

TOI auf Knopfdruck: Schnelle und präzise Messungen mit modernen Signalanalysatoren

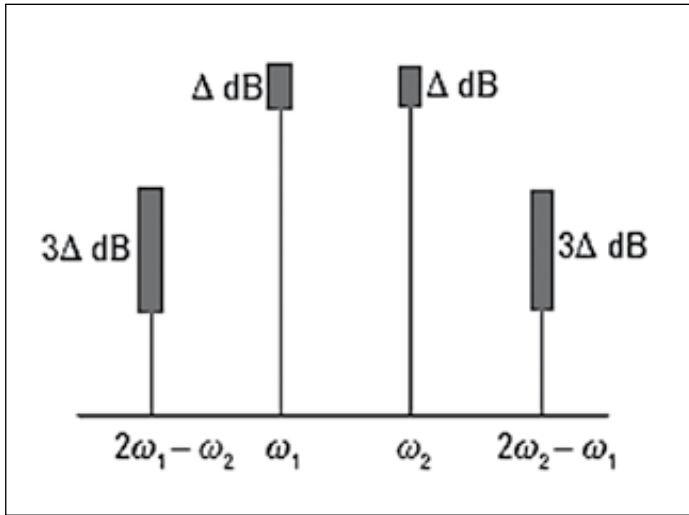


Bild 1: Grundschwingungen und Intermodulationsprodukte.

Das Einrichten von Messungen zur Ermittlung des Intercept Points dritter Ordnung kann recht frustrierend sein. Es gilt, einen ausgewogenen Kompromiss zwischen Dynamikbereich, Messzeit, Wiederholbarkeit und Messunsicherheit zu finden, wobei die Messunsicherheiten auch noch von den Einstellungen des Spektrumanalysators abhängen und sich mit diesen ändern. Moderne Messgeräte wie die Signalanalysatoren der Serie X von Agilent Technologies sind in der Lage, die optimalen Einstellungen automatisch vorzunehmen, und liefern schnelle und präzise Messungen mit minimaler Streuung der Ergebnisse.

Zu den häufiger vorkommenden Messaufgaben für einen HF-/Mikrowellen-Spektrumanalysator zählt die Ermittlung des Intercept Points dritter Ordnung, kurz TOI (Third Order Intercept). Der Prüfling (Device under Test – DUT) ist dabei oft ein Verstärker. Der TOI ist ein Parameter, der bestimmt wird,

um die Linearität von Komponenten einer Schaltung abzuschätzen. Nichtlineare Effekte können in manchen Anwendungen – beispielsweise bei digital modulierten Signalen – erhebliche Störungen verursachen.

Der TOI ist nicht direkt messbar, sondern muss auf der Basis von Messungen errechnet werden. Die Ermittlung des TOI kann durchaus eine Herausforderung sein, weil die Messunsicherheit

auch von den Einstellungen des Spektrumanalysators abhängen und sich mit diesen verändern. Zur Optimierung dieser Einstellungen in der traditionellen manuellen Labormesstechnik muss der Ingenieur aufwändig zwischen Dynamikbereich, Messzeit, Wiederholgenauigkeit und Messunsicherheit abwägen. Aber es geht auch einfacher!

Manuelle Messoptimierung

Zur TOI-Bestimmung werden zwei Sinus-Signale der Frequenzen ω_1 und ω_2 kombiniert und der relative Pegel der beiden Intermodulationsprodukte dritter Ordnung bei den Frequenzen $2\omega_1 - \omega_2$ und $2\omega_2 - \omega_1$ gemessen. Steigert man die Amplitude der Grundschwingungen um 1 dB, wächst der absolute Pegel der Intermodulationsprodukte dritter Ordnung um 3 dB, der relative Pegel (dBc) der Intermodulationsprodukte um 2 dB (Bild 1).

