

Vom Halbleiter bis zum intelligenten Netzwerk

Validierung des O-RAN-Funkmoduls

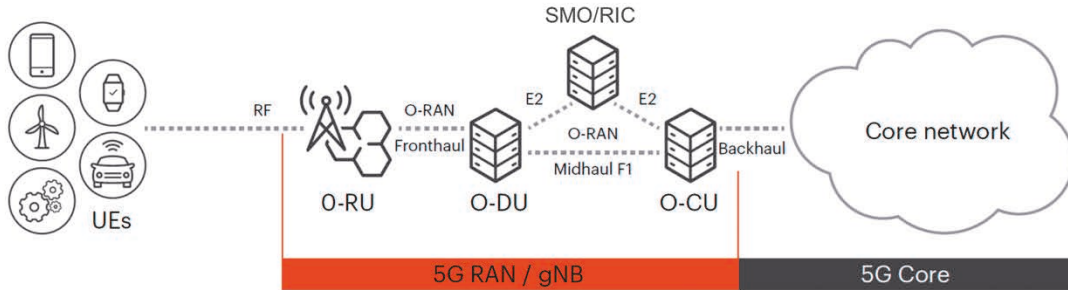


Bild 1: O-RAN-Architektur mit Anwendergeräten und Kern-Netzwerk

Um O-RAN-Funkmodule von der Halbleiter-Entwicklung bis zur einsatzbereiten, sicheren und intelligenten Implementierung zu bringen, sind einige Validierungsschritte entscheidend. Welche Anforderungen und Herausforderungen sind bei der Validierung vor und nach der Halbleiter-Entwicklung, der Leistungsüberprüfung von MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)/mMIMO (Massive MIMO), Energieeffizienzmessungen, Sicherheitstests und Funk-Management zu beachten?

Das Ziel

Die O-RAN Alliance (Open Radio Access Network), die von einer Gruppe von Mobilfunknetzbetreibern (MNOs) geleitet wird, ist die treibende Kraft hinter der Entwicklung des 5G-Funkzugangnetzes (Radio Access Network, RAN).

Ziel ist es, die Branche zu einer offeneren, interoperablen, virtualisierten und intelligenten Architektur zu lenken.

In der Vergangenheit wurden RAN-Implementierungen von proprietärer Hardware einer kleinen Gruppe von Anbietern dominiert, was zu hohen Kosten und eingeschränkter Flexibilität führte. O-RAN begegnet diesen Herausforderungen durch die Aufteilung der RAN-Architektur und die Einführung standardisierter Schnittstellen für Interoperabilität und Virtualisierung. Dieser offene Ansatz fördert die Flexibilität und ermöglicht es Unternehmen, Lösungen verschiedener Anbieter zu kombinieren, wodurch Kosten gesenkt und Innovationen gefördert werden.

Darüber hinaus verbessern die jüngsten Fortschritte in den Bereichen künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen (ML) O-RAN weiter, indem sie es intelligenter machen. Dieser Schritt wird noch mehr Innovationen in Bezug auf Energieeffizienz, Verbesserung der Sicherheit, Netzwerkoptimierung und Wartung des Netzwerks ermöglichen.

Wichtige Komponenten der O-RAN-Architektur

Bild 1 zeigt die wichtigsten Komponenten der O-RAN-Architektur, darunter:

- **O-RAN-Funkmodul (O-RU)** führt analoge/HF-Sende- und Empfangsfunktionen aus und verarbeitet den unteren Teil der Bitübertragungsschicht, z.B. FFT (Fast Fourier Transform)/IFFT (Inverse FFT), Beamforming, Vorcodierung, Einfügen/Entfernen von zyklischen Präfixen und Komprimierung/Dekomprimierung
- **O-RAN Distributed Unit (O-DU)** übernimmt die Basisbandverarbeitung, das Scheduling, die Funkverbindungssteuerung, die Medienzugriffssteuerung und den oberen Teil der Bitübertragungsschicht
- **O-RAN-Zentraleinheit (O-CU)** eine zentralisierte und virtualisierte Einheit, die für die Protokollschicht der Paketdatenkonvergenz zuständig ist
- **O-RAN Intelligent Controller (O-RIC)** verarbeitet Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Dienste, um Informationen aus dem Netzwerk zu sammeln, und nutzt künstliche Intelligenz und Machine Learning, um die erforderlichen Optimierungsaufgaben durchzuführen
- **Service Management and Orchestration (SMO)** verwaltet und koordiniert das RAN zentral, einschließlich beider RICs

