

Breitbandige Direct-Sampling-Empfänger

So bleibt der Dynamikbereich maximal

Im Mittelpunkt dieses Artikels stehen die Herausforderungen beim Ansteuern von RF-Sampling-ADCs mit Bandbreiten von mehreren Oktaven.

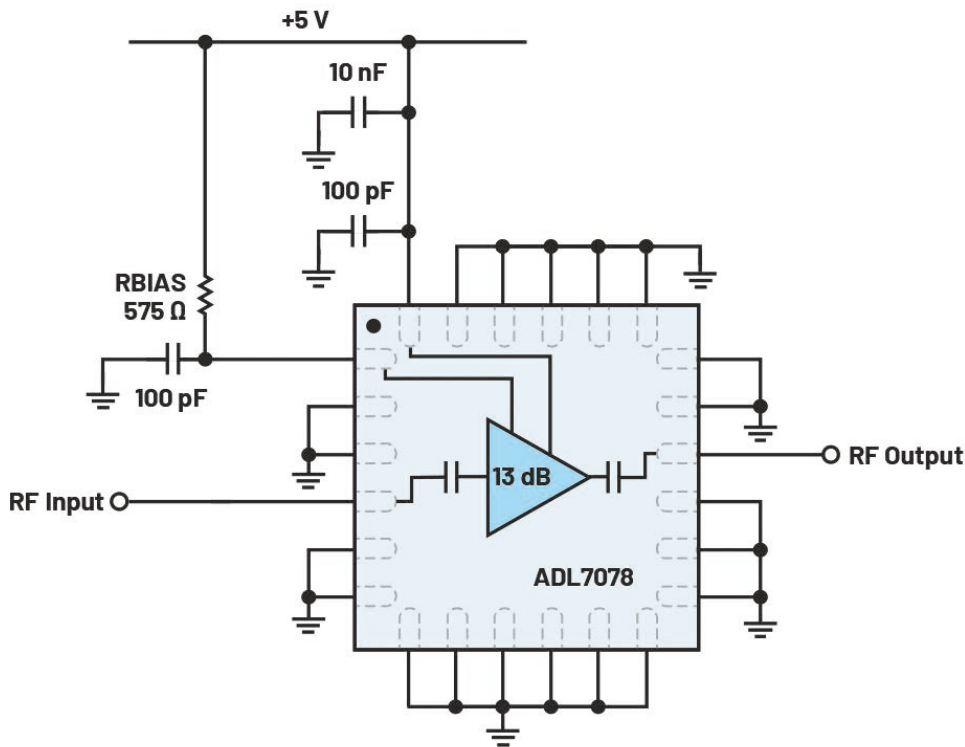


Bild 5. Blockschaftbild des ADL7078



Behandelt werden die Probleme im Zusammenhang mit der Intermodulation zweiter und dritter Ordnung, die Vor- und Nachteile der massebezogenen und differenziellen Ansteuerung sowie die Frage, welche Eigenschaften und Leistungsdaten HF-Treiberverstärker idealerweise mitbringen müssen, damit sie als ADC-Treiber geeignet sind.

Einführung

Die RF-Sampling-ADCs und DACs AD9084 und AD9088 machten das direkte Abtasten bzw. Digitalisieren von Mehroktaven-Frequenzbändern, wie etwa des von 2 bis 18 GHz reichenden Electronic-Warfare-Bands, zur Realität. Allerdings bringen diese Fortschritte auch Herausforderungen mit sich. Während sich die Performance-Werte traditioneller schmal-

bandiger Empfänger auf den IP3 konzentrieren, hat man es bei Mehroktaven-Empfängern mit In-Band-Oberschwingungen zweiter Ordnung, Oberschwingungen dritter Ordnung sowie Intermodulationsprodukten zweiter Ordnung zu tun.

Weshalb sind Oberschwingungen problematisch für breitbandige Empfänger?

In breitbandigen Signalketten sollen leistungsfähige Systeme einen möglichst großen Teil des Spektrums digitalisieren – mit hoher Wiedergabetreue und minimalem Rauschen. Beim Versuch, sämtliche Performance-Aspekte (Geschwindigkeit, Stromverbrauch, Empfindlichkeit und Genauigkeit) zu verbessern, geht es nicht ohne

Kompromisse. Ein solcher Kompromiss ist die Unterdrückung des Oberschwingungs- und Intermodulationsgehalts auf Kosten einer geringeren System-Performance und beeinträchtigter Sensing-Fähigkeiten. Auch wenn einige Oberschwingungen und Intermodulationsprodukte ausgefiltert werden können, wird es mit zunehmender Betriebsbandbreite immer weniger möglich, In-Band-Oberschwingungen auszufiltern.

