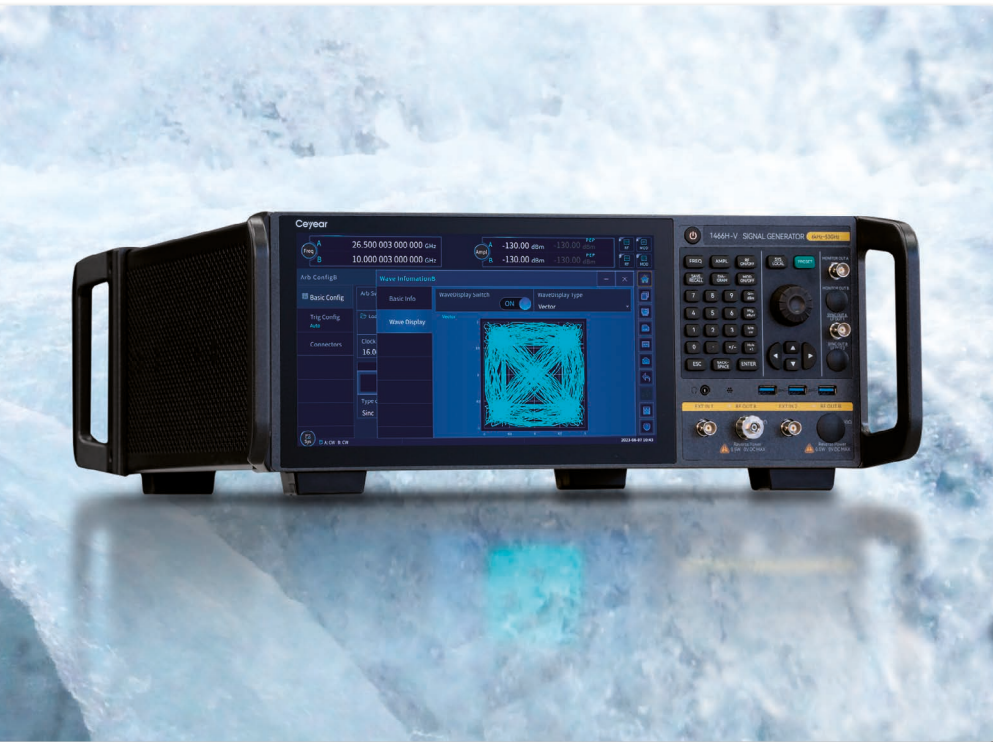


Integriertes AWGN

Wenn SNR-Genauigkeit über Konformität entscheidet



Die Qualifizierung von HF-Empfängern und Demodulator-ICs – ob für 5G NR, DVB-S2X oder Radarsysteme – setzt eine kontrollierte Überlagerung des Nutzsignals mit Additivem Weißem Gaußischem Rauschen (AWGN) voraus. Das eingestellte SNR bzw. E_b/N_0 ist dabei keine reine Konfigurationsgröße, sondern der messtechnisch kritische Parameter: Eine Unsicherheit von $\pm 0,5$ dB verschiebt den BER-Waterfall eines typischen LDPC-codierten 5G-NR-Empfängers horizontal um denselben Betrag – und kann einen Prüfling fälschlich als konform oder nichtkonform ausweisen.

Systematische Ungenauigkeit

Klassische Aufbauten mit externer Rauschquelle und Richtkoppler produzieren genau diese Unsicherheit systematisch. Der Transmissionsverlust eines Richtkopplers variiert über die Systembandbreite typisch $\pm 0,5 \dots 1,5$ dB; Impedanz-Mismatch an den Koppleranschlüssen addiert weitere Pegelfehler, und der Ausgangspegel einer externen Rauschquelle ist temperatur- und zeitabhängig nicht konstant. In der Summe entsteht eine systematische SNR-Unsicherheit, die sich im Messergebnis nicht vom Empfängerverhalten selbst trennen lässt.

Der Ceyear 1466-V (Bild 1) adressiert dieses Problem architekturell: Das Rauschen wird im digitalen Basisband durch ein Feedback-Schieberegister mit anschließender Gauß-Wahrscheinlichkeitstransformation erzeugt und dort – im selben digitalen Signalpfad – kohärent dem Nutzsignal addiert. Erst das kombinierte Signal wird auf den HF-Träger moduliert. Das SNR ist eine rein digitale Amplitudenverhältniseinstellung; der HF-Ausgangspegel bleibt bei jeder SNR-Änderung konstant. Kopplerripple, Impedanz-Mismatch und externe Driftquellen entfallen als Fehlerquellen vollständig.

