

kHz Satellite Laser Ranging – Innovative Applikationen

Georg Kirchner, Franz Koidl, Daniel Kucharski, Graz

Kurzfassung

Die Laserstation Graz – Lustbühel misst seit 1982 Entfernungen zu Satelliten mit kurzen Laserpulsen; seit 2004 als einzige Station weltweit mit 2 kHz. Dies hat nicht nur enorme Vorteile für diese Messungen selbst (z.B. Genauigkeiten im sub-mm-Bereich), sondern ermöglicht auch eine ganze Reihe von innovativen Zusatz-Applikationen. Die routinemäßig gemessenen Entfernungen ermöglichen eine extrem genaue Bestimmung der Spin-Daten von Satelliten; parallel zu diesen Entfernungsmessungen können Seeing-Werte der Atmosphäre erfasst werden; die kHz Laserpulse werden zusätzlich für LIDAR-Zwecke verwendet; eine Übertragung bzw. Vergleich von Zeitskalen im sub-ns-Bereich, sowie eine Übertragung von Daten mit Hilfe der kHz Laserpulse ist im Aufbau.

Schlüsselwörter: Satellite Laser Ranging, SLR, Satellite Spin, Seeing, LIDAR, Zeittransfer

Abstract

Since 1982, the laser station Graz – Lustbuehel measures distances to satellites using short laser pulses; since 2004 as the only station with 2 kHz. This is not only an enormous advantage for these distance measurements (e.g. sub-mm accuracies), but also allows several additional and innovative applications.

The routinely measured distances allow an extremely accurate determination of spin parameters of satellites; in parallel, atmospheric seeing measurements are evaluated and registered; the kHz pulses are additionally used for LIDAR purposes; a transmission of, and comparison between time scales in the sub-ns range, as well as a data transmission concept using kHz laser pulses is in development.

Keywords: Satellite Laser Ranging, SLR, Satellite Spin, Seeing, LIDAR, Time Transfer

1. Einleitung

Die Laserstation Graz misst Entfernungen zu Satelliten mit Hilfe von sehr kurzen (10 ps) und relativ schwachen (400 μ J bei 532 nm Wellenlänge) Laserpulsen, mit einer Pulsrate von 2 kHz; die Laserpulse werden durch Retro-Reflektoren an den Satelliten reflektiert; von den etwa 10^{14} gesendeten Photonen pro Puls werden – je nach Entfernung des Satelliten – EIN Photon pro 1000 Pulse (GPS-Satelliten, GIOVE / GALILEO etc. in Entfernungen von 20.000 km und mehr) bis zu einigen 100 Photonen (bei niedrigen Satelliten wie z.B. GOCE in etwa 250 km) in Graz detektiert, und die Laufzeit gemessen. Die dabei erzielte Genauigkeit beträgt etwa 2-3 mm; damit ist Graz nicht nur seit etwa 5 Jahren die einzige Laserstation mit 2-kHz-Routine-Betrieb, sondern auch eine der genauesten [1] SLR-Stationen der Welt (Abb. 1)

Diese Routine-Messungen werden von zahlreichen Institutionen für vielfältige Anwendungen benötigt und verwendet, z.B.:

- POD: Precise Orbit Determination
- Stationskoordinaten und deren Bewegungen; Plattentektonik
- Terrestrial Reference Frame / Center of Mass / Scale

- Gravitationsfeld-Bestimmung und dessen zeitliche Veränderung
- Polbewegung und Tageslänge
- POD und Kalibrierung für Altimetermissionen (Meere, Eisflächen)
- Massenverteilung auf der Erde und deren Änderungen
- Grundlagenforschung (Tether-Anwendung, Relativitätstheorie, Frame Dragging etc.)
- Spin-Parameter von passiven Satelliten (Periode, Orientierung, Richtung) usw.

Neben diesen Routine-Messungen – die natürlich ebenfalls laufend verbessert werden – gibt es aber zusätzlich eine ganze Reihe von neuartigen Anwendungen, die im folgenden beschrieben werden.

