

Die Prüfung von modernen Radar- und ECM-Systemen - Eine Herausforderung für die Messtechnik

Die kontinuierlichen Fortschritte im Bereich der zivilen und militärischen Radargeräte erfordern Prüfgeräte mit Spitzenleistungen, die genaue Messungen und Analysen der HF-Leistung ermöglichen.

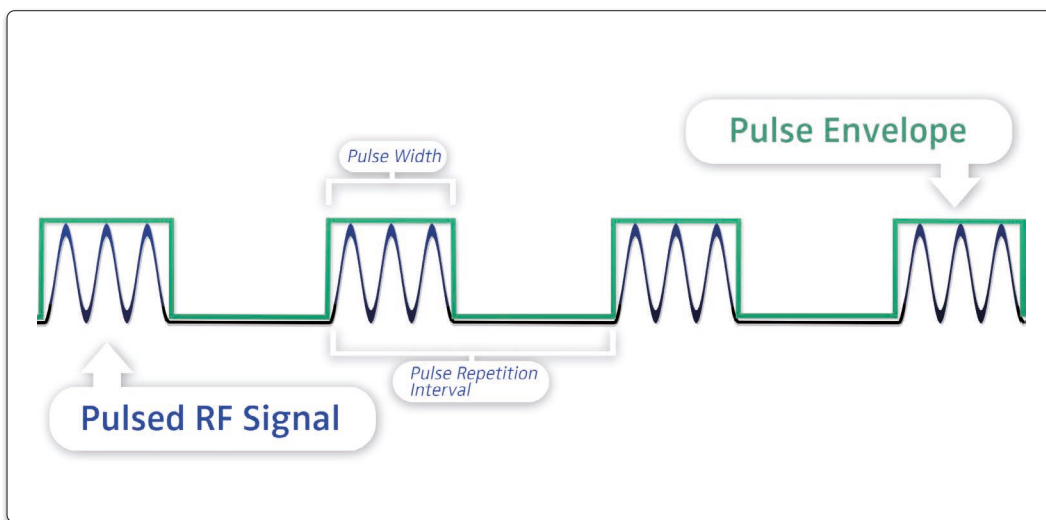


Bild 1: Ein gepulstes HF-Signal und seine Leistungshüllkurve

Dieser Artikel gibt zunächst einen Überblick über wichtige Eigenschaften von gepulsten Signalen. Nach einer Auffrischung der Kenntnisse über die Analyse gepulster Signale wird die grundlegende Funktionsweise von vier verschiedenen Radar-Typen erläutert:

- Sekundärüberwachungs-Radar (SSR)
- elektronische Gegenmaßnahmen (ECM)
- Entfernungsmessgeräte (DME)/Doppler-VHF-Rundstrahl-Radar (DVOR)
- Lärm-Radar-Technologie

Schließlich werden die wichtigsten Messungen und die Fähigkeiten der wichtigsten Testinstrumente zur Charakterisierung der Leistung der einzelnen Systeme erläutert.

Analyse eines gepulsten Radar-Signals

Viele Radar-Anwendungen arbeiten mit pulsmodulierten HF-Trägersignalen (Bild 1). Daher ist es wichtig, ihre grundlegende Anatomie und die Definition der Leistungsparameter für eine effektive Analyse zu verstehen.

Die Leistungshüllkurve zeichnet die Form eines Impulses nach

und beschreibt die Amplitudenschwankungen. Eine ideale Leistungshüllkurve ist frei von Signalverzerrungen mit perfekt vertikalen Vorder- und Rückflanken (Anstiegs- und Abfallzeit gleich 0), die in eine konstante Spitzenamplitude übergehen.

Die Impulsbreite ist das Zeitintervall zwischen der Vorder- und der Rückflanke, das für die

Auflösung eines Radar-Systems wichtig ist, d.h. für die Fähigkeit, nahe gelegene Ziele aufzulösen. Schmale Impulsbreiten verbessern die Trennschärfe zwischen nahe beieinander liegenden Zielen auf Kosten einer geringeren Reichweite des Systems. Große Impulsbreiten hingegen erhöhen die Erfassungsreichweite, erhöhen aber auch das Risiko, dass benachbarte Ziele zu einem einzigen Objekt verschmelzen.

