

Phasenrauschprofile helfen beim Systemtest

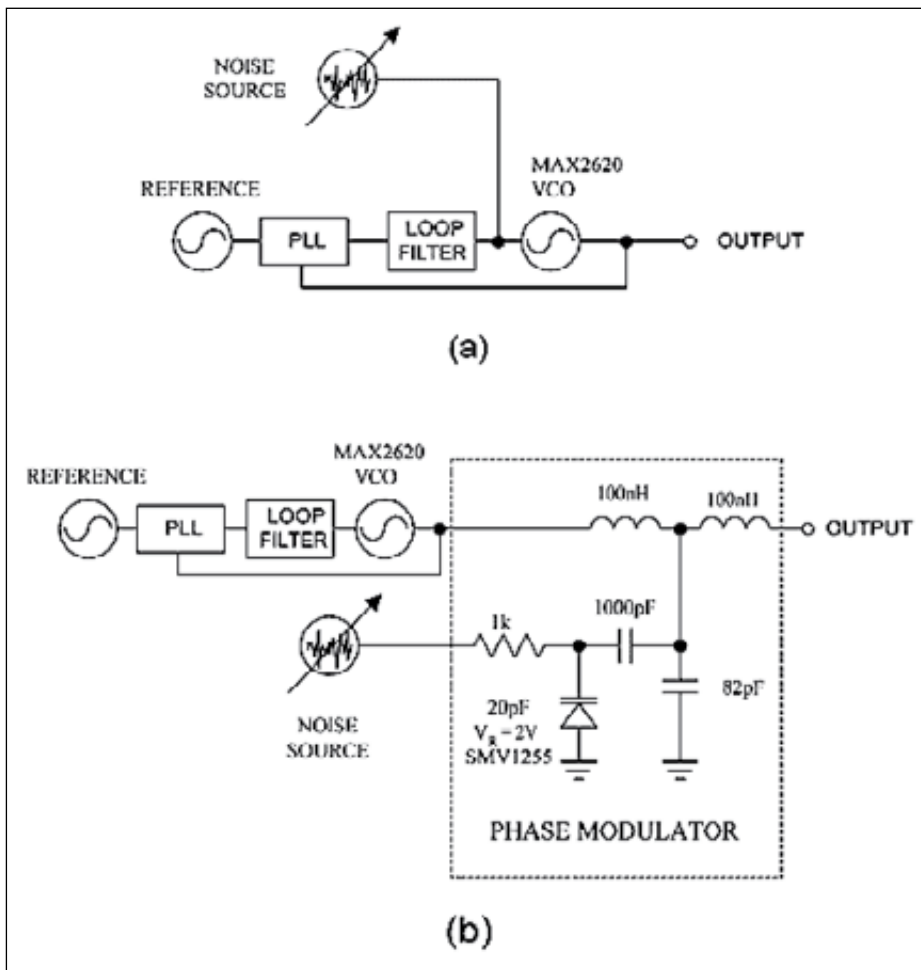


Bild 1: Phasenrauschen wird durch Einspeisung einer Rauschspannung direkt in den Abstimmeneingang des VCOs (a) oder in die Varaktordiode eines Phasenmodulators (b) erzeugt.

Rauschen findet man in jedem System. Phasenrauschen im Besonderen existiert üblicherweise in Oszillatoren und PLL-Schleifen und kann die Leistung eines Systems verschlechtern. Phasenrauschen im Oszillator eines drahtlosen Kommunikationssystems reduziert die Empfindlichkeit durch reziprokes Mischen. Phasenrauschen in einem Telekommunikationssystem verursacht Jitter in der Signalkette. Obwohl Ingenieure normalerweise versuchen, das Phasenrauschen zu reduzieren, verschlechtern sie es zu Testzwecken manchmal absichtlich. Die gut geplante Einspeisung von Phasenrauschen hilft beim Testen der Toleranz eines

Systems gegen Phasenrauschen oder Jitter. Daher sind Signale mit einem einstellbaren Phasenrauschpegel für Testzwecke sehr nützlich.

