

Breitband-Eingangsstufen für GPS-Wandler entwickeln

Im Zuge der Weiterentwicklungen bei schnellen A/D-Wandlertechnologien steigt die Notwendigkeit, sehr hohe ZF-Frequenzen bei hohen Geschwindigkeiten exakt aufzulösen.

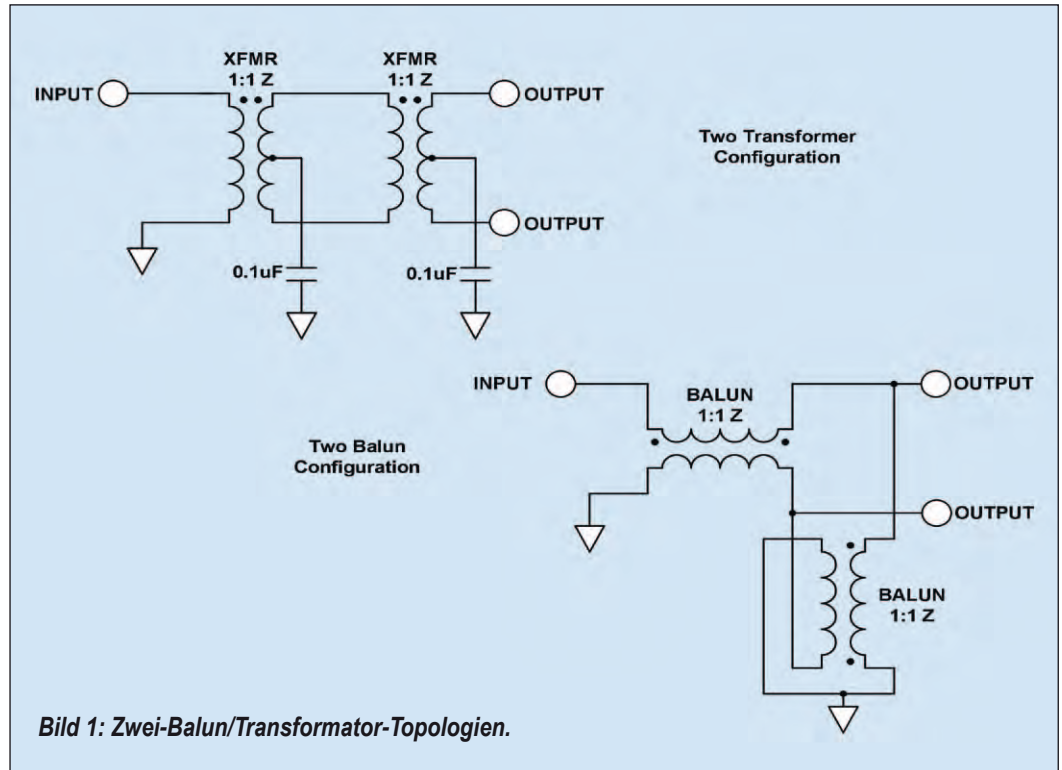


Bild 1: Zwei-Balun/Transformator-Topologien.

Dies bringt zwei Herausforderungen mit sich. Die Wandlerentwicklung selbst und die Eingangsstufe, die das Signal in den Wandler einspeist. Selbst wenn der Wandler eine ausgezeichnete Leistungsfähigkeit aufweist, darf die Eingangsstufe die Signalqualität nicht beeinträchtigen. Hochfrequente, sehr schnelle Wandlerdesigns findet man heute in vielen Anwendungen. RADAR, Mobilfunk-Infrastruktur und Messtechnik erweitern die Leistungsgrenzen ständig. Anwendungen wie diese verlangen schnelle GPS-Wandler mit Auflösungen von 8 bis 14 bit. Dabei ist zu beachten, dass viele Parameter erfüllt werden müssen, um für eine bestimmte Anwendung das passende Bauteil zu finden.

Mit „Breitband“ sind in diesem Beitrag Signalbandbreiten von über 100 MHz bis hin zu Frequenzen von 1 bis 4 GHz gemeint. Der Beitrag konzentriert sich auf die Entwicklung eines passiven Breitbandnetzwerks inklusive Spezifikationen,

die man wissen muss, wenn man einen Transformator oder Balun auswählt. Außerdem werden heute übliche Stromkonfigurationstopologien erläutert. Zum Schluss werden Überlegungen und Optimierungstechnologien vorgestellt, um Entwicklern zu helfen, eine praktikable Breitbandlösung im GHz-Bereich zu realisieren, welche zu den Parametern einer bestimmten Anwendung passt.