Die Zeit, die vergeht, bis sich der Impulszyklus wiederholt, wird als Impuls-wiederholungsintervall (PRI) bezeichnet. Dieses Intervall wird verwendet, um die maximale, eindeutige Reichweite des Systems festzulegen, die durch die Zeit bestimmt wird, die ein Impuls übertragen, von einem Ziel reflektiert und vor dem nächsten Impuls zurückkehren kann. Die Impuls-wiederhol-frequenz (PRF) ist die Anzahl der Impulse eines sich wiederholenden Signals, die pro Sekunde übertragen werden, normalerweise gemessen in Impulsen pro Sekunde und

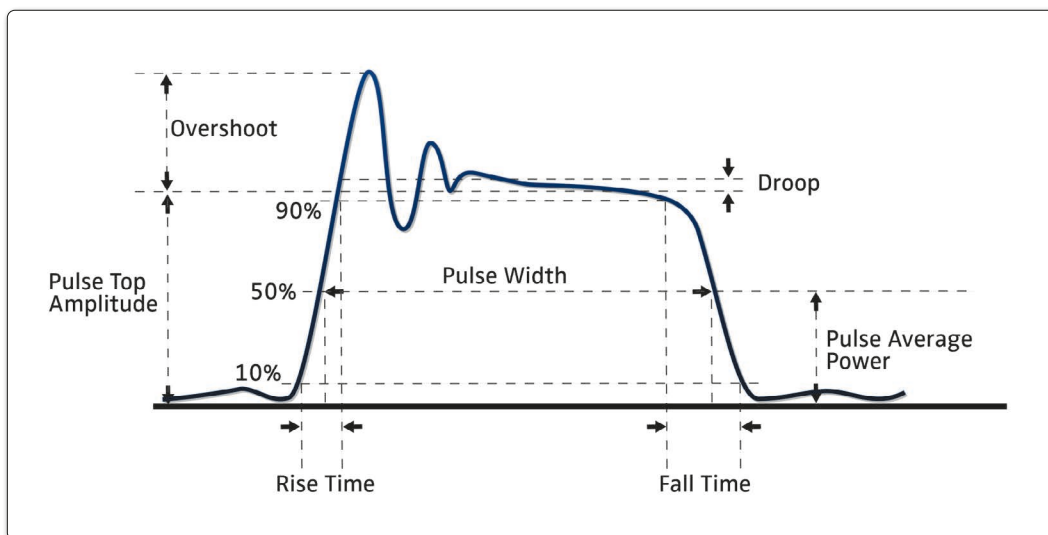


Bild 2: Grundlegende Merkmale eines Radar-Impulses

Autor:
Bob Buxton
Produkt Manager
Boonton
<https://boonton.com/>

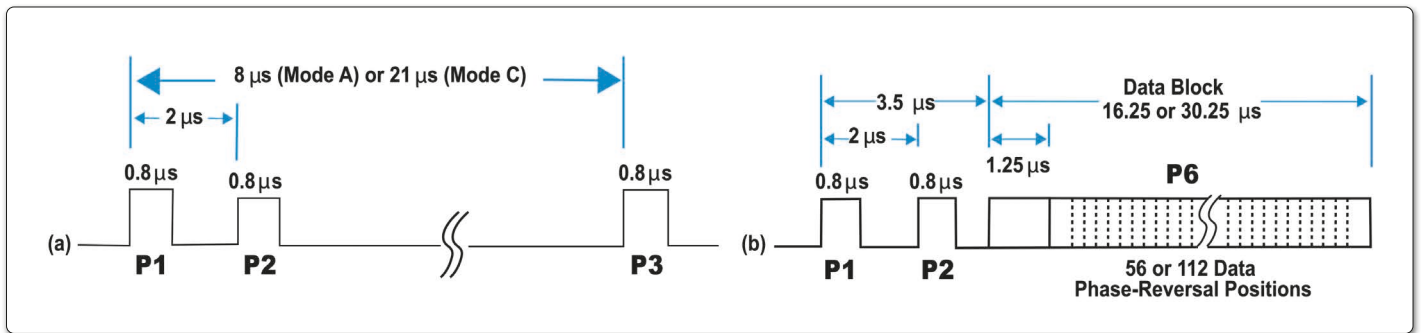


Bild 3: Aufschlüsselung von drei SSR-Abfragesignalen: Modus A und Modus C (a) sowie Modus S (b)

erfasst in Hz. Sie ist gleich dem Kehrwert der PRI.