Signalpfad

und systemrelevante Geräteparameter

Die Qualität der AWGN-Simulation hängt nicht nur vom AWGN-Algorithmus selbst ab, sondern von drei Plattformparametern mit direkten messtechnischen Konsequenzen:

• Phasenrauschen

Das SSB-Phasenrauschen des LOs geht additiv in den Rauschboden des erzeugten HF-Signals ein. Bei DVB-S2X VL-SNR-Tests, die bis $E_s/N_0 = 10$ dB reichen, übersteigt die Rauschleistung die Trägerleistung um den Faktor 10. Ein LO mit unzureichendem Phasenrauschen liefert in diesem Bereich einen messbaren Eigenanteil am Gesamtrauschen, der den effektiven E_s/N_0 verfälscht und nicht korrigierbar ist.

Der 1466-V erreicht >132 dBc/Hz bei 10 GHz/10 kHz Offset und >161 dBc/Hz Breitbandrauschen bei 30 MHz Offset/20 GHz – Werte, die den LO-Eigenanteil auch bei tiefen E_s/N_0 -Werten vernachlässigbar halten.

• IQ-Modulationsbandbreite

Die konfigurierte Rauschdichte-Bandbreite muss die vollständige Systembandbreite des Prüflings abdecken. Wird sie unterschritten, fehlt Rauschleistung in den Randbereichen des Kanals – der Prüfling sieht ein spektral ungleichförmiges Rauschprofil und ein scheinbar besseres SNR als konfiguriert. Mit 2 GHz Modulationsbandbreite (Option H31-2000) deckt der 1466-V die Kanalansforderungen von 5G NR FR2 (bis 400 MHz Kanalbandbreite), 802.11be (320 MHz) und DVB-S2X wideband vollständig ab. Zudem gilt per Gerätespezifikation: Die Rauschdichte-Bandbreite muss mindestens doppelt so groß sein wie die Systembandbreite – unterhalb dieses Faktors hebt die interne Berechnung die Bandbreite automatisch an.

• AWGN-Sequenzlänge und Basisbandpuffer

Das digitale Rauschsignal basiert auf einer endlichen periodischen Sequenz aus dem Feedback-Schieberegister, deren Periode von der eingestellten Rauschdichte-Bandbreite abhängt. Wiederholt sich das Muster innerhalb einer BER-Messung, werden korrelierte Fehler gezählt – die BER wird systematisch unterschätzt. Bei HARQ-Systemen wie 5G NR reagiert die BLER

Autor:
Shashank Vodapally, M.Sc.
HF-Spezialist
Meilhaus Electronic GmbH
www.meilhaus.com

noch sensibler auf solche Periodizitäten, da Retransmissionen zeitkorrelierte Fehlerbursts erzeugen. Der 16 GB-Basisbandpuffer (Option H32) hält die Wiederholperiode bei 200 MHz Rauschdichte-Bandbreite im Minutenbereich – weit außerhalb praktischer Messdauern.

SNR-Parametrierung: C/N, Eb/N0 und Pegelplanung

Der Generator unterstützt zwei komplementäre SNR-Parametriermodi über einen Einstellbereich von -50 dB bis +40 dB. Im C/N-Modus wird das Carrier-to-Noise-Verhältnis direkt in dB eingegeben, bezogen auf die konfigurierte Rauschdichte-Bandbreite. Im Eb/N0-Modus (Bild 2) berechnet der Generator das C/N intern nach der Beziehung $SNR = Eb/N0 \times (Rb/BN)$, wobei Rb die Bitrate des modulierten Signals und BN die Rauschdichte-Bandbreite ist – die direkte Umsetzung der normgebenden 3GPP-Referenzgröße für BER-Kurvenvergleiche über verschiedene Modulationsverfahren und Codierungsraten.

In beliebiger Welle (ARB) und Multi-/Dualtone-Betrieb steht ausschließlich der C/N-Modus zur Verfügung, da eine Bitrate nicht automatisch berechnet werden kann.

Im Add-Noise-Betrieb führt der HF-Ausgang die kombinierte Leistung $P_{total} = P_{carrier} + P_{noise}$. Bei $SNR = 0$ dB gilt $P_{carrier} = P_{noise} = P_{total} - 3$ dB. Für Sensitivitätstests, bei denen der absolute Eingangspegel am Prüfling exakt kalibriert sein muss, ist dieser Zusammenhang bei der Pegelplanung zwingend zu berücksichtigen. Der programmierbare 130-dB-Stufenabschwächer (Option H01-130) ermöglicht dabei die Einstellung sehr kleiner Ausgangspegel ohne Eingriff in den internen HF-Signalfad.