2. Bestimmung von Spin-Parametern von passiven Satelliten

Eine ganze Reihe von Satelliten wurde speziell für SLR-Messungen entwickelt, und in meist kreisförmige Umlaufbahnen in Höhen zwischen 300 km und > 20.000 km gebracht; diese Satelliten sind komplett passive Kugeln, mit Retro-Reflektoren an ihrer Oberfläche; alle diese Satelliten wurden mit einem Initial-Spin versehen (je nach Größe und Masse: Von ca. 40 s / Umdrehung (ETA-

Hitotsubashi Univ. Orbital Analysis

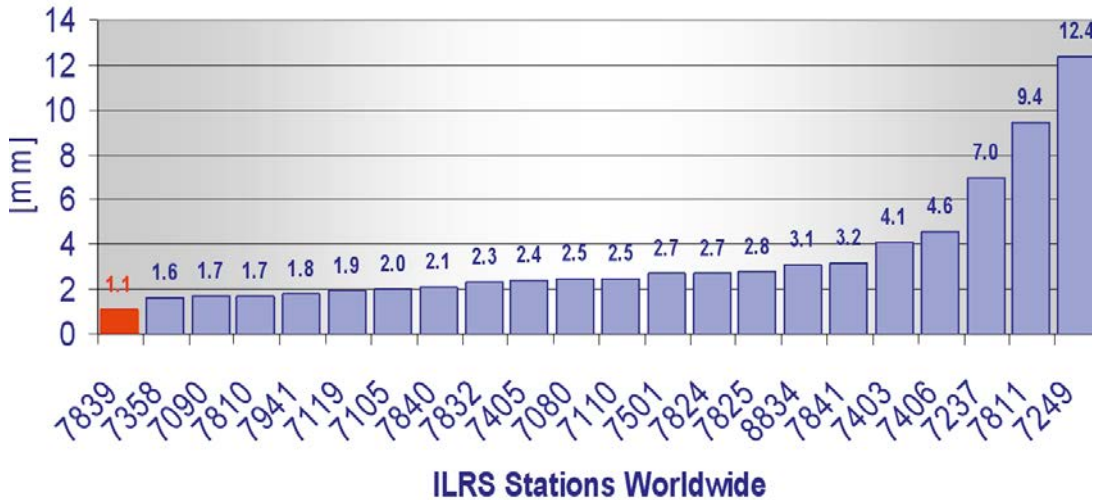


Abb. 1: Genauigkeit der einzelnen SLR-Station (7839: Graz)

LON) bis < 1 s (LAGEOS)), der aber – je nach Konstruktion, Material und Masse – im Laufe der Zeit abnimmt bzw. ganz aufhört. Während diese Rotation bei den kleineren Satelliten wie Starlette (Kugel mit 24 cm Durchmesser, ca. 47 kg) schon nach relativ kurzer Zeit (etwa 1 Jahr) aufhört, kommen größere Satelliten wie LAGEOS-1 (Kugel mit 60 cm Durchmesser, ca. 407 kg) erst nach etwa 30 Jahren zum Stillstand [4a].

2.1 ... am Beispiel des Satelliten AJISAI

Der 1986 von Japan gestartete, rein passive Satellit AJISAI (Abb. 2) wiegt etwa 685 kg ; zwischen den 318 auf seiner Oberfläche montierten Spiegeln sind insgesamt 120 Retroreflektoren für Lasermessungen in 15 Ringen angeordnet. Der ca. 685 kg schwere Satellit umrundet die Erde in knapp 1500 km Höhe [1].

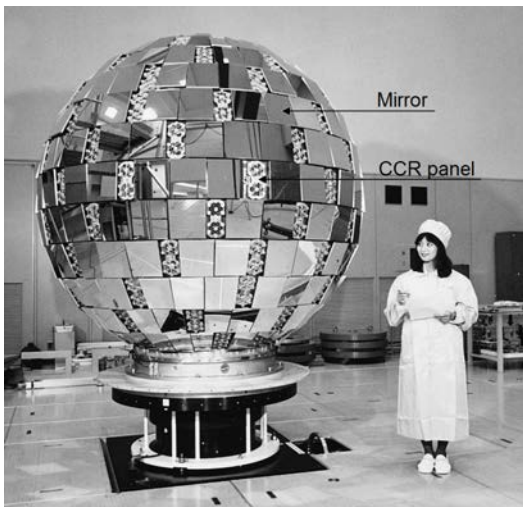


Abb. 2: Satellit AJISAI: Ca. 215 cm Durchmesser; jeweils zwischen mehreren Spiegeln sind die – etwas dunkleren – Retroreflektorpanele erkennbar.