In den vergangenen Jahrzehnten dienten Suboktav-Vorselektionsfilter als Teillösung zur Vermeidung von IM2-Produkten und Oberschwingungen, die im Zusammenhang mit Störsignalen entstehen können. Diese Töne bergen Gefahren für Empfänger – und hier insbesondere für jene, die (wie beispielsweise Mischer und Verstärker) nicht-lineare Komponenten nutzen, um das Spektrum für Datenwandler mit geringerer Abtastrate herunterzusetzen. Die Modulation von Oberschwingungen kann außerdem zur Entstehung von In-Band-Tönen führen, die die eigentlich interessierenden Signale verdecken, was entsprechende Herausforderungen bei der Diskrimination falscher Target-Signale und beim Schutz vor Spoofing-Attacks mit sich bringt.

Betrachten wir einmal die Empfindlichkeit einer Signalkette, die einen Digitalisierer ansteuert. Im Idealfall gibt der Empfänger einen einzelnen Ton aus, sodass der betreffende Prozessor seine Entscheidungen auf der Basis sauberer Daten fällen kann. In der Realität jedoch liegen oftmals mehrere Töne unterschiedlicher Stärke vor, die miteinander interagieren und infolge von Nichtlinearitäten in der Signalkette zusätzliche Töne erzeugen. Durch den Einsatz

Autoren:
Michael Gurr (oben),
Product Line Manager
Eamon Nash (unten),
Product Applications Director
Analog Devices, Inc.
www.analog.com

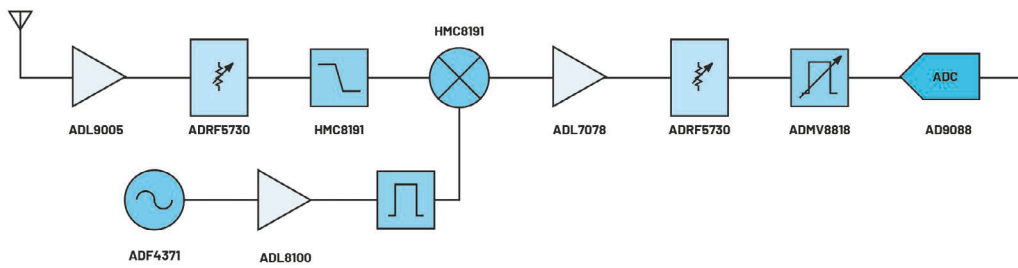


Bild 1: Standardmäßige Architektur eines Heterodyn-Empfängers

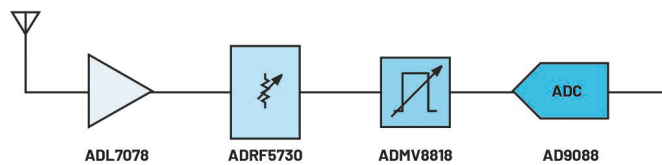


Bild 2: Blockschaltbild einer einfachen Direct-Sampling-Empfängerarchitektur

hochgradig linearer Komponenten in der Signalkette gelingt es dem Digitalisierer, einen großen störungsfreien Dynamikbereich (Spurious-Free Dynamic Range, SFDR) zu bewahren. Dieser ist ein Maß dafür, wie weit herab ein Empfänger ein schwaches Signal in der Gegenwart mehrerer stärkerer Signale detektieren kann, die Intermodulationsprodukte erzeugen (angegeben in dB bezogen auf das primäre Signal). Je größer der SFDR, umso geringer das Risiko, ein Zielsignal falsch zu identifizieren oder Opfer einer Spoofing-Attacke zu werden.

In neueren Architekturen werden die Suboktav-Vorselektionsfilter in größerer Entfernung zur Antenne platziert, um die Rauschzahl zu minimieren und den Dynamikbereich zu maximieren. Hierbei ergeben sich jedoch Herausforderungen im Zusammenhang mit der Erzeugung und Verstärkung von Oberschwingungen und Intermodulationsprodukten im gesamten Empfänger. Neue Methoden für den Umgang mit diesen unerwünschten Tönen sind deshalb erforderlich.

Empfängerarchitekturen kurz verglichen

RF-Sampling-Architekturen sind ein essenzielles Element

beim Design moderner Funkempfänger. Welche Architektur gewählt wird, hat außerdem signifikante Auswirkungen auf das Oberschwingungs-Verhalten des jeweiligen Systems. Nachfolgend wird kurz auf die Vor- und Nachteile der gängigen RF-Sampling-Architekturen Direct RF Sampling und Heterodyn eingegangen.