In Bild 2 ist eine realistische Leistungshüllkurve eines Radar-Impulses dargestellt. Radar-Impulse weisen Verzerrungen auf, die von der idealen, flachen, rechteckigen Leistungshüllkurve abweichen. So folgt beispielsweise unmittelbar auf die Anstiegszeit des Impulses

ein Überschwingen, bei dem das Signal über die Zielamplitude hinausgeht.

Nach einer Periode mit Ringing-Artefakten pendelt sich der Impuls in der Nähe seines Sollwerts ein. Die Spitzenamplitude des Pulses nimmt typischerweise zwischen dem Beginn und dem Ende des Pulses ab, was als Droop bezeichnet wird.

Praktische Übergänge zwischen Vorder- und Hinterflanke erfolgen nicht sofort. Die Anstiegszeit gibt die Zeit an, die die Vorderflanke eines Signals benötigt, um von einem bestimmten niedrigen auf einen hohen Wert zu wechseln oder anzusteigen, typischerweise 10 % bis 90 % der Impulsgröße. Die Abfallzeit definiert die Änderung der Impulsgröße von 90% auf 10%.

Grundlegende Funktionsweise der verschiedenen Radar- und ECM-Systeme

Obwohl die Systeme je nach Typ und Anwendungsfall sehr unterschiedlich sind, lassen sich vier wesentliche Systeme nennen: SSR, ECM-Systeme, DME/DVOR und Rausch-Radar. Bevor man den effektivsten Prüf- und Messansatz entwickelt, muss man zunächst die grundlegende Funktionsweise jedes Systems verstehen.

Sekundär-Überwachungsradar – SSR (Secondary Surveillance Radar)

SSR ermittelt spezifische Daten über ein Ziel, z.B. den Identifikationscode eines Flugzeugs oder die Druckhöhe. Bei SSR sendet eine Bodenstation, die auch als Interrogator bezeichnet wird, ein Abfragesignal (hier 1030 MHz) in Richtung des gewünschten Ziels. Der Modus des Abfragesignals (Abbildung 3) bestimmt die spezifische Anfrage des Abfragesystems. Nachdem der bordeigene Transponder des Flugzeugs die Abfrage empfangen und interpretiert hat, sendet er die gewünschten Informationen in einer Antwort (auf 1090 MHz) an die Bodenstation.

SSR arbeitet häufig mit dem Primärüberwachungs-Radar (PSR – Primary Surveillance Radar) zusammen, das die Peilung und Entfernung eines Flugzeugs auf der Grundlage des Zeitintervalls zwischen dem Sendesignal einer Bodenstation und der Erfassung der Radarreflexion bestimmt.

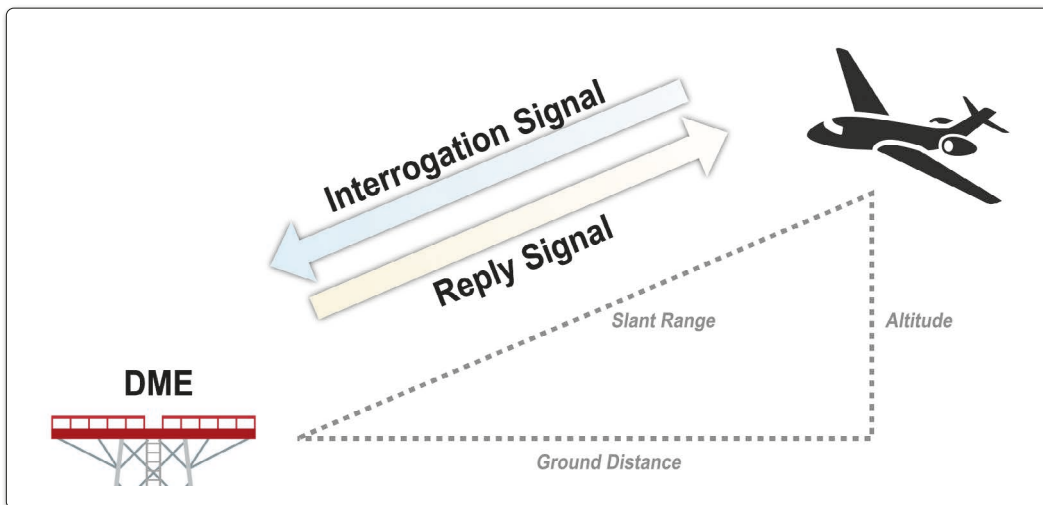


Bild 4: Ein Überblick über die Kommunikation zwischen DME und einem Flugzeug zur Bestimmung der Schräggenferne

