

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

**Forschungsbericht 2002-06**

The Onboard Navigation System  
for the BIRD Small Satellite

Eberhard Gill and Oliver Montenbruck

Raumflugbetrieb  
und Astronautentraining (GSOC)  
Oberpfaffenhofen

102 pages

39 figures

31 tables

42 references



Manuskript eingereicht am 10. April 2002

# The Onboard Navigation System for the BIRD Small Satellite

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Raumflugbetrieb und Astronautentraining (GSOC)  
Raumflugtechnologie  
Münchner Str. 20  
D- 82234 Weßling

Oberpfaffenhofen, den 10. April 2002

Direktor:  
Prof. Dr. K. Wittmann

Leiter Raumflugtechnologie:  
Th. Rupp

Verfasser:  
Dr. rer. nat. Eberhard Gill  
Dr. rer. nat. Oliver Montenbruck

## **The Onboard Navigation System for the BIRD Small Satellite**

### **Abstract**

The BIRD mission is a small satellite project carried out by the German Aerospace Center (DLR). Launched on October 22, 2001 its major objectives are the test of a new generation of infrared array sensors as well as the detection and scientific investigation of hot spots, like forest fires or volcanic activities. As a technology satellite, BIRD is equipped with a GPS-based autonomous navigation system which provides real-time onboard orbit determination as well as orbit and event prediction capabilities.

The Onboard Navigation System (ONS) supports the BIRD Attitude Control System with real-time attitude information to allow for a nadir pointing of the spacecraft during image sessions and high-rate data downlinks. In addition, precise ONS position data are merged onboard the spacecraft with BIRD image sensor data, thus enabling a geocoding of satellite images on-the-flight. Furthermore, the ONS derives precise timing information from the GPS receiver, which allows a proper synchronization of the BIRD onboard clock based on the measured bias and the determined drift rate. Finally, NORAD twoline elements are autonomously generated onboard from GPS position data, which are downlinked to a relocatable ground terminal for antenna pointing and pass scheduling. An example of the autonomous navigation capabilities of the ONS is the onboard computation of upcoming shadow transits and station contacts, that serves as a demonstration of more fundamental tasks like the support of onboard experiment scheduling or power management.

Starting with an introduction to the BIRD satellite mission, a detailed mathematical description of the algorithms applied within the ONS is given. The concept and architectural design of the implemented system is presented with emphasis on the interaction of the ONS threads and their timing characteristics, followed by a description of the ONS software modules. A series of ONS-related software and hardware-in-the-loop test cycles has been conducted in the preparation of the mission, which are presented. Based on more than two months of flight experience, the performance of the ONS is analyzed in detail, demonstrating the reliable performance of the system together with an excellent accuracy performance, which provides real-time position accuracy of a few meters on-board the BIRD satellite.

Autonome Navigation, Bahnbestimmung, Bordgestützte Navigation, GPS, BIRD

## **Das bordgestützte Navigationssystem des Kleinsatelliten BIRD**

### **Zusammenfassung**

Die BIRD-Mission ist ein Kleinsatellitenprojekt, das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt durchgeführt wird. Die Missionsziele des am 22. Oktober 2001 gestarteten Satelliten umfassen den Test einer neuen Generation von Infrarot-Flächensensoren, sowie die Detektierung und wissenschaftliche Untersuchung von heißen Quellen, wie Waldbränden und Vulkanausbrüchen, aus dem Weltraum. Als Technologiesatellit ist BIRD mit einem GPS-gestützten autonomen Navigationssystem ausgestattet, das eine bordgestützte Bahnbestimmung in Echtzeit durchführt und darüber hinaus eine Vorhersage der Satellitenbahn sowie die Vorhersage von Sichtbarkeitszeiten und Schattendurchgängen ermöglicht.

Das Onboard Navigation System (ONS) unterstützt das BIRD Lagekontrollsystem indem es Lageinformation in Echtzeit bereitstellt, die zur Nadirausrichtung des Satelliten während der Bildaufnahmesequenzen und der Datenübertragungen benötigt wird. Des weiteren werden präzise ONS-Positionsdaten an Bord mit den Bilddaten verknüpft, womit eine bordgestützte Geokodierung bereits im Flug ermöglicht wird. Mittels hochgenauer Zeitinformation des GPS-Empfängers wird eine Zeitsynchronisierung der BIRD-Borduhr realisiert, die auf der gemessenen Ablage der Borduhr und deren am Boden bestimmter Uhrendrift basiert. Schließlich werden an Bord des BIRD-Satelliten die sogenannten Twoline-Elemente bestimmt, die sich besonders zur Langzeitvorhersage der Bahn eignen. Als Telemetriedaten werden die Twoline-Elemente zur Antennensteuerung und Vorhersage der Stationskontakte an ein mobiles Bodenterminal übermittelt. Als ein Beispiel für die vielfältigen Möglichkeiten autonomer Navigation wie z.B. bordgestützte Nutzlast-Einsatzplanung oder Ressourcenmanagement, werden an Bord die künftigen Schattenzeiten und die Stationskontakte berechnet.

