

Von 5G-Uplink-Tests bis 6G-Forschung

KI-basierte digitale Nachentzerrung kommt ins Labor



Mit 5G und 5G Advanced steigen die Anforderungen an Uplink-Effizienz und Modulationsqualität. Vor diesem Hintergrund gehen Entwickler erneut der Frage nach, wo die Linearisierung des Leistungsverstärkers stattfinden und wie sie validiert werden sollte. Hardware-in-the-Loop-Tests von KI-basierter digitaler Nachentzerrung verbinden die heutige 5G-Messtechnik mit möglichen 6G-Empfängerarchitekturen.

Knackpunkt PA

Die Linearität des Leistungsverstärkers bleibt einer der schwierigsten Kompromisse bei der Entwicklung von Mobilfunksystemen. Ein Endgerät kann seinen PA mit Power-Backoff im linearen Bereich betreiben, um die Signalqualität zu erhalten – dadurch sinkt jedoch der Wirkungsgrad und die Akkulaufzeit verkürzt sich entsprechend. Oder es kann den PA näher an die Sättigung treiben – das verbessert zwar die Leistungseffizienz, führt aber zu Inband-Verzerrungen und Out-of-Band-Spectral-Regrowth. Bei 5G und zunehmend auch

bei 5G Advanced tritt dieser Kompromiss deutlicher zutage, da die Anforderungen an die Uplink-Performance steigen.

DPoD als Ausweg

Dies ist einer der Gründe, warum die digitale Nachentzerrung (Digital Post-Distortion, DPoD) auf verstärktes Interesse stößt. Im Gegensatz zur herkömmlichen digitalen Vorverzerrung (Digital Pre-Distortion, DPD), die den PA senderseitig linearisiert, verlagert DPoD einen Teil des Kompensationsaufwands auf den Empfänger. Im zellularen Uplink bedeutet das: Die Basisstation versucht, ein Signal wiederherzustellen, das möglicherweise von einem Endgerät mit höherer Effizienz und stärkerer Nichtlinearität gesendet wurde. Von besonderer Bedeutung ist das Konzept für batteriebetriebene Geräte am Zellrand, wo die Leistungseffizienz im Uplink entscheidend ist.

DPoD wird häufig im Kontext von 6G diskutiert. Die praktische Evaluierung der Technologie beginnt jedoch mit 5G-Tests.

Autor:
Andreas Oeldemann
Program Manager AI for Wireless
Rohde & Schwarz
www.rohde-schwarz.com

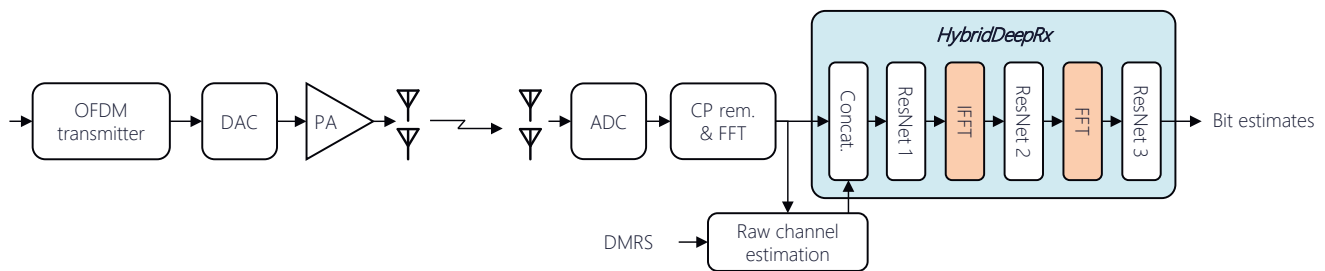


Bild 1: Der HybridDeepRx KI-Empfänger © Nokia

Die entscheidenden Fragen lassen sich heute messtechnisch klären: Wie viel Verzerrung im Uplink verträgt ein Empfänger? Können KI-basierte Empfänger Signale wiederherstellen, die über die Fähigkeit herkömmlicher Algorithmen hinausgehen? Und welcher Messaufbau ist nötig, um beide unter realistischen Bedingungen zu vergleichen?

