

Hochintegrierte Multibeamformers bieten SWaP-Vorteile

Analog Devices hat eine Familie von Multibeam-Beamforming-ICs auf den Markt gebracht, die Nutzlast-Beamforming-Anwendungen mit geringer Leistung und hoher Funktionalität unterstützen und sich an die Missionsanforderungen anpassen lassen.

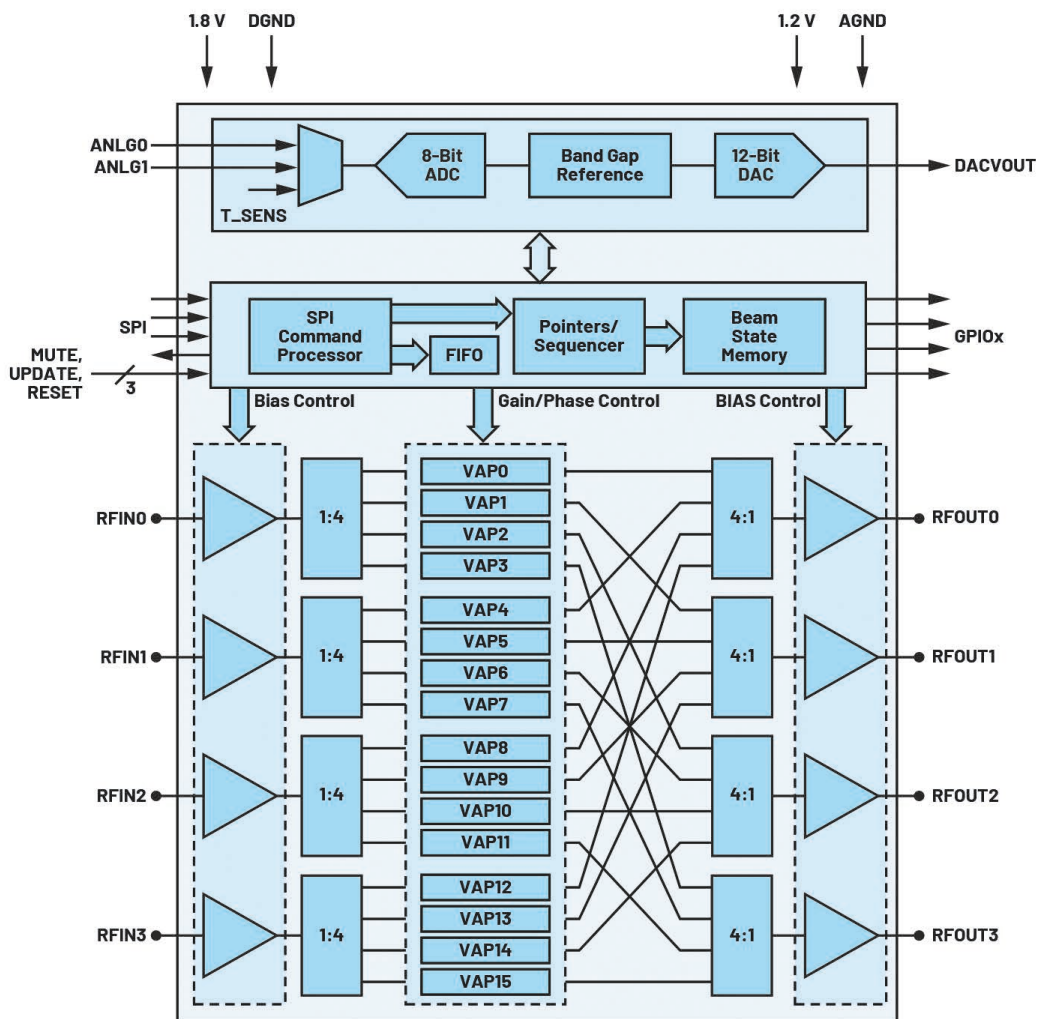


Bild 1: ADAR3000/ADAR3001-Blockdiagramm

wieder verschwinden. Die Nutzlast stellt eine besondere Herausforderung dar, da sie in einer Umgebung mit begrenzter Leistung betrieben wird, in der die Verlustleistung von Gleichstrom kritisch ist. Darüber hinaus ist ein hohes Maß an Funktionalität erforderlich, wie z.B. Multibeam-Fähigkeit, Beam-Hopping, Beam Memory und die Möglichkeit, die Anzahl der Strahlen zu skalieren, um alle Missionsanforderungen zu erfüllen.

