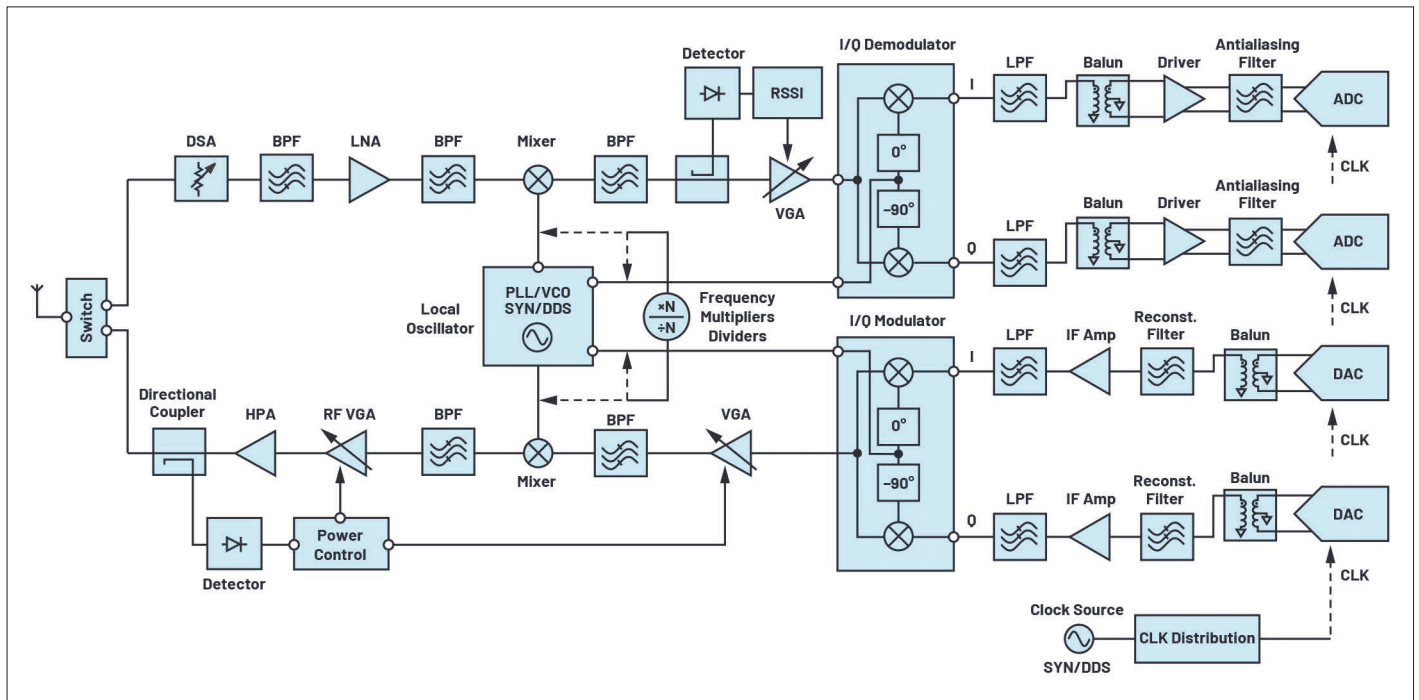


## Diskussion zur HF-Signalkette (Teil 1)

# Grundeigenschaften und Leistungskennzeichen

Heute ist die HF-Technik elementar in unserem Alltag verwurzelt. Es gibt zahllose Bereiche, die sehr stark auf die HF-Signalketten angewiesen sind, was der Fokus dieser Diskussion ist.



