

Bestimmung des lokalen Verbindungsvektors zwischen IVS- und IGS-Referenzrahmen am Raumobservatorium Onsala (Schweden)

Michael Lösler

Zusammenfassung

Für die Bildung des International Terrestrial Reference Frame (ITRF) müssen Ergebnisse von verschiedenen Raumverfahren wie beispielsweise Very Long Baseline Interferometry (VLBI), SLR/LLR (Satellite/Lunar Laser Ranging) oder Global Navigation Satellite System (GNSS) genutzt und miteinander kombiniert werden. Die Kombination dieser Raumverfahren wird jedoch erst durch so genannte Kollokationsstationen möglich. Dies sind Stationen, an denen mindestens zwei Raumverfahren betrieben werden. Der Verbindungsvektor (local-tie), der die räumlichen Beziehungen zwischen den betriebenen Raumverfahren beschreibt, wird durch präzise, lokale, terrestrische Vermessung der Referenzpunkte abgeleitet.

Die im Herbst dieses Jahres durchgeführten Vermessungsarbeiten mit einem Lasertracker an der Fundamentalstation in Onsala (Schweden) zur Bestimmung des Verbindungsvektors zwischen dem GPS- und dem VLBI-Referenzpunkt sowie die erzielten Ergebnisse sollen im Folgenden dargestellt werden.

1. Einleitung

Terrestrische Vermessungsarbeiten zur Bestimmung des lokalen Verbindungsvektors (local-tie) zwischen den Referenzpunkten verschiedener Raumverfahren wie z.B. Very Long Baseline Interferometry (VLBI), SLR/LLR (Satellite/Lunar Laser Ranging) oder Global Navigation Satellite System (GNSS) an sogenannten Kollokationsstationen sind von essentieller Bedeutung für die Bildung des globalen Koordinatenrahmens der Erde (ITRF) und maßgeblich an dessen Genauigkeit beteiligt z.B. [Ray und Altamimi, 2005]; [Altamimi et al., 2006]. An die Bestimmung der Koordinaten der Referenzpunkte, zwischen denen local-tie definiert ist, werden daher sehr hohe Anforderungen gestellt. In der Agenda VLBI2010 [Niel et al., 2004] wird eine regelmäßige Bestimmung mit einer Genauigkeit von unter 1mm angestrebt. Im Rahmen des Global Geodetic Observing System (GGOS) wird neben der Forderung nach Submillimetergenauigkeit auch die automatische, permanente Bestimmung des Verbindungsvektors angeregt [Plag und Pearlman, 2008].

Die an der schwedischen Westküste gelegene Fundamentalstation in Onsala (Schweden) ist eine nationale Forschungseinrichtung, welche mit der Technischen Universität Chalmers, Göteborg (Schweden), zusammenarbeitet. An diesem Raumobservatorium wurde im Herbst des Jahres 2008 der Verbindungsvektor zwischen dem IGS- und dem IVS-Referenzpunkt mit einem Leica Lasertracker LTD840 bestimmt (Abbildung 1). Während der IGS-Referenzpunkt sich unmittelbar durch antastendes Messen bestimmen lässt, da er durch einen Vermessungsbolzen materialisiert und zugänglich ist, kann der geometrische Referenzpunkt des 20m VLBI-Radioteleskops, welches in einem schützenden Radom steht, nur durch ein indirektes Verfahren abgeleitet werden.