Einleitung

Die meisten herkömmlichen Satellitenkommunikationssysteme basierten ursprünglich auf GEO-Satelliten, die lediglich drei Satelliten für eine globale Abdeckung benötigten. Dabei handelt es sich um große Satelliten (>1000 kg), bei denen in der Regel ein einzelner Satellit auf einer Trägerrakete sitzt. Diese Art der Bereitstellung war zwar für Rundfunk- und Fernseh Anwendungen von Vorteil, hatte jedoch auch ihre Grenzen. Eine davon ist die Latenz, die allein durch die große Entfernung zwischen dem Benutzer oder der Benutzerin und dem Satelliten entsteht und etwa 400 ms beträgt. Dies entspricht in etwa dem Zehnfachen von Punkt-zu-Punkt-Glasfaserverbindungen in den Vereinigten Staaten. Zudem deckt der GEO-Satellit zwar einen Großteil der Erde ab, kann aber den Nord- oder Südpol nicht effektiv bedienen. Die Global-Xpress-GEO-Satelliten von Inmarsat erfassen beispielsweise einen Bereich von $\pm 75^\circ$ abseits des Äquators.

Um eine echte globale Abdeckung zu erreichen, werden kleinere (<500 kg) LEO-Satelliten eingesetzt. Manche verwenden geeignete Umlaufbahnen und

Der Bedarf an hohen Datenraten und allgegenwärtiger terrestrischer Konnektivität hat zu enormen Investitionen in Konstellationssysteme mit niedriger Erdumlaufbahn (Low Earth Orbit, LEO) geführt.

effizienter. LEO-Satellitenkommunikationsdienste versprechen eine weltweite Abdeckung am Boden, auf dem Meer und im Flugzeug.

Damit dies Wirklichkeit werden kann, sind elektronisch gesteuerte Arrays an beiden Enden der Verbindung unerlässlich, um das kontinuierliche, unabhängige und schnelle Scannen mehrerer Strahlen und die regelmäßigen Übergaben zu unterstützen, wenn Satelliten in Sicht kommen und

Ein LEO-Satellit senkt die Start- und Ausrüstungskosten erheblich, verringert die Latenzzeit im Vergleich zu geostationären (GEO) Verbindungen um das 20-fache und verwaltet Bandbreite, Nutzerinnen und Nutzer

Autoren:
Qui Luu

Senior Manager,
John Wise
ehemaliger
Catalog Modules Manager

Analog Devices
www.analog.com

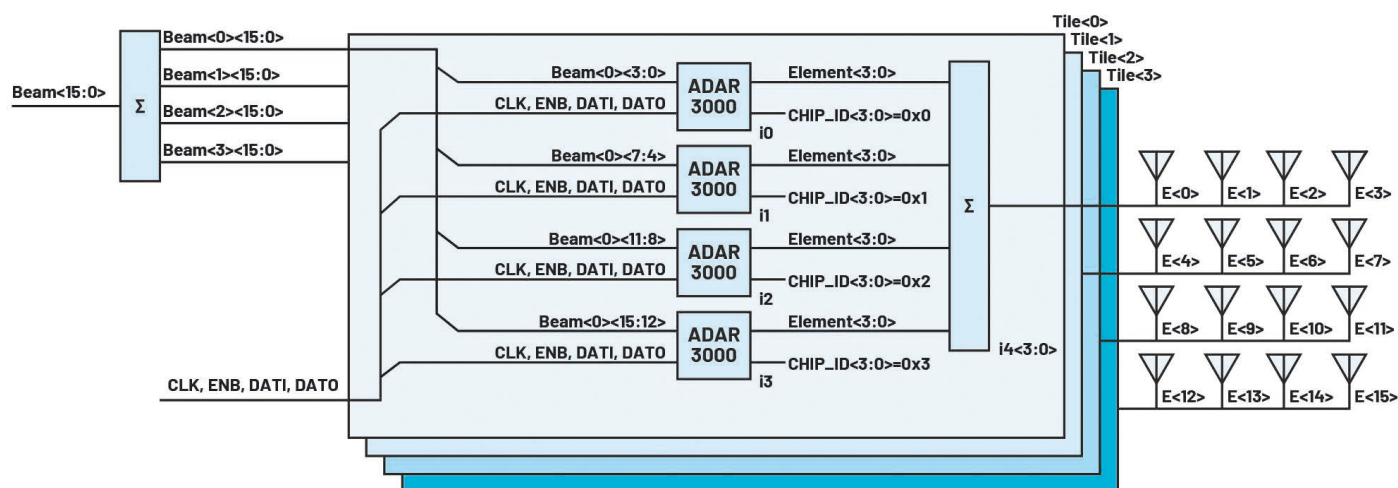


Bild 2: Skalierbarkeit des ADAR3000/ADAR3001 für eine höhere Strahlanzahl. Man muss beachten, dass PA und Filter nicht am Element angezeigt werden.

können so städtische und ländliche Gebiete abdecken, andere nutzen polare Umlaufbahnen, um die Pole zu erreichen. Diese Konstellationen variieren von mehreren hundert bis zu mehreren tausend Satelliten. Für all diese Satelliten werden Beamforming-Antennen benötigt, da sie mit 27.000 km/h in einer Höhe von 600 bis 1200 km um die Erde kreisen. Dies führt zu einer Reduzierung der Ende-zu-Ende-Latenz auf etwa 50 ms.