Zunächst stellen wir fest, dass die Grenzen des HF-Bereichs unterschiedlich definiert werden. Was also ist HF dann eigentlich? Eine einheitliche Basis für eine Definition in mehr als nur einer Hinsicht gründet in der Fokussierung auf die charakteristischen Eigenschaften der HF, welche die Phasenverschiebung, Blindwiderstand, Verlustleistung, Rauschen, Abstrahlung, Reflexionen und Nichtlinearität mit einschließt [1]. Diese Basis repräsentiert eine alles umfassende Definition, also eine, die nicht nur von einem einzelnen Aspekt oder bestimmten numerischen Werten abhängt. Der Ausdruck HF kann damit für jede Schaltung oder Komponente angewandt werden, die eine Anzahl der genannten Eigenschaften aufweist.

### Prinzip der Signalkette

Nun, da wir den Kontext für unsere Diskussion festgelegt haben, können wir zum Hauptthema übergehen und die

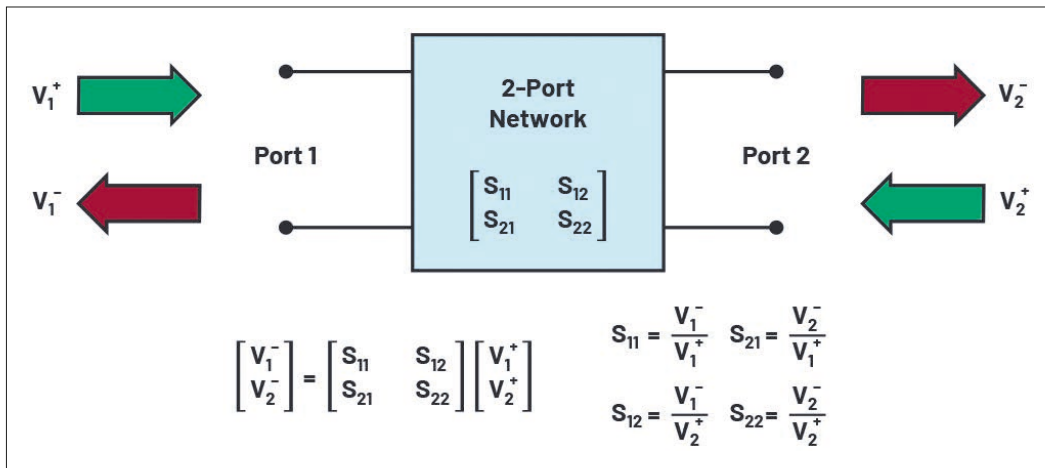
HF-Signalkette in ihrer generischen Form, s. Aufmacherbild, beschreiben. Diese Repräsentation nutzt ein Schaltungsmodell mit verteilten Elementen, um die Phasenverschiebung in der Schaltung zu beschreiben, welche bei kürzeren Wellenlängen nicht vernachlässigbar ist, wodurch die direkte Schaltungsapproximation für diese Art von System nicht anwendbar ist. Eine HF-Signalkette kann eine große Vielfalt an diskreten Komponenten enthalten, wie Dämpfungsglieder, Schalter, Verstärker, Detektoren, Synthesizer und weitere analoge HF-Bauteile, auch zusammen mit schnellen A/D- und D/A-Wandlern. Alle diese Komponenten dienen dazu, eine spezielle Applikation zu realisieren, deren gewünschte Gesamtleistung von der kombinierten Leistung ihrer diskreten Einzelkomponenten bestimmt wird.

Um ein System entwickeln zu können, das spezielle Anforderungen erfüllt, die von der

Zielanwendung benötigt werden, muss ein HF-Systemingenieur daher eine wesentliche Übersicht auf Systemebene erlangen und ein umfassendes Verständnis für die Schlüsselbegriffe und Prinzipien haben, die ihnen zugrunde liegen. Die Bedeutung dieses Know-hows hat zu dieser Abhandlung geführt, welche aus zwei Teilen besteht.

