Signalketten-Rauschanalyse bei HF-zu-Digital-Empfängern

Entwickler von Signalempfängersystemen müssen oft eine vollständige kaskadische Kettenanalyse der Systemleistung von der Antenne bis hin zum ADC durchführen. Rauschen ist ein kritischer Parameter in dieser Analyse, da es die Gesamtempfindlichkeit des Empfängers begrenzt.

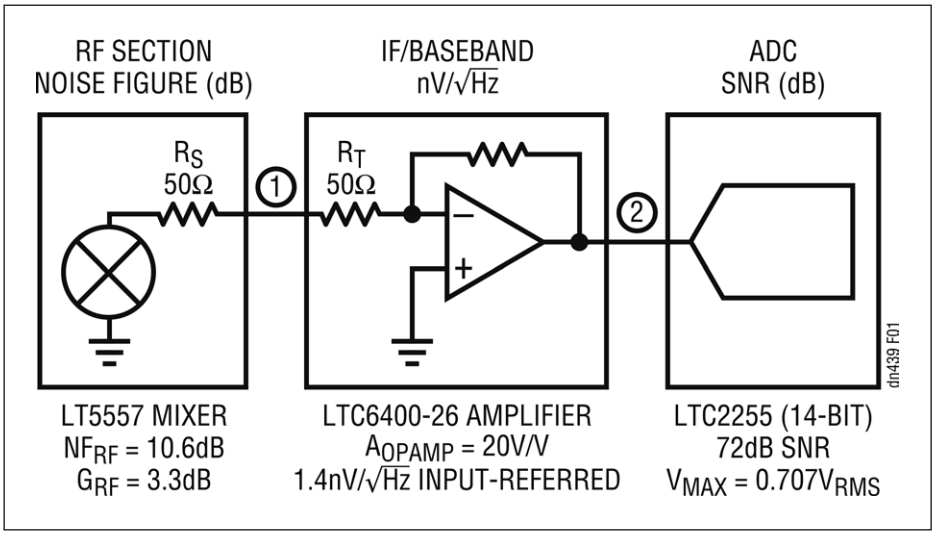

Bild 1: Blockdiagramm einer vereinfachten Signal-Kette mit HF-Komponenten (Mischer, LNA, etc.), IF-/Basisbandkomponenten (dargestellt durch einen einfachen Verstärker) und einem ADC. Der Eingangswiderstand der Verstärker dient als angepasster Abschluss des 50-Ohm-Bereichs.

Einführung

Die Rauschanforderungen einer Anwendung haben einen signifikanten Einfluss auf die Systemtopologie, da die Wahl der Topologie darauf abzielt, das Intermodulationsverhalten, das Gesamt-Signal-/Rauschverhältnis, den Dynamik-Bereich und verschiedene andere Parameter zu optimieren. Ein Problem bei Rauschberechnungen ist das Übersetzen zwischen den verschiedenen Einheiten, die in den einzelnen Komponenten der Kette verwendet werden, nämlich im RF- und IF- Bereich, im Basisband und in den digitalen Bereichen der Schaltung.

Rauschzahl NF

Bild 1 zeigt ein vereinfachtes Systemdiagramm. Es enthält einen RF-Bereich, eine IF-Sektion (dargestellt durch einen Verstärker), einen Basisbandabschnitt und einen ADC. Der RF-Abschnitt, der einen Mischer oder einen Demodulator umfasst, wird üblicherweise mit Hilfe der Rauschzahl (NF) in einer dB-Skala spezifiziert. Er kann aber auch mit Hilfe der spektralen Rauschleistungsdichte definiert werden. Sie ist der Rauschzahl im Prinzip ähnlich (d.h. -160 dBm/Hz entsprechen einer NF von ungefähr 14 dB). Hier verwenden wird aber nur die Rauschzahl NF. Wenn man in einer konstanten 50-Ohm-Umgebung arbeitet, vereinfacht die Verwendung der NF die Analyse einer RF-Signalkette. Wenn dies jedoch nicht der Fall ist, wird die NF-Berechnung etwas komplizierter.

Signal-Rauschverhältnis

IF- und Basisbandkomponenten, wie z.B. Verstärker, werden normalerweise durch ihre spektrale Rauschleistungsdichte spezifiziert, die in Volt oder Ampere pro Quadratwurzel aus Hertz (nV/√Hz, pA/√Hz) angegeben wird. ADC-Rauschen wird in erster Linie als Signal-Rauschverhältnis (SNR) in dB angegeben. SNR ist das Verhältnis der Stärke des maximalen Eingangssignals zum gesamten integrierten Eingangsrauschen des ADCs. Um eine vollständige Signalkettenanalyse durchzuführen, muss der Entwickler in der Lage sein, Messwerte zwischen den Einheiten NF, Rauschdichte und SNR umzusetzen.

NF zu SNR: Wie viel ADC-Auflösungsvermögen ist erforderlich?

Der erste Übergang erfolgt vom HF-Bereich zum IF-/Basisbandbereich. Die Rauschzahl ist für Berechnungen eine bequeme Einheit, erfordert aber konstanten Systemwiderstand. Die Unabhängigkeit der spektralen Rauschleistungsdichte von der Impedanz ist macht die Konvertierung von NF zu nV/√Hz sinnvoll, da die Kette beim Übergang von

Design Note 439
„Signal Chain Noise Analysis for RF-to-Digital-Receivers"
Cheng-Wei Pei
Linear Technology

HF zu Basisband (Knotenpunkt 1 in Bild 1) die Umgebung mit 50 Ohm festgelegter Impedanz verlässt. An Knoten 1 kann die Störspannungsdichte wegen des HF-Teils der Kette wie folgt dargestellt werden:

$$e_{N(RF)} = 10^{\left[\frac{(G_{RF}+NF_{RF})}{20}\right]} \bullet e_{N(50)} \bullet 0.5 \left(\frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)$$

Darin ist:

G_{RF} = kaskadische Verstärkung der HF-Komponenten in dB

NF_{RF} = kaskadierte Rauschzahl der HF-Komponenten in dB

$e_{n\,(50)}$ = Rauschleistungsdichte von 50 Ohm (0.91 nVRMS/$\sqrt{Hz}$ bei 27 °C)

0,5 = ohm´scher Teiler vom Lastabschluss, ist gleich 0,5, wenn R_T und R_s 50 Ohm betragen.