Die Radio Unit (RU) ist eine wichtige Fronthaul-Komponente, die die kabellose Verbindung zu den Endgeräten der Anwender herstellt. Sie kommuniziert mit den übrigen O-RAN-Komponenten, um Informationen zum und vom Netzwerk zu übertragen. Die O-RAN Alliance 7.2x Split Option verteilt die Funktionen der Bitübertragungsschicht zwischen O-RU und O-DU neu, um ein Gleichgewicht zwischen den Anforderungen an die Fronthaul-Bandbreite, den Latenzen und der Komplexität der Komponenten herzustellen. Das beeinflusst die gesamte O-RU-Architektur des Funkmoduls, indem Signalverarbeitungsfunktionen zum digitalen Teil des Funkmoduls hinzugefügt werden.

Während des Produktentwicklungszyklus' validieren die Entwicklungsteams die Funktionalität durch Simulationen auf Blockebene. Auf Systemebene nehmen jedoch Komplexität und Laufzeit der Simulationen drastisch zu. Daher ist es unerlässlich, die Validierung vor der Halbleiterfertigung zum richtigen Zeitpunkt und deutlich vor dem Tape-out zu beginnen.

Validierung vor der Halbleiterfertigung für mehr Vertrauen vor dem Tape-Out

Bei der Validierung vor der Halbleiterfertigung wird das Design vor der Herstellung des Chips emuliert, um eine genauere Abbildung des Designs unter realen Bedingungen zu erhalten. Dieser Schritt trägt dazu bei, die Testziele in einem angemessenen Zeitrahmen zu erreichen, indem Designfehler frühzeitig erkannt werden. Um jedoch die erforderlichen Testfälle für bestimmte Funktionen zu bestimmen, ist ein gründliches Verständnis der Testspezifikationen erforderlich. Diese Testspezifikationen umfassen eine Vielzahl von Tests für Protokolle der Steuerungs-, Anwender-, Synchronisations-



*Autor:
Ajay Kumar
leitender FPGA-
Entwicklungsingenieur
Keysight Technologies
www.keysight.com*

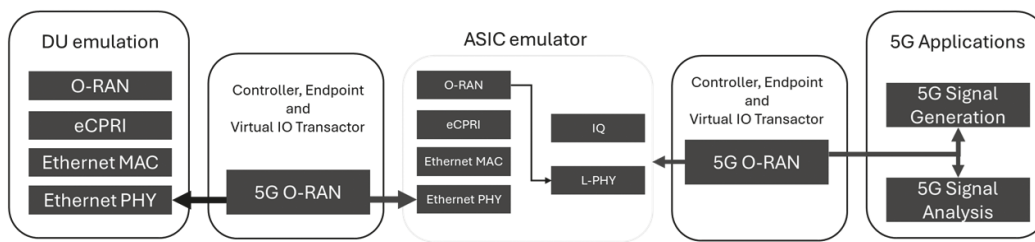


Bild 2: O-RU ASIC-Testprotokollstapel

und Verwaltungsebene (Control, User, Synchronization and Management, CUSM).

Die Erstellung von Testvektoren, die den 5G-Standards entsprechen, ist angesichts der Vielzahl der beteiligten Parameter eine komplexe Aufgabe. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Teststimuli synchron sowohl von der Ethernet-Schnittstelle auf DU als auch entweder über die nicht standardisierte Zeitbereichs-IQ-Schnittstelle oder die HF-Schnittstellenseite gesendet werden müssen, um eine vollständige Abdeckung des Funkbereichs zu gewährleisten.

Um die Ziele der Tests vor der Halbleiterfertigung zu erreichen, ist es wichtig, vorab verifizierte Testsuiten zu haben, um Zeit für die Fehlerbehebung der Testfälle selbst zu sparen. Die Überwachung der Testkonfiguration ist ebenfalls von größter Bedeutung, um Probleme frühzeitig zu erkennen und zu beheben und zu verhindern, dass potenzielle Fehler in das endgültige Design übernommen werden. Bild 2 zeigt den O-RU-Testprotokollstapel und

die Controller-Testkonfiguration für die ASIC-Emulation.

