HF-Wandler ermöglichen effiziente Multiband-Transceiver für die nächste Generation an Mobilfunk-Basisstationen

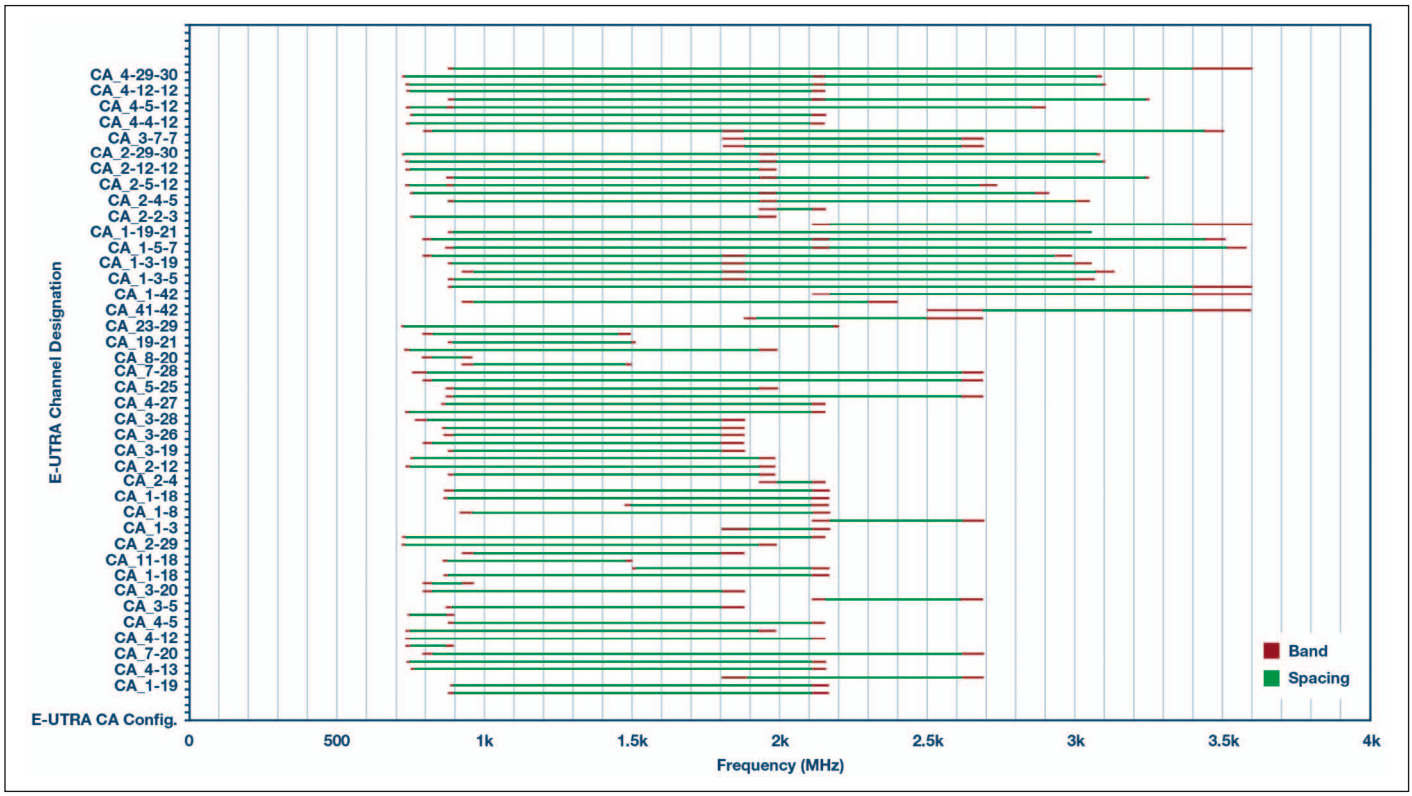

Bild 1: Die Trägeraggregation von nicht zusammenhängendem Spektrum verdeutlicht das Problem des knappen zur Verfügung stehenden Spektrums. Rot ist das lizenzierte Spektrum dargestellt, grün der Interbandabstand

Um den steigenden Bedarf an drahtloser Datenübertragung zu decken, werden moderne Basisstations-Transceiver entwickelt, die mehrere E-UTRA-Bänder sowie Techniken zur Trägeraggregation unterstützen.

