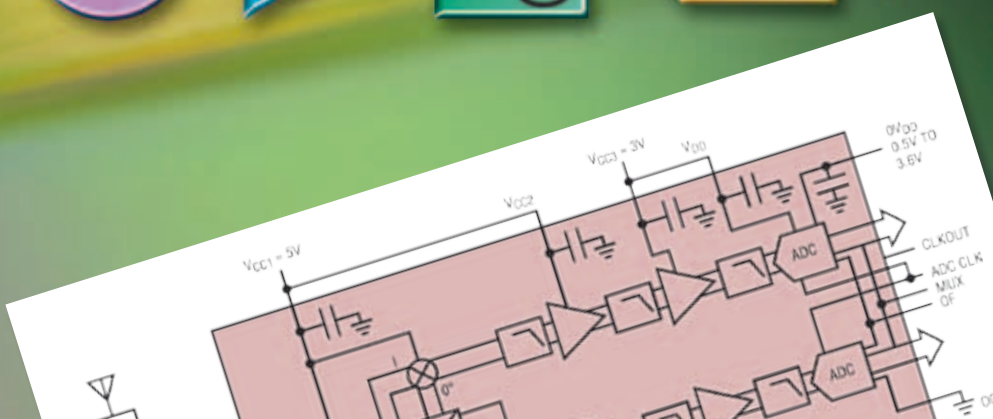
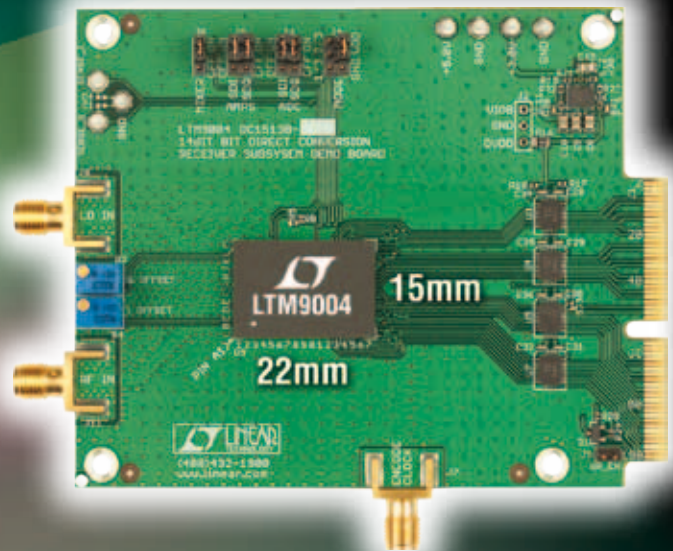


hf-praxis

HF- und Mikrowellentechnik

1/2-Zoll-UMTS-Basisstationsempfänger

Linear, Seite 8



1/2-Zoll-UMTS-Basisstationsempfänger

Wie hoch kann man Komponenten für die Kommunikation integrieren und dabei die hohen Leistungsanforderungen einer Makrozellen-Basisstation erfüllen?



Die Halbleiterfertigungstechnik diktiert immer noch, dass einige der Schlüsselfunktionen in speziellen Fertigungsprozessen gefertigt werden: GaAs und SiGe im HF-Bereich, CMOS mit kleinen Strukturbreiten für schnelle A/D-Wandler (ADCs) und Filter hoher Güte (high Q), können nicht sonderlich gut in Halbleitermaterialien implementiert werden. Dennoch fordert der Markt immer höhere Funktionsdichten.