Abbildung 1: IGS-Referenzstation und Radom des VLBI-Radioteleskops

Der IVS-Referenzpunkt eines Azimut-Elevation-Radioteleskops, wie es in Onsala vorhanden ist, ist als Schnittpunkt zwischen der Azimut- und der Elevationsachse definiert. Schneiden sich diese Teleskopachsen nicht, so ist der Punkt auf der Azimutachse Referenzpunkt, der den kürzesten Abstand zur Elevationsachse besitzt. Der so definierte Punkt ist invariant gegenüber der vorherrschenden Teleskopausrichtung, kann aber auch nicht materialisiert werden, um direkt beobachtet zu werden. Die Bestimmung ist daher weitaus schwieriger. Als äußerst zuverlässig hat sich hierbei die Referenzpunktbestimmung mittels räumlicher Kreisausgleichung etabliert z.B. [Haas und Eschelbach, 2003]; [Dawson et al., 2006] oder [Leinen et al., 2007]. Im Allgemeinen werden hierzu Messmarken an der Außenwand der Elevationskabine angebracht und koordinatenmäßig in verschiedenen vordefinierten Teleskoppositionen bestimmt. Wird das Teleskop stets nur um eine der beiden Achsen gedreht, so bilden die Trajektorien der angebrachten Messmarken Kreise um diese Achse. Der über eine Ausgleichung bestimmbare Mittelpunkt eines solchen Kreises ist somit ein Punkt der Drehachse. Werden mehrere solcher Kreise bestimmt, lässt sich folglich die jeweilige Drehachse geometrisch bestimmen. Sowohl die Azimut- als auch die Elevationsachse können so abgeleitet werden, sodass der IVS-Referenzpunkt letztlich über die oben beschriebene Projektionsbeziehung berechenbar ist. Neben dem Referenzpunkt selbst lassen sich auch zusätzliche Parameter wie beispielsweise das Achsenoffset bestimmen. Mit Hinblick auf das im GGOS diskutierte Monitoring der Referenzpunkte erweist sich diese Strategie aufgrund der gezielten Teleskopdrehung jedoch als ungeeignet. Um dem Wunsch nach permanenter Bestimmung nachzukommen, wurde eine neue Auswertestrategie entworfen [Lösler und Hennes, 2008], die keine vordefinierten Teleskopausrichtungen zwingend benötigt. Der gesuchte Referenzpunkt wird hierbei aus der Beziehung zwischen einem Teleskopkoordinatensystem und dem lokalen Aufnahmesystem des Instrumentes abgeleitet. Eine Verifizierung dieses mathematischen Ansatzes sowie eine Eignungsprüfung des Lasertrackers bei der Bestimmung von Referenzpunkten war Ziel der Vermessungsarbeiten am Observatorium in Onsala (Schweden).

2. Auswertemodell zur IVS-Punktbestimmung

Analog zur konventionellen Methode über räumliche Kreise leitet das im Folgenden beschriebene Modell den Referenzpunkt eines VLBI-Radioteleskops aus indirekten Beobachtungen ab. Die in [Lösler und Hennes, 2008] ausführlich hergeleitete Gleichung (1) beschreibt eine Transformation zwischen dem Teleskopkoordinatensystem und einem lokalen (erdfesten) Aufnahmesystem des Messinstrumentes.

Als Aufnahme- oder Beobachtungs koordinatensystem kann hier das in der Regel vorhandene lokale Vermessungsnetz an der Station genutzt werden. Dieses ist meist aus fest vermarkten

Punkten und stabilen Vermessungspfeilern, die die Möglichkeit zur Zwangszentrierung bieten, realisiert. Das Teleskopkoordinatensystem leitet sich aus einem idealen Radioteleskop ab. Es ist ein kartesisch rechtshändiges System, in welchem die x_{Tel} -Achse der Elevations- und die z_{Tel} -Achse der Azimutachse entspricht. Die y_{Tel} -Achse steht jeweils senkrecht auf den beiden anderen Achsen. Der Schnittpunkt aller drei Achsen, der Koordinatenursprung, ist der IVS-Referenzpunkt selbst. Da reale Konstruktionen von dieser idealisierten Form abweichen, sind entsprechende Korrekturgrößen im Modell zu berücksichtigen. Von der Existenz eines Schnittpunktes zwischen der Azimut- und der Elevationsachse darf nicht ausgegangen werden, hier ist ein exzentrisches Offset $\mathbf{Ecc} = [0 \ e \ 0]^T$ zu beachten. Die Azimutachse des Teleskops kann als Vektor im Raum beschrieben werden, der nicht parallel zur lokalen z_{Obs} -Achse des Beobachtungssystems verläuft. Die Modellierung dieser Neigung kann durch zwei Achsdrehungen um die Korrekturwinkel α und β ausgedrückt werden. Auch die Radioteleskopachsen selbst werden fertigungsbedingt nicht exakt orthogonal aufeinander stehen und um einen Winkel γ von der Rechtwinkligkeit differieren. Wird ein im Teleskopkoordinatensystem gegebener Punkt \mathbf{P}_{Tel} in Polardarstellung in Abhängigkeit der beiden Orientierungswinkel A und E des Radioteleskops ausgedrückt, die aufgelisteten Restriktionen berücksichtigt und der gesuchte Referenzpunkt \mathbf{P}_R als Translationsvektor zwischen den beiden Systemen betrachtet, so ergeben sich die Koordinaten des selben Punktes \mathbf{P}_{Obs} im Beobachtungssystem nach