Viele Satelliten werden bei jeder Bereitstellung in einer einzigen Trägerrakete transportiert, sodass Größe und Gewicht dieser LEO-Satelliten von entscheidender Bedeutung sind. Außerdem sollen diese Satelliten Hochgeschwindigkeitsdaten zur Verfügung zu stellen, sodass der Frequenzplan wichtig ist. Traditionell wurde das Ku-Band (10,7 bis 12,7 GHz Downlink/13,75 bis 14,5 GHz Uplink) verwendet. Es gibt jedoch einen Trend zu höheren Frequenzen, die größere Bandbreiten und höhere Datenraten unterstützen können. Das K/Ka-Band wird aktiv genutzt (17,7 bis 21,2 GHz Downlink/27,5 bis 31,5 GHz Uplink) und viele Anwender untersuchen Q/V-Bänder als nächstes Frequenzband (37,5 bis 42,5 GHz Downlink/47,2 bis 51,4 GHz Uplink).

Diese höheren Frequenzen stellen neue Herausforderungen an das Design und die Realisierung

einer Phased-Array-Antenne. Mit zunehmender Frequenz nimmt der Gitterabstand der Antennenelemente ab, wodurch der verfügbare Platz auf der Platine minimiert wird. Traditionell wäre ein diskreter Ansatz möglich gewesen, bei dem Übertragungsleitungen für Zeitverzögerungen, Strahlsteuerung mit Phasenschiebern/digitalen Stufendämpfungsgliedern (Digital Step Attenuators, DSA) oder Vektormodulatoren und die Einbettung der Wilkinson-Splitter/Combiner in die Leiterplatte selbst verwendet werden. Bei diesen höheren Frequenzbändern stellt jedoch die Leiterplattenfläche eine erhebliche Herausforderung dar, wodurch der Bedarf an stärkerer Integration zur Vereinfachung des Designs und der Herstellbarkeit steigt. Darüber hinaus erhöht der Bedarf an Multibeam-Arrays die Komplexität.

Beamforming-ICs definieren elektronisch steuerbare Phased Arrays (Electronically Steerable Phased Arrays, ESA) und stellen den kritischsten Baustein dar. Zwischen den Beamforming-ICs befinden sich ein Power Combiner und ein Power Splitter, welche die Signale an jeden Beamforming IC verteilen. Die Kombination aus Beamforming-IC, Power Combiner/Splitter und dem Gewebe, das diese beiden Komponenten in einem Leiterplatten-Design miteinander

verbindet, bestimmt die Leistung der ESAs.

Beamforming-ICs

Um die Datenrate zu maximieren, kommen in High-Throughput-Satelliten (HTS) mehrere Spot-Beams zum Einsatz, um Daten effektiv zu verteilen. Typische Nutzlasten in HTS verwenden mehrere Strahlen, die man steuern und springen lassen kann, um die Wiederverwendung von Platz und Frequenz zu maximieren. Die Strahlsteuerung wird durch die Änderung der Phase des Strahls sowie der Amplitude an jedem Element der Phased-Array-Antenne erreicht. Um die Anzahl der erforderlichen VAP-Geräte (variable Amplitude und Phase) zu bestimmen, multipliziert man die Anzahl der Strahlen für den Satelliten mit der Anzahl der Elemente für die Antenne.

Bei einer Konfiguration von 576 Elementen und 16 Strahlen beträgt die Anzahl der VAP-Geräte beispielsweise 9216 pro Array. Wenn man einen diskreten Vektormodulator als VAP-Gerät verwendet, der in der Regel 3×3 mm groß ist und etwa 0,5 W verbraucht, ergibt sich eine Abmessung von $0,27 \times 0,27$ m, die über 4 kW Gleichstromleistung benötigt. Zum Vergleich: Ein Array mit 576 Elementen bei 30 GHz mit einem Abstand der halben Wellenlänge hat eine Größe von $0,113 \times 0,113$ m. Dies zeigt, dass für Nutzlastlösungen

mit Phased-Array-Antennen für höhere Frequenzen ein höherer Integrationsgrad erforderlich ist, ebenso wie eine Lösung mit minimalem Stromverbrauch.