Durch die hohe Laser-Pulsrate von 2 kHz können diese rotierenden Satelliten recht genau „abgetastet“ werden; die Rotation der einzelnen Retro-Reflektoren bildet sich in den Messdaten ab (Abb. 3). Die hier abgebildeten Messdaten sind Residuen (gemessene minus berechnete Entfernung) während eines 2 Sekunden langen Abschnittes eines AJISAI – Passes; darin sind gut die mehr oder weniger regelmäßigen Schwankungen der Entfernung durch die Rotation des Satelliten zu erkennen.

Eine spektrale Analyse dieser Residuen nach Lomb [2] ergibt deshalb auch sehr ausgeprägte Spektren (Abb. 4); die verschiedenen Frequenzen ergeben sich durch die unterschiedliche Anzahl von Retro-Panelen auf dem Umfang des Satelliten, (es gibt Ringe zu je 12 / 9 / 6 / 3 Retros) bzw. auch aus deren Überlagerungen. Mit diesen Daten können nun mehrere Spin-Parameter bestimmt werden: Spin-Periode, Spin-Richtung und auch die Orientierung der Spin-Achse [3,4].

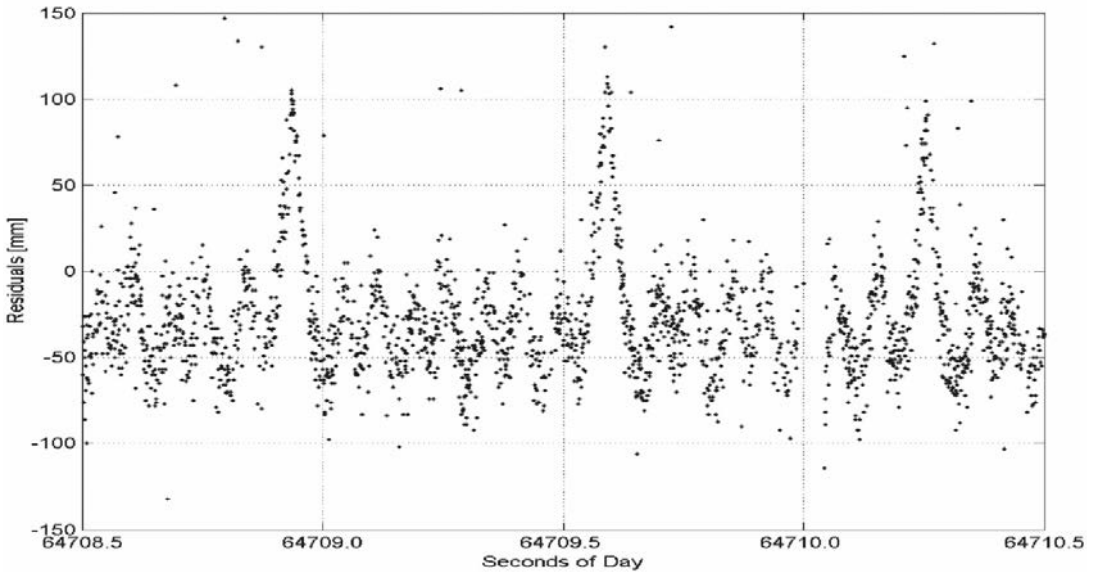


Abb. 3: Satellit AJISAI: Residuen von 2 Sekunden Lasermessungen; deutlich erkennbar: Die regelmäßigen Entfernungsschwankungen durch die Rotation des Satelliten.

