

Lösungen für Design und Aufbau

Energieeffiziente O-RAN-Applikationen, Teil 1

Um erfolgreich und kosteneffizient zu sein, müssen Open Source für Funkgeräte und optimierte 5G-Technologiegeräte verfügbar sein. In diesem zweiteiligen Artikel wird eine dieser Lösungen für die Entwicklung und den Aufbau einer energieeffizienten Lösung vorgestellt.

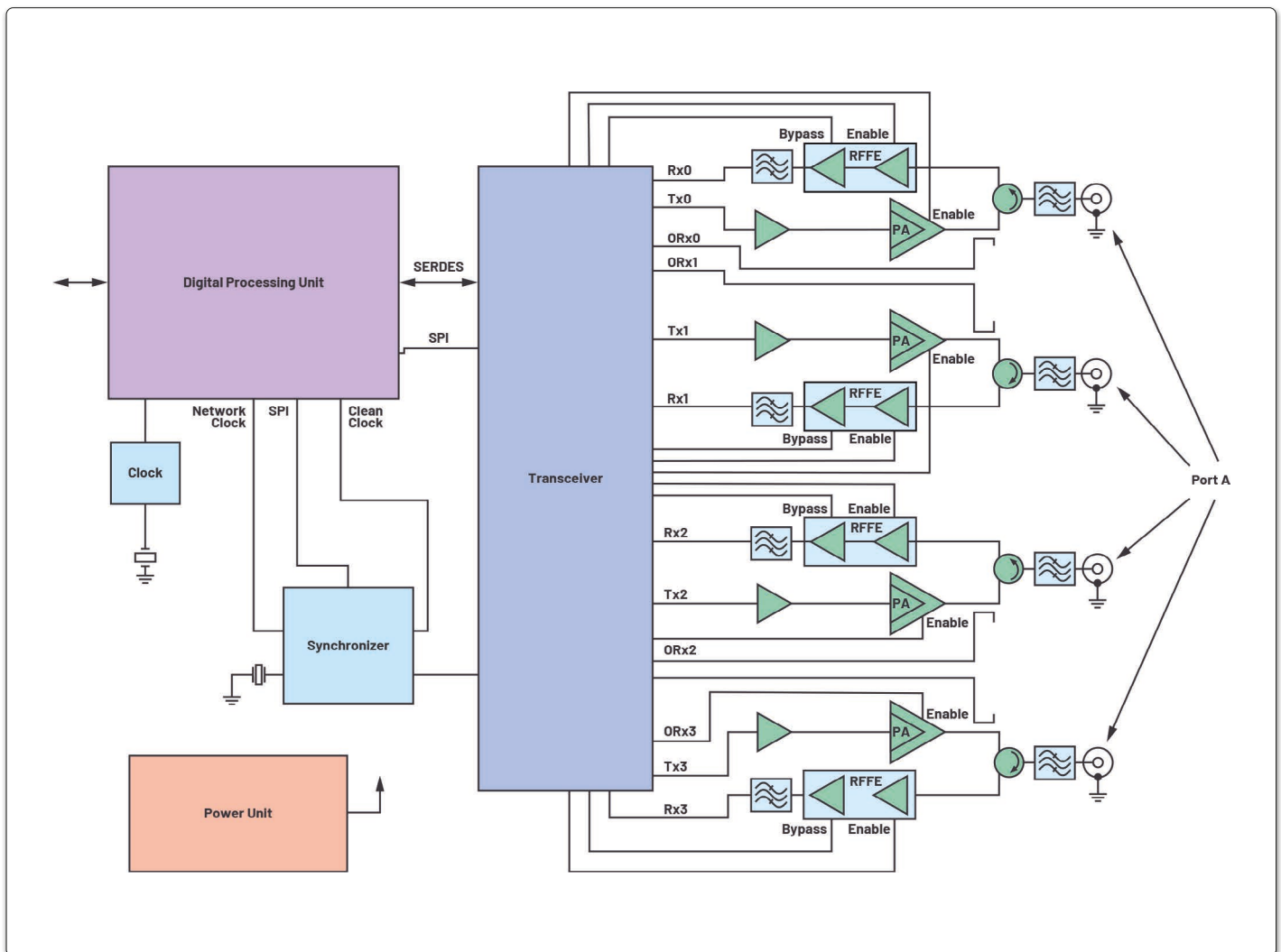


Bild 1: Vereinfachtes Blockdiagramm einer Kleinzelle

Die O-RAN Alliance wurde als Beschleuniger geschaffen, um die Wireless-Community so umzugestalten, dass neue Kanäle für Sendeempfänger möglich sind und Innovationen geschaffen werden, um die Spezifikationen des 3GPP (Third Generation Partnership Project) Projekts im 5G zu erfüllen [1].

