

Einfacheres Antennen-Design

Phasengesteuerte Strahlformungs-ICs

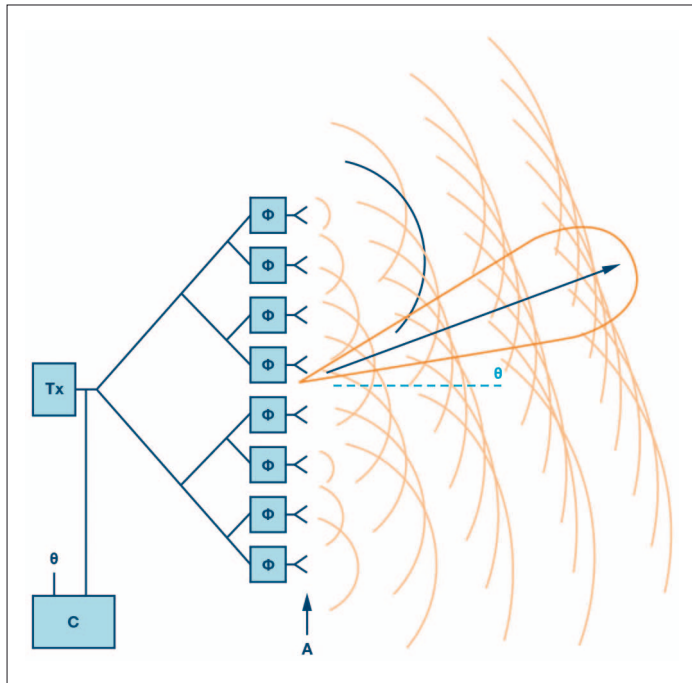


Bild 1: Darstellung der grundlegenden Theorie eines phasengesteuerten Antennenelements

Paradigmenwechsel in der Branche. Bisherige Nachteile von phasengesteuerten Antennen werden durch fortschrittliche Halbleitertechnik eliminiert. Damit schrumpfen Abmaße, Gewicht und Leistungsbedarf.

munikation einschließlich vernetzter Automobile.

Die Technik

Eine phasengesteuerte Antenne ist eine Ansammlung von einzelnen Antennenelementen, die so zusammengefügt sind, dass das Strahlmuster jedes einzelnen Elements konstruktiv mit den benachbarten Elementen in der Form kombiniert ist, dass im Ergebnis die sogenannte Hauptkeule entsteht. Diese überträgt Energie in die gewünschte Richtung, wobei die Antenne so konstruiert ist, dass Signale in unerwünschten Richtungen durch Phaseninterferenz eliminiert werden, jedoch sind auch Seitenkeulen möglich. Durch Anpassung der Phasenlage des in die einzelnen Antennenelemente eingespeisten Signals kann die Abstrahlungsrichtung beeinflusst werden.

Einleitung

Parabolantennen mit Dreharm haben einige Nachteile. Wegen der Größe (Windlast) ist nur eine langsame Nachführung möglich, und die Langzeit-Zuverlässigkeit ist gering. Auch ist nur ein einziges Strahlungsmuster möglich. Daher haben sich die Entwicklungsingenieure der phasengesteuerten Antennentechnik zugewandt. Diese Antennen werden elektrisch „geführt“ und bieten Vorteile wie flaches Gehäuse und geringe Abmaße, verbesserte Langzeit-Zuverlässigkeit, schnelle Strahlnachführung und das gleichzeitige Ausbilden mehrerer Strahlen. Das eröffnet Einsatzmöglichkeiten im Militär, in der Satellitenkommunikation (SatCom) und der 5G-Telekom-

Die Aufmachergrafik zeigt, wie man die Phase jedes einzelnen Antennenelements in einem linearen Array justieren kann, um einen effektiven Sendestrahlin

Dieser Artikel beschreibt die Vorteile elektrisch gesteuerter Antennen. Er geht dann in die Fortschritte bei den Halbleitern über, die dabei helfen, das Ziel von verbesserter SWaP-C für diese Antennen zu erreichen, gefolgt von konkreten Produktbeispielen, welche dies ermöglicht.

Drahtlose Kommunikations- und Radarsysteme gehen einher mit einem wachsenden Bedarf an innovativen Antennentechniken, um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen.