System Type	Critical Test Parameters	Instrument Capabilities
Secondary Surveillance Radar	Overshoot/Ringing (Signal Distortions), Test Multipulse Bursts	Realtime Data Capture, Long Test Intervals, Multipulse Analysis
Electronic Counter Measures	PRF Analysis (Individual and Variation Range)	Advanced Measurement Software (Persistence)
Distance Measuring Equipment and Doppler VHF Omnidirectional Radar	Pulse Spacing and Pulse Fidelity	Time Resolution, Rise Time, and Automatic Pulse Measurements
Noise Radar Technology	Amplifier Performance	Crest Factor and Statistical Analysis (CCDF)

Tabelle 1: Entscheidende Messungen und Testinstrumente zur Charakterisierung der Leistung verschiedener Radar-Systeme

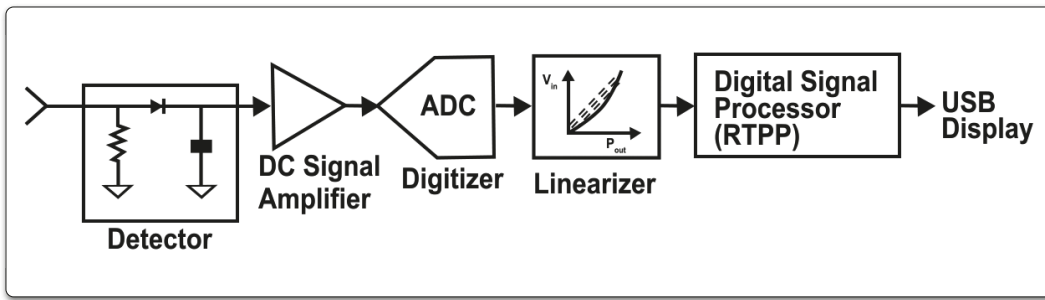


Bild 5: Blick ins Innere eines Spitzenleistungssensors, der über einen digitalen Echtzeit-Signalprozessor für eine schnelle, lückenlose Erfassung verfügt

Zu den üblichen Abfragesignalmodi gehören:

- - Modus A (fordert den Identitätscode an): Das Abfragesignal hat hier ein 8- μ s-Zeitintervall zwischen den Impulsen P1 und P3.
- - Modus C (Abfrage der Höhe in 100-Fuß-Schritten): Das Abfragesignal hat hier ein 21- μ s-Zeitintervall zwischen den Impulsen P1 und P3.
- - Modus S (Zweck variiert): Das Abfragesignal hat hier ein

Zeitintervall von 3,5 μ s zwischen den Impulsen P1 und P3. Das Signal besteht aus einer Präambel mit den Impulsen P1 und P2 und einem phasenmodulierten 56- oder 112-Bit-Datenblock.

Elektronische Gegenmaßnahmen – ECM (Electronic Counter Measure)

ECM-Systeme versuchen, das Radar des Gegners zu verwirren.

Es gibt zwar viele Täuschungsstrategien, aber eine Spoofing-Technik besteht darin, die PRF eines Signals zu verändern. Die zufällige Veränderung der PRF stört die Vorhersagbarkeit des Signals, auf die sich Radarempfänger bei der Zielerfassung verlassen.

ECM-Systeme, die die PRF variieren, können wertvolle Informationen über ein Objekt verbergen, z.B. die Entfernung oder die Geschwindigkeit.

Entfernungsmessgeräte und Doppler-VHF-Radar mit Rundstrahlcharakteristik – DME

DME bestimmen die Schrägentfernung (oder den relativen Abstand) eines Flugzeugs von der Radar-Bodenstation und werden häufig zu Navigationszwecken in der militärischen und zivilen Luftfahrt eingesetzt. Im Beispiel unten sendet das Flugzeug zunächst einen Abfrageimpuls auf einem bestimmten Kanal zwischen 960 und 1215 MHz. Anschließend sendet die Bodenstation zeitverzögert einen Antwortimpuls auf einem Frequenzband, das um 63 MHz von der Kanalzuweisung des Abfrageimpulses abweicht. Der Empfänger des Flugzeugs ist in der Lage, die Schrägentfernung zu berechnen, indem er die Zeitverzögerung zwischen den Abfrage- und Antwortimpulsen misst (Abbildung 4).