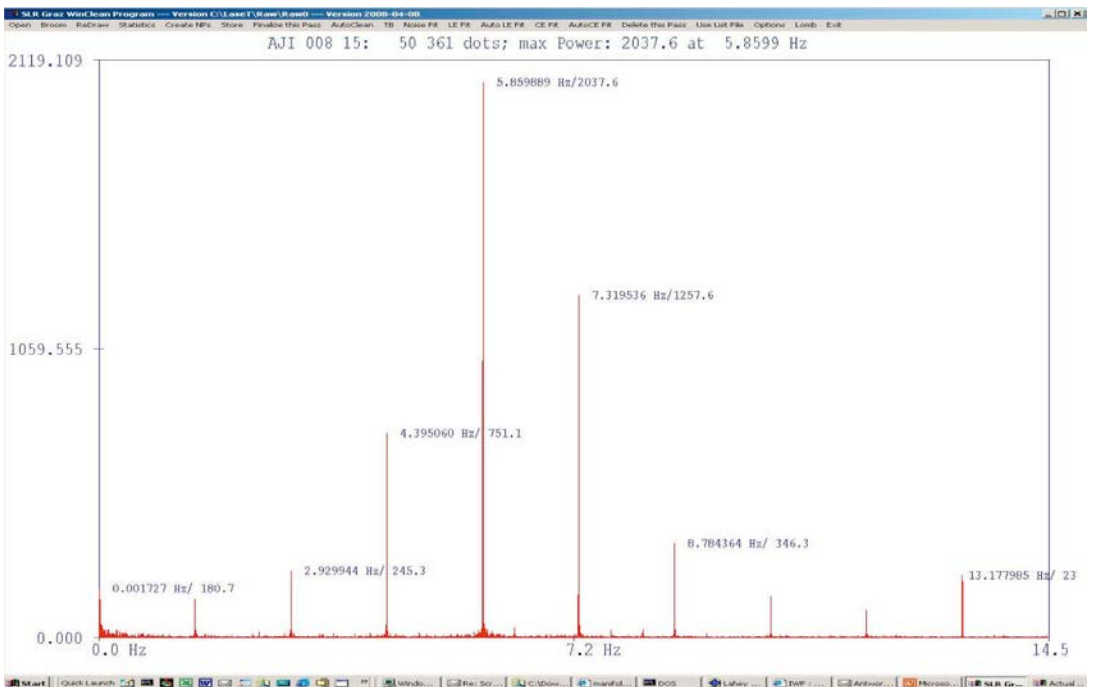


Abb. 4: Spektralanalyse eines AJISAI Passes: Unterschiedliche Anzahl von Retros entlang des Umfanges des rotierenden Satelliten ergeben diverse Frequenzen; auch mit zusätzlichen Überlagerungen.

Eine spektrale Auswertung aller verfügbaren SLR-Daten von AJISAI seit dem Start im Jahre 1986 ergibt eine langsame Zunahme der Spin-Periode [3,4], von ursprünglich 1.48 s auf etwa 2.08 s im Jahre 2009 (Abb. 5); während mit den

Daten von 10-Hz-SLR-Stationen die Spin-Periode immerhin noch mit etwa 0.1% Genauigkeit bestimmt werden kann, erreicht man mit den 2-kHz-Daten von Graz bereits < 0.01% Genauigkeiten.

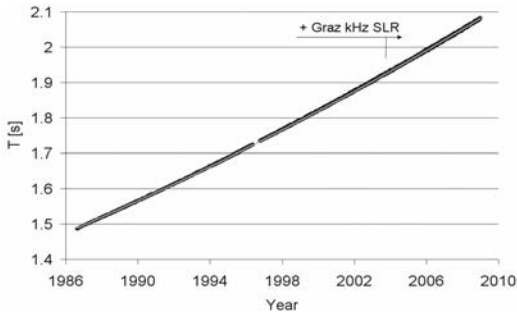


Abb. 5: AJISAI: Zunahme der Spin-Periode im Laufe von 22 Jahren; Schwarz: Werte der einzelnen Passes; Grau: Ausgleichskurve. Die Genauigkeit beträgt etwa 0.1% (10-Hz-Stationen) bzw. <0.01% für Graz kHz Daten.

2.2 ETALON Spin

Die Bestimmung der Spin-Periode der beiden ETALON-Satelliten [1] (ca. 1415 kg, 1.3 m Durchmesser, in knapp 20.000 km Höhe über der Erde, je 2146 Retros; Abb. 6) ist wesentlich schwieriger: Die durchschnittliche Return-Quote liegt – wegen der großen Entfernung – nur noch bei etwa 0.3 % (bei 2 kHz ergibt das aber immer noch etwa 6 Echos pro Sekunde !); durch die große Zahl der Einzel-Retros sind dadurch

aber keine Spektrallinien einzelner Retros mehr erkennbar. Dafür jedoch hinterlassen die relativ stark ausgeprägten „Gaps“ der Retro-Verteilung auf der Oberfläche der Satelliten (Abb. 6) eine – wenn auch schwache – spektrale Spur. Damit ist nicht nur die Spin-Periode sowie deren Zunahme im Laufe der Zeit (Abb. 6, unten) meßbar, sondern auch die Spin-Periode unmittelbar nach dem Start extrapolierbar: Sie betrug nur etwa 50% des berechneten (und ursprünglich angenommenen) Wertes [5].

