

# Verfahren zur Messung des Phasenrauschens



Das Phasenrauschen kann entweder mit herkömmlichen Spektrumanalysatoren oder mit speziellen Phasenrauschanalytoren gemessen und analysiert werden.

## Überblick über das Spektralanalysator-Verfahren

Die Methode des Spektralanalysators ist die älteste, einfachste und am weitesten verbreitete Methode zur Messung des Phasenrauschens. Das grundlegende Verfahren beginnt mit der Messung der Trägerleistung ( $P_c$ ) des zu prüfenden Geräts in dBm. Der nächste Schritt besteht darin, sich zu einem bestimmten Frequenzversatz vom Träger zu bewegen – das heißt, zu einem Punkt im Phasenrausch-Seitenband.

Die Rauschleistung ( $P_n$ ), die innerhalb einer Bandbreite von einem Hertz enthalten ist, wird dann an diesem Offset-Punkt gemessen. Subtrahiert man  $P_c$  von  $P_n$ , dann erhält man das Phasenrauschen in dBc/Hz bei dem gegebenen Offset. Diese Methodik ist in Bild 1 dargestellt. In fast allen Fällen wird diese Prozedur bei verschiedenen Offsets vom Träger wiederholt, wobei die Ergebnisse grafisch und/oder als einzelne Punktrauschwerte dargestellt werden.

Bei der Messung des Phasenrauschens mit einem Spektralanalysator müssen jedoch zwei zusätzliche Schritte durchgeführt werden, um genaue Messwerte zu gewährleisten: Normierung und Formkorrektur

### Normierung

Das Phasenrauschen wird als die in einer Bandbreite von 1 Hz enthaltene Rauschleistung angegeben. Spektralanalysatoren messen die Leistung mit einem Filter mit einer optimalen Auflösungsbreite (RBW), und bei den meisten Spektralanalysatoren ist das zur Leistungsmessung verwendete Filter breiter als 1 Hz. Daher muss die mit diesen breiteren RBW-Filtern gemessene Rauschleistung auf eine Bandbreite von 1 Hz normiert werden. Diese Normierung erfolgt durch Verringerung des gemessenen Rauschleistungswertes um  $N$  dB, wobei  $N = 10 \log(\text{RBW in Hz})$  ist. Wenn beispielsweise die mit einem Filter mit einer Auflösungsbreite von 3 kHz gemessene Rauschleistung -90 dBm beträgt

(Bild 2), würde die normierte Rauschleistung bei 1 Hz -124,77 dBm betragen:  $-90 - 10 \log(3000)$

In Bild 2 wurde die Auflösungsbreite als Rechteck dargestellt. In der Praxis sind Auflösungsbreiten-Filter jedoch nicht vollkommen rechteckig, sondern haben in der Regel eine Gauß-Form oder eine ähnliche Form, wie in Bild 3 dargestellt. Daher müssen zusätzlich zur Normierung der Bandbreite auch Korrekturen erfolgen, um die