Einführung

Alle elektronische Bauteile tragen zum Phasenrauschen bei, aber Oszillatoren sind im Allgemeinen die dominierende Quelle. Ein spannungsgesteuerter Oszillator (VCO), ob freischwingend oder phasenstarr, wird durch Rauschmodulation phasenmoduliert. Es ist daher logisch, dass Phasenrauschspezifikationen Spektralreinheit charakterisieren. Das Ausgangssignal eines idealen Sinus-Oszillators würde zum Beispiel im Frequenzbereich als eine einfache senkrechte Linie dargestellt. In der Realität enthalten jedoch Oszillatoren Rauschquellen, die bewirken, dass die Ausgabefrequenz von ihrer idealen Position abweicht und eine „Glocke“

von unerwünschten Frequenzen nahe dem Träger erzeugt.

Methoden zur Erzeugung von Phasenrauschen

Sie können Phasenrauschen auf zwei Arten erzeugen oder verschlechtern. Ein Weg besteht darin, den Oszillator oder VCO direkt zu modulieren, oder eine Geräuschquelle zu verwenden. Ein VCO (Bild 1) ist phasenstarr mit einer PLL gerastet, und die Bandbreite des Schleifenfilters wird tiefer als die minimale Modulationsfrequenz gelegt. Wenn zum Beispiel der interessierende minimale Phasenrauschoffset 10 Hz Offset zum Träger hat, dann legen Sie die Loop-Bandbreite auf 1 Hz. Speisen Sie dann das Rauschsignal direkt in den Frequenzabstimmeneingang des VCOs ein, wodurch Phasenrauschen am Ausgang erzeugt wird. Dann können Sie den Phasenrauschpegel durch Erhöhung des Eingangsrauschens erhöhen.

Das Ausgangs-Phasenrauschen wird von der VCO-Verstärkung (K_{VCO}) geformt. Nehmen Sie an, dass die VCO-Frequenz f_o ist und moduliert ist mit einer Rauschquelle von $V_n(f_n)$ mit einer in einer Bandbreite von 1 Hz und der Frequenz f_n . Unter Verwendung einer Näherungsformel für Schmalband-Frequenzmodulation ergibt sich für das VCO-Ausgangssignal:

$$V_{OUT}(t) \approx A_0 \cos(2\pi f_o t) + [A_0 K_{VCO} V_n(f_n) / 2f_n] \cdot [\cos(2\pi f_o + 2\pi f_n)t + \cos(2\pi f_o - 2\pi f_n)t]$$

Der erste Term stellt das Trägersignal dar; der zweite Term repräsentiert die Rauschleistung in einem bestimmten Offset vom Träger. Phasenrauschen ist definiert als das Verhältnis der Rauschleistung bei der Offsetfrequenz zur Trägerleistung bei f_o .

Erinnern Sie sich daran, dass $V_n(f_n)$ die RMS-Rauschspannung in einer 1-Hz-Bandbreite bei f_n ist. Das Phasenrauschprofil ist das Rauschquellenprofil geteilt durch f_n . Daher nimmt bei einer Eingangsquelle mit flachem weißen Rauschprofil, die den VCO moduliert ($V_n(f_n) = \text{konstant}$), das Ausgangs-Phasenrauschprofil um 20 dB/Dekade ab, wie in Bild 2 gezeigt. (Dies geht davon aus, dass das erzeugt Phasenrauschen deutlich größer als das VCO-eigene ist.)

Eine zweite Methode zur Erzeugung von Phasenrauschen verwendet einen Phasenmodulator, um das phasengerastete Trägersignal am VCO-Ausgang zu modulieren (Bild 1 b). Diese Lösung speist Rauschen in den Phasenmodulator ein, der als Tiefpassfilter in der LCL-Konfiguration ausgeführt ist (2). Die beiden Spulen sind

Unter Verwendung der Application Note 3822 von Maxim Integrated Products: "Phase-Noise Profiles Aid System Testing" www.maxim-ic.com

