

Fehlerdiagnose für ADCs und DACs in einer Loop-Back-Struktur unter Einbeziehung von Parametervariationen

Matthias Gulbins, Wolfgang Vermeiren
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS,
Institutsteil Entwurfsautomatisierung EAS Dresden
matthias.gulbins@eas.iis.fraunhofer.de
wolfgang.vermeiren@eas.iis.fraunhofer.de

Stefan Redlich
Infineon Technologies AG
Duisburg, Deutschland
stefan.redlich@infineon.com

Kurzfassung — Es wird ein Ansatz zur Fehlerdiagnose für in einer Loop-Back-Struktur angeordnete ADCs und DACs unter Einbeziehung von Parametervariationen vorgestellt. Mit Monte-Carlo-Simulationen für den fehlerfreien Fall und die fehlerbehafteten Fälle werden der Einfluss der Parametervariationen auf die Übertragungskennlinien der Loop-Back-Struktur berechnet und Kennlinienscharen erzeugt. Aus den Übertragungskennlinien werden typische Kenngrößen extrahiert und zu Fehlersignaturen zusammengefasst. Grundlage für die Fehlerdiagnose bilden dann Verteilungen der Kenngrößen und Min-Max-Intervalle der Fehlersignaturen. Ein Anwendungsbeispiel wird beschrieben.

I. EINLEITUNG

ADC (Abk. für engl. Analog-to-Digital-Converter) und DAC (Abk. für engl. Digital-to-Analog-Converter) sind typische Mixed-Signal-Komponenten in System-on-Chip-Halbleiterbauelementen. Die bekannten Teststrategien für diese Komponenten basieren in der Regel auf automatisierten Testsystemen mit hochgenauen analogen Signalquellen und -analysatoren. Die Zusammenschaltung von ADC und DAC zu einer Loop-Back-Struktur mit digitalen Ein- und Ausgängen ermöglicht dagegen den Test mit kostengünstigen rein digitalen Testsystemen und die Implementierung sogenannter On-Chip Tests, für die meist keine geeigneten analogen Ressourcen zur Verfügung stehen.

Als Stimulation für die Loop-Back Struktur wird in dieser Arbeit eine digitale Treppenfunktion verwendet. Die (statischen) Übertragungskennlinien von DAC und ADC werden durch Simulationen und Fehlersimulationen der elektrischen Netzwerke bestimmt und in eine MATLAB kompatible Verhaltensbeschreibung konvertiert. Um die Datenmenge zu reduzieren, werden aus den Übertragungskennlinien typische Kenngrößen wie z.B. INL, DNL sowie TUE [1] extrahiert und zu einer Fehlersignatur [2] zusammengefasst. Die ermittelten Kenngrößen und Fehlersignaturen sind die Grundlage für den hier vorgestellten Fehlerdiagnosezugang. Ziel ist es, solche Kenngrößen zu finden und in die Fehlersignatur aufzunehmen, die in der Lage sind, Fehler an unterschiedlichen Fehlerorten sicher voneinander zu unterscheiden.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des BMBF-Projektes DIANA (FKZ 01 M 3188B) durchgeführt.

Neu an dem hier vorgestellten Ansatz ist die Berücksichtigung herstellungsbedingter Parametervariationen bei der Fehlerdiagnose. Der Einfluss der Parametervariationen auf die Fehlersignatur wird mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen berechnet. Dadurch wird die Unterscheidbarkeit der Fehler quantifizierbar. Im Folgenden wird gezeigt, wie mit Hilfe o. a. Kenngrößen die Fehlerdiagnose, bestehend aus Fehlerlokalisierung und Fehleridentifizierung, erfolgt. Ergänzend dazu wird die Signifikanz der einzelnen Kenngrößen bewertet.

II. SIMULATIONEN MIT VARIERTEN PARAMETERN

Die Bauelementparameter der passiven und aktiven Schaltungskomponenten wie z.B. Widerstände und Transistoren und der verwendeten Makrozellen wie z.B. Operationsverstärker bestimmen die Übertragungskennlinien der betrachteten ADCs und DACs. Von ihnen seien jeweils Nominalwert und Standardabweichung bekannt. Mit Monte-Carlo-Simulationen wird der Einfluss der Parametervariationen auf die Übertragungskennlinien berechnet und eine Kennlinienschar erzeugt. Anhand dieser Kennlinienschar wird die Übertragungscharakteristik der Loop-Back-Struktur auf der Basis eines einfachen MATLAB basierten Verhaltensmodells berechnet. Für jeden Fehler werden die berechneten Kenngrößen in ein Histogramm übertragen und die Verteilungen der Kenngrößen approximativ bestimmt. Zusätzlich werden in den Simulationen Minimal- und Maximalwert jeder Kenngröße einer Fehlersignatur berechnet. Bei genügend vielen Monte-Carlo-Simulationen wird davon ausgegangen, dass jede Kenngröße im Intervall zwischen Minimal- und Maximalwert liegt. Nach Ausführung der Monte-Carlo-Simulationen umfasst jede Fehlersignatur zusätzlich zu den Nominalwerten die Verteilungen und die Min-Max-Intervalle aller ihrer Kenngrößen.