Viele neue Anwendungen sind nur mit Antennen möglich, die weniger Versorgungsleistung in einem flacheren Format benötigen als mechanisch geführte Parabolantennen. Diese Anforderungen entstehen zusätzlich zu existierenden Anforderungen. So muss das System schnell auf eine neue Gefährdung reagieren oder einem zusätzlichen Nutzer antworten und gleichzeitig mehrfache Datenströme übertragen. Ein Betrieb über längere Lebenszeiten bei aggressiven Kostenzielen wird gefordert. In einigen Applikationen gilt es, ein einkommendes Störsignal zu „nullen“ und eine geringe Störungswahrscheinlichkeit zu haben.

Phasengesteuerten Antennen können diese Anforderungen meistern und führen zu einem

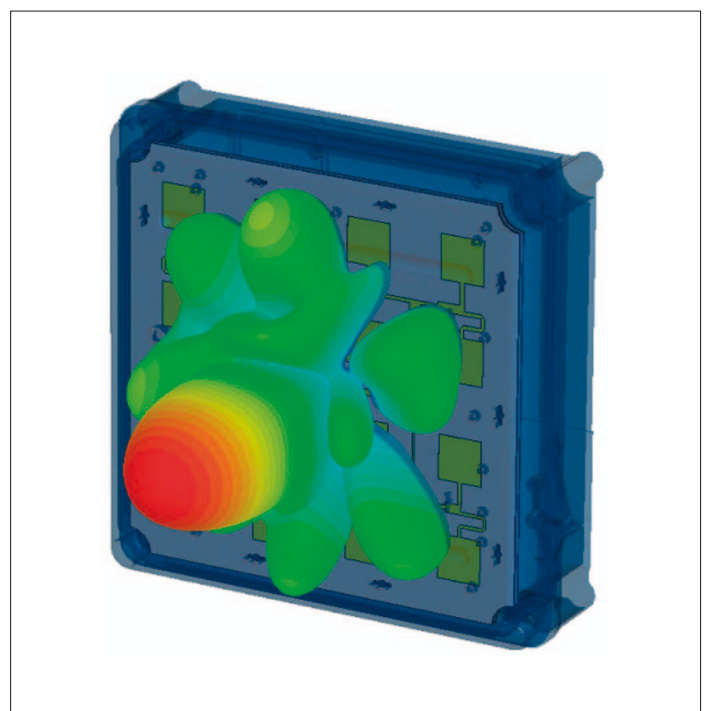


Bild 2: Darstellung des Abstrahlmusters eines 4x4-Antennenarrays

Analog Devices, Inc.
www.analog.com

Basisformeln

$$Antenna\ Gain\ (G_t) = \frac{Radiation\ Intensity\ in\ Desired\ Direction}{Radiation\ Intensity\ of\ Isotropic\ Antenna\ (All\ Angles)} = 10\ Log\ N + G_e$$

$$EIRP = P_t \times G_t$$

$$\frac{G_t}{T_n} = \frac{Antenna\ Gain}{Noise\ Temperature}$$

$$T_n = [Noise\ Factor - 1] \times Temp$$

$$P_t = 10LogN + P_e$$

- N ... Anzahl der Elemente
- G_e ... Elementgewinn
- G_t ... Antennengewinn
- P_t ... gesamte Senderleistung
- P_e = Leistung pro Element
- T_n = Rauschtemperatur

der gewünschten Richtung zu erzeugen. Voraussetzung ist, dass jede Antenne im Array eine unabhängige Phasen- und Amplitudeneinstellung hat, um das gewünschte Abstrahlmuster zu erzeugen. Die Möglichkeit einer schnellen Steuerung des Strahls liegt auf der Hand, weil es keine mechanisch bewegten Teile gibt.

Auf Halbleiterbausteinen basierende Phaseinstellungen können in Nanosekunden erfolgen. Zudem ist es möglich, ein Interferenzsignal zu absorbieren. Ein zusätzlicher Vorteil ist die Möglichkeit, gleichzeitig mehrere Keulen auszubilden und zu steuern. Dies wird durch die

digitale Signalverarbeitung der Datenströme im Basisband ermöglicht.

Man nutzt Planarantennenelemente, angeordnet in Reihen und Spalten gleicher Anzahl, sodass bei einem 4x4-Design 16 Elemente vorhanden sind, s. Bild 1 zu sehen. Ein solches Antennenarray kann in Bodenradaranlagen auf über 100.000 Elemente anwachsen.