In der Vergangenheit waren Heterodyn-Architekturen (Bild 1) aus mehreren Gründen beliebt. An erster Stelle stand die Verfügbarkeit von HF-Bauelementen für leistungsfähige und hinreichend schnelle Datenwandler für das IF-Sampling und das Erzielen eines sehr großen Dynamikbereichs. Heterodyn-Architekturen zeichnen sich durch angemessene Linearität und Frequenzagilität aus und bergen das Potenzial für sehr gute Oberschwingungs- und SFDR-Eigenschaften, wenn sie mehrere IF- und RF-Filterstufen kombinieren. Darüber hinaus haben sie meist moderate Eigenschaften bezüglich der Oberschwingungen und Intermodulationsprodukte zweiter Ordnung. Beim Mischen des RF-Signals entstehen jedoch Töne, die die Linearität beeinträchtigen können, wogegen allerdings sorgfältiges Design und Filtermaßnahmen Abhilfe schaffen.

Aufgrund der Selektivität der IF-Stufe zeichnen sich Heterodyn-Empfänger außerdem durch gute Sperreigenschaften aus. Nachteilig sind ihre Komplexität, die Möglichkeit der Oberschwingungserzeugung und die Notwendigkeit anspruchsvoller Frequenzpläne, um die Oberschwingungen zu unterdrücken. Hinzu kommt, dass Heterodyn-Empfänger (insbesondere für höhere Frequenzen) sehr viele Bauelemente benötigen.

Direct-RF-Sampling-Empfänger (Bild 2) bieten ausgezeichnete Oberschwingungs-Eigenschaften und sehr hohe Linearität. Denn sie vermeiden Abwärts-wandler-Stufen und erzielen dadurch sehr gute Eigenschaften hinsichtlich der Oberschwingungen und der Intermodulationsprodukte zweiter Ordnung. Wichtig ist, dass die Linearität sowohl des ADCs selbst als auch

der Schaltungen, die den ADC ansteuern, eine entscheidende Rolle für die IP2-, IP3- und Intermodulations-Eigenschaften spielt. Jedoch gibt es auch einige Herausforderungen: Solche Empfänger können nämlich empfindlich gegenüber Störbeeinflussungen durch Out-of-Band- und In-Band-Blockersignale sein, da die Empfänger ein breites Frequenzspektrum erfassen.

Effektive Filtermaßnahmen und das Design des RF-Frontends sind deshalb entscheidend dafür, wie sich diese Blocker auswirken. Weitere Herausforderungen können sich im Hinblick auf die DC-Leistungsaufnahme und die Kosten ergeben. Die schnellen Wandler und die FPGAs können nämlich einen erheblichen Stromverbrauch verursachen.

Eine genauere Gegenüberstellung der verschiedenen Empfängerarchitekturen enthält der Beitrag: „Wideband RF Receiver Architecture Options“.

Oberschwingungen zweiter und dritter Ordnung, IMD2 und IMD3

Bei beiden Konzepten sind verschiedene Abwägungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit anzustellen. Einer der wichtigsten Parameter ist die Tonlinearität, die häufig im Fokus

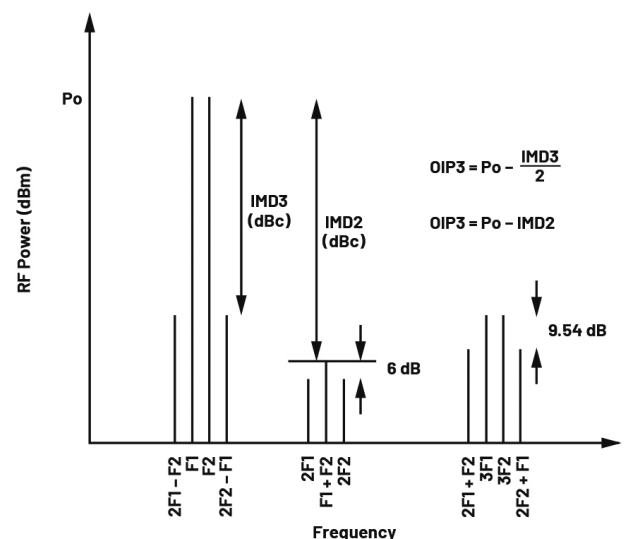


Bild 3: Oberschwingungen zweiter und dritter Ordnung sowie Intermodulationsprodukte zweiter und dritter Ordnung als Resultat einer Zweitonanregung