$$\mathbf{P}_{Obs} = \mathbf{P}_R + \mathbf{R}_x(\beta) \cdot \mathbf{R}_y(\alpha) \cdot \mathbf{R}_z(A) \cdot \mathbf{R}_y(\gamma) \cdot (\mathbf{Ecc} + \mathbf{R}_x(E) \cdot \mathbf{P}_{Tel}). \quad (1)$$

Bei der Referenzpunktbestimmung kann die Position des Punktes \mathbf{P}_{Obs} im Beobachtungssystem und die zugehörigen Teleskoporientierungswinkel A, der die Drehung um die Azimutachse beschreibt, und E, der die Elevationsdrehung repräsentiert, als messbar bzw. gegeben vorausgesetzt werden. Unbekannt sind neben den aufgeführten Korrekturtermen (für e , α , β , γ), die Position des Punktes \mathbf{P}_{Tel} im Koordinatensystem des Teleskops und der Referenzpunkt \mathbf{P}_R . Abbildung 2 zeigt schematisch die Beziehungen der Größen in einer festen Azimutposition. Auf die Darstellung der Rotation um die Azimutachse z_{Tel} mit einem Drehwinkel A wurde zur Wahrung der Übersichtlichkeit verzichtet.

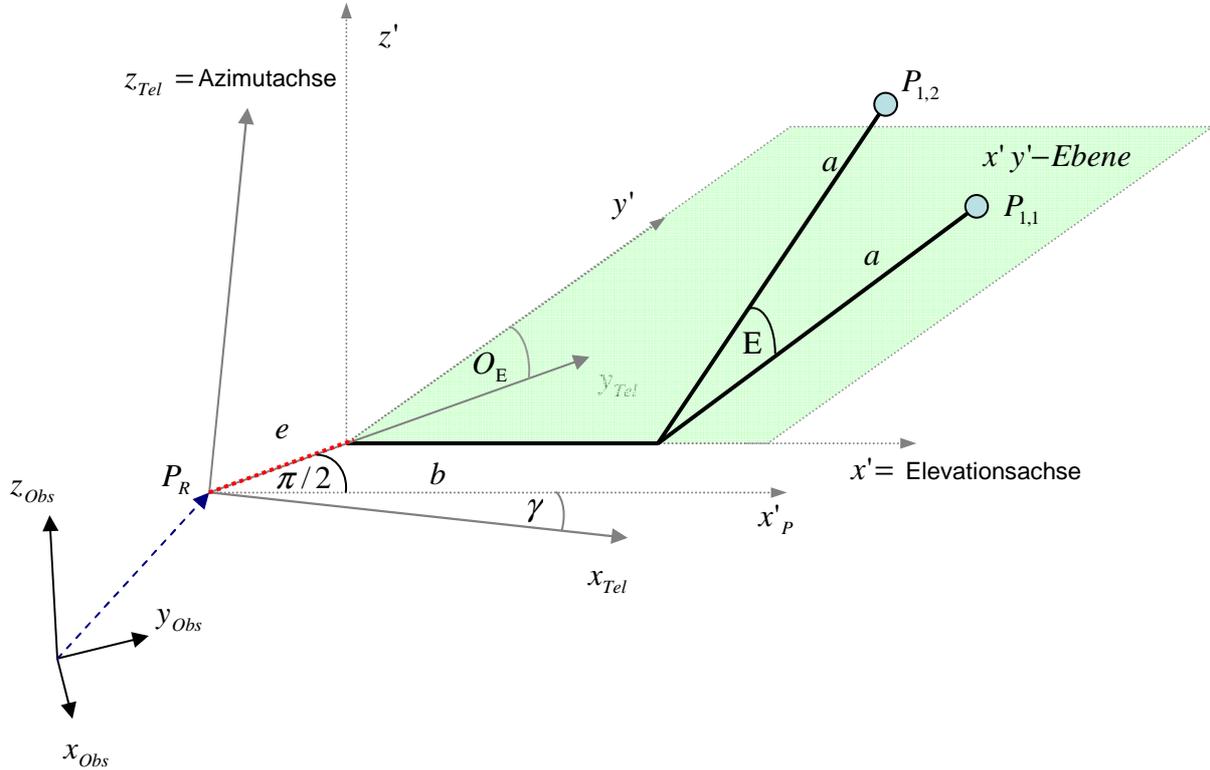


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Aufnahme- und Teleskopsystem

Wird der Punkt in Abhängigkeit der beiden Orientierungswinkel A und E ausgedrückt, so setzt dies voraus, dass beide Koordinatensysteme gleich orientiert sind bei einer Azimutstellung von $A = 0^\circ$ und sich der Punkt P_{Tel} exakt in der xy -Ebene bei einer Elevationsstellung von $E = 0^\circ$ befindet. Da die Zielmarken jedoch an gut verteilten aber dennoch willkürlichen Positionen an der Elevationskabine angebracht werden, sind zwei Orientierungsunbekannte mitzuschätzen, vgl. Gleichung (2).

$$\mathbf{P}_{Obs} = \mathbf{P}_R + \mathbf{R}_x(\beta) \cdot \mathbf{R}_y(\alpha) \cdot \mathbf{R}_z(A + O_A) \cdot \mathbf{R}_y(\gamma) \cdot (\mathbf{Ecc} + \mathbf{R}_x(E + O_E) \cdot \mathbf{P}_{Tel}) \quad (2)$$