Dies im Sinn, wählten wir den Einsatz der SiP-Technik (system-in-chip), um einen Receiver zu bauen, der nur 1/2 Quadratzoll (knapp über 3 cm²) Fläche beansprucht. Die Anschlüsse des Receivers sind der 50-Ohm-HF-Eingang, der 50-Ohm-LO-Eingang, der ADC-Takteingang und der digitale ADC-Ausgang. Damit muss die rauscharme Verstärkung und HF-Filterung an

den Eingang hinzugefügt werden, LO und die Taktgenerierung sowie die digitale Signalverarbeitung an den digitalen Ausgang. Innerhalb des 15 mm x 22 mm großen Gehäuses ist eine Signalkette mit Hochfrequenz-SiGe-Komponenten, diskreter, passiver Filterung und CMOS-ADCs mit kleinen Strukturbreiten vereint.

Nachfolgend die Analyse des Designs für zwei µModule-Produkte: den LTM9004, einen Empfänger mit direkter Konvertierung und den LTM9005, einen Empfänger mit ZF-Sampling.

Design-Ziele

Das Designziel ist ein UMTS-Aufwärts-FDD-System, besonders die Medium Area Basisstation im Betriebsband I, die detailliert in der Spezifikation 3GPP TS25.104 V7.4.0 definiert ist.

Die Empfindlichkeit ist eine der Hauptanforderungen an den Empfänger: sie muss ≤ -111 dBm für ein Eingangss-SNR (Signal/Rauschverhältnis) von $-19,8$ dB/5 MHz betragen. Das bedeutet, dass der effektive Rauschteppich am Empfänger Eingang bei $\leq -158,2$ dBm/Hz liegen muss.

Design-Analyse – Null-ZF oder Empfänger mit direkter Wandlung

Der LTM9004 ist ein Empfänger mit direkter Wandlung und besteht aus einem I/Q-Demodulator, Basisbandverstärkern und einem 14-Bit-Zweikanal-A/D-Wandler mit 125 MSamples/s (Bild 1). Der Tiefpassfilter LTM9004-AC hat 0,2 dB Eckfrequenz bei 9,42 MHz, was vier WCDMA-Träger ermöglicht. Der LTM9004 kann mit einem HF-Front-End verwendet werden, um einen kompletten UMTS-Aufwärtsempfänger zu bilden. Ein HF-Front-End besteht aus einem Diplexer, einem oder mehreren rauscharmen Verstärkern (LNAs) und Keramik-Bandpassfiltern. Um Schwankungen in der Verstärkung und Phase zu minimieren, besitzt die Basisband-Kette eine Topologie mit fester Verstärkung, deshalb ist ein HF-VGA vor dem LTM9004 nötig. Tabelle 1 zeigt die typischen Leistungsanforderungen an ein solches Front-End.

Mit dem gegebenen, effektiven Rauschbetrag des Front-Ends, ist das maximal erlaubte Rauschen wegen dem LTM9004 dann $-142,2$ dBm/Hz. Das typische Eingangsrauschen für den LTM9004 ist $-148,3$ dBm/Hz was zu einer berechneten Systemempfindlichkeit von $-116,7$ dBm führt.

Typischerweise genießt ein solcher Empfänger die Vorteile einer DSP-Filterung des digitalen Signals nach dem ADC. In diesem Fall ist das DSP-Fil-

Tabelle 1: Leistungsanforderungen

Hx-Frequenzbereich:	1920 bis 1980 MHz
HF-Verstärkung:	15 dB maximal
AGC-Bereich:	20 dB
Rauschzahl:	1,6 dB
IIP2:	+ 50 dBm
IIP3:	0 dBm
P1dB:	- 9,5 dBm
Unterdrückung (rejection) @ 20 MHz:	2 dB
Unterdrückung @ Tx-Band:	96 dB

*Von Douglas Stuetzle,
Senior Module Design
Engineer und
Todd Nelson,
Module Development
Manager,
Linear Technology
Corporation*