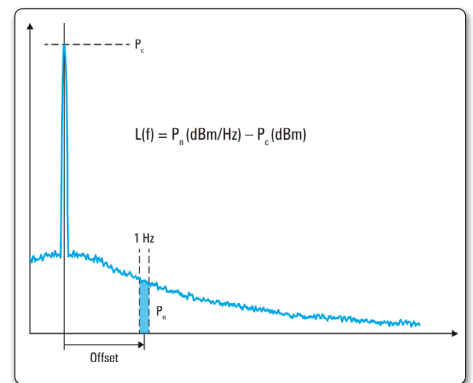


Bild 1: Spektralanalysator-Methode

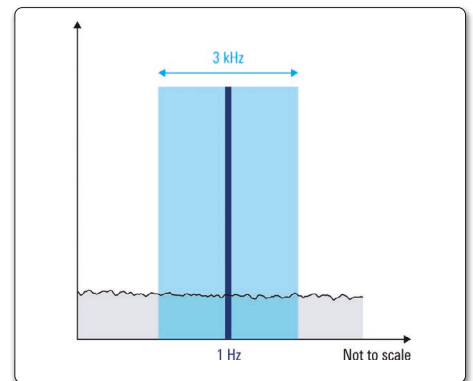


Bild 2: Normalisierung der Rauschleistung auf 1 Hz Bandbreite

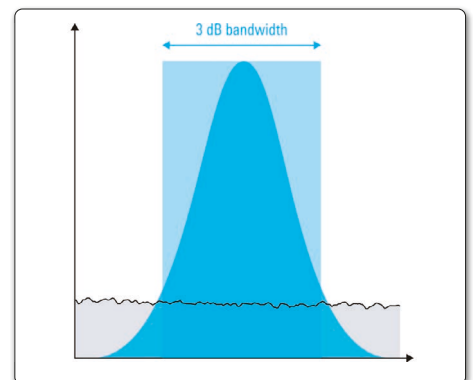


Bild 3: Formkorrektur

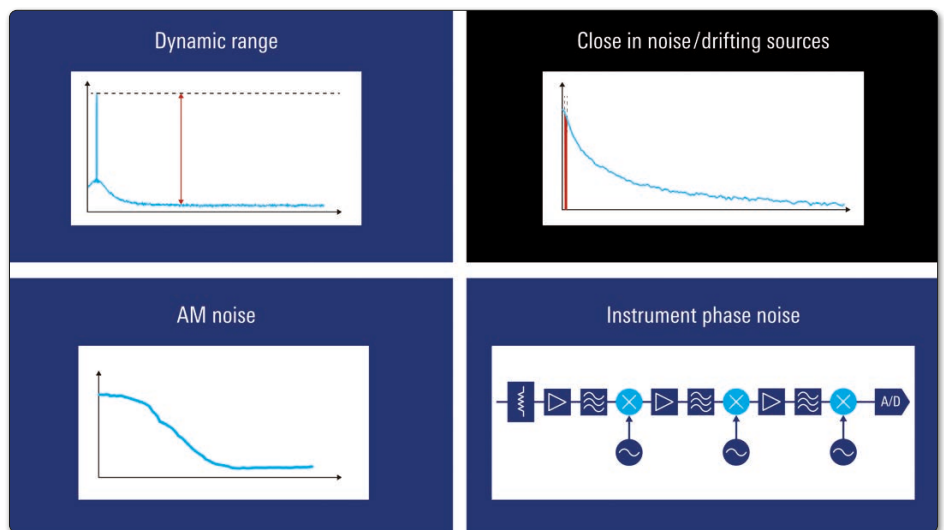
Autor:  
Paul Denisowski  
Rohde & Schwarz  
GmbH & Co. KG  
www.rohde-schwarz.com

Form des Filters zu kompensieren. Bei einer bestimmten Auflösungsbandbreite hat ein Gauß-Filter eine größere Rauschbandbreite als seine Nennbandbreite (3 dB). Daher muss die Filterbandbreite vor der Normierung mit einem Skalierungs- oder Korrekturfaktor multipliziert werden. Dieser ist abhängig von der Implementierung. Mit anderen Worten: Der Wert hängt von der spezifischen Filterimplementierung ab; nicht alle Gauß-Filter mit der gleichen Auflösungsbandbreite haben die gleiche Form. Die Formkorrektur für das in Bild 3 gezeigte 3-kHz-Filter beträgt beispielsweise 1,165, sodass bei der Berechnung von N die nominale Filterbreite mit 1,165 multipliziert wird, bevor der Logarithmus gebildet wird. Beachten Sie, dass die meisten Spektrumanalysatoren beide Arten der Korrektur – Bandbreite und Form – mithilfe einer speziellen Rauschmarkierungsfunktion automatisch anwenden.

### Messung mit einem Spektrumanalysator

Diese Art von Rauschmarker könnte für manuelle Phasenrauschmessungen verwendet werden. Der Marker würde einfach am gewünschten Offset platziert werden, um den normierten und formkorrigierten Phasenrauschwert zu erhalten. Wie die meisten anderen manuellen Verfahren ist jedoch auch die Messung des Phasenrauschens auf diese Weise sowohl zeitaufwändig als auch fehleranfällig. Viele moderne Spektrumanalysatoren verfügen über eine Funktion zur Messung des Phasenrauschens, die den Prozess automatisiert und die Messung über einen benutzerdefinierten Bereich von Frequenz-Offsets wiederholt.

Spektrumanalysatoren sind Allzweckinstrumente. Der größte Vorteil der Verwendung eines Spektrumanalysators für die Messung des Phasenrauschens besteht darin, dass er zusätzliche nützliche Funktionen für die Charakterisierung von Quellen bietet, wie



**Bild 4: Herausforderungen/Grenzen der Spektrumanalysator-Methode**

z.B. die Messungen von Störsignalen oder Einschwingzeiten.

### Herausforderungen/Einschränkungen der Spektrumanalysator-Methode

Für viele Anwendungen ist der traditionelle Ansatz des Spektrumanalysators ausreichend, um genaue und wiederholbare Phasenrauschmessungen zu erhalten. Es ist jedoch wichtig, sich einiger Herausforderungen oder Einschränkungen bei der Verwendung der Spektrumanalysatormethode bewusst zu sein. Dazu gehören der dynamische Bereich, nahegelegene Rausch- oder Driftquellen, Amplitudenrauschen und der Beitrag des Phasenrauschens des Instruments (Bild 4).