DME wird oft zusammen mit DVOR eingesetzt, um zusätzliche zweidimensionale Navigationsdaten zu erhalten, wie z. B. den Azimutwinkel zwischen dem Flugzeug und dem Bodenradar.

Rausch-Radar-Technologie

Hierbei werden Radar-Signale vor gegnerischen Sensoren und Erkennungssystemen mithilfe von Geräten zur Erzeugung von Hochfrequenzrauschen verborgen. Diese Rauschgeneratoren verdecken das Radar-Signal mit wirklich zufälligen Wellenformen des additiven weißen Gaußschen Rauschens (AWGN). Dies führt zu einer niedrigen Abfangwahrscheinlichkeit des Radars (LPIR) und minimiert die Fähigkeit des Gegners, das Radar zu entdecken.

Testgrundlagen nach Radar-Art

Unabhängig davon, ob SSR-, ECM-, DME/DVOR- oder Rausch-Radar-Systeme getestet werden, erfordert jedes System bestimmte HF-Leistungsmessungen und Prüfgerätekfunktionen, um die Leistung zuverlässig und genau zu bewerten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Prüfkriterien für jeden Radartyp.

Multiimpulsanalyse in Echtzeit für SSR

Sensoren, die mit herkömmlicher digitaler Signalverarbeitung arbeiten, erfassen Abtastwerte entlang einer Wellenform, um eine Signalspur auf einem Display zu erstellen. Die Erfassung muss angehalten werden, um eine Reihe von aufeinander folgenden Verarbeitungsschritten abzuschließen, zu denen trigger-basierte Anpassungen, Linearitätskorrekturen, Einheitenumwandlung und Skalierung sowie die Erstellung der Wellenformkurve gehören. Die Unterbrechung der Signalerfassung hinterlässt ein Zeitfenster, in dem der Sensor die Wellenform nicht überwacht und aufzeichnet. Wenn beispielsweise ein Radar-Leistungverstärker (PA) während dieses Zeitfensters überhitzt, kann der Sensor keinen Signalabfall oder Drop-out erkennen.

Ein Erfassungsmodul für die Echtzeitverarbeitung (Bild 5), wie die Real-Time Power Processing Technologie (RTPP) der Boonton-Echtzeit-Leistungssensoren

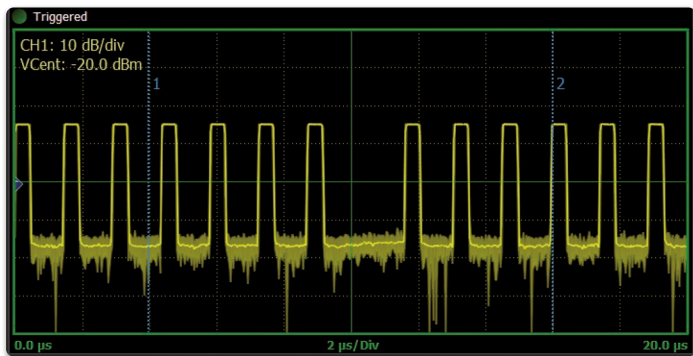


Bild 6: Ein Beispiel für ein Mehrimpuls-Radar-Signal

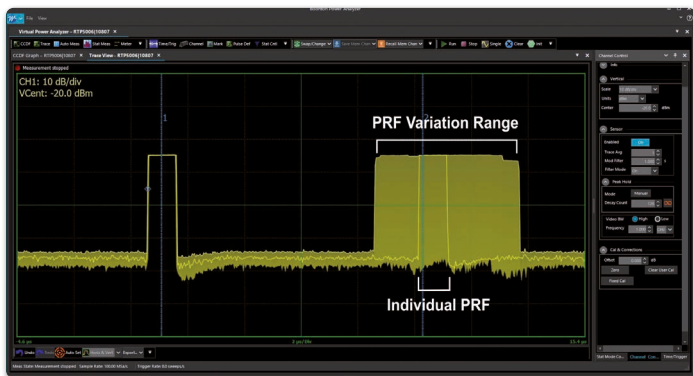


Bild 7: Die Steuerungs-Software eines Sensors, die über Persistenzfunktionen verfügt, zeigt die individuelle PRF und den PRF-Variationsbereich in der Trace-Ansicht an