Die Grundlage

Es ist ganz normal, für Anwendungen aus den Bereichen RADAR, Messtechnik und Kommunikation nach GPS-Wandlern zu greifen, da diese ein größeres Frequenzspektrum oder Nyquist-Band bieten. Ein größeres Frequenzspektrum bringt jedoch weitere Herausforderungen bezüglich der Frontend-Entwicklung mit sich. Die Anschaffung eines Wandlers mit +1 GHz Nyquist bedeutet, dass man die richtigen Peripheriebauteile wählt und sich mit dem

Schaltungsaufbau wie zum Beispiel der Eingangsstufe (Frontend) beschäftigt. Die Herausforderungen steigen drastisch, wenn die Anwendung +1 GHz Super-Nyquist-Abtastung verlangt, bei der Spektralinformation in der zweiten, dritten oder vierten Nyquist-Zone erfasst werden muss.

Eine Bemerkung zur Bandbreite

Zunächst sollten einige Bemerkungen bezüglich Bandbreite diskutiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Full-Power-Bandbreite eines Wandlers eine andere ist als die nutzbare oder „Sample“-Bandbreite. Die Full-Power-Bandbreite ist die Bandbreite, die der Wandler benötigt, um Signale exakt zu erfassen, und damit das interne Frontend richtig einschwingt. Eine ZF zu wählen und den Wandler in diesem Bereich zu nutzen, ist keine gute Idee, weil die Leistungsfähigkeit im System stark variiert. Basierend auf den im

Von Rob Reeder, Senior System Application Engineer, Analog Devices

Datenblatt angegebenen Spezifikationen für Auflösung und Leistungsfähigkeit ist die Full-Power-Bandbreite wesentlich größer (möglicherweise x2) als die Abtastbandbreite des Wandlers. Die Abtastbandbreite ist der Kern der Entwicklung. Bei allen Entwicklungen sollte man vermeiden, einen Teil oder den gesamten Anteil der Bereiche mit den höchsten Frequenzen der spezifizierten Full-Power-Bandbreite zu nutzen. Ansonsten ist eine Reduzierung der dynamischen Leistungsfähigkeit (SNR/SFDR) zu erwarten. Zur Bestimmung der Abtastbandbreite eines schnellen A/D-Wandlers sollte man sich im Datenblatt oder beim Applikationssupport informieren, da diese nicht speziell angegeben ist. Normalerweise enthält das Datenblatt spezifizierte oder gelistete, in der Produktion getestete Frequenzen, welche die Leistungsfähigkeit innerhalb der Abtastbandbreite des Wandlers garantieren. Allerdings müssen bessere Erklärungen dieser Bandbreitenausdrücke spezifiziert und definiert werden.

Balun-Charakteristik und Asymmetrie

Sobald die Anwendungsbandbreite und der schnelle A/D-Wandler bekannt sind, wählt man die Topologie der Eingangsstufe: Verstärker (aktiv) oder Transformator (passiv). Die Kompromisse der beiden Topologien sind zahlreich und hängen auch von der Anwendung ab. Mehr Informationen zu diesem Thema enthält Referenz 3. Ab hier konzentriert sich der Beitrag auf Eingangsstufen mit Transformator/Balun-Kopplung. Der Begriff „Balun“ wird im Rahmen des Beitrags verwendet, wenn Transformator oder Balun gemeint sind. Obwohl sich die beiden hinsichtlich Aufbau und Topologie unterscheiden, nimmt man an, dass zur Kopplung und zur Entwicklung der Eingangsstufe, die das eintreffende, massebezogene ZF-Signal in ein differenzielles Signal wandelt, ein passives Bauteil verwendet wird.