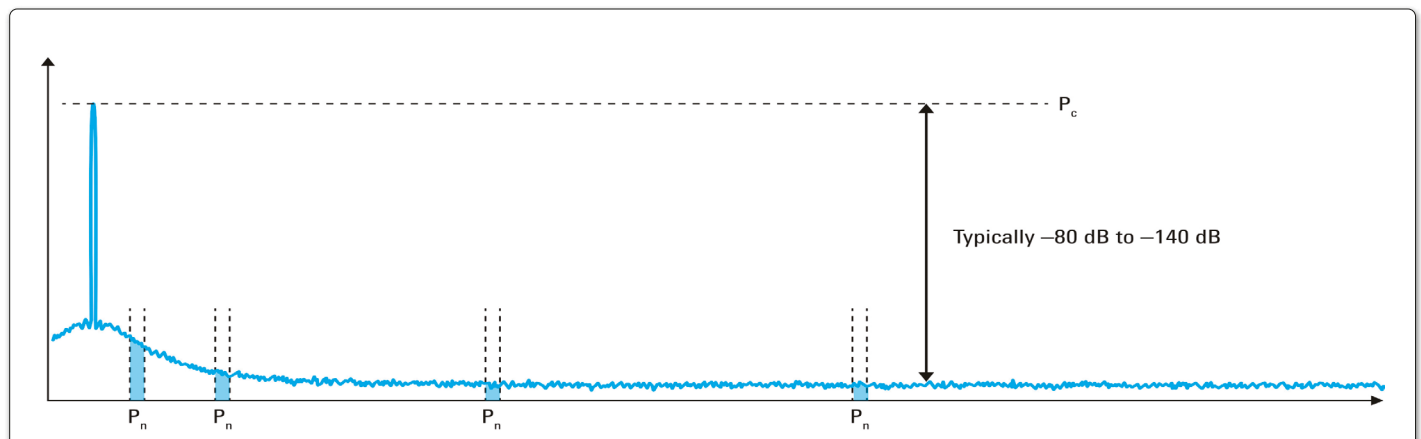
### Dynamischer Bereich

Bei der Methode des Spektrumanalysators wird das Phasenrauschen berechnet, indem sowohl die Leistung des Trägers als auch die Rauschleistung bei verschiedenen Abständen zum Träger gemessen wird. Der Unter-

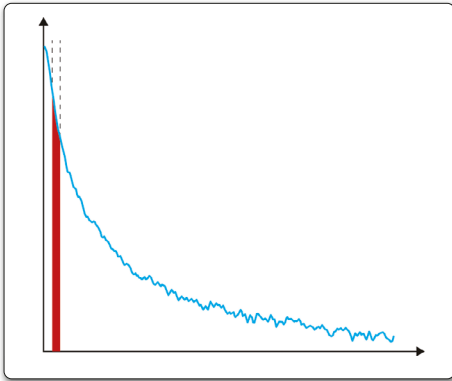
schied zwischen der gemessenen Trägerleistung und der gemessenen Rauschleistung ist in der Regel recht groß, typischerweise von 80 bis über 140 dB. Für genaue Phasenrauschmessungen muss der Analysator daher in der Lage sein, sowohl sehr hohe als auch sehr niedrige Leistungen gleichzeitig zu messen. Daher ist der Dynamikbereich – die Differenz zwischen den größten und den kleinsten Signalen, die genau gemessen werden können – ein wichtiger Faktor bei der Auswahl eines Spektrumanalysators für Phasenrauschmessungen (Bild 5).

### Nahes Phasenrauschen/driftende Quellen

Die Messung des Phasenrauschens bei sehr kleinen Abständen zum Träger („close-in“-Phasenrauschen) ist aus zwei Gründen eine Herausforderung. Erstens ist eine sehr schmale Auflösungsbandbreite erforderlich, um zu vermeiden, dass sowohl die Trägerleistung als auch die Rauschleistung gemessen wird. Die Tatsache, dass Auflösungsbandbreiten-Filter eher eine Gaußsche als eine



**Bild 5: Dynamikbereich und das Spektrumanalysatorverfahren**



**Bild 6: Messung des Phasenrauschens im Nahbereich**

perfekt rechteckige Form haben, erschwert dieses Problem zusätzlich. Eine weitere Herausforderung ist die Messung des Phasenrauschens eines Trägers, der leicht in der Frequenz driftet, obwohl einige Analysatoren in der Lage sind, einen kleinen Teil der Drift zu verfolgen und automatisch zu kompensieren.