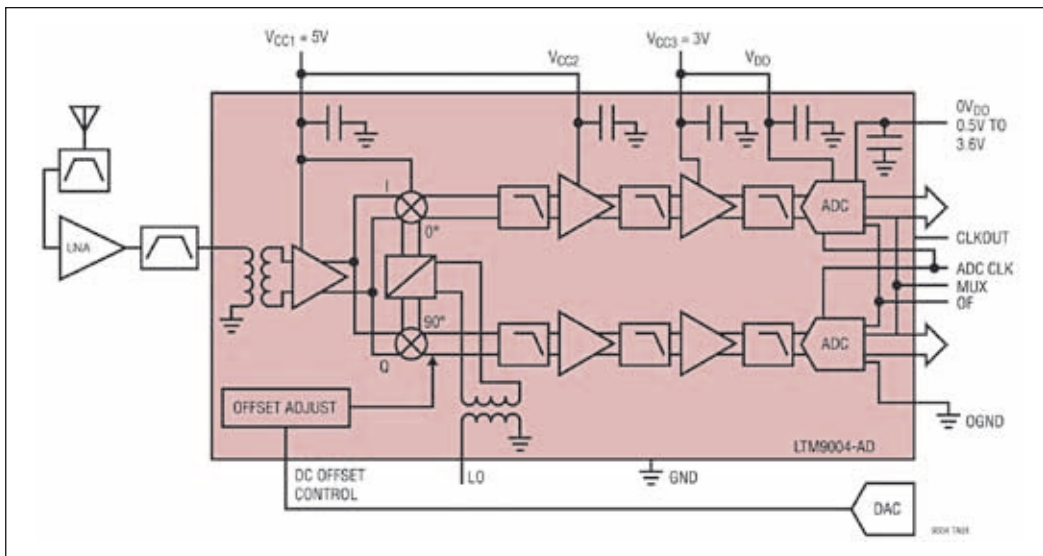


Bild 1: Die im μ Module-Empfänger LTM9004 implementierte direkte Wandlungs-Architektur

ter ein 64-Tap-RRC-Tiefpass mit $\alpha = 0,22$. Um auch bei Anwesenheit von Störsignalen auf den Nachbarkanälen einwandfrei zu arbeiten, muss der Empfänger einen ausreichenden Dynamikbereich bei maximaler Empfindlichkeit haben. Die UMTS-Spezifikation definiert ein maximales Störsignal auf dem Nachbarkanal von -73 dBm. Man beachte, dass der Eingangspegel für -1 dBFS im ZF-Bandpass des LTM9004 -15 dBm für ein modulierte Signal mit einem Crestfaktor von 10 dB beträgt. Am LTM9004-Eingang summiert sich dies auf -53 dBm, entsprechend einem digitalisierten Signalpegel von $-42,6$ dBFS.

Mit der automatischen Verstärkungsregelung (AGC), die für eine minimale Verstärkung eingestellt ist, muss der Empfänger das größte zu erwartende und gewünschte Signal vom Handset demodulieren können. Diese Anforderung setzt das maximale Signal, das der LTM9004 aufnehmen kann auf -1 dBFS oder darunter. Der kleinste Verlust im Signalpfad ist in der Spezifikation mit 53 dB genannt und nimmt eine durchschnittliche Leistung des Handsets von $+28$ dBm an. Der maximale Signalpegel ist dann -25 dBm am Empfängereingang. Dies entspricht einem Vergleichswert von $-14,6$ dBFS Spitze.

Es gibt mehrere Blockiersignale, die detailliert in den UMTS-Systemspezifikationen enthalten sind. Es ist jedoch nur eine gewisse Reduzierung der Empfindlichkeit ist bei Vorhandensein dieser Signale erlaubt; die Empfindlichkeitsspezifikation ist -115 dBm. Das erste davon ist einem benachbarten Kanal 5 MHz entfernt mit einem Pegel von -42 dBm. Der Pegel des digitalisierten Signals liegt bei $-11,6$ dBFS Spitze. Die Nachverarbeitung mit dem DSP addiert 51 dB Dämpfung, so dass dieses Signal einem Störsignal mit -93 dBm am Eingang des Empfängers entspricht. Die resultierende Empfindlichkeit beträgt $-112,8$ dBm.

