CASPER

Combined analysis of space weather effects on near-Earth satellites.

Programm / Ausschreibung	Weltraum, Weltraum, ASAP Ausschreibung 2022	**Status**	abgeschlossen
Projektstart	01.07.2023	**Projektende**	30.06.2025
Zeitraum	2023 - 2025	**Projektlaufzeit**	24 Monate
Keywords	Space Weather, Forecast, Satellite, Ionosphere, Thermosphere		

Projektbeschreibung

Mit dem rasanten technologischen Fortschritt der letzten Jahrzehnte sind die Auswirkungen des Weltraumwetters unmittelbar im Alltag der Menschen wahrnehmbar. In Phasen hoher Sonnenaktivität steigt die Zahl der Sonneneruptionen wie Flares und koronale Massenauswürfe (CMEs). Diese solaren Phänomene können geomagnetische Stürme auslösen, die Satelliten im Weltraum als auch die technische Infrastruktur auf der Erde stören und beschädigen können. Im Februar 2022 lösten zwei nacheinander auftretende CMEs einen geomagnetischen Sturm aus, der zum Verlust von 40 Starlink-Satelliten führte. Eine aktuelle ESA-Studie schätzt die potenziellen sozioökonomischen Auswirkungen eines einzigen extremen Ereignisses in Europa auf etwa 15€ Mrd. Im Hinblick auf den aktuellen Sonnenzyklus, ist es zwingend erforderlich, extreme Weltraumwetterbedingungen zu überwachen und bestenfalls genau vorherzusagen. Im FFG-Vorgängerprojekt SWEETS haben die Antragsteller das Tool SODA entwickelt, um den zu Höhenverlust von Satelliten, ausgelöst durch CMEs, vorherzusagen. Die Ergebnisse waren sehr ermutigend weshalb der Dienst Anfang 2023 Teil des ESA-SSA Programmes wird. Um die erlangte Anerkennung innerhalb der Gemeinschaft zu bestätigen, ist es unerlässlich, den bestehenden Dienst weiterzuentwickeln und zu verbessern sowie weiteres Wissen in diesem Forschungsbereich zu erwerben. Im Projekt CASPER wird das ESA-Service SODA basierend auf einer interdisziplinären Untersuchung von interplanetaren Messungen sowie Beobachtungen der Thermosphäre-Ionosphäre verbessert. Im Hinblick auf Thermosphärendichte werden bestehende Lösungen durch eine ausgefeilte Modellierung der thermischen Rückstrahlung von Satelliten und durch Integration komplexer Selbstabschattungsroutinen verbessert. Zudem soll SODA um Vorhersagen für unterschiedliche Höhenschichten (400 km, 450 km und 500 km) erweitert werden. Weiters können Sonneneruptionen den Ionisierungsgrad der Atmosphäre verändern. Diese Ereignisse sind besonders kritisch für GNSS-Navigationssignale. Daher soll in CASPER eine kombinierte Analyse der Ionosphäre-Thermosphäre durchgeführt werden. Für die Untersuchung der Ionosphäre ist die Anwendung des selbst entwickelten GNSS “Raw Observation Approach“ vorgesehen. Dieser Ansatz hat seine Vorteile eindrucksvoll in der jüngsten IGS-Kampagne repro3 unter Beweis gestellt und seine Anwendung als Analysemethode in diesem Forschungsbereich stellt ein Novum dar. Die jüngsten Ereignisse im Februar 2022 haben gezeigt, dass die Struktur eines CMEs entscheidend für die Schwere der Auswirkungen sein kann. Daher liegt der Fokus bei der Untersuchung auf (1) den Wechselwirkungen zwischen sequenziell auftretenden CMEs und (2) der Analyse von CME-Substrukturen, die je nach Auftreten ein ungleiches Verhalten bei der Ausbreitung im interplanetaren Raum haben und dadurch die Auswirkungen auf die Erde beeinflussen können. In diesem Sinne soll das Projekt CASPER einen wesentlichen Beitrag zu mehr Sicherheit im

Weltraum leisten.

Abstract

Accompanying with the rapid technological progress in the last decades space weather effects can directly be perceptible in people's everyday life. During high solar activity phases, the number of solar eruptions like flares and coronal mass ejections (CMEs) increases. These solar phenomena have the capability to trigger geomagnetic storms, which may disrupt and damage satellites in space as well as technical infrastructure on Earth. In February 2022 two sequentially occurring CMEs triggered a geomagnetic storm that resulted in the loss of 40 Starlink. A recent ESA study estimated that the potential socio-economic impact in Europe today from a single extreme space weather event could be about €15 billion. With a view to the rising solar cycle it is mandatory to monitor and at best accurately forecast extreme space weather conditions. In the predecessor FFG project SWEETS the applicants have developed the forecasting tool SODA, to predict the expected satellite orbit decay triggered by CMEs. The results were very encouraging, which is why the service SODA will become part of ESA's Space Safety Program (ESA-SSA) in the next portal release in 2023. Nevertheless, to confirm the achieved recognition within the scientific community it is essential to further develop and improve the existing service as well as acquire further knowledge in this research topic.
In the project CASPER, we aim to further develop SODA based on an interdisciplinary exploration of interplanetary observations and measurements of the ionosphere-thermosphere. In terms of thermosphere density modelling, it is envisaged to improve the existing solutions by means of a sophisticated modelling of the spacecraft re-radiation and the integration of satellite self-shading routines. In addition, SODA will be extended to predict the impact of CMEs for different altitude layers. Moreover, solar eruptions have the capability to change the amount of ionization of the atmosphere due to high energy particles from the Sun. Since, these incidences are especially critical for GNSS navigation signals, it is the aim to carry out a combined analysis of the ionosphere-thermosphere. For the examination of the ionosphere, we apply the in-house developed GNSS "Raw Observation Approach". This approach has impressively demonstrated its advantages in the latest IGS repro3 campaign and its application in this field of research represents a novelty. Regarding the examination of CMEs, the most recent events in February 2022 have shown that the structure of a CME can be decisive for the severity of the impact. Thus, the focus during the examination is on (1) the interactions between sequentially occurring CMEs and (2) the analysis of CME substructures which have a different behavior in propagation through interplanetary space and impact on the Earth's near environment. With that in mind, the project CASPER is intended to make a significant contribution to more safety and security in space in the future.

Endberichtkurzfassung

The CASPER project was proposed to better protect critical satellite infrastructure from the growing threat of space weather by enhancing the forecasting capabilities of the SODA (Satellite Orbit DecAy) service during the rising solar cycle 25. Furthermore, we aimed to develop a new capability to analyze the ionosphere based on the in-house raw observation approach and to perform a unified analysis of the coupled ionosphere-thermosphere system. The project successfully achieved these goals. As proposed, the thermospheric density models, which are critical for calculating atmospheric drag, were significantly improved. By implementing more complex satellite macro-models, sophisticated thermal re-radiation modeling, and a dynamic molar mass model to account for atmospheric composition changes, the accuracy of the resulting density estimates was improved. A key discovery was that a storm's integrated intensity and duration (the integrated area of the negative B z deflection) might be a more robust predictor of orbit decay than its peak strength alone in the future. In parallel, the project successfully implemented a novel processing chain to analyze the ionosphere using raw GNSS data via

the in-house GROOPS software. A key innovation was the generation of multi-altitude VTEC maps (at 400, 450, and 500 km), which provided a layered view of the ionosphere's structure crucial for the unified analysis with the thermosphere. Additionally, the project delivered an upgrade to the SODA forecasting tool, which became part of the ESA Space Safety Programme during the project. This new version features a more user-friendly interface and a newly developed NOAA G-scale (G1-G5) storm severity forecast. Finally, the analysis of more than 100 coronal mass ejection events confirmed a reliable ~20-hour forecast lead time, which also shows a clear dependence on satellite altitude. The ultimate validation of the project's approach came from the analysis of the May 2024 superstorm, where the team observed a sharp increase in thermospheric density occurring in lockstep with a significant drop in ionospheric VTEC, providing powerful evidence of the tightly coupled nature of the upper atmosphere.

Projektkoordinator

- Technische Universität Graz

Projektpartner

- Universität Graz