Deutsches Zentrum DLR für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft

Laserbasierte Erfassung von Weltraumschrott

Laser-based space debris monitoring

Künstlerische Darstellung der Verteilung von Weltraumschrott

> Artists view of the distribution of space debris



(source: ESA)

Höhenverteilung der Debris-Objekte, berechnet mit Hilfe des ESA-Modells MASTER

Height distribution of debris objects calculated from the ESA MASTER model



Die uneingeschränkte Nutzung des Weltraums für wissenschaftliche, sicherheitstechnische und informationstechnische Anwendungen ist eine wesentliche Entwicklungsvoraussetzung für fortschrittliche Nationen. Jedoch hat die stetige Zunahme der Anzahl an Weltraummissionen zu einer Anhäufung von Weltraumschrott (Space Debris) geführt. Dieser stammt aus verschiedenen Quellen; zu nennen sind dabei etwa Explosionen von Raketenoberstufen aufgrund der Treibstoff-Ausdehnung während des Verdampfens, Oberflächendegradationen aufgrund der harschen Umweltbedingungen im Weltraum sowie Kollisionen von Satelliten (Iridium 33 vs. Kosmos-2251 am 10. Februar 2009). Laut dem ESA Modell **MASTER** (Meteoroid and Space **Debris Terrestrial Environment Refe** rence) befinden sich über 600.000 Objekte mit einer Größe von mehr als 1 cm in Erdumlaufbahnen, wobei davon ca. 23.000 permanent observiert werden. Hiervon werden nur 15.000 Objekte in einer Datenbank geführt.

Die Abbildung links oben gibt einen Eindruck der Debris-Verteilung um die Erde, wobei die Objekte zur Illustration vergrößert dargestellt sind. Im low earth orbit (LEO) und im geostationären Orbit (GEO) ist eine Anhäufung von Debris-Objekten erkennbar, was eine erhöhte Gefährdung der sich dort befindlichen Infrastruktur – etwa Kommunikationssatelliten im LEO – mit sich bringt. Die räumliche Dichte der Debris-Objekte als Funktion der Höhe zeigt ausgeprägte Maxima bei 900 km und 1400 km (Abbildung links unten). Übersteigt die Population einen kritischen Schwellwert, The unconfined use of outer space for applications in the domain of science, safety, and information is mandatory for a further development of progressive nations. However, the increasing number of space missions has lead to an increased population of so called space debris. The space debris stems from several sources; to mention are for instance explosions of rocket upper stages due to propellant expansion during vaporisation, surface degradation due to the harsh environmental conditions in outer space, and collisions of satellites (Iridium 33 vs. Kosmos-2251 at February 10th, 2009). According to ESA's MASTER model (Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference), there are at present about 600,000 objects with a size exceeding 1 cm in earth orbit, whereas 23,000 are being monitored permanently, and 15,000 are available in data bases.

The figure on the upper left side provides an artitsts rendition of the space debris distribution around earth, wherein the object sizes are exaggerated for illustrative reasons. In the low earth orbit (LEO) and the geostationary orbit (GEO), an aggregation of debris objects can be observed, which exposes local infrastructure, for instance communication satellites in the LEO, to raised endangerment. The spatial density of debris objects as a function of height shows expressed maxima at 900 km and 1400 km, respectively (c.f. lower left figure). If the debris population exceeds a critical threshold, a cascading effect of collisions is threatening which adds an additional source of space debris to the above mentioned sources.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Technische Physik Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart Dr. Uwe Völker Fon: +49 711 6862 -691 Fax: +49 711 6862 -788 uwe.voelker@dlr.de www.DLR.de/tp Einschlag einer Aluminiumkugel der cm-Klasse mit einer typischen LEO - Geschwindigkeit auf einen Aluminiumblock

Simulated laboratory Impact of a cm - class aluminum sphere with typical LEO-speed on an aluminum block



(source: ESA)

Einschlag eines realen Debris-Objekts auf dem Solar-Panel eines Satelliten.