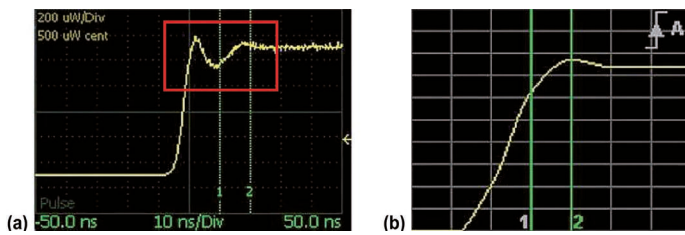


Bild 8: Überschwngen und Klingeln, aufgenommen mit einem Sensor, der eine Zeitauflösung von 100 ps bietet (a), während ein Testinstrument mit unzureichender Zeitauflösung die Verzerrung verdeckt (b)

soren, stellt sicher, dass bei der Verarbeitung der Messungen keine Impulse oder Signalanomalien übersehen werden. Ein digitaler Echtzeit-Signalprozessor kann Wellenformabtastungen gleichzeitig mit der Erfassung erfassen und verarbeiten, wodurch die Gesamtzykluszeit im Vergleich zu herkömmlichen Leistungsmesssystemen reduziert wird. Diese Leistungsfähigkeit erhöht die Messgeschwindigkeit (z.B. erreichen die RTPP-gestützten Leistungssensoren von Boonton 100.000 Messungen pro Sekunde) und eliminiert Totzeiten, um jedes Detail einer SSR-Wellenform zu erfassen.

Ingenieure können erweiterte Echtzeit-Datenerfassung über längere Testfenster durchführen, wenn dies durch zusätzliche Software unterstützt wird. Durch die Messung der Spitzenleistung, der Durchschnittsleistung, der Mindestleistung, der Startzeit und der Messdauer eines Impulses in den gewünschten Intervallen, während alle anderen irrelevanten Daten verworfen werden, werden die Puffergröße und die PC-Datenübertragungen minimiert und die Prüfintervalle drastisch verlängert.

Da SSR-Radarsignale aus Mehrfachimpulsbündeln bestehen (Bild 6), müssen Ingenieure Leistungssensoren verwenden, die die Erfassung und Verarbeitung in Echtzeit sowie die Analyse von Mehrfachimpulsen unterstützen.

PRF-Schwankungsbereich für ECM

Prüfgeräte müssen in der Lage sein, die Schwankungen der PRF

eines Impulses in ECM-Systemen zu erfassen. Dieses Verhalten muss nicht nur genau erfasst werden, sondern das Softwarepaket, das die Messung steuert und ausliest, muss auch in der Lage sein, sowohl die individuelle PRF als auch den PRF-Variationsbereich anzuzeigen (Bild 7). Software mit Persistenzfunktionen ermöglicht es dem Benutzer, den Verlauf der Messkurve zur Analyse der PRF-Variation auf dem Display anzuzeigen.

Impulsabstand und Impulstreue für DME/DVOR

Die Zeitauflösung eines Sensors ist mit mehreren wichtigen Prüffunktionen verknüpft, nämlich Messung des Abstands zwischen DME/DVOR-Impulsen, Triggerstabilität und Erfassung von Signalverzerrungen wie Überschwngen und Ringing (Bild 8). Branchenführende Spitzenleistungssensoren bieten eine Zeitauflösung von 100 ps und charakterisieren Pulsbreiten von nur 10 ns.

Impulse sind dynamisch und ändern ihre Amplitude schnell, wobei die größten Amplitudenschwankungen an der Vorder- und Rückflanke des Impulses auftreten. Ein Prüfgerät muss schnell genug reagieren, um diese Amplitudenänderung zu erfassen, d.h., es muss über eine ausreichende Anstiegszeit verfügen. Diodenbasierte Spitzenleistungssensoren sind ideal für gepulste Radarmessungen, da sie schnelle Anstiegszeiten bieten. So können beispielsweise branchenführende Spitzenleistungssensoren Anstiegszeiten von unter 3 ns erreichen.