Moderne Spektrumanalysatoren können einige dieser Probleme vermeiden, indem sie das Phasenrauschen mit sogenannten I/Q-Daten messen. I/Q-Daten sind eine digitale Darstellung des Spektrums und werden mithilfe der schnellen Fourier-Transformation gewonnen. Die Messung mit I/Q-Daten kann sowohl die Stabilität als auch die Genauigkeit von Phasenrauschmessungen verbessern, insbesondere bei nahegelegenen oder driftenden Quellen (Bild 6).

### Amplitudenrauschen

Der gleiche I/Q-Modus ist auch bei Amplitudenrauschen nützlich. Bei der Messung des Phasenrauschens wird davon ausgegangen, dass die Rauschseitenbänder um den Träger herum größtenteils auf Phasenrauschen zurückzuführen sind, wobei ein kleinerer Anteil an Amplitudenrauschen beigemischt ist. Im Allgemeinen ist dies eine gültige Annahme: Das AM-Rauschen ist bei realen Geräten in der Regel viel geringer als das Phasenrauschen. In einigen Fällen trifft diese Annahme jedoch nicht zu, und wenn eine relativ große Menge an Amplitudenrauschen vorhanden ist, liefert die Methode des Spektrumanalysators möglicherweise keine genauen Ergebnisse, da diese Methode normalerweise nicht zwischen AM- und Phasenrauschen unterscheiden kann.

Getrennte Messungen von AM- und Phasenrauschen erfordern in der Regel die Verwendung eines anderen Instruments, d.h. eines speziellen Phasenrauschanalysators, aber ein herkömmlicher Spektrumanalysator kann einen Teil des AM-Rauschens zurückweisen, wenn die Messung mit I/Q-Daten

durchgeführt wird. Es sollte auch beachtet werden, dass der Einfluss des AM-Rauschens in der Regel bei höheren Frequenzabweichungen vom Träger am größten ist, sodass die Vorteile der Verwendung von I/Q-Daten mit zunehmender Abweichung vom Träger immer deutlicher werden.

### Phasenrauschen des Instruments

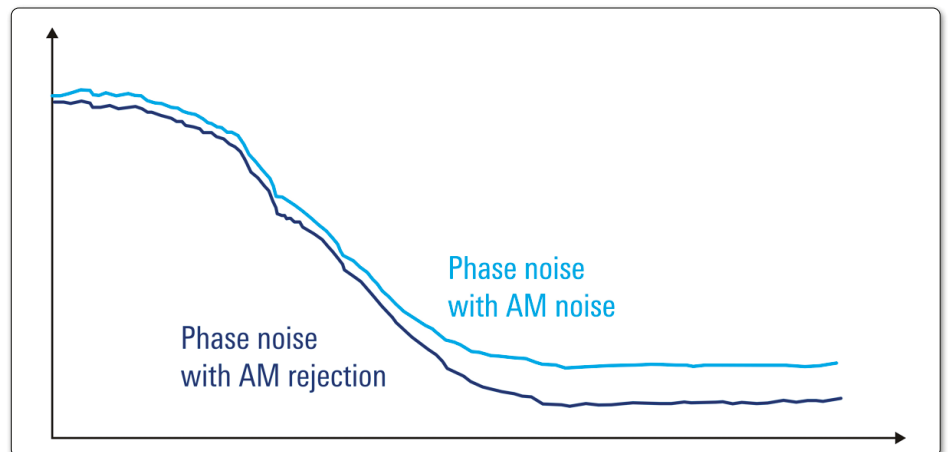
Ein weiterer Aspekt ist das Phasenrauschen des Analysators selbst. Spektrumanalysatoren enthalten in der Regel mehrere LOs. Wie alle anderen Oszillatoren haben auch die in einem Spektrumanalysator verwendeten lokalen Oszillatoren ihr eigenes Phasenrauschen, und das Phasenrauschen der LOs im Spektrumanalysator wird zum Phasenrauschen des gemessenen Signals addiert, wenn es verschiedene Stufen im Analysator durchläuft.

Eine der Grenzen der Spektrumanalysator-Methode ist daher die Schwierigkeit, das im Originalsignal vorhandene Phasenrauschen von dem durch das Messgerät hinzugefügten Phasenrauschen zu trennen oder zu