Das Ziel des ersten Teils ist es, eine exakte Einführung in die Haupteigenschaften und Kennzahlen zu geben, um HF-Bauteile charakterisieren und ihre Leistungsmerkmale quantifizieren zu können. Das Ziel des zweiten Teils ist es, einen klar strukturierten Überblick über die große Palette an einzelnen Komponenten und ihrer Art zu geben, die dazu verwendet werden können, HF-Signalketten für die gewünschten Applikationen zu entwickeln. In diesem Artikel betrachten wir die Haupteigenschaften sowie Leistungskennzahlen von HF-Systemen.

Autor:  
Anton Patyuchenko  
Field Applications Engineer  
Analog Devices Inc.  
www.analog.com



**Bild 1:** Ein durch seine S-Matrix beschriebenes Netzwerk mit zwei Ports

**Einführung in die HF-Terminologie**

Es gibt eine Vielzahl an Spezifikationen, die zur Charakterisierung von kompletten HF-Systemen und ihren diskreten Bausteinen genutzt werden. Abhängig von der Anwendung oder dem Einsatzgebiet sind einige dieser Eigenschaften von größerer Bedeutung, während andere weniger wichtig oder gar irrelevant sind. Es ist sicher unmöglich, eine vollumfängliche Analyse eines derart komplexen Systems durchzuführen. Nichtsdestotrotz pflegen wir eine kompakte, dabei aber umfassende Analyse der üblichsten HF-Leistungsmerkmale, indem wir der allgemeinen Herausforderung folgen, ihre komplexe Konstellation in eine ausgewogene und einfach zu verstehende Erläuterung der Eigenschaften und Charakteristika von HF-Systemen überzuführen.

**Fundamentale Eigenschaften**

Die Streumatrix (oder S-Matrix) ist der grundlegende Begriff, den man kennen muss, um das Verhalten eines HF-Systems zu beschreiben. Eine S-Matrix erlaubt es, selbst die komplexesten HF-Netzwerke als eine einfache Blackbox mit N-Ports darzustellen. Ein gängiges Beispiel eines HF-Netzwerks mit zwei Ports (zum Beispiel ein Verstärker, Filter oder Dämpfungsglied) ist in Bild 2 gezeigt, in dem V+ die komplexe Amplitude der ein-

gehenden Spannungswelle am Port n ist und V- die komplexe Amplitude, der an Port n reflektierten Welle darstellt. Wenn alle Ports mit angepassten Lasten abgeschlossen sind, beschreibt dieses Netzwerk über die Streumatrix, welche Elemente- oder S-Parameter- bestimmen, wie sich die HF-Energie im System, in Bezug auf dem Verhältnis zwischen diesen Spannungswellen ausbreitet. Lassen Sie uns nun S-Parameter verwenden, um die Haupteigenschaften eines typischen HF-Netzwerks zu beschreiben.

S21 entspricht dem Übertragungs-Koeffizienten von Port 1 zu Port 2 für den Fall, dass das Netzwerk abgeglichen ist (S12 kann entsprechend definiert werden). Seine Größe |S21| im logarithmischen Maßstab beschreibt das Verhältnis der Ausgangsleistung zur Eingangsleistung, was auch als Verstärkung oder skalare logarithmische Verstärkung bezeichnet wird. Dieser Parameter ist die Schlüsseleigenschaft eines Verstärkers und weiterer HF-Systeme, bei denen er auch negative Werte annehmen kann. Eine negative Verstärkung zeigt immanente oder durch Fehlanspassung hervorgerufene Verluste an, ausgedrückt durch ihre reziproke Größe, bekannt als Einfügedämpfung (insertion loss = IL), welche eine typische Eigenschaft von Dämpfungsgliedern und Filtern ist.