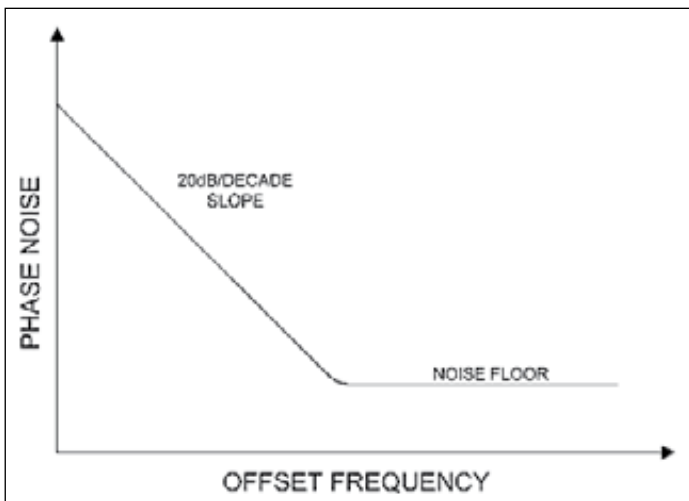


Bild 2: Wenn ein VCO direkt an seinem Abstimmeingang rauschmoduliert wird, erzeugt er ein Phasenrauschprofil mit einer Hüllkurve mit 20 dB Abfall.

Festinduktivitäten, und als variable Kapazität wird eine Varaktordiode verwendet, die durch entsprechende Vorspannung auf einen normalen Kapazitätswert eingestellt wurde. Rauschspannung über dem Varaktor variiert die Kapazität, die wiederum die Phase beeinflusst. Auf diese Art wird die Rauschspannung in Phasenrauschen umgesetzt. Nimmt die Rauschspannung zu, steigt auch der Phasenrauschpegel.

Die Phasenmodulatormethode beschränkt nicht die PLL-Schleifenbandbreite, die deshalb so groß wie erforderlich sein kann, um eine schnellere Einrastzeit zu erreichen. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Phasenrauschenprofil nicht von der VCO-Verstärkung sondern vom Phasengewinn (K_{PHASE}) in Ein-

heiten von Radian/pro Volt abhängt. Darüber hinaus hängt der Phasengewinn vom Phasenfrequenzgang des LCL-Filters und der Kapazitätscharakteristik der Varaktordiode ab. Auf diese Weise ergibt sich für das VCO-Eingangssignal:

$$V_{OUT}(t) \approx A_0 \cos [2\pi f_0 t + K_{PHASE} V_n(t)]$$

Darin ist $V_n(t)$ die Rauschspannung zur Zeit t . Der Phasenrauschterm ist

$$K_{PHASE} V_n(t) = \Phi(t).$$

Man kann das Phasenrauschen durch Anwenden der Fourier-Transformation auf $V_{OUT}(t)$ berechnen, aber das Ergebnis ist schwierig, analytisch zu lösen. Als Annäherung (3) ergibt sich das Phasenrauschen zu:

$$L(f_n) \approx [S_\Phi(f_n) / 2rad^2]$$

$$L(f_n) \approx [K^2_{PHASE} S_v(f_n) / 2rad^2]$$

Darin ist S_Φ die spektrale Dichte von $\Phi(t)$ in rad^2/Hz , und $S_v(f_n)$ die Spektraldichte von $V_n(t)$ in V^2/Hz . Das Phasenrauschprofil nimmt daher die gleiche Form wie das Profil der modulierenden Rauschdichte an. Für eine weiße Rauschquelle, gefolgt von einem 100-kHz-Tiefpassfilter, ist das Phasenrauschprofil gleich dem Frequenzgang des Filters. In diesem Fall, ist der Phasenrauschpegel innerhalb der Filter-Grenzfrequenz konstant und fällt außerhalb der -3dB-Bandbreite ab. (Bild 3). Diese Phasenmodulatorschaltung bietet einen bequemen Weg ein variables Phasenrauschsignal zu erzeugen, das reale Rauschquellensignale, wie zum Beispiel von PLL-Oszillatoren nachahmt.

