHz. Dies erfordert eine Pulsdauer von ~4 ns, die die Chip-Periode übersteigt. Im Gegensatz zu Einzelimpulsmustern in der Präambel kann IPI im Nutzdatenstrom aufgrund von aufeinanderfolgenden Impulsen mit der Chip-Rate erfolgen.

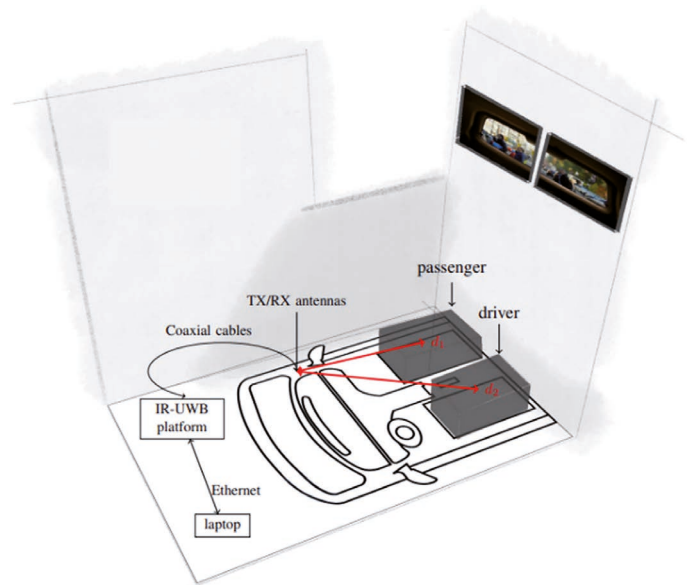
Das UWB-TX-Design von Imec verfügt über eine digitale Deserialisierungs-Serialisierungsschaltung (DesSer), um den IPI zu reduzieren. Ein 2-Bit-Amplituden- und Phasencode mit 499,2 MHz wird zunächst in zwei verschachtelte parallele Pfade mit 249,6 MHz deserialisiert. Jeder Pfad verwendet den asynchronen Impulsformer und erzeugt 16 verzögerte Teilimpulse, die zusammen eine quantisierte Hamming-Impulsform bilden. Die asynchrone Impulsformung beseitigt vollständig die spektralen Bilder, unter denen synchrone Impulsformungssysteme leiden, allerdings um den Preis eines höheren Quantisierungsrauschens. Das Quantisierungsrauschen kann jedoch durch die Wahl ausreichender Quantisierungsstufen reduziert werden.

Die Ausgänge der beiden ineinander verschachtelten parallelen asynchronen Impulsformer werden von einem digitalen Serialisierer serialisiert, der sie je nach der durch den Phasencode vorgegebenen Polarität entweder summiert oder subtrahiert. Darüber hinaus extrahiert der digitale Serialisierer ein neues Phasencode-Signal und synchronisiert es mit der Schaltung zur Erkennung des Nulldurchgangs, wodurch der Phasenübergang ohne störende Emissionen erleichtert wird.

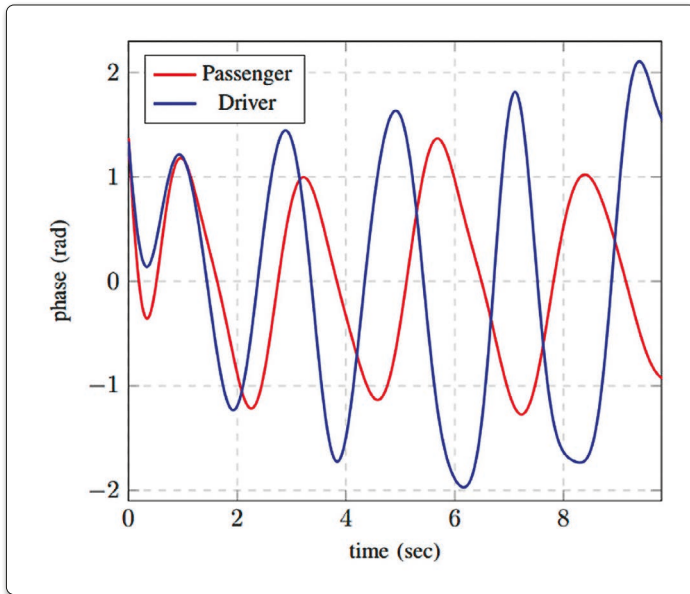
Ein zusätzlicher paralleler Pfad erzeugt unterdessen einen kleineren Vorläuferimpuls mit entgegengesetzter Polarität. Ein ähnlicher DesSer-Schaltkreis kombiniert digital den Vorläufer- und den Hauptimpuls vor dem Leistungsverstärker, während die Umschaltung zwischen dem gegenphasigen Vorläufer- und dem Hauptimpuls ebenfalls durch einen Nulldurchgangserkennungsschaltkreis synchronisiert wird, um die Erzeugung von Störsignalen zu vermeiden.