Autor:

Brad Brannon
Analog Devices, Inc.
www.analog.com

Herausforderungen bei 5G

Es gibt mehrere Techniken, die Funk- und Netzwerkingenieure

einsetzen, um diese Ziele zu erreichen. Neben der Verlagerung von Datendiensten an den Rand des Netzes trägt der Einsatz von Massive MIMO- und Kleinzellentechnologie zur Steigerung der Kapazität und des Durchsatzes bei. Bei der Massive-MIMO-Technologie werden zahlreiche Sendeempfänger in einem Array eingesetzt, um nicht nur die Kapazität, sondern auch die Abdeckung eines zentralen Standorts zu erhöhen. Wie beim Vorgänger, der Makrozelle, würde ein Massive-

MIMO-Sendeempfänger eine relativ breite Abdeckung um diesen Standort herum bieten. Massive-MIMO-Sendeempfänger werden jedoch auf höheren Frequenzen, in der Regel 2,6 GHz und höher, eingesetzt, die Gebäude nicht sehr gut durchdringen. Zur Versorgung von Innenräumen und anderen schwer abdeckbaren Außenbereichen werden deshalb kleine Zellen eingesetzt. Angesichts der Vielzahl von Innen- und Außenstandorten, die von Haushalten über Unter-

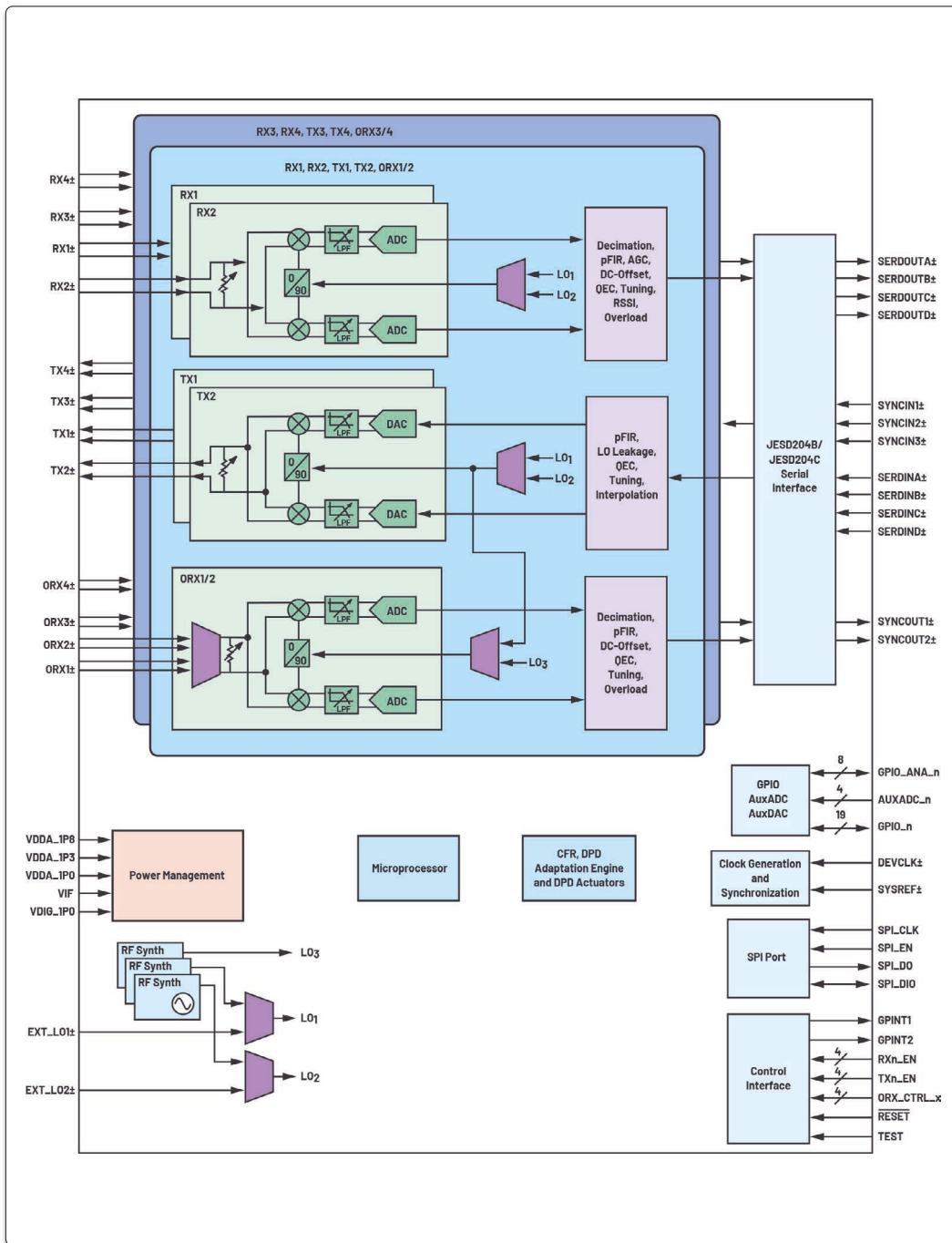


Bild 2: ADRV9029-Transceiver

nehmensinstallationen bis hin zu kommerziellen Einkaufszentren und sogar Arenen reichen, wird die Nutzung von Kleinzellen für den Erfolg von 5G entscheidend sein.

Angesichts der großen Anzahl von Kleinzellen und der Vielfalt, der in einem Netz erforderlichen Installationen, müssen diese kostengünstig zu installieren und zu betreiben sein; dies wird ein Schlüsselfaktor für 5G sein.

Verfügbare Technologien

In den letzten Jahren haben sich mehrere Technologien in eine Richtung entwickelt, die Lösungen für 5G ermöglicht. Erstens hat das Mooresche Gesetz im Bereich des Basisbands nicht nur zu einer weiteren Senkung der Siliziumkosten pro Kommunikationskanal geführt, sondern auch dazu, dass komplexere Funktionen in die Funktechnologie integriert wer-