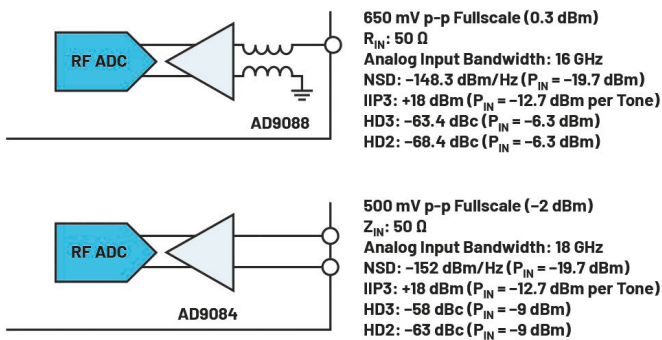


Bild 4: Die ADCs AD9084 und AD9088 mit ihren eingangsbezogenen HF-Kenndaten

entsprechender Diskussionen steht. Oberschwingungen zweiter und dritter Ordnung sowie Intermodulationsverzerrungen (Intermodulation Distortion, IMD) sind die häufigsten Quellen sowohl interner als auch extern generierter Störgrößen. Für System-Designer kommt es darauf an, Ursprung und Auswirkungen dieser Störgrößen zu kennen und darüber Bescheid zu wissen, wie sich ihre Auswirkungen abmildern lassen.

Bild 3 zeigt das resultierende Spektrum, wenn zwei benachbarte Töne an einen HF-Verstärker gelegt werden. Die Zweitonanregung wird häufig zur Messung der Intermodulationsprodukte dritter Ordnung verwendet, die in der Nähe der Töne bei $2F_1 - F_2$ und $2F_2 - F_1$ entstehen. Der Test simuliert ein

am Empfänger ankommendes Signal mit einer Frequenz, die sich nur wenig von der des Haupttons unterscheidet. Die Leistungsdifferenz zwischen der Grundschiwingung und den IMD3-Tönen wird zur Berechnung des OIP3 (Output Third-Order Intercept Point) genutzt:

$$OIP3 = P_O - \frac{IMD3}{2}$$

P_O ... Ausgangsleistung der Grundschiwingung

Der OIP3-Wert ist eine entscheidende Spezifikation von Hochfrequenzsystemen und ermöglicht nicht nur eine Prognose des Nachbarkanal-Leistungsverhältnisses (Adjacent Channel Power Ratio, ACPR), sondern ist auch ein Maß für die Beständigkeit des Systems gegen In-Channel-Blockersignale.

Bild 3 offenbart, dass die Zweitonanregung noch weitere Nebenprodukte erzeugt. Dazu gehören Oberschwingungen zweiter und dritter Ordnung der Ursprungstöne bei $2F_1$, $2F_2$, $3F_1$ und $3F_2$, IMD3-Töne bei $2F_1 + F_2$ und $2F_2 + F_1$ sowie ein Intermodulationston zweiter Ordnung bei $F_1 + F_2$. Die Differenz zwischen den Grundschiwingungen und dem Ton bei $F_1 + F_2$ wird zum Berechnen des OIP2-Werts herangezogen:

$$OIP2 = P_O - IMD2$$

Aufgrund der Filterung in den IF-Stufen sind die IP2-Produkte und die Oberschwingungen zweiter und dritter Ordnung in traditionellen Heterodyn-Empfängern geringer Bandbreite weniger problematisch. In Direct-Sampling-Empfängern wird dagegen weniger gefiltert, sodass der Pegel dieser Produkte berücksichtigt werden muss. Während beispielsweise ein Electronic-Warfare-Empfänger mit 2 bis 18 GHz Bandbreite scannt, haben die innerhalb des Empfängers generierten Oberschwingungen durchaus das Potenzial, entweder Fehlalarme zu erzeugen oder echte Bedrohungen zu verbergen.

ADCs für Direct-Sampling-Anwendungen

Die Bausteine AD9088 und AD9084 gehören zu einer Familie mehrkanaliger Direct-Sampling-ADCs und -DACs mit Analogeingangs-Bandbreiten von 16 bzw. 18 GHz. Bild 4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Blockschaltbild des AD9088, der sich auf dessen RF-Sampling-ADC konzentriert. Während der AD9084 eine differenzielle Eingangsstruktur aufweist, verfügt der AD9088 über einen eingebauten Balun und besitzt einen massebezogenen Eingangswiderstand von 50 Ohm. Wenn diese ADCs von einem HF-Verstärker angesteuert werden sollen, ist es sinnvoll, die Kenndaten dieser Bausteine als Leistungspegel in dB anzugeben, wie in Bild 4 geschehen. Durch die Umwandlung von dBFS-Spezifikationen (Dezibel bezogen auf Full Scale) in dBm (Dezibel bezogen auf 50 Ohm) ist es möglich, den Full-Scale-Eingang sowie die eingangsbezogenen IP2- und IP3-Werte in dBm auszudrücken. Wenn beispielsweise zwei Töne mit -15 dBm bei 5,2 GHz, die an den Eingang des AD9084 gelegt werden, ein IMD2-Produkt bei $F_1 + F_2$ mit -59,3 dBc erzeugen, ergibt dies einen äquivalenten IIP2-Wert von 44,3 dBm. Auf die gleiche Weise können die

