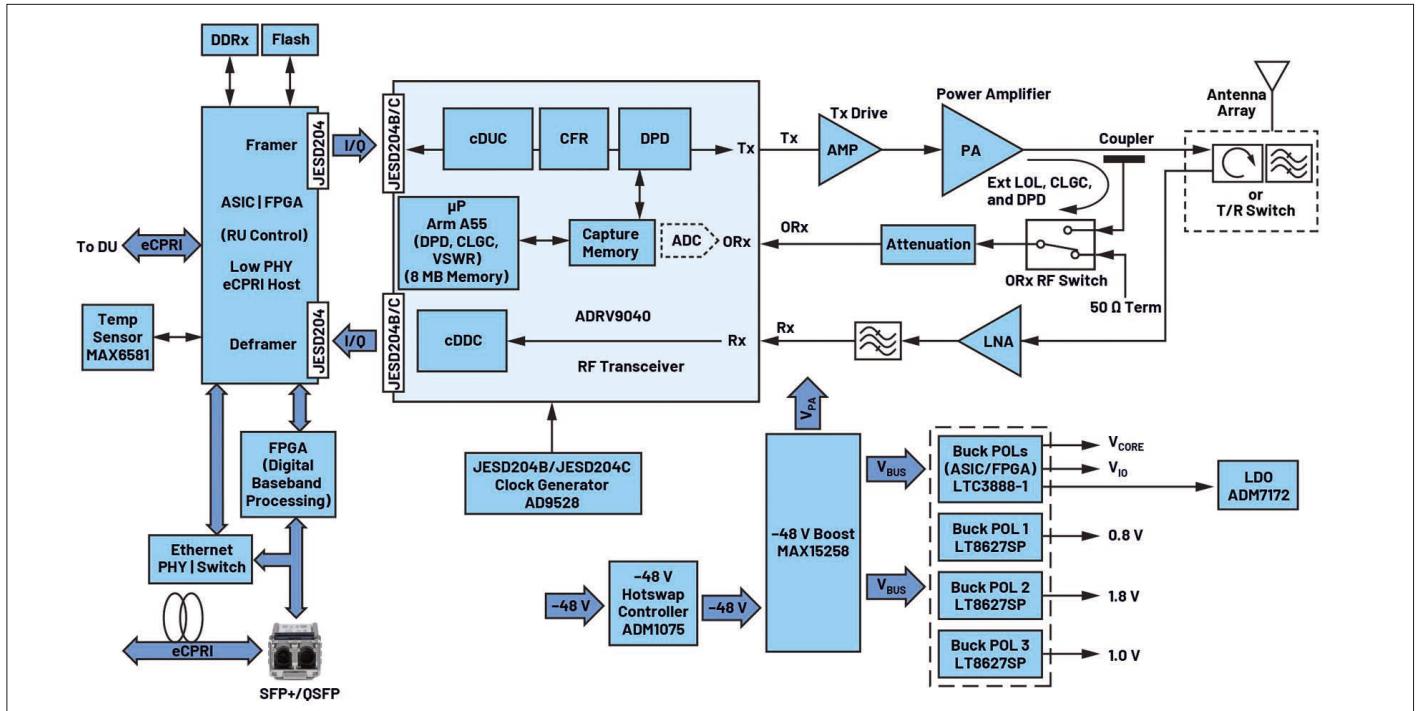


Wie Vereinfachungen möglich sind

Aufbau, Design und Evaluierung von 5G-Basis-Sendeempfangsstationen



Blockdiagramm auf Systemebene eines Makro-RRH mit den Leistungslösungen des ADRV9040

Mit drahtlosen Kommunikationsstandards wie LTE und 5G hat die Betonung höherer Datenraten und spektraler Effizienz die Hersteller von drahtlosen Originalgeräten (OEMs) dazu veranlasst, neue Übertragungsformate wie das orthogonale Frequenzmultiplexing (OFDM) zu übernehmen.

Diese Signale mit starken Schwankungen in ihren Hüllkurven sind jedoch aufgrund ihres hohen Verhältnisses von Spitzenleistung zu mittlerer Leistung (PAPR) besonders anfällig für nichtlineare Verzerrungen durch Leistungsverstärker (PA). Bei diesem hohen PAPR-Signal kann eine PA-Nichtlinearität zu erheblichen Signalverzerrungen

führen, die die Bitfehlerrate (BER) erhöhen und den Signal-Rauschabstand verringern. Dieser Artikel gibt einen Überblick über PAPRs, ihren Ursprung, die Art und Weise, wie sie die HF-Komponenten der Sendekette stören können, und wie man sie loswerden oder zumindest ihre Auswirkungen auf die Signalkette abschwächen kann.

Einführung

Die neueren Modulationsformate wie OFDM und verschiedene Formen der Quadraturamplitudenmodulation (QAM) haben große Schwankungen in ihren Signalhüllkurven. Dadurch entsteht eine hohe PAPR im Signal. Die Wiedergabe eines Signals mit hohem PAPR auf einem nichtlinearen PA erzeugt spektrales Nachwachsen. Spektrales Nachwachsen bezieht sich auf neue Frequenzen, die durch die Verstärkungskompression verursacht werden und im ursprünglichen Eingangssignal nicht enthalten waren. Der hohe PAPR verursacht eine bandinterne Verzerrung, die die BER-Leistung des gesamten Systems verschlechtert. Wir werden eine Lösung erörtern, die dabei hilft, den richtigen Kompromiss zwischen Effizienz und Linearität zu finden, indem wir digitale Vorverzerrung (DPD) und Crest-Faktor-Reduktion (CFR) einsetzen.

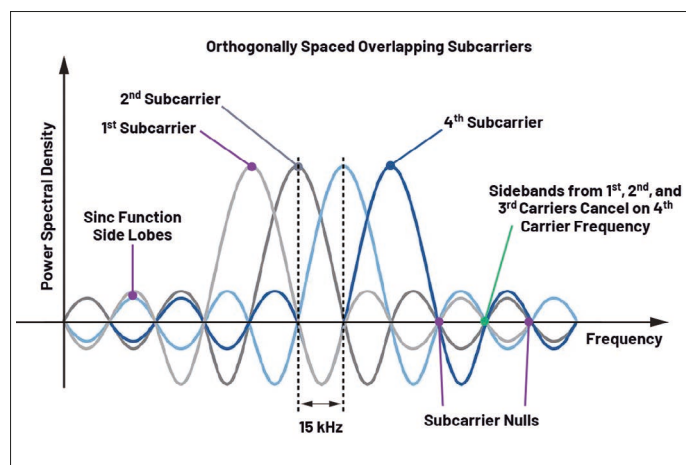


Bild 1: Wellenformen von Mehrträger-OFDM-Unterträgern

Autor:
Hamed M. Sanogo
Endmarkt-Spezialist
Analoge Devices
www.analog.com

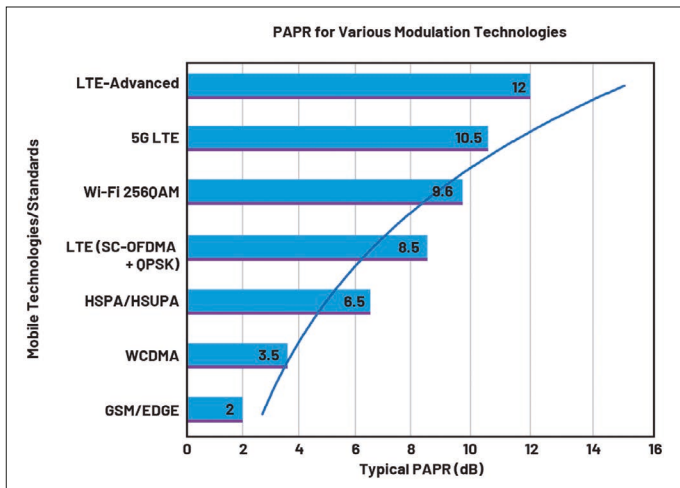


Bild 2: Typischer PAPR für verschiedene Modulationstechnologien. PAPR in OFDM-Signalen