2.3 Spin-Daten von weiteren Satelliten

Im Prinzip können Spin-Daten von fast allen rotierenden Satelliten mit Hilfe von SLR – Daten bestimmt werden (Tab. 1); in Graz wurde dies bereits bei einer ganzen Reihe von solchen Satelliten durchgeführt [6,7]; da auch weiterhin solche passiven SLR-Satelliten gestartet werden bzw. in Planung sind (BLITS /2009; ANDE/2009, LARES /2010, PERCS / 2014 usw.), werden diese Spin-Parameter-Bestimmungen auch weiterhin in Graz durchgeführt; die Genauigkeit wird in Zukunft durch die nun absehbare Inbetriebnahme von weiteren kHz-SLR-Stationen verbessert werden können.

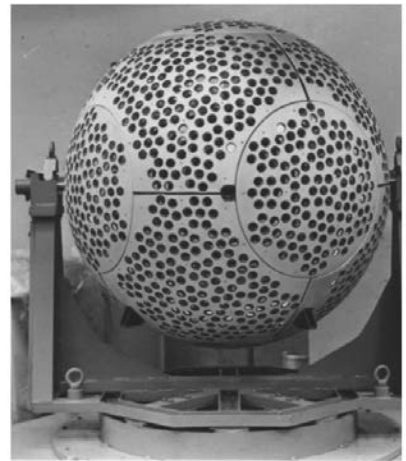
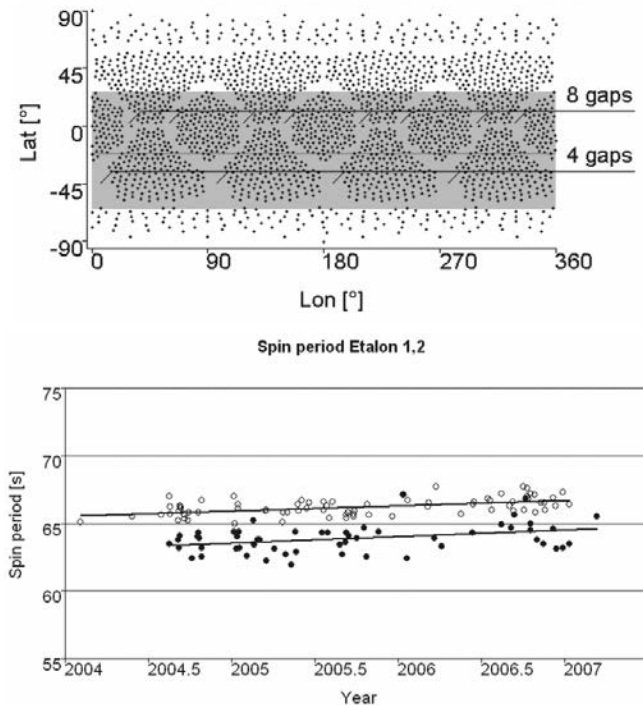


Abb. 6: Satellit ETALON: Die „gaps“ in der Verteilung der Retros hinterlassen eine schwache spektrale Spur in den Echos; daraus kann wiederum die Spin-Periode abgeleitet werden.

Satellit	Spin-Periode [s]	Erreichbare Genauigkeit	Spin-Achse bestimmbar	Spin-Richtung bestimmbar	Anmerkung
AJISAI	2.04	0.01 %	Ja	Ja	Nur mit kHz SLR so genau
LAGEOS-1	6000	3 %	Ja	Teilweise	Kaum mehr Spin (Launch 1976)
LAGEOS-2	600	1 %	Ja	Ja	Spin noch vorhanden (Launch 1992)
GP-B	75.9	1.2 %	Ja	Ja	
ETALON 1	63.0	1.5 %	Nein	Nein	Return Rate < 0.1 %
ETALON-2	65.5	0.8 %	Nein	Nein	Return Rate < 0.1 %