John Oates, Systemingenieur
Analog Devices, Inc.
www.analog.com

Diese Multiband-Transceiver verwenden GSPS-RF-ADCs und -DACs (Giga Samples Per Second) der nächsten Generation, die frequenzagile, direkte HF-Signalsynthese und Abtasttechniken ermöglichen.

Um das schmale HF-Funkspektrum gut auszunutzen, wird ausgeklügeltes Digital Signal Processing (DSP) verwendet, um die Datenbits effizient in HF und wieder zurück zu verarbeiten. Dieser Artikel beschreibt beispielhaft einen HF-Sender für eine Multibandapplikation mit entsprechenden DSP-Konfigurationen und geht auf die Abwägung zwischen Leistung und Bandbreite ein.

Einleitung: Zehn Jahre, zehnmal mehr Bänder, hundertfache Datenraten

Es ist nun über zehn Jahre her, seit die Smartphone-Revolution begann, nämlich als Apple 2007 das Original-iPhone auf den Markt brachte. Nach zwei Generationen von Mobilfunkstandards hat sich heute viel verändert. Die Infrastruktur-Basisstationen (eNodeB) des Radio Access Networks (RAN) haben sich auf eigene Art gewandelt, um die Datenflut unserer heutigen vernetzten Welt zu ermöglichen. Die Zahl der zellulären Bänder hat sich verzehnfach, während sich die Abtastraten der Datenwandler um das Hundertfache gesteigert haben. Was bedeutet das für uns?

Multiband-Funk und effiziente Nutzung des Spektrums

Von 2G GSM bis 4G LTE ist die Anzahl der Mobilfunkbänder um das Zehnfache gestiegen – von vier bis über 40. Mit dem Aufkommen von LTE-Netzen haben sich die Anbieter von Basisstationen gezwungen gesehen, weitere Funkkonzepte entwickeln. LTE-advanced erhöhte die Anforderungen an Multiband-Transceiver. Deshalb kam es zur Trägeraggregation, bei der nicht zusammenhängende Frequenzspektren innerhalb desselben Bandes zusammengeführt werden – oder, was noch wichtiger ist, dass die verschiedenen Bänder im Basisbandmodem zu einem einziger Datenstrom zusammengefasst werden.

Das HF-Spektrum ist jedoch begrenzt. Bild 1 zeigt mehrere trägeraggregierte Bandkombinationen, die das Problem des begrenzten Spektrums verdeutlichen. In Grün ist der Interbandabstand und in Rot ist das interessierende Band markiert. Die Informationstheorie sagt aus, dass ein System keine Ressourcen verschwendet, wenn auch das unerwünschte Frequenzspektrum mit umwandelt wird. Mehrband-Transceiver