Baluns weisen eine andere Charakteristik auf als Verstärker und sollten bei der Auswahl des Bauteils berücksichtigt werden. Spannungsverstärkung, Impedanzverhältnis, Bandbreite und Einfügungsverluste, Asymmetrie von Amplitude und Phase sowie Rückflussverluste sind einige dieser unterschiedlichen Charakteristika. Andere Anforderungen können Leistungsangabe (Power Rating), Typ der Konfiguration (zum Beispiel Balun oder Transformator) und Mittenabgriff-Optionen sein. Mit Baluns zu entwickeln ist nicht immer einfach. So ändern sich zum Beispiel die Balun-Charakteristika mit der Frequenz, was die Entwicklung erschwert. Manche Baluns sind empfindlich bezüglich Masseführung, Layout und Mittenabgriff-Kopplung. Man sollte daher das Datenblatt des Baluns nicht als alleinige Basis verwenden. Erfahrung kann hier eine große Rolle spielen, da ein Balun eine neue Rolle annimmt, wenn Leiterplattenparasitäten, externe Anpassungsnetzwerke und die Sample-&-Hold-Schaltung im Wandler ins Spiel kommen. Die wichtigsten Charakteristika zur Wahl eines Baluns sind im Folgenden zusammengefasst.

Die **Signalverstärkung** entspricht idealerweise dem Wicklungsverhältnis des Transformators. Obwohl Spannungsverstärkungen in einem Balun von Grund auf rauschfrei sind, steigt beim Einsatz eines Baluns mit Spannungsverstärkung das Signalrauschen. Auch kann die Bandbreite wesentlich beeinträchtigt werden. Baluns sollten vereinfacht als breitbandiges Durchlassfilter mit Nennverstärkung betrachtet werden. Daher gilt, je größer die Signalverstärkung im Balun ist, desto geringer ist die Bandbreite. Spannungsverstärkungen bei Baluns können stark variieren. Dies erlaubt, wesentlich mehr Ripple und Roll-Off zu erzielen, wenn dies nicht gewünscht ist. Heute einen Transformator mit einem Impedanzverhältnis von 1:4 und guter Leistungsfähigkeit im GHz-Bereich zu finden, ist schwierig. Anwender sollten

$$\text{Rückflussdämpfung (RL)} = -18,9 \text{ dB bei } 110 \text{ MHz} = 20 \cdot \log(50 - Z_0 / 50 + Z_0) \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$10^{(-18,9/20)} = (50 - Z_0 / 50 + Z_0) \quad (\text{Gleichung 2})$$

$$Z_0 = 39,8 \Omega \quad (\text{Gleichung 3})$$

Gleichungsblok 1-3

$$\frac{Z(\text{Prim Reflektiert})}{Z(\text{Sec Ideal})} = \frac{Z(\text{Prim Ideal})}{Z(\text{Sec Reflektiert})} \quad (\text{Gleichung 4})$$

$$39,8/200 = 50/X \quad (\text{Gleichung 5})$$

$$\text{Aufgelöst nach X ergibt } X = 251 \Omega \quad (\text{Gleichung 6})$$

Gleichungsblok 4-6

an dieser Stelle vorsichtig sein. Der Ansatz, Baluns mit Impedanzverhältnissen von 1:4, 1:8 und 1:16 zu verwenden, um die Rauschzahl in der letzten Stufe der Signalkette zu verbessern oder zu optimieren, sollte sorgfältig überlegt und im Labor verifiziert werden. Da Bandbreitenoptionen sowie die Leistungsfähigkeit begrenzt sind, ergeben sich wesentliche Kompromisse. Dies führt zu einer Leistungsfähigkeit, die im GHz-Bereich nicht besser als bei einer Schaltung mit einem Impedanzverhältnis von 1:1 oder 1:2 ist.

Der **Einfügungsverlust** eines Baluns ist der Verlust über den spezifizierten Frequenzbereich. Er ist die gebräuchlichste Messspezifikation im Datenblatt eines Baluns. Dies wird sich bei der Implementierung in die Schaltung definitiv ändern. Normalerweise kann man die Hälfte des im Datenblatt angegebenen Frequenzbereichs erwarten. Einige Baluns zeigen je nach Topologie und Empfindlichkeit gegenüber Lastparasitäten (z.B. Kapazitäten) ein noch schlechteres Verhalten. Dies ist möglicherweise der am meisten missverständliche Parameter für Baluns, da diese Bauteile ohne Parasitäten in einer idealen Impedanzsituation optimiert sind – sie werden mit einem Netzwerkanalysator charakterisiert.