Wenn man nun die einfallenden und reflektierten Wellen am gleichen Port betrachtet, kann man S11 and S22 wie in Bild 1 gezeigt definieren. Diese Begriffe entsprechen dem Reflexions-Koeffizienten am korrespondierenden Port, für den Fall, dass der andere Port mit einer angepassten Last abgeschlossen ist. Mit Gleichung 1 kann man die Größe des Reflexions-Koeffizienten ins Verhältnis zur Rückflussdämpfung (RL = return loss) setzen:

$$RL = -20 \log(|\Gamma|) \tag{1}$$

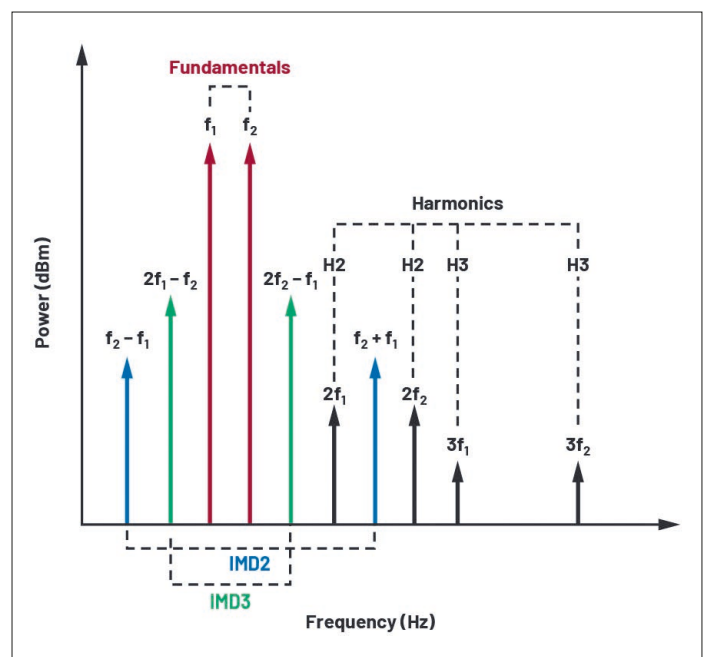
RL beschreibt das Verhältnis der in den Port eingespeisten Lei-

stung zur Leistung, die an die Quelle zurück reflektiert wird. Abhängig davon, an welchem Port dieses Verhältnis bestimmt wird, kann man zwischen Eingangs- und Ausgangs-Rückflussdämpfung unterscheiden. Die Rückflussdämpfung ist nie negativ und zeigt an, wie gut die Eingangs- oder Ausgangsimpedanz der Netzwerke an die Impedanz an dem Port angepasst ist, der mit der Quelle verbunden ist.