OFDM-Modulation – Alle machen es!

In LTE- und 5G-Systemen wird die Trägeraggregation, d.h. die parallele Übertragung mehrerer Träger, verwendet, um die Bandbreite und Datenrate zu erhöhen. Diese Netze nutzen die OFDM-Modulation, eine sehr leistungsfähige und weit verbreitete Mehrträger-Übertragungstechnik, die eine bessere spektrale Effizienz ermöglicht und die Auswirkungen von Mehrweg-Reflexionen auf die Fähigkeit des Empfängers zur Demodulation des Signals reduziert. Bei

OFDM ist die endgültige Wellenform eine orthogonale Summierung von Unterträgern, die Informationen tragen, wobei jeder Unterträger seine eigene Mittenfrequenz und sein eigenes Modulationsschema hat. Im Zeitbereich können sich die Spitzen dieser Unterträger manchmal ausrichten, um eine große OFDM-Wellenformspitze zu erzeugen.

Ein einzigartiges Merkmal von OFDM ist, dass die Wellenformen der Unterträger orthogonal kombiniert werden, sodass die Null (oder Nullamplitude) eines Unterträgers mit der Spitze der anderen Unterträger zusammenfällt, wie in Bild 1 dargestellt. Dies ermöglicht eine relativ effiziente Nutzung der Kanalbandbreite, was zu einer verbesserten spektralen

Effizienz im Vergleich zur herkömmlichen Modulation mit einem Träger führt.

OFDM hat mehrere weitere Vorteile, darunter seine Robustheit gegenüber Mehrwegschwund. Eines der Hauptprobleme bei der OFDM-Modulation ist jedoch die hohe PAPR der übertragenden Wellenformen. Bild 2 zeigt die PAPR verschiedener gängiger Mobilfunktechnologien oder Modulationsarten. Es ist zu erkennen, dass der typische PAPR-Wert mit dem Aufkommen neuer Standards oder Modulationstechnologien stetig zunimmt.

Wie bereits erwähnt, wird die Trägeraggregation, die durch die OFDM-Modulation ermöglicht wird, verwendet, um die Bandbreite und Datenrate

in 5G-Systemen zu erhöhen. OFDM führt auch zu einem Signal, dessen Hüllkurve nicht konstant ist, was zu einer hohen PAPR führen kann, die zu Systemschäden führen kann. Wenn die HF-Leistungskomponenten in der HF-Signalleitung, insbesondere der PA, nicht ausreichend spezifiziert sind, um die erwarteten Spannungsspitzen zu verarbeiten, können diese Komponenten ausfallen. Eine große PAPR verringert die Effizienz des PA, indem sie ihn tief in die Sättigung, seinen nichtlinearen Betriebsbereich, treibt, was zu Verzerrungen führt, die eine spektrale Streuung des Signals zur Folge haben. Die Linearität des PA war schon immer ein kritischer Punkt bei der Entwicklung von digitalen Modulationsverfahren ohne Hüllkurve. Bild 3 zeigt ein LTE 64-QAM-Signal im Zeitbereich, das am Senderausgang des ADRV9040 aufgezeichnet wurde.

Komplementäre kumulative Verteilungsfunktion

Aufgrund seiner Form erfordert ein OFDM-Signal einen statistischen Ansatz für die richtige Messung. Die komplementäre kumulative Verteilungsfunktion (CCDF) wird verwendet, um die Leistung der PAPR-Reduzierung in einer HF-Signalkette zu bewerten. Bild 4a zeigt die übertragene Wellenform eines LTE-Downlink-Signals mit einer Bandbreite von 10 MHz und einer Modulation mit 64 QAM-Unterträgern. Die CCDF in Bild 4b zeigt, dass die Signalleistung in 0,01% der Zeit den Durchschnitt um mindestens 7,4 dB übersteigt. Der theoretische Höchstwert tritt bei einer Wahrscheinlichkeit von 0 % auf, die in diesem Diagramm nicht definiert ist. Die Kurve schneidet die x-Achse (0,01% oder eine Wahrscheinlichkeit von $10e-4$) bei einem PAPR von etwa 7,4 dB.

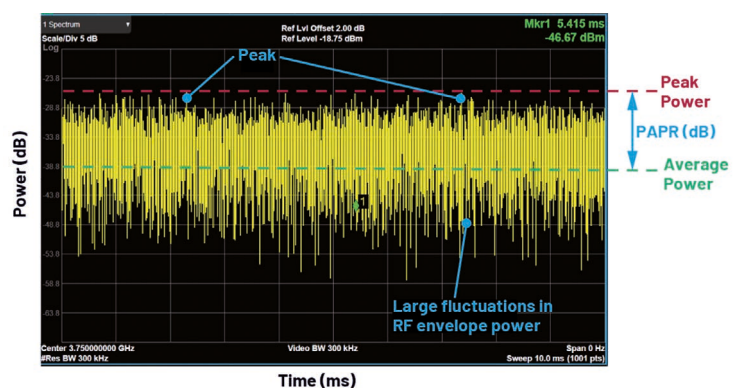


Bild 3: Illustration der orthogonalen Summierung von Unterträgern, die große Spitzen verursacht

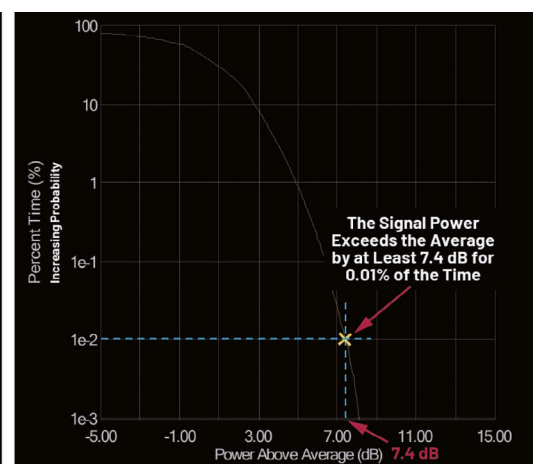
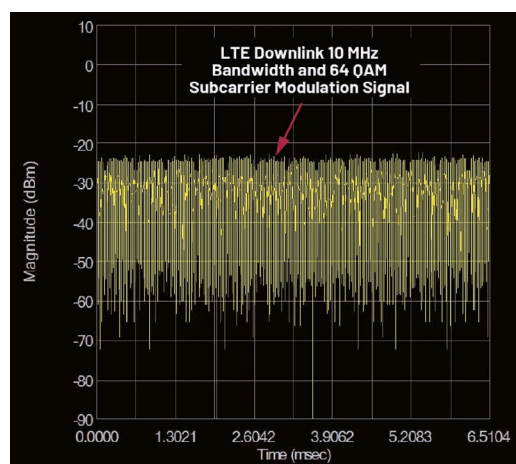