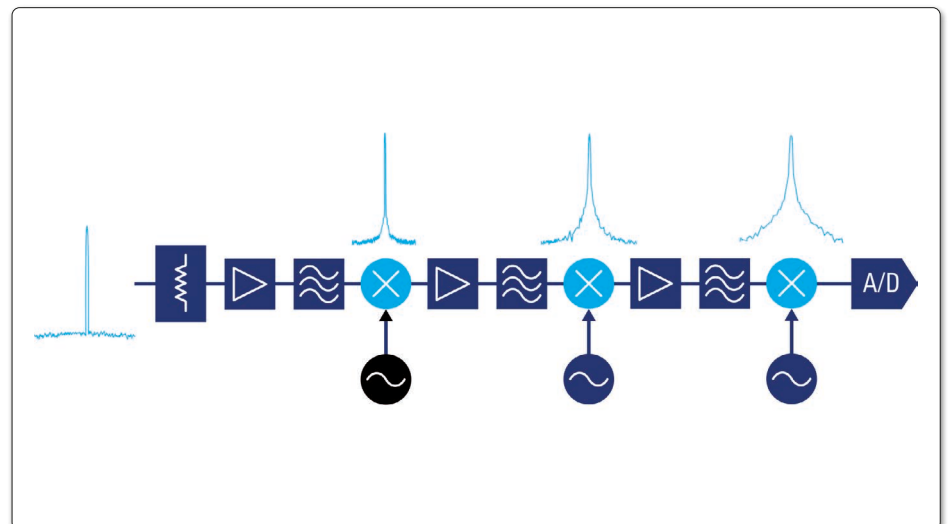
unterscheiden (Bild 8). Die einfachste und gebräuchlichste Methode, dieses Problem zu vermeiden, besteht darin, sicherzustellen, dass der Analysator eine bessere Spezifikation des Phasenrauschens aufweist als das zu prüfende Gerät (DUT). Ein Mindestabstand von 10 dB wird im Allgemeinen als akzeptabel angesehen, aber im Allgemeinen führt ein größerer Abstand zu genaueren Ergebnissen beim Phasenrauschen.

### Kreuzkorrelationsverfahren

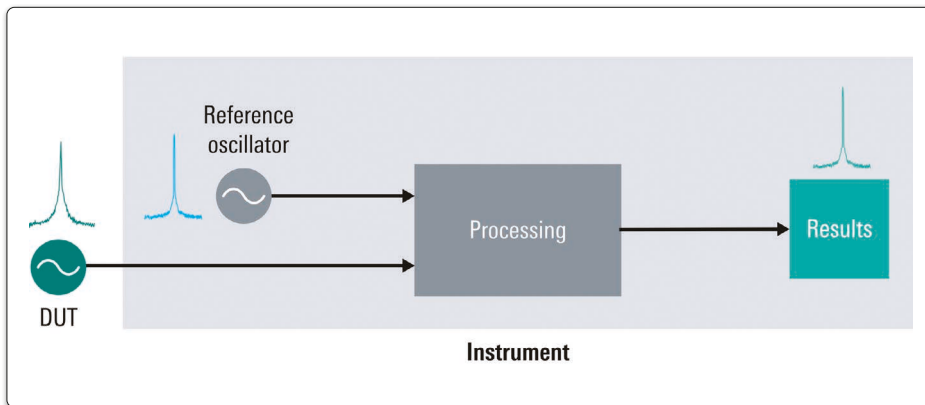
Es gibt viele verschiedene Methoden zur Messung des Phasenrauschens. Einige der gebräuchlichsten Methoden sind die oben beschriebene Spektrumanalysator-Methode, die PLL-Methode und sowohl Phasendetektor- als auch digitale Phasendemodulator-Methoden. Jede dieser Methoden hat unterschiedliche Stärken und Schwächen, aber sie alle haben die gemeinsame Einschränkung, dass das Phasenrauschen des Messgeräts zum Phasenrauschen des zu prüfenden Geräts hinzugefügt wird. Der größte Teil



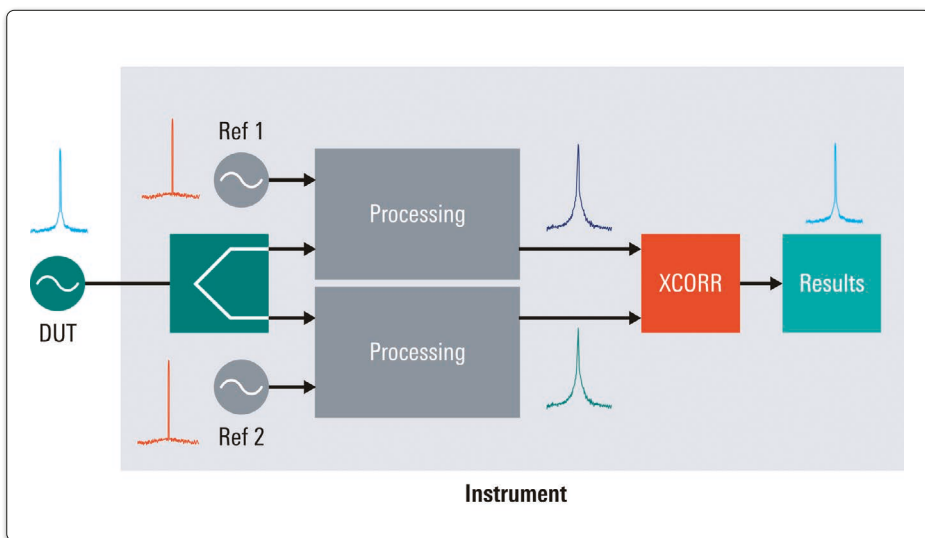
**Bild 7: Phasenrauschen mit und ohne AM-Rauschen**