Misst man bei einem gegebenen Ausgangspegel des Prüflings einen einzelnen relativen Verzerrungspegel, so lässt sich der theoretische Punkt errechnen,

an dem die Leistung der Intermodulationsprodukte exakt der Leistung der Grundschwingung entspricht – der TOI. Mathematisch gilt Gleichung 1:

$$TOI = A_{fund} - d/2$$

Dabei ist A_{fund} = der Pegel der Grundwelle in dBm und d die Differenz zwischen Grundwelle und Intermodulation in dB.

Die Gerade lässt sich mit einem Anstiegsfaktor 2 darstellen und repräsentiert die relative Verzerrung basierend auf der Ausgangsleistung des Prüflings. Bild 2 zeigt die grafische Darstellung des TOI für einen Prüfling mit Intermodulationsprodukten von -64 dBc bei einem Ausgangspegel der Grundwelle von -10 dBm. Das Beispiel ergibt einen TOI von +22 dBm.

Aber auch der Spektrumanalysator produziert intern Intermodulationsprodukte dritter Ordnung, und zwar auf exakt denselben Frequenzen, wie sie auch der Prüfling erzeugt. Diese Intermodulationsprodukte beziehen sich aber auf den Mischpegel, nicht auf die Ausgangsleistung des Prüflings. Dieser

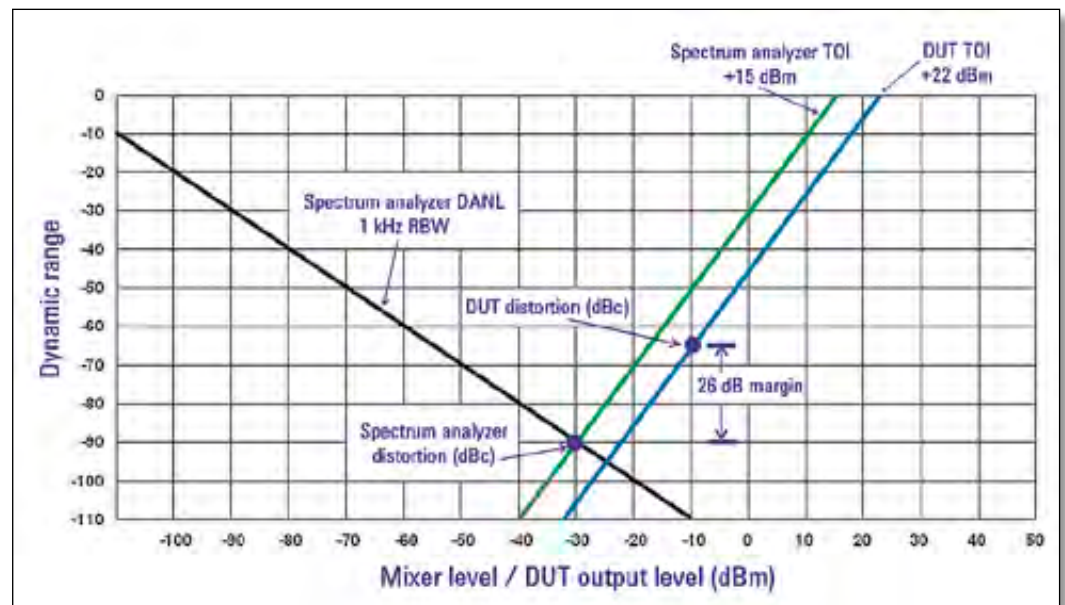


Bild 2: Intercept Point dritter Ordnung des Prüflings (DUT) +22 dBm.