Bild 4: CCDF eines LTE-Downlinks mit 10 MHz Bandbreite und 64 QAM Unterträgermodulation

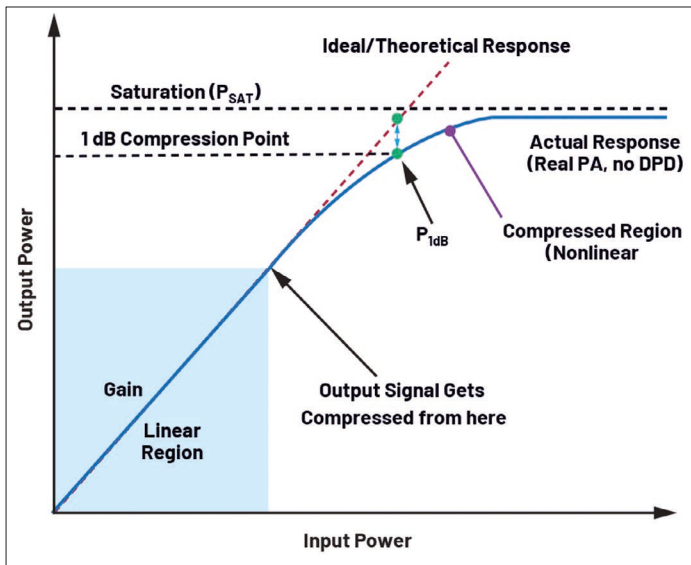


Bild 5: Die AM-AM-Kurve mit dem 1-dB-Kompressionspunkt

Dies würde bedeuten, dass eine von 10.000 Proben die durchschnittliche Leistung um mehr als 7,4 dB überschreiten würde.

Bei näherer Betrachtung des CCDF-Diagramms fällt auf, dass die y-Achse die kumulative Wahrscheinlichkeit darstellt und in der Regel auf einer logarithmischen Skala aufgetragen wird; die x-Achse ist die in dB aufgetragene Leistung. Das Diagramm zeigt die Wahrscheinlichkeit oder den Prozentsatz der Zeit an, in der eine Signalleistung bei oder über der durchschnittlichen Leistung liegt. Im Wesentlichen zeigt die CCDF-Darstellung für jeden Leistungspegel die Zeit, die das Signal über dem durchschnittlichen Leistungspegel verbringt. Je weiter die CCDF-Kurve nach rechts wandert, desto größer wird das Verhältnis von Spitzenleistung zu Durchschnittsleistung.

Die CCDF-Darstellung verifiziert den linearen Betrieb und wird häufiger unmittelbar nach einer PA gemessen. Sie kann eine genauere Darstellung der Signalkompression liefern als die üblicherweise verwendete Methode der Verfolgung von Verstärkungsänderungen bei unterschiedlichen Leistungspegeln. Die statistische Analyse des Auftretens des Crest-Faktors macht ihn zu einem wertvollen Werkzeug für Entwick-

ler, um die Auswirkungen der Verstärkerkompression auf die BER und/oder den Fehlerratewert (EVM) des Systems zu beurteilen.

Warum ist PAPR so wichtig?

PAs sind von Natur aus nicht-linear und weisen einen Kompromiss zwischen Linearität und Effizienz auf. Die häufigsten nichtlinearen Probleme sind Verstärkerkompression und Phasenverzerrung, einschließlich In-Band- und Out-of-Band-Verzerrungen. Jeder dieser Faktoren verschlechtert die BER-Leistung des Systems und führt zu einer spektralen Vergrößerung außerhalb des Bandes, was zu Nachbarkanalstörungen führt und die von den Regulierungsbehörden vorgeschriebenen Emissionsstandards außerhalb des Bandes verletzt.

Bei der Prüfung eines PA wird die Eingangsamplitude schrittweise erhöht, bis das gemessene Verhältnis um 1 dB abnimmt, was einer Verstärkerkompression von 1 dB entspricht. Der 1-dB-Kompressionspunkt ist eine wichtige Kennzahl, die HF-Designern Anhaltspunkte für die Leistung ihres Verstärkers liefert. Im Wesentlichen ist der 1-dB-Kompressionspunkt eines Verstärkers definiert als die Ausgangsleistung, bei der die Verstärkung des Geräts um 1 dB ge-

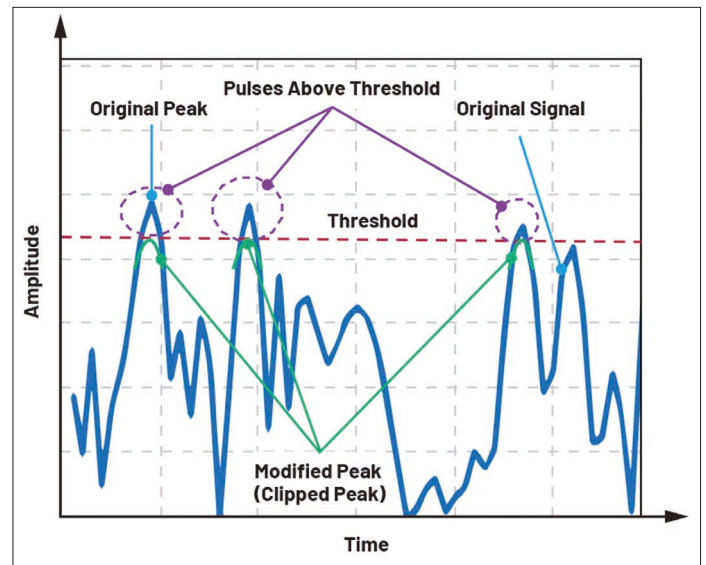


Bild 6: Erkannte Signalspitzen oberhalb des Schwellenwerts werden reduziert

genüber seinem Kleinsignalwert abfällt. Dieser Parameter wird in der Regel als Referenzpunkt für den Beginn der Nichtlinearität eines Verstärkers verwendet und entspricht ungefähr der maximal nutzbaren Spitzenausgangsleistung des Verstärkers. Aus diesem Grund setzen viele HF-Designer die maximale Betriebsausgangsleistung ihres PA in der Regel um einige dB niedriger als den 1-dB-Kompressionspunkt an. Daher ist die Ermittlung des 1-dB-Kompressionspunkts eines PAs von entscheidender Bedeutung, damit ein Signal mit hoher PAPR den PA nicht in die Sättigung treibt. Ein anderer Name für PAPR ist Crest-Faktor. Bild 5 zeigt die AM-AM-Kurve mit dem 1-dB-Kompressionspunkt.