Bei niedrigen SNR-Werten steigt der PAPR des kombinierten Ausgangssignals durch die Überlagerung von Träger und AWGN an. Überschreitet der Crest-Faktor die Aussteuerungsreserve des ALC-Regelkreises, wird der eingestellte HF-Ausgangspegel nicht mehr exakt gehalten. Die Abhilfe ist in beiden Fällen identisch: den absoluten HF-Ausgangspegel reduzieren und den gewünschten Eingangspegel am Prüfling über den kalibrierten Stufenabschwächer einstellen.

Anwendungen: 5G NR, DVB-S2X, Radar und Mehrkanal

- **5G NR Reference Sensitivity (TS 38.101)**
Der Reference Sensitivity Test nach TS 38.101-1 (FR1) und -2 (FR2) bewertet, ob ein 5G NR-Empfänger bei definiertem Mindesteingangspegel eine



Bild 1: 1466-V GUI



Bild 2: Additive White Gaussian Noise (AWGN) GUI



Bild 3: Kommunikationsstandard GUI

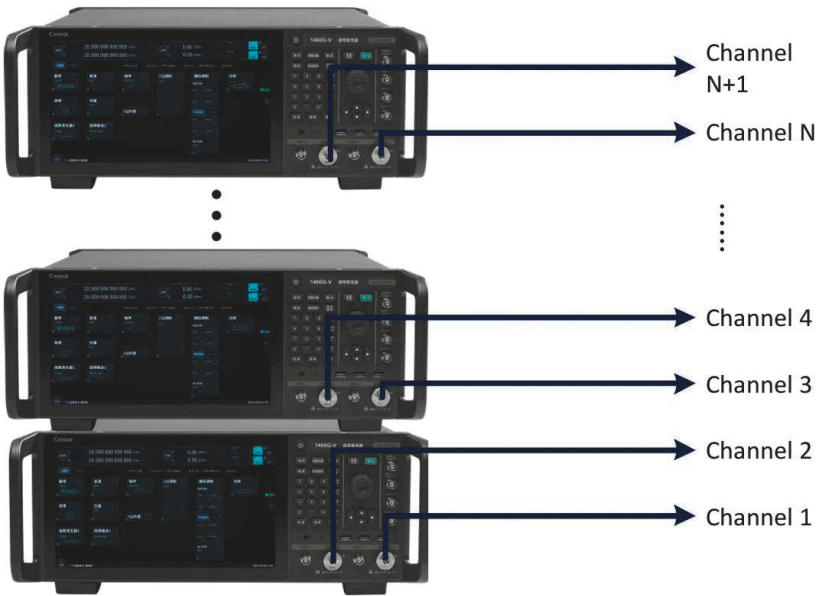


Bild 4: Multikanalaufbau

PDSCH-BLER < 0,1 % erreicht. Das dazu erforderliche standardkonforme PDSCH-Signal – über 600 TestModel/FRC abgedeckt durch Option S34 – wird im selben Basisband mit AWGN überlagert. Die Pegelunsicherheit eines externen Kopplers entfällt vollständig. Für FR2 mit Kanalbandbreiten bis 400 MHz ist die 2-GHz-Basisbandbreite Voraussetzung für ein spektral korrektes Rauschprofil über den gesamten Kanal. Die EVM-Spezifikation von <0,8% bei 28 GHz stellt sicher, dass Modulationsverzerrungen des Generators keinen messbaren Eigenbeitrag zur BLER liefern – im Empfänger sind EVM-induzierte und AWGN-induzierte Fehler nicht trennbar.

• DVB-S2X VL-SNR

Die Very Low SNR Modi nach EN 302 307-2 operieren bei Es/N0 bis ?10 dB, wo die Rauschleistung die Trägerleistung um den Faktor 10 übersteigt. Frame Error Rates im Bereich 10E-3 bis 10E-4 erfordern Messzeiten von mehreren Minuten für statistische Validität – innerhalb derer das AWGN-Muster nicht wiederholt werden darf. Gleichzeitig dominiert in diesem Es/N0-Bereich jeder LO-Eigenrauschanteil das Messergebnis direkt. Das Breitbandrauschen von -161 dBc/Hz bei 30 MHz Offset/20 GHz hält diesen Eigenanteil vernachlässigbar; für Messungen mit höchsten C/N-Anforderungen empfiehlt sich Option H04-2.