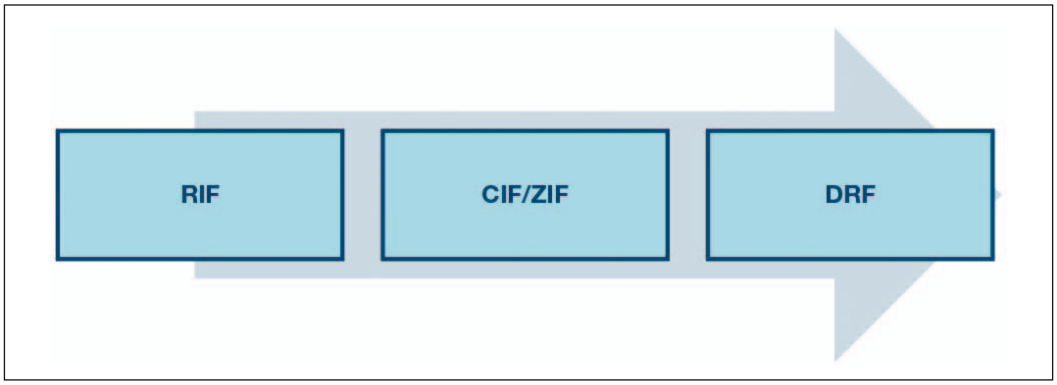

Bild 2: Die Funkarchitektur hat sich weiterentwickelt, um den steigenden Bandbreitenanforderungen gerecht und durch SDR-Techniken agiler zu werden

für die effiziente Umwandlung des knappen Spektrums zwischen der analogen und digitalen Domaine werden erforderlich.

Entwicklung der Basisstationen hin zur HF-Direktabtastung

Um den erhöhten Datendurchsatz von 4G-LTE-Netzen zu ermöglichen, wurde die Transceiver-Architektur der Basisstationen für den Weitverkehr weiterentwickelt. Superheterodyn-, Schmalband- und IF-Abtastt-Tansceiver mit Mischern und Einkanal-Datenwandlern wurden durch I/Q-basierte Architekturen mit doppelter Bandbreite ersetzt, wie z.B. Complex-IF (CIF) und Zero-IF (ZIF). CIF- und ZIF-Transceiver erfordern analoge I/Q-Modulatoren/Demodulatoren mit Zwei- und Vierkanal-Datenwandlern. Allerdings haben diese CIF/ZIF-Transceiver mit ihrer größeren Bandbreite auch eine LO-Abstrahlung, und die Spiegelfrequenzen müssen durch Korrektur unterdrückt werden.

Bild 2 skizziert: Die Funkarchitektur hat sich weiterentwickelt, um einerseits den steigenden Bandbreitenanforderungen gerecht und andererseits durch SDR-Techniken agiler zu werden.

Erfreulicherweise sind die Abtastraten der Datenwandler ebenfalls enorm, nämlich von 100 MSPS im Jahr 2007 auf 10 GSPS+ im Jahr 2017 gestiegen. Diese Steigerung der Abtastrate hat zu GSPS-HF-Wandlern mit sehr großen Bandbreiten geführt, sodass frequenzagile, softwaredefinierte Transceiver endlich Realität wurden.

Der heilige Gral der Sub-6-GHz-Radio-BTS-Architektur war lange die direkte HF-Abtastung und -Synthese. Direkte HF-Architekturen erübrigen die analoge Frequenzumsetzung im Mischer, in I/Q-Modulatoren und I/Q-Demodulatoren, die ihrerseits die Quelle vieler unerwünschter Störsignale sind. Stattdessen verfügt der Datenwandler über eine direkte Schnittstelle zu hohen Eingangsfrequenzen, und jede Mischung kann digital über integrierte digitale Up/Down-Wandler (DUCs/DDCs) erfolgen.

Die Multiband-Effizienzsteigerung erfolgt in Form eines hochentwickelten DSPs, der in den HF-Wandlern von ADI enthalten ist und die digitale Kanalbildung nur in den gewünschten Frequenzbändern ermöglicht sowie gleichzeitig den Zugriff auf die gesamte HF-Bandbreite. Mit parallelen DUCs oder DDCs,