Einen einzigartigen Ansatz zur Lösung dieses Problems hat Analog Devices bei der Entwicklung von ADAR3000 und ADAR3001 verfolgt. Diese Beamforming-ICs sind für Satelliten-Nutzlastanwendungen im K/Ka-Band vorgesehen. Sie bestehen aus einer 4-Strahl-/4-Element-Konfiguration, die 16 VAP-Kanäle umfasst. Die Größe des resultierenden Beamformers beträgt $7 \times 12,5$ mm, was bei Verwendung eines Vektormodulatoransatzes nur einem Bruchteil der Array-Größe entspricht. Um den Stromverbrauch zu senken, verwenden die VAP-Kanäle außerdem passive Strukturen. Im Fall von ADAR3000/ADAR3001 besteht der VAP-Kanal aus einem DSA und einer digitalen Zeitverzögerungseinheit. Diese Konstruktion erzeugt einen 4-Strahl-/16-Kanal-Beamformer, der weniger als 200 mW DC-Leistung verbraucht. Bild 1 zeigt ein Blockdiagramm. Diese Geräte werden in einem Halbleiterprozess hergestellt, der Weltraummissionen unterstützt und für LEO/MEO/GEO-Anwendungen eingesetzt werden kann. Die Beamformer haben Strahlungswerten von 100 krad TID und 80 MeV SEE standgehalten.

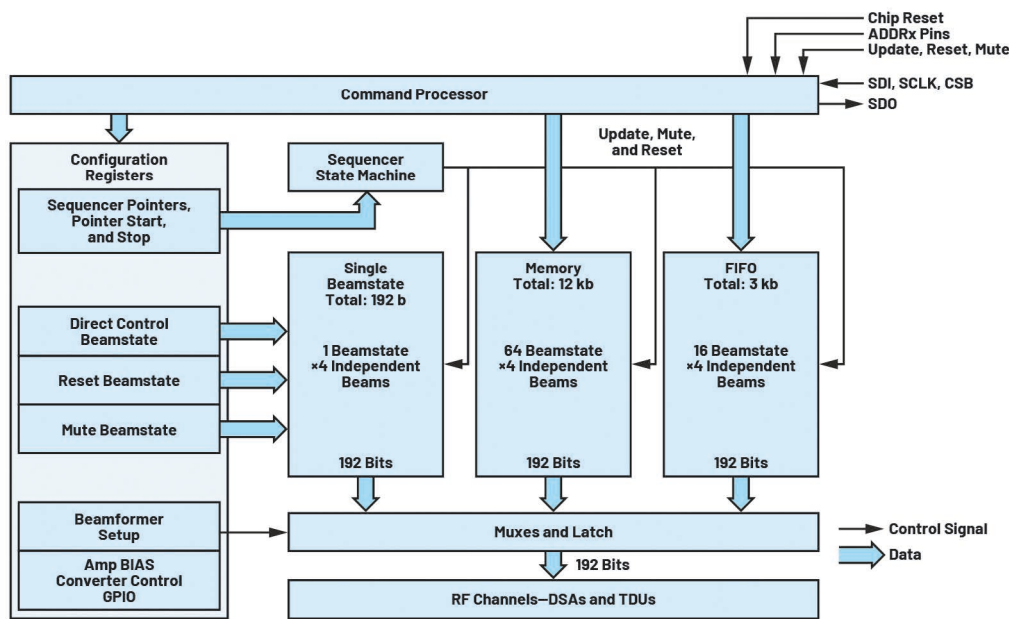


Bild 3: Digitale Funktionen des ADAR3000/ADAR3001

Skalierbarkeit

Nicht alle Nutzlastantennen sind ausschließlich 4-Strahl-Designs. Je nach Konstellation und Mission ist eine höhere Strahlanzahl erforderlich. Die Strahlanzahl ist oft ein Vielfaches von 4, sodass es wichtig ist, eine Lösung von 4 Strahlen auf 8, 16 oder 32 Strahlen skalieren zu können. Die Beamformer von ADI lassen sich leicht skalieren, um eine höhere Anzahl von Strahlen sowie eine unterschiedliche Menge von Elementen zu bewältigen. Bild 2 zeigt ein Beispiel für ein Array mit 16 Strahlen/16 Elementen.

Genutzt wird eine Blade-Konstruktion, bei der jedes Blade aus Beamforming-ICs mit vier Kanälen besteht. In diesem Beispiel betrachten wir die Sendeanterie, aber man kann dies auch umkehren, um die Empfangsanterie mit dem entsprechenden Empfangs-Beamforming-IC zu unterstützen. Jedes Blade unterstützt vier Elemente. Für 16 Elemente werden vier Blades benötigt. Jeder Strahl muss an jedem Blade vorhanden sein, sodass jeder Strahl in vier Teile aufgeteilt und dann zu jedem Blade geleitet werden muss. Die Strahlen 0 bis 3 steuern dann einen der Beamforming-ICs an, die Strahlen 4 bis 7 den zweiten, die Strahlen 8 bis 11 den dritten

und schließlich die Strahlen 12 bis 15 den vierten. Der Ausgang jedes Beamforming-ICs repräsentiert die Elemente 0 bis 3 auf dem Array, wobei jeder Beamformer jeden Strahl entsprechend der gegebenen Position des Elements im Array gewichtet. Da jeder ADAR3000 die Strahlen für die Elemente 0 bis 3 ausgibt, müssen die Ausgänge kombiniert werden, um sicherzustellen, dass alle 16 Strahlen an jedem Element vorhanden sind. Das Gleiche gilt für die Elemente 1, 2 und 3. Vor dem Ansteuern der Elemente sollten Entwicklerinnen und Entwickler den geeigneten Leistungsverstärker auswählen, um die EIRP- und Verjüngungsanforderungen der Antenne zu erfüllen.