Impact of a real debris object on a satellite solar panel



(source: ESA)

droht ein Kaskadeneffekt einzusetzen, bei dem sich die Debris-Objekte durch Kollisionen untereinander weitervermehren (*Kesslersyndrom*).

Debris-Objekte bewegen sich im Bereich des LEO mit Geschwindigkeiten von etwa 7 km/s und weisen somit auch schon in der cm-Größenklasse kinetische Energien auf, welche die sichere Durchführung von unbemannten und bemannten Missionen gefährden. Die Folge des Einschlags einer Aluminiumkugel in der genannten Geschwindigkeits- und Größenklasse auf einen Aluminiumblock ist exemplarisch in der linken Abbildung dargestellt. Diese experimentell demonstrierte Zerstörungskraft von Space Debris lässt sich durch eine Analyse der Oberflächenkrater von Satelliten nach Wiedereintritt in die Erdatmosphäre belegen, wie in der unteren Abbildung dargestellt ist. Durch die potentiell destruktive Wirkung der Debris-Objekte werden Raumfahrzeuge immer wieder zu Ausweichmanövern gezwungen, was deren Lebensdauer aufgrund des dabei anfallenden Treibstoffverbrauchs verkürzt.

Betrachtet man die weltweite Situation beim Debris Monitoring, stellt man fest, dass lediglich die USA über ein umfassendes Weltraumüberwachungssystem verfügen. Dieses ist im Wesentlichen auf Radarobservationen gestützt, die zum US Space Surveillance Network (US-SSN) zusammengeschlossen sind. Dazu zählen die Anlagen des sogenannten Space Fence, weitere unterstützende Radarstationen hauptsächlich in Nordamerika oder auch optische Observatorien auf Hawaii. Um auf dem Gebiet der Überwachung von Weltraumschrott zum Schutz der eigenen Infrastruktur den Anschluss zu schaffen, werden derzeit im europäischen Raum die Bemühungen im Bereich des Space Situational Awareness (SSA, Weltraumlage) intensiviert. Als bestehende Anlagen in Europa sind die Radaranlagen TIRA, betrieben vom Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FhG-FHR) und EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association) zu nennen. Zur passivoptischen Detektion steht das Space Debris Telescope, betrieben von der ESA zur Verfügung (Teide-Observatorium, Teneriffa).

In this scenario, the number of objects proliferates through inter-debris collisions, which creates even more debris and thus an enhanced collision risk. This phenomenon is referred to as *Kessler syndrome*.

Space debris objects hold velocities in the order of approximately 7 km/s and thus possess even in the cm-class kinetic energies which endanger the secure execution of both unmanned and manned space missions. The effect of an aluminium sphere's impact with the mentioned velocity and size range on an aluminium block is shown in the upper left figure. This experimentally demonstrated destructiveness of space debris can be verified by an analysis of craters on satellites after re-entry into the earth's atmosphere, as is depicted in the lower left figure. Due to the potentially destructive effect of space debris space vehicles are continuously forced to perform obstacle avoidance manoeuvres. Such manoeuvres will reduce the lifetime of each mission due to the consumption of fuel. Thus, a detailed knowledge of orbital parameters of the space debris objects is very valuable, both in terms of avoiding collisions and in order to prevent unnecessary evasions.

Observing the worldwide situation in the field of space debris monitoring, one finds that only the USA is operating an extensive space situational awareness system. This is primarily based on radar observations, which are constituted to the US space surveillance network (US-SSN). The US-SSN is consisting of the instruments of the so called space fence, additional contributing radar stations mainly in North America, and optical observatories in Hawaii. In order to gain speed in the area of the surveillance of space debris to protect own infrastructure, the efforts regarding space situational awareness (SSA) are intensified in Europe. Existing Radar facilities in Europe are the TIRA, operated by the Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik, FhG-FHR, and EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association). Passive optical monitoring can be done with the optical Space Debris Telescope (ESA) at the Teide observatory on Teneriffe.