Es gibt einen Zielkonflikt zwischen der Größe des Antennenarrays und der Leistung jedes einzelnen abstrahlenden Elements, welches die Richtung des Strahls und die effektiv abgestrahlte Leistung beeinflusst. Die Antennen-

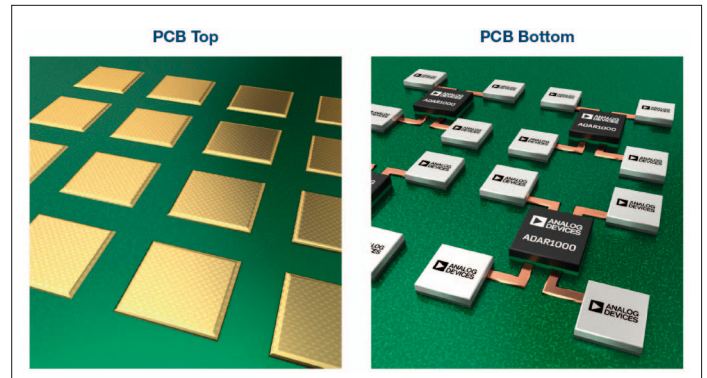


Bild 3: Ein flaches Antennendesign zeigt die Antennen auf der Oberseite und die ICs auf der Unterseite der Baugruppe

leistungsfähigkeit kann bestimmt werden, indem man einige allgemeine Leistungsparameter betrachtet. Häufig konzentrieren sich Antennenentwickler dabei auf den Antennengewinn und die effektive isotrop abgestrahlte Leistung (EIRP) und auch das G_t/T_n. Es gibt einige Basisgleichungen, um diese Parameter zu berechnen, s. Kasten. Man erkennt dabei, dass der Antennengewinn und die EIRP direkt proportional zur Anzahl der Antennen im Array sind. Dies kann zu großen Arrays führen, wie man sie in Bodenradaranlagen findet.

Ein weiterer Schlüsselparameter ist der Abstand der Antennenelemente. Hat man das Systemziel mit der Anzahl der Elemente bestimmt, werden die physikalischen Arrayabmessungen in erster Linie vom Durchmesser jeder Einzelzelle festgelegt. Dieser muss weniger als die halbe Wellenlänge betragen, um Spiegelkeulen (grating lobes) zu vermeiden. Spiegelkeulen tragen zu jener Energie bei, welche in

unerwünschte Richtungen abgestrahlt wird. Diese Ausdehnungsbegrenzung führt im Antennenarray zu strengen Anforderungen an die Elektronik, welche klein, verbrauchsarm und leicht sein muss. Die Abstände mit maximal halber Wellenlänge sind besonders bei höheren Frequenzen herausfordernd, wenn die Fläche jeder Elementarzelle kleiner wird. Dies erfordert bei höheren Frequenzen zunehmend höherintegrierte Lösungen, zudem muss das Wärmemanagement vereinfacht werden.

Es gibt viele Herausforderungen beim Design des Arrays, wie das Routen der Steuerleitungen, das Stromversorgungsmanagement, Schaltungen für den gepulsten Betrieb, das Wärmemanagement, Umweltbedingungen etc. Es besteht eine deutliche Tendenz hin zu kleinen, flachen und leichten Arrays. Die traditionelle Architektur (plank architecture) verwendet kleine mit Elektronik bestückte Leiterplatten, die rechtwinklig in die Rückseite der Antennenleiterplatte eingesteckt werden. Diese Methode wurde in den letzten 20 Jahren immer weiter verbessert und die Abmaße dieser Baugruppe wurden immer weiter reduziert und damit auch die Bauhöhe der Antenne. Die nächste Design-Generation verlässt dieser Architektur zugunsten eines Flachantennenansatzes, für den jetzt eine genügend hohe Integration erreicht ist. So kann jedes IC direkt auf die Rückseite der Antennenbaugruppe bestückt werden, was die Höhe der