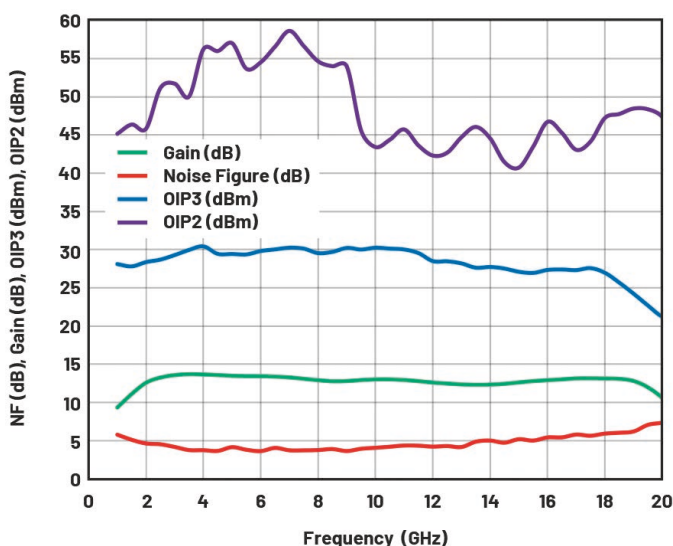


Bild 6: Verstärkung, Rauschzahl, OIP2 und OIP3 des ADL7078

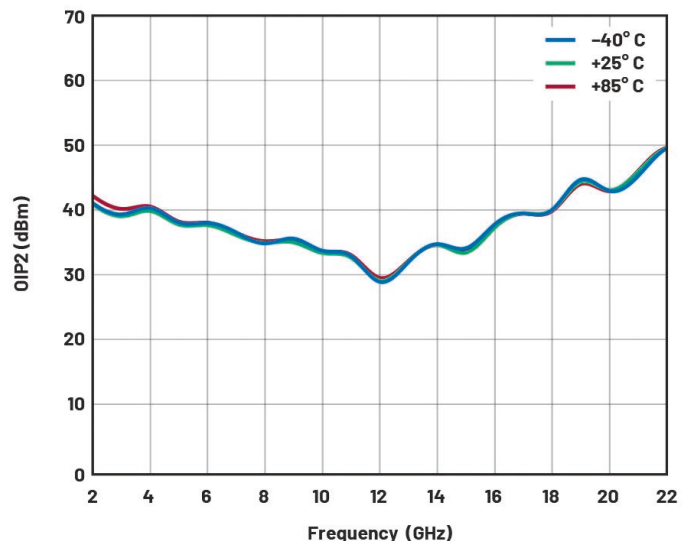


Bild 7: Typische IP2-Kurve des ADL8100 in mehrtaktigen, verteilten Breitbandverstärkern