III. FEHLERDIAGNOSE – FEHLERLOKALISIERUNG UND FEHLERIDENTIFIKATION

Die Verteilungen der Kenngrößen und die Min-Max-Intervalle einer Fehlersignatur bilden die Grundlage für die Fehlerdiagnose. Werden n Kenngrößen als Achsen eines kartesischen Koordinatensystems betrachtet, so bildet jeder Fehler einen Punkt in diesem n -dimensionalen Raum. Die Monte-Carlo-Simulationen führen zu einer Punktwolke um jeden Fehler. Diese Punktwolke wird durch einen

n -dimensionalen Quader begrenzt, dessen Grenzen durch die Min-Max-Intervalle vorgegeben werden. Die Fehlerdiagnose bezieht sich dann auf mögliche Überschneidungen der Quader.

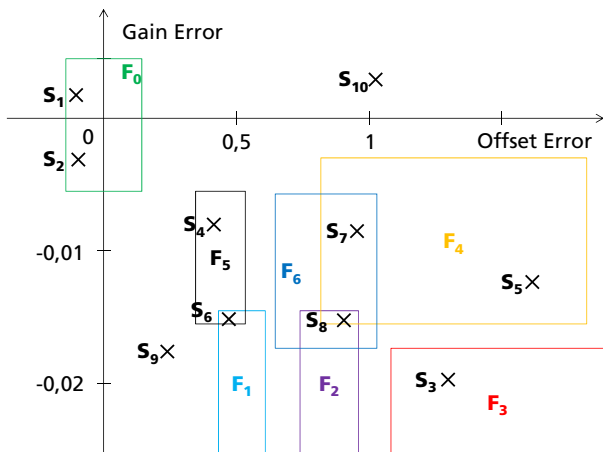


Bild 1. Fehlerintervalle F_i der Kenngrößen „Gain Error“ und „Offset Error“ für verschiedene Fehler und gemessene Fehlersignaturen S_i

Zur Veranschaulichung werden, wie in Bild 1 illustriert, die beiden Kenngrößen „Gain Error“ und „Offset Error“ betrachtet. Für den fehlerfreien Fall F_0 und sechs mögliche Fehler F_1, \dots, F_6 wurden per Monte-Carlo-Simulation die Intervalle für Offset und Gain Error bestimmt, innerhalb derer diese Kenngrößen auftreten.

Die Fehler F_0 (hier auch als „Fehler“ betrachtet), F_1, \dots, F_6 spannen unterschiedlich große Flächen auf. Aufgabe der Fehlerdiagnose ist es, einer gemessenen Fehlersignatur S_i Fehlerkandidaten zuzuordnen. Bild 1 skizziert, wie sich diese Aufgabe grafisch lösen lässt: Liegt die Fehlersignatur S_i innerhalb der aufgespannten Fläche bzw. im aufgespannten n -dimensionalen Quader eines Fehlers, so kommt dieser Fehler als Kandidat für die vorliegende Fehlersignatur in Frage. Gibt es nur einen Kandidaten, so ist die Fehlerdiagnose damit beendet. Im vorliegenden Beispiel gemäß Bild 1 wird bei den Fehlersignaturen S_1 und S_2 kein Fehler (F_0); bei S_3 Fehler F_3 ; bei S_4 F_5 und bei S_5 F_4 klassifiziert. Gibt es mehrere Kandidaten, so wird zunächst der Fehlerort (Fehlerlokalisierung) bestimmt.

Sind die Fehler F_1 und F_5 Fehler am gleichen Fehlerort mit unterschiedlichen Fehlerwerten, so ist der Fehlerort gefunden. Im Schritt der Fehleridentifikation muss der Fehlerwert, d. h. die Abweichung von einem Nominalwert, bestimmt werden.

Haben die Fehlerkandidaten unterschiedliche Fehlerorte, so können weitere Kenngrößen in Simulation und Messung einbezogen werden, um so die Fehlerkandidaten voneinander zu unterscheiden. Da Fehler unterschiedlicher Fehlerorte häufig auch unterschiedliche Bereiche der Kennlinie verändern, kommen als zusätzliche Kenngrößen z. B. solche mit lokalem Bezug in Betracht.

Unabhängig davon ist eine Bewertung der Kandidaten unter Verwendung der berechneten Kenngrößen-Verteilungen möglich. Dabei werden Fehler gleichen Fehlerorts zusammengefasst. Anschließend werden die Kandidaten entsprechend der sich aus den Kenngrößen-Verteilungen ergebenden Auftretswahrscheinlichkeit gewichtet.

