



Atmosphärisches Echtzeit Laser Tracking

Atmospheric Real-Time Laser Tracking

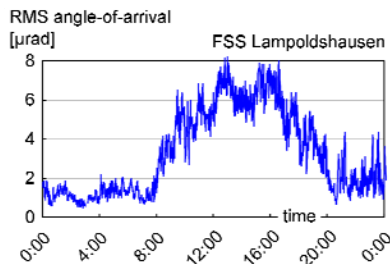
Blick von der Sendestation über die Laser Freistrahlstrecke des DLR. Im Vordergrund befindet sich das Empfangsteleskop mit integriertem Laser Tracking System und aufgesatteltem Beleuchtungslaser

View from the main station across the DLR free space propagation laser test range. In the front, the receiver telescope with laser beam tracking system and attached laser illuminator is displayed



Typischer Tagesverlauf der Strahlrichtungsschwankungen auf der Freistrahlstrecke, abgeleitet aus der Vermessung der Strukturkonstanten der Turbulenz (C_n^2)

Typical diurnal dependence of the angle-of-arrival statistics on the laser test range, derived from measured turbulence refraction structure parameter (C_n^2) data



Zur Erfassung von schnell fliegenden Objekten über große Entfernungen sind Trackingsysteme erforderlich, welche eine ständige Ausrichtung von Sende- und Empfangseinrichtungen gewährleisten. Die Genauigkeit dieser Systeme wird durch atmosphärische Turbulenz eingeschränkt. Die Aufgabe ist die Entwicklung von hochgenauen Trackingsystemen mit Genauigkeiten im sub μ rad Bereich.

Die ständige Nachführung von Sende- und Empfangseinrichtungen auf mehrere Kilometer entfernte Objekte ist für eine Vielzahl von optischen Anwendungen wie z.B. Datenkommunikation, sicherheitsrelevante Aufklärung und Zielpunkt-erkennung unerlässlich. Unvermeidliche Luftturbulenzen der Atmosphäre führen jedoch u. a. zu einer Destabilisierung der Schwerpunktslage eines Laserstrahls und infolgedessen zu einer reduzierten Leistungsdichte auf dem Zielobjekt. Die typischen Zeitkonstanten für Änderungen der atmosphärischen Turbulenzzellen liegen im Bereich von 10 ms bis 100 ms. In Abhängigkeit von den vorliegenden meteorologischen Bedingungen treten dabei Ablenkwinkel von etlichen Mikroradian auf. Die am Institut für Technische Physik entwickelten Laser Tracking Systeme eröffnen die Möglichkeit, die Strahl- bzw. Strahlrichtungsstabilität von Laserstrahlen unter atmosphärischer Propagation deutlich zu verbessern.

Ein Laser Tracking System muss mit einer hohen Regelbandbreite im kHz-Bereich operieren. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die Echtzeitfähigkeit. Die Systeme basieren auf kommerziell erhältlichen Kippspiegeln mit piezoelektrischen Aktuatoren. Als Positionssensoren kommen Quadrantendioden mit selbstentwickelter Messverstärkerelektronik zum Einsatz.

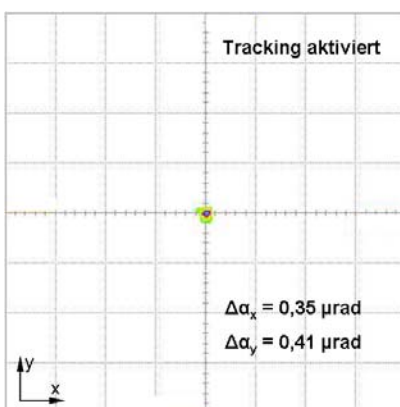
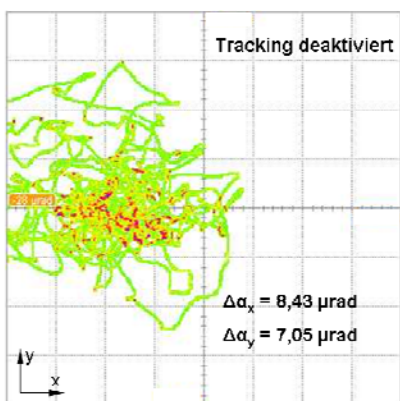
The acquisition of agile rapidly moving objects over long distances requires tracking systems which allow for a continuous alignment of transmitter and receiver units. The accuracy of these tracking systems is limited by the effect of atmospheric turbulences. The objective is the development of high-precision tracking systems with an accuracy in the sub- μ rad range.

