

Diss. ETH No. 13583

Low Noise CMOS Chopper Instrumentation Amplifiers for Thermoelectric Microsensors

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
CHRISTIAN IVO MENOLFI
Dipl. El. Ing. ETH
born November 21, 1967
citizen of Wikon LU

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Q. Huang, examiner
Prof. Dr. H. Baltes, co-examiner

2000

Abstract

This dissertation describes the modeling, implementation and experimental characterization of highly sensitive monolithic integrated CMOS instrumentation amplifiers employing the chopper modulation technique. These amplifiers are a crucial element in the interface circuitry to CMOS compatible thermoelectric infrared microsensors, where very weak dc signal levels in the sub-microvolt range must be amplified in a maximum bandwidth of ~ 100 Hz.

One of the main challenges in weak sensor signal data acquisition systems are low-frequency $1/f$ -noise and dc-offset. To achieve the sub-microvolt level both for offset and noise, the chopper modulation technique has been found a prime candidate to meet these stringent requirements. A comprehensive analysis of this circuit structure is given. Charge injection spikes of the periodically driven input modulators have been found a major limit to the dc offset performance and cause a residual offset. It is shown that by the choice of an appropriate amplifier transfer function in between the chopping modulators or by the introduction of a suitable delay between input- and output modulator

clock a substantial reduction of residual offset is achieved. The efficiency of the proposed schemes is derived.

The circuit implementation of two chopper modulated amplifiers in a 1- μm single-poly CMOS technology is described. The amplifier AMP10 is based on a fully differential architecture utilizing three gain stages. While the first stage is a very low-noise preamplifier and determines the noise performance of the overall system, the second gain stage consists of a second order bandpass filter with center frequency matched to the chopping frequency and ensures low residual offset caused by wideband charge injection spikes, thanks to its frequency selectivity. Furthermore, it provides an ac coupling to a third gain stage. The amplifier features a total gain of $77\text{ dB}\pm 0.3\text{ dB}$ at a bandwidth of 600 Hz. The measured low-frequency noise PSD is $8.5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ and the input offset is 600 nV. The measured dc CMRR is better than 150 dB. No external components or trimming are required.

The second amplifier, AMPdT, utilizes an innovative approach to achieve sub-microvolt offset and noise. Key to its performance is a delayed chopping scheme combined with a first order spike shaping lowpass filter. In contrast to AMP10, the chopping clock needs not to match any particular circuit parameter and can be set within a certain range. The amplifier features a gain of $68.8\pm 0.7\%$, an input noise PSD of $8.5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ and a minimum CMRR of 144 dB. Sub-microvolt residual offset has been measured, even for higher sensor resistances up to 100 k Ω .

To allow a seamless integration of the chopper modulated amplifiers in a smart sensor microsystem, back-end circuit configurations are investigated that are particularly adapted to monolithic integration. A synchronous over-sampling technique is proposed as a robust and chip-area efficient method to further process signals originating from chopper modulated amplifiers.

Chopper amplifiers are limited in bandwidth. The chopper stabilization technique is presented, which combines the dc performance of the chopper modulated amplifier with a wideband operational amplifier. A comprehensive set of design equations is derived and second-order effects are studied. Experimental verification is performed by the use of a discrete measurement setup.

Kurzfassung

Diese Dissertation befasst sich mit der Modellierung, der Implementierung und der experimentellen Auswertung von hochempfindlichen monolithisch integrierten CMOS Messverstärkern. Diese stellen ein wichtiges Glied in der Signalverarbeitung von CMOS-kompatiblen thermoelektrischen Infrarotsensoren dar, wo Gleichspannungen im Sub-Mikrovoltbereich in einer maximalen Bandbreite von 100 Hz verstärkt werden müssen.

Eine der grössten Herausforderungen in der Erfassung sehr schwacher Sensorsignale sind niederfrequentes $1/f$ -Rauschen und Fehlspannungen (Offset). Um diese Werte unter ein Mikrovolt zu bringen, eignet sich insbesondere das Prinzip des Zerhacker-Verstärkers. Diese Schaltungsstruktur wird umfassend untersucht. Eine bedeutende Beschränkung im Gleichspannungsverhalten stellen Ladungsinjektionen des Eingangsmodulators dar, die zu einem Restoffset des Verstärkers führen. Es zeigt sich, dass dieser störende Restoffset mit der Wahl einer passenden Verstärker-Übertragungsfunktion zwischen dem Eingangs- und Ausgangsmodulator oder mit einer verzögerten Ansteuer-

ung des Ausgangsmodulators beträchtlich reduziert werden kann. Die Effizienz der vorgeschlagenen Verfahren wird untersucht.

Die Realisierung von zwei Zerhacker-Verstärkerschaltungen in einer digitalen $1\ \mu\text{m}$ CMOS Technologie wird beschrieben. Der Messverstärker AMP10 basiert auf einer dreistufigen Architektur. Er besteht aus einem rauscharmen Vorverstärker und einem Bandpassfilter zweiter Ordnung, dessen Resonanz auf die Zerhackerfrequenz abgestimmt ist. Dieser Filter garantiert dank seiner Frequenzselektivität einen niedrigen Restoffset. Ausserdem ermöglicht er eine Wechsellspannungskopplung an eine dritte Stufe. Der gemessene Verstärkungsfaktor ist $77\ \text{dB} \pm 0.3\ \text{dB}$ und die Bandbreite beträgt $600\ \text{Hz}$. Eine niederfrequente Rauschleistungsdichte von $8.5\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, ein Restoffset von $600\ \text{nV}$ und eine Gleichtaktunterdrückung von über $150\ \text{dB}$ konnte nachgewiesen werden. Die realisierte Schaltung braucht weder externe Komponenten, noch muss sie abgeglichen werden.