In Bild 1 gibt es für die Fehlersignaturen S_6 und S_7 jeweils zwei, F_1 und F_5 bzw. F_4 und F_6 , sowie für die Fehlersignatur S_8 drei Kandidaten: F_2, F_4 und F_6 .

Falls einer gemessenen Fehlersignatur kein Fehler zugeordnet werden kann, gehört diese Signatur nicht zu den in den Simulationen untersuchten Fehlern. In Bild 1 gilt das für S_9 und S_{10} .

IV. LOKALISIERBARKEIT DER FEHLER

Darüber hinaus zeigt Bild 1 die Möglichkeit, die Güte der Fehlerdiagnose zu beurteilen, d. h., wie gut die Fehler lokalisierbar sind und welchen Beitrag die einzelnen Kenngrößen dabei leisten. Der Einfachheit halber werden im Folgenden Fehler an unterschiedlichen Fehlerorten betrachtet. Ein Fehler ist dann eindeutig lokalisierbar, wenn er sich von jedem anderen Fehler in mindestens einer Kenngröße unterscheidet. In Bild 1 (die Signaturen S_i spielen hierbei keine Rolle) ist außer dem fehlerfreien Fall F_0 nur der Fehler F_3 eindeutig lokalisierbar. Von den Fehlern F_1 und F_2 unterscheidet sich F_3 im Offset Error und von F_4 im Gain Error, von den anderen Fehlern in beiden Kenngrößen. Von den anderen Fehlern haben wenigstens zwei (z. B. F_1 und F_5) eine gemeinsame Schnittmenge.

Um die Fehlerlokalisierbarkeit zu verbessern, müssen weitere Kenngrößen hinzugenommen werden. Dabei wird untersucht, wie viel jede Kenngröße zur Unterscheidung beiträgt. Aus der Kenntnis der Kennlinienverläufe bisher nicht unterscheidbarer Fehler können gezielt zusätzliche, auch alternative Kenngrößen (vgl. [3], [4]) entwickelt werden, die zu deren Unterscheidung beitragen.

V. ANWENDUNGSBEISPIEL

Die Wirksamkeit des hier vorgestellten Diagnoseansatzes konnte beispielhaft anhand einer, aus einem 5 Bit R2R-DAC und einem 5 Bit Flash-ADC bestehenden Loop-Back-Struktur demonstriert werden. Dazu wurde der DAC mit einer digitalen Treppenfunktion stimuliert. Aus den digitalen Ausgangsdaten des ADCs wurden dann die bekannten Kenngrößen berechnet. Als Fehler wurden sowohl Haftfehler, z. B. an den Komparator-Ausgängen oder im Decoder, als auch parametrische Fehler, z. B. in der Widerstandskette des ADCs, in den Widerständen des R2R-Netzwerks und der Schwellwerte der Operationsverstärkereingänge, angenommen. Alle Fehler wurden als Einzelfehler betrachtet.

Für jeden Fehler wurde der Einfluss der Parametervariationen mit einer aus 10.000 Einzelsimulationen bestehenden Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Verändert wurden dabei die Werte sämtlicher Widerstände sowie die Verstärkung und Offsetspannung der Operationsverstärker. Für die Standardabweichung wurde jeweils ein Wert von 1% der Nominalwerte angenommen. In der Fehlersignatur wurden die folgenden Kenngrößen berücksichtigt:

Offset Error, Gain Error, TUE (total unadjusted error) sowie die maximalen und minimalen Werte von DNL (differenzielle Nichtlinearität) und von INL (integrale Nichtlinearität).

Für den Wirksamkeitsnachweis wurden per Zufallsgenerator 1.000 Fehler ausgewählt. Bei ca. einem Viertel der Fehler war eine eindeutige Fehlerlokalisierung und Fehleridentifikation möglich. Bei den anderen Fehlern wurden mehrere Fehlerkandidaten ermittelt.

LITERATUR

- [1] "ADC and DAC Glossary", MAXIM Application notes, Jul 22, 2012.
<http://www.maximintegrated.com/appnotes/index.mvp/id/641>
- [2] P. Duhamel, J. Rault: "Automatic Test Generation Techniques for Analog Circuits and Systems: A review", IEEE Trans. on Circuits and Systems, vol. CAS-26, no. 7, pp. 411-440, July 1979
- [3] S. Chakrabarti, S. Cherubal, A. Chatterjee: "Fault Diagnosis for Mixed-Signal Electronic Systems", Aerospace Conference, 1999, pp. 169 – 179
- [4] S. H. Kook.: "Low-Cost Testing of High-Precision Analog-to-Digital Converters", PhD Thesis. School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, August 2011