Diese Konstruktion kann leicht skaliert werden, um mehr oder weniger Strahlen und Elemente zu unterstützen. Durch die Erhöhung der Anzahl der Platten ist eine größere Anzahl von Elementen problemlos möglich. Durch Hinzufügen oder Verringern der Anzahl der Beamforming-ICs kann der Entwickler die Anzahl der erforderlichen Strahlen anpassen.

Digitale Funktionen

Neben Größe und Leistung sind digitale Steuerung und Funk-

tionalität wichtig, um Größe, Gewicht und Leistung (Size, Weight and Power, SWaP) in der Nutzlast zu minimieren. Anforderungen wie das Beam-Hopping müssen einfach und schnell ausgeführt werden können. Um die Strahlsteuerung so nah wie möglich an den Elementen zu unterstützen, ist ein hochentwickelter digitaler Abschnitt in dem Beamforming-IC integriert. Hier ist anzumerken, dass jedes Gerät über vier Adressleitungen verfügt, sodass ein einzelner SPI-Bus mit bis zu 16 Beamformern kommunizieren kann, was die Anzahl der SPI-Leitungen minimiert und das Array-Design vereinfacht. Jeder Strahl wird unabhängig gesteuert und verfügt über einen eigenen Speicher.

RAM und FIFO verfügen über ihre eigenen Zustandsautomaten, welche die darin gespeicherten Strahlzustände durchlaufen (Bild 3). Der RAM kann bis zu 64 Strahlzustände speichern und der FIFO bis zu 16.

Diese Funktionen unterstützen das Beam-Hopping und Raster-Scannen der Antenne. Bei Verwendung des RAM mit dem Sequenzer können 64 Strahlzustände pro Strahl programmiert werden. Mit dem Sequenzer ist es möglich, die Strahlzustände in jeder erforderlichen

vorgeschriebenen Reihenfolge zu laden. Ebenso können bei Verwendung des FIFO die Strahlzustände nach dem Laden in FIFO-Reihenfolge geladen werden. Hier muss man beachten, dass bei Verwendung des internen Speichers die Strahlaktualisierungen sehr schnell erfolgen. Die Antwortzeit eines einzelnen VAP-Kanals beträgt <10 ns. Die minimale Zeit zwischen zwei Aktualisierungen liegt bei <50 ns.

Wilkinson-Splitter/Combiner

Wie bereits erwähnt, bieten das Design des Beamformer-ICs und der höhere Integrationsgrad innerhalb eines Gehäuses erhebliche SWaP-Vorteile. Ebenso muss die Design-Entscheidung des zwischen den Beamforming-ICs verschachtelten Power-Combiners/Splitters für SWaP-Kompromisse optimiert werden. Da Power Combiner/Splitter vor den gleichen Design-Herausforderungen stehen, wie z.B. minimale Leiterplattenfläche aufgrund enger Gitterabstandsgrenzen, sind geringe Größe und optimierte Leiterplattenführung für die Systemleistung und Signalintegrität von entscheidender Bedeutung.

Combiner/Splitter für Phased Arrays sind meist passiv. Das Wärme-Management für ein aktives Phased-Array ist angesichts der sehr geringen Größe und des Formfaktors sowie der hohen Leistungsfähigkeit eine beträchtliche technische Herausforderung. Um die thermischen Anforderungen des Phased-Array-Systems nicht weiter zu belasten, ist der Combiner/Splitter passiv.

Wichtige Leistungsmerkmale bei Combiner/Splitter sind Bandbreite, Portanpassung, Isolation, minimale parasitäre Verluste und Belastbarkeit. Durch die Anpassung der Ports wird die Symmetrie aufrechterhalten, bei der sich die Eingangsleistung gleichmäßig auf alle Ausgangsports verteilt und die Phasendifferenz zwischen den Ausgangsports minimiert wird. Die in Phased-Array-Systemen am häufigsten

