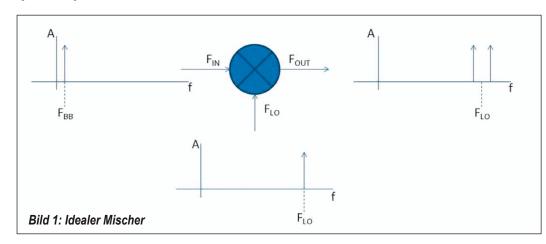
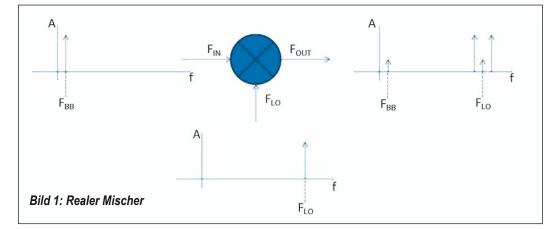
Eine Herausforderung für Designer: Transmit-LO-Leakage (LOL) in Zero-ZF-Geräten unterdrücken



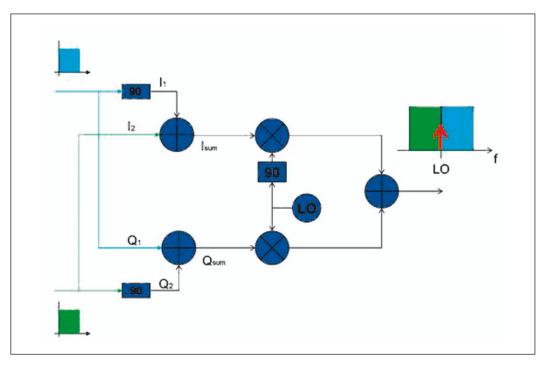


Die Zero-ZF-Architektur (ZIF) bringt, neben wesentlichen Vorteilen, auch Herausforderungen mit sich, wie z.B. Transmit-LO-Leakage (Transmit Local Oscillator Leakage), die bewältigt werden müssen. Unkorrigiert produziert Transmit-LOL unerwünschte Leckeffekte innerhalb der Übertragung, was sich auf die Systemspezifikationen auswirken kann. Dieser Beitrag befasst sich mit dem Thema Transmit-LOL und untersucht die Techniken, die man verwendet, um Transmit-LOL zu eliminieren. Implementiert sind solche Techniken beispielsweise in der Transceiver-Familie Radio-Verse von Analog Devices (mit dem AD9371; mehr Informationen gibt es auf der Radio Verse Website von Analog Devices). Das Ziel ist, die Transmit-LOL auf einen Pegel zu reduzieren, der so klein ist, dass die Systemoder Leistungsdaten nicht beeinträchtigt werden, dann können Entwickler vielleicht über das LOL laut lachen (LoL).

Was ist LOL?

Ein HF-Mischer verfügt über zwei Eingänge und einen Ausgang (Bild 1). Der ideale Mischer produziert ein Ausgangssignal, das dem Produkt der beiden Eingangssignale entspricht. Frequenzmäßig sollte am Ausgang lediglich $F_{\rm IN}+F_{\rm LO}$ und $F_{\rm IN}-F_{\rm LO}$ anliegen. Falls an einem der beiden Eingänge kein Signal anliegt, entsteht kein Ausgangssignal.

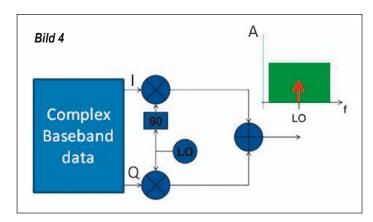
In Bild 1 ist die Eingangsfrequenz F_{IN} auf F_{BB} bei einer Basisbandfrequenz von 1 MHz eingestellt. Die Frequenz am zweiten Eingang (F_{LO}) ist auf F_{LO} eingestellt, mit einer Lokaloszillatorfrequenz von 500 MHz. Ein idealer Mischer würde ein Ausgangssignal produzieren, das



Dave Frizelle Analog Devices www.analog.com

Bild 3: Die unerwünschte Energie bei FLO (rot gekennzeichnet) wird LOL genannt

34 hf-praxis 12/2017



aus zwei Tönen besteht: einer bei 499 MHz und der andere bei 501 MHz.