Die Thematik des "Debris Monitoring" wird in Zukunft am Institut für Technische Physik (DLR-TP) mit laserbasierten Observationsmethoden aufgegriffen. Diese versprechen eine Steigerung sowohl der Detektionsgenauigkeit als auch der Detektionseffektivität. Beide Punkte sind von großer Bedeutung, weil die Debris-Objekte – insbesondere im LEO – durch Reibung an der Atmosphäre abgebremst werden und somit ihre Bahnparameter laufend ändern. Dies macht sogenannte follow-up Messungen nötig, welche insbesondere von einer gesteigerten Effektivität profitieren.

Gestützt auf der Expertise des DLR-TP sowohl im Bereich der Hochenergielaserentwicklung als auch im Bereich des Pointing, Tracking und der adaptiven Optik ist geplant, die Positionen der Debris-Objekte aus den Winkelkoordinaten und aus Abstandsinformationen zu bestimmen. Die Winkelkoordinaten lassen sich durch die Stellung des Beobachtungsteleskops bestimmen. Der Abstand des Weltraumschrotts soll mit der Methode des Laser Ranging, also der Laufzeitmessung von am Debris-Objekt reflektierten Laserpulsen bestimmt werden. Dieses Verfahren ist schematisch in der Abbildung rechts oben skizziert. Dabei werden Laserpulse mit ausreichender Pulsenergie ausgesandt, so dass eine adäguate Anzahl von Photonen detektiert werden kann. Durch eine präzise Laufzeitmessung der Pulse ist somit eine Messung der Entfernung möglich.

Beim Betrieb eines laserbasierten SSA-Systems sind unterschiedliche Betriebsmodi denkbar. Zum einen lässt sich unbekannter Weltraumschrott finden, indem zunächst an diesen Objekten reflektiertes Sonnenlicht detektiert wird. Bewegt man das Beobachtungsteleskop auf einer derartigen Trajektorie, sodass Sterne als Punkte erscheinen, dann hinterlässt Space Debris eine Leuchtspur auf dem Kamerasensor (vgl. Abbildung rechts unten).

Diese Spur beinhaltet Informationen, welche genutzt werden, um den Pulslaser für das oben beschriebene Laser Ranging auf die entdeckten Objekte zu richten und neben den Winkelkoordinaten die notwendigen Abstandsinformation zu gewinnen. The subject of "debris monitoring" will be picked up at the Institute of Technical Physics (DLR-TP) using laser based observation methods in the future. These methods promise an enhancement of the detection accuracy as well as detection efficiency. Both points are of great importance, since the debris-objects – especially in the LEO – are slowed down by atmospheric friction. Thus, their orbital parameters change continuously, which necessitates so called follow-up measurements, which in particular benefit from an increased effectiveness of debris observations.

Based on the expertise of the DLR-TP in both areas of high-energy laser development and pointing, tracking, and adaptive optics, it is planned to determine the debris position from the angular coordinate and from distance information. The angular coordinates can be identified from the attitude of the observation telescope. The distance of the space debris ought to be quantified using the method of laser ranging, i.e. the time of flight measurement of reflected laser pulses from the debris sample. This technique is depicted schematically in the upper right figure. Here, laser pulses of adequate photon numbers are emitted towards the debris object in order to receive an amount of photons sufficiently large to be detected. By monitoring the time of flight of the photons carefully the ranging of the debris object of interest is possible by such "time of flight" method.

For a laser based SSA system, different operational modes are possible. First of all, unknown space debris could be discovered by detecting solar radiation reflected from the debris itself. By moving the detection telescope on a trajectory which makes stars appear as dots, space debris objects leave a trace on the camera sensor, as shown in the lower right figure.