Der Empfänger muss auch zufrieden stellend arbeiten bei einem -35 -dBm-Störsignal im benachbarten Kanal ≥ 10 MHz entfernt. Die ZF-Unterdrückung des μ Module-Empfängers dämpft es auf einen äquivalenten digitalisierten Signalpegel von $-6,6$ dBFS. Mit der DSP-Nachverarbeitung beträgt dieser $-89,5$ dBm am Empfängereingang und die resultierende Empfindlichkeit ist $-109,2$ dBm.

Sperrsignale außerhalb des Übertragungsbands müssen auch erfasst werden, aber diese haben den selben Pegel wie die Signale innerhalb, die bereits berücksichtigt sind.

In all diesen Fällen liegt der typische Eingangspegel des LTM9004 für -1 dBFS deutlich über den berechneten maximalen Signalpegeln. Man beachte, dass der Crestfaktor für die modulierten Kanäle in der Größenordnung von 10 bis 12 dB liegt, so dass der größte davon eine Spitzenleistung von ungefähr $-6,5$ dBFS am Ausgang des LTM9004 erreicht.

Das stärkste Sperrsignal ist der -15 -dBm-CW-Ton ≥ 20 MHz neben den Flanken des Empfängerbands. Das HF-Front-End bietet 37 dB Unterdrückung (Dämpfung) dieses Tons, so dass er am Eingang des LTM9004 bei -32 dBm erscheint. Und auch hier darf ein Signal mit diesem Pegel den Basisband- μ Module-Empfänger nicht in seiner Empfindlichkeit beeinflussen. Der entsprechende digitale Pegel ist nur $-41,6$ dBFS Spitze, so dass er keine Auswirkung auf die Empfindlichkeit hat.

Eine weitere Quelle unerwünschter Signale ist der Verlust (leakage) des Senders. Da dies eine FDD-Applikation ist, ist der hier beschriebene Empfänger mit einem Sender gekoppelt, um simultan zu arbeiten. Der Ausgangspegel des Senders wird mit $\leq +38$ dBm und einer Trennung (isolation) zwischen senden und empfangen von 95 dB angenommen. Der Signal, das am LTM9004-Eingang

ankommt beträgt dann $-31,5$ dBm Offset vom empfangenen Signal, bei mindestens 130 MHz. Der äquivalente digitalisierte Pegel ist nur $-76,6$ dBFS Spitze, so dass keine Reduzierung der Empfindlichkeit eintritt.

Eine Herausforderung der direkten Wandlungsarchitektur ist die Linearität 2. Ordnung. Eine nicht ausreichende Linearität 2. Ordnung erlaubt es jedem Signal, erwünscht oder unerwünscht, einen DC-Offset oder Zufallsrauschen im Basisband zu generieren. Die bereits beschriebenen Sperrsignale vermindern dann die Empfindlichkeit, wenn dieses Zufallsrauschen den Rauschpegel des Empfängers erreicht. Die Systemspezifikation erlaubt in jedem Fall eine bestimmte Empfindlichkeitseinbuße bei Vorhandensein dieser Blocker. Laut der Systemspezifikation darf der mit -35 -dBm sperrende Kanal in der Empfindlichkeit auf -105 dBm sinken.

Wie man bereits gesehen, bildet dieser Blocker ein Störsignal mit -15 dBm am Empfängereingang. Die Verzerrung 2. Ordnung die vom LTM9004-Eingang produziert wird, ist ungefähr 16 dB unter dem thermischen Rauschen und die resultierende prognostizierte Empfindlichkeit ist $-116,6$ dBm.