Die Schaltung in Bild 1b arbeitet hervorragend von 5 bis 30 MHz, und man kann die Induktivitäten und Kapazitäten sehr leicht für den Betrieb auf anderen Frequenzen skalieren. Laborexperimente zeigten, dass die Schaltung bis zu 2 oder 3 GHz skaliert werden kann. Diese Frequenzen erfordern etwa 1 nH Induktivität und 1 pF, daher ist diese Technik durch die Verfügbarkeit der Bauteile und der parasitären Komponenten der Leiterplatte begrenzt.

Eine Änderung in der Varaktorkapazität ändert nicht nur die Rauschsignalamplitude sondern auch die Phase. Amplitudenänderungen sind jedoch viel kleiner, als Phasenänderungen. Die Phasenänderungen repräsentieren Phasenrauschen und die Amplitudenschwankungen entsprechen Amplitudenrauschen (Bild 4). Dieser Modulator

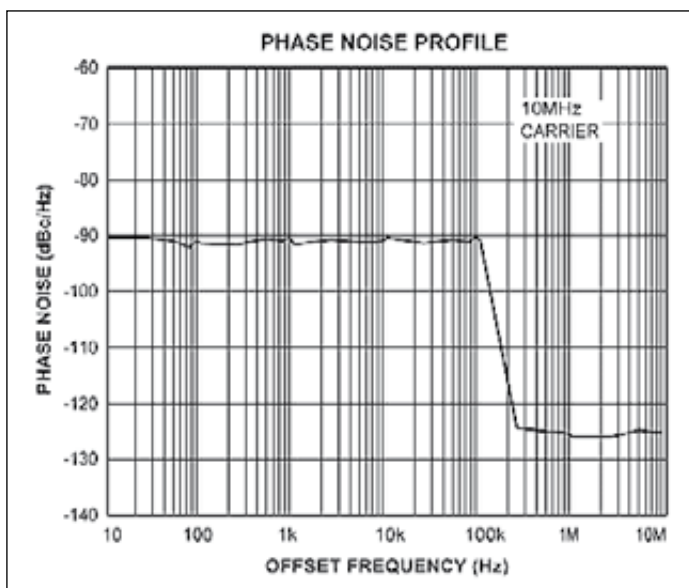


Bild 3. Dieses Phasenrauschprofil wird mit dem Phasenmodulator in Bild 1b erzeugt.

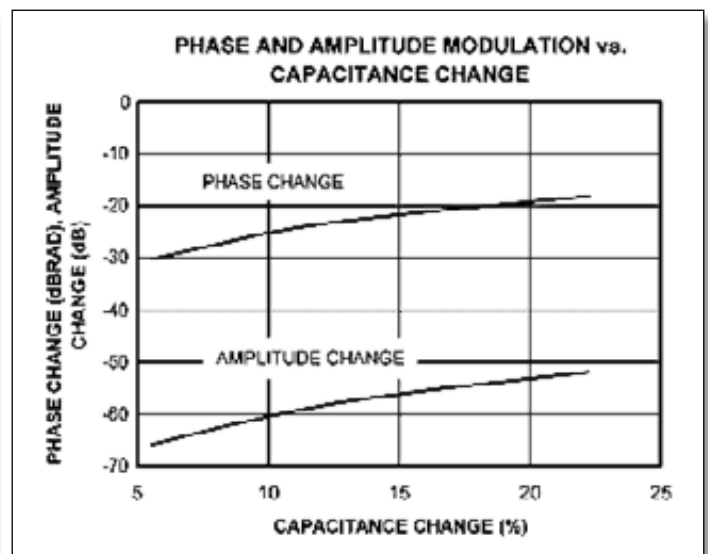


Bild 4: Diese Graphik zeigt Phasen- und Amplitudenmodulation für die Schaltung in Bild 1b bei 10 MHz. Die Phasenmodulation ist 30 dB größer als die Amplitudenmodulation.