Nachdem der Entwickler die PA bewertet und den 1-dB-Kompressionspunkt identifiziert hat, muss er die PA in ihrem linearen Bereich mit einer Absenkung der Eingangsleistung betreiben (z.B. die PA mit einer geringeren Leistung innerhalb des linearen Teils ihrer Betriebskurve betreiben), um den Spektralanstieg zu vermeiden, richtig? Nun, nicht ganz!

Ein einfaches Absenken der Eingangsleistung, weit weg vom Sättigungspunkt des PA, kann zwar dazu beitragen, alle besprochenen nichtlinearen Probleme

zu vermeiden, führt aber zu sehr niedrigen Wirkungsgraden und erhöht die Wärmeabgabe. Dieses Problem des geringen Wirkungsgrads durch eine Erhöhung der Leistungsaufnahme des Systems zu lösen, ist kein gangbarer Kompromiss. Wie in Bild 2 zu sehen ist, hat die Entwicklung neuer Modulationsverfahren durch die Normungsgremien zur besseren Nutzung des vorhandenen Spektrums zu Signalen mit immer höherem Crest-Faktor geführt. Die Verwendung einer PA-Backoff-Implementierungsstrategie würde also auf Dauer nicht funktionieren. In den nächsten Abschnitten dieses Artikels werden zwei Implementierungsstrategien erörtert, die in ihrer Kombination die PA bis zu ihrem Sättigungspunkt betreiben, dabei aber eine gute Linearität beibehalten und ihre Effizienz erheblich steigern. Bei der ersten wird eine Amplitudenbegrenzungstechnik zur PAPR-Reduzierung eingesetzt, bei der zweiten Methode wird die nichtlineare Antwort eines PA über den vorgesehenen Leistungsreich linearisiert.

Die zwei Merkmale einer sehr erfolgreichen digitalen Frontend-Lösung

Ein drahtloses digitales Frontend-System (DFE) umfasst eine Vielzahl von Subsystemen, darunter DPD, digitale Auf-

wärtswandlung (DUC), digitale Abwärtswandlung (DDC) und CFR. Darüber hinaus gibt es weitere wichtige Bereiche wie DC-Offset-Kalibrierung, Impulsformung, Bildunterdrückung, digitales Mischen, Verzögerungs-/Verstärkungs-/Ungleichgewichtskompensation, Fehlerkorrektur und andere relevante Blöcke. Die am Ausgang des PA erfassten Daten werden von der DPD-Schaltung zur Linearisierung des PA-Ausgangs verwendet. DPD verbessert die Systemlinearität, indem PAs effizienter arbeiten können, während CFR dazu beiträgt, die PAPR des Signals zu begrenzen. Die DPD-Engine wird nach der Verwendung von CFR eingesetzt, um den Dynamikbereich des Signals zu verringern und den Betrieb des PA oberhalb des linearen Bereichs zu ermöglichen. Obwohl jeder dieser Blöcke wichtige Funktionen des DFE abdeckt, wird in diesem Abschnitt nur auf die Blöcke CFR und DPD eingegangen.

Crest-Faktor-Reduzierung

Der größte Teil des Eingangssignals einer OFDM-Wellenform liegt innerhalb des linearen Bereichs des PA. Wie bereits gezeigt, weist das Signal jedoch Spitzen auf, die den linearen Betriebsbereich des PA überschreiten können, was aufgrund ihres Beitrags zur Systemschädigung zu Bedenken hinsichtlich der langfristigen Zuverlässigkeit führt. Auch hier ist es äußerst

wünschenswert, den PA mit der höchstmöglichen Eingangsleistung zu betreiben, ohne dass er in die Sättigung geht. Um eine Sättigung aufgrund von Spitzenwerten zu vermeiden, wird CFR eingesetzt, wobei nicht das gesamte Signal gedämpft wird, sondern nur die Teile des Signals, die oberhalb des linearen Bereichs des PA liegen. Kurz gesagt, CFR trägt dazu bei, den PA linear zu halten.

Wenn Spitzen unterdrückt werden, führt dies zu einer konstanten Ausgangsleistung, wodurch sichergestellt wird, dass das Signal innerhalb des linearen Bereichs des PA bleibt. CFR ist keine Linearisierungstechnik, sondern ein Verfahren zur Effizienzsteigerung. Bei der effektivsten Implementierung eliminiert CFR die Spitzen des Sendesignals, um das Verhältnis von Spitzen- zu Durchschnittsleistung zu verringern und gleichzeitig die gewünschte spektrale Emissionsmaske, das Nebarkanalleistungs-Verhältnis und die EVM-Spezifikationen einzuhalten. Bild 6 zeigt die erkannten Signalspitzen oberhalb eines Schwellenwerts. Die Größe der Spitzen wird auf einen Wert unter dem Zielwert reduziert. Anschließend erfolgt in der Regel eine Filterung, um das Signalspektrum neu zu gestalten.

Ein Nachteil von CFR ist, dass die Begrenzung zu einer Verzerrung des Signals innerhalb des Bandes führt, was eine Verschlechterung der BER-

Leistung zur Folge hat, sowie zu einer Abstrahlung außerhalb des Bandes, die benachbarte Kanäle mit Störsignalen außerhalb des Bandes belastet. Kurz gesagt, die Folge des Clippings ist eine schlechte Signal-ACLR und EVM. Die Filterung des abgeschnittenen Signals wird häufig verwendet, um die Außerbandstrahlung auf Kosten des Spitzenwertwachstums zu reduzieren.

Digitale Vorverzerrung

Mit DPD kann der PA bis in den Sättigungsbereich betrieben werden, ohne seine linearen Eigenschaften zu beeinträchtigen. DPD ermöglicht es HF-Entwicklern, ihre Systeme im effizienten, aber nichtlinearen Bereich eines PA zu betreiben und gleichzeitig die für die OFDM-Modulation erforderliche Linearität des Sendesignals beizubehalten. Mit anderen Worten: Mit DPD wird der lineare Bereich des PAs erweitert. Die DPD-Engine erzeugt Vorverzerrerkoeffizienten durch Modellierung der inversen AM-AM- und AM-PM-Eigenschaften des PA. Im Wesentlichen konzentriert sich DPD auf die Verbesserung der Qualität eines Signals, das der PA erzeugt, wenn er an seinem Spitzenwirkungsgradpunkt arbeitet. DPD zielt darauf ab, inverse Nichtlinearitäten einzuführen, die die PA-Verstärkung kompensieren. Dabei handelt es sich um eine Technik zur Verbesserung der Linearität eines

nichtlinearen PA durch Einführung einer präzisen Antiverzerrung in die Eingangswellenform, die die nichtlinearen Produkte des PA innerhalb des Bandes kompensiert.

