



Woher Störungen kommen

Das Ausgangssignal eines jeden Oszillators enthält unerwünschte Rausch- und Störsignale. Diese können zufällige und/oder deterministische Anteile haben – sowohl im Bereich der Amplitude als auch der Phase des Signals. Auf die Hauptgründe einiger unerwünschter Störsignale wollen wir hier eingehen.

.....
Gerd Reinhold
Produktmarketing für frequenzbestimmende
Produkte (FCP) bei WDI

Phasenrauschen und Jitter sind nicht dasselbe. Jitter beschreibt den Rauschanteil eines Oszillators über die Zeitachse, wohingegen sich Phasenrauschen über den Frequenzbereich definiert. In digitalen Systemen spielt der Jitterwert eine wesentliche Rolle, während in HF-Systemen das Phasenrauschen von Bedeutung ist. Folglich wird ein HF-Entwickler einen Wert für das Phasenrauschen festlegen, der Digitaltechniker dagegen eher einen für den Jitter. Es ist zu beachten, dass Pha-

senrauschen und Jitter zwei miteinander gekoppelte Eigenschaften darstellen. Diese stehen im Zusammenhang mit einem rauschenden Oszillator.

Daher nimmt mit zunehmendem Phasenrauschen in dem Oszillator im Allgemeinen auch der Jitter zu. Dieser Zustand lässt sich am besten anhand eines idealen Signals darstellen, das gestört wird. Es wird so lange behindert, bis das Signal mit dem echten Ausgangssignal eines Oszillators übereinstimmt.

■ Ein bisschen Signaltheorie

Ein ideales Sinussignal lässt sich mathematisch wie folgt darstellen - Gleichung 1. Dabei sind A_0 die Amplitude des Signals, f_0 die Nenn-Grundfrequenz und t die Zeit. *Bild 1* zeigt eine Darstellung des idealen Signals sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich. Kommt jetzt Amplitudenrauschen hinzu, erweitert sich Gleichung 1 auf Gleichung 2.

Der Term $\varepsilon(t)$ stellt die Zufallsabweichung der Amplitude dar. Damit die Rechnung noch etwas interessanter wird, fügen wir eine zufällige Phasenkomponente $\phi(t)$ in Gleichung 2 ein. Nun erhalten wir Gleichung 3.

Die neue Darstellung des Zeit- und Frequenzbereichs ist in *Bild 2* zu sehen, während *Bild 3* eine Vektordarstellung von Gleichung 3 zeigt. Es stellt sich heraus, dass Oszillatoren in der Regel auf Amplitudenebene gesättigt sind und wir daher $\varepsilon(t)$ in Gleichung 3 vernachlässigen können. Somit vereinfachen wir die Gleichung erneut und erhalten Gleichung 4.

Erweitern wir diese jetzt durch das Hinzufügen einer deterministischen Komponente, erhalten wir Gleichung 5. Dabei sind m_d die Amplitude des deterministischen Signals, das den Träger phasenmoduliert, f_d dessen Frequenz.

Die Gleichung 5 lässt sich durch gewöhnliche Trigonometrie nicht vereinfachen. Allerdings kann sie als eine Reihe aus Sinusfunktionen durch Anwendung von Besselfunktionen erster Ordnung ausgedrückt werden. Dies ist jedoch im Rahmen dieser Übung nicht von Bedeutung. Stellen wir uns nun vor, dass sämtliche Harmonische und gegebenenfalls Subharmonische zu dem Signal hinzugefügt werden. Die Rechnung wächst dadurch schnell an - Gleichung 6. Der letzte Term repräsentiert eine Subharmonische. Durch das Hinzufügen von Angaben für Störfrequenzen lässt sich die Gleichung beliebig erweitern.

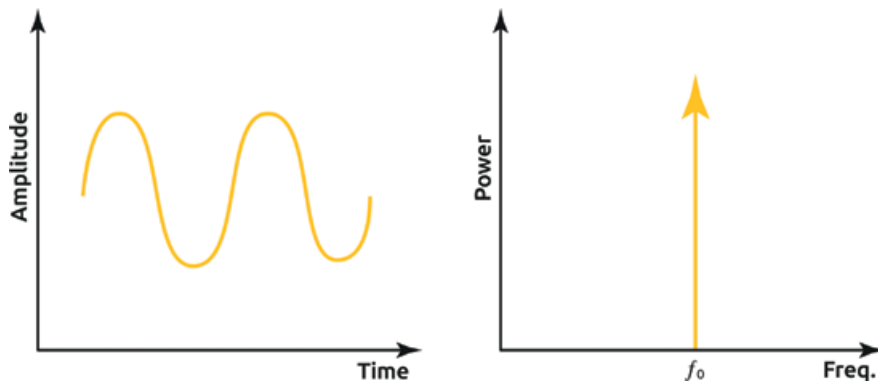


Bild 1: Signal eines idealen Oszillators im Frequenzbereich (links) und im Zeitbereich (rechts).