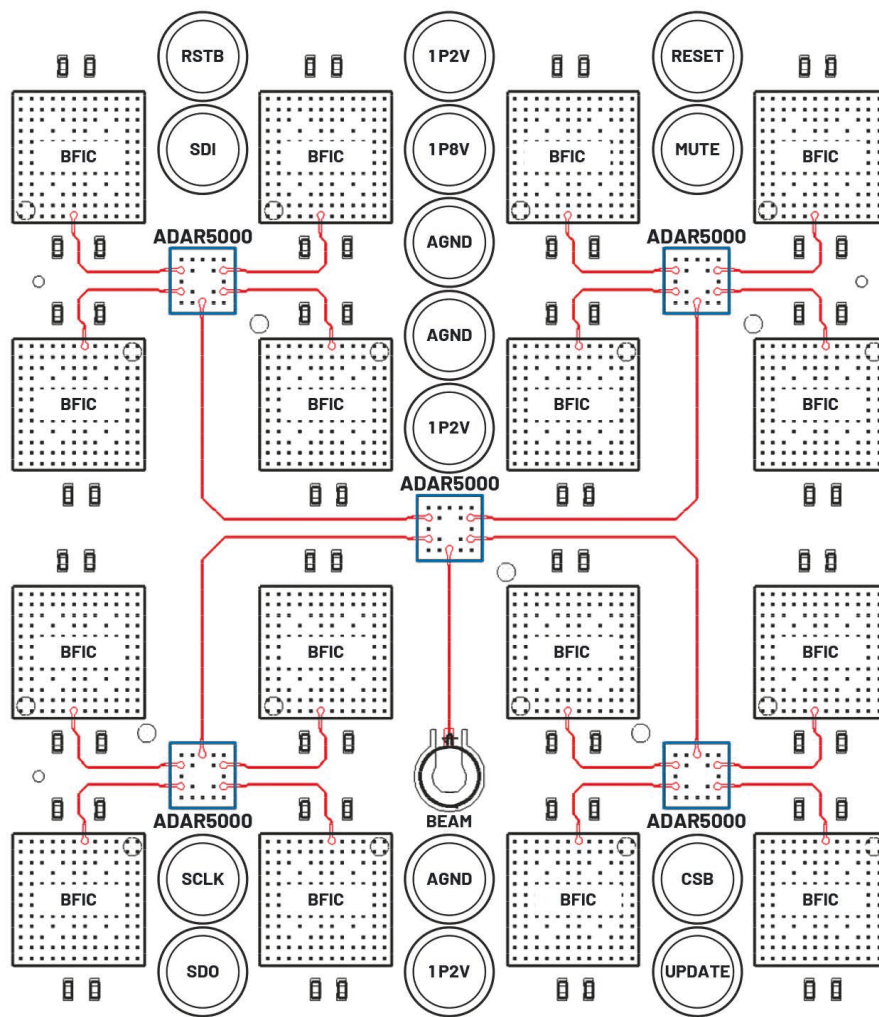


Bild 4: Beamforming IC mit dem ADAR5000-Layout

verwendete Architektur für Power Combiner/Splitter ist die nach Wilkinson mit den Vorteilen minimale Verluste, hohe Isolation und reziproke Wirkung. Wilkinson-Designs werden in der Regel direkt auf der Leiterplatte mit Mikrostreifen und/oder Streifenleitung implementiert. Alternativ dazu erweisen sich monolithische siliziumbasierte Designs wie ADAR5000 und ADAR5001 als sehr vorteilhaft, da sie Platz auf der Leiterplatte sparen, die Verlegung erleichtern und die Signalintegrität verbessern.

Der ADAR5000 ist ein 1:4 Power Splitter in einem kompakten WLCSP-Gehäuse mit den Abmessungen $2,5 \times 2,5 \times 0,5$ mm, was ihn ideal macht für den Einsatz in planaren Phased-Array-Antennensystemen, die einen geringen Abstand

zwischen den Elementen benötigen. Der ADAR5001 ist ähnlich: ein 1:2 Wilkinson Power Splitter in einem WLCSP-Gehäuse mit den Abmessungen $1,5 \times 1,5 \times 0,5$ mm. Beide punkten mit einer erheblichen Leiterplattenfläche und Kosteneinsparungen gegenüber herkömmlichen Wilkinson Power Dividers mit Mikrostreifen-Design. Bild 4 zeigt die Verlegung eines Ka-Band-Beamforming-ICs, der in Verbindung mit dem ADAR5000 1:4 Splitter für Anwendungen ausgelegt ist, die ein zweidimensionales planares Design erfordern.

Zeitverzögerung

Um das Design eines Phased-Array-Systems unter Verwendung eines Corporate-Feed-Netzwerks weiter zu verbessern und zu vereinfachen, bietet der ADAR4002 eine erweiterte

Zeitverzögerung und Amplitudensteuerung in einem einkanaligen, stromsparenden und miniaturisierten Gehäuse. Aufgrund dieser Merkmale ist er die ideale Komponente, um geringfügige Änderungen der Verzögerung aufgrund von Fehlanpassungen vorzunehmen oder eine zusätzliche Verzögerungskompensation hinzuzufügen, wie sie für ein echtes Phased-Array-System mit Zeitverzögerung erforderlich ist, bei dem die Verzögerung zur Abdeckung der Bandbreite ineffizient ist.