Bild 7 zeigt das Konzept der DPD zur Linearisierung des PA-Verhaltens. Es beruht auf dem Prinzip der Vorverzerrung der übertragenen Daten im digitalen Bereich, um die durch die PA-Kompression im analogen Bereich verursachte Verzerrung auszugleichen. Der Ansatz für DPD kann von einfachen Lösungen wie einer einfachen Lookup-Tabelle (LUT) bis hin zu einem komplexeren Echtzeit-Signalverarbeitungsansatz reichen. DPD-Implementierungen können in speicherlose Modelle und Modelle mit Speicher unterteilt werden.

Speicherloses DPD

Das speicherlose DPD korrigiert die Amplitude und Phase der IQ-Abtastwerte nur auf der Grundlage des aktuellen Abtastwerts. Streng speicherlose PAs lassen sich durch ihre AM-AM- und AM-PM-Umwandlungen charakterisieren. Diese momentane Nichtlinearität wird in der Regel durch die AM-AM- und AM-PM-Antworten des PA charakterisiert, bei denen die Amplitude des Ausgangssignals und die Phasenabweichung des PA-Ausgangs als Funktionen der Amplitude des aktuellen Eingangs gegeben sind. Daher kann ein speicherloser PA durch seine AM-AM- und AM-PM-Antworten charakterisiert werden. Diese Messungen werden zur Erstellung von LUT-Daten verwendet, die jede Kombination aus Eingangsleistung und -phase mit der Leistung und Phase in Beziehung setzen, die zur Erzeugung des gewünschten linearen Ausgangs erforderlich ist. Der Vorteil der speicherlosen DPD ist, dass sie relativ einfach als Lookup-Tabelle implementiert werden kann. Die Bilder 8a und 8b zeigen die AM-AM-Antwort eines PA mit und ohne DPD-Korrektur, angewandt auf einen Datensatz von 2×100

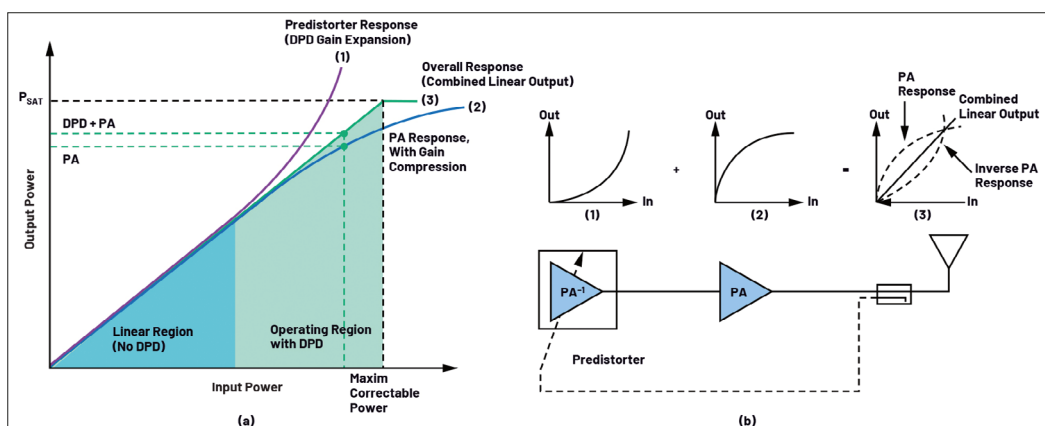


Bild 7: Allgemeines DPD-Konzept zur Linearisierung des PA-Verhaltens: (a) Typische AM-AM-Kurve, bei der der gesamte lineare Bereich in Grün dargestellt ist; (b) Grundkonzept von DPD und wie es die Effizienz des Leistungsverstärkers verbessert.

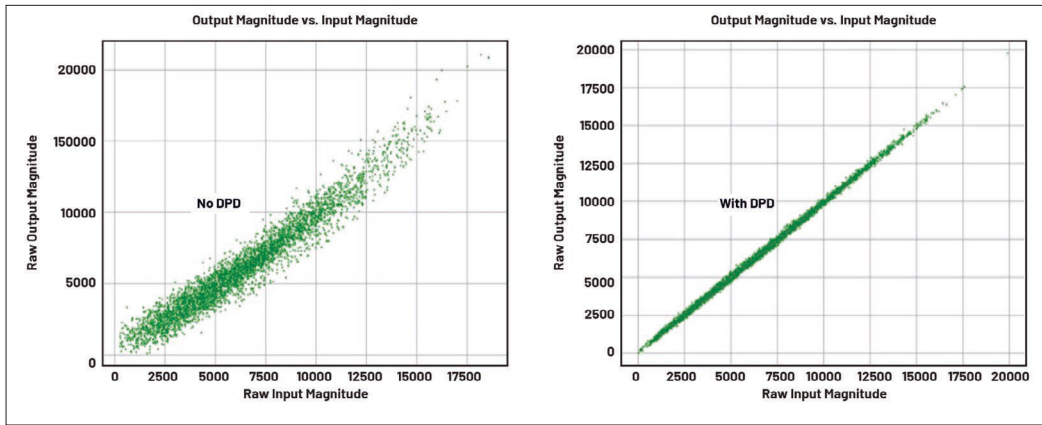


Bild 8: AM-AM-Antwort eines PA mit und ohne DPD bei einem 2x 100-MHz-Signal mit 400-MHz-Bandbreite

MHz, 400 MHz Bandbreite und 4096 Abtastwerten.

DPD mit Speicher

Mit zunehmender Bandbreite des Sendesignals beginnen PAs, Memory-Effekte zu zeigen. Dabei handelt es sich um ungleichmäßige Frequenzgänge in bestimmten Komponenten wie dem Vorspannungsnetzwerk, den Entkopplungskondensatoren und der Stromversorgungsschaltung oder um thermische Konstanten der aktiven Bauelemente. Dies hat zur Folge, dass die Stromabgabe des PA nicht nur von der aktuellen Eingabe, sondern auch von vergangenen Eingabewerten abhängt. Das bedeutet, dass der PA zu einem nichtlinearen System mit Gedächtnis geworden ist. DPD mit Gedächtnis korrigiert Amplitude und Phase von IQ-Datenabtastwerten auf der Grundlage mehrerer früherer Abtastwerte und ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten. Die Reaktion des PA hängt im Allgemeinen nicht nur von der aktuellen Signalamplitude ab, sondern auch von den Amplituden der vorherigen Abtastwerte. Daher muss der digitale Vorverzerrer auch über Speicherstrukturen verfügen - dies ist das mathematische Rückgrat des DPD. Die Volterra-Reihe ist der allgemeinste Polynomtyp der Nichtlinearität mit Speicher und wird zur Modellierung nichtlinearer Systeme mit Speicher verwendet. Daher ist die Verwendung der Volterra-Reihe die allgemeinste Möglichkeit, Speicher einzuführen. Eine ausführliche

Diskussion über die mathematischen Details der Modellierung der PA-Verzerrung mit der Volterra-Reihe findet sich in Masterson [2].