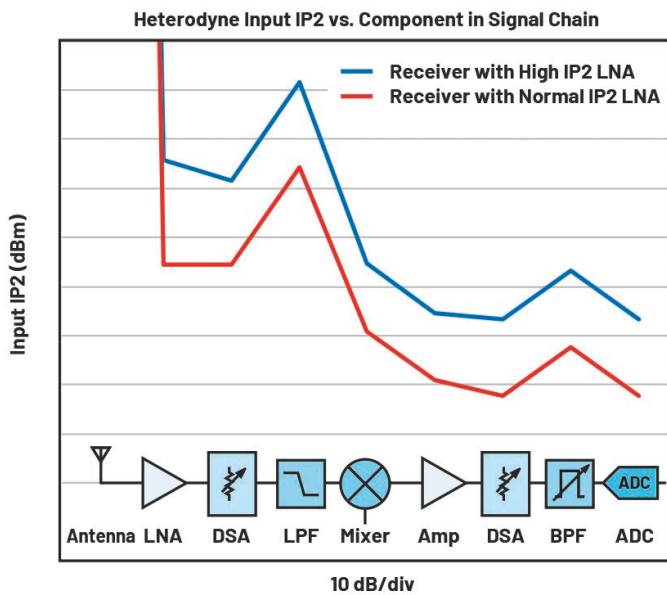


Bild 8: Kaskadierter Input-IP2-Wert bei einem Heterodynempfänger

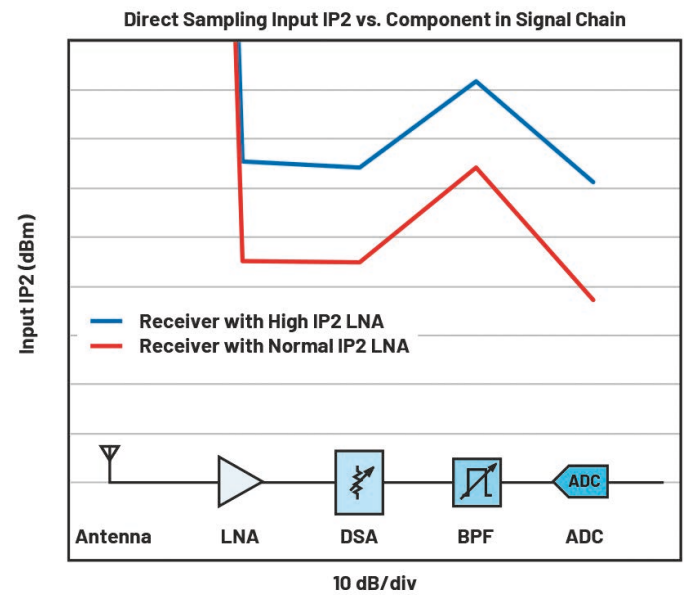


Bild 9: Kaskadierter Input-IP2-Wert bei einem Direct-Sampling-Empfänger

Oberschwingungen zweiter und dritter Ordnung in dBc angegeben werden, das Rauschen dagegen in dBm/Hz.

Oberschwingungsverhalten eines typischen breitbandigen HF-Verstärkers

Das Optimieren von Empfänger-Designs im Interesse hoher Linearität bzw. das Minimieren der Auswirkungen von Oberschwingungen und ihren Produkten mit zunehmender Eingangsleistung des Empfängers ist von grundlegender Bedeutung, wenn die Empfindlichkeit verbessert werden soll. Zwar lassen sich intern erzeugte Oberschwingungen und Intermodulationsprodukte durch Filtermaßnahmen und eine sorgfältige Frequenzplanung minimieren, aber in dicht belegten und durch starke Störgrößen geprägten Umgebungen müssen auch die Einflüsse mehrerer Töne am Empfängereingang berücksichtigt werden. Die Oberschwingungs-Eigenschaften jeder Komponente der Signalkette haben unmittelbaren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.

HF-Verstärker gehören zu jenen Bestandteilen von HF-Signalketten, die erheblich zum Aufkommen intern generierter Oberschwingungen beitragen. Breitbandverstärker, die große

Frequenzbereiche beispielsweise über Oktaven oder Dekaden hinweg abdecken, können IP2- und IP3-Werte im Bereich von 30 dBm aufweisen, die sich zudem mit der Frequenz ändern. Bei Heterodyn-Empfängern mit den entsprechenden Filtern liegen die Oberschwingungen zweiter Ordnung tendenziell außerhalb des interessierenden Frequenzbandes und sind daher weniger kritisch. In breitbandigen Direct-Sampling-Empfängern können die Oberschwingungen zweiter Ordnung dagegen in das interessierende Frequenzband fallen und lassen sich somit nicht ohne weiteres herausfiltern. Als Lösung für dieses Problem hat ADI Verstärker mit hohen IP2-Werten entwickelt.

Bild 5 zeigt das Blockschaltbild und die grundlegende Beschaltung des neuen Breitband-LNAs ADL7078. Er verkraftet am Eingang Signale bis zu 32 dBm (was die Notwendigkeit eines Begrenzers verringert) und weist einen hohen OIP2 von typisch 48 dBm auf (s. Bild 6).

Beim ADL7078 sind viele Schaltungselemente, die sonst häufig extern hinzugefügt werden müssen, integriert, etwa AC-Kopplungskondensatoren sowie Bias-Induktivität. Wie in Bild 5 zu erkennen ist, benötigt der ADL7078 nur eine Filterung

der Versorgungsleitung, und zum Festlegen des Drain-Ruhestroms reicht ein einziger Widerstand.

Bei typischen, verteilten Mehroktaven-Verstärkern mit großer Bandbreite hat die IP2-Kurve einen V-förmigen Verlauf, s. Bild 7. Unterhalb der Mitte einer Bandbreite von zwei Oktaven bleibt die Oberschwingung zweiter Ordnung innerhalb des Bandes, sodass die IP2-Kurve entweder flach verläuft oder mit steigender Frequenz abnimmt. Sobald aber die Oberschwingung zweiter Ordnung das Band verlässt, wird der IP2-Wert bis zum oberen Ende des Durchlassbands des Verstärkers steigen. Im Gegensatz zur gerade beschriebenen Charakteristik weist der ADL7078 über die gesamte Betriebsbandbreite hinweg eine relativ flach verlaufende IP2-Kurve auf. Darüber hinaus sind die IP2-Werte dieser Verstärker generell höher als bei typischen verteilten Verstärkern. Ideal zum Ansteuern von ADCs in mehroktavigen HF-Signalketten in Direct-Sampling-Technik.