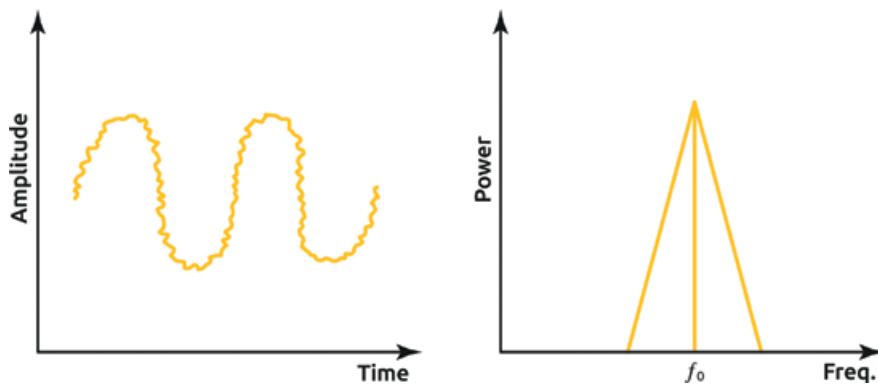


Bild 2: Verrauschtes Signal eines Oszillators im Frequenzbereich (links) und im Zeitbereich (rechts).

GLEICHUNGEN

$$(1) \quad u(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$$

$$(2) \quad u(t) = [A_0 + \varepsilon(t)] \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$$

$$(3) \quad u(t) = [A_0 + \varepsilon(t)] \cdot \sin[2\pi \cdot f_0 \cdot t + \Delta\phi(t)]$$

$$(4) \quad u(t) = A_0 \cdot \sin[2\pi \cdot f_0 \cdot t + \Delta\phi(t)]$$

$$(5) \quad u(t) = A_0 \cdot \sin[2\pi \cdot f_0 \cdot t + \Delta\phi(t) + m_d \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t)]$$

$$(6) \quad u(t) = A_0 \cdot \sin[2\pi \cdot f_0 \cdot t + \Delta\phi(t) + m_d \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t)] + \\ + A_1 \cdot \sin[2\pi \cdot 2f_0 \cdot t + \Delta\phi(t) + m_d \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t)] + \\ + A_2 \cdot \sin[2\pi \cdot 3f_0 \cdot t + \Delta\phi(t) + m_d \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t)] + \\ + \dots \\ + A_N \cdot \sin[2\pi \cdot (N+1) f_0 \cdot t + \Delta\phi(t) + m_d \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t)] + \\ A_{sub} \cdot \sin\left[2\pi \cdot \frac{f_0}{N} \cdot t + \Delta\phi(t) + m_d \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t)\right]$$

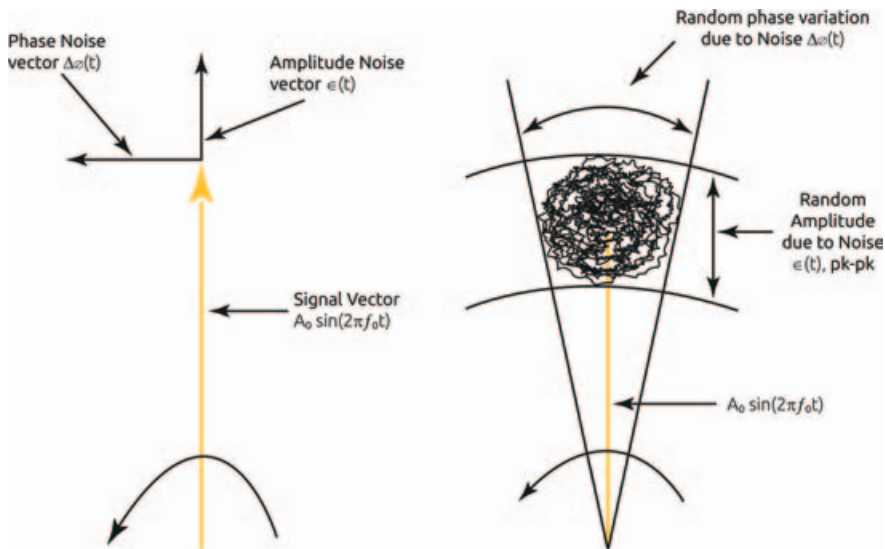


Bild 3: Vektordarstellung von Gleichung 3 mit Festwerten des Phasen- und Amplitudenrauschens (links) sowie mit rauschbedingten, zufälligen Variationen von Phase und Amplitude (rechts).

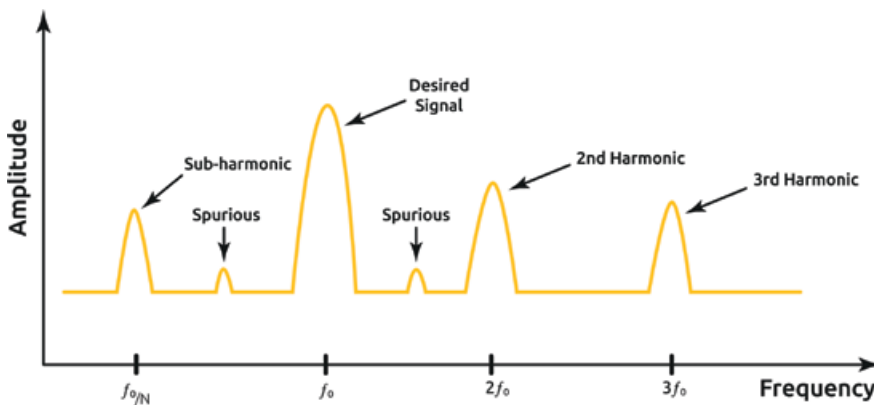


Bild 4: Typisches Ausgangsspektrum eines realen Oszillators.