Warum der Uplink schwierig bleibt

Das Spitzen-zu-Mittelwert-Verhältnis (peak-to-average power ratio, PAPR) von OFDM-Signalen im 5G-Uplink führt zu nichtlinearen Verzerrungen, wenn der PA des Endgeräts nahe der Sättigung betrieben wird. Mit steigender Modulationsordnung schrumpft die Toleranz gegenüber Störungen weiter. Konstellationen höherer Ordnung verbessern die spektrale Effizienz, sind aber auch anfälliger für EVM-Verschlechterung durch PA-Kompression und Phasenverzerrung.

Bisher wurde diesem Problem im Endgerät mit Sender-Linearisierung, Kalibrierung und sorgfältigem PA-Betrieb begegnet. Dieser Ansatz hat jedoch seinen Preis: mehr Komplexität, höherer Stromverbrauch und thermischer Overhead. Bei Smartphones, Wearables und IoT-Geräten fallen diese Nachteile ins Gewicht. Deshalb wird die empfängerseitige Kompensation erneut in Betracht gezogen – insbesondere da 5G Advanced die Uplink-Performance stärker in den Fokus rückt und die 6G-Forschung noch ambitioniertere Ziele für die spektrale Effizienz erwägt.

DPoD macht Spektrumkonformität nicht irrelevant, und es entschärft auch das Problem der Nichtlinearität des PA nicht. Was DPoD aber bietet, ist eine andere Systemaufteilung: Ein Teil des Aufwands für die Wiederherstellung eines verzerrten Uplink-Signals verlagert sich vom Endgerät auf den Empfänger im Netz.

Warum KI-basierte DPoD wichtig ist

Klassische Nachentzerrungsverfahren stützen sich auf vordefinierte Modelle des nichtlinearen Verhaltens. Diese Verfahren können in kontrollierten Fällen gut funktionieren. Reale Uplink-Signale werden jedoch von mehreren Effekten gleichzeitig beeinflusst: PA-Nichtlinearität, Mehrwege-Fading, Rauschen, Synchronisierungsfehler und Nichtidealitäten der Implementierung. Dadurch werden rein modellbasierte Ansätze schwieriger, vor allem mit Blick über die heutigen 5G-Netze hinaus auf 5G Advanced und 6G.

KI-basierte Empfänger sind attraktiv, weil sie aus repräsentativen Daten lernen, statt einem festen analytischen Modell zu folgen. Ein Beispiel dafür ist HybridDeepRx von Nokia Bell Labs, ein auf neuronalen Netzen basierender Empfänger für OFDM-Signale, die sowohl von Kanalstörungen als auch von Nichtlinearitäten des Senders betroffen sind (Bild 1). Im hier beschriebenen Aufbau ersetzt HybridDeepRx faktisch einen Teil der herkömmlichen Empfängerkette der Basisstation.

Seine Aufgabe besteht nicht einfach darin, das Signal zu „entrauschen“. Das Modell behandelt kanalbedingte Effekte und nichtlineare Verzerrung gemeinsam und führt anschließend das Demapping durch, um Soft-Informationen für die Decodierung zu erzeugen. Ein wesentliches Merkmal der Architektur ist der Wechsel zwischen Verarbeitung im Frequenz- und Zeitbereich. Stufen im Frequenzbereich ermöglichen es, Kanaleffekte auf eine Weise zu behandeln, die herkömmlichen OFDM-Empfängern ähnlich ist, während sich Stufen im Zeitbereich gut eignen, um PA-bedingte Verzerrungen zu verringern. Diese hybride Struktur eignet sich für die Untersuchung, ob KI-basierte DPoD die herkömmliche Empfängerverarbeitung im Uplink übertreffen kann, wenn der Sender bewusst in einem weniger linearen Bereich betrieben wird.