• Radar und Electronic Warfare

In Kombination mit Option S03 (Intra-Pulse-Modulation) erzeugt der Generator ein AWGN-überlagertes Pulsradarsignal innerhalb einer einzigen

Basisbandverarbeitungskette. Unterstützte Modulationstypen umfassen LFM, Dreieck-FM, Barker-Code, Polyphasen-Codes (P1...P4, Frank), BPSK/QPSK sowie FSK. Das zeitliche Alignment zwischen Pulsmodulation und Rauschsignal ist deterministisch definiert – bei externen Rauschquellen führt Triggerjitter im Kopplerpfad zu undefinierten SCR-Verhältnissen pro Puls. Mit Modell 1466P (bis 110 GHz) ist der Frequenzbereich für W-Band-Radar bei 77 und 94 GHz abgedeckt.

• Mehrkanalbetrieb (Bild 3) und Phasenkohärenz

Der 1466-V unterstützt nativ Single-Unit Dual-Channel-Betrieb (Option H11-BV20), bei dem beide RF-Kanäle eines Geräts unabhängig konfigurierbar sind. Für phasenkohärenten Mehrkanalbetrieb – etwa für MIMO-, Beamforming- oder Diversity-

Tests – ermöglicht Option H36 die LO-Kopplung zwischen mehreren 1466-V-Einheiten über dedizierte 4...20-GHz-LO-Ein-/Ausgänge auf der Geräterückseite. Die gekoppelten Instrumente (Bild 4) teilen sich einen gemeinsamen LO und sind damit frequenz- und phasenstarr synchronisiert. Jeder Kanal führt dabei sein eigenes unabhängig konfiguriertes AWGN-Signal; die statistische Unabhängigkeit der Rauschsignale ist durch getrennte Schieberegister mit unabhängigen Seed-Werten gewährleistet – eine Voraussetzung für korrekte MIMO-Kanalsimulation, bei der korreliertes Rauschen auf mehreren Pfaden die räumliche Kanalkapazität künstlich erhöht.

Fazit

Die Integration der AWGN-Erzeugung in den digitalen Signalpfad des 1466-V ist keine Komfortfunktion, sondern eine messtechnische Grundsatzentscheidung. Kopperripple, Impedanzmismatch und Neukalibrierung bei jeder SNR-Stufe – die strukturellen Fehlerquellen klassischer Aufbauten – entfallen architekturell. Das eingestellte SNR ist eine digitale Amplitudenverhältniseinstellung mit der Stabilität des internen Taktgitters, reproduzierbar über Frequenz, Temperatur und Messzeit.

Die drei plattformrelevanten Parameter – Phasenrauschen (-161 dBc/Hz Breitband), IQ-Bandbreite (2 GHz) und Sequenzlänge (16 GB Puffer) – sind direkt messrelevant: Sie bestimmen, ob der LO-Eigenanteil bei DVB-S2X VL-SNR vernachlässigbar bleibt, ob das Rauschprofil bei 5G NR FR2 spektral korrekt ist, und ob die BER-Messung bei niedrigen Fehlerraten statistisch valide ist. Für Labors, die in diesen Anwendungsdomänen qualifizieren, entscheiden sie darüber, ob ein Messergebnis trägt. ◀

Parameter	Wert
Frequenzbereich (1466L-V / 1466P)	6 kHz – 67 GHz / 110 GHz
SSB Phasenrauschen @ 1 GHz / 10 kHz	-145 dBc/Hz
Breitbandrauschen @ 20 GHz / 30 MHz	-161 dBc/Hz
Spurious / Harmonische	< -80 dBc / < -55 dBc
EVM @ 5G NR FR2 / 28 GHz	< 0,8 %
IQ-Modulationsbandbreite (H31-2000)	2 GHz
Interner Basisbandspeicher (H32)	16 GB
AWGN-Betriebsmodi	Add Noise · Pure Noise · CW Interferer
SNR-Parametrierung	C/N (dB) oder Eb/N0 (dB)
Stufenabschwächer (H01-130)	130 dB programmierbar
Mehrkanal / Phasenkohärenz (H36)	Multi-Instrument LO-Sharing

Ceyear 1466-V – AWGN-relevante Spezifikationen