Allerdings produziert ein realer Mischer (Bild 2) auch Energie bei F_{BB} und F_{LO}. Die Energie bei F_{BB} kann vernachlässigt werden, da sie weit entfernt vom relevanten Ausgangssignal ist und durch die HF-Bauteile nach dem Mischerausgang herausgefiltert wird. Unabhängig von der Energie bei F_{BB} kann die Energie bei F_{LO} ein Problem darstellen. Sie befindet sich sehr nahe oder innerhalb des relevanten Ausgangssignals und lässt sich mit einem Filter nur schwer oder überhaupt nicht entfernen, da der Filter auch das relevante Signal filtern würde.

Die unerwünschte Energie bei F_{LO} bezeichnet man als LOL. Der Lokaloszillator (LO), der den Mischer treibt, beeinträchtigt über einen Leck-Pfad den Ausgang des Mischers. Ferner gibt es weitere Pfade, über die

LO-Energie an den Systemausgang gekoppelt kann, etwa über Stromversorgungen oder über das Silizium selbst. Unabhängig davon, wie der LO "leckt", kann dieses Verhalten als LOL bezeichnet werden.

In einer realen ZF-Architektur. bei der nur ein Seitenband übertragen wird, kann die Transmit Local Leakage (LOL) mithilfe eines HF-Filters beseitigt werden. Bei einer Zero-IF-Architektur hingegen, bei der beide Seitenbänder übertragen werden müssen, liegt die LOL-Frequenz in der Mitte des relevanten Ausgangssignals und stellt eine größere Herausforderung dar (Bild 3). Eine herkömmliche Filterung ist nicht mehr möglich, da jeder Filter, der das unerwünschte Signal beseitigt, auch Teile der gewünschten Übertragung entfernen würde. Deshalb müssen zur Beseitigung andere Techniken herangezogen werden. Andernfalls wird es wahrscheinlich eine unerwünschte Abstrahlung in der gesamten Übertragung werden.

LO-Leakage beseitigen (LOL-Korrektur)

Die LOL lässt sich mit einem Signal beseitigen, dessen Amplitude gleich groß ist, aber die entgegengesetzte Phasenlage hat (Bild 4). Bei bekannter Amplitude und Phase kann das Auslöschungssignal durch Anlegen eines DC-Offsets an die Transmitter-Eingänge erzeugt werden.

Erzeugung des Auslöschungssignals

Die komplexe Mischerarchitektur eignet sich gut zum Erzeugen des Auslöschungssignals. Da Quadratursignale bei der LO-Frequenz im Mischer vorhanden sind (sie sind ein Kernelement der komplexen Mischerfunktion) ermöglichen sie die Erzeugung eines Signals mit beliebiger Phase und Amplitude bei der LO-Frequenz.

Die Quadratursignale, die den komplexen Mischer treiben, können als Sin(LO) und Cos(LO) bezeichnet werden – dies sind orthogonale Signale bei der LO-Frequenz, welche die beiden Mischer treiben. Um das Auslöschungssignal zu erzeugen, werden die orthogonalen Signale mit verschiedener Gewichtung addiert. Rechnerisch kann man ein Ausgangssignal I × Sin(LO) + Q × Cos(LO) erzeu-

gen. Indem man unterschiedliche Signalwerte an Stelle von I und Q heranzieht, wird sich die resultierende Summe bei der LO-Frequenz befinden und kann jede gewünschte Amplitude und Phase haben. Bild 5 zeigt Beispiele.

Das gewünschte Übertragungssignal muss an die Eingänge des Transmitters gelegt werden. Indem man einen DC-Bias an die Übertragungsdaten anlegt, wird der Mischerausgang sowohl das gewünschte Übertragungssignal als auch das relevante LOL-Auslöschungssignal enthalten. Das absichtlich erzeugte Auslöschungssignal überlagert sich mit dem unerwünschten LOL, und beide Signale löschen sich aus. Übrig bleibt lediglich das gewünschte Übertragungssignal.

Die Transmit-LOL beobachten

Die Transmit-LOL wird mithilfe eines Beobachtungs-Empfängers (Observation Receiver) beobachtet (Bild 6). In diesem Beispiel nutzt der Observation Receiver die gleiche LO wie der Transmitter. So erscheint jegliche Transmit-Energie an der LO-Frequenz als DC am Ausgang des Observation Receivers.

Das Konzept in Bild 6 zeigt jedoch eine Schwäche. Durch Nutzung der gleichen LO zum Übertragen und Beobachten erscheint die Transmit-LOL als DC am Ausgang des Observa-

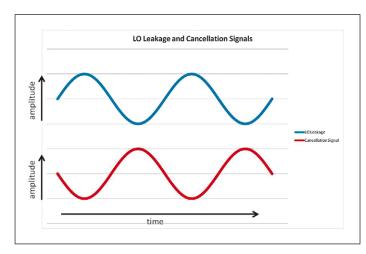


Bild 5: Beispiele für Auslöschungssignale mit beliebiger Phase und Amplitude.