Hardware-in-the-Loop-Testsystem

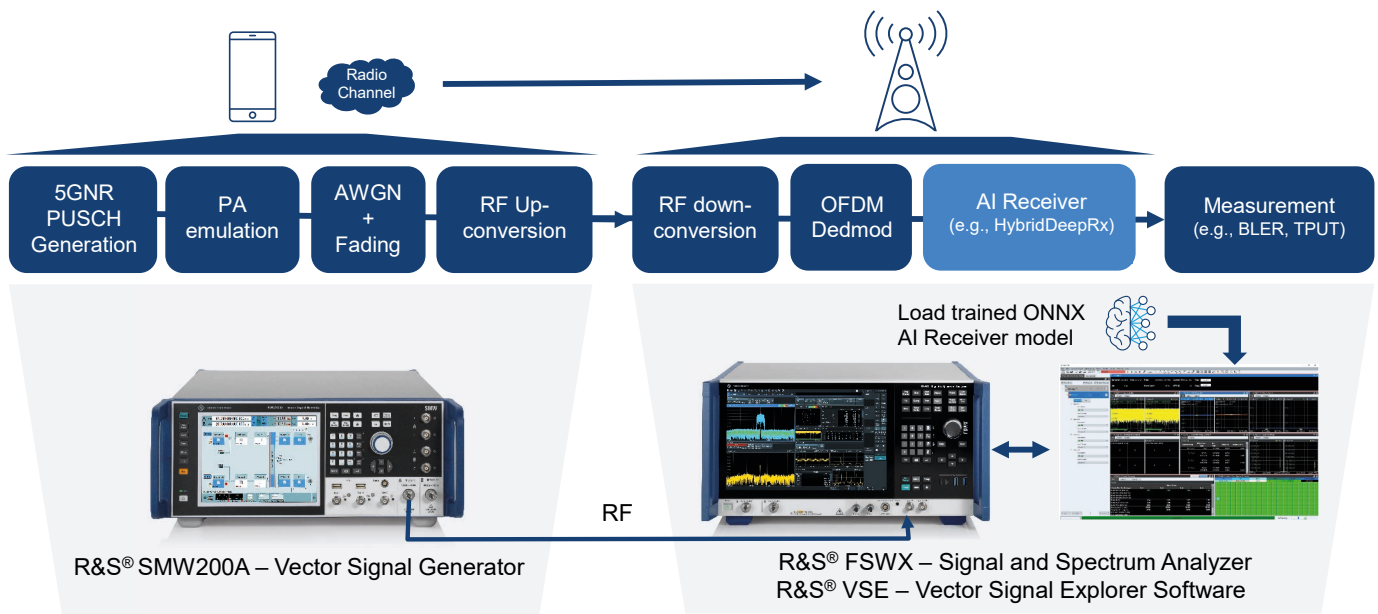
Um diese Frage belastbar zu beantworten, haben Nokia Bell Labs und Rohde & Schwarz ein Hardware-in-the-Loop-Testsystem eingesetzt, das auf standardkonformer 5G-Signalerzeugung und Breitbandanalyse aufbaut. Ziel war es, die herkömmliche Empfängerverarbeitung mit KI-basiertem Empfang unter kontrollierten, aber realistischen Störbedingungen im Uplink zu vergleichen.

Bild 2 zeigt den Gesamtaufbau. Ein R&S SMW200A Vektorsignalgenerator erzeugt das 5G-Uplink-Signal. Neben der Signalerzeugung dient der R&S SMW200A dazu, ein Leistungsverstärkermodell auf das Uplink-Signal anzuwenden und dann den Funkkanal zu emulieren. Das ist wichtig, da sich so nichtlineare PA-Verzerrungen kontrolliert einbringen lassen, ohne von Test zu Test die physische Hardware ändern zu müssen. Forscher können den Arbeitspunkt des Verstärkers und den Verzerrungspegel reproduzierbar variieren, was beim Vergleich von herkömmlichem und KI-basiertem Empfängerverhalten entscheidend ist.

Auf der Empfangsseite erfasst ein FSWX Signal- und Spektrumanalysator das gestörte Uplink-Signal. Der FSWX bietet die Bandbreite und den Dynamikbereich, die solche Aufgaben erfordern. Das erfasste Signal wird anschließend in der R&S VSE Vector Signal Explorer Software verarbeitet, die als zentrale Analyseumgebung dient.

In diesem Aufbau übernimmt die VSE-Software mehrere Aufgaben. Die Software führt die für die Signalanalyse erforderlichen Standard-Demodulationsschritte durch, unterstützt die Ermittlung von KPIs wie BLER, BER, Durchsatz und ACLR und kann benutzerdefinierte KI-Modelle im ONNX-Format laden.

In diesem Fall wird der HybridDeepRx-Empfänger von Nokia Bell Labs in den Messablauf importiert und mit GPU-beschleunigter Inferenz ausgeführt.



COMPANY RESTRICTED

Bild 2: Hardware-in-the-Loop-Testsystem für KI-Empfänger mit dem R&S SMW200A Vektorsignalgenerator, dem FSWX Signal- und Spektrumanalysator und dem R&S VSE Vector Signal Explorer zum Vergleichen des herkömmlichen 5G-Uplink-Empfangs mit HybridDeepRx von Nokia Bell Labs.

