

On the design of analog VLSI iterative decoders

Doctoral Thesis

Author(s):

Lustenberger, Felix

Publication date:

2000

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004041689>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

Series in Signal and Information Processing 002

A vertical strip on the left side of the cover features a grayscale microscopic image of a VLSI chip. The image shows a complex grid of circuitry with various rectangular blocks and connecting lines. The text is overlaid on this image.

Series in
Signal and
Information
Processing

Volume 2

Diss. ETH No 13879

On the Design of Analog VLSI Iterative Decoders

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology, Zürich
for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Felix Lustenberger

Ing. en Microtechnique dipl. EPFL
born on May 31, 1969
citizen of Kriens (LU) and Honau (LU)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. George S. Moschytz, examiner
Prof. Dr. Hans-Andrea Loeliger, co-examiner
Prof. Dr. David A. Johns, co-examiner

November 2000

Hartung
Gorre
Konstanz

Abstract

The rapidly growing electronic networking of our society has created the need for a high-speed and low-power data communications infrastructure. Both voice and data communications have been made available for the mobile user. Additionally, more complex coding schemes and decoding algorithms have been introduced to protect the user data from corruption during the transmission over a communications channel. The aim of all these new coding and decoding approaches is to meet the theoretical channel capacity limit to make a better use of the signal power and channel bandwidth. The iterative probability-propagation-type algorithms that are used to decode state-of-the-art codes such as Turbo codes and low-density parity-check codes create the need for a tremendous computational power. Often, the computational complexity can not be implemented with a traditional digital design approach and a given power budget.

This thesis discusses the efficient implementation of high-performance decoding algorithms in analog VLSI technology. The building blocks are very simple analog translinear circuits that implement vector multipliers with basically only one transistor per element of the outer product of two discrete probability distributions. The presented analog probability propagation networks made of these building blocks are a direct image of the underlying sum-product algorithm. The design of these analog networks follows a heavily semiconductor-physics-centered bio-inspired design approach, that exploits, rather than fights against, the inherent nonlinear behaviour of the basic semiconductor devices. By using such a bio-inspired design approach, the performance of these networks in terms of speed or power-consumption or both is increased by at least a factor of 100 compared to digital implementations. Despite the use of very-low-precision circuit devices, a remarkable system-level accuracy can be achieved by such a large, highly-connected analog network.

The first part of the thesis discusses the background of channel coding and decoding and the theoretical foundations of factor graphs and the sum-product algorithm, which operates by message passing on such graphs. This part provides a brief introduction to the information-theoretic aspects of the interdisciplinary research effort.

The second part of the thesis is devoted to the actual transistor level implementation of the sum-product algorithm using very simple analog-VLSI computational building blocks. This part discusses the design-oriented aspects of the research, however, it relies heavily on the information-theoretic concepts introduced in the first part.

Finally, we present practical designs and design studies of several decoding networks. Algorithmic simulations, circuit simulations, and, where available, measurement results of the implemented decoding networks are presented. Two of the decoder examples were actually fabricated in a $0.8\mu\text{m}$ BiCMOS process. Additionally, application-specific design problems are discussed.

The thesis is finished with a summary of the achieved results and a presentation of future research propositions in the field of analog decoding.

Keywords: Iterative decoding, low-density parity-check (LDPC) codes, repeat-accumulate (RA) codes, trellis codes, Turbo codes, maximum-*a posteriori* probability (MAP) decoder, maximum-likelihood (ML) sequence detection, sum-product algorithm, Viterbi algorithm, probability propagation, factor graphs, analog VLSI technology, bio-inspired networks.

Kurzfassung

Die schnell wachsende elektronische Vernetzung unserer Gesellschaft hat einen grossen Bedarf an schneller und leistungsarmer Datenkommunikationsinfrastruktur erzeugt. Sowohl Sprach- wie auch Datenkommunikationsmittel sind inzwischen für den mobilen Benutzer zugänglich. Zusätzlich werden laufend komplexere Kodierungsverfahren und Dekodieralgorithmen eingeführt, um die Benutzerdaten vor Übertragungsfehlern zu schützen. Das Ziel dieser neuen Kodier- und Dekodierverfahren ist das Erreichen der theoretischen Kanalkapazitätsgrenze, damit die vorhandene Signalleistung und Kanalbandbreite optimal ausgenutzt werden können. Die bei der Dekodierung der dem aktuellen Stand der Technik entsprechen Codes (wie zum Beispiel Turbo Codes und Codes mit dünn besetzter Paritätsprüfmatrix) verwendeten iterativen Wahrscheinlichkeits-Fortpflanzungs-Algorithmen benötigen eine enorme Rechenleistung. Diese Rechenkomplexität kann bei vorgegebenem Leistungsbudget oft nicht mehr mit traditionellen digitalen Entwurfsansätzen erreicht werden.