den können. Es ist jetzt möglich, viele der erforderlichen Steuerungsalgorithmen direkt in den Sendeempfänger zu integrieren, einschließlich Funktionen wie die digitale Vorverzerrung (DPD). Viele weitere Möglichkeiten ergeben sich, wenn neue Generationen von Funkgeräten verfügbar werden. Zweitens arbeiten Industrieallianzen wie O-RAN2 in der gesamten Mobilfunkbranche daran, Skaleneffekte zu erzielen, um nicht nur

die Kosten zu senken, sondern auch die Sicherheit in der Lieferkette zu verbessern und um neue Möglichkeiten zur Monetarisierung dieser drahtlosen Netze zu bieten.

„Die O-RAN Alliance wurde von den Netz-Betreibern gegründet, um die Anforderungen klar zu definieren und ein Ökosystem für die Lieferkette aufzubauen, mit dem die Ziele erreicht werden können. Um diese Ziele zu erreichen, wird die Arbeit der O-RAN Alliance die Prinzipien von Offenheit und Intelligenz verkörpern.“ [3] Daher konzentrieren sich ihre Aktivitäten auf die Definition der von 3GPP spezifizierten physikalischen Schnittstellen, damit diese standardisiert und in der gesamten Branche als interoperable White-Box-Lösungen implementiert werden können.

Darüber hinaus definiert O-RAN auch die Hardware-Anforderungen und stellt Referenz-Designs für die O-CU, O-DU und O-RU (Open Centralized Unit, Open Distributed Unit bzw. Open Radio Unit, wie von O-RAN definiert) bereit. Zusammen ermöglichen sie die Standardisierung von Fronthaul- und Basisbandprozessoren, um die Lösungskosten weiter zu senken und können mit anderen integrierten 5G-Geräten definieren, was kleine Zellen leisten sollen, und die Umsetzung dieser Standards zu ermöglichen.

Drittens hat sich die Funktechnologie in den letzten Jahren rasant weiterentwickelt. Hochleistungsfähige Sendeempfänger sind jetzt in verschiedenen Formaten erhältlich, die die vom 3GPP Projekt in der 38.104 Spezifikation und verwandten Dokumenten geforderten Leistungsstandards erfüllen [1]. Diese sind hochintegriert und umfassen nicht nur die analogen und HF-Komponenten, sondern auch kritische Algorithmen wie DPD und Crest-Faktor-Reduktion. Während diese Funksysteme mit Finline-CMOS-Technologie hergestellt werden, erfolgten andere Evolutionen in der HF-Eingangs- und Sendestufe durch