Der ADAR4002 ist ein bidirektionaler, einkanaliger Breitband-Echtzeitverzögerer (True-Time Delay Unit, TDU) mit geringer Leistungsaufnahme und ein DSA. Der Frequenzbereich erstreckt sich von 500 MHz bis 19 GHz mit einer Impedanz von 50 Ohm an beiden HF-Ports.

Die TDU verfügt über zwei programmierbare maximale Zeitverzögerungen, die jeweils mit einer 7-Bit-Steuerung ausgestattet sind. Der Bereich 0 hat eine maximale Verzögerung von 508 ps mit einer Auflösung von 4 ps. Für den Betrieb mit niedriger Frequenz wird der Bereich 0 ausgewählt, da für eine vollständige 360° -Phasenabdeckung mehr Zeitverzögerung zur Verfügung steht. Der Bereich 1 hat eine maximale Verzögerung von 254 ps und eine Auflösung von 2 ps. Dieser Bereich hat im Vergleich zu Bereich 0 einen geringeren Einfügungsverlust und eignet sich besser für den Hochfrequenzbetrieb, da der Verzögerungsbereich schmal ist und die Schrittgröße präziser gesteuert werden kann. Der DSA hat eine 6-Bit-Auflösung mit einem Dämpfungsbereich von 0 bis 31,5 dB und einer Schrittgröße von 0,5 dB (Bild 5).

Was die SWaP-Vorteile des ADAR4002 betrifft, so sind die Energieeinsparungen beträchtlich, da die Kernbausteine des Geräts passiv sind. Die TDU und DSA sind passiv, während der digitale Baustein der einzige ist, der Strom verbraucht. Weiter ist eine flexible digitale Steuerung entweder über eine serielle Portschnittstelle (Serial Port Interface, SPI) oder ein Schieberegister möglich. Das Schieberegister erlaubt die Verkettung mehrerer Chips. Der IC enthält einen Registerspeicher für 32 TDU- und DSA-Zustände. Der Speicher ermöglicht in Kombination mit On-Chip-Sequenzern eine schnelle bidirektionale Speicherweiterentwicklung über den UPDATE-Pin. Diese digitalen Funktionen erweisen sich als vorteilhaft für die Nutzungsfreundlichkeit und das schnelle Beam-Hopping.

Der ADAR4002 verbraucht insgesamt 1 mW bei 1,2/1 V Dualversorgung und ist in einem LFCSP-Gehäuse mit den Abmessungen 2×3 mm untergebracht. Der in einem so kleinen Gehäuse verfügbare Zeitverzögerungsbereich ist angesichts aller potenziellen Anwendungsfälle für dieses Bauteil ziemlich

Material	Er	Er _{eff}	V Mikrostreifen	V Streifenleitung	tpd Mikrostreifen	tpd Streifenleitung
Vakuum oder Luft	1	1	11,8 in/ns	11,8 in/ns	85 ps/in	
Isola 370HR	4,0	2,92	6,90 in/ns	5,9 in/ns	145 ps/in	170 ps/in
Isola I-Speed	3,64	2,69	7,20 in/ns	6,18 in/ns	139 ps/in	162 ps/in
Isola I-Meta	3,45	2,57	7,36 in/ns	6,35 in/ns	136 ps/in	158 ps/in
Isola Astra MT77 oder Tachyon 100G oder Rogers 3003	3,0	2,28	7,8 in/ns	6,8 in/ns	128 ps/in	147 ps/in
Rogers 4000 Serie	3,55 – 3,66	2,63 – 2,7	~7,20 in/ns	~6,20 in/ns	~139 ps/in	~161 ps/in