Rahmen für den einfachen Entwurf von 5G-RF-Signalketten

Der ADRV9040 RF Transceiver bietet einen optimierten Rahmen für die einfache Entwicklung, Implementierung und Prüfung der RF-Signalkette eines 5G-Kommunikationssystems. Ein diskretes Massive-MIMO-System erfordert in seiner diskreten Form der Bereitstellung vier Chipebenen, darunter einen RF-Transceiver, DFE-FPGAs, Basisband-FPGA/ASIC und ein Steuer-FPGA. Da dieser Transceiver mit integriertem DFE geliefert wird, entfällt der Bedarf an mehreren FPGAs, die in diskreten Lösungen der Konkurrenz verwendet werden, bei denen die Blöcke DPD, CFR, DUC und DDC in Computercode implementiert sind. Die FPGA-Implementierung ist in der Regel kostspielig und verbraucht viel Strom. Dieser hochintegrierte RF-Transceiver trägt dazu bei, solche stromfressenden dedizierten FPGAs zu vermeiden. Hier nun stellen wir diesen HF-Transceiver und ein vorgeschlagenes Rahmenwerk zur Überprüfung einer typischen PA-Verstärkungsreihe und zur Durchführung eines Sanity-Checks für Rauschgrenzen durch die Implementierung von Registerschreiboperationen im Gerät vor.

Dieses hochintegrierte, hochflexible Transceiver-System auf dem Chip (SoC) bietet acht Sender, zwei Beobachtungsempfänger für die Überwachung von Sendekanälen, acht Empfänger, einen integrierten Lokaloszillator (LO) und Taktsynthesizer sowie digitale Signalverarbeitungsfunktionen, um einen vollständigen Transceiver mit erheblichen digitalen Front-End-Fähigkeiten bereitzustellen. Der Baustein bietet die hohe Funkleistung und den geringen Stromverbrauch, die von zellularen Infrastrukturanwendungen wie Small Cell Radio Units (RUs), Macro 4G/5G RUs und Massive MIMO RUs gefordert werden. Das komplette Transceiver-Subsystem umfasst automatische und manuelle Dämpfungssteu-

erung, DC-Offset-Korrektur, Quadraturfehlerkorrektur und digitale Filterung. Der Transceiver verfügt über ein vollständig integriertes digitales Front-End, das einige Schlüsselblöcke unterstützt, darunter DPD (bis zu 400 MHz IBW), eine leistungsstarke dreistufige CFR-Engine, integrierte digitale Abwärtskonvertierung und digitale Aufwärtskonvertierung, die beide bis zu acht Komponententräger unterstützen. Der Baustein eignet sich für solche Einsätze/Anwendungen mit Small Cell Single-Band, Multi-Band, TDD Massive-MIMO und TDD/FDD in Makro-RU-Ausrüstung. Bild9 zeigt ein funktionales Blockdiagramm auf hoher Ebene.

ZIF-basierte Architektur

Die Sende- und Empfangssignalfade des ADRV9040 verwenden eine Zero-IF-Architektur (ZIF), die eine große Bandbreite mit einem für nicht zusammenhängende Mehrträger-RU-Anwendungen geeigneten Dynamikbereich bietet. Die ZIF-Architektur bietet die Vorteile eines geringen Stromverbrauchs sowie einer flexiblen HF-Frequenz und Bandbreite. Diese Architektur bietet Größen-, Gewichts- und Leistungsvorteile gegenüber diskreten Lösungen. Die Architektur ermöglicht es OEMs, die kleins-

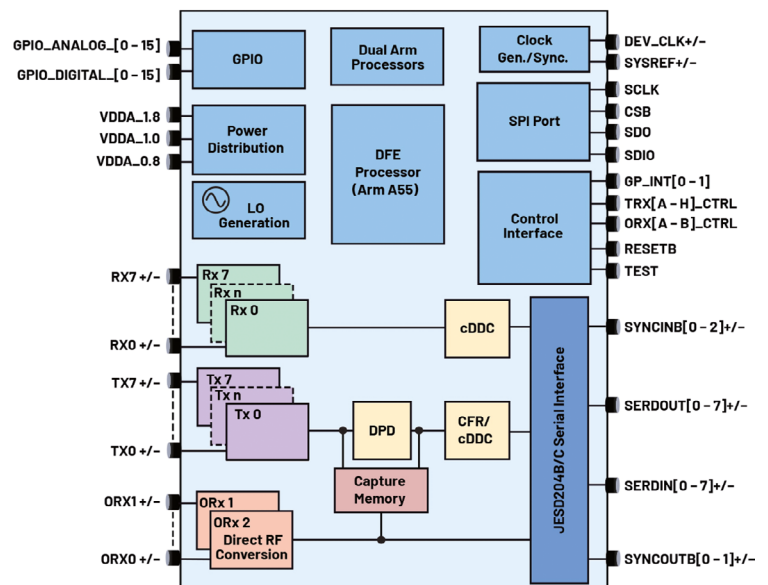


Bild 9: Ein ADRV9040-Blockschaltbild auf hoher Ebene

ten und leichtesten 5G-Massive-MIMO-Funkgeräte zu entwickeln, die 40 % leichter und ~10 % energieeffizienter sind. Die Analyse einer kompletten Kleinsignal-Funkplatine zeigt, dass die ZIF-Architektur erhebliche Kosteneinsparungen (pro 32T32R) bei der RF-BOM im Vergleich zu einfachen abgeleiteten RUs ermöglicht.

Die Zero-IF-Architektur überträgt auch Energie auf der LO-Frequenz. Die Quadratur- und LO-Leckfehler (z.B. sind die Träger nicht auf der LO-Frequenz zentriert) werden aufgrund von Unterschieden in den IQ-Misch- und Datenpfaden eingeführt (z.B. haben zwei Mischer nie wirklich die gleichen Eigenschaften). Dies ist ein noch größeres Problem bei Anwendungen mit mehreren Trägern und asymmetrischen Trägern. Um diese unerwünschte Emission zu reduzieren, verfügt der Transceiver über einen Algorithmus zur Korrektur des Tx-LO-Lecks, der sowohl für die Anfangskalibrierung als auch für die Nachführungskalibrierung im laufenden Betrieb verwendet wird.

CFR-Block

Der CFR-Block des Bausteins hilft dabei, die PAs linear zu halten. Diese CFR-Engine mit geringer Leistung hilft den Entwicklern, das Verhältnis von Spitzenwert zu Mittelwert des Eingangssignals zu reduzieren, was effizientere Sendeleitungen ermöglicht. Wie bereits erwähnt, ist das spektrale Nachwachsen der korrigierten Spitzen bei CFR immer ein Problem. Der ADRV9040 spielt eine wichtige Rolle bei der Optimierung des Algorithmus, um sicherzustellen, dass die Auswirkungen des CFR-Blocks mit den Systemspezifikationen des OEMs übereinstimmen. Der ideale CFR-Block hat eine sehr niedrige Latenzzeit und keine verpassten Spitzenwerte.