A continuous alignment of transmitter and receiver units onto remote objects at a distance of several kilometres is important for applications like data communication, or security related acquisition and aim point detection of targets. The accuracy of these tracking systems is usually hampered by mechanical vibrations and atmospheric turbulence, which leads to a destabilization of the centroid of the laser beam and to a reduced power density on the target. Typical involved time constants of the variation of these turbulence cells are in the range of 10 ms – 100 ms. Dependent on the local meteorological conditions, laser beam deflection angles of a few micro radians will result. The high-precision tracking systems developed at the Institute of Technical Physics will allow for the control and improvement of the positional and pointing stability of laser beams under atmospheric propagation.

A laser tracking system has to be operated with a large control loop bandwidth up to the kHz range. Another important feature is real-time capability. The systems are based on commercially available tip/tilt mirrors driven by piezoelectric actuators. Position sensing is performed with quadrant diodes driven by in house developed amplifier circuitry.

Richtungsschwankungen des Laserstrahl-schwerpunktes auf beleuchtetem Objekt aufgrund atmosphärischer Turbulenzen über 130 m Entfernung mit deaktivierter Regelung (oben) bzw. aktivierter Regelung (unten)

Angle-of-arrival fluctuations of the laser beam centroid on an illuminated target due to atmospheric turbulence observed over a range of 130 m with control-loop deactivated (picture above), and control-loop activated (picture below)



Beide werden von einem Echtzeit FPGA System ausgelesen bzw. angesteuert. Mittels schneller digitaler Signalverarbeitung und piezomechanischer Kippspiegel hoher Bandbreite wird eine Regelfrequenz von über 50 kHz ermöglicht.

Eine kompakte Laser Tracking Einheit wurde erfolgreich an ein 10 Zoll Schmidt-Cassegrain Spiegelteleskop angeflanscht, um Trackingexperimente über große Distanzen unter realistischen Randbedingungen durchführen zu können. Zur Überprüfung der Eignung im Feld wurde auf der Laserfreistrahldrecke (FSS) des Institutes für Technische Physik jeweils eine Sende- bzw. Empfangseinheit installiert. Die Sendeeinheit besteht aus einem Spiegelteleskop mit integrierter Fasereinkopplung für einen Richtlaser mit einer Wellenlänge von 532 nm und ca. 100 mW mittlerer Leistung. Beide Teleskope sind mit ihren optischen Achsen aufeinander ausgerichtet, um über die volle Distanz der FSS (130 m Länge) turbulenzbedingte Strahlrichtungsschwankungen zu kompensieren. Es konnte hierbei eine Strahlrichtungsinstabilität von $\Delta\alpha \approx 8 \mu\text{rad}$ (Standardabweichung) auf weniger als $\Delta\alpha < 400 \text{ nrad}$ reduziert werden. Dies entspricht einer Richtungsschwankung von ca. 1 mm auf 2,5 km Abstand.

Die bei den atmosphärischen Nachführexperimenten gewonnenen Daten erlauben die Skalierung der Systemanforderungen auf relevante Entfernungen von mehreren Kilometern. Damit werden die Voraussetzungen für das Verfolgen schnell bewegter Objekte über große Entfernungen geschaffen. Darüber hinaus werden dadurch die Grundlagen gelegt, um Satelliten und Trümmerstücke (sog. „Space Debris“) auf ihren Bahnen im LEO und GEO hochpräzise verfolgen und die entsprechenden Bahndaten bestimmen zu können.

Both are monitored and controlled via a robust realtime control circuit. Using fast digital processing components a control loop frequency of 50 kHz was achieved to address the piezomechanic tip/tilt mirror.

A laser tracking unit has been mounted subsequently onto a 10" Schmidt-Cassegrain reflector for performing tracking experiments over long distances under realistic conditions. At the laser test range of the Institute of Technical Physics, a transmitter and a receiver unit were installed for performing field tests. The transmitter unit was consisting of a reflecting telescope with embedded fiber coupling for a beacon laser operating at a wavelength of 532 nm at a cw power of 100 mW. The optical axes of both telescopes were adjusted to each other for the demonstration of compensation techniques of atmospheric turbulence effects. An instability of $\Delta\alpha \approx 8 \mu\text{rad}$ standard deviation was successfully compensated down to a value of $\Delta\alpha < 400 \text{ nrad}$. This corresponds to an inaccuracy of approximately 1 mm over a distance of 2.5 km.

The data which are gathered in the course of these campaigns will allow for a scaling of final system requirements over relevant distances of several kilometres. This defines the requirements for the tracking of fast moving targets. In addition, the basic knowledge for tracking of satellites and space debris is laid, which will enable the acquisition of orbital data.



DLR

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