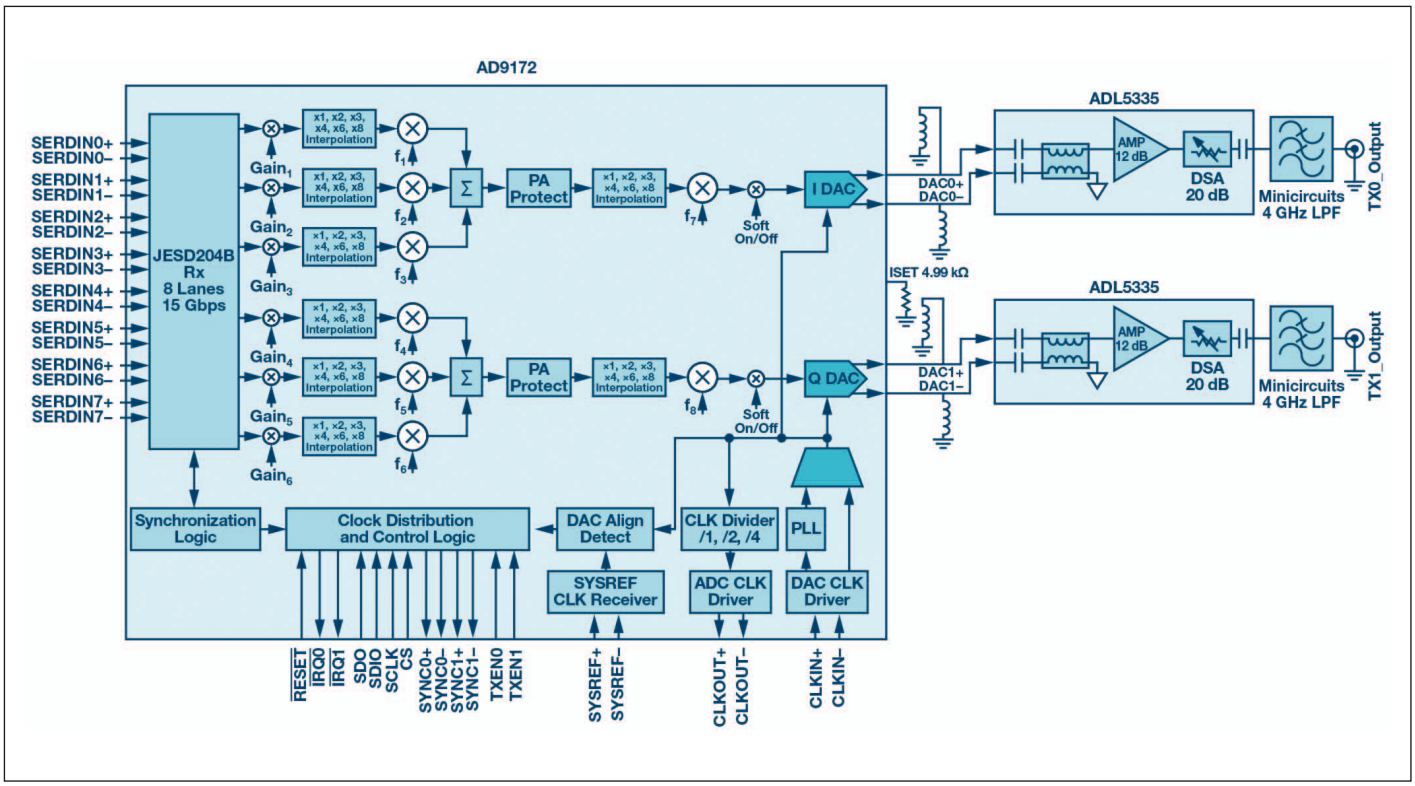

Bild 3: Direkter HF-Sender. HF-DACS wie der AD9172 beinhalten hochentwickelte DSP-Blöcke mit parallelen, digitalen Upconverting-Kanälen für eine effiziente Multibandübertragung