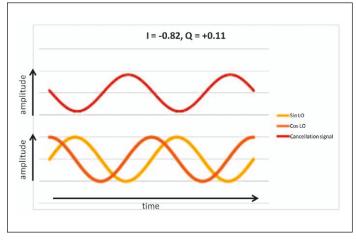
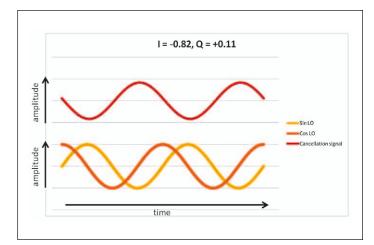


Bild 6: Basiskonzepte zur Beobachtung und Korrektur von TxLO-Leakage

hf-praxis 12/2017 35



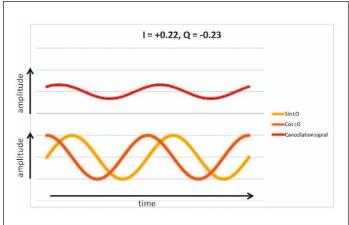


Bild 7: Die Nutzung anderer LOs zum Übertragen und Beobachten

Bild 8: Trennung von Observation Receiver DC von Tx LOL

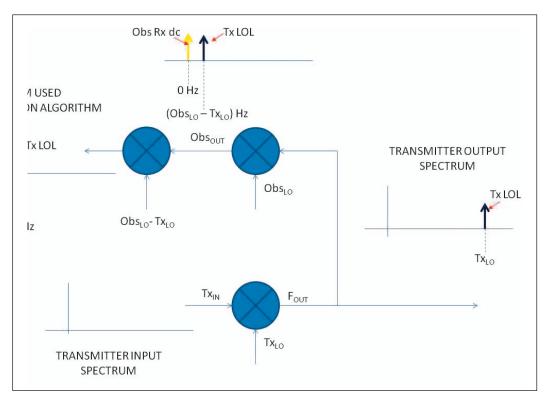


Bild 9: Die Übertragungsfunktion vom Transmitter-Eingang zum Ausgang des Observation-Empfängers

tion Receivers. Der Observation Receiver selbst weist durch Fehlanpassung von Bauteilen im Schaltkreis allerdings ebenfalls eine gewisse Menge an DC auf. Somit entspricht der gesamte DC-Ausgang des Observation Receivers der Summe aus Transmit-LOL und dem nativen DC-Offset im Observation Receiver. Es gibt zwar Möglichkeiten, diese Problematik zu überwinden, allerdings besteht die bessere Herangehensweise darin,

eine andere LO-Frequenz zur Beobachtung zu verwenden. Dadurch wird die native DC im Beobachtungspfad vom Transmit-LOL-Beobachtungsergebnis getrennt. Dies zeigt Bild 7.

Da die Übertragung mithilfe einer anderen Frequenz als Transmit-LO überwacht wird, erscheint Energie an der Transmit-LO-Frequenz nicht an DC im Observation Receiver. Stattdessen erscheint sie als Basisband-Ton, dessen Frequenz der Differenz aus Transmit-LO und Observation-LO entspricht.

DC Native im Observation-Pfad erscheint dennoch an DC. Somit kommt es zu einer völligen Trennung von Observation-DC- und Transmit-LOL-Messergebnissen. Bild 8 veranschaulicht dieses Konzept, das der Einfachheit halber eine Ein-Mischer-Architektur enthält. Der Eingang am Transmitter in diesem Beispiel ist Null. Somit ist der einzige Ausgang vom Trans-

mitter Transmit-LOL. Eine Frequenzverschiebung erfolgt nach dem Observation Receiver, um die beobachtete Transmit-LOL-Energie zu DC zu bringen.

Die erforderlichen Korrekturwerte finden

Die benötigten Korrekturwerte lassen sich finden, indem das Ausgangssignal des Observation Receivers durch die Übertragungsfunktion vom Eingang zum Ausgang des Empfängers dividiert und das Ergebnis mit der vorgesehenen Übertragung vergleicht. Bild 9 zeigt die betreffende Übertragungsfunktion.