Neben Anstiegs- und Abfallzeit sind auch andere Pulsparameter wichtig, um die Form eines Pulses zu definieren: Pulsbreite, Periode, PRF, Tastverhältnis, Ausschaltzeit, Wellenformmittelwert, Pulsmittelwert, Pulsspitze, Overshoot, Droop, Pulsspitzenleistung, Pulsbasisleistung und Flankenverzögerung. Die Prüfgeräte können diese wichtigen Impulsmessungen automatisch in ihrer Steuerungs-Software anbieten.

Crest-Faktor und CCDF für Rausch-Radar

Der Crest-Faktor, auch Spitzenwert-zu-Mittelwert-Leistungsverhältnis (PAPR) genannt, ist das Verhältnis zwischen der Spitzenleistung und der Durchschnittsleistung eines Signals. AWGN-Wellenformen, die im Rauschradar verwendet werden, weisen eine relativ niedrige Durchschnittsleistung mit gelegentlichen hohen Leistungsspitzen auf, was bedeutet, dass die Crest-Faktor-Werte oft hoch sind.

Hohe Scheitelfaktoren können den linearen Betrieb von Radar-Verstärkern beeinträchtigen. Nichtlineare, komprimierte Verstärker können das Signal so stark verzerren, dass Empfangssysteme verwirrt werden und die Zielerfassung eingeschränkt wird. Außerdem ist es für feindliche Sensoren wahrscheinlicher, Übertragungen aufgrund von Signalüberschwngungen und Intermodulationsverzerrungen (IMD), die durch die Nichtli-

nearität des Radar-Verstärkers entstehen, abzufangen, obwohl diese eigentlich vom Rauschen verdeckt sein sollten.

Spitzenleistungssensoren können die Nichtlinearität des Verstärkers und die Kompression mithilfe von Crest-Faktor-Messungen und durch die Erstellung von CCDF-Kurven (Complementary Cumulative Distribution Function) charakterisieren. Ein CCDF-Diagramm liefert eine statistische Analyse der Crest-Faktoren und zeigt den prozentualen Anteil der Zeit oder die Wahrscheinlichkeit (y-Achse), dass der Crest-Faktor eines Signals gleich oder größer als ein bestimmter Crest-Faktor-Wert (x-Achse) ist. Die Eingangs- und Ausgangs-CCDF-Kurven von linearen Radar-Verstärkern sind nahezu identisch (Bild 9a), während bei nichtlinearen Radarverstärkern eine Verringerung des Crest-Faktors des Ausgangssignals zu beobachten ist (b).

Fortschrittliche Radar- und ECM-Systeme von heute

Testgeräte, die von fortschrittlicher Mess- und Steuerungssoftware unterstützt werden, können Signalverzerrungen aufdecken, variable PRF erfassen, Impulsabstände und -treue messen und Verstärkerkompression für moderne Radar-Systeme identifizieren. Mit branchenführenden Testinstrumenten können Radar- und ECM-Systeme weiterhin die höchsten Leistungsstandards erreichen. ◀

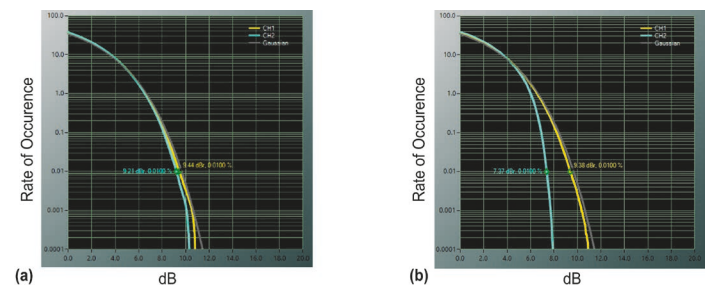


Bild 9: CCDF-Darstellung, die die Linearität des Radarverstärkers bestätigt – der Eingangs-Crest-Faktor beträgt 9,4 dB und der Ausgangs-Crest-Faktor 9,2 dB mit einem Wahrscheinlichkeitsprozentsatz von 0,01% von Interesse (a) und CCDF-Darstellung, die die Nichtlinearität des Radar-Verstärkers offenbart – der Eingangs-Crest-Faktor beträgt 9,4 dB und der Ausgangs-Crest-Faktor 7,4 dB mit einem Wahrscheinlichkeitsprozentsatz von 0,01% von Interesse (b)