Bild 10 zeigt die Ergebnisse einer PAPR-Reduzierung bei einem 5G New Radio (NR)-Signal. Das Diagramm vor der CFR (links) zeigt eine Spitzen-

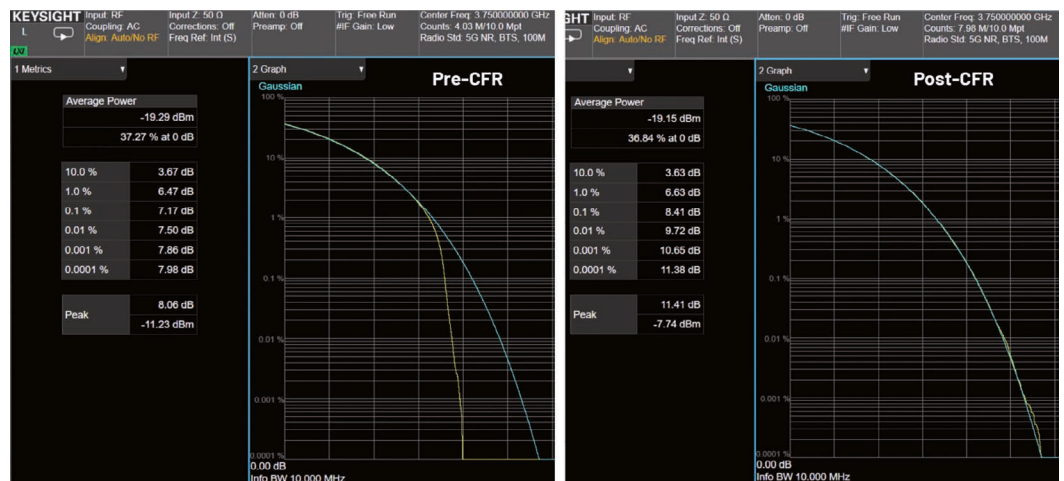


Bild 10: 5G NR-Signal vor und nach Anwendung von CFR

kompromission, die dadurch angezeigt wird, dass die CCDF des Ausgangssignals (gelbe Kurve) mit zunehmender PAPR steiler abfällt als die CCDF des Eingangssignals, die Gaußsche Referenzkurve (grüne Kurve). Auf der anderen Seite zeigt das Post-CFR-Diagramm (rechts) ein deutlich verbessertes 5G NR-Signal, dessen CCDF der des Gauß-Signals ähnelt.

Diese CFR wird mit einer Variation einer Impulsauslöschungstechnik implementiert, bei der ein vorberechneter Impuls von den erkannten Spitzenwerten subtrahiert wird, um das Signal in den linearen Bereich des PA zu bringen. Der CFR-Block besteht aus drei Kopien von CFR-Engines, von denen jede eine Erkennungsschwelle zur Erkennung der Spitzen und eine Korrekturschwelle verwendet, auf die die erkannten Spitzen abgeschwächt werden. Diese spektral geformten Korrekturimpulse werden vom Datenstrom subtrahiert, um das Signal in den linearen Bereich des PA zu bringen. Der Korrekturimpuls muss spektral geformt sein, um die Rauschverluste in benachbarte Bänder zu kontrollieren. Der ADRV9040 kann zwei Korrekturimpulse, die zwei verschiedenen Trägerkonfigurationen entsprechen, gleichzeitig auf dem Gerät speichern. Diese Korrekturimpulse können vorgeladen werden und ermöglichen es dem Gerät, on-the-fly zwischen

zwei Trägerkonfigurationen zu wechseln.

DPD-Block

Der Baustein enthält eine vollständig integrierte DPD-Engine mit geringer Leistung für den Einsatz in HF-Signalketten-Linearisierungsanwendungen. Diese Engine bietet eine branchenführende DPD-Leistung. Wie bereits erwähnt, ist die Verwendung der Volterra-Reihe der allgemeinste Weg, um Speicher einzuführen. Diese DPD-Engine basiert auf einer verkürzten Implementierung des verallgemeinerten Speicherpolynoms (GMP) und der dynamischen Abweichungsreduktion (DDR), die verallgemeinerte Teilmengen der bekannten Volterra-Reihe sind. Die verallgemeinerten Speicherpolynome, die im ADRV9040 verwendet werden, werden im Benutzerhandbuch des Transceivers und in anderen Design-Kollateralen ausführlich beschrieben. Ein inverses PA-Modell (PA-1) wird über

die DPD-Aktuator-Hardware auf die interpolierten digitalen Basisband-Samples angewendet. Ein spezieller eingebetteter Arm Cortex A55-Prozessor wird für die Berechnung der GMP-Koeffizienten verwendet. Der DPD-Aktor ist ein programmierbarer Polynom-Rechner. Bild 11 zeigt ein PA-1-Modell, das auf die interpolierten digitalen Basisband-Samples angewendet wird.

Dieser DPD-Algorithmus unterstützt sowohl indirekte Lern- als auch direkte Lern-DPD-Mechanismen zur Extraktion von DPD-Modellkoeffizienten. Beim indirekten Lernen werden die beobachteten Empfängerdaten als Referenz für die Vorhersage der Eingangsabstastwerte verwendet, die der Referenz entsprechen, während beim direkten Lernen das Pre-DPD-Aktor-Sendesignal als Referenz verwendet wird, um den Fehler zwischen den beobachteten und den Referenzdaten zu minimieren. Der Unterschied zwischen

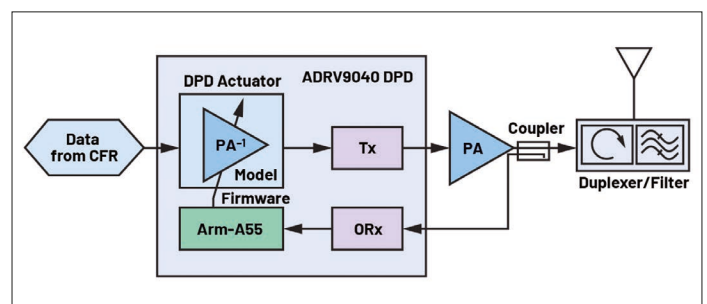


Bild 11: Ein inverses PA-Modell wird auf die interpolierten digitalen Basisbandabstastwerte angewandt