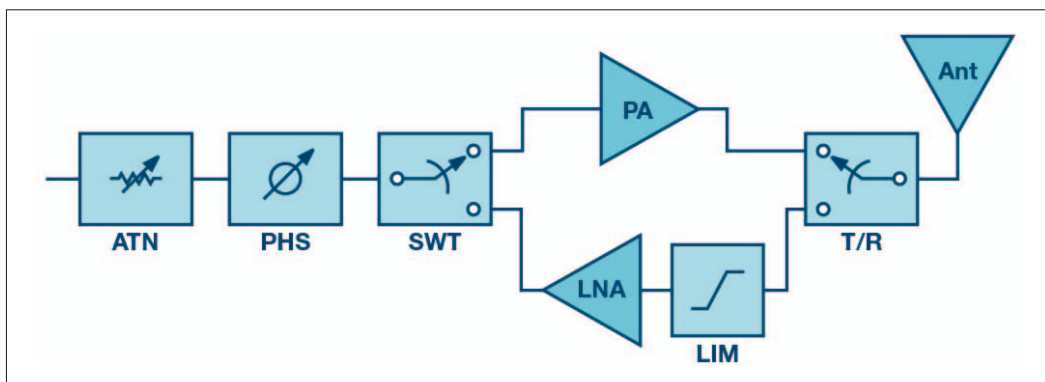


Bild 4: Typisches HF-Frontend für eine phasengesteuerte Antenne

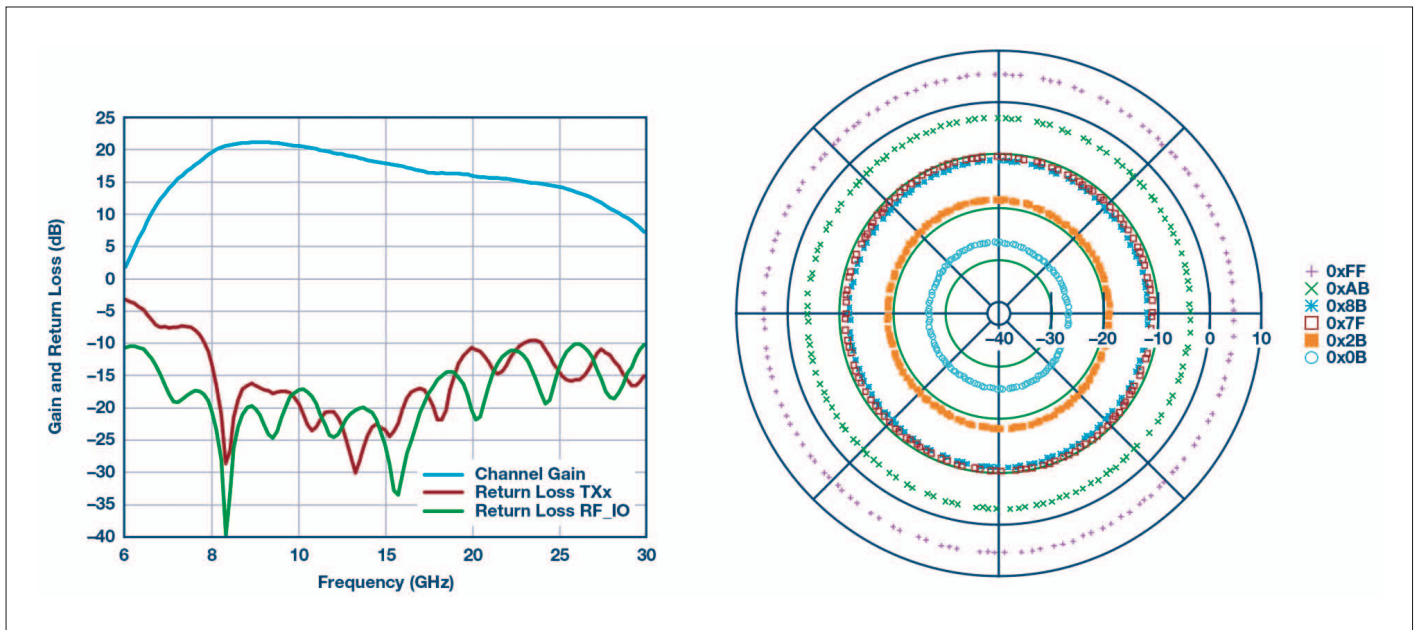


Bild 5: Tx-Gewinn/Rückflussdämpfung und Phase/Verstärkungssteuerung bei einer Frequenz von 11,5 GHz