Tabelle 1: Ausbreitungsverzögerung für einige Leiterplattenmaterialien

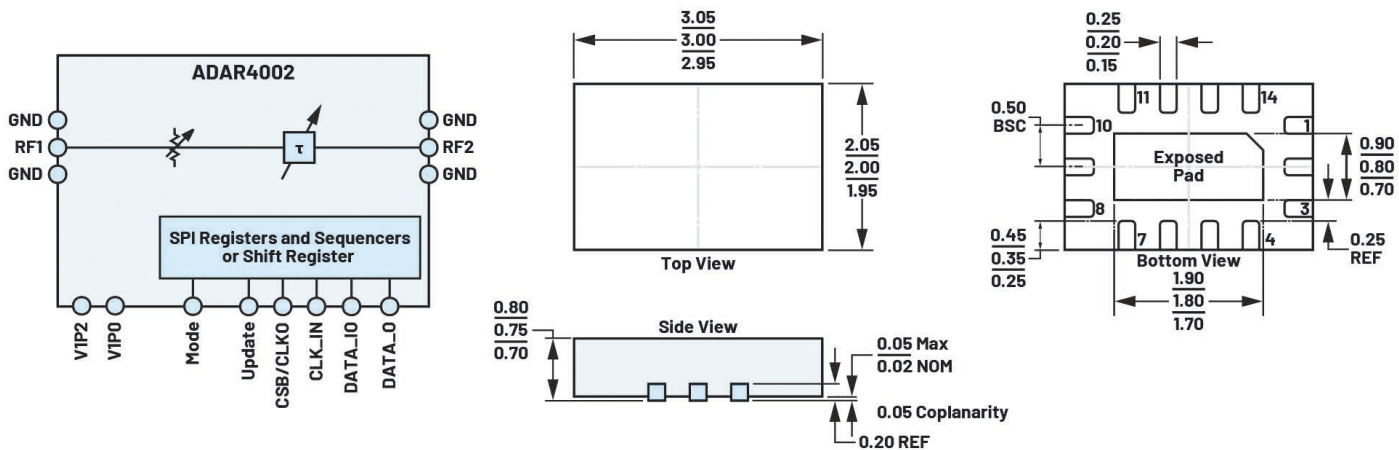


Bild 5: ADAR4002-Blockdiagramm und Gehäuseumriss. Ein 14-Pin Lead Frame Chip Scale Package (LFCSP) mit einem 3 × 2 mm großen Gehäuse und einer 0,75 mm hohen Verpackung (CP-14-6)

erstaunlich. Es kann strategisch in einem Design platziert werden, um die Leiterbahnlänge auszugleichen oder die Laufzeit zu verändern. Bei sehr großen Phased-Arrays ist es schwierig, alle Signalspuren auf der Leiterplatte in der Länge anzugleichen. Daher kann eine Veränderung der Laufzeit erforderlich sein. Das Ziel ist, die Länge der Signalspuren in einer angepassten Gruppe von Netzen auf den gleichen Längenwert einzustellen. Dadurch wird gewährleistet, dass alle Signale innerhalb einer begrenzten Zeitabweichung ankommen. Der gängigste Ansatz zur Synchronisierung der Signalpfade besteht darin, dem kürzeren Signalpfad eine Verzögerung hinzuzufügen, indem Leiterbahnen mäandriert werden, wie z.B. Posaune, Sägezahn oder Akkordeon. Das Mäandern der Leiterbahnen geht auf Kosten der Leiterplattenfläche und der Designzeit. Tabelle 1 in der Originalveröffentlichung zeigt die

Ausbreitungsverzögerung für einige Leiterplattenmaterialien.

Fazit

Herkömmliche diskrete Ansätze für das Design von Phased-Array-Antennen für Satellitennutzlasten sind nicht für Größe, Gewicht oder Leistung optimiert. GEO-Satelliten sind große Satelliten, bei denen sich ein einzelner Satellit auf einer Träger Rakete befindet. Im Gegensatz dazu erfordern die heutigen LEO-Konstellationen den Einsatz vieler Satelliten auf einer einzigen Trägerrakete, was ihre Größe und ihr Gewicht begrenzt. Darüber hinaus verschiebt die Nachfrage nach einem höheren Datendurchsatz die Satellitenkommunikationsfrequenzen vom Ku-Band zum K/Ka-Band und höher, was noch kleinere Antennen-Arrays erfordert. Fortschritte bei siliziumbasierten ICs haben zu einem höheren Integrationsgrad, einer höheren

Funktionalität und einem geringeren Gleichstromverbrauch geführt. Dies ermöglicht den Einsatz von kleineren, dünneren und leichteren Antennenaperturen, um Ku-Band-Frequenzen und höhere Frequenzen zu unterstützen und die SWaP-Herausforderungen der heutigen Satelliten zu bewältigen.

Wer schreibt:

Qui Luu erwarb im Jahr 2000 ihren Bachelor of Science in Elektrotechnik am Worcester Polytechnic Institute in Worcester, Massachusetts, USA. 2005 schloss sie die Northeastern University in Boston, Massachusetts, USA, mit dem Master of Science in Elektrotechnik ab. Seit 2000 ist sie bei Analog Devices, Inc. tätig, wo sie derzeit als System Engineer/IC Architect in der Luft- und Raumfahrt- und Verteidigungsorganisation in Chelmsford, MA, arbeitet. In letzter Zeit lag ihr

Schwerpunkt auf der Entwicklung von Beamforming ICs und -Systemen von der Antenne bis zu Bits für elektronisch steuerbare Phased Arrays.

John Wise erwarb seinen Bachelor of Science in Elektrotechnik am Illinois Institute of Technology. Vor seinem Ruhestand war er Product Line Manager für Beamforming ICs und SiPs in der Luft- und Raumfahrt- und Verteidigungsorganisation von Analog Devices. Vor seiner Tätigkeit bei ADI hatte Herr Wise Positionen bei Hewlett-Packard (jetzt Keysight) und Hitite Microwave inne. Er verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung in der Gestaltung, Entwicklung und Produktion von Mikrowellen- und Glasfaser-Testgeräten, Komponenten, Modulen sowie spezifischen Baugruppen und ICs für kommerzielle, militärische und hochausfallsichere Anwendungen. ◀