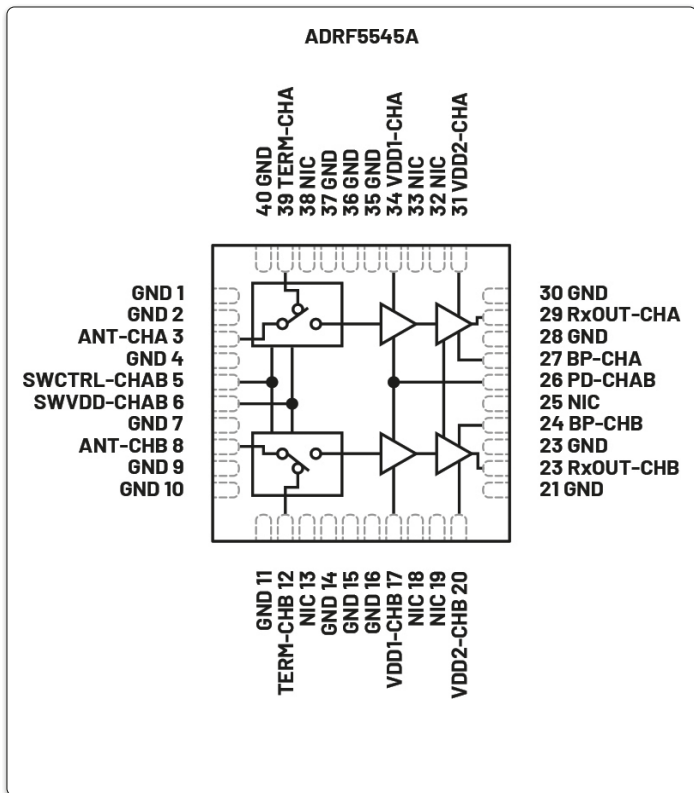


Bild 3: ADRF5545A-Zweikanal-TDD-Empfänger-Frontend

kostengünstige Prozesse (SiGe, SOI, GaN, GaAs etc.).

Systemübersicht

Bild 1 zeigt ein typisches 4T4R-Blockdiagramm (vier Sender und vier Empfänger) einer 5G-Klein- zelle. Es sind viele Permutati-

onen möglich, darunter 2T2R und eine Reihe von Leistungs- klassen von 24 dBm und höher.

Dieses Blockdiagramm bildet die Grundlage für den weiteren Verlauf dieser Diskussion, wobei der Schwerpunkt auf Geräten der 5G-Technologie liegt, die leicht

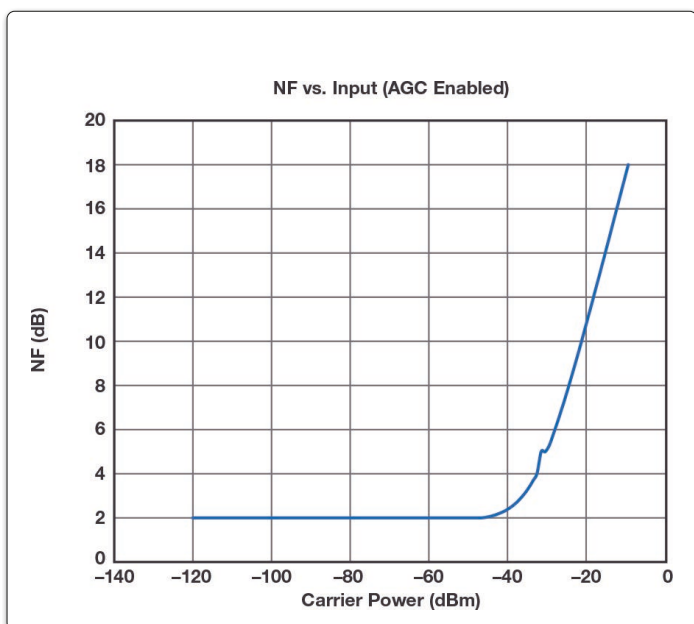


Bild 5: Empfänger-NF in Abhängigkeit vom Eingangspegel

für Band- und Leistungspegel- variationen innerhalb der O-RU skaliert werden können.

Schlüsselemente für Sendeempfänger

Im Laufe des letzten Jahrzehnts hat sich der integrierte Transceiver zu einer Hochleistungs- plattform entwickelt. Die ADI- RadioVerse-Familie umfasst eine breite Palette an integrierten Transceivern, die eine belegbare Bandbreite von bis zu 200 MHz unterstützen und fortschrittliche Funktionen wie DPD integrieren. Zusammengefasst erfüllt diese Produktfamilie nicht nur die Anforderungen von Gerä- ten mit 5G-Technologie, son- dern unterstützt auch weiterhin LTE- und Multicarrier-GSM- HF-Anforderungen. Während neue Generationen dieser Geräte ständig in der Entwicklung sind, ist eine der neuesten in Bild 2 zu sehen, der ADRV9029, eine 4T4R-Konfiguration. Weitere Produkte sind erhältlich, darun- ter Bauelemente mit und ohne integrierte DPD und andere Konfigurationen, einschließ- lich 2T2R.