Das aufgezeigte nicht-lineare Gleichungssystem lässt sich durch eine Ausgleichsrechnung, formuliert als Gauß-Helmert-Modell, lösen. Als Beobachtungen \mathbf{l} gehen die in j unterschiedlichen Antennenpositionen gemessenen 3D-Positionen einer Zielmarke T_i sowie die zugehörigen Positionswinkel A und E der Radioteleskopantenne ein.

$$\hat{\mathbf{l}}_i = \mathbf{l}_i + \mathbf{v}_i = [\mathbf{X}_{i,1}, Y_{i,1}, Z_{i,1}, A_{i,1}, E_{i,1}, \dots, X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}, A_{i,j}, E_{i,j}]^T + \mathbf{v}_i \quad (3)$$

Zu bestimmen gilt es die unbekannt Parameter $\hat{\mathbf{X}}$, die sich in einen festen $\hat{\mathbf{X}}_{const}$ und in einen zielmarkenabhängigen Anteil $\hat{\mathbf{X}}_{target}$ aufteilen lassen. Der konstanten Anteil $\hat{\mathbf{X}}_{const}$ beinhaltet die Koordinaten des Referenzpunktes \mathbf{P}_R , das Offset zwischen beiden Teleskopachsen e , die Winkel zur Korrektur der Achsschiefen α , β und γ sowie die Azimutorientierungsunbekannte O_A . Da die Position jeder Zielmarke unbekannt ist, erhöht sich die Anzahl der Unbekannten um drei pro Zielmarke. Der zielmarkenabhängige Anteil

\hat{X}_{target} enthält die radialen Abstände a und b sowie die Elevationsorientierungsunbekannte O_E (siehe Abbildung 2). Das zu lösende Normalgleichungssystem des verwendeten Gauß-Helmert-Modells ist z.B. in [Jäger et al., 2005] gegeben durch

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \cdot \mathbf{Q}_l \cdot \mathbf{B}^T & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{k} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{w} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Die Designmatrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} enthalten die partiellen Ableitungen nach den Unbekannten bzw. Beobachtungen, der Vektor \mathbf{x} beinhaltet die iterativen Zuschläge zu den Näherungswerten \mathbf{X}^0 , \mathbf{w} betitelt den Widerspruchsvektor, der Korrelatenvektor ist \mathbf{k} und \mathbf{Q}_l ist die Kofaktormatrix der Beobachtungen l . Geeignete Strategien zur zuverlässