

# 16-nm-Transceiver-Familie für das 6-GHz-Band

Durch die kürzlich erfolgte Zuweisung des 6-GHz-Frequenzbands für drahtlose Kommunikationssysteme eröffnen sich neue Möglichkeiten für die Entwicklung innovativer Anwendungen, die hohe Datenraten und niedrige Latenzzeiten erfordern.

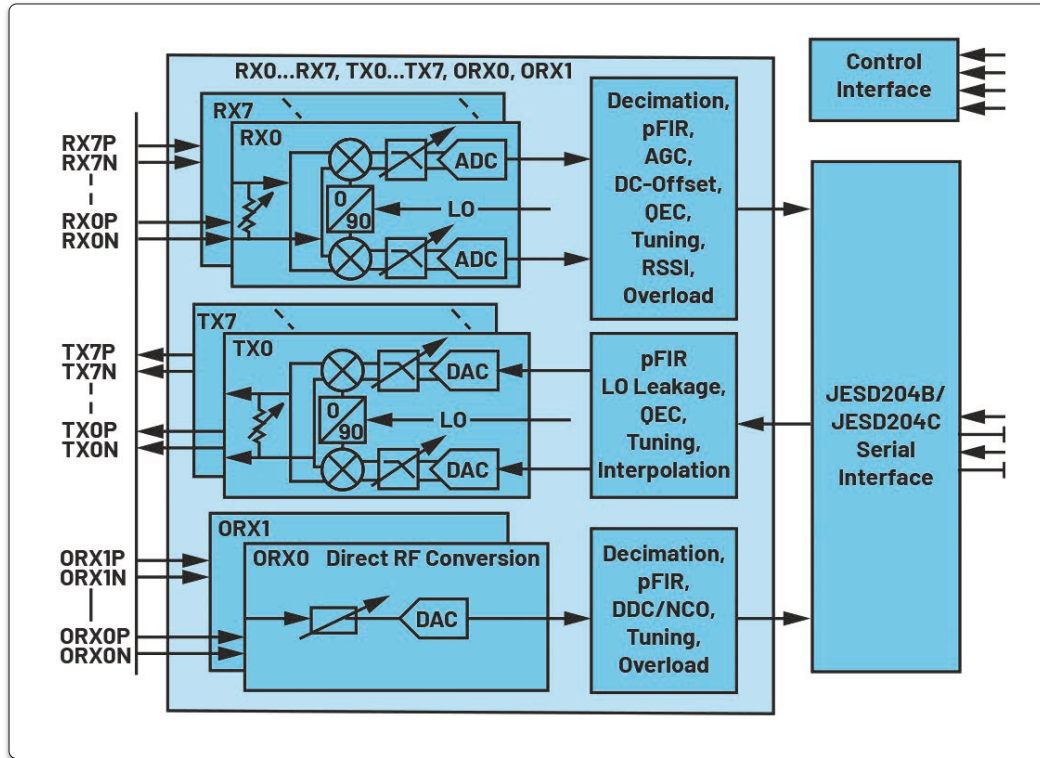


Bild 1: Blockschaltung der 16-nm-Transceiver

Die hochintegrierten 16-nm-Transceiver von Analog Devices (ADI) bieten trotz ihres geringen Energiebedarfs eine hohe Performance und eignen sich somit ideal für Anwendungen im neuen Frequenzband. Der Artikel beschreibt die Besonderheiten des 6-GHz-Frequenzbands und

erläutert die Vorteile der Zero-IF-Architektur, die in ADIs Transceiver-Familie eingesetzt wird. Darüber hinaus geht der Artikel auf Merkmale der Transceiver ein und beleuchtet deren Anwendung in unterschiedlichen Szenarien.

## Einführung

Angesichts der zunehmenden Dynamik im Bereich der drahtlosen Kommunikationssysteme sucht die Branche kontinuierlich nach neuen Technologien und Frequenzbereichen. Für die Mobilfunkbranche ist die Aufnahme des 6-GHz-Frequenzbandes in den Frequenzbereich 1 (FR1) durch die Standardisierungsorganisation 3GPP eine erfreuliche Entwicklung. Durch die Erweiterung des ursprünglichen Frequenzbereichs FR1 sowohl in die niedrigen als auch in die höheren Frequenzen – von 450 MHz bis 6 GHz auf 410 MHz bis 7,125 GHz – erhält die Mobilfunkbranche Zugang zu einer erheblichen Menge an verfügbaren Frequenzen, was neue Möglichkeiten für Wachstum und Innovation schafft.

Verglichen mit dem traditionellen FR1-Frequenzband stellt das neue 6-GHz-Band wesentlich größere Bandbreiten zur Verfügung. Die spezifischen Bandbreiten bzw. Frequenznutzungsklassen sind: n96 mit 1,2 GHz (von 5925 bis 7125 MHz), n102 mit 500 MHz (von 5925 bis 6425 MHz) und n104 mit 700 MHz (von 6425 bis 7125 MHz).



Autor:  
Howie Jing  
Senior Manager  
Analog Devices (ADI)  
www.analog.com

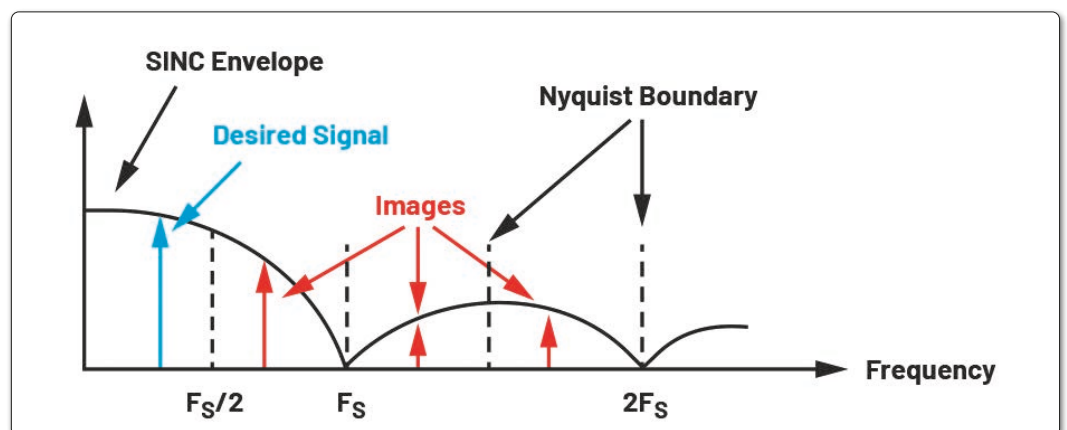
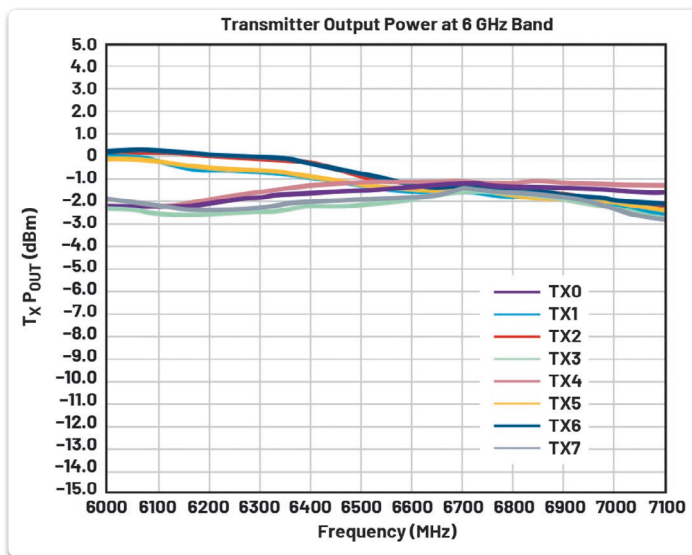
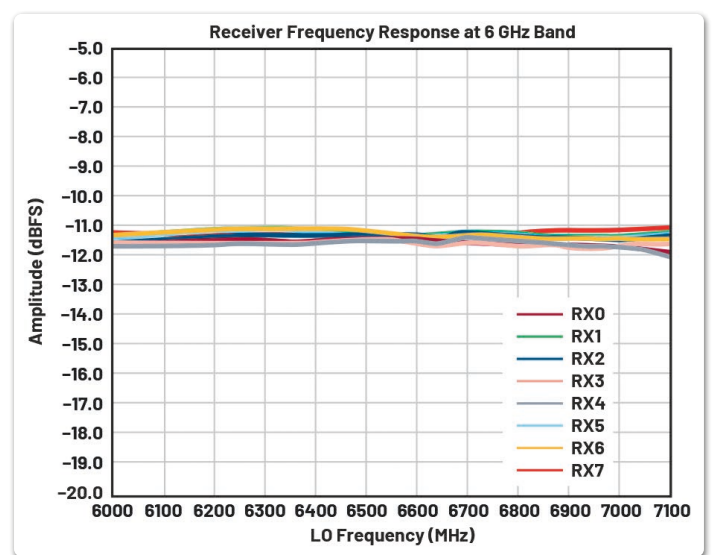


Bild 2: SINC-Antwort des DAC und unerwünschte Frequenzen (Images)



**Bild 3: Transmitter-Ausgangsleistung und flacher Frequenzgang (Flatness) im 6-GHz-Band**



**Bild 4: Frequenzgang des Empfängers im 6-GHz-Band**

Die Bereitstellung eines Frequenzspektrums, das hohe Datenraten, eine verbesserte Energieeffizienz im Netzwerk und vorteilhaftere Ausbreitungseigenschaften gegenüber FR2 ermöglicht, macht das neue 6-GHz-Band zu einer wichtigen Basis für die drahtlose Kommunikation zwischen Geräten.

Im Jahr 2020 hat die US-amerikanische Regulierungsbehörde FCC (Federal Communications Commission) das 6-GHz-Band für unlizenzierte WLAN-Nutzung freigegeben, was es in diesem Marktumfeld besonders attraktiv und wettbewerbsfähig macht.

## Eigenschaften und Vorteile der 16-nm-Transceiver-Familie von ADI

Die hochintegrierten Transceiver gibt es in den Konfigurationen 8T8R (acht Sender und acht Empfänger) und 4T4R (vier Sender und vier Empfänger). Sie enthalten umfangreiche Funktionen im digitalen Frontend, darunter digitale Vorverzerrung (Digital Predistortion, DPD), Spitzenfaktorreduktion (Crest Factor Reduction, CFR) sowie CDDC (Channel Digital Down Converter) und CDUC (Channel Digital Up Converter), die Signale für die Übertragung in niedrigere bzw. höhere Frequenzen wandeln. Des Weiteren enthalten

die Transceiver energiesparende Funktionen.

## Architektur

Die 16-nm-Transceiver-Serie von ADI (Bild 1) verfügt über jeweils acht differentielle Sendekanäle (Tx0-Tx7) und Empfangskanäle (Rx0-Rx7) sowie zwei differentielle Beobachtungsempfänger (ORx0-ORx1), welche die empfangenen Signale überwachen und analysieren. Der einstellbare Frequenzbereich erstreckt sich von 400 bis 7,125 GHz und wird mithilfe von zwei Hochfrequenzsynthesizern als lokale Oszillatoren (LO) abgedeckt. Die maximale einstellbare Bandbreite beträgt 600 MHz. Für die Anbindung an den Basisbandprozessor steht eine Hochgeschwindigkeits-Schnittstelle gemäß JESD204B/JESD204C zur Verfügung.

## Transmitter

Es kommt eine Zero-IF-Architektur zum Einsatz. Die In-Phase- und Quadratur-Basisbandsignale (I/Q) aus den D/A-Wandlern (DACs) werden durch Tiefpassfilter (LPFs) im Basisband rekonstruiert und geglättet. Anschließend werden sie von einem analogen Modulator und einem lokalen Oszillator (LO) auf eine hohe Frequenz (HF) gebracht. Der Zero-IF-Transmitter erreicht eine höhere Line-

arität und ein besseres Rauschverhalten bei vergleichsweise geringerer Leistungsaufnahme als ein HF-Sampling-Wandler.

Die Übertragungsfunktion des DAC entspricht allgemein dem Verlauf von  $\sin(x)/x$ , wodurch der Frequenzgang nicht linear ist (Bild 2). Das analoge Ausgangssignal wird bei höheren Frequenzen abgeschwächt. Während des Abtastvorgangs entstehen unerwünschte Frequenzen (Images), die herausgefiltert werden müssen. Sonst können sie das Funkspektrum beeinträchtigen und gegen die Emissionsvorgaben von 3GPP und der FCC verstoßen.

Daher liegt die maximal nutzbare Ausgangsfrequenz eines DAC typischerweise bei 40% der Abtastfrequenz. Damit die HF-Abtastung im 6-GHz-Band (bis zu 7,125 GHz) effektiv funktioniert, muss die Abtastrate des DACs über 18 GHz liegen, was einen erheblichen Energieverbrauch zur Folge hat. An dieser Stelle zeigt sich der Vorteil eines Zero-IF-Transmitters. Da er lediglich das Basisband-I/Q-Signal digitalisieren muss, genügt eine DAC-Abtastrate von 3 GHz, um das 6-GHz-Band abzudecken.

Dies sorgt für eine gleichmäßigere Ausgangsleistung über das gesamte 6-GHz-Band (Bild 3) und eine niedrigere spektrale

Rauschdichte (NSD) bei vergleichsweise niedrigem Energieverbrauch. Typischerweise verbrauchen HF-Sampling-Wandler, selbst bei denselben Verfahren, etwa 125% mehr Energie als Basisband-I/Q-Wandler, um für eine typische Anwendung mit nur einem einzelnen Frequenzband (Single Band) ein vergleichbares Rauschverhalten zu erreichen.

## Empfänger

Im Empfangspfad wird das HF-Eingangssignal mithilfe eines analogen Demodulators und eines lokalen Oszillators (LO) auf ein Basisband-I/Q-Signal heruntergemischt. Dieses wird anschließend von einem Continuous Time Delta-Sigma-ADC (CTSD-Wandler) digitalisiert, der speziell für die Verarbeitung von Basisbandsignalen ausgelegt ist.

Der CTSD-Wandler verfügt über eine integrierte Anti-Aliasing-Filterung, die die Anforderungen an externe Filter im Vergleich zu traditionellen Abtastverfahren erheblich verringert. Am HF-Eingang sorgt die Breitbandanpassung für einen gleichmäßigen Frequenzgang über das gesamte 6-GHz-Band (Bild 4).

Der Basisbandverstärker kann in einer klassischen Topologie mit Rückkopplungsschaltungen ausgeführt sein, um eine hohe

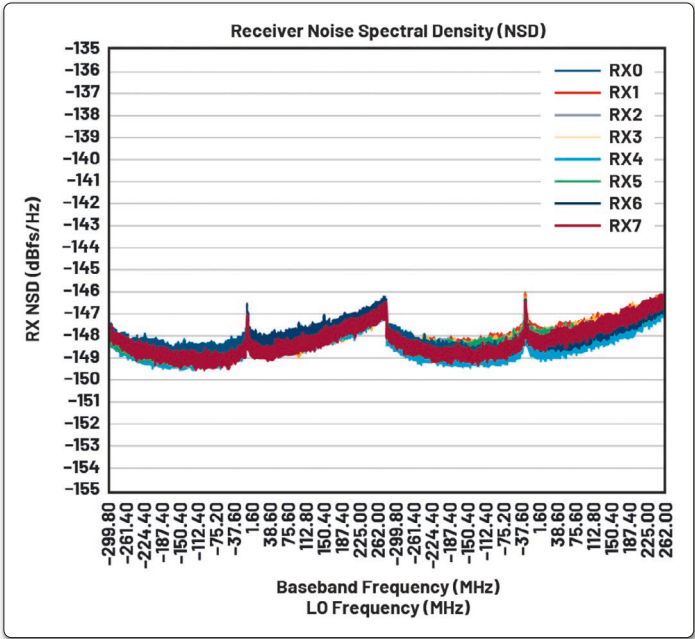


Bild 5: Spektrale Rauschdichte (NSD) des Empfängers

Linearität und ein gutes Rauschverhalten zu erreichen. HF-Sampling-Empfänger hingegen erfordern zusätzliche, aufwendige Filtermaßnahmen im HF-Bereich, was zu höheren Kosten führt.

Für die Abtastung des 6-GHz-Bands benötigt der HF-Sampling-ADC eine Abtastrate von 8 GSample/s, um das gewünschte Signal aus der zweiten Nyquist-Zone zu erfassen. Ohne geeignete Filtermaßnahmen lassen sich unerwünschte Frequenzanteile (Aliasing-Produkte) dabei nicht ausreichend unterdrücken, was die Signalqualität beeinträchtigen kann.

Alternativ kann mit einer Abtastfrequenz von über 15 GSample/s gearbeitet werden, um die Anforderungen an die Anti-Aliasing-Filterung zu verringern. Dieser Ansatz führt jedoch im Vergleich zum Basisband-I/Q-Sampling des Zero-IF-Senders zu einem erheblich höheren Energieverbrauch. Im Gegensatz dazu benötigt die Basisband-I/Q-Abtastung des Zero-IF-Senders nur einen niedrigen I/Q-Abtasttakt von etwa 3 GSample/s, um eine ausreichende Performance zu erzielen.

Zusätzlich ist die spektrale Rauschdichte (NSD) des Zero-IF-Empfängers im Allgemeinen unabhängig vom Frequenzband.

Wie Bild 5 zeigt, sind die NSD-Werte bei 6300 und 7100 MHz nahezu identisch.

Beobachtungsempfänger

In diesem hochintegrierten Transceiver sind zwei Beobachtungsempfänger als HF-Abtast-Architektur implementiert. Sie dienen der Bereitstellung von Leistungsdaten für den Loopback-Empfänger der digitalen Vorverzerrung (DPD) des Leistungsverstärkers, dem Überwachungspfad für die Ausgangsleistung des Senders sowie dem Abhörempfänger (Sniffing Receiver) zur Analyse des HF-Spektrums, unterstützt durch ein geeignetes Frontend-Design.

Um verschiedene Anwendungen zu ermöglichen, kann der Beobachtungsempfänger so konfiguriert werden, dass er mit vier unterschiedlichen Abtasttaktfrequenzen arbei-

tet. Dies bietet die Flexibilität, zwischen Bandbreite, NSD und Energieverbrauch zu variieren. In Tabelle 1 sind NSD und Leistungsaufnahme bei verschiedenen Abtasttaktfrequenzen zusammengefasst.

Anwendung als drahtloses MIMO-System

ADIs 16-nm-Transceiver haben sich bestens in Sub-6G-MIMO-Systemen etabliert. Millionen Basis-Transceiver-Stationen (BTS), die diese Technologie nutzen, sind erfolgreich in der Praxis im Einsatz. Die Bauteile haben ihre Eignung als zuverlässige Funklösungen im Sub-6G-Frequenzspektrum unter Beweis gestellt. Ab sofort sind die Transceiver in der Lage, die Vorteile der erweiterten FR1-Spezifikation zu nutzen, die für die Performance im 6-GHz-Band optimiert wurden und folgende Vorteile bieten:

- **große Bandbreite:** Bereitstellung einer Momentanbandbreite (Instantaneous Bandwidth, IBW) von 600 MHz beim Sender und Empfänger sowie einer Synthesebandbreite von 800 MHz für die digitale Vorverzerrung (Digital Predistortion, DPD) des Leistungsverstärkers.
- Zwei Beobachtungsempfänger können als Rückkopplungskanal für die digitale Vorverzerrung (DPD) des PAs verwendet werden.
- Die digitale Schnittstelle nach JESD204B/JESD204C ermöglicht Datenübertragungsraten von bis zu 19,66 bzw. 32,44 Gbit/s, um die große Bandbreite abzudecken.

Technologie zur Verringerung der Phasenabweichungen über Kanäle

• Multichip-Synchronisation (MCS)

Bei der Geräteinitialisierung nutzt die MCS-Zustandsmaschine das globale Systemreferenzsignal SYSREF, um die Taktgeber der Datenwandler und anderer Taktgeber im digitalen Datenpfad zurückzusetzen. Dadurch wird die Taktphase mit dem Gerätekontakt DEVCLK synchronisiert, was die Taktsignale, die von der JESD-Schnittstelle ausgegeben werden, mit denen der Datenwandler synchronisiert. Zusätzlich setzt die MCS-Zustandsmaschine die Phase der HF-PLL zurück, um sie mit DEVCLK und den Teilern im Verteilungsweg des lokalen Oszillators abzugleichen. Dies sorgt für eine einheitliche Phasensynchronisation an den HF-Ein- und Ausgängen.

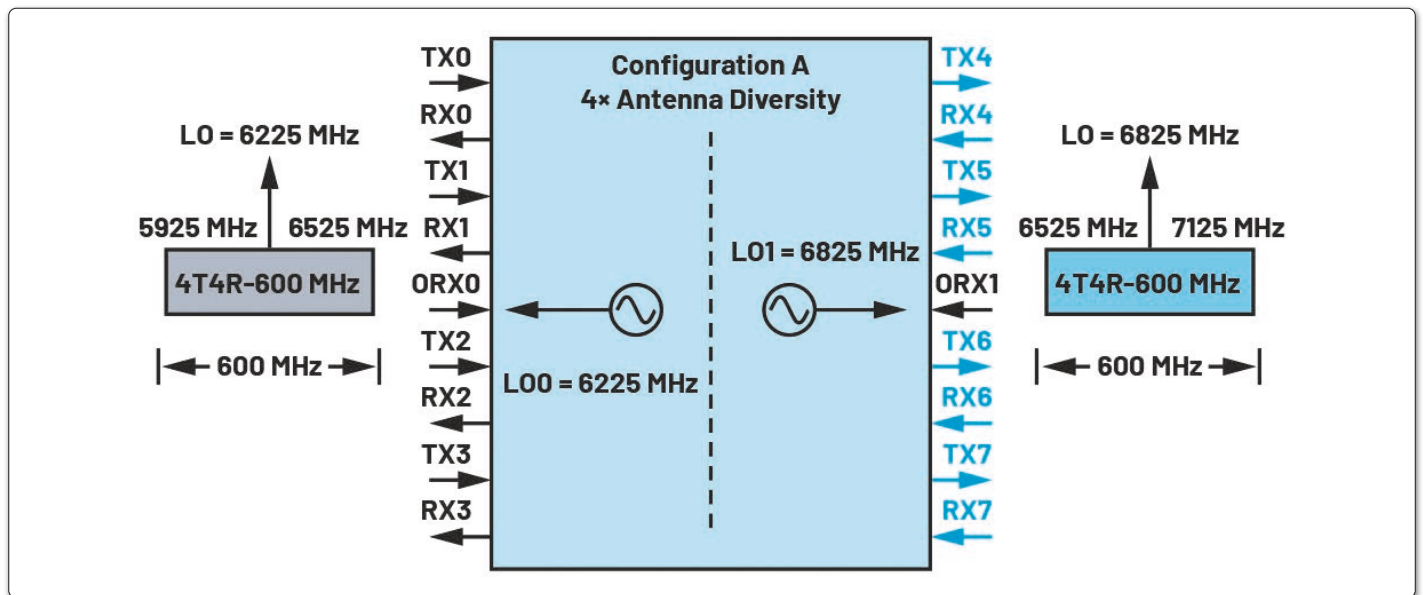
• Phasenkorrektur bei der Senderdämpfung

Änderungen in der Verstärkung oder Dämpfung im Signalweg können zu Phasenabweichungen führen. Um diese Phasenänderungen zu verringern, wurde eine vorcharakterisierte Phasenkorrektur für jeden Dämpfungsindex des Senders implementiert. Dies stellt sicher, dass die Phasenkorrektur immer angewendet wird, wenn das System die Dämpfung anpasst.

Die Implementierung dieser Technologien im Transceiver vereinfacht die Antennenkalibrierung im System, indem die Kanäle in einen konsistenteren Ausgangszustand versetzt werden. Dies führt dazu, dass die

| Abtasttakt   | nutzbare Nyquist-Bandbreite | NSD          | relativer Anstieg der Leistungsaufnahme auf 2949.12 MS/s |
|--------------|-----------------------------|--------------|----------------------------------------------------------|
| 2949.12 M/s  | 1274.56 MHz                 | -144 dBFS/Hz | 0 mW                                                     |
| 3932.16 MS/s | 1766.08 MHz                 | -145 dBFS/Hz | 235 mW                                                   |
| 5898.24 MS/s | 2749.12 MHz                 | -147 dBFS/Hz | 365 mW                                                   |
| 7864.32 MS/s | 3732.16 MHz                 | -148 dBFS/Hz | 780 mW                                                   |

Tabelle 1: NSD und Leistungsaufnahme bei unterschiedlichen Abtasttaktfrequenzen



**Bild 6: Konfiguration A für eine große Bandbreite – 4× Antennendiversität**

| U-NII-Bänder | Frequenzbereich (GHz) | Bandbreite (MHz) |
|--------------|-----------------------|------------------|
| U-NII-5      | 5,925 bis 6,425       | 500              |
| U-NII-6      | 6,425 bis 6,525       | 100              |
| U-NII-7      | 6,525 bis 6,875       | 350              |
| U-NII-8      | 6,875 bis 7,125       | 250              |

**Tabelle 2: Unlizenzierte U-NII-Bänder im 6-GHz-Band**

Antennenkalibrierung im Betrieb seltener durchgeführt werden muss, da die Temperaturempfindlichkeit des HF-PLLs reduziert und die Phasenvariationen bei Verstärkungsänderungen verringert werden.

## Energie sparen durch diskontinuierliche Übertragung (DTX)

Herkömmliche Funkstationen verbrauchen auch dann viel Energie, wenn keine Benutzer in der Funkzelle aktiv sind. Die Transceiver von ADI nutzen DTX, um Komponenten im Senderdatenpfad während der nicht

genutzten Übertragungszeitintervalle (TTIs) abzuschalten.

Mit aktivierter DTX-Funktion schaltet der Transceiver den Leistungsverstärker und andere Senderkomponenten ab, sobald er erkennt, dass keine Daten zur Übertragung vorliegen. Sobald Daten zur Übertragung vorliegen, wird das System schnell wieder aktiv. In Szenarien, die reale Daten von Mobilfunkanbietern nutzen, hat diese Technologie den Energieverbrauch der RU um mehr als 30% verringert, ohne die Qualität des Dienstes (Quality of Service, QoS) zu beeinträchtigen.

## Anwendung für WLAN im unlizenzierten 6-GHz-Band

Nach der Freigabe des 6-GHz-Bands für den unlizenzierten WLAN-Betrieb durch die US-amerikanische FCC im Jahr 2020 unterteilte die WiFi Alliance den Frequenzbereich von 5925 bis 7125 MHz in Kanäle für WiFi 6E3. Dies ergänzt die bestehenden 2,4- und 5-GHz-Bänder um 14 zusätzliche 80-MHz-Kanäle bzw. sieben zusätzliche 160-MHz-Kanäle. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die unlizenzierten Frequenzbereiche im 6-GHz-Band.

Das 6-GHz-Band wird von der 16-nm-Transceiver-Serie von ADI abgedeckt, die eine gute Performance bietet und Anwendern die Möglichkeit gibt, einen Kompromiss zwischen Energieverbrauch und Bandbreite zu finden. Ferner profitieren die Transceiver von den Vorteilen der in den vorherigen Abschnitten erläuterten Zero-IF-Architektur.

## Einchip-Funkmodul für 1,2 GHz mit räumlicher Diversität (4× oder 2× Antennendiversität)

Wie bereits erwähnt, können die Transceiver eine IBW von 600 MHz verarbeiten. Durch den Einsatz von zwei internen lokalen Oszillatoren lässt sich das gesamte 1,2-GHz-Band mit einem einzigen Chip abdecken. Wie in Bild 6 dargestellt, sind die Transceiver so konfiguriert, dass sie Signale von vier Antennen (vier Kanäle) gleichzeitig für das gesamte 1,2-GHz-Band verarbeiten können.

LO0 wird für die Kanäle 0 bis 3 verwendet, um die Bereiche U-NII-5 und U-NII-6 auf allen vier Kanälen abzudecken. LO1 wird auf 6825 MHz eingestellt, um die Kanäle 4 bis 7 für die Bereiche U-NII-7 und U-NII-8 abzudecken. Beide 600-MHz-Bänder können gleichzeitig über die Hochgeschwindigkeitsschnittstelle nach JESD204C zum Basisband übertragen werden. Tabelle 3 zeigen die Konfigurationsdetails.

|           | Anzahl der Antennen | LO              | IBW     | Datenrate   | JESD     | Lane Rate    | Anzahl der Lanes |
|-----------|---------------------|-----------------|---------|-------------|----------|--------------|------------------|
| U-NII-5/6 | 4                   | LO0 = 6.225 MHz | 600 MHz | 983,04 MS/s | JESD204C | 32,44 GBit/s | 4                |
| U-NII-7/8 | 4                   | LO1 = 6.825 MHz | 600 MHz | 983,04 MS/s | JESD204C | 32,44 GBit/s | 4                |

**Tabelle 3: Konfiguration des Transceivers für breite Bandbreite**

## Energieeffiziente Lösung für 1,2 GHz mit Frequenz-Sweeping des LOs

Das 6-GHz-WiFi-Spektrum kann in 59 Kanäle mit jeweils 20 MHz Bandbreite unterteilt werden oder sieben Kanäle mit jeweils 160 MHz Bandbreite nutzen. Anstelle der oben genannten Konfigurationen für eine große Bandbreite können die Transceiver auch für eine schmale Bandbreite und niedrige Leistungsaufnahme konfiguriert werden.

Bei einer Datenrate von 245,76 MSample/s kann die Signalbandbreite 160 MHz betragen, während die JESD-Lanerate auf bis zu 9,8 GBit/s reduziert werden kann. Die HF-LO-Frequenz lässt sich flexibel innerhalb des 1,2-GHz-Bandes konfigurieren, um das gesamte 6-GHz-Band abzudecken. Der Energieverbrauch des Transceivers für die Konfiguration mit geringem Stromverbrauch verringert sich um 20% gegenüber der Konfiguration mit großer Bandbreite. Beispiele für die Konfiguration zeigen Bild 7 und Tabelle 4.

## Breitband-Beobachtungsempfänger für Frequenz-Sweeping

Für diese Anwendung kann der Beobachtungsempfänger auf 7,8 GHz konfiguriert werden, wodurch das 6-GHz-Band für WLAN lückenlos abgedeckt wird. Bild 8 zeigt die Position des 6-GHz-Bandes im oberen Bereich der zweiten Nyquist-Zone. In der ersten Nyquist-Zone kann das umgekehrte 6-GHz-Spektrum mithilfe des numerisch gesteuerten Oszillators (NCO) im Empfangsdatenpfad in das Basisband umgewandelt werden.