Jeder RadioVerse-Baustein ent- hält alles, was zum Aufbau eines kompletten Sendeempfängers erforderlich ist, mit Ausnahme des LNA und der PA. Während die RadioVerse-Produkte alle breitbandig bis zu 6 GHz sind, sind LNAs und PAs dies nicht und müssen mit dem Radio- Verse-IC gepaart werden.

Beispiel für einen Empfangszweig

Kombiniert man den ADRV9029 mit dem ADRF5545A, wie in Bild 3 gezeigt, lässt sich leicht ein 2-Chip-Empfänger aufbauen. Der ADRF5515 ist pin-kompati- bel und kann ebenfalls verwen- det werden. Zusammen mit eini- gen wenigen anderen passiven Bauelementen kann so ein sehr kompaktes, leistungsfähiges Empfängerdesign entstehen, wie in der Signalkette in Bild 4 dargestellt. Der entscheidende Vorteil dieser Architektur ist der hohe Integrationsgrad, der nicht nur zu einer sehr kostengün-

stigen Implementierung, sondern auch zu einer möglichst geringen Verlustleistung führt [4].

Die Architektur der Radio- Verse-Familie eliminiert viele Elemente, die typischerweise mit einem klassischen Emp- fängerdesign verbunden sind, einschließlich eines Teils der HF-Verstärkung, Filterung und Integration eines Großteils der verbleibenden Funkfunktio- nalität, einschließlich Kanalfilter (analog und digital) und Basis- bandverstärker. Dabei handelt es sich in der Regel um einige der größten und leistungsstärk- sten Komponenten im System.

Wie in Bild 4 gezeigt, besteht die Kleinzellen-Empfänger- gruppe aus einem Zirkulator (für TDD-Anwendungen), einem ADRF5545A, einem SAW/ BAW-Filter (Surface Acoustic Wave/Bulk Acoustic Wave) oder einem Monoblockfilter, einem Balun und einem Transcei- ver. Zusätzliche Verstärker oder VGAs sind angesichts des guten Rauschverhaltens und des niedrigen Eingangs-1-dB-Kom- pressionspunkts des ADRV9029 und anderer Mitglieder der Radi- oVerse-Familie nicht erforder- lich. Mit dieser Signalkette ist es möglich, für das gesamte System von der Antenne bis zu den Bits Rauschwerte von nur 2 dB zu erreichen. Trotz integri- ertem HF-Frontend-Modul (FEM) werden viele Designs auch von einem diskret aufge- bauten Design profitieren.

Geht man von einem Verlust vor dem LNA von etwa 0,5 dB aus, und betrügt der Verlust des Bandfilters 1 dB, so sollte die nominale Rauschzahl für die gesamte Empfängersignalkette etwa 2 dB betragen. Bei 0 dB S/R beträgt die Referenzemp- findlichkeit etwa -104,3 dBm für einen G-FR1-A1-1-5G-Träger (etwa 5 MHz). Dies sollte mehr als ausreichend sein, um selbst die in Abschnitt 7.2.2 der in der Spezifikation 38.104 dargelegten Anforderungen an die Weitbe- reichsdeckung mit Spielraum zu erfüllen, und mehr als genug für lokale Bereiche/Kleinzel- len (-93,7 dBm, s. Tabelle 1).