Einsatz des ADL7078 in Direct-Sampling-Empfängern

Vor dem Hintergrund der Diskussionen um den Vergleich verschiedener Empfängerarchitekturen und die Bedeutung hochgradig linearer Verstärker

erfolgten Simulationen von Direct-Sampling- und Heterodyn-Empfängern, um die Leistungsunterschiede hervorzuheben. Diese einfachen Signalketten-Simulationen machen schnell deutlich, weshalb die Verwendung von Verstärkern, die für hohe Linearität ausgelegt sind, von großem Vorteil für das Erzielen eines störungsfreien Dynamikbereichs sind.

Um sich ein Bild von den IP2-Eigenschaften einer Signalkette zu machen, kann man die einzelnen Komponenten und ihre Beiträge zur kaskadierten IP2-Performance betrachten. Diese eingangsbezogene Simulation liefert eine visuelle Darstellung der Leistungsfähigkeit und macht die Design-Entscheidungen damit einfacher, jedoch wird hier jeweils nur eine einzige Frequenz berücksichtigt.

Bild 8 zeigt, dass der Empfangs-LNA als erste aktive Komponente der Signalkette die erste Schwachstelle darstellt. Wird anstelle eines typischen Breitband-LNAs ein Verstärker mit hohem IP2-Wert verwendet, ergibt sich ein um etwa 20 dB besserer IIP2-Wert. Die nächste Schwachstelle ist der Mischer, der Oberschwingungen und Mischprodukte der Oberschwingungen erzeugt, was negative Auswirkungen

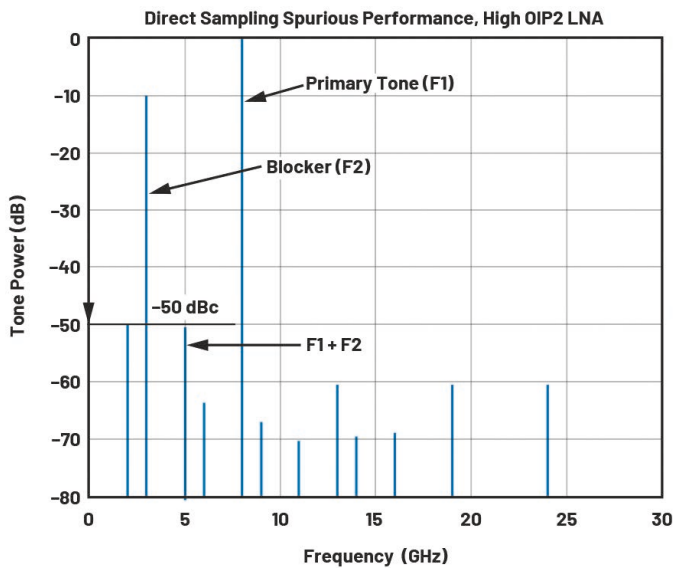


Bild 10: Störgehalt am ADC-Eingang mit dem High-IP2-LNA ADL7078 und Direct-Sampling-Empfänger (Grundschwingung normiert auf 0 dBm)

auf die Oberschwingungseigenschaften hat. Nachfolgende Filterstufen können die Oberschwingungs-Performance allerdings verbessern. Bild 9 macht deutlich, dass die einzige Schwachstelle am LNA erheblichen Einfluss auf die störenden Signalanteile hat, die zum ADC gelangen. Durch einfaches Abwandeln dieses einen Bauteils lässt sich ein Performance-Unterschied von 20 dB erreichen, was die Energie der Oberschwingungen nahezu um den Faktor 7 verringert.

Um besser zu verstehen, welche Auswirkungen hochlineare Verstärker mit hohen IP2-Werten haben, ist es sinnvoll, den Störanteil zu untersuchen, der den ADC im Fall eines einzelnen Eingangstons bei 8 GHz in der Gegenwart eines Blockertons bei 3 GHz erreicht, der sich um -10 dBc vom primären Eingangston unterscheidet. Wir konzentrieren uns hierbei ausschließlich auf die in Bild 2 dargestellten Direct-Sampling-Architekturen, denn Heterodyn-Empfänger erzeugen zusätzliche Mischprodukte, die den Vergleich komplizieren machen. Dabei wird deutlich, dass die (auf 0 dBm normierten) Primärtöne bestimmte Oberschwingungen generieren und dass der Primärtön mit dem Blockerton interagiert, was zur

Entstehung von Intermodulationsprodukten führt. Obwohl die enthaltenen Oberschwingungen vor Erreichen des ADC ausgefiltert werden, sind nach wie vor Oberschwingungen von hinreichender Amplitude enthalten, und die Intermodulationsprodukte erzeugen ein unerwünschtes Signalrauschen. In Bild 10 hat der bei 5 GHz liegende stärkste Intermodulations-ton eine Amplitude von -50 dBc, während derselbe Ton in Bild 11 mit -23 dBc erkennbar ist. Diese beträchtliche Differenz hat direkte Auswirkungen auf die Empfängerempfindlichkeit und unterstreicht, wie wichtig die Absenkung des Oberschwingungs- und Intermodulationsgehalts durch Verwendung des richtigen Verstärkers ist, um eine optimale Leistungsfähigkeit zu erreichen.