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der effizienten analogen VLSI-Implementation von leistungsstarken Dekodieralgorithmen. Die Baublöcke der vorgestellten Technik sind sehr einfache analoge translineare Schaltungen zur Implementierung von Vektormultiplizierern. Dabei wird praktisch nur ein Transistor zur Bildung eines Elementes des äusseren Produkts von zwei diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen benötigt. Die aus den Baublöcken aufgebauten analogen Wahrscheinlichkeits-Fortpflanzungs-Netzwerke sind ein direktes Abbild des zugrundeliegenden Summe-Produkt-Algorithmus'. Der Entwurfsprozess dieser analogen Netzwerke verfolgt einen auf die Halbleiterphysik ausgerichteten und von der Biologie inspirierten Entwurfsansatz, wobei das grundlegend nichtlineare Verhalten von Halbleiterelementen ausgenutzt wird anstatt dagegen anzukämpfen. Indem dieser bio-inspirierte Entwurfsansatz verfolgt wird, kann das Leis-

tungsverhalten in Bezug auf den Stromverbrauch oder die Geschwindigkeit oder beides, verglichen mit einer äquivalenten digitalen Lösung, um mindestens einen Faktor 100 erhöht werden. Obwohl nur Bauelemente mit sehr schlechten Präzisionseigenschaften verwendet werden, erreichen diese hochgradig verbundenen analogen Netzwerke eine erstaunliche Systemgenauigkeit.

Der erste Teil der Dissertation vermittelt Hintergrundinformationen zum Thema Kanalkodierung und -dekodierung und liefert die theoretischen Grundlagen über Faktorgraphen und den Summe-Produkt-Algorithmus, der gemäss dem sogenannten Nachrichten-Übertragungs Prinzip auf solchen Graphen angewandt wird. Dieser Teil gibt eine kurze Einführung in die informationstheoretischen Aspekte der interdisziplinären Forschungsanstrengungen.

Der zweite Teil der Arbeit ist der eigentlichen Implementierung auf Transistorebene des Summe-Produkt-Algorithmus' mittels sehr einfacher Rechenbaublöcke gewidmet. Dieser Teil diskutiert somit die entwurfsorientierten Aspekte der Arbeit. Er nimmt jedoch sehr stark Bezug auf die im ersten Teil vorgestellten informationstheoretischen Konzepte.

Schliesslich werden im dritten Teil praktische Ausführungen und Entwürfe von verschiedenen Dekodiernetzwerken besprochen. Es werden dabei algorithmische Simulationen, Schaltungssimulationen und, soweit vorhanden, Messresultate der von uns gebauten Dekodiernetzwerke vorgestellt. Zwei dieser Dekoderbeispiele wurden in einer $0.8\mu\text{m}$ BiCMOS-Technologie fabriziert. Zusätzlich werden auch anwendungsspezifische Entwurfsprobleme besprochen.

Die vorliegende Dissertation wird durch eine Zusammenfassung der erzielten Resultate und Vorschläge für weitergehende Forschungsprojekte im Bereich der analogen Dekodierung abgerundet.

Stichwörter: Iterative Dekodierung, Codes mit dünn besetzter Paritätsprüfmatrix, Repetitions-Anhäufungs-Kodes, Trellis-Kodes, Turbo-Kodes, Maximum-*a-posteriori*-Wahrscheinlichkeits-Dekoder, Maximum-Likelihood (ML)-Sequenzdetektion, Summe-Produkt-Algorithmus, Viterbi-Algorithmus, Wahrscheinlichkeitsfortpflanzung, Faktorgraphen, analoge VLSI-Technik, bio-inspirierte Netzwerke.