Tab. 1: Beispiele für Spin-Parameter-Bestimmungen mit Hilfe von SLR Daten (Graz + International)

3. Bestimmung von atmosphärischen Seeing-Werten durch kHz SLR

Der Laserstrahl wird durch das Sendeteleskop Richtung Satellit gelenkt. Der auf dem Weg durch die Atmosphäre produzierte Backscatter wird mit einer CCD-Kamera im Empfangsteleskop erfasst; die Bilder dieser CCD-Kamera werden im PC aufgezeichnet. Die Ablenkungen des Laserstrahls durch atmosphärische Turbulenzen - im Bogensekundenbereich - werden an Hand der aufgezeichneten Bilder in Echtzeit im PC vermessen; die Bewegungen der Laserstrahlspitze definieren den Bereich des aktuellen „Astronomical Seeings“ [8]. Die Kalibrierung dieser Messungen erfolgte durch astronomische

Standardmethoden (Hartmann-Shack Wellenfrontsensor).

Eine solche - während einer Routine-SLR-Messung des Satelliten AJISAI - aufgezeichnete astronomische Seeing-Messung zeigt die Elevationsabhängigkeit des Seeing-Wertes (Abb. 7) - und mit den eher schlechten Seeing-Werten auch die relativ ungünstige Lage der SLR-Station Graz-Lustbühel (Stadt Nähe, nur 500 m MSL, asphaltierte Parkplätze, beheizte aber kaum isolierte Arbeitsräume mit entsprechender Wärmeabstrahlung etc.). Zusätzlich verschlechtert die relativ schnelle Bewegung des Teleskops ebenfalls das Seeing.

Day 2006/037: Seeing vs. Elevation

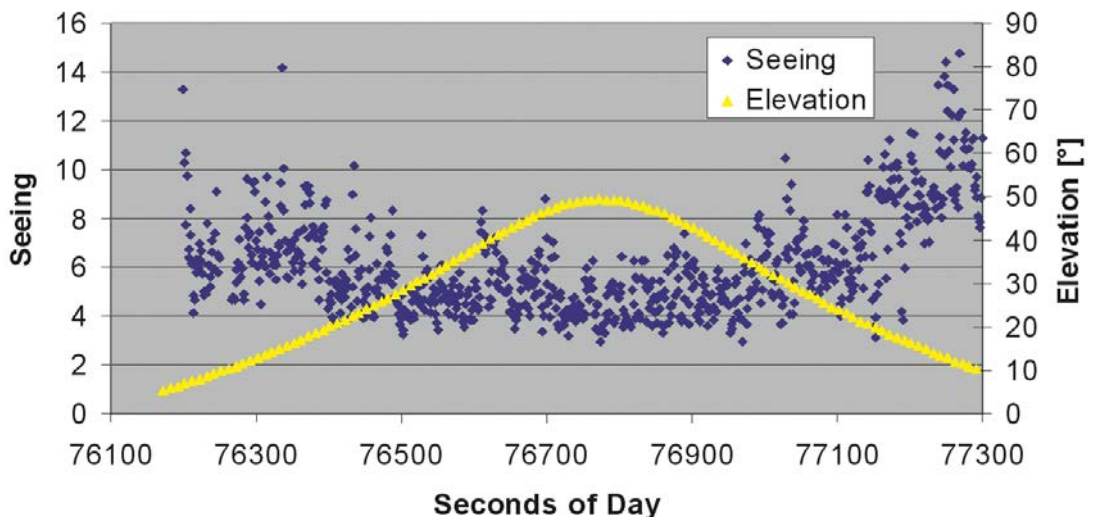


Abb. 7: Das astronomische Seeing, gemessen durch Auswertung des Laserstrahl-Backscatters während eines Routine-SLR-Passes des Satelliten AJISAI, zeigt die Abhängigkeit von der Elevation.

Diese Seeing-Bestimmungen erfolgen automatisch und parallel zu allen Nacht-SLR-Messungen.