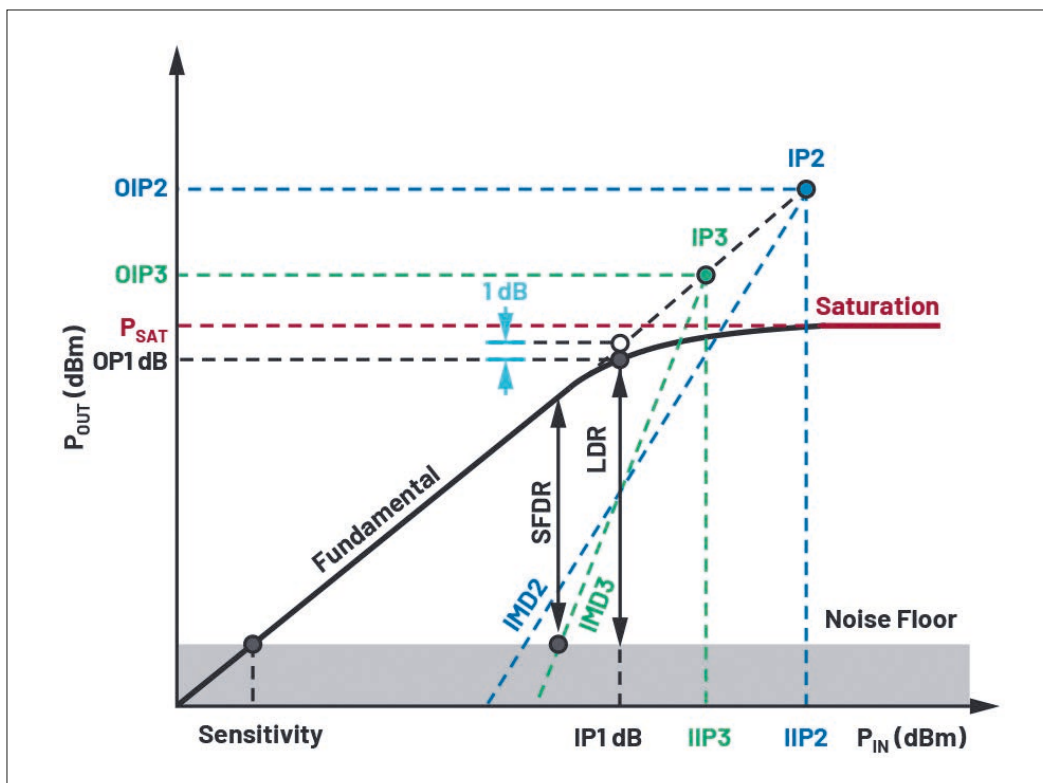
Es ist wichtig anzumerken, dass dieser einfache Zusammenhang von IL und RL zu den S-Parametern nur für den Fall gilt, dass alle Ports korrekt mit der angepassten Impedanz abgeschlossen sind sind, was die Hauptbedingung für die Definition der S-Matrix ist, die das Netzwerk selbst beschreibt. Ist das Netzwerk nicht angepasst ändern sich seine immanenten S-Parameter nicht, aber es ändern sich dann die RL an seinen Ports und damit auch die Übertragungs-Koeffizienten zwischen ihnen [2].

**Frequenzbereich und Bandbreite**

All diese fundamentalen Größen, die gerade beschrieben wurden, ändern sich kontinuierlich über den Frequenzbereich, der die grundlegende Charakteristik



**Bild 2:** Harmonische und Intermodulationsprodukte



**Bild 3: Definition der nichtlinearen Charakteristik**

für alle HF-Systeme ist. Er definiert die Frequenzen, bei denen diese Systeme arbeiten können und führt uns zu einem weiteren wichtigen Leistungsmerkmal – der Bandbreite (bandwidth = BW). Obwohl sich dieser Begriff ausschließlich auf Signaleigenschaften beziehen kann, werden einige seiner Formen auch genutzt, um HF-Systeme zu beschreiben, die diese Signale verarbeiten. In der allgemeinen Definition ist die Bandbreite ein Frequenzbereich, begrenzt durch bestimmte Kriterien. Sie kann jedoch unterschiedliche Bedeutung haben, die abhängig vom spezifischen Anwendungsfall sind. Um unsere Diskussion weiter zu komplettieren, zeigen wir hier einige kurze Definitionen der Variationen ihrer Bedeutung:

- Die 3-dB-Bandbreite ist der Frequenzbereich, in dem der Pegel der Signalleistung über der Hälfte seines maximalen Wertes liegt.
- Die Echtzeitbandbreite (IBW = instantaneous band width) definiert die maximale kontinuierliche Bandbreite, die ein System generieren, oder erfassen

kan, ohne neu abgestimmt werden zu müssen.

- Die belegte Bandbreite (OBW = occupied band width) ist der Frequenzbereich, der einen spezifizierten Prozentanteil der integrierten Gesamtsignalleistung enthält
- Die Auflösungsbandbreite (RBW = resolution band width) beschreibt in ihrer allgemeinen Bedeutung die minimale Trennung zweier Frequenzkomponenten, die noch aufgelöst werden können. In Spektrumanalysatoren ist dies z.B. die Bandbreite der letzten Filterstufe.