Die Übertragungsfunktion vom Transmitter-Basisband-Eingang zum Observation-Empfänger-Basisband-Ausgang besteht aus zwei Komponenten: Amplitudenskalierung und Phasendrehung. Jede Komponente wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Bild 10 zeigt, dass die Amplitude des Übertragungssignals am Observation-Empfänger eventuell nicht der tatsächlichen Amplitude des Übertragungssignals entspricht. Dies ist dann der Fall, wenn der Loopback-Pfad vom Transmit-Ausgang zum Eingang des Observation-Empfängers eine Verstärkung oder Dämpfung im Pfad aufweist oder falls die Verstärkung des Transmitter-Schaltkreises von der Verstärkung des Observa-

36 hf-praxis 12/2017

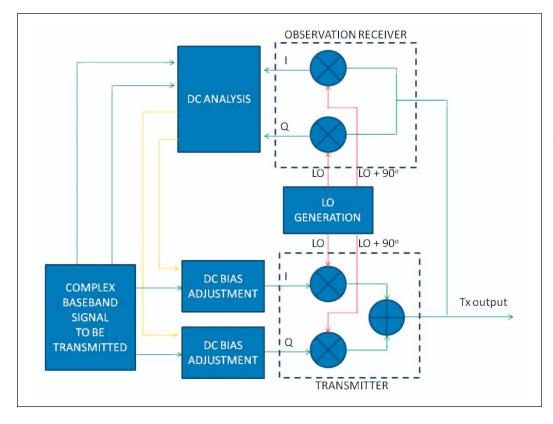


Bild 10: Amplitudenskalierung aufgrund von Dämpfung im Loopback-Pfad

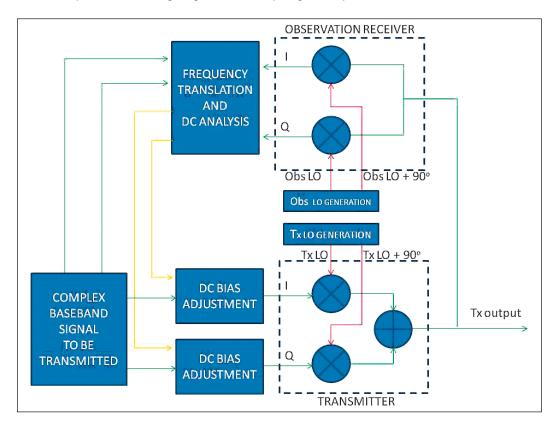


Bild 11: Beziehung zwischen Entfernung und Phase bei einer Leitungslänge von 5 cm, einem 3-GHz-Signal und Messpunkten bei 0, 2 und 4 cm

tion-Empfänger-Schaltkreises abweicht.

Betrachten wir jetzt die Phasendrehung. Grundsätzlich ist anzumerken, dass sich Signale nicht unmittelbar von Punkt A zu Punkt B bewegen. Zum Beispiel wandern Signale mit etwa

der halben Lichtgeschwindigkeit durch eine Kupferleitung. Dies bedeutet, dass ein 3-GHz-Signal, das sich über einen Kupferstreifen fortpflanzt, eine Wellenlänge von etwa 5 cm hat. Daraus folgt, dass, wenn sich mehrere Oszilloskop-Prüfspitzen (Probes) im Abstand von wenigen Zentimetern entlang des Kupferstreifens befinden, auf dem Oszilloskop-Display mehrere phasenverschobene Signale zu sehen sind. Bild 11 veranschaulicht dies. Zu sehen sind drei Signale, die in verschiedenen Abständen ent-

lang einer Kupferleitung abgegriffen wurden. Das Signal an jedem Punkt hat eine Frequenz von 3 GHz. Zwischen den drei Signalen ist eine Phasendifferenz zu sehen.

Man beachte, dass dieser Effekt nicht entsteht, wenn man eine einzige Prüfspitze entlang der Kupferleitung bewegt, da das Oszilloskop stets bei 0° Phase triggert. Nur mithilfe von mehreren Probes lässt sich die Beziehung zwischen Abstand und Phase beobachten.

Genauso wie es entlang der Kupferleitung eine Phasenänderung gibt, tritt eine solche auch zwischen Transmitter-Eingang und Ausgang des Observation-Empfängers auf (Bild 12). Es ist wichtig, dass der LOL-Korrekturalgorithmus das Maß der Phasendrehung kennt, um die richtigen Korrekturwerte zu berechnen.