**Bild 8: Beitrag des Phasenrauschens des Instruments**



**Bild 9: Vom Instrument hinzugefügtes Phasenrauschen**



**Bild 10: Kreuzkorrelation bei Phasenrauschmessungen**

dieses hinzugefügten Rauschens stammt von dem/den Lokal- oder Referenzoszillator(en) des Messgeräts, und dieses Rauschen ist problematisch, weil es die Bestimmung erschwert, wieviel Phasenrauschen im Signal des Prüflings vorhanden ist und wieviel vom Messgerät hinzugefügt wird.

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, besteht die herkömmliche Methode zur Lösung dieses Problems darin, ein Messgerät zu verwenden, das ein „besseres“ Phasenrauschen als das Messobjekt aufweist, wobei „besser“ in der Regel als mindestens 10 dB oder mehr definiert wird. Bei der Messung moderner Prüflinge mit sehr geringem Phasenrauschen ist dieser Ansatz jedoch unter Umständen nicht mehr ausreichend.

### Phasenrauschen des Prüflings gegenüber Phasenrauschen des Instruments

Bild 9 veranschaulicht das Problem des Phasenrauschens der Instrumente. Das zu prüfende Gerät weist ein gewisses Phasenrauschen auf, das gemessen werden soll.

Innerhalb des Messgeräts wird dieses Signal mit einer der verschiedenen Methoden zur Messung des Phasenrauschens verarbeitet. Unabhängig von der verwendeten Methode erfordert die Verarbeitung oder Messung des Signals mindestens einen Lokal- oder Referenzoszillator, dessen Phasenrauschen mit dem Phasenrauschen des Prüflings kombiniert wird. Je nach den relativen Pegeln des Phasenrauschens im Prüfling und im Referenzoszillator sind die Ergebnisse der Phasenrauschmessung möglicherweise keine genaue Messung des Phasenrauschens des Prüflings.

### Verbesserung von Phasenrauschmessungen

Die Verwendung eines Geräts, dessen lokale Oszillatoren ein geringes Phasenrauschen aufweisen, und die Anwendung einer modernen Methode zur Messung des Phasenrauschens, wie z.B. der digitalen Phasendemodulation, kann die Ergebnisse des Phasenrauschens erheblich verbessern, doch reicht dies möglicherweise nicht aus,

um sehr „leise“ Oszillatoren zu messen. In diesen Fällen wäre es besonders vorteilhaft, den Einfluss des Phasenrauschens der Instrumente zu beseitigen oder zumindest zu verringern. Dies würde die Empfindlichkeit erhöhen, d.h. die Messung von sehr geringem Phasenrauschen ermöglichen. Seit den 1990er Jahren ist die Kreuzkorrelation die wichtigste Methode, um die Auswirkungen des Phasenrauschens von Instrumenten zu verringern oder zu beseitigen.

### Über die Kreuzkorrelation

Sie ist ein Maß für die Ähnlichkeit zwischen zwei verschiedenen Reihen oder Signalen und kann auch die für eine maximale Ähnlichkeit erforderliche Zeitverzögerung angeben. Die Kreuzkorrelation wird in vielen verschiedenen Anwendungen der Signalverarbeitung eingesetzt, z.B. bei Radar, Peilung usw. Da die Kreuzkorrelation die Ähnlichkeiten zwischen zwei Signalen identifiziert, kann sie auch dazu verwendet werden, die „Unterschiede“ zwischen Datensätzen zu reduzieren oder zu entfernen. Mit anderen Worten, die Kreuzkorrelation kann verwendet werden, um Daten in „korrelierte“ oder ähnliche Teile und „unkorrelierte“ oder unähnliche Teile zu trennen. Darüber hinaus kann die Kreuzkorrelation als iterativer oder wiederholter Prozess durchgeführt werden: Durch wiederholte Kreuzkorrelationen werden die korrelierten und unkorrelierten Elemente in zwei Datensätzen deutlicher voneinander getrennt.