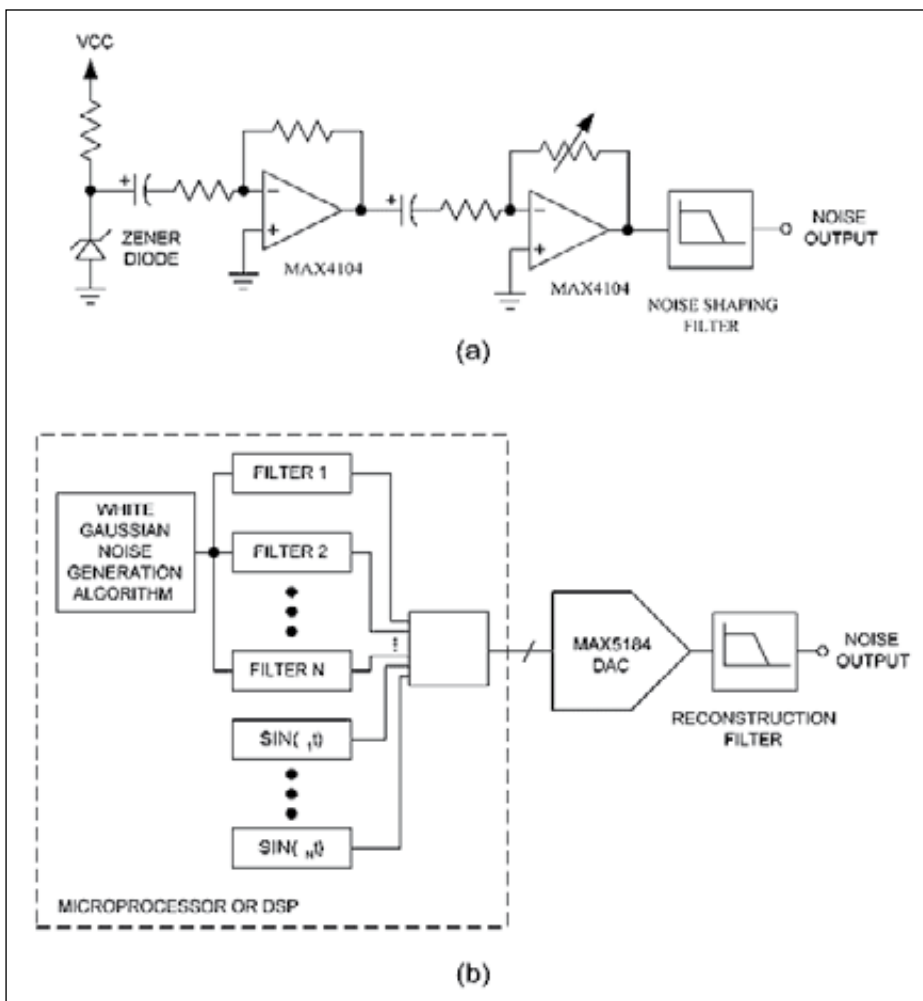


Bild 5: (a) Schaltung eines einfachen Rauschgenerators mit Zenerdiode; (b) aufwändiger Rauschgenerator mit Mikroprozessor zur Erzeugung eines Multisegment-Rauschprofils

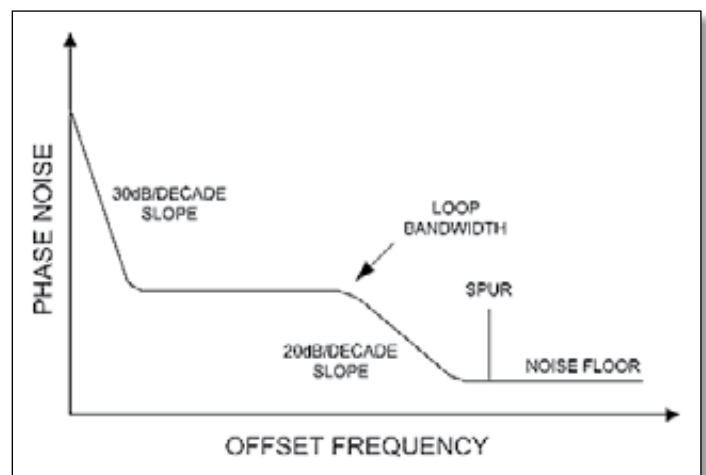
produziert etwa 30 dB größere Phasenmodulation als Amplitudenmodulation, wodurch sichergestellt wird, dass der Phasenrauschanteil vorherrscht.