Antenne signifikant verringert, weshalb sie sich nun einfacher in portablen oder Luftfahrt-Applikationen einsetzen lässt. In Bild 2 sind die vergoldeten Flachantennenelemente auf der Oberseite der Leiterplatte gezeigt und in Bild 3 sieht man das analoge Frontend auf der Unterseite. Dies ist nur ein Teilbereich der Antenne; es könnte z.B. noch eine Frequenzumsetzstufe an einem Ende der Antenne geben und ein Verteilungsnetzwerk, um einen einzigen HF-Eingang in das gesamte Array zu routen. Es ist leicht zu erkennen, dass hochintegrierte ICs die Schwierigkeiten im Antennendesign signifikant reduzieren und dass die Antenne damit kompakter wird. Da immer mehr Elektronikfunktionalität auf einer kleineren Fläche komprimiert wird, erfordert die Antennenentwicklung neue Halbleitertechnologien.

Digitale vs. analoge Strahlformung

Die meisten phasengesteuerten Arrayantennen, die in den vergangenen Jahren entwickelt wurden, nutzen die analoge Strahlformung, bei welcher die Phaseinstellung bei der HF oder Zwischenfrequenzen erfolgt und wo es einen einzigen Satz Datenwandler für die gesamte Antenne

gibt. Es besteht jedoch ein wachsendes Interesse an der digitalen Strahlformung, bei der ein Satz Datenwandler pro Antennenelement eingesetzt wird und wo die Phaseinstellung digital in einem FPGA oder in speziell angepassten Datenwandlern erfolgt. Das hat mehrere Vorteile, angefangen bei der Fähigkeit, zeitgleich mehrere Strahlkeulen zu bilden oder deren Anzahl nahezu verzögerungsfrei zu ändern. Diese bemerkenswerte Flexibilität ist für viele Anwendungen attraktiv. Kontinuierliche Verbesserungen der Datenwandler verringern die Verlustleistung und erlauben höhere Frequenzen, wobei die Abdeckung des L- und S-Bands diese Technik auch für Radarsysteme geeignet macht.

Es gilt, einige Faktoren beim Vergleich der analogen mit der digitalen Strahlformung zu betrachten, doch die Grundentscheidung wird meist von der Anzahl der erforderlichen Strahlen, der Verlustleistung und den Kosten bestimmt. Die Methode des digitalen Strahlformens hat mit einem Datenwandler pro Element üblicherweise einen höheren Leistungsbedarf, zudem benötigen die Wandler einen hohen Dynamikbereich, da ein Strahlmuster, welches Störer abweist, erst nach der Digita-

lisierung ausgeführt werden kann. Das analoge Verfahren kann ebenfalls multiple Strahlen generieren, benötigt dazu aber pro Strahl einen zusätzlichen Phasenjustierkanal. Um z.B. ein System mit 100 Strahlen zu kreieren würde sich die Anzahl von HF-Phasenschiebern gegenüber einem Einstrahlensystem um 100 multiplizieren. Damit kann beim Vergleich die Kostenwaage Datenkonverter gegenüber Phasenjustier-ICs abhängig von der Anzahl der Strahlen kippen. Die Verlustleistung für eine analoge Methode mit passiven Phasenschiebern ist üblicherweise geringer; steigt aber die Anzahl der Kanäle, so steigt auch die Verlustleistung, da zusätzliche Verstärkungsstufen nötig sind.

Ein verbreiteter Kompromiss ist deshalb eine hybride Methode, bei der Subarrays mit analoger Strahlformung eingesetzt werden, anschließend werden deren Signale auf digitaler Ebene kombiniert. Dies ist eine Methode, die ein wachsendes Interesse hervorruft und sich in den nächsten Jahren noch wesentlich weiterentwickeln wird.