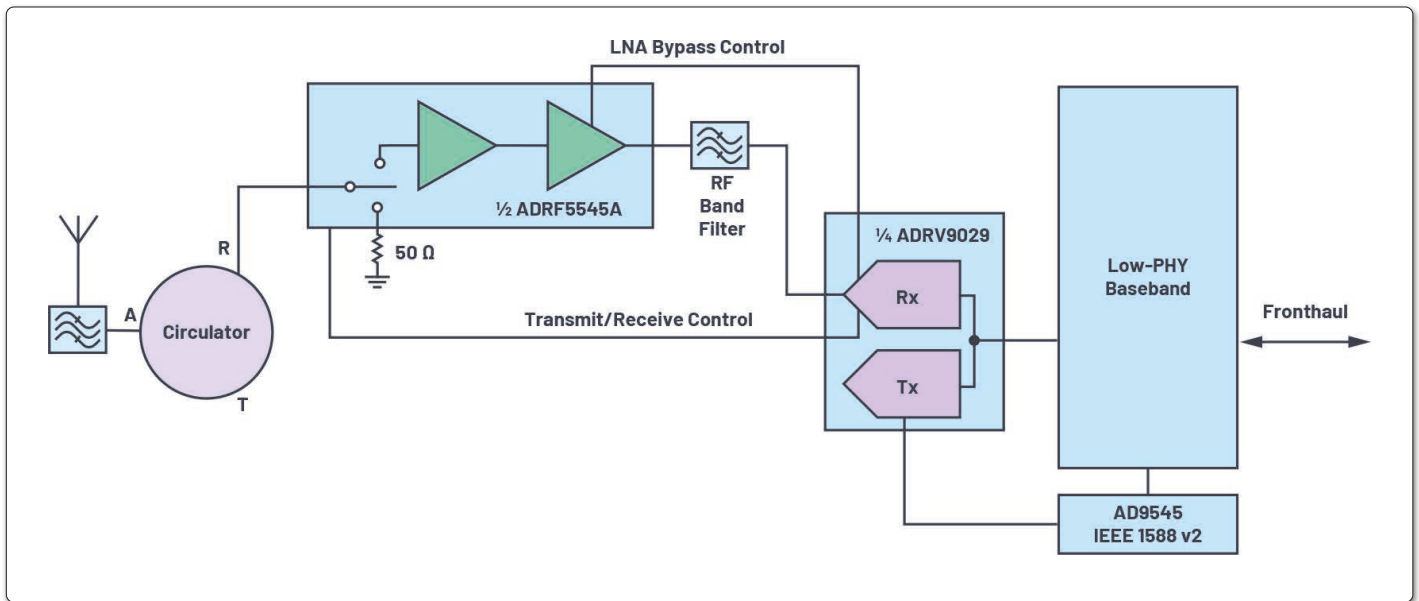


Bild 4: Empfängersignalkette im Detail

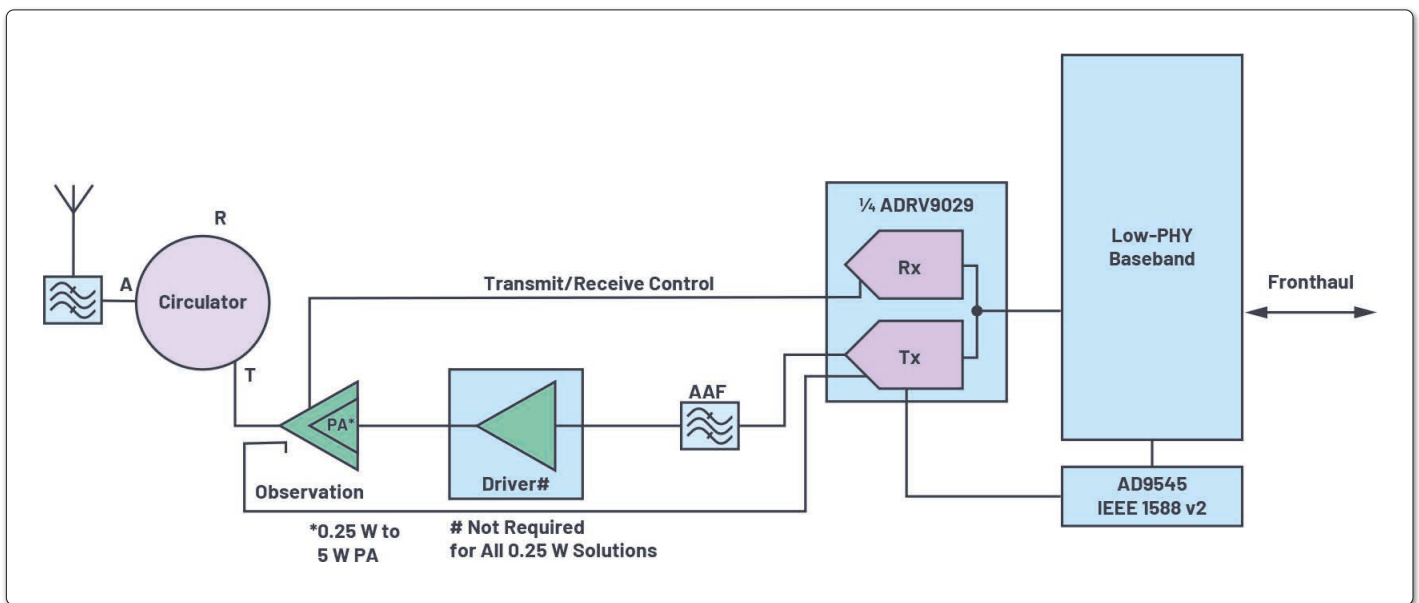


Bild 6: Detail der Sendersignalkette

Zusätzlich erfordert der 38.104 Abschnitt 7.4.1, dass der Empfänger bei -52 dBm (Wide Area) ACS-Blocking nicht mehr als 6 dB zurückregelt. Ausgehend von der in Bild 5 gezeigten NF in Abhängigkeit vom Eingangsspiegel tritt bei -52 dBm nur sehr wenig zusätzliches Rauschen auf als bei niedrigeren Pegeln. Tatsächlich steigt das Grundrauschen erst kurz nach -40 dBm nach oben an, was ideal für das lokale ACS ist, das eine Toleranz von -44 dBm erfordert.