Die Übertragungsfunktion vom Eingang zum Ausgang des Observation-Empfängers bestimmen

Die Übertragungsfunktion in Bild 13 erhält man, indem man ein Eingangssignal an den Transmitter anlegt und es mit dem Signal am Ausgang des Observation-Empfängers vergleicht. Allerdings sind dabei einige Punkte zu beachten. Falls ein statisches (DC) Signal an den Transmitter-Eingang angelegt wird, produziert es ein Ausgangssignal an der Transmit-LO-Frequenz, und die Transmit-LOL wird sich mit ihm überlagern. Dies verhindert, dass die Übertragungsfunktion korrekt erzeugt wird. Ebenfalls zu beachten ist, dass der Transmit-Ausgang eventuell an eine Antenne angeschlossen ist. Absichtlich solche Signale an den Transmitter-Eingang anzulegen, ist somit nicht zulässig.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, nutzen die Transceiver von Analog Devices einen Algorithmus, der einen DC-Offset mit niedrigem Pegel auf das übertragene Signal anwendet.

hf-praxis 12/2017 37

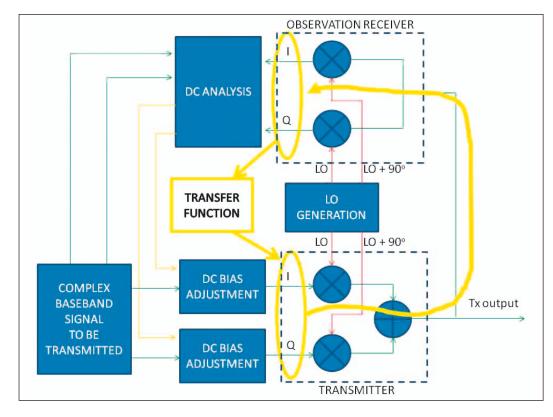


Bild 12: Phasendrehung aufgrund physikalischer Entfernung im Loopback-Pfad

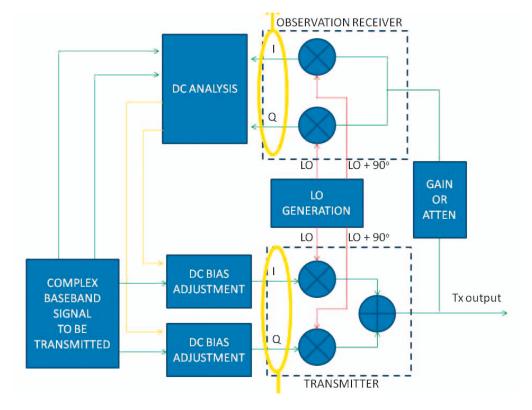


Bild 13: Bestimmung der Übertragungsfunktion vom Transmitter-Eingang zum Ausgang des Observation-Empfängers

Der Offset-Pegel wird periodisch angepasst und diese Störungen erscheinen an den Ausgängen des Observation-Receivers. Der Algorithmus analysiert dann die Änderungen der Eingangswerte im Vergleich zu denen der beobachteten Werte Durch eine Subtraktion der beiden Fälle wird die konstante Transit-LOL aus der Gleichung entfernt, und man erhält die Übertragungsfunktion. Die Zahl der Fälle kann auf mehr als zwei erweitert werden. Dies ergibt viele unabhängige Ergebnisse, die für eine höhere Genauigkeit gemittelt werden können.

Zusammenfassung

Der LOL-Korrekturalgorithmus "lernt" die Übertragungsfunktion vom Übertragungseingang zum Ausgang des Observation-Empfängers. Er wird dann das Ausgangssignal des Observation-Empfängers heranziehen und ihn durch die Übertragungsfunktion dividieren, um ihn auf den Eingang des Transmitters zu beziehen. Durch Vergleich der DC-Pegel in der vorgesehenen Übertragung mit den DC-Pegeln in der beobachteten Übertragung wird die Transmit-LOL bestimmt. Abschließend berechnet der Algorithmus die erforderlichen Korrekturwerte, um die Transmit-LOL zu eliminieren und sie als DC-Bias an die gewünschten Übertragungsdaten anzuwenden.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über einen Aspekt der Algorithmen, die in den Radio-Verse-Transceivern von Analog Devices verwendet werden. Ein tieferes Verständnis der Konzepte von Zero-ZF und Algorithmen vermittelt der Artikel über komplexe HF-Mischer "Complex RF Mixers, Zero-IF Architecture, and Advanced Algorithms: The Black Magic in Next-Generation SDR Transceivers" von David Frizelle und Frank Kearney, erschienen in Analog Dialogue, Ausgabe 51 vom Februar 2017.

Der Autor Dave Frizelle

Dave Frizelle works as an applications manager in the Transceiver Product Group at Analog Devices Limerick supporting the integrated transceiver family of products. He has worked at ADI since graduation in 1998. His previous engineering roles include six years working in Japan and Korea supporting the development and designing of ADI components into advanced consumer products.

38 hf-praxis 12/2017