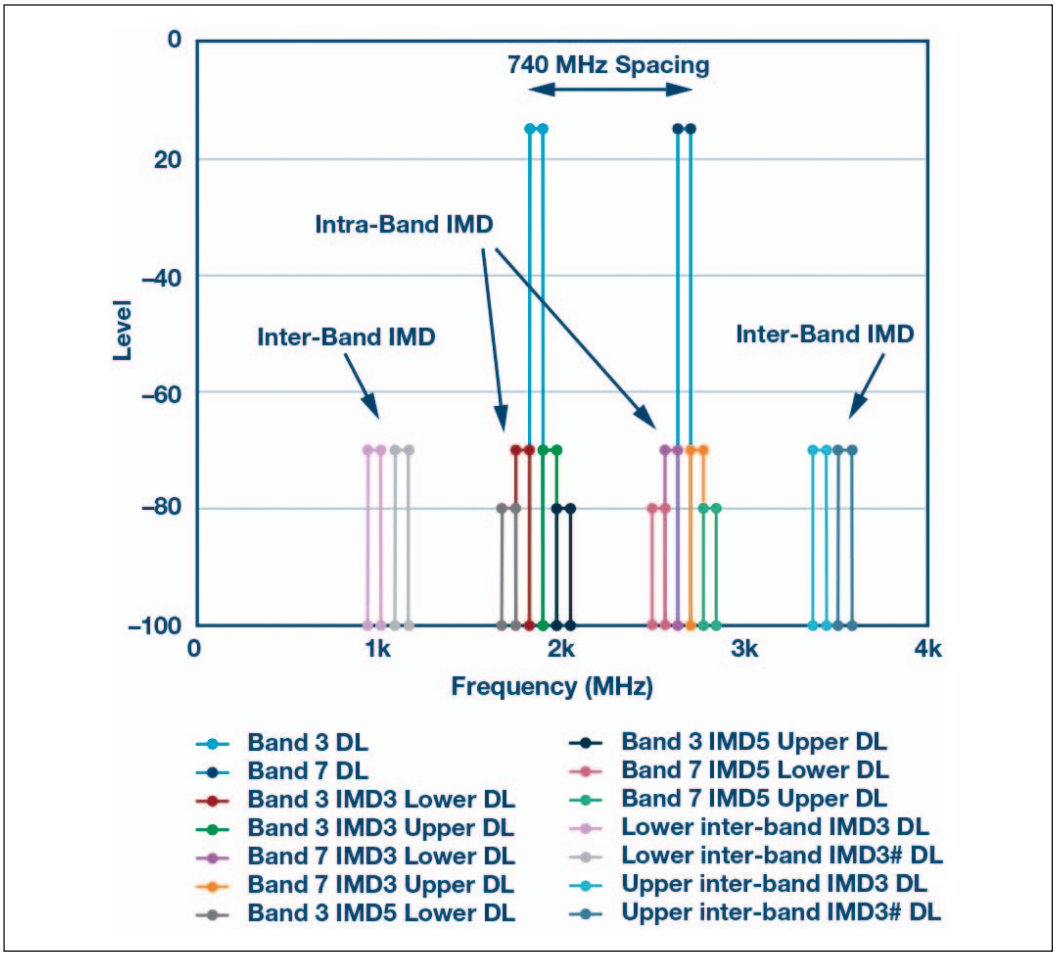

Bild 4: Dualband-Szenario: Band 3 (1805...1880 MHz) und Band 7 (2620...2690 MHz)

die interpolierende/dezimierende Up/Down-Sampler, Halbbandfilter und numerisch gesteuerte Oszillatoren (NCOs) kombinieren, können die interessierenden Bänder vor der Umwandlung zwischen analogen und digitalen Domänen digital konstruiert/dekonstruiert werden.

Die parallele digitale Auf-/Abwärtswandler-Architektur ermöglicht es, mehrere Bänder des gewünschten Spektrums (rot in Bild 1) in einem Funkkanal unterzubringen und keine wertvollen Wandlungszyklen für die Umwandlung des ungenutztes Interbandspektrums zu verschwenden (grün in Bild 1). Eine effiziente Multiband-Kanalbildung bewirkt eine Senkung der erforderlichen Abtastraten der Datenwandler sowie der Anzahl der seriellen Kanäle, die für den Transport über den Datenbus JESD204B erforderlich sind. Die Reduzierung der Systemabtastraten reduziert die Anforderungen an Kosten, Leistung und am Wärmemanagement des Basisbandprozessors und spart Investitions- und Betriebskosten des gesamten Basisstationssystems. Wahr bleibt dabei auch die Aussage, dass die Implementierung von Kanalisierungs-DSP in einem hochoptimierten CMOS-ASIC-Prozess weitaus energieeffizienter ist als die Implementierung in einem generellen FPGA – auch wenn die FPGAs mit kleineren Geometrien angeboten werden.

