



Doctoral Thesis

## High precision GPS processing in kinematic mode

**Author(s):**

Cocard, Marc Marcel

**Publication Date:**

1994

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001435590> →

**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. 10874

# **High Precision GPS Processing in Kinematic Mode**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH  
for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
MARC MARCEL COCARD  
Dipl. Verm. Ing. ETH  
born June 26, 1963  
citizen of Luxemburg

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. H.-G. Kahle, examiner  
Prof. Dr. G. Beutler, co-examiner

Zurich 1994

---

**Abstract**

*This work deals with the calculation of highly accurate trajectories of moving vehicles, and of airplanes in particular, from differential GPS measurements processed in the off-line mode.*

In the last few years the Global Positioning System (GPS) has become the most powerful navigation system world-wide. Although it was developed by the American Department of Defense (DoD) and is, therefore, primarily designated for military use, the number of civilian users is rapidly increasing from day to day. Based on satellite measurements, GPS allows instantaneous positioning accurate to within 100-200 meters. [Remondi, 1984] has shown that differential processing of phase measurements allows improvement of position accuracy to few centimeters. There are numerous applications for spatial trajectories calculated with such high quality accuracy: e.g. their integration in photogrammetric aerotriangulation allows considerable reduction of the number of control points on the ground. Also in airborne gravimetry new horizons are being opened by using GPS.

A software system for processing kinematic data in the off-line mode has been developed. Its key features are presented first. A robust and flexible approach using simultaneously phase- and code-measurements in a differential way is used. For the computation the differences between the code and phase information, measured by the roving receiver as well as by a fixed reference receiver, are used in order to reduce the systematic errors, which affect both receivers in a similar way. The main differences between the phase and the code data are (a) noise (decimeters to meters for the code, millimeters for the phase) and (b) the unknown ambiguities in the phase measurements, which are known to be integer values. Processing is carried out in two steps: firstly a least squares adjustment is applied in order to determine the time-invariant parameters, using the entire data set. Parameters which are considered as invariant are the ambiguities and the coordinates of the roving receiver during stationary periods. Next, the integer values of the ambiguities are determined. In a second step the trajectory is re-processed by introducing the known ambiguities.

The key problem in obtaining high-accuracy trajectories consists in making reliable identification of the integer-valued ambiguities. It is demonstrated that a conventional sigma dependent rounding strategy, commonly used in static applications, is still a useful tool in off-line kinematic processing. In addition, a more powerful search strategy has been analyzed and simulations show that under ideal conditions the integer values of the ambiguities can be retrieved within one epoch worth of dual-frequency measurements. These simulated results have been validated by real data. With increasing distance between the roving and the reference receiver a stochastic modeling of the ionospheric path delay gave good results but also showed the limitation of instantaneous ambiguity resolution.

Using GPS data of good quality trajectories with an accuracy of a few centimeters were recovered. With increasing distance between rover and reference station (up to 100 kilometers), however, all ambiguities could not always be resolved and the quality of the resulting trajectories deteriorates to some decimeters. But even in this case it was possible to derive the velocity and acceleration of the aircraft with high accuracy from the coordinates.

## **Zusammenfassung**

**Thema der vorliegenden Arbeit ist die Bestimmung von hochpräzisen Trajektorien von bewegten Trägern vorallem Flugzeugen mit Hilfe von differentiellen GPS-Messungen im Off-line Modus.**

Das Global Positioning System (GPS) hat sich in den letzten Jahren zu einem der besten und verbreitetsten Navigationssysteme weltweit entwickelt. Obwohl es vom DoD (Department of Defence) der Vereinigten Staaten betrieben wird und somit vorallem für militärische Zwecke bestimmt ist, wächst die Zahl der zivilen Benutzer tagtäglich. Messungen zu Satelliten ermöglichen eine momentane Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von 100-200 Metern. Durch das Einbeziehen von Phasenmessungen im differentiellen Modus kann aber eine Genauigkeit von einigen Zentimeter erreicht werden [Remondi, 1984]. Die Anwendungen für solche hochgenauen Trajektorien sind mannigfaltig. So führt z.B. die Integration von GPS in die photogrammetrische Aerotriangulation zu einer erheblichen Reduktion der benötigten Passpunkte am Boden. Auch in der Aerogravimetrie öffnen sich durch den Einsatz von GPS neue Horizonte.

Programme zur Auswertung von GPS-Messungen im Off-line Modus wurden erstellt. Ein robuster und flexibler Ansatz unter gleichzeitiger Verwendung von differentiellen Code- und Phasenmessungen wurde benutzt. Durch die Differenzbildung der Messungen des bewegten Empfängers und des statischen Referenzempfängers können eine Reihe von systematischen Fehlern grösstenteils eliminiert werden. Die Hauptunterschiede zwischen Code- und Phasenmessung sind (a) die Messauflösung (Dezimeter bis Meter für den Code, Millimeter für die Phase) und (b) die zusätzlichen unbekannt, aber ganzzahligen Mehrdeutigkeiten der Phasenmessungen. Für die Auswertung wurde folgendes zweistufiges Vorgehen verwendet. In einem ersten Schritt werden aus allen Messungen die zeitunabhängigen Parameter mit der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen. Als zeitunabhängige Parameter gelten die Mehrdeutigkeiten der Phasenmessungen und die Koordinaten des bewegten Empfänger während statischen Perioden. Anschliessend werden die ganzzahligen Werte der Mehrdeutigkeiten bestimmt. In einem zweiten Schritt wird die Trajektorie unter Verwendung der im ersten Schritt bestimmten Mehrdeutigkeiten berechnet.

Das zentrale Problem um eine hohe Genauigkeit der Trajektorien zu gewährleisten, ist die zuverlässige Identifizierung der ganzzahligen Werte der Mehrdeutigkeiten. Es konnte gezeigt werden, dass die bei statischen Auswertungen oft verwendete statistische Rundungs-Methode (sigma dependent rounding strategy) auch in kinematischen Anwendungen benutzt werden kann. Daneben aber wurde ein effizienterer Surchalgorismus analysiert. Simulationsrechnungen zeigten, dass es unter idealen Bedingungen möglich ist, die Mehrdeutigkeiten aus Zweifrequenz-Messungen einer einzigen Epoche auf ihre Integer-Werte zu fixieren. Dieses Simulationsresultat bestätigte sich im Fall von reellen Messdaten. Mit zunehmender Distanz zwischen bewegten und Referenzempfänger zeigte ein stochastisches Modellieren des Ionosphäreneinflusses gute Resultate aber auch die Grenzen der schnellen Auflösung der Mehrdeutigkeiten.

Unter Verwendung von qualitativ guten GPS-Messungen konnten Flugtrajektorien mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern bestimmt werden. Mit zunehmender Distanz zwischen bewegtem und Referenzempfänger (bis zu 100 km) konnten nicht mehr alle Mehrdeutigkeiten gelöst werden und die Qualität der Koordinaten verschlechterte sich zu einigen Dezimetern. Aber auch in diesem Fall konnten Geschwindigkeit und Beschleunigung mit hoher Genauigkeit aus den Koordinaten abgeleitet werden.