Halbleitertechnik

Ein gepulstes Standard-Radarsystem überträgt ein Signal, welches von einem Objekt

reflektiert wird, wobei das Radar auf den reflektierten Puls wartet, um ihn im Sichtfeld der Antennen abzubilden. In den vergangenen Jahren war dieses Antennen-Frontend mit diskreten Komponenten aufgebaut, welche meistens auf Galliumarsenid basierten. Die integrierten Schaltungskomponenten, welche als Funktionsblöcke für diese phasengesteuerten Antennen verwendet wurden, sind in Bild 4 dargestellt. Sie bestehen aus einem Phasenschieber, um die Phase jedes Antennenelements einzustellen (was letztendlich die Antenne steuert), einem Abschwächer, welcher den Pegel des Eingangssignales anpasst, einem Leistungsverstärker für das Sendesignal und einem rauscharmen Vorverstärker zum Empfangen des Signals sowie einem Schalter, um zwischen Sende- und Empfangsmodus zu wechseln. In älteren Implementierungen saß jedes dieser ICs einzeln in einem 5 x 5 mm großen Gehäuse; neuere Lösungen verwenden je Kanal ein monolithisch integriertes GaAs-IC.

Die stark zunehmende Verbreitung von phasengesteuerten Antennen wurde erst durch die modernste Halbleitertechnik ermöglicht. Die fortschrittlichen

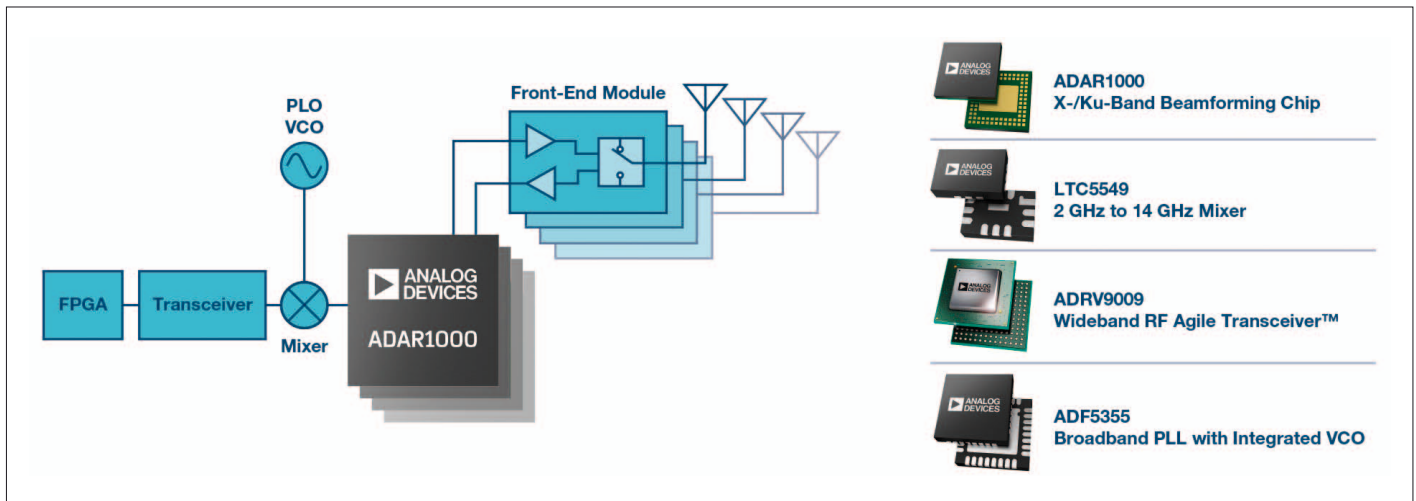


Bild 6: Weitere Informationen über die Eigenschaften der phasengesteuerten Antennen-Arrays gibt es auf analog.com/phasedarray

Prozessgeometrien bei Si-BiC-MOS, SOI (Silicon on Insulator) und Bulk-CMOS ermöglichen in einem einzelnen IC die Kombination der digitalen Steuerung inklusive HF-Pfad samt Phasen- und Amplitudeneinstellungen in einem einzigen IC. Man kann heute mehrkanalige phasengesteuerte ICs realisieren, welche Verstärkung und Phase in einer vierkanaligen Konfiguration für bis zu 32 Kanäle einstellen, das Ganze ausgelegt auf Millimeterwellen-Anwendungen. Für Anwendungen mit geringer Verlustleistung lassen sich die aufgezählten Funktionen komplett in einem monolithischen siliziumbasierten IC realisieren. Hochleistungsanwendungen haben gallium-nitrid-basierte Leistungsverstärker, die in die Einheitszelle von phasengesteuerten Antennen passen.