### Kreuzkorrelation bei Phasenrauschmessungen

Da bei der Kreuzkorrelation die Ähnlichkeit zweier unterschiedlicher Signale gemessen wird, besitzt das Messgerät einen zweiten Messpfad. Das Signal des zu prüfenden Geräts wird geteilt und von diesen beiden, nominell „identischen“ Pfaden verarbeitet. Da das Signal des Prüflings einfach geteilt wird, bleibt das Phasenrauschen des Prüflings auf jedem Pfad gleich oder „korreliert“. Jeder Pfad verwendet jedoch seinen eigenen unabhängigen lokalen Oszillator zur Messung des Phasenrauschens, und das von diesen lokalen Oszillatoren verursachte Phasenrauschen ist daher auf jedem Pfad unkorreliert oder „anders“. Daher sind die Messergebnisse jedes Pfades eine Kombination aus dem korrelierten Phasenrauschen des Prüflings und dem unkorrelierten Phasenrauschen des lokalen Oszillators. Wenn diese beiden Pfade in eine Kreuzkorrelationsfunktion eingespeist werden, wird das unkorrelierte Instrumentenrauschen entfernt oder reduziert, sodass nur das korrelierte Phasenrauschen des Messobjekts übrig bleibt (Bild 10).

Da zwei getrennte Pfade erforderlich sind und zwei Datensätze verglichen werden müssen, kann die Kreuzkorrelation nur in speziellen Phasenrauschanalytoren und nicht in herkömmlichen Einpfadspektrumanalysatoren implementiert werden.

## Über die Korrelationszählung

Es sei daran erinnert, dass die Kreuzkorrelation iterativ oder wiederholt durchgeführt werden kann. Wenn die Anzahl der Korrelationen,  $N$ , erhöht wird, verringert sich der Anteil des unkorrelierten Instrumentenrauschens in den Messergebnissen. Dies wiederum führt zu einer höheren Empfindlichkeit oder einem niedrigeren Grundrauschen, was die genaue Messung selbst sehr geringer Phasenrauschpegel ermöglicht. Die durch die Erhöhung der Anzahl der Korrelationen erzielte Verbesserung ist logarithmisch und folgt der Formel  $5 \log_{10}(N)$  dB. Jedes Mal, wenn die Anzahl der Korrelationen um eine Größenordnung erhöht wird, steigt die Empfindlichkeit um 5 dB. So führen beispielsweise 10.000 Korrelationen zu einer Verbesserung um 20 dB.

Mit zunehmender Anzahl der Korrelationen erhöht sich auch die für die Messung benötigte Gesamtzeit, aber die Vorteile der Kreuzkorrelation überwiegen normalerweise bei weitem den relativ geringen Anstieg der Messzeit. In der Regel liegt die Anzahl der Korrelationen, die bei Phasenrauschmessungen verwendet werden, im Bereich von mehreren Tausend bis zu einer Million.

## Visualisierung der Kreuzkorrelationsverstärkung

Die nächste Frage ist, wie viele Kreuzkorrelationen durchgeführt werden sollen. Die Anzahl der Korrelationen sollte hoch genug sein, um das Grundrauschen des Geräts unter den Pegel des Phasenrauschens des Messobjekts zu senken, wobei idealerweise ein gewisser Spielraum verbleiben sollte. Dadurch wird sichergestellt, dass nur das Phasenrauschen des Messobjekts gemessen wird.

Zusätzlich zur gemessenen Phasenrauschkurve können einige Phasenrauschanalytoren auch die so genannte Kreuzkorrelationsverstärkung anzeigen, mit der visuell überprüft werden kann, ob eine ausreichende Messspanne vorhanden ist. In Bild 11 zeigt der graue Bereich unter der Phasenrauschkurve die Kreuzkorrelationsverstärkung an. Je höher die Kurve über diesem Bereich liegt, desto genauer kann das Phasenrauschen des Prüflings getrennt vom Instrumentenrauschen gemessen werden. Wenn die Kurve zu nahe an diesem Bereich liegt oder ihn berührt, sollte das Gerät so

konfiguriert werden, dass es eine höhere Anzahl von Kreuzkorrelationen durchführt, um die Messuntergrenze weiter zu senken. In Bild 11 wird durch die Erhöhung der Anzahl der Korrelationen von 100 auf 10.000 die Messspanne deutlich verbessert, insbesondere für das Phasenrauschen bei nahe beieinander liegenden Offsets.