Mit dem in Bild 1 gezeigten LT5557 ergibt sich für e_n (HF) 2.25 nV/$\sqrt{Hz}$. Die eingangsbezogene Rauschleistungsdichte des IF-/Basisbandbereichs (einschließlich der OPAmp-Widerstände) kann unter Verwendung des OPAmp-Datenblatts berechnet werden und zum Beitrag des HF-Teils addiert werden. Multiplizieren des Ergebnisses mit dem Verstärkungsfaktor (V/V) ergibt die Gesamtrauschleistungsdichte am Knotenpunkt 2 und ignoriert den effektiven Beitrag des ADC:

$$e_{N2} = A_{OPAMP} \bullet \sqrt{e_{N(OPAMP)}^2 + e_{N(RF)}^2} \left(\frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)$$

Unter Verwendung der Spezifikationen des Verstärkers LTC6400-26 ergibt sich für e_{N2} 53 nV/$\sqrt{Hz}$. Der letzte Schritt besteht darin, das Gesamt-SNR am ADC zu berechnen. Dazu muss man das gesamte integrierte Rauschen am Knotenpunkt 2 kennen.

Der letzte Schritt

Nimmt man an, dass die Spektraldichte über der Frequenz konstant ist, kann man einfach e_{N2} mit der Quadratwurzel der gesamten Rauschbandbreite multiplizieren. Diese Bandbreite wird durch die Verstärkerschaltung und jede eventuelle ADC-Antialiasing-Filterung begrenzt. Nimmt man eine Gesamtbandbreite von 50 MHz an, beträgt das integrierte Rauschen in unserem Beispiel N2 = 375 μV_{RMS}. Das gesamte, theoretische SNR kann wie folgt berechnet werden:

$$SNR_{THEORETICAL} = 20 \bullet \log_{10}\left(\frac{V_{MAX}}{N2}\right)(dB)$$

wo V_{MAX} das maximale sinusförmige Eingangssignal des ADCs in der Form V_{RMS} (V_{pp} • 0,35) und N_2 = das gesamte integrierte Rauschen Knotenpunkt 2 ist, bis auf das Rauschen des ADC, in V_{RMS}

Dieses theoretische SNR, das in unserem Beispiel 65.5 dB beträgt, repräsentiert die maximale Auflösung, die mit einem perfekten ADC erreichbar ist. Der tatsächliche ADC sollte aber ein SNR haben, das um mindestens 5 dB darüber liegt, um das Leistungsniveau entlang der Kette beizubehalten. Zum Beispiel würde ein 14-Bit-Hochleistungs-ADC aus der LTC2255-Familie von Linear Technology ein SNR im Bereich von 72 bis 74 dB haben.

SNR zu Rauschzahl

Für Radiodesigner ist eine wichtige Überlegung im Systemdesign das Gesamtrauschmaß, da es durch alle Komponenten in der Kette beeinflusst wird. Sobald die Komponenten ausgewählt sind, kann man die äquivalente Eingangsrauschzahl und die Gesamtempfindlichkeit des Empfängers bestimmen. Unter der Annahme, dass die interessierenden Signale innerhalb einer Nyquist-Bandbreite des ADC liegen (eine Nyquist-Bandbreite ist $f_{SAMPLE/2}$), ergibt sich für den ADC das äquivalente Rauschen zu:

$$e_{N(ADC)} = 10^9 \bullet \frac{V_{MAX}}{10^{\left(\frac{SNR_{ADC}}{20}\right)}} \bullet \frac{1}{\sqrt{\frac{f_{SAMPLE}}{2}}} \left(\frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)$$

wobei SNR_{ADC} = das Datenblatt-SNR bei der interessierenden Frequenz ist

f_{SAMPLE} = Sampling-Rate des ADC in Hertz

In unserem Beispiel ergibt sich $e_{N(ADC)}$ zu 22,5 nV/$\sqrt{Hz}$ unter der Annahme einer Sampling-Rate von 125MHz. Diese Rauschspannungsdichte, $e_{N(ADC)}$, kann dann mit der Verstärkerausgangs-Rauschdichte e_{N2} summiert werden (Effektivwerte!) und durch Division durch den Gewinn A_{OPAMP} auf den Eingang bezogen werden. Um dieses Ergebnis zurück zur Rauschzahl NF zu konvertieren, ordnen Sie die erste Gleichung in diesem Artikel um:

$$NF_{TOTAL} = \left\{20\log_{10}\left(\frac{\sqrt{e_{N(ADC)}^2 + e_{N2}^2}}{A_{OPAMP} \bullet e_{N(50)} \bullet 0.5}\right) - G_{RF}\right\}(dB)$$

Der Wert NF_{TOTAL}, gibt die gesamte Eingangs-Rauschzahl mit den Beiträgen der HF-Stufe, der Verstärker und des ADCs an. Im Beispiel ist NF_{TOTAL} 12.7 dB für die gesamte Kette von drei Einheiten. ◄