Die allgemeinen Sperrfilteranforderungen (Abschnitt 7.4.2) verlangen, dass, wenn ein Aggressor von -35 dBm (lokaler Bereich) auf den Empfänger innerhalb des interessierenden

Bandes mit einem Offset von $\pm 7,5$ MHz angewendet wird, nicht mehr als 6 dB Abweichung zulässig sind. Aus Bild 5, das die Performance der Signalkette von Analog Devices demonstriert,

geht hervor, dass der Rückgang nur etwa 0,9 dB beträgt. Schmalbandiges Blocking ist ein CW-ähnlicher Einfluss mit etwas geringerer Leistung, stellt aber ebenfalls kein Problem dar.

	Fernbereich (dBm)	Mittelbereich (dBm)	Lokaler Bereich (dBm)
5 MHz BW/15 kHz	-101.7	-96.7	-93.7
20 MHz BW/15 kHz	-95.3	-90.3	-87.3
50 MHz BW/30 kHz	-95.6	-90.6	-87.6
100 MHz BW/30 kHz	-95.6	-90.6	-87.6

Tabelle 1: 38.104-Empfängerklassifikationen

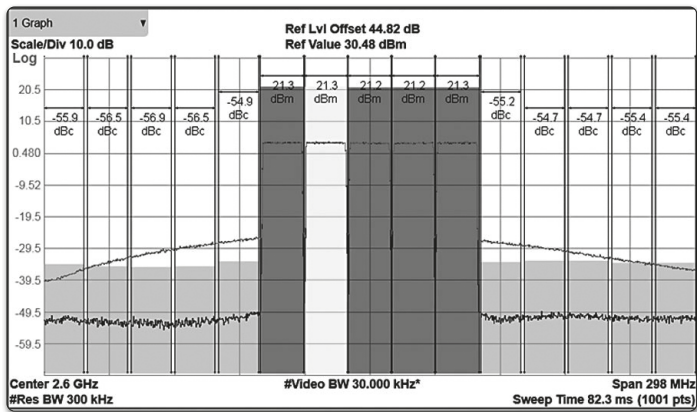


Bild 7: Typisches PA-Spektrum mit und ohne DPD und einer totalen HF von 26 dBm

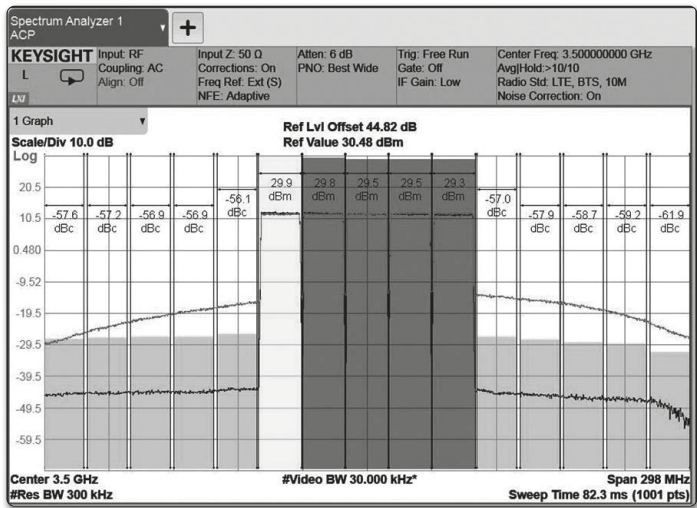


Bild 8: Typisches PA-Spektrum mit und ohne DPD und einer totalen HF von 37 dBm

Eine vielleicht interessantere Herausforderung ist das Außerband-Blocking aus Abschnitt 7.5.2. Hier wird ein Signal von -15 dBm an den Antenneneingang eingespeist. Bei einer kleinen Zelle mit weniger als 200 MHz kommt dieses Signal dem Bandrand am nächsten, nämlich bei 20 MHz. Der Test erfordert einen Sweep von 1 MHz bis zu 12,75 GHz, wobei ein Band von 20 MHz Breite bei der Betriebsfrequenz ausgeschlossen wird. Hier wirken sich mehrere Faktoren zum Vorteil der Signalkette aus. Erstens hat der Zirkulator eine endliche Bandbreite und wird viele Signale außerhalb des Bandes unterdrücken, aber im Band spielt er keine große Rolle. Zweitens bietet der nach dem ADRF5545A gezeigte Filter eine gewisse Filterung. Schließlich ist

eine der nützlichsten Eigenschaften der Transceiver-Familie von ADI die integrierte Außerband-Unterdrückung, s. Applikationschrift AN-1354.