Die Erzeugung der Rauschspannung

Es gibt viele Methoden, die Rauschspannung für die Phasenrauschmodulation zu generieren. Der einfachste Weg besteht darin, eine Zenerdiode in ihren Avalanche-Durchbruchbereich (Bild 5a) vorzuspannen. Das Schrot-Rauschen der Diode kann sowohl mit Verstärkern mit fester oder variabler Verstärkung auf den erforderlichen Wert gebracht werden. Der Gewinn dieser kaskadierten Verstärker muss groß genug sein, um den erwünschten Rauschspannungspegel zu erzeugen. Dem Rauschspannungsausgang folgt ein Filter, das den Rauschfrequenzgang entsprechend dem in Bild 1a oder 1b erforderlichen Phasenrauschprofilformt. Ein Vorteil der Schaltung in Bild 1 b ist, dass der Verlauf des Rauschquellenprofils

der Gleiche wie beim Ausgangs-Phasenrauschprofil ist. Das Phasenrauschprofil eines tatsächlichen Oszillators kann kompliziert sein: Es kann mit 30 dB/Dekade bei niedrigen Offsets abfallen, innerhalb der

Bild 6: In einem realen phasengerasteten Oszillator sinkt das Phasenrauschen bei niedrigen Offsetfrequenzen schnell ab, mit einem Gefälle von 30 dB/Dekade. Das Phasenrauschen ist flach innerhalb der Loop-Bandbreite. Außerhalb der Loop-Bandbreite fällt das Phasenrauschen nochmals mit 20 dB/Dekade, bis es den Rauschflur erreicht.



Loop-Bandbreite flach sein, außerhalb der Loop-Bandbreite mit 20 dB/Dekade abfallen und schließlich einen flachen Rauschflur bilden (Bild 6). Diese Phasenrauschprofile erfordern eine kompliziertere Schaltung zur Rauschspannungserzeugung, zum Beispiel ein Design wie in Bild 5b. Es erzeugt komplizierte Multisegment-Rauschprofile mit Hilfe eines Mikroprozessors oder eines DSP's und eines Digital-/Analogwandlers. Für den Phasenmodulator in Bild 1b wird ein Bereich mit flachem Phasenrauschen durch weißes Gauss'sches Rauschen erzeugt, gefolgt von einem digitalen Filter mit flachem Frequenzgang bei der interessierenden Offset-Frequenz. Um die gewünschte Abfall-Hüllkurve zu erzeugen, folgt dem weißen Gauss'schen Rauschen ein FIR- oder IIR-Digitalfilter-Algorithmus. Für Störfrequenzen (Spurs) kann einfach eine Sinusspannung zur Rauschspannung hinzugefügt werden. Dann werden alle Segmente zusammenaddiert. Die immer noch digitale Rauschspannung wird anschließend in analoges Format mit dem D/A-Wandler umgesetzt, dem noch ein Rekonstruktionsfilter folgt.

Zusammenfassung:

Die Methoden für die Erzeugung des Phasenrauschens zeigt Bild 1 und die Techniken zur Erzeugung von Rauschspannungen Bild 5. Die Schaltung in Bild 1a produziert Phasenrauschen durch direkte Modulation des VCO-Abstimmeeingangs, Schaltung 1b erzeugt Phasenmodulation mit einem externen Phasenmodulator. Jede Technik produziert ein unterschiedliches Phasenrauschprofil. Die direkte Modulation in Bild 1a funktioniert bei jeder VCO-Frequenz. Für die Phasenmodulator-Technik in Bild 1b ist die Trägerfrequenz auf einige GHz aufgrund der Bauteile-Verfügbarkeit und der parasitären Komponenten Bauelemente der Leiterplatte begrenzt.