■ Störquellen in einem Oszillator

Nun wollen wir beschreiben, woher einige der unerwünschten Signale und das Rauschen in einem Oszillator kommen. Wie in Gleichung 6 dargestellt, produziert ein Oszillator ein sehr komplexes Signal mit zufälligen und deterministischen Phasenvariationen, Harmonischen, Subharmonischen etc. (Bild 4).

■ Zufällige Rauschquellen

Für die zufälligen Komponenten sind überwiegend – aber nicht ausschließlich – drei Hauptquellen verantwortlich: thermisches Rauschen, Schrotrauschen und Funkelrauschen. Das thermische Rauschen wird durch die Brownsche Bewegung von Elektronen aufgrund von thermischer Beeinflussung verursacht. Die Größe nimmt in Abhängigkeit von Temperatur, Bandbreite und Rauschwiderstand zu. Das Schrot- oder auch Stromrauschen entsteht durch den

diskontinuierlichen Stromfluss über mögliche pn-Übergänge. Und das Funkelrauschen ist proportional zu $1/f^2$ und in sämtlichen aktiven Bausteinen vorhanden, sowie in einigen passiven Komponenten, beispielsweise Kohleschichtwiderständen.

Das mittenfrequenznahe Phasenrauschen des Oszillators ist direkt proportional zu dem frequenzbestimmenden Resonator Q. Je größer der Q-Wert des Resonators, desto kleiner ist das mittenfrequenznahe Phasenrauschen. Das Grundrauschen entsteht aus der Mitwirkung aller Einflüsse innerhalb der Oszillatorschaltung, auch bezeichnet als weißes Rauschen.

■ Deterministische Quellen

Die deterministische Komponente kann unter anderem vier Ursachen haben: Spannungsversorgung, Störsignale, Quarzkristallresonanz und Subharmonische.

Erstens, im Falle einer unsauberen Spannungsversorgung kann ein Brummsignal in den Rückkopplungspfad des Os-

zillators gelangen und möglicherweise die Ausgangs- bzw. Trägerfrequenz phasenmodulieren. Zweitens, obschon Oszillatoren einen Rückkopplungspfad haben, um das gewünschte Ausgangssignal zu generieren, existieren in der Realität jedoch viele solcher Rückkopplungspfade, die Störsignale auf zahlreichen verschiedenen Frequenzen und Amplituden verursachen. Drittens, in einem Quarzoszillator kann ein nicht genutztes Resonanzsignal des Kristalls quarzgesteuerte Störsignale (Spurious) verursachen. Das stärkste Signal wird beispielsweise als Grundsignal (Fundamental) bezeichnet, hier entstehen ungradzahlige Obertöne (z. B. 3. Oberton, 5. Oberton etc.) sowie sogenannte Störsignale (Spurious), die in jedem Quarzkristall vorkommen. Ein Oszillator kann einige dieser Signale anregen und damit eine deterministische Komponente bei dem Ausgangssignal verursachen. Eine Subharmonische ist ein ganzzahliger Teil der Ausgangsfrequenz. Ein Oszillatorausgangssignal, abgeleitet von einer niedrigen Frequenzquelle durch eine Art Frequenzvervielfachung, verfügt über mindestens eine Subharmonische. Die Subharmonische trägt direkt zum deterministischen Jitter des Ausgangssignals und harmonischen Verzerrung bei.

■ Harmonische Quellen

Harmonische können durch die Nichtlinearität irgendeines Bausteins innerhalb der Oszillatorschaltung generiert werden. Hauptursachen sind jedoch pn-Übergänge, die das Signal passieren muss. Eine hohe Harmonische, zum Beispiel die elfte Harmonische, kann einen Empfänger desensibilisieren, indem sie in das Zwischen- bzw. Empfangsfrequenzband wechselt. Harmonische Verzerrung kann ein Problem werden, wenn das Ausgangssignal des Oszillators von einem Sinus- in ein Rechtecksignal zu konvertieren ist.

■ Fazit

Die Ausgangssignale eines Oszillators sind niemals perfekt. Die Spezifikation und Validierung der Oszillatorleistung durch den Systementwickler bedarf einer sorgfältigen Prüfung. Zusätzlich kann das System einen Oszillator leicht durch zugeführte beziehungsweise abgestrahlte Signale stören. Erfahrene HF-Techniker wissen, dass man am besten keine unerwünschten Signale generiert. Ist das nicht möglich, werden sie versuchen, diese im Nachhinein herauszufiltern. (rh)