Der -15 -dBm-CW-Blocker wird auch das Produkt 2. Ordnung erhöhen; in diesem Fall ist dieses Produkt ein DC-Offset. DC-Offset ist aber unerwünscht, da er das maximale Signal reduziert, das der A/D-Wandler verarbeiten kann. Der einzig gangbare Weg, die Effekte von DC-Offset abzumildern, ist es sicherzustellen, dass die Linearität 2. Ordnung des Basisband- μ Module-Empfängers hoch genug ist. Der berechnete DC-Offset wegen dieser Signale ist < 1 mV am Eingang des ADC.

Man beachte, dass der Verlust (leakage) des Senders nicht in den Systemspezifikationen enthalten ist, so dass die Reduzierung der Empfindlichkeit auf Grund dieses Signals auf einem Minimum gehalten werden muss.

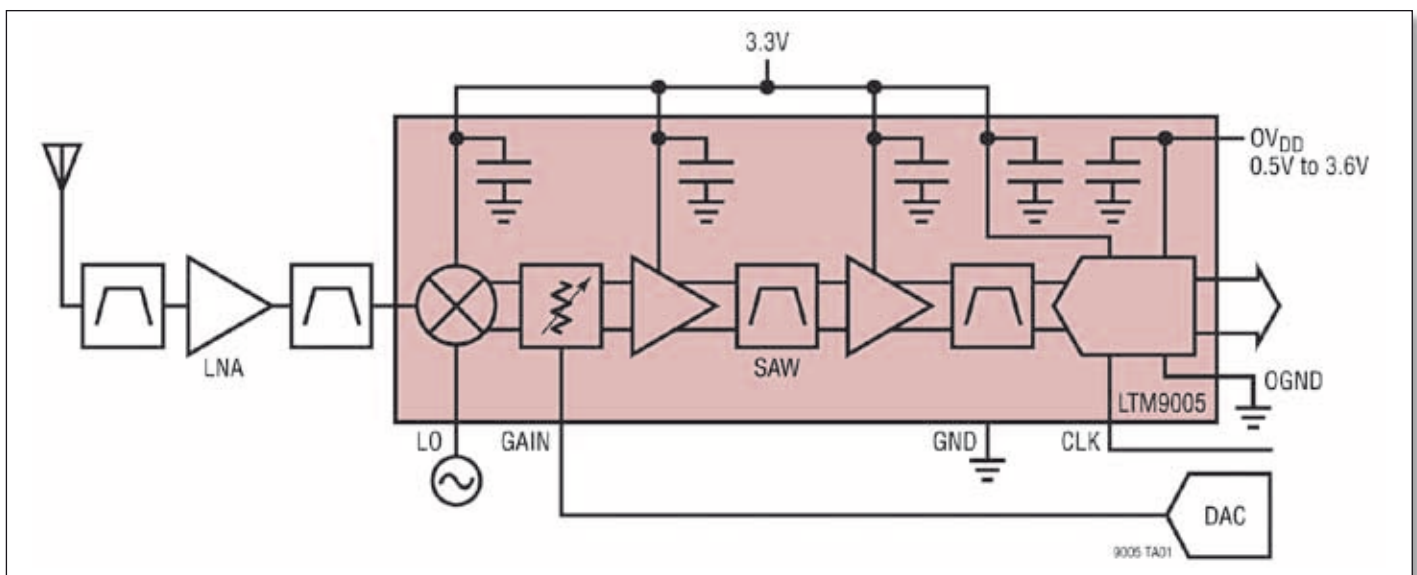


Bild 2: Die ZF-Sampling-Architektur, die im μ Module-Empfänger LTM9005 implementiert ist

Der Ausgangspegel des Senders wird mit $\leq +38$ dBm und einer Trennung zwischen senden und empfangen von 95 dB angenommen.

Die im LTM9004 generierte Verzerrung 2. Ordnung ist so bemessen, dass der Empfindlichkeitsverlust $< 0,1$ dB ist. Es gibt nur eine Anforderung in der

Spezifikation für die Linearität 3. Ordnung. Bei Vorhandensein von zwei Störsignalen, darf die Empfindlichkeit nicht unter -115 dBm absinken.