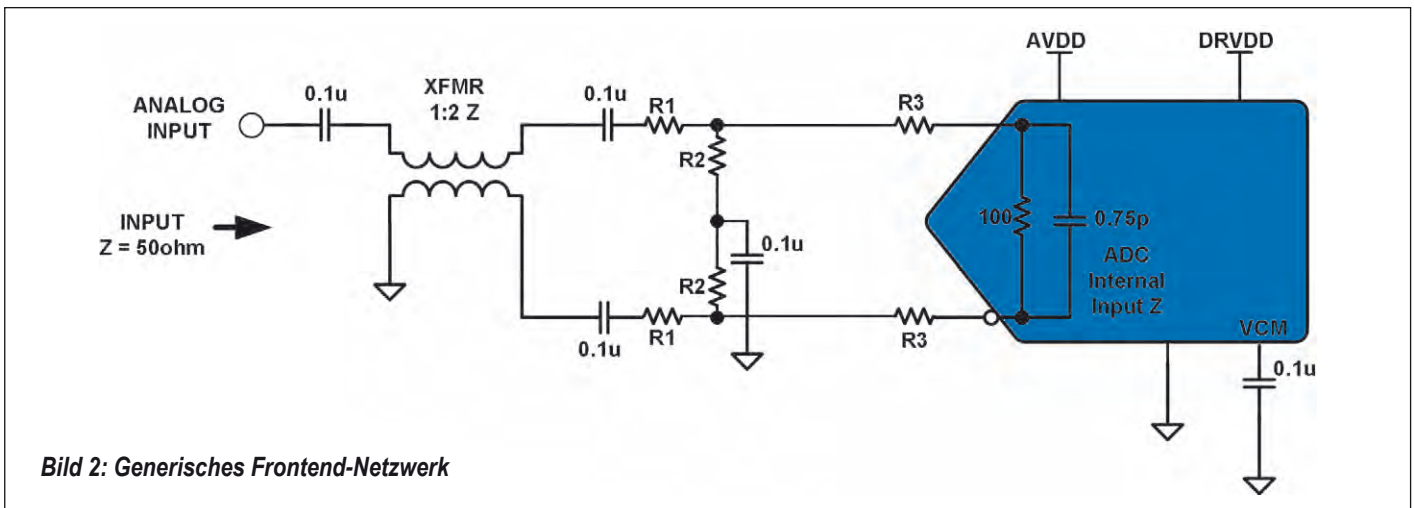
Die **Rückflussdämpfung** (Return Loss) ist die Fehlanpassung des Baluns bezüglich

der effektiven Impedanz der Sekundärseite, gesehen von der Primärseite. Falls zum Beispiel das Quadrat des Verhältnisses von Sekundär- und Primärseite 4:1 beträgt, würde man erwarten, dass eine 50 Ω -Impedanz in die Primärseite reflektiert wird, wenn sich auf der Sekundärseite ein Abschluss mit 200 Ω befindet. Diese Beziehung ist jedoch nicht exakt. Die reflektierte Impedanz auf der Primärseite ändert sich mit der Frequenz, wie das folgende Beispiel zeigt.

Zunächst muss die Rückflussdämpfung bei der für die Schaltung spezifizierten Mittenfrequenz ermittelt werden. In diesem Beispiel werden 110 MHz verwendet. Z_0 ist nicht 50 Ω , wie für einen idealen Transformator angenommen, sondern niedriger (Gleichungsblok 1-3).

Als nächstes ermittelt man das Verhältnis der Primärseite Z_0 aus Gleichung 3 und der idealen Impedanz der Sekundärseite. Das gleiche macht man für die ideale Primärseite und löst nach der echten Impedanz der Sekundärseite auf. (Gleichungsblok 4-6).

Dieses Beispiel beweist, dass ein differenzieller 251 Ω -Abschluss auf der Sekundärseite vorhanden sein sollte, um auf der Primärseite eine 50 Ω -Last zu reflektieren. Andernfalls muss die nachfolgende Stufe in der Signalkette eine größere Last (~40 Ω) treiben. Dies führt zu einer höheren Verstärkung in der folgenden