**Wesentliche Verbesserung der Messgenauigkeit**

Experimente mit der IC-Implementierung von imec zeigen,



**Illustration des Demo-Aufbaus von imec, der ein monostatisches IR-UWB-Radar mit Vollduplex und einem einzigen Eingang und einem einzigen Ausgang (SISO) verwendet. Der Radarsender (TX) beleuchtet das Ziel, während der Empfänger (RX) das reflektierte Signal misst**



**Extrahierte Atemsignale für Beifahrer und Fahrer mit Frequenzen von 24 bzw. 28,2 bpm**

dass sie die ToA-Messleistung und die UWB-Entfernungspräzision effektiv verbessert. Die Pulsmischschaltung hält zusammen mit der Resynchronisation die Nebenkeulen-Unterdrückung von -35 dBc sowohl ohne als auch mit Vorläuferpulsen aufrecht, während mit den Vorläuferpulsen die Anstiegszeit der Vorderflanke des Hauptpulses von 700 auf 550 ps reduziert wird. Zweitens zeigt ein Algorithmus zur Untersuchung der Auswirkung auf die ToA-Schätzung, dass sich die Genauigkeit der Differenzschätzung um einen Faktor von (fast) vier verbessert, wenn der Impuls mit Vorläufer verwendet wird.

**IEEE-802.15.4z-kompatibles IR-UWB-Radar-System für die Innenraumüberwachung**

Auf der Grundlage ihres wegweisenden UWB-Transceiver-Designs haben die Forscher von imec bereits den nächsten Schritt unternommen und ein experimentelles IR-UWB-Radarsystem für die Echtzeit-Erkennung im Fahrzeuginnenraum entwickelt. Das System arbeitet mit einer Bandbreite von 499,2 MHz und entspricht damit dem Standard IEEE 802.15.4z. Es zeigt drei überzeugende Anwendungsfälle im Automobilbereich, nämlich

die Erkennung von Personen auf dem Fahrer- und/oder Beifahrersitz, die Schätzung der Atemfrequenz und die Erkennung von Gesten (der Beifahrer).

Im Demo-Setup, das eine Innenraumumgebung simuliert, sind die Antennen strategisch an den Seiten angebracht, zum Boden hin geneigt und stärker zum Fahrersitz hin geneigt, um beide Sitze in die Hauptkeule der Antennen einzubeziehen. Die Beifahrer- und Fahrersitze haben einen Abstand von 45 cm (Kante zu Kante), wobei die Antennen 1,17 bzw. 1,7 m von der Mitte des Beifahrer- bzw. Fahrersitzes entfernt sind. Jede TX- und RX-Antenne ist über 100 cm lange Kabel mit der IR-UWB-Plattform verbunden, die alle 10 ms Kanalimpulsantworten (CIRs) unter Verwendung von IEEE-802.15.4z-konformen SPO-Paketen erfasst. Nach dem Despreading und der CIR-Akkumulation wird eine erfasste CIR über eine schnelle Zeit mit einer Auflösung von  $T_f = 1$  ns geschätzt. Schließlich wird die UWB-Plattform über ein Ethernet-Kabel mit einem Laptop verbunden, auf dem speziell entwickelte Algorithmen die erfassten Daten verarbeiten.