Zusammen filtern diese Blöcke den -15-dBm-Aggressor außerhalb des Bandes auf -40 bis -45 dBm bis zum 20-MHz-Band. Weiter draußen wird eine noch größere Unterdrückung angenommen. Bild 5 zeigt, dass bei diesem Pegel eine nur sehr geringe Dämpfung zu erwarten ist.

Das größere Problem könnte in der Linearität des Frontend-Moduls liegen. Bei diesem Pegel wäre mit einem erheblichen IM3 zu rechnen. Je nach gewähltem FEM kann es wünschenswert sein, den Bandselektionsfilter vor den zweiten LNA zu setzen,

um ihn vor Außerbandsignalen zu schützen, die in der Regel große IM-Produkte erzeugen. Bei diesen FEM-Typen ist es nicht möglich, ein Filter zwischen den Stufen zu platzieren, daher wird eine alternative Option implementiert.

Um die Auswirkung von Intermodulationsprodukten bei großen Außerband-Blockern zu begrenzen, enthält ein typisches FEM Bypass-Schalter für die zweite Stufe, um die Verstärkung zu reduzieren und diese Stufe vor Nichtlinearität zu bewahren, vgl. Bild 3. Das Umschalten der LNA-Verstärkung reduziert das SNR der Signalkette um 1 dB und trägt dazu bei, den gesamten Dynamikbereich zu erhalten, indem die durch diese großen Blocker verursachte Intermodulationsverzerrung begrenzt wird. Insgesamt würde dies im ungünstigsten Fall zu einem NF von etwa 5,7 dB führen, was immer noch innerhalb der Anforderungen an die Referenzempfindlichkeit für lokale Bereiche (kleine Zellen) liegt. Die verbleibende Filterung erfolgt durch einen Antennenfilter, und die Unterdrückung kann auf der Grundlage des Niederpegel-Kompressionspunkts und des IP3 des Empfänger-FEM bestimmt werden.

und Transceiver. Der Koppler am Ausgang des PA wird zur Überwachung der Ausgangsverzerrung verwendet.

Einige ADI-Transceiver verfügen über eine vollintegrierte DPD, die mit einer inkrementellen Leistung von maximal 350 mW arbeitet. Sie reduziert die Anzahl der SERDES-Leitungen auf dem externen Basisband-Chip um die Hälfte, da die SERDES-Leitungen des Beobachtungsempfängers vollständig entfallen und die Nutzlast des Senders reduziert wird. Eine äquivalente DPD in einem FPGA hat typischerweise eine zehnfach höhere Leistungsaufnahme und ist für kleine Zellen mit geringem Stromverbrauch und Massive MIMO nicht effektiv.

Bild 7 und 8 zeigen Beispiele für den Einsatz der DPD von ADI in Kleinzellenanwendungen mit geringer und mittlerer Leistung. Der gezeigte Stimulus gilt für fünf benachbarte 20-MHz-LTE-Träger mit insgesamt 100 MHz. LTE erfordert in der Regel ein Minimum von 45 dB ACLR, wobei bei den meisten Implementierungen mehr als dieser Wert erreicht werden dürfte. ◀

Beispiel Sendersignalkette

Wenn der ADRV9029 mit einem geeigneten HF-Ansteuerverstärker oder RFVGA und einer geeigneten PA kombiniert wird, kann eine kompakte Indoor-Picocell, Outdoor-Picocell oder Outdoor-Microzelle [5] leicht aufgebaut werden. Mit nur wenigen weiteren passiven Komponenten können diese Baugruppen der 5G-Technologie zu einem sehr kompakten und effizienten Senderdesign kombiniert werden, wie es Bild 6 zeigt. Der Hauptvorteil dieser Architektur ist der hohe Integrationsgrad, der nicht nur zu einer sehr kostengünstigen Implementierung, sondern auch zu einer möglichst geringen Verlustleistung führt. Wie in Bild 6 zu sehen ist, besteht die Kleinzellensender-Linie aus Zirkulator, PA, Filter

Der Autor:

Brad Brannon arbeitet seit 37 Jahren bei ADI, nachdem er seinen Abschluss an der North Carolina State University gemacht hat. Bei ADI hatte er Positionen in den Bereichen Design, Test, Anwendungen und Systemtechnik inne. Derzeit entwickelt Brad Brannon Referenzdesigns für O-RAN und unterstützt die Kunden. Brad hat mehrere Artikel und Applikationschriften zu Themen verfasst, die die Taktung von Datenkonvertern, die Entwicklung von Funkgeräten und das Testen von ADCs umfassen. Sie können ihn unter brad.brannon@analog.com erreichen.