Post-Silicon-Validierung zur Überbrückung der Lücke zur Produktion

Während die Methodik für Interoperabilitätstests, bei der die Komponenten gemeinsam als gNB getestet wurden, weitgehend unverändert geblieben ist, haben sich die Konformitätstests weiterentwickelt. Konformitätstests stellen sicher, dass jede Komponente den von der O-RAN Alliance definierten Spezifikationen entspricht.

Um die Dynamik im schnelllebigen Design-Zyklus aufrechtzuerhalten, ist ein reibungsloser Übergang von der Validierung vor der Halbleiterfertigung zur Validierung nach der Halbleiterfertigung erforderlich. Daher sind derselbe Workflow und dieselben Tools für die Signalerzeugung und -analyse erforderlich, um dieselbe Testsuite wiederverwenden zu können.

In der Post-Silicon-Phase ist der Testzugriff in erster Linie auf die O-RAN- und HF-Ports der

O-RU beschränkt. Um die O-RU zu testen, sind, wie in Bild 3 dargestellt, ein O-DU-Emulator zum Senden und Empfangen von Nachrichten der CUSM-Ebene am O-RAN-Port, ein Vektorsignalanalysator zum Empfangen des von der O-RU gesendeten Downlink-HF-Signals und ein Signalgenerator zum Senden des Uplink-Signals an die O-RU erforderlich. Für nicht leitungsgebundene Tests sind möglicherweise zusätzliche Geräte erforderlich. Alle diese Testaufbaukomponenten müssen mit einem gemeinsamen Takt synchronisiert werden und innerhalb enger Fronthaul-Timing-Anforderungen arbeiten.

MIMO und Massive MIMO für die gewünschte Leistung

MIMO- und mMIMO-Technologien verwenden mehrere Antennen – in der Regel 16 oder mehr bei mMIMO-Systemen –, um mehrere Nutzer gleichzeitig auf demselben Frequenzband zu bedienen. Das erhöht die spektrale Effizienz und den Durchsatz. Bei Massive MIMO müssen fortschrittliche

Beamforming-Techniken eingesetzt werden, um die Funksignale präzise auf die Nutzer zu lenken, die Signalqualität zu verbessern und Interferenzen zu reduzieren. Mit zunehmender Komplexität des Systems kann die Leistungsverifizierung jedoch sehr komplex, zeitaufwändig und kostspielig werden.

Um ein Massive-MIMO-Funkmodul zu testen, ist ein O-DU-Emulator mit Tools zum Erstellen, Abspielen, Erfassen und Messen von O-RAN-Datenverkehr über eine Ethernet-Schnittstelle sowie ein Multi-HF-Transceiver erforderlich, um die Strahlen mit Rauschen und Interferenzen in verschiedene Richtungen zu erzeugen und gleichzeitig zu empfangen. Testaufbauten müssen nicht nur alle Strahlen und Signale in Aufwärts- und Abwärtsrichtung messen, sondern auch in der Lage sein, Probleme bei der Strahlformung genau zu lokalisieren. Bild 4 zeigt ein Beispiel für die Downlink-Strahlformung mit Amplituden- und Phasengewichtungen sowie den entsprechenden Strahlmustern und EVM-Werten.

Energieeffizienz für Nachhaltigkeit

Angesichts des exponentiellen Wachstums im Bereich der Wireless-Konnektivität hat Energieeffizienz für Betreiber höchste Priorität, um Betriebskosten zu senken, Nachhaltigkeitsziele zu erreichen und die Umweltbelastung zu reduzieren. Da zahlreiche Studien gezeigt haben, dass der Großteil der Energie vom RAN verbraucht wird, arbeitet die O-RAN-Community an der Standardisierung von Energiesparmodi mit dem Ziel, den Stromverbrauch zu senken, ohne die Servicequalität zu beeinträchtigen.