Direkter HF-Sender mit DPD-Empfänger

Ein Beispiel: Mit dem HF DAC ist es gelungen, den IF DAC in den Multiband-BTS-Transceivern der nächsten Generation zu ersetzen. Bild 3 zeigt ein Beispiel für einen direkten HF-Sender mit dem16-Bit/12-GSPS-RF-DAC AD9172, der die Triband-Kanalbildung mit drei parallelen DUCs unterstützt und eine flexible Platzierung von Subträgern über 1,2 GHz Bandbreite ermöglicht. Auf den HF-DAC folgend, bietet der ADL5335 Tx einen VGA mit 12 dB Verstärkung und 31,5 dB Abschwächungsbereich bis zu 4 GHz. Der Ausgang dieses DRF-Senders kann dann je nach Ausgangsleistungsbedarf des eNodeB einen Leistungsverstärker der Wahl ansteuern.

Betrachten wir nun das in Bild 4 dargestellte Szenario für Band 3 und 7. Für die direkte Umwandlung des Datenstroms in HF können zwei verschiedene Ansätze verwendet werden. Der erste Ansatz (ein Breitbandansatz) würde die Bänder ohne Kanalisierung synthetisieren und eine Datenrate von 1228,8 MHz erfordern. 80% dieser Bandbreite ergeben eine DPD (Digitale Verzerrung) synthetisierte Bandbreite von 983,04 MHz, die ausreicht, um beide Bänder und deren 740 MHz Interbandabstand zu übertragen. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in DPD-Systemen, die nicht nur eine Vorverzerrung der intrabandigen IMDs jedes einzelnen Trägers ermöglichen, sondern auch andere unerwünschte nichtlineare Emissionen zwischen den gewünschten Bändern unterdrücken.

Der zweite Ansatz besteht darin, kanalisierte Versionen dieser Bänder zu synthetisieren. Da jedes Band nur 60 bzw. 70 MHz breit ist und die Betreiber nur über Lizenzen für eine Teilmenge dieser Bandbreite verfügen, ist es nicht notwendig, alles zu übertragen und somit hohe Datenraten zu erzeugen. Stattdessen sollte man eine angemessenere, niedrigere Datenrate von 153,6 MHz verwenden, von der 80% zu einer DPD-Bandbreite von 122,88 MHz führen. Wenn ein Betreiber Lizenzen für 20 MHz in jedem Band besitzt, gibt es noch genügend DPD-Bandbreite für die Korrektur von Interband-IMDs 5. Ordnung für jedes Band. Dieser Mode kann bis zu 250 mW Leistung im DAC gegenüber dem oben beschriebenen Breitbandansatz und viel mehr Energie/Wärme im Basisbandprozessor einsparen sowie die Anzahl der seriellen Pfade reduzieren, was kleinere und kostengünstigere FPGA/ASIC-Implementierungen ermöglicht.

Bild 5 skizziert die LTE-Übertragung von Band 3 und 7 durch einen direkten HF-Sender unter Verwendung des RF-DAC AD9172.

Observationsempfänger für DPD verwenden auch DRF-Architekturen (Direct RF). Der 14-Bit/3-GSPS-RF-ADC AD9208 unterstützt durch parallele DDCs auch die Multiband-Kanalbildung. Die Kombination von HF-DACs und HF-ADCs im DPD-Subsystem des Senders hat viele Vorteile, darunter gemeinsame Wandlertakte, korrelierte Phasenrausch-Unterdrückung und eine allgemeine Vereinfachung des Systems. Die Vereinfachung ergibt sich durch den Einsatz des RF-DACs AD9172, der mit seiner integrierten PLL aus einem