## Zusammenfassung

Das Phasenrauschen kann entweder mit herkömmlichen Spektrumanalysatoren oder mit speziellen Phasenrauschanalytoren gemessen werden. Der Hauptvorteil von Spektrumanalysatoren besteht darin, dass sie universell einsetzbar sind und neben dem Phasenrauschen auch für eine Vielzahl anderer Messungen verwendet werden können. Die Methode der Spektrumanalysatoren hat jedoch gewisse Einschränkungen, die sie für die Messung sehr geringer Pegel des Phasenrauschens oder des Phasenrauschens im Nahbereich ungeeignet machen können. Phasenrausch-Analysatoren verwenden verschiedene Arten von Spezialhardware zur Messung des Phasenrauschens, aber ihr größter Vorteil ist die Möglichkeit, die Kreuzkorrelationsmethode zu verwenden.

Durch die Verwendung eines zweiten Messpfads reduziert die Kreuzkorrelationsmethode den Einfluss des Phasenrauschens des Geräts erheblich und ermöglicht die genaue Messung sehr geringer Phasenrauschpegel. In einigen Fällen können Phasenrauschanalytoren auch viele herkömmliche Spektrumanalysator-Funktionen implementieren, so dass sie sowohl eine erhöhte Empfindlichkeit bei der Messung des Phasenrauschens als auch Standard-Spektrumsmessungen in einem einzigen Gerät bieten.

## Wer schreibt:

Paul Denisowski ist Produktmanagement-Ingenieur bei Rohde & Schwarz. Er ist spezialisiert auf Interferenzsuche, Peilung und Mobilfunktests. Er verfügt über mehr als 20 Jahre Erfahrung in der Test- und Messtechnik und war zuvor sowohl im Außendienst als auch in der Forschung und Entwicklung bei HP/Agilent, Fujitsu und Alcatel tätig. Paul hat einen Master-Abschluss in Elektrotechnik von der North Carolina State University und war Gastdozent am Tokyo Institute of Technology. ◀

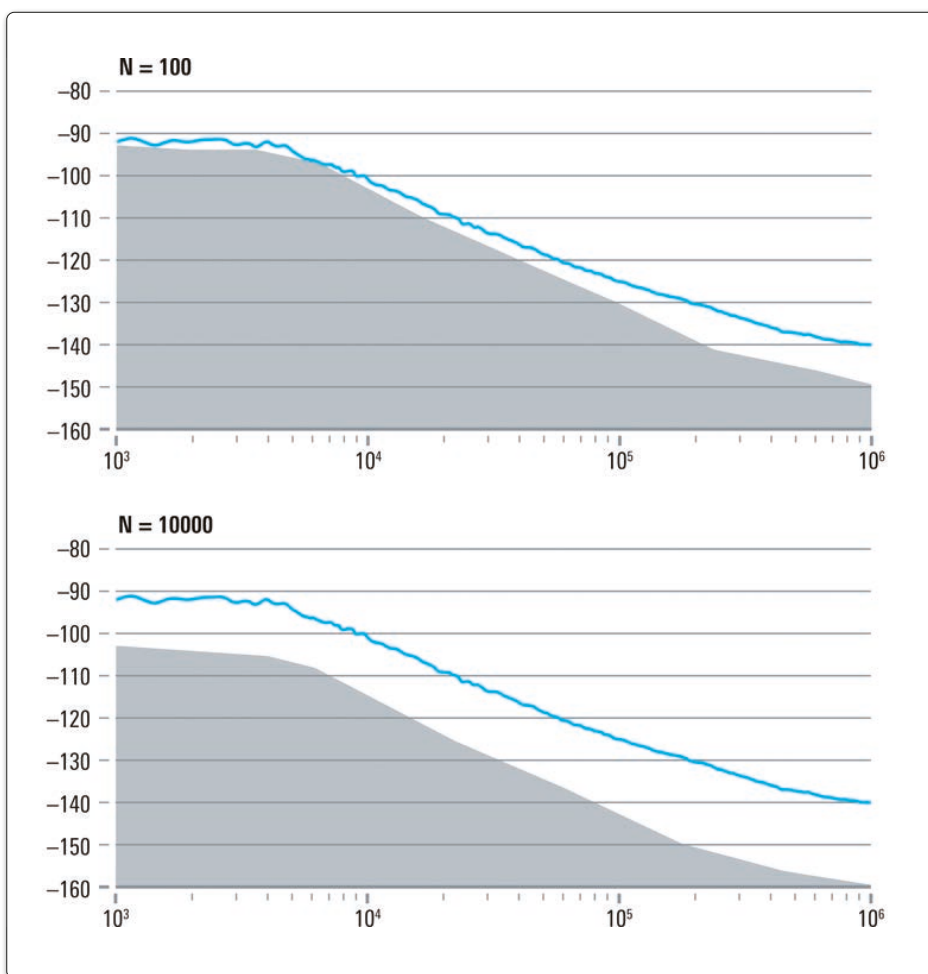


Bild 11: Visualisierung der Kreuzkorrelationsverstärkung