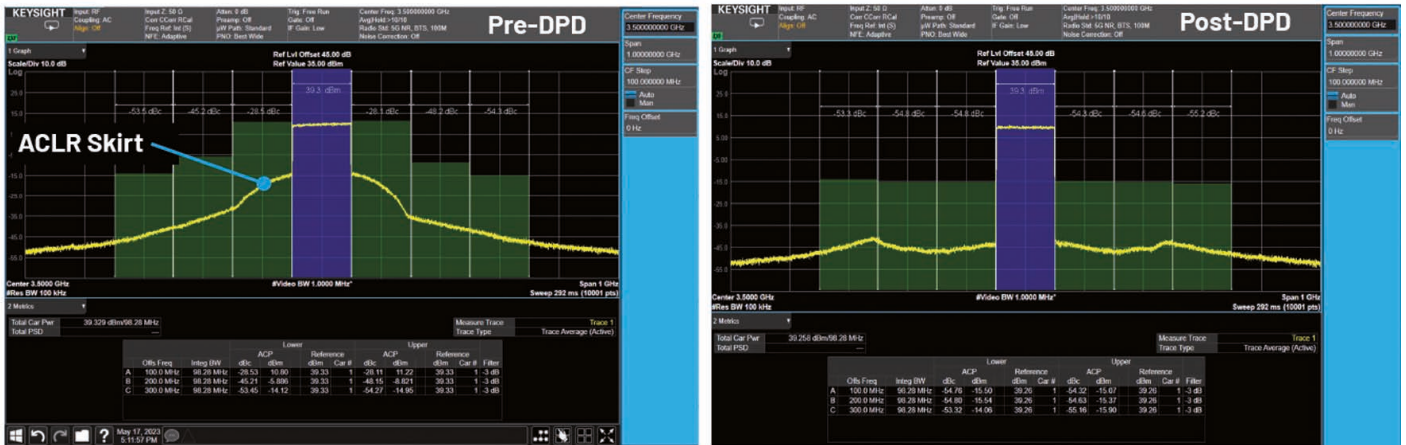


Bild 12: Leistungsspektraldichte, die die Verbesserung der ACLR nach DPD zeigt

den beiden Verfahren besteht darin, dass der indirekte Lernalgorithmus zeitsparend ist, während der direkte Lernalgorithmus genauer ist, da er eine längere Zeit zur Konvergenz benötigt. In einer Systemanwendung, in der DPD nicht erforderlich ist, bietet der ADRV9040 einen Mechanismus zur Umgehung der Vorverzerrung durch GPIO-Steuerung. Bild 12 zeigt die Verbesserung der spektralen Leistungsdichte in der ACLR nach Anwendung von DPD für ein 20-MHz-LTE-Signal. Die Beeinträchtigungen, die den ACLR-Sockel auf der linken Seite verursachten, wurden durch die Anwendung von DPD auf der rechten Seite beseitigt.

Überlegungen zum Energie-Management

Das Design des ADRV9040 mit den richtigen Leistungslösungen ist von entscheidender Bedeutung, um Probleme wie die schlechte EVM des ersten Symbols (z.B. zyklisches Präfix) an den TDD-Empfangs-/Sendeübergängen zu vermeiden und eine optimale HF-Leistung zu erzielen. Die Silent Switcher-Technologie von ADI bietet mehrere Unterscheidungsmerkmale, darunter eine hohe Schaltfrequenz, ein extrem niedriges Effektivrauschen und ein Punktrauschen. Ein Silent Switcher 3-Leistungs-Design erfordert weniger Komponenten, einen kleinen PCB-Footprint (Größe) und vor allem eine schnellere und gut kontrollierte

Einschwingzeit, was zu einer extrem niedrigen EMI-Emission führt. Bild 13 (Aufmacherbild am Anfang des Artikels) zeigt ein High-Level-Blockdiagramm einer Makro-Basisstation mit einigen vorgeschlagenen Leistungs-ICs, LT8627SP und ADM7172 zur Versorgung der ADRV9040-Spannungsschienen.

Evaluierungsplattformen ADS10-V1EBZ und ADRV904X-MB/PCBZ

Die ADRV9040-Evaluierungsplattform erleichtert die Einrichtung eines einfachen und unkomplizierten Rahmens für das Testen des Benutzerdesigns. Bild 14 zeigt das ADS10-V1EBZ (Motherboard) und das ADRV904X-MB/PCBZ-Evaluierungsboard. Bitte wenden Sie sich an Ihren ADI-Vertriebsmitarbeiter, um Ihr Evaluierungssystem zu bestellen. Der HF-Designer muss seine Geräte nur an die Evaluierungsplattform anschließen, um die verschiedenen Diagramme zu erfassen, während der ADRV9040 die schwere Arbeit übernimmt, die optimale Leistungskonfiguration durch Schreiben von Datenbytes in seine Register zu finden.

Schlussfolgerung

Die Fortschritte in der Telekommunikationstechnologie, die eine Kommunikation mit höheren Datenraten und eine verbesserte spektrale Effizienz durch Trägeraggregation ermöglichen, tragen ebenfalls zu einem

Anstieg der PAPR bei. Durch die Integration von CFR- und DPD-Funktionen in den fachmännisch entwickelten ADRV9040-Transceiver wird der Funkdesignprozess jedoch vereinfacht, was im Vergleich zu herkömmlichen FPGA-basierten Implementierungen zu geringeren Kosten für die HF-Stückliste, die Größe der Leiterplatte, das Gewicht und den Stromverbrauch führt. Angesichts der großen Anzahl von drahtlosen Basisstationen und dezentralen Einheiten, die weltweit im Einsatz sind, kann eine verbesserte Effizienz der Leistungsverstärker die Energie- und Kühlungskosten für Dienstleister erheblich senken. Dies beschleunigt nicht nur die Markteinführung, sondern trägt auch zur Senkung der Betriebskosten bei und gewährleistet die Einhaltung von Vorschriften beim Einsatz in Netzwerken.

Referenzen

- [1] "1" ADRV9040: 8T8R SoC with DFE, 400 MHz iBW RF Transceiver." Analog Devices, Inc., 2021.
- [2] Claire Masterson. "Digital Predistortion for RF Communications: From Equations to Implementation." Analog Dialogue, Vol. 56, No. 2, April 2022.

Wer schreibt:

Hamed M. Sanogo ist ein Endmarktspezialist für Cloud und Kommunikation in der Global Applications Group von Ana-

log Devices. Hamed schloss sein Studium an der University of Michigan-Dearborn mit einem M.S.E.E.-Abschluss ab und erwarb später einen M.B.A.-Abschluss an der University of Dallas. Nach seinem Abschluss arbeitete Hamed als leitender Entwicklungsingenieur bei General Motors und als leitender Elektroingenieur und leitender Designer für Node-B- und RRU-Basisbandkarten bei Motorola Solutions, bevor er zu ADI kam. In den letzten 18 Jahren war Hamed in verschiedenen Funktionen tätig, unter anderem als FAE/FAE-Manager und Produktlinienmanager. ◀

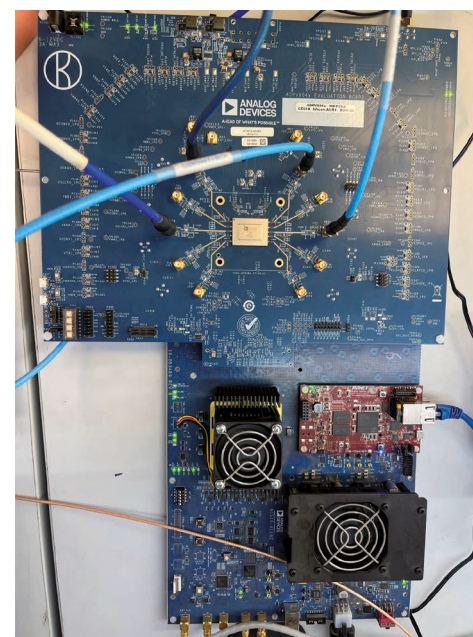


Bild 14: ADS10-V1EBZ (Hauptplatine) und ADRV904X-MB/PCBZ Evaluierungsplatine