This trace contains information, which can be used to point the pulse laser for the above described laser ranging technique onto the discovered objects. Besides the angular coordinates, the range of the debris can thus be gained by using the obove described "time of flight" technique. Schematische Darstellung des Laser Ranging von Weltraumschrott

Schematic of laser ranging of space debris



Identifizierung von Debris Objekten: Das Empfangsteleskop wird auf die Sterne nachgeführt und das Debris-Objekt erscheint als Leuchtspur

Identification of debris objects: the angular motion of stars is compensated by rotating the receiver telescope and debris objects will appear as a tracer



Blockdiagramm eines laserbasierten Space Debris Monitoring Systems

Flowchart of a laser based space debris monitoring system



Dieser Modus hat zur Folge, dass ein laserbasiertes SSA-System in kürzester Zeit auf große Drehgeschwindigkeiten beschleunigt werden muss (Größenordnung: 10 °/s²), nachdem in effizienten Detektionsalgorithmen die nötigen Winkelkoordinaten ermittelt wurden. Der prinzipielle Ablauf eines solchen Konzepts ist im Blockdiagramm links dargestellt. In einem zweiten Betriebsmodus ist denkbar, die Informationen zu bereits in Datenbanken erfassten Objekten zu vervollständigen, indem die zu erwartenden Koordinaten im Vorlauf angefahren werden. Beide hier vorgestellten Modi stellen einen wichtigen Beitrag zu einem effektiven und genauen Observationssystem dar

Aufgrund der großen Entfernung, der hohen Geschwindigkeit sowie des geringen Rückstreuquerschnittes der Weltraumschrott-Objekte ergeben sich sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit und Drehgeschwindigkeit des Teleskops sowie an die Empfindlichkeit der Detektoren. Im Institut werden die einzelnen Komponenten eines solchen Systems anhand von Experimenten ausgelegt, um einen Demonstrator für das laserbasierte Debris Monitoring zu entwickeln. Die bekannten Abhängigkeiten der zu erwartenden detektierbaren Photonenzahl lassen sich dabei über die Untersuchung skalierter Modellobiekte sowie der Verwendung optischer Filter nachbilden. Durch Experimente zum Tracking von Debris-Proben, welche mit zu LEO-Objekten äquivalenten Winkelgeschwindigkeiten bewegt werden, lassen sich Systemparameter des Demonstrators bestimmen. Dieser ist an einem geeigneten Standort zu betreiben, an dem die Lasersicherheit für Flugverkehr und für aktive Satelliten gewährleistet ist. Dafür kommen astronomische Observatorien in Betracht.

This operational mode causes the necessity of accelerating the laser based SSA system in shortest time to large slew rates (order of magnitude: 10 °/s²), shortly after efficient detection algorithms calculated the angular coordinates for debris tracking. The course of events of such concept for a laser based SSA system is shown in the flowchart on the left hand side. For a second operational mode, information on already registered debris objects could be supplemented by approaching the coordinates which have to be expected due to database entries prior to the ranging procedure. Both operational modes introduced here offer important contributions to an effective and accurate system for space debris observation.

Due to the large distance, the high velocities, and the low backscatter cross section of the space debris objects, high specifications are imposed on the accuracy and slew rate of the telescope as well as on the sensitivity of the detectors. Each of the components of such system will be rated by experiments, in order to develop a demonstrator for laser based space debris monitoring. The known dependencies of the amount of detectable photons to be expected can be mimicked by means of investigating scaled model objects and using optical filters. Conducting experiments on tracking of debris samples, which are moved with angular velocities equivalent to LEO objects, system parameters for laser based debris monitoring can be deduced. Such operational system must be operated at an appropriate location, where laser safety is guaranteed for air traffic and for passing active satellites. For this purpose, astronomical observatories come into consideration.



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Technische Physik Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart Telefon: +49 (0)711 6862-773 Telefax: +49 (0)711 6862-788

www.DLR.de/tp