Es gibt nur wenige Beispiele unterschiedlicher Bandbreitendefinitionen, jedoch wird die Bandbreite einer HF-Signalkette, unabhängig von ihrer Bedeutung, größtenteils von ihrem analogen Frontend sowie von der Abtastrate und Bandbreite der schnellen A/D- und D/A-Wandler bestimmt.

### Nichtlinearitäten

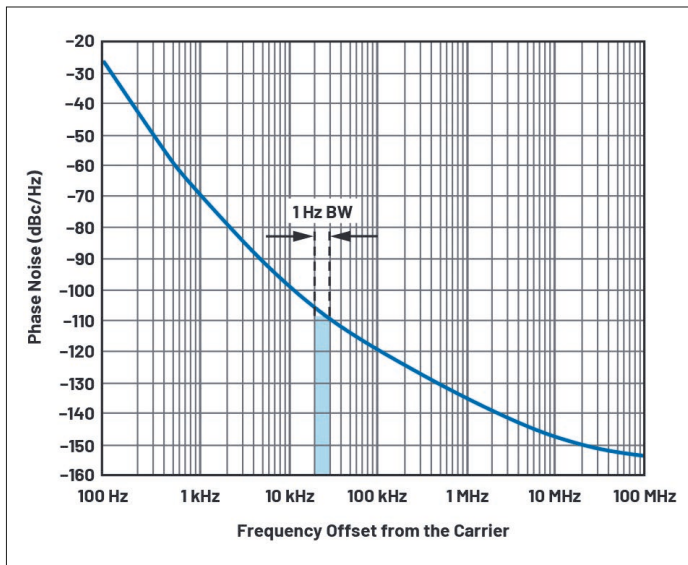
Es muss erwähnt werden, dass die charakteristischen Eigen-

schaften eines HF-Systems nicht nur bei unterschiedlichen Frequenzen variieren, sondern auch mit unterschiedlichen Leistungspegeln eines Signals. Die grundlegenden Eigenschaften, die am Anfang dieses Artikels beschrieben wurden, sind typisch für Kleinsignal-S-Parameter die keine Auswirkungen von Nichtlinearität zeigen. In einem allgemeinen Fall, bei dem kontinuierlich ansteigende Leistungspegel durch ein HF-Netzwerk fließen, resultiert dies häufig in einer deutlicheren Ausprägung von Nichtlinearitäten, welche letztendlich seine Leistungsfähigkeit beeinträchtigen.

Wenn man über ein HF-System oder eine seiner Komponenten mit guter Linearität spricht, denkt man im Allgemeinen, dass die Schlüsselkennzahlen, die seine nichtlineare Leistungsmerkmale beschreiben, auch die Anforderungen der Zielanwendung erfüllen. Dazu betrachten wir einige dieser Schlüsselkennzahlen, die üblicherweise verwendet werden, um das nichtlineare Verhalten eines HF-Systems zu quantifizieren

Der erste Parameter, den man betrachten sollte, definiert den Punkt, bei dem ein allgemeiner Baustein vom linearen in den nichtlinearen Betrieb übergeht: den Ausgangs-1 dB-Kompressionspunkt (OP1 dB). Dort liegt der Ausgangsleistungspegel, an dem die Verstärkung des Systems um 1 dB sinkt. Dies ist eine essenzielle Charakteristik eines jeden Leistungsverstärkers, der den Betrieb des Bausteins in Sättigung, definiert von der Ausgangssättigungsleistung ( $P_{SAT}$ ), bestimmt. Leistungsverstärker gehören im Allgemeinen zur Ausgangsstufe einer Signalkette und deshalb definieren ihre Parameter üblicherweise den Ausgangsbereich eines HF-Systems.