Damit wird die Brücke zwischen KI-Modell-Entwicklung und HF-Messtechnik geschlagen: Dasselbe erfasste Signal kann entweder durch eine herkömmliche Algorithmenkette oder den neuronalen Empfänger verarbeitet werden.

Direktvergleich durch realistischen Signalanalyse-Ablauf

HybridDeepRx spielt nun eine entscheidende Rolle im Messkonzept. Statt ein abstraktes KI-Modell offline zu bewerten, bindet der Aufbau das Modell direkt in einen realistischen Signalanalyse-Ablauf ein. So können Empfängerkonzepte auf Grundlage der gleichen Signaleigenschaften, Störbedingungen und KPIs, wie z.B. Blockfehler-rate und Durchsatz, miteinander verglichen werden. Für Ingenieure ist dieses Verfahren wesentlich aussagekräftiger als rein simulierte Benchmarks.

Der Nutzen des Testsystems beschränkt sich nicht auf den Nachweis, dass ein KI-Empfänger in den Aufbau eingebunden werden kann. Es hilft auch zu klären, wie viel Verzerrung toleriert wird, bevor die herkömmliche Verarbeitung versagt, und ob sich ein KI-basierter Empfänger besser schlägt.

Da der R&S SMW200A sowohl Funkkanaleffekte nachbilden als auch eine kontrollierte PA-Nichtlinearität aufprägen kann, deckt der Aufbau ein breites Spektrum realistischer Uplink-Fälle ab – von leicht gestörten

Verbindungen bis hin zu stark komprimierter Übertragung. So lässt sich eine zentrale Architekturfrage für künftige Systeme untersuchen: Wenn der Empfänger intelligenter wird – darf das Endgerät dann weniger linear und damit effizienter senden?

Diese Frage ist wichtig, weil die empfängerseitige Kompensation zwar die Bitwiederherstellung verbessern kann, die physikalischen Folgen der PA-Kompression aber nicht beseitigt. Der Wert eines Hardware-in-the-Loop-Aufbaus liegt darin, dass sich die Bewertung an messbarem Signalverhalten und KPIs auf Systemebene orientiert statt nur an Performance-Angaben zu Algorithmen.

Von der 5G-Messung zur 6G-Architektur

Damit ist KI-basierte DPoD ein gutes Beispiel dafür, wie 5G-Testergebnisse in künftige Mobilfunkarchitekturen einfließen. Signaleigenschaften, KPIs und messtechnische Methodik gründen in der heutigen Entwicklungsarbeit an 5G und 5G Advanced. Die untersuchte Systemfrage verweist jedoch auf 6G: ob sich ein Teil des Linearisierungsaufwands im Uplink von leistungsbegrenzten Endgeräten zu rechenstarker Infrastruktur verlagern lässt.

Diese Möglichkeit ist attraktiv, weil die Einschränkungen des Endgeräts im Uplink am stärksten ins Gewicht fallen.

Wenn künftige Basisstationen stärker verzerrte Signale wiederherstellen können, lassen sich Endgeräte unter schwierigen Verbindungsbedingungen möglicherweise mit einfacheren oder effizienteren Sendern betreiben. Für Nutzer am Zellrand könnte das eine bessere Leistungseffizienz bedeuten, ohne dass äquivalente Einbußen bei Abdeckung oder Durchsatz in Kauf genommen werden müssen.

Entwicklungsbedarf voraus

Das Konzept steht noch am Anfang, und viele Herausforderungen bleiben – darunter die Generalisierung über Geräte, Kanäle und Einsatzbedingungen hinweg. Die Kombination aus realistischer 5G-Signalquelle, kontrollierbarer PA- und Kanalemulation, Breitbandsignalerfassung und KI-Inferenz in der Messlösung bietet jedoch einen praktikablen Weg, den Ansatz schon heute zu untersuchen.

KI-basierte Nachentzerrung ist nicht nur ein theoretisches 6G-Thema. Sie beschäftigt die 5G-Messtechnik schon heute. Und wie diese Arbeit zeigt, ist echter Fortschritt auf hardwaregestützte Vergleiche von etablierten Empfängerverfahren mit KI-basierten Alternativen angewiesen – mit Werkzeugen, die beide in denselben Messablauf einbinden. ◀