Die Störer sind ein CW-Ton und ein WCDMA-Kanal mit je -48 dBm. Dies erscheint am LTM9004-Eingang mit je -28 dBm. Ihre Frequenzen liegen so,

dass das Intermodulationsprodukt 3. Ordnung in das Basisband fällt.

Auch hier erscheint dieses Produkt wieder als Pseudo-Zufallsrauschen und reduziert deswegen das Signal/Rausch-Verhältnis. Die im LTM9004 produzierte Verzerrung 3. Ordnung liegt rund 20 dB unter dem thermischen

Rauschpegel und die berechnete Reduzierung der Empfindlichkeit beträgt $< 0,1$ dB.

Design-Analyse – 140-MHz-ZF-Sampling-Empfänger

Der LTM9005 ist ein ZF-Sampling-Empfänger, der aus einem abwärts wandelnden Mischer, ZF-Verstärkern mit einer variablen Dämpfung, einem Oberflächenwellenfilter (OWF) und einem 14-Bit-ADC mit 125 MS/s besteht (Bild 2). Das LTM9005-AB-OWF hat eine Mittenfrequenz von 140 MHz und eine Bandbreite von 20 MHz, was vier WCDMA-Träger erlaubt. Der LTM9005-AB kann mit einem vergleichbaren HF-Front-End eingesetzt werden, wie bereits beschrieben, um einen komplette UMTS-Band-Aufwärtsempfänger aufzubauen. In diesem Fall sollte ein geeignetes Front-End eine maximale HF-Verstärkung von 14,5 dB haben. Tabelle 2 zeigt die typischen Schlüsselspezifikationen für den LTM9005-AB:

Das typische Eingangsrauschen des LTM9005-AB ist -158 dBm/Hz. Mit dem gegebenen Rauschen des HF-Front-Ends, ist die berechnete Systemempfindlichkeit bei maximaler HF-Verstärkung $-122,2$ dBm.