Im Anschluss an eine Einführung in die BIRD Satellitenmission wird eine eingehende mathematische Beschreibung des ONS gegeben. Daran schließt sich eine Vorstellung des ONS-Konzeptes und dessen Software-Architektur an, wobei der Schwerpunkt auf die Beschreibung der zeitlichen Abfolge und Interaktionen eigenständiger Softwarekomponenten sowie der implementierten Softwaremodule gelegt wird. Weiterhin werden die in der Vorbereitungsphase der Mission durchgeführten ONS-relevanten Softwareverifikationen sowie die hardwarenahen Tests vorgestellt. Auf der Grundlage einer zweimonatigen BIRD Betriebserfahrung werden schließlich das Verhalten und die Ergebnisse des ONS untersucht. Dabei zeigt sich nicht nur ein stabiler und verlässlicher Betrieb des ONS sondern auch eine ausgezeichnete Genauigkeit, mit der eine bordseitige Kenntnis der BIRD-Position in Echtzeit von wenigen Metern erreicht wird.



## Table of Contents

<b>1</b>	<b>The BIRD Satellite Mission.....</b>	<b>1</b>
1.1	Mission Introduction and Early Operations .....	1
1.2	DLR Partners and Mission Objectives .....	2
1.3	Spacecraft Description .....	2
1.4	Payload Instruments .....	5
1.5	Attitude Control System .....	6
1.6	GPS Receiver .....	7
1.7	Satellite Board Computer.....	8
1.8	ONS Objectives and Constraints.....	9
<b>2</b>	<b>Mathematical Description .....</b>	<b>13</b>
2.1	Reference Systems .....	14
2.1.1	International Celestial Reference Frame (ICRF) and EME2000 .....	14
2.1.2	Mean Equator and Equinox of Date (Mean of Date, MOD) .....	15
2.1.3	True Equator and Equinox of Date (True of Date, TOD).....	15
2.1.4	Pseudo Earth Fixed (PEF).....	16
2.1.5	World Geodetic System 1984 (WGS84).....	16
2.1.6	True Equator and Mean Equinox of Date (TEMED).....	16
2.1.7	True Equator and Pseudo Mean Equinox of Date (TEPMED).....	17
2.2	Quaternion Algebra.....	17
2.2.1	Basic Quaternion Algebra.....	17
2.2.2	Vector Transformations Using Quaternions.....	18
2.2.3	Elementary and Compound Rotations .....	19
2.3	Onboard Navigation System .....	20
2.3.1	Employed Reference System.....	20
2.3.2	Numerical Integration .....	20
2.3.3	Force Model.....	23
2.3.4	Estimation Algorithm .....	25
2.4	Real-Time Twoline Generation .....	26
2.4.1	SGP4 Propagation Model .....	26
2.4.2	Osculating to Mean State Vector Conversion.....	27
2.4.3	Kalman Filtering of the Mean Epoch State Using GPS Measurements.....	28
2.4.4	Generation of Orbit Related Information .....	30
2.5	Attitude Control System Conventions .....	31
2.5.1	Employed Reference System.....	31
2.5.2	BIRD Attitude Transformations .....	31

<b>3</b>	<b>Architectural Design</b> .....	<b>33</b>
3.1	ONS Building Blocks.....	33
3.2	RTG Building Blocks .....	34
3.3	Threads and Timeline .....	37
3.4	Module Descriptions .....	42
3.5	ACS Interface.....	47
3.6	Telecommand Interface.....	48
3.7	Telemetry Interface .....	48
3.8	Software Upload.....	50
<b>4</b>	<b>System Testing and Hardware-in-the-Loop Simulations</b> .....	<b>51</b>
4.1	Software Testing.....	52
4.1.1	Test of Keplerian Orbit Routines .....	52
4.1.2	Test of Reference System Routines.....	52
4.1.3	Test of Numerical Trajectory Integration.....	53
4.1.4	Test of the SGP4 Propagator and Twoline Generation.....	54
4.2	Hardware-in-the-Loop Simulations .....	54
4.2.1	Test Configuration .....	54
4.2.2	GPS Receiver Configuration .....	55
4.2.3	GPS Signal Simulator .....	57
4.2.4	BIRD Attitude .....	58
4.2.5	GEM-S Receiver Performance.....	58
4.2.6	Orbit Determination Results.....	60
4.2.7	Clock Synchronization Results.....	62
4.2.8	Results from the Generation of Twoline Elements .....	62
<b>5</b>	<b>ONS Flight Performance</b> .....	<b>67</b>
5.1	GPS Receiver Tracking.....	67
5.2	ONS Orbit Determination .....	71
5.3	Time Synchronization .....	75
5.4	Realtime Twoline Generation .....	77
<b>6</b>	<b>Conclusions</b> .....	<b>85</b>