



Doctoral Thesis

An optical phase locked loop for coherent space communications

Author(s):

Herzog, Frank Thomas

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005132944> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 16384

An optical phase locked loop for coherent space communications

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
FRANK THOMAS HERZOG
Dipl. El. Ing. ETH
born 11 January 1975
citizen of Wigoltingen (TG), Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. W. Bächtold, examiner
Prof. Dr. H. Bölcskei, Dr. K. Kudielka, co-examiners

2006

Abstract

Optical free-space transmission with coherent detection is a promising technology for inter-satellite communications. It allows the use of small antennas and moderate transmitter power to build data links in the Gbit/s range over tens of thousands of km. The present thesis aims at a specific circuit of coherent reception: the optical phase locked loop.

Basic properties of optical reception are reviewed. It is shown that the sensitivity of a shot noise limited coherent receiver exceeds the quantum limited direct detection receiver by 3.5 dB (in terms of the peak optical power). Furthermore, optical heterodyning suffers from an inherent 3 dB power penalty compared to optical homodyning, making the homodyne receiver – in combination with BPSK modulation – the most sensitive in optical detection.

Several phase-locking schemes, suitable for optical communications, are presented and classified by their complexity and user signal requirements. A relatively new design, the dither loop, is identified as being superior to other concepts. In the present thesis, a detailed mathematical analysis of the dither loop is derived for the first time. The contribution of phase dithering, phase noise and shot noise to the total phase error variance is calculated. Power penalties, induced by the above mentioned noise sources, are evaluated. The knowledge gained during the analysis leads to design rules for an optimum dither loop. The design rules are based on general system specifications.

Measurement results of a homodyne receiver, employing a dither loop, are presented. The sensitivity amounts to 36 photons/bit (-55.7 dBm) for the transmission of a PRBS $2^{31} - 1$ signal at a data rate of 400 Mbit/s and a bit error rate of 10^{-9} . The transmission system uses diode-pumped Nd:YAG lasers at a wavelength of 1.06 μm .

Zusammenfassung

Optische Freiraumübertragung mit kohärenter Detektion ist eine vielversprechende Technologie für die Inter-Satelliten Kommunikation. Sie ermöglicht die Verwendung kleiner Antennenaperturen und mittlerer Sendeleistungen für den Bau von Datenlinks im Gbit/s Bereich über Zehntausende von km. Diese Dissertation behandelt einen spezifischen Schaltkreis des kohärenten Empfangs: den optischen Phasenregelkreis.

Grundlegende Eigenschaften des optischen Empfangs werden besprochen. Es wird gezeigt, dass die Empfindlichkeit eines schrotrauschbegrenzten kohärenten Empfängers jene eines quantenlimitierten Direktempfängers um 3.5 dB übersteigt (in Bezug auf die optische Spitzenleistung). Des weiteren erfährt der optische Heterodynempfang eine inhärente 3 dB Leistungseinbusse im Vergleich zum optischen Homodynempfang, so dass der Homodynempfänger – in Kombination mit einer BPSK Modulation – den empfindlichsten Empfänger der optischen Detektion darstellt.

Verschiedene Phasenregelverfahren, welche für die optische Kommunikation geeignet sind, werden präsentiert und bezüglich ihrer Komplexität und den Anforderungen an das übertragene Signal klassifiziert. Ein relativ neues Verfahren, der Dither Loop, erweist sich den anderen Konzepten als überlegen. In der vorliegenden Dissertation wird zum ersten Mal eine ausführliche mathematische Analyse des Dither Loops hergeleitet. Der Beitrag des Phasen‘wackelns’, des Phasenrauschens und des Schrotrauschens zur totalen Phasenfehlervarianz wird berechnet. Leistungseinbussen, induziert durch die oben genannten Rauschquellen, werden evaluiert. Das Wissen, welches während der Analyse gewonnen wurde, führt zu Entwurfsregeln für einen optimalen Dither Loop. Die Entwurfsregeln basieren auf grundlegenden Systemspezifika-

tionen.

Es werden Messwerte eines Homodynempfängers präsentiert, welcher einen Dither Loop verwendet. Die Empfindlichkeit beträgt 36 Photonen/bit (-55.7 dBm) für die Übertragung eines PRBS $2^{31} - 1$ Signals bei einer Datenrate von 400 Mbit/s und einer Bitfehlerrate von 10^{-9} . Das Übertragungssystem benützt diodengepumpte Nd:YAG Laser bei einer Wellenlänge von 1.06 μm .