4. kHz SLR als LIDAR

Bei allen Routine-SLR-Messungen kann der Backscatter der kHz Laserpulse auch für LIDAR-Messungen verwendet werden: Die von der Atmosphäre rückgestreuten Photonen werden mit einem SPCM (Single Photon Counting Modul) detektiert, und in insgesamt 4096 Zählern (denen jeweils ein Zeitfenster von 100 ns bzw. ca. 15 m Entfernung zugeordnet sind) aufsummiert; diese Integrationszeit ist vom Programm für jede einzelne Messung einstellbar. Damit können Reflektionen an Wolken, Kondensstreifen, atmosphärischen Schichten, Cirruswolken usw. sowohl bei Tageslicht als auch natürlich in der Nacht gut detektiert werden. Durch die gleichzeitige Aufzeichnung von Azimut und Elevation (mit Bogensekunden-Genauigkeit, aus der Teleskop-Steuerung) sowie der Entfernung (in 15-m-Slots) fallen 3-D-Koordinaten dieser Reflektions-Orte als Zusatz-Produkte bei allen SLR-Messungen an. Diese Daten können als Beiträge zur Atmosphärenbestimmung im Grazer Becken verwendet werden; für die Laserstation ist die Korrelation zwischen SLR Return-Raten und atmosphärischem Backscatter von Interesse; durch zusätzliche Scans (außerhalb von Routine-SLR) können Ausmaße und Entwicklung von Cumulo-Nimbus- (Gewitter-) Wolken, deren Tops etc. recht genau vermessen werden [9].

5. Zeitvergleiche zwischen terrestrischen und Satelliten-Zeitkalen

Zum genauen (sub-ns) Vergleich des Frequenzganges von Frequenznormalen auf Satelliten (meist H-Maser) mit terrestrischen Normalen sind Verfahren im optischen Bereich (Laser) weit besser geeignet als Mikrowellen-Verfahren; ein solches Experiment wurde vor kurzem erstmals zwischen der SLR-Station Changchun / China und dem chinesischen GPS-Satelliten Compass-M1 erfolgreich durchgeführt [10]

Bei diesem Experiment misst die Station mit Hilfe von Laserpulsen die Entfernung zum Satelliten; auf diesem ist nun zusätzlich ein Detektor (im Zentrum des Retroreflektors) montiert; dieser misst die Ankunftszeit des Pulses, die mit Hilfe der normalen Telemetrie zu einer Bodenstation übertragen wird. In der SLR Station kann durch den Vergleich dieser Ankunftszeit mit den SLR-Daten (die ja ebenfalls die Epochezeiten der einzelnen Laserpulse enthalten) jeder Offset bzw.

jede Drift zwischen der terrestrischen und der Satelliten – Zeitskala bestimmt werden: In diesem Falle wurde eine differentielle Drift von 110 ps pro Sekunde zwischen den beiden Zeitskalen gemessen [10].

6. Datentransmission durch Pulsphasenmodulation von kHz SLR

Eine weitere innovative Anwendung von kHz SLR wird derzeit gerade in Graz implementiert: Dabei wird mit Hilfe von Pulsphasenmodulation (engl.: Puls Position Modulation / PPM) eine Datenübertragung durchgeführt.

Im normalen Betrieb werden die Laserpulse immer im gleichen Abstand von ca. 500 μ s (= 2 kHz) \pm 7 ns (Jitter des Lasers) gesendet; bei PPM-Betrieb kann dieser Abstand leicht verändert werden; wird diese Abweichung z.B. mit $N \cdot 40$ ns definiert (mit $N = 0 - 255$; $N =$ ASCII Definition), kann dadurch pro Laserpuls ein Character mit ASCII Code „N“ übertragen werden. Beispiel: $N = 65$ (ASCII „A“); Abweichung $65 \cdot 40$ ns = 2.6 μ s; ein Laserpuls verzögert um 2.6 μ s gegenüber dem Standardraster überträgt damit den Buchstaben „A“. Bei einer 2 kHz SLR Station können damit im optimalen Fall 2 kB / s zu Satelliten übertragen werden (zum Vergleich: Software-Updates zum Satelliten CHAMP erfolgen derzeit mit einer Datenrate von 119 bytes / s). Weitere potentielle Vorteile:

- Derzeit sind mehrere kHz-SLR-Stationen im Aufbau; damit sind in absehbarer Zeit mehrere potentielle „Sende-Stationen“ vorhanden;
- Die Umrüstung auf PPM-Fähigkeit ist – für kHz SLR Stationen - relativ einfach durchzuführen;
- Die Datenübertragung kann gleichzeitig mit der ganz normalen SLR-Aktivität erfolgen;
- Bei Bedarf kann die Datenrate mit leicht geänderten Lasern (schwächere Einzelpulse, aber höhere Pulsraten) auch noch wesentlich gesteigert werden (z.B. 20 kHz Laser);
- Ein erster Check auf erfolgreiche Übertragung ist – neben Standardverfahren wie erweiterter oder mehrdimensionaler Paritätskontrolle – auch möglich durch Überprüfung der Echos vom Satelliten: Wenn die Station ein eindeutiges Echo vom Satelliten erhält, dann MUSS auch der Detektor am Satelliten diesen – dort noch ungleich stärkeren – Laserpuls detektiert haben.

7. Zusammenfassung

Die SLR Station Graz-Lustbühel liefert nicht nur hoch präzise Laserentfernungsmessungen zu

Satelliten, sondern hat mittlerweile eine ganze Reihe von innovativen Zusatz-Applikationen entwickelt und / oder implementiert. Mit diesen Zusatzapplikationen wird der Nutzen der Anlage – bei annähernd gleichem Aufwand für deren Betrieb – beträchtlich erweitert und auf weitere Forschungsgebiete ausgedehnt.

Referenzen

- [1] *ILRS*: International Laser Ranging Service: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>
- [2] *N. R. Lomb*: "Least-squares frequency analysis of unequally spaced data" *Astrophysics and Space Science* 39, p. 447-462, 1976.
- [3] *G. Kirchner, W. Hausleitner, E. Cristea*: AJISAI spin parameter determination using Graz kilohertz satellite laser ranging data, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 45, 201-205, 2007
- [4] *D. Kucharski, G. Kirchner, T. Otsubo*: 22 years of AJISAI spin period determination from standard SLR and kHz SLR data, *Advances in Space Research* (2009), in press
- [4a] *D. Kucharski, G. Kirchner, S. Schillak, E. Cristea*: Spin Determination of LAGEOS-1 from kHz laser observations, *Advances in Space Research*, 39 (2007), 1576-1581
- [5] *D. Kucharski, G. Kirchner, E. Cristea*: ETALON Spin Period Determination from kHz SLR Data, *Advances in Space Research*, S0273-1177(07)00912-X; DOI: 10.1016/j.asr.2007.08.030 ; JASR 9240
- [6] *D. Kucharski, G. Kirchner, F. Koidl, E. Cristea*: 20 Years of LAGEOS-1 and 15 Years of LAGEOS-2 Spin Period Determination from SLR Data, *Advances in Space Research* (2009), doi: 10.1016/j.asr.2009.01.019; Reference: JASR 9685
- [7] *G. Kirchner, D. Kucharski, E. Cristea*: Gravity Probe-B: New Methods to Determine Spin Parameters From kHz SLR DATA; *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Volume 47, pp 370-375
- [8] *Georg Kirchner, Daniel Kucharski, Franz Koidl, Jörg Weingrill*: "Measuring Atmospheric Seeing with kHz SLR", *Proceedings of SLR Workshop Canberra*; 11/2006: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>
- [9] *Georg Kirchner, Franz Koidl, Daniel Kucharski, Walther Pachler, Matthias Seiss, Erich Leitgeb*: Graz kHz SLR LIDAR: First Results, *SPIE Paper Number: 7355-28*; *SPIE Digital Library*: <http://spiedl.org>
- [10] *I. Prochazka, F. Yang*: Photon counting module for laser time transfer via Earth orbiting satellite, *Journal of Modern Optics*, Vol. 56, Iss. 2 & 3; Jan. 2009, p. 253-260, ISSN 0950-0340

Anschrift der Autoren

Dipl. Ing. Dr. Georg Kirchner, Lustbühelstr. 46, A-8042 Graz,
E-Mail: Georg.Kirchner@oeaw.ac.at

Ing. Franz Koidl, Lustbühelstr. 46, A-8042 Graz,
E-Mail: Franz.Koidl@oeaw.ac.at

Dipl. Ing. Dr. Daniel Kucharski, Lustbühelstr. 46, A-8042
Graz, E-Mail: Daniel.Kucharski@oeaw.ac.at 