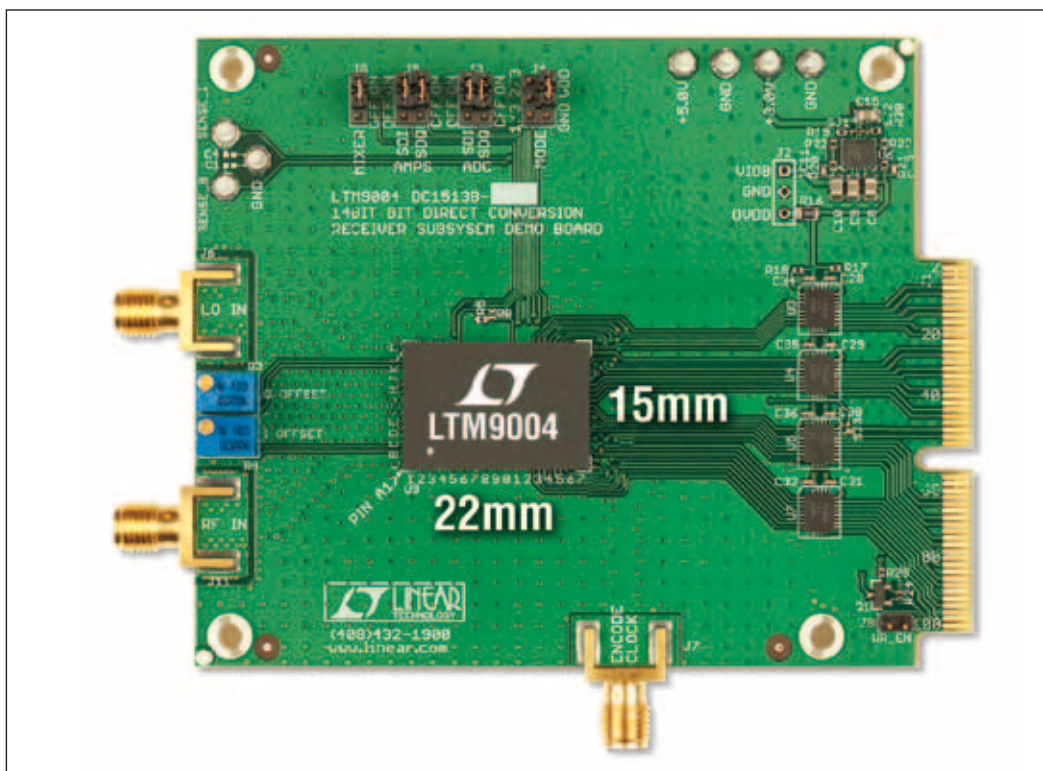


Bild 3: Dieses aktuelle Foto eines Demo-Boards zeigt, dass nur minimal externe Komponenten benötigt werden

Tabelle 2: Typische Schlüsselspezifikationen

Signaleingang für – 1 dBFS:	- 17,8 dBm
Eingangsrauschpegel:	- 158 dBm/Hz
IIP3	- zwei Töne in der ZF: + 17,7 dBm
	- zwei Töne außerhalb der ZF: + 19 dBm
P1dB:	+ 8,8 dBm
Unterdrückung außerhalb des ZF-Bandpasses:	40 dB

Die UMTS-Spezifikation definiert für ein maximales Störsignal im Nachbarkanal – 73 dBm. Mit dem Empfänger, eingestellt auf maximale Verstärkung, ist dann der Pegel, der den Eingang des mModule Empfängers erreicht – 58,5 dBm. Man beachte, dass der Crestfaktor für einen modulierten Kanal in der Größenordnung von 10 bis 12 dB liegen wird, so dass dieses Signal eine Spitzenleistung von ungefähr – 48,5 dBm am μ Module-Empfängereingang erreichen wird. Dies führt zu – 31,7 dBFS am Eingang des ADCs.

Ist die HF-AGC auf ein Minimum eingestellt und die durchschnittliche Leistung des Handsets + 28 dBm, ist der minimale in der Spezifikation definierte Verlust im Signalpfad 53 dB. Der maximale Signalpegel ist dann – 25 dBm am Empfängereingang. Diese Bedingung setzt die maximale HF-Verstärkung, die vor dem μ Module-Empfänger platziert werden kann. Bei einem angenommenen HF-AGC-Bereich von 20 dB ist der Signalpegel am Eingang des LTM9005-AB – 30,5 dBm. Unter Berücksichtigung des Crestfaktors, wird dieses Signal eine Spitzenleistung von ungefähr – 320,5 dBm am Eingang des μ Module-Empfängers erreichen. Dies führt zu – 3,7 dBFS am ADC.

Betrachten wir nun die Empfängereinstellungen für eine maximale HF-Verstärkung bei Vorhandensein eines Sperrsignals. Wenn die ZF-Unterdrückung des μ Module-Empfängers 40 dB ist, und die DSP-Nachverarbeitung weitere 20 dB hinzufügt, dann entspricht dieses Signal einem äquivalenten Störsignal bei – 114,5 dBm am Empfängereingang; der Pegel des digitalisier-

ten Signals liegt bei – 50,7 dBFS. Die resultierende Empfindlichkeit beträgt – 122,2 dBm.

Der Empfänger muss also mit einem – 40-dBm-Störkanal \geq 10 MHz entfernt arbeiten können. Auch hier wird das HF-Front-End wieder keinen Dämpfung dieses Kanals haben, aber die ZF- und DSP-Unterdrückung des μ Module-Empfängers wird es auf einen äquivalenten Pegel von – 102, 5 dBm am Empfängereingang dämpfen. Dies entspricht einem digitalisierten Pegel von – 38,7 dBFS und einer resultierenden Empfindlichkeit von – 119,8 dBm.