O-RU ist die Komponente im Zugangsnetzwerk mit dem höchsten Energieverbrauch. Energieeinsparungen lassen sich jedoch durch zahlreiche Maßnahmen erzielen, darunter variable Taktung, dynamische Vorspannung des Leistungs-

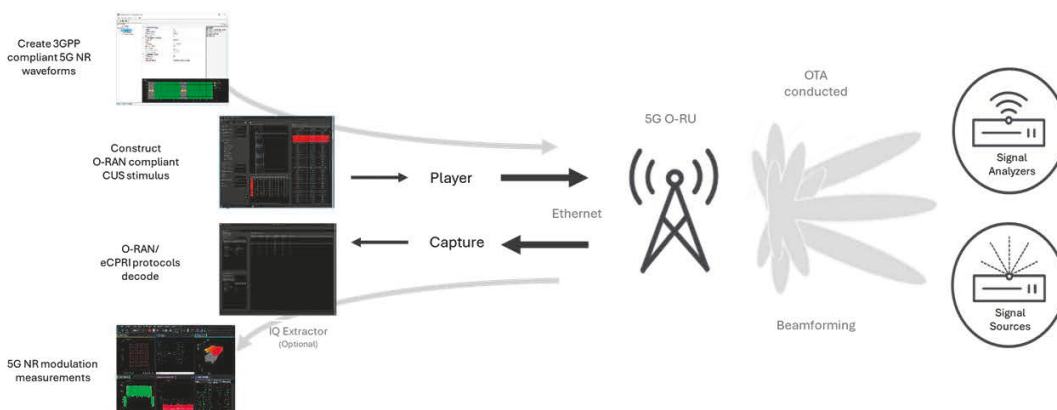


Bild 3: Diagramm und Ablauf des O-RU-Test- und Validierungstests

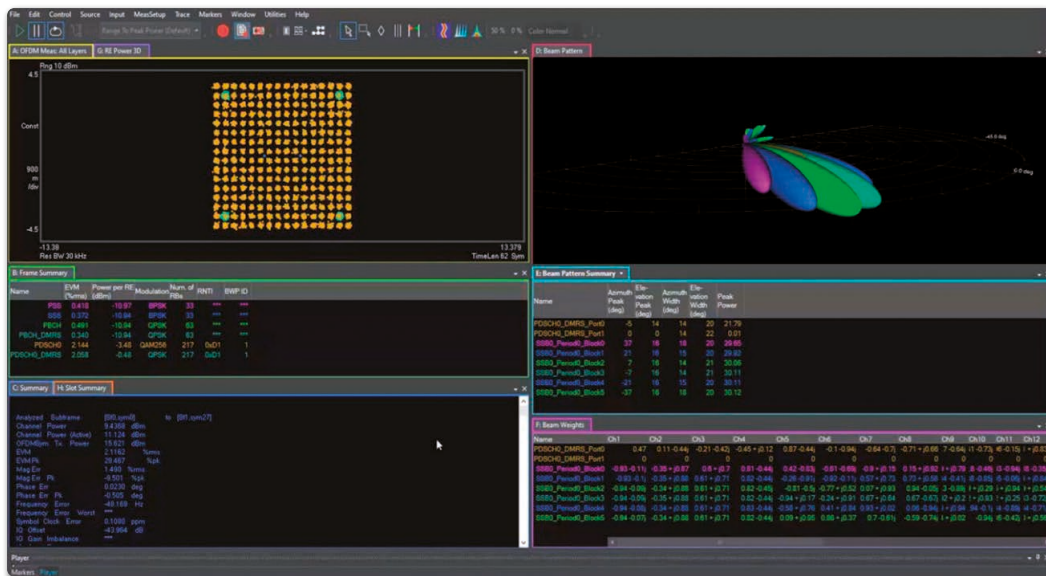


Bild 4: Downlink-Beamforming mit Amplituden- und Phasengewichtungen und entsprechenden Strahlmustern, EVM-Werte

verstärkers, Abschaltung von Zellen und Trägern, Neukonfiguration des HF-Kanals, Schlafmodi sowie diskontinuierliche Übertragung und Empfang. Mit der Disaggregation des RAN müssen alle Komponenten charakterisiert werden, um die Kompromisse auf System- und Netzwerkebene vollständig zu verstehen. Bild 5 zeigt die Leistungsaufnahme einer O-RU-Anlage über einen Zeitraum von 24 Stunden mit und ohne aktiviertem Microsleep sowie die potenziellen Einsparungen.