Der entscheidende Faktor bei der Erkennung von zwei nahe

beieinander liegenden Zielen für ein System mit einer Bandbreite von 499,2 MHz liegt in der Verwendung fortschrittlicher Signalverarbeitungsalgorithmen. Besonders in einer Fahrzeugkabine, in der sich der Fahrer und die neben ihm sitzende Person in unmittelbarer Nähe befinden, stellt dies eine große Herausforderung dar. Durch den Einsatz ihrer speziell entwickelten Algorithmen gelang es den Forschern von imec jedoch, die Anwesenheit beider Personen präzise zu erkennen und so eine Erkennungswahrscheinlichkeit von über 95% zu erreichen.

Die Forscher führten zwei Versuchsreihen durch, um die Fähigkeit des Systems zur Schätzung der Atemfrequenz zu bewerten. Im ersten Szenario bestand ihr Ziel darin, die Genauigkeit des Systems bei der Schätzung der Atemfrequenz mit einer Toleranz von weniger als 1 bpm zu überprüfen. Bei der Verwendung eines Referenzgeräts mit Gürtelsensoren zur Messung der Atemfrequenz der Testperson zeichnete das Referenzgerät eine Atemfrequenz von 11,96 bpm auf, während das Demosystem diese auf 11,71 bpm schätzte, was die Genauigkeit des Systems innerhalb der gewünschten Schwelle bestätigte. Im zweiten Szenario wollten die Forscher die Fähigkeit des Systems demonstrieren, die Atemfrequenz von Beifahrer und Fahrer gleichzeitig zu schätzen. Auch dieses Ziel wurde erfolgreich erreicht. Jedoch zeigte sich, dass Körperbewegungen und Interferenzen zwischen den Zielpersonen die Messungen verzerren können. Deshalb erwägen sie für die Zukunft die Entwicklung spezieller Algorithmen, die diese Faktoren abbildern.

Schließlich spielten die Algorithmen auch bei der Erkennung einer vordefinierten Geste in der Kabine eine entscheidende Rolle. Die Experimente ergaben, dass ihr Klassifikator eine beeindruckende Genauigkeit von 99,9% bei der korrekten Erkennung falscher Gesten und von 90,5% für die Referenzgeste erreichte. Das könnte durch

zusätzliche Datenerfassung noch verbessert werden.

Link: [www.imec-int.com/en/5G-and-wireless-iot-communication/ultra-wide-band-ubw-technology](http://www.imec-int.com/en/5G-and-wireless-iot-communication/ultra-wide-band-ubw-technology)

**Christian Bachmann**

ist Programmleiter für drahtlose Sensorik bei imec. Er leitet die Ultrabreitband- und Bluetooth Secure Proximity-Mikroortungsprogramme des Forschungszentrums, die Anwendungen der kommenden Generation in den Bereichen Automobil, Medizin und IoT ermöglichen. Christian kam 2011 zu imec, nachdem er bei Infineon Technologies und der Technischen Universität Graz gearbeitet hatte. Im Laufe seiner Karriere hat er ein breites Spektrum an drahtlosen Kommunikationslösungen für 802.11ah Wi-Fi, Bluetooth LE, 802.15.4 (Zigbee) und Ultrabreitband-Impulsfunk kennengelernt.

**Amirashkan Farsaei**

ist Forscher im Team Internet der Dinge bei imec in den Niederlanden, wo er an Ultrabreitband-Radaranwendungen und Bluetooth-Kanalsondierung arbeitet. Er kam 2021 nach seinem Abschluss an der Technischen Universität Eindhoven zu imec, wo er seine Doktorarbeit über massive MIMO-Systeme für 5G-Anwendungen schrieb.

**Chris Marshall**

ist leitender Mitarbeiter des technischen Personals im Team Internet der Dinge bei imec in den Niederlanden. Er arbeitet an Fortschritten bei drahtlosen Lokalisierungstechnologien, die auch in schwierigen Innenräumen und in Kraftfahrzeugen gut funktionieren. Er kam 2021 zu imec, nachdem er eine lange Karriere im Bereich der drahtlosen Innovation hinter sich hat, von Single-Chip-Empfängern bis zu GSM-Chipsätzen und von Low-Power-Funksystemen bis zu GPS-Software. ◀