In all diesen Fällen liegt der typische Eingangspegel des LTM9005-AB für – 1 dBFS deutlich über dem voraussichtlichen maximalen Pegel des Sperrsignals. Man beachte, dass die resultierenden Empfindlichkeiten dabei alle innerhalb der Spezifikation von – 115 dBm liegen.

Störsignale außerhalb des Übertragungsbandes müssen ebenfalls beachtet werden, der größte davon ist der – 15 dBm-CW-Ton \geq 20 MHz neben den Empfangsbandflanken. Das HF-Front-End bietet rund 37 dB Dämpfung dieses Tons und das ZF-Filter bringt weitere 40 dB Dämpfung. Berechnet für die DSP-Dämpfung ist dieser Ton dann äquivalent zu – 114,5 dBm. Die resultierende Empfindlichkeit beträgt dann – 122,2 dBm und der digitalisierte Signalpegel liegt bei – 60,7 dBFS,

Der Ausgang des Senders wird angenommen zu \leq + 38 dBm mit einer Trennung zwischen senden und empfangen von 95 dB. Der äquivalente Pegel am Empfängereingang berechnet für ZF- und DSP-Unterdrückung ist dann – 119,5 dBm, oder – 55,7

Todd Nelson Biography

Todd Nelson has been the Marketing Manager for Linear Technology's Mixed Signal Business Unit since 1998. He is responsible for all data converter products, interface

transceivers, system monitoring products, Hot Swap-Controllers and powered Ethernet devices.

He has held various marketing and applications positions at Linear Technology and at National Semiconductor prior to joining Linear Technology in 1995. Todd earned his Bachelor's degree in Engineering from Kettering University, and his Masters in Engineering Management from Santa Clara University. He has published several technical articles and papers and participated on various standards committees. Todd enjoys bicycling with his wife and son in his leisure time.

dBFS. Die resultierende Empfindlichkeit beträgt – 122,2 dBm, was auch innerhalb der Spezifikation von – 115 dBm liegt.

Für die Linearität 3. Ordnung, bei Vorhandensein von zwei Störsignalen, darf die Empfindlichkeit nicht unter – 115 dBm sinken. Die Störsignale sind hier ein CW-Ton und ein WCDMA-Kanal mit je 48 dBm. Diese treten am Eingang des LTM9005-AB bei jeweils – 33,5 dBm auf. Ihre Frequenz liegt so, dass sie 10 MHz und 20 MHz neben dem gewünschten Kanal liegen, so dass die Intermodulationsprodukte 3. Ordnung in das Bandpass fallen. Auch hier erscheint dieses Produkt wieder als Pseudo-Zufallsrauschen. Der Einsatz des IIP3 ist für Töne außerhalb des Bandpass geeignet

und die berechneten Produkte 3. Ordnung erscheinen bei – 131,1 dBm. Dies ist etwa 30 dB unter dem Rauschpegel und hat keinen Einfluss auf die Empfindlichkeit.

Zusammenfassung

Die beiden μ Module LTM9004 und LTM9005 haben die hohe Leistung, die für Applikationen in UMTS-Basisstationen nötig ist. Sie bieten jedoch die geringen Ausmaße und hohe Integrationsdichte, die für sehr kompakte Designs erforderlich sind (Bild 3).

Durch Nutzen der SiP-Technik, enthalten die μ Module-Empfänger Komponenten, die in optimierten Prozessen (SiGe, CMOS) gefertigt werden sowie auch passive Filterelemente.

**Doug Stuetzle, Module Design Engineer
Linear Technology Corp.**

Doug Stuetzle is a Module Design Engineer at Linear Technology in the Signal Conditioning Product group. He joined the company in 2003 and has over 26 years of experience designing RF and microwave circuits, modules, and systems for military and

commercial customers. His present responsibility is the definition and design of mixed signal micro-modules for the industrial, medical, and automotive markets. He holds an MSEE from Santa Clara University and a BSEE from San Jose State University.