In Luftfahrtanwendungen geht der Trend zu Flacharchitekturen mit den Vorteilen der Power-Added-Efficiency (PAE) der GaN-Technik. GaN hat es auch in großen Bodenradarstationen ermöglicht, auf die phasengesteuerte Antennentechnik zuzugehen. Es gibt jetzt GaN-ICs, die über 100 W Leistung mit über 50% PAE liefern. Kombiniert wird dieses PAE-Niveau mit dem geringen Taktverhältnis von Radarapplikationen sowie den reduzierten Ausmaßen, Gewicht und Kosten des Antennenarrays. Zusätzlich bietet GaN den Vorteil

geringerer Abmaße im Vergleich zu bestehenden GaAs-Lösungen. Teilweise reduzieren sich die Abmaße um die Hälfte.

Antennenarray-ICs von Analog Devices

Analog Devices hat analoge strahlformende ICs entwickelt, die auf eine ganze Reihe von Applikationen abzielen, wie Radar, Satellitenkommunikation und 5G-Telekommunikation. Der ADAR1000 für das X/Ku-Band ist ein vierkanaliger Baustein für den Betrieb im Time-Division-Duplex-Modus (TDD) zwischen 8 und 16 GHz. Dabei sind alle Sender und Empfänger integriert. Dies ist ideal sowohl für X-Band-Radar als auch Ku-Band-SatCom, wofür der IC derart konfiguriert werden kann, dass es nur als Sender oder Empfänger arbeitet. Der vierkanalige IC hat ein 7 x 7 mm großes QFN-Gehäuse und verbraucht im Sendebetrieb nur 240 mW/Kanal sowie 160 mW/Kanal im Empfangsmodus.

Die Sende- und Empfangskanäle sind herausgeführt zwecks direkter Verbindung mit einem Frontend-Modul (FEM), s. Bild 5. Bild 6 zeigt Verstärkungsgewinn und Rückflussdämpfung sowie die erreichbare Verstärkungs- und Phasensteuerung bei 360° Phasenabdeckung. Phasenschritte unter 2,8° und eine Verstärkungskontrolle von 31 dB sind erreichbar.

Der ADAR1000 besitzt einen internen Speicher, um bis zu 121 Strahlzustände abzuspeichern. Ein Zustandswert umfasst alle Phasen- und Verstärkungseinstellungen für den gesamten IC. Der Sender bietet eine Verstärkung von ungefähr 19 dB mit 15 dBm Sättigungsleistung, wohingegen die Empfängerverstärkung rund 14 dB beträgt.

Ein weiterer Schlüsselparameter ist der Phasengang über dem gewählten Verstärkungsfaktor, hier rund 3° über 20 dB. Ähnlich liegt die Rückwirkung auf die Verstärkung bei Phasensteuerung bei etwa 0,25 dB über der gesamten 360°-Phasenabdeckung, was insgesamt die Kalibrierung des Bausteins vereinfacht.

Die ICs sind für analog phasengesteuerte oder hybride Arrayarchitekturen entwickelt, die das analoge Formen des Sendestrahls mit digitalem Strahlformen kombinieren. Analog Devices bietet eine vollständige Systemlösung von der Antenne bis zur Bit-Ebene an. Diese umfasst Datenwandler-, Frequenzumsetzungs- und analoge Strahlform-ICs, dazu auch komplette Frontend-Module. Die kombinierten Chip-Sätze von Analog Devices erlauben es, Funktionen zu kombinieren und die ICs optimal zu wählen, womit die Anwender ein Antennen-Design einfacher implementieren können.

Weitere Informationen gibt es auf www.analog.com/phasedarray. ◀

Der Autor



Keith Benson (keith.benson@analog.com) absolvierte sein Studium an der University of Massachusetts, Amherst und schloss es 2002 mit dem Titel B.S.E.E. ab. 2004 erhielt er von der University of Cali-

fornia, Santa Barbara, den Titel M.S.E.E. Er arbeitete am Anfang seiner Karriere bei Hittite Microwave, wo er ICs entwickelte, die in drahtloser Elektronik eingesetzt wurden. Anschließend leitete er ein Team von IC-Entwicklern, das sich auf drahtlose Kommunikation fokussierte. 2014 wurde Hittite Microwave von Analog Devices übernommen und Keith wurde Product Line Director für HF/Mikrowellen-Verstärker und ICs für phasengesteuerte Antennenarrays. Er hält drei U.S.-Patente für neuartige Verstärkertechniken.