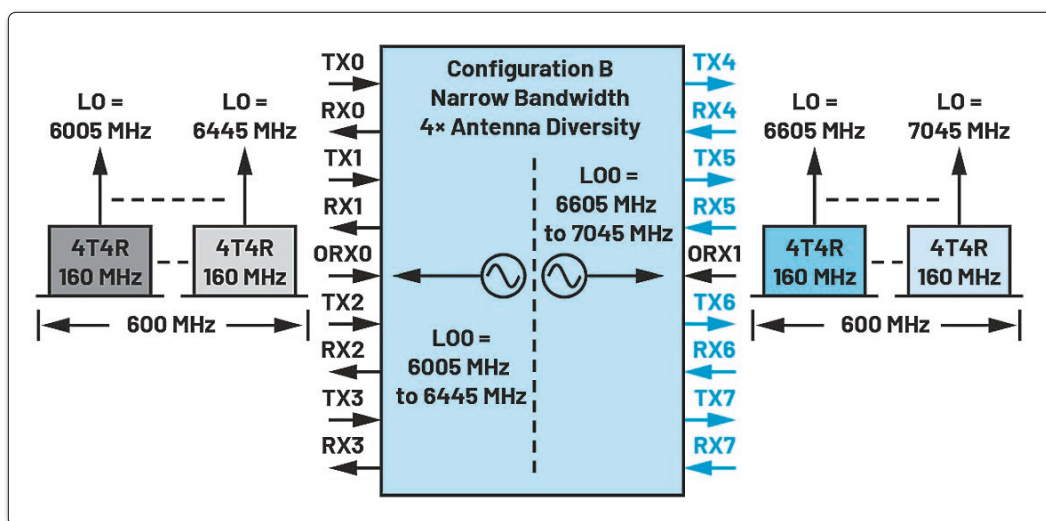


Bild 7: Konfiguration B für eine schmale Bandbreite – 4x Antennendiversität

## Neue Lösungen für neue Anforderungen

Im Bereich der drahtlosen Kommunikation erfordern neue Technologien und das ständig erweiterte Frequenzspektrum kosteneffiziente Lösungen von den Betreibern. Daher gewinnen hochintegrierte und energieeffiziente Lösungen zunehmend an Bedeutung.

Die 16-nm-Transceiver-Familie von ADI integriert acht Kanäle mit dem Hochleistungs-Analog-Frontend sowie digitalen Frontend-Funktionen (DPD, CFR und CDDC/CDUC) auf nur einem Chip. Ferner bildet die Zero-IF-Architektur die Basis für eine energieeffiziente Transceiver-Lösung.

Die integrierte Energiesparfunktion (DTX) trägt dazu bei, den

Energieverbrauch des Systems weiter zu senken, indem sie den Leistungsverstärker (PA) steuert. Darüber hinaus ermöglicht die flexible Konfiguration eine einfache Anpassung an verschiedene Anwendungen, darunter Basisstationen für den Mobilfunk (BTS) und WLAN-Systeme.

## Literatur

Equalizing Techniques Flatten DAC Frequency Response, Analog Devices Inc., August 2012

Brad Brannon: Radio Architecture Matters: A Review of RF Sampling vs. Zero-IF, Analog Devices Inc., Dezember 2021

FCC Opens 6 GHz Band to Wi-Fi and Other Unlicensed Uses, Federal Communications Commission, April 2020

## Autorenvorstellung

Howie Jing ist Product Applications Manager in der Wireless Platform Group (WPG) bei Analog Devices (ADI) und arbeitet im RTP-Büro. Er trat 2011 bei ADI China ein und begann als Applikationsingenieur, um die Transceiver-Produkte auf dem chinesischen Markt zu betreuen. 2019 wechselte er ins ADI-Büro in den USA als Application Manager und setzte seine Unterstützung für Transceiver für Kunden weltweit fort. Vor seiner Tätigkeit bei ADI arbeitete Jing als Applikationsingenieur bei Maxim Integration (jetzt ADI) für digitale Audio-/Video-Netzwerke und 3G-Mobilfunkanwendungen. ◀

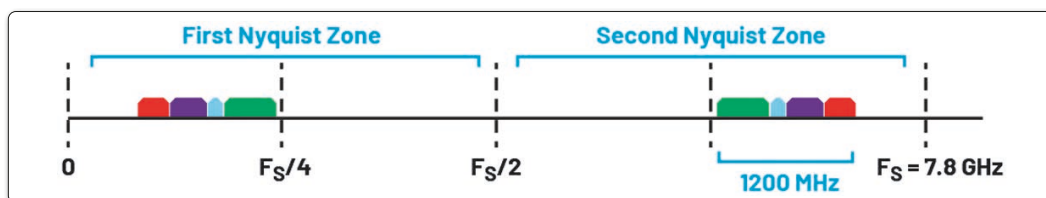


Bild 8: 6-GHz-Spektrum am Beobachtungsempfänger

|           | Anzahl der Antennen | LO  | IBW     | Datenrate   | JESD     | Lane Rate  | Anzahl der Lanes |
|-----------|---------------------|-----|---------|-------------|----------|------------|------------------|
| U-NII-5/6 | 4                   | LO0 | 160 MHz | 245,76 MS/s | JESD204B | 9,8 GBit/s | 4                |
| U-NII-7/8 | 4                   | LO1 | 160 MHz | 245,76 MS/s | JESD204B | 9,8 GBit/s | 4                |

Tabelle 4. Konfiguration des Transceivers für schmale Bandbreite