Ist ein System einmal im nichtlinearen Modus, entstehen störende Frequenzanteile oder Verzerrungen (spurs). Verzerrungen werden relativ zum Pegel eines Trägersignals in dBc gemessen und können in Harmonische und Intermodulationsprodukte eingeteilt werden (Bild 2). Eine Harmonische ist ein Signal, das man bei ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz findet (z.B. die Harmonischen H1, H2, H3). Im Gegensatz dazu sind Intermodulationsprodukte Signale, die auftreten, wenn zwei oder mehr Signale in einem nichtlinearen System vorhanden sind. Wenn das erste Grundsignal die Frequenz  $f_1$  hat und das zweite  $f_2$ , dann liegen die Intermodulationsprodukte 2. Ordnung bei  $f_1 + f_2$  und  $f_2 - f_1$  sowie bei  $f_1 + f_1$  und  $f_2 + f_2$  (letztere sind auch als H2-Harmonische bekannt). Diese Kombination von Intermodulationsprodukten 2. Ordnung und den Grundsignalen resultiert in Intermodulationsprodukten 3. Ordnung, von denen zwei ( $2f_1 - f_2$  und  $2f_2 - f_1$ ) nahe an den originalen Signalen liegen und deshalb nicht so einfach herausgefiltert werden können (Bild 2). Das Ausgangsspektrum eines nichtlinearen HF-Systems mit Störfrequenzanteilen zeigt einen Intermodulationsverzerrungspegel (IMD = intermodulation distortion), ein wichtiger Begriff zur



**Bild 4: Beispiel einer Phasenrauschcharakteristik**

Beschreibung der Nichtlinearität des Systems.

Störanteile im Zusammenhang mit den IMD2 und IMD3 verursachen eine Interferenz mit dem gewünschten Signal. Um das Ausmaß der Störwirkung zu quantifizieren, wird der „Einholpunkt“ oder Schnittpunkt (IP = intercept point) genutzt, der Punkt, an dem der IM-Pegel den Signalpegel theoretisch eingeholt hätte (Gleichheit). Man unterscheidet IP2 und IP3. Wie in Bild 3 dargestellt, definieren sie hypothetische Punkte für die Leistungspegel der Eingangssignale (IIP2, IIP3) und Ausgangssignale (OIP2, OIP3). Obwohl eine rein mathematische Größe, ist ein IP doch das wichtigste Maß für Linearität eines HF-Systems.

**Noise/Rauschen**

Der Begriff Noise beschreibt eine Schwankung in einem elektrischen Signal, das viele verschiedene Aspekte umfasst, unterscheidet sich also vom deutschen Begriff „Rauschen“. Abhängig von seinem Spektrum und der Weise, wie es ein Signal beeinträchtigt und den Mechanismen die es verursachen, kann ein Noise in viele unterschiedliche Typen und Formen eingeteilt werden. Trotz der unterschiedlichen Quellen muss man sich nicht in ihre physikalischen Eigenschaften vertiefen,

um ihre Auswirkungen auf die Systemleistung zu beschreiben. Man kann auf ein vereinfachtes Rauschmodell eines Systems zurückgreifen, das nur einen einzigen theoretischen Rauschgenerator verwendet, der durch sein Rauschmaß (NF, noise factor) beschrieben ist. Das ist auch die Verringerung des vom System verursachten Signal/Rausch-Abstands (SNR) in dB. Das NF eines passiven Bausteins ist gleich seiner Einfügedämpfung [S21]. In Systemen aus mehreren Komponenten, die durch ihre individuellen Rauschfaktoren  $F_i$  und Leistungsverstärkungen  $G_i$  definiert sind, gilt bei Anpassung die Frijs-Gleichung:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (2)$$

Daraus geht hervor, dass die erste Stufe in einer HF-Signalkette den Hauptanteil zur Rauschzahl des Systems beiträgt.