Der zweite Verstärker, AMPdT, basiert auf einer neuartigen Struktur bestehend aus einem Tiefpassfilter erster Ordnung kombiniert mit einer zeitlich verzögerten Ansteuerung des Ausgangsmodulators. Die gemessene Verstärkung beträgt $68.8 \pm 0.7\%$, die niederfrequente Rauschleistungsdichte ist $8.5\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ und eine Gleichtaktunterdrückung von mindestens $144\ \text{dB}$ konnte erreicht werden. Der gemessene Restoffset liegt unterhalb eines Mikrovolt für Sensorwiderstände bis $100\ \text{k}\Omega$.

Um eine nahtlose Integration der Zerhacker-Verstärker in ein Sensor-Mikrosystem zu gewährleisten, werden passende nachfolgende Schaltungskonzepte untersucht, die sich speziell für integrierte Schaltungen eignen. Ein synchrones Überabtastverfahren wird vorgeschlagen, das eine robuste und effiziente Weiterverarbeitung der Verstärkersignale erlaubt.

Zerhacker-Verstärker haben eine beschränkte Bandbreite. Eine Lösung dieses Problems bieten zerhackerstabilisierte Operationsverstärker, die die Vorteile des Zerhackerverstärkers mit denen eines Breitbandoperationsverstärkers kombinieren. Eine umfassende Analyse dieser Struktur sowie eine Studie der wichtigsten Nichidealitäten wird vorgelegt. Eine experimentelle Überprüfung der Schaltung wird mit einem diskreten Messaufbau durchgeführt.

Résumé

Cette thèse traite de la modélisation, de la réalisation et de la caractérisation expérimentale des amplificateurs de mesure hautement sensibles, entièrement intégrés en technologie CMOS et utilisant la technique de modulation à découpage (chopper). Ces amplificateurs représentent un élément primordial dans le circuit de l'interface, connecté à des micro-capteurs thermoélectriques à infrarouge, compatibles avec la technologie CMOS, et où des niveaux de signal de courant continu très faibles (sous-microvolt) doivent être amplifiés dans une largeur de bande maximale de 100 Hz.

Les deux plus grandes difficultés rencontrées par une chaîne d'acquisition de signaux de capteur très faibles sont le bruit $1/f$ à basse fréquence et la tension d'offset. Afin d'atteindre le niveau au-dessous d'un microvolt pour les deux, il est possible d'utiliser la technique de modulation à découpage, particulièrement appropriée pour répondre à ces exigences strictes. Une analyse complète de ce circuit est effectuée. Les pointes de charge injectées périodiquement par le modulateur d'entrée se sont trouvées à une limite marquante de la performance de l'offset, ce qui est la cause d'un offset résiduel. Il est démontré qu'en choisissant, soit la fonction de transfert de l'amplificateur situé entre les modulateurs d'entrée et de sortie, soit l'introduction d'un retard

adéquat sur l'horloge du modulateur de sortie, une réduction considérable de l'offset résiduel peut être atteinte. Une recherche est réalisée sur l'efficacité des méthodes proposées.

La réalisation de deux amplificateurs chopper avec une technologie digitale CMOS 1 μm est décrite. L'amplificateur AMP10 est basé sur une architecture avec trois étapes de gain. Alors que la première étape se compose d'un pré-amplificateur à bruit faible, déterminant la performance du bruit pour l'ensemble du système, la seconde étape consiste en un filtre passe-bande de deuxième degré, dont la résonance est synchronisée avec la fréquence de l'horloge de découpage, ce qui permet, grâce au filtre à fréquence sélective, de réduire l'offset résiduel, causé par les pointes de charge à large bande injectées. De plus, celui-ci fournit un couplage à courant alternatif avec la troisième étape de gain. L'amplificateur caractérise un gain total de 77 ± 0.3 dB dans une largeur de bande de 600 Hz. La densité spectrale de puissance en bruit à basse fréquence mesurée est de $8.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ et l'offset d'entrée est de 600 nV. Le rapport de réjection du mode commun (CMRR) est supérieur à 150 dB. Aucun composant ou réglage externes n'est requis.

Le deuxième amplificateur, AmpdT, adopte une approche innovatrice, afin d'atteindre un offset et une tension de bruit inférieurs à un microvolt. La clé de cette architecture est un processus de découpage retardé, combiné à un filtre passe-bas de premier degré. L'amplificateur caractérise un gain de $68.8 \pm 0.7\%$, une densité spectrale de puissance en bruit à basse fréquence de $8.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ et un CMRR de 144 dB. L'offset résiduel mesuré est inférieur à un microvolt, même pour des résistances de capteur plus élevées que 100 k Ω .

Une recherche est effectuée sur les configurations du circuit placées après les amplificateurs chopper, particulièrement adaptées à l'intégration monolithique. Une technique d'échantillonnage synchronisée est proposée, en tant que méthode robuste et efficace pour le traitement de signaux ayant comme origine les amplificateurs chopper.

Les amplificateurs à découpage sont limités dans la largeur de bande. Pour y pallier, on utilise la technique de stabilisation chopper, combinant la performance en basse fréquence de l'amplificateur chopper avec celle d'un amplificateur opérationnel à bande large. Un ensemble d'équations est dérivé et les effets secondaires sont étudiés. La vérification expérimentale est réalisée, grâce à un dispositif de mesure discret.