Leistungsspezifikationen	Fall 1 – R1=25 Ω, R2=33 Ω, R3=33 Ω	Fall 2 – R1=25 Ω, R2=33 Ω, R3=10 Ω	Fall 3 – R1=10 Ω, R2=68 Ω, R3=33 Ω
Bandbreite (-3 dB)	3169 MHz	3169 MHz	1996 MHz
Bandpass-Flatness (2GHz Ripple)	2.34 dB	2.01 dB	3.07 dB
SNRFS bei 1000 MHz	58.3 dBFS	58.0 dBFS	58.2 dBFS
SFDR bei 1000 MHz	74.5 dBc	74.0 dBc	77.5 dBc
H2/H3 bei 1000 MHz	-74.5 dBc/-83.1 dBc	-77.0 dBc/-74.0 dBc	-77.5 dBc/-85.6 dBc
Input Impedance bei 500 MHz	46 Ω	45.5 Ω	44.4 Ω
Input Drive bei 500 MHz	+15.0 dBm	+12.6 dBm	+10.7 dBm

Tabelle 1. Gemessene Anpassung der Leistungsfähigkeit gegenüber drei Frontend-Entwicklungen.>

Stufe. Eine höhere Verstärkung und falsche Lastbedingungen führen zu größeren Verzerrungen, die der schnelle Verstärker „sieht“. Dies begrenzt den Dynamikbereich des Systems. Im Allgemeinen erhöht sich mit steigendem Impedanzverhältnis die Veränderlichkeit der Rückflussdämpfung. Dies sollte man bei der Entwicklung eines „angepassten“ Frontends mit einem Balun beachten.

Amplitude und Phasenasymmetrie sind die wichtigsten Leistungseigenschaften in Verbindung mit einem Balun. Diese Parameter liefern ein gutes Maß dafür, wie stark jedes massebezogene Signal vom Ideal abweicht – gleich große Amplitude und 180° phasenversetzt. Diese beiden Spezifikationen zeigen dem Entwickler, wie viel Signalintegrität an den Wandler geliefert wird, wenn eine Entwicklung hohe ZF-Frequenzen (+1.000MHz) verlangt. Im Allgemeinen verschlechtert sich die

Leistungsfähigkeit mit zunehmender Abweichung. Man sollte sich für Transformatoren oder Baluns entscheiden, die diese Information im Datenblatt enthalten. Falls das Datenblatt diese Information nicht enthält, kann dies ein Grund sein, warum das betreffende Bauteil keine gute Wahl für diese HF-Anwendung ist. Man bedenke, dass sich mit steigender Frequenz die Nichtlinearität des Baluns ebenfalls erhöht.

Normalerweise wird dies durch die Phasenasymmetrie dominiert. Dies wiederum bewirkt bei geradzahigen Harmonischen (hauptsächlich 2te Harmonische oder H2) größere Verzerrungen, wie sie der schnelle Wandler „sieht“. Eine Phasenasymmetrie von drei Grad kann die Leistungsfähigkeit im störungsfreien Dynamikbereich (SFDR) wesentlich reduzieren. Man sollte nicht voreilig den Wandler dafür verantwortlich machen, sondern zuerst die Frontend-

Entwicklung analysieren, falls der erwartete SFDR, speziell bei H2, wesentlich vom Datenblatt abweicht.

Zur Bekämpfung von **Verzerrungen der zweiten Harmonischen** gibt es einige Lösungen. So sollte man beim Einsatz eines Baluns bei höheren Frequenzen versuchen, mehrere Transformatoren oder Baluns in einer kaskadierten Anordnung zu verwenden. Zwei (Bild 1) und in manchen Fällen drei Baluns können verwendet werden, um über die hohen Frequenzen das massebezogene in ein differenzielles Signal zu wandeln. Die Nachteile dabei sind ein erhöhter Platzbedarf, höhere Kosten und Einfügungsdämpfung. Eine andere Möglichkeit ist, verschiedene Baluns auszuprobieren. Einzelne Baluns werden angeboten, etwa von Anaren, Hyperlabs, Marki Microwave, Minicircuits und Picosecond. Diese basieren auf patentierten Schaltungen mit speziellen Topologien, die eine

erweiterte Bandbreite im GHz-Bereich erlauben und somit eine hohe Symmetrie bieten. Da man hier mit nur einem Bauteil auskommt, das in manchen Fällen kleiner als die heute üblichen Standard-Ferrite ist.