Bob Nelson
Peter Mosshammer
Agilent Technologies
www.agilent.com

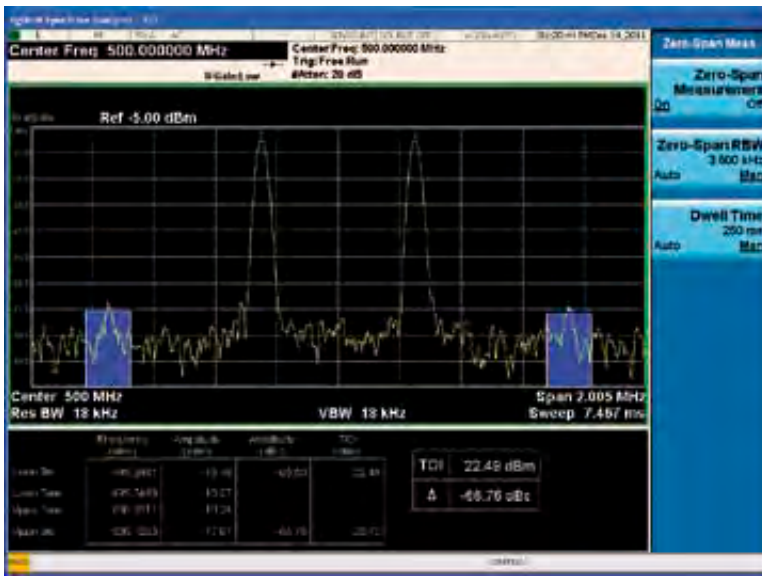


Bild 3; Automatisierte TOI-Messung "auf Knopfdruck", schnelle Geräte-Einstellung bei optimaler Genauigkeit und Dynamik und Messzeit

Agilent Technologies verwenden dieses Leistungsmerkmal zusammen mit der RMS-Quadratmitelung (Root Mean Square) der Leistung, um geringste Messunsicherheiten bei optimaler Messzeit zu erreichen.

Die Alternative

Eine automatisierte TOI-Messung "auf Knopfdruck", wie sie die Signalanalytoren der Serie X von Agilent bieten, ermöglicht dem Anwender eine schnelle optimale Einstellung des Analyzers, um beste Genauigkeit und Dynamik zu erzielen, ohne die vielen Nachteile des traditionellen Optimierens von Hand in Kauf nehmen zu müssen. Mit dem Softkey Auto Tune bestimmt der Anwender automatisch die Mittenfrequenz und den Wobbelbereich. Die optimale Abschwächung stellt der Softkey Adjust Attenuation for Minimum Clip ein. Als nächstes werden die beiden Grundwellen gemessen und der relative Pegel der Intermodulationsprodukte angezeigt. Abschließend errechnet und präsentiert das Gerät das TOI-Ergebnis (Bild 3).

Das Zero-Span-Verfahren ermöglicht Messungen mit großem Dynamikbereich bei optimaler Messgeschwindigkeit. Das Gerät tastet den gesamten Bereich mit großer Auflösungsbandbreite ab und misst die Amplituden der beiden Grundwellensignale. Als nächstes misst es die beiden Intermodulationsprodukte mit einer vom Anwender wählbaren niedrigen Auflösungsbandbreite. Bei dieser Zero-Span-Messung verbleibt das Gerät über eine ebenfalls vom Anwender wählbare Verweilzeit auf einer Frequenz. Längere Verweilzeiten vergrößern die Anzahl der zum Mitteln verfügbaren Messungen (Samples) und vermindern die Streuung der Messergebnisse.

Traditionelle Mittelungsmethoden vergeuden Messzeit durch das überflüssige Wobbeln mit niedriger Auflösungsbandbreite im Bereich zwischen den Intermodulationsprodukten. Das Zero-Span-Verfahren ist hier sicherlich das Optimum. ◀

Unterschied ermöglicht die Untersuchung eines Prüflings mit einem wesentlich höheren TOI als dem des Spektrumanalysators. Ein Beispiel des relativen Pegels der Intermodulationsprodukte bezogen auf den Mischerpegel eines Spektrumanalysators mit einem TOI von +15 dBm ist ebenfalls in Bild 2 zu sehen.