Sicherheitstests für unterbrechungsfreien Netzzugang

In einer disaggregierten O-RAN-Umgebung mit verschiedenen Anbietern bestehen erhöhte Sicherheitsrisiken für einzelne Komponenten, Schnittstellen, Netzwerkfunktionen und Daten. Die O-RAN-Spezifikation für Bedrohungsmodellierung und Risikobewertung umfasst über 160 verschiedene Bedrohungen für diese Elemente, einschließlich O-RU.

Jedes Element, jedes Protokoll und jede Schnittstelle muss auf Schwachstellen überprüft, unter realistischen Bedrohungsszenarien getestet und unter simulierten Angriffen auf seine Leistungsfähigkeit getestet werden. Außerdem muss sichergestellt werden, dass wirksame Strategien zur Risikominderung vorhanden sind. Vor diesem Hintergrund sind auto-

matisierte Sicherheitstests von entscheidender Bedeutung, nicht nur für die Einhaltung von Sicherheitsstandards, sondern auch für die Gewährleistung eines garantierten Funkzugangs und die Übereinstimmung mit den Zero-Trust-Prinzipien von O-RAN.

Funk-Management mit RIC für betriebliche Effizienz

Während die SMO-Schicht (Service Management and Orchestration) die Koordination der Netzwerkressourcen übernimmt, spielt das RIC eine wichtige Rolle bei der Optimierung der Leistung des Funkzugangsnetzes. Das Nicht-Echtzeit-RIC nutzt rApps, um eine KI-/ML-gesteuerte Langzeitoptimierung für weniger zeitkritische Vorgänge durchzuführen. Das Echtzeit-RIC hingegen setzt xApps ein, um Echtzeit-Netzwerkoptimierungen zwischen

zehn Millisekunden und einer Sekunde vorzunehmen.

Zusammen verbessern diese Controller die Netzauslastung und die betriebliche Effizienz durch fortschrittliche Funktionen wie Strahlmanagement und Funkressourcen-Management. Um eine zuverlässige Leistung zu gewährleisten, müssen sowohl Open-Loop- als auch Closed-Loop-Strategien implementiert und für eine kontinuierliche Optimierung rigoros getestet werden.

Fazit

Der Weg des O-RAN-Funkmoduls von der Halbleitervalidierung bis zu intelligenten Netzwerken ist äußerst komplex, aber unerlässlich, um das volle Potenzial offener und intelligenter Netzwerke auszuschöpfen. Um mit den immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen

Schritt zu halten und die Einhaltung der O-RAN-Fronthaul-Standards sicherzustellen, sind gut geplante Testaufbauten, robuste Tools, vorab verifizierte Testfälle und automatisierte Testsuiten unerlässlich, um einen reibungslosen Übergang zwischen den verschiedenen Phasen zu gewährleisten.

Wer schreibt:

Ajay Kumar ist seit 2008 bei Keysight (ehemals Agilent Technologies) tätig und verfügt über mehr als 25 Jahre Erfahrung in der Elektronik- und Kommunikationsbranche. Er hat innovative Messprodukte wie den O-DU-Emulator, die Massive-MIMO-Lösung, den 5G-NR-UE-Emulator und die Wi-Fi-6-Lösung für O-RAN-, 5G-NR- und Wi-Fi-Technologien sowie Digitizer, Arbiträrgeneratoren und Bitfehlerraten-tester im Bereich der HF- und digitalen Hochgeschwindigkeits-Messung erforscht und entwickelt. Bevor er zu Keysight kam, war Ajay an der Entwicklung von Display-Technologien bei Samsung Electronics und Telekommunikationsprodukten bei ITI Limited beteiligt.

Ajay hat einen Master of Technology in Integrierter Elektronik und Schaltungen vom IIT Delhi, ein Postgraduierten-Diplom in Informationstechnologie vom IIT Hyderabad und einen Bachelor of Engineering in Elektronik und Telekommunikation vom NIT Silchar. ◀



Bild 5: Leistungsaufnahme der O-RU-Anlage über einen Zeitraum von 24 Stunden