Wenn man Bausteine oder Systeme speziell unter dem Aspekt „Rauschverhalten“ betrachtet, bezieht man sich auf Signaleigenschaften, die von Rauschquellen beeinflusst werden. Diese Eigenschaften sind Phasen-Jitter und Phasenrauschen, zusammenhängende Begriffe, die die Signalstabilität im Zeitbereich (Jitter) und in der Frequenzdomäne (Phasenrauschen)

anzeigen. Welche davon bevorzugt wird, hängt normalerweise von der Applikation ab – in der HF-Kommunikation ist es üblich den Begriff „Phasenrauschen“ zu benutzen, während man in digitalen Systemen häufig den Begriff Jitter findet. Phasen-Jitter definiert kleine Schwankungen in der Phasenlage eines Signals, während das Phasenrauschen die spektrale Repräsentation beschreibt, die vom Leistungspegel des Rauschens relativ zum Träger in 1-Hz-Bandbreite bei unterschiedlichen Offsets des Trägers charakterisiert ist. Zudem wird angenommen, dass es bei dieser Bandbreite gleichmäßig ist (Bild 4).

**Vielfältige Derivate**

Die wichtigsten Kennzahlen, die hier bisher betrachtet wurden, liegen einer Vielzahl an von ihnen abgeleiteten Parametern zugrunde, die für die Leistungsquantifizierung von HF-Signalketten in unterschiedlichen Anwendungsbereichen benutzt werden.

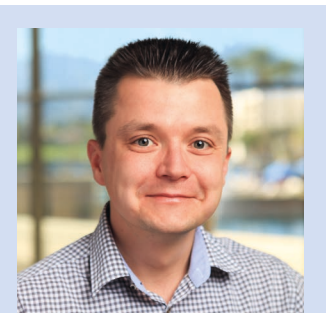
Die Kombination der Begriffe „Rauschen“ und „Störsignal“ (Noise) resultiert in der Definition des Dynamikbereichs (DR = dynamic range). Dieser beschreibt den Pegelbereich, für den ein System eine gewünschte Charakteristika aufweist. Der lineare Dynamikbereich (LDR = linear dynamic range) wird am unteren Ende durch das Rauschen und am oberen Ende durch den Kompressionspunkt begrenzt. Wenn das obere Ende vom Leistungspegel definiert ist, bei dem die Intermodulationsverzerrungen inakzeptabel werden, spricht man vom verzerrungsfreien Dynamikbereich (SFDR = spurious free dynamic range). Es sollte noch erwähnt werden, dass, abhängig von der Applikation, die aktuellen Definitionen der Begriffe LDR und SFDR variieren können [2].

Der niedrigste Signalpegel, den ein System verarbeiten kann, um ein Ausgangssignal mit einem bestimmten minimalen SNR zu produzieren, definiert ein weiteres wichtiges Kriterium

für ein Empfängersystem, die Empfindlichkeit. Sie lässt sich am einfachsten über das Rauschmaß des Empfängers definieren und wird dadurch bandbreiten- (nicht aber frequenz-)unabhängig: Empfindlichkeit = NF des Empfängers bei  $f_c$ . Das Phasenrauschen oder der Jitter in einem Datenkommunikationssystem resultieren z.B. in einer Abweichung der Konstellationspunkte von ihren idealen Orten im Augendiagramm, was wiederum den Fehlervektor (EVM = error vector magnitude) verschlechtert und damit zu einer höheren Bitfehlerrate (BER = bit error rate) beiträgt.

**Referenzen**

- [1] M. S. Gupta. “What Is RF?” IEEE Microwave Magazine, Vol. 2, No. 4. December 2001.
- [2] David M. Pozar. Microwave Engineering, 4. Edition. Wiley, 2011. ◀



**Der Autor**

Anton Patyuchenko erwarb 2007 seinen Master of Science in Mikrowellentechnik an der Technischen Universität in München. Nach seiner Graduierung arbeitete Anton als Forscher im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Er kam 2015 als Field Applications Engineer zu Analog Devices und liefert in dieser Position derzeit Unterstützung für strategische und Großkunden von Analog Devices, die auf HF-Anwendungen spezialisiert sind. Man erreicht ihn unter: anton.patyuchenko@analog.com.