Der Mischerpegel gemäß Gleichung 2 lässt sich durch Anheben oder Absenken des Eingangsschwächers im Spektrumanalysator einstellen. Im Idealfall sollten die intern generierten Intermodulationsprodukte sehr viel kleiner als die vom Prüfling erzeugten sein. Wären sie – nur als Beispiel – gleich groß, dann läge die Messunsicherheit je nach der Phasenlage der beiden Signale zueinander zwischen + 6 dB und $-\infty$. Optimal ist der Mischerpegel dann, wenn die vom Spektrumanalysator intern generierten Intermodulationsprodukte seinem Grundrauschen bei einer bestimmten Auflösungsbandbreite (Resolution Bandwidth – RBW) entsprechen. Der Verlauf des Rauschpegels DANL (Displayed Average Noise Level) bei 1 kHz Auflösungsbandbreite über dem Mischerpegel in Bild 2 zeigt die Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses durch Anheben des Mischerpegels. In diesem Beispiel liefert ein Mischerpegel von -30 dBm ein Signal-Rausch-Verhältnis von -90 dB.

Gleichung 2:

$$\text{Mischerpegel} = \text{Eingangspegel} - \text{externe Dämpfung} - \text{Eingangsabschwächung}$$

Ein Ausgangspegel des Prüflings von -10 dBm mit 20 dB Abschwächung liefert einen Mischerpegel von -30 dBm, wie in Bild 2 zu sehen ist. Die TOI-Kurve für den Spektrumanalysator zeigt, dass die intern generierten Verzerrungsprodukte bezogen auf diesen Mischerpegel bei -90 dBc liegen. Das ermöglicht einen Abstand von 26 dB zwischen den vom Prüfling und den intern generierten Intermodulationsprodukten. Wird zusätzlicher Dynamikbereich benötigt, muss der Mischerpegel durch Anheben der Abschwächung verringert werden. Auch die Auflösungsbandbreite muss verringert werden, um das größere Grundrauschen zu kompensieren. Die Verringerung der Auflösungsbandbreite verlängert jedoch die Messzeit, wie Gleichung 3 zeigt:

$$\text{Wobbelzeit} = K * \text{SPAN} / \text{RBW}^2$$

oder Gleichung 4:

$$\text{Wobbelzeit} = K * \text{SPAN} / (\text{RBW} * \text{VBW}) \text{ für } \text{VBW} < \text{RBW}$$

Dabei ist SPAN das Wobbelband oder der Abtastbereich zwischen Start- und Stopfrequenz, RBW die Auflösungsbandbreite, VBW (Video Bandwidth) die Videobandbreite und K

eine gerätespezifische Konstante des jeweils verwendeten Spektrumanalysators bei bestimmten Einstellungen.

In der Praxis empfiehlt es sich, die interne Abschwächung so lange anzuheben, bis die angezeigten Intermodulationsprodukte ihre Amplitude nicht mehr verändern. Von diesem Punkt an beeinflussen die intern generierten Verzerrungen die Ergebnisse nicht mehr.

Die Varianz der Messergebnisse beruht primär auf einem niedrigen Signal-Rausch-Verhältnis der Verzerrungsprodukte bezogen auf das Grundrauschen des Signalanalytators. Die Wiederholbarkeit lässt sich durch Reduzierung der Auflösungsbandbreite und/oder durch Mittelung verbessern. Üblicherweise lassen sich solche Varianzen durch Trace Averaging oder durch Reduzieren der Videobandbreite (VBW) auf einen Wert kleiner als die Auflösungsbandbreite verringern. Log-Video Averaging ist eine weitere Option. Dieses Verfahren verursacht ein Unterschwingen als Rauschanteil und verbessert so das Signal-Rausch-Verhältnis der Intermodulationsprodukte.

Egal, welcher Weg eingeschlagen wird – er braucht zusätzliche Messzeit. Spektrum- und Signalanalytoren, bei denen sich der Rauschteppich gezielt reduzieren lässt (Noise Floor Extension – NFE) wie der PXA N9030A von