Zusammenfassung

Durch die Einführung schneller RF-Sampling-ADCs wächst der Bedarf an breitbandigen Treiberschaltungen, deren IP2- und IP3-Werte mit jenen traditioneller Heterodyn-Empfänger vergleichbar sind. Die großen Abtastbandbreiten und das potenzielle Vorhandensein von In-Band-Blocker- und Interferenzsignalen haben dazu geführt, dass die Eigenschaften

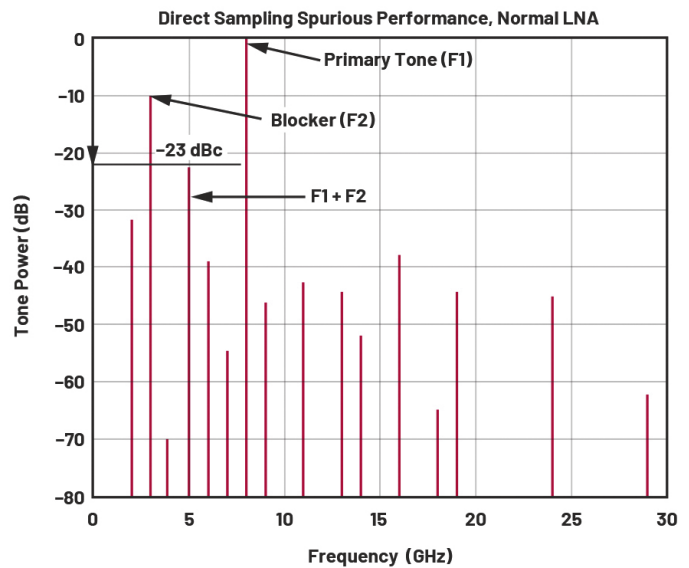


Bild 11: Störgehalt am ADC-Eingang mit normalem LNA ADL7078 und Direct-Sampling-Empfänger (Grundschwingung normiert auf 0 dBm)

der LNAs und ADC-Treiber in Bezug auf die Oberschwingungen zweiter Ordnung und die Intermodulationsprodukte vermehrt ins Blickfeld rücken. Die Eigenschaften bezüglich der Oberschwingungen dritter Ordnung und der Intermodulationsprodukte sind ebenfalls weiterhin wichtige Faktoren bei der Bewertung breitbandiger Verstärker. Die High-IP2-Verstärker ADL7078 und ADL8104 von ADI zeichnen sich unter den auf dem Markt angebotenen Einzelverstärker-ICs durch die besten IP2-Werte aus und eignen sich hervorragend als ADC-Treiber in breitbandigen Systemen.

Literaturnachweis

Annino, Benjamin: SFDR Considerations in Multi-Octave Wideband Digital Receivers, Analog Dialogue, Vol. 55, Januar 2021

Hall, Brad und David Mailloux: How Digitally Tunable Filters Enable Wideband Receiver Applications, Analog Dialogue, Vol. 56, Juni 2022

Jayamohan, Umesh: Not Your Grandfather's ADC: RF Sampling ADCs Offer Advantages in Systems Design, Analog Devices, Inc., Juli 2015

Wer schreibt:

Michael Gurr ist in der Aerospace and Defense Business Unit von Analog Devices als Product Line Manager für HF-Verstärker tätig. Seit seinem Eintritt bei ADI im Jahr 2018 hatte er verschiedene Positionen im HF-Design und Management inne. Gurr besitzt über 10 Jahre Erfahrung in unterschiedlichen Funktionen bei der Entwicklung von GaN- und GaAs-Verstärkern. Im Fach Elektrotechnik erwarb er 2013 an der Boston University ein Bachelordiplom und 2016 an der Northeastern University ein Masterdiplom. Hinzu kam 2021 ein MBA-Abschluss von der UMass Amherst.

Eamon Nash arbeitet bei Analog Devices als Applications Engineering Director für HF-Verstärker und Beamformer. Im Feld ebenso wie in der Fabrik war er für das Unternehmen in verschiedenen Funktionen im Bereich der Mixed-Signal-, Präzisions- und HF-Produkte tätig. Den gegenwärtigen Schwerpunkt seiner Arbeit bilden HF-Verstärker und Beamformer-Produkte für Satellitenkommunikations- und Radaranwendungen. Nash hat an der University of Limerick (Irland) ein Bachelor-of-Engineering-Diplom in Elektronik erworben und ist Inhaber von fünf Patenten. ◀