Man beachte, dass nicht alle Baluns von allen Herstellern auf die gleiche Weise spezifiziert sind. Baluns mit offensichtlich ähnlichen Spezifikationen können sich in unterschiedlichen Situationen unterschiedlich verhalten. Die beste Möglichkeit, einen Balun für eine Schaltung zu wählen, ist, die Spezifikationen des potenziellen Baluns zu sammeln und zu verstehen sowie wichtige Daten, die nicht im Datenblatt stehen, beim Hersteller anzufordern. Alternativ oder zusätzlich kann es nützlich sein, die Leistungsfähigkeit des Baluns mit einem Netzwerkanalytator oder auf dem Systemboard vor dem schnellen A/D-Wandler zu messen.

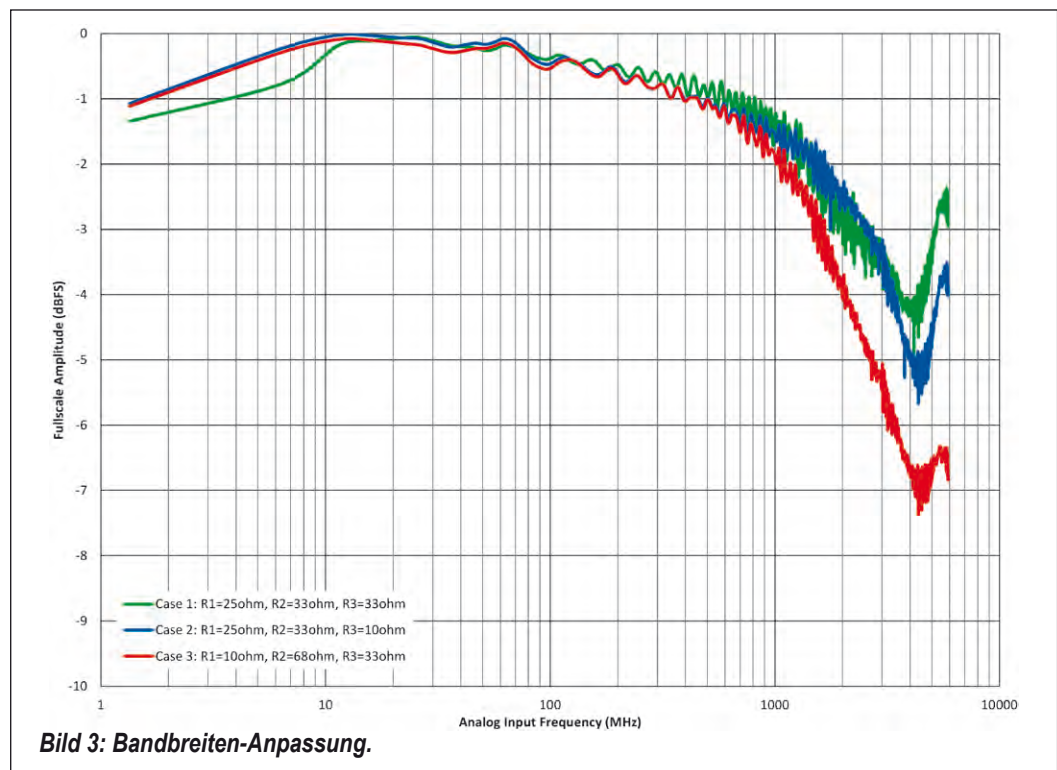
Beim Einsatz eines oder mehrerer Baluns spielt das Layout im Hinblick auf die Phasensymmetrie eine ebenso wichtige Rolle. Damit die Leistungsfähigkeit bei höheren Frequenzen stets optimal bleibt muss das Layout so symmetrisch wie möglich sein. Andernfalls können sich kleinste Fehlanpassungen der Leiterbahnen in Frontends mit Baluns als nutzlos erweisen (z.B. Begrenzung des Dynamikbereichs).

Frontend-Anpassung

Zunächst eine Anmerkung. Das Wort „Anpassung“ sollte klug verwendet werden. Es ist fast unmöglich, ein Frontend bei jeder heute üblichen Frequenz mit 100 MSample/s schnellen Wandlern „anzupassen“. Ganz abgesehen über eine +1.000 MHz Band. Den Ausdruck „Anpassung“ sollte man als Optimierung verstehen, welche beim jeweiligen Frontend die besten Ergebnisse liefert. Dies wäre ein „Alles-Inklusive“-Ausdruck, bei dem Impedanz, dynamische Leistungsfähigkeit, Signaltriebstärke und Bandbreite sowie ihre Flachheit im Durchlassbereich das beste Ergebnis für diese spezielle Anwendung erzielen.

Dies bedeutet, jeder Parameter sollte entsprechend der Anwendung eine individuelle Gewichtung erhalten. In manchen Fällen kann zum Beispiel die Bandbreite die wichtigste Spezifikation sein, während man in Kauf nimmt, dass andere Parameter geringfügig schlechter sind, wenn nur die richtige Bandbreite erzielt wird. Dieses Beispiel (Bild 2) zeigt das Eingangnetzwerk für einen GSPS-Wandler. Jeder Widerstand im Netzwerk ist wie eine Variable. Allerdings sind alle Widerstandswerte unterschiedlich, um die gleiche Eingangsimpedanz zu erhalten, welche die Leistungsparameter ändert (Tabelle 1).

Im Wesentlichen ist das Impedanzanpassungsnetzwerk ungefähr das gleiche. Jedoch erhält man bei allen drei Beispielen andere Ergebnisse für



die gemessenen Parameter, die zur Entwicklung des Frontend-Netzwerks erforderlich sind. Die Anpassung hier ist das beste Ergebnis für alle beteiligten Parameter, wobei in diesem Fall eine Bandbreite von über 2,5 GHz benötigt wurde. Dies begrenzt die Wahl auf die Fälle 1 und 2 (Bild 3).

Betrachtet man die Fälle 1 und 2 genauer, lässt sich leicht erkennen, dass der Fall 2 aus zwei Gründen der bessere wäre. Zum einen hat die Flatness im Durchlassbereich nur einen Ripple von 2 dB über den 2-GHz-Bereich, während andererseits die Eingangstreiberfähigkeit 3 dBm geringer ist als bei Fall 1. Dies ist bezüglich der HF-Verstärkung weiter oben in der Signalkette weniger einschränkend, um Vollausschlag des schnellen Wandlers auf der Primärseite des Baluns zu erreichen. Fall 2 scheint in diesem Beispiel die beste „Anpassung“ zu sein.

Zusammenfassung

GSPS-Wandler sind theoretisch einfach in der Handhabung, wenn es um die Abtastung größerer Bandbreiten geht, damit mehrere Frequenzbänder abge-

deckt werden können oder eine Abwärtsmischerstufe im Frontend-HF-Bereich entlastet werden soll. Bandbreite im +1 GHz-Bereich zu erzielen kann jedoch Herausforderungen bei der Entwicklung eines leistungsstarken Wandler-Frontend-Netzwerks mit sich bringen. Man sollte daran denken, wie wichtig ein Balun ist. Speziell dann, wenn Phasensymmetrie wichtig wird, bei dem es zum Beispiel der schnelle A/D-Wandler als optimale Linearität zweiter Ordnung versteht. Wenn man sich für den Einsatz eines Baluns entscheidet, sollte man dessen Leistungsfähigkeit nicht durch weniger optimale Layout-Techniken zunichtemachen. Auch sollte man das Netzwerk richtig anpassen. Viele Parameter sind zu erfüllen, damit die „Anpassung“ der jeweiligen Anwendung stimmt.

Referenzen

- 1) Transformer-Coupled Front-End for Wideband A/D Converters – Analog Dialogue, April 2005
- 2) Wideband A/D Converter Front-End Design Considerations – When to Use a Double Transformer Confi-

guration– Analog Dialogue, July 2006

- 3) Wideband A/D Converter Front-End Design Considerations II - Amplifier- or Transformer Drive for the ADC? – Analog Dialogue, February 2007
- 4) AN-827, A Resonant Approach to Interfacing Amplifiers to Switch-Capacitor ADCs
- 5) AN-742, Frequency Domain Response of Switched-Capacitor ADCs
- 6) AN-912, Driving a Center-Tapped Transformer with a Balanced Current-Output DAC

Autorenvorstellung

Rob Reeder ist Senior System Application Engineer bei Analog Devices Inc. in den Segmenten Industrial und Instrumentation mit den Schwerpunkten Militär- und Luftfahrtanwendungen. Vor dieser Position war er acht Jahre lang Applikationsingenieur für die High-Speed Converter Product Line. Sein MSEE und BSEE hat er von der Northern Illinois University in DeKalb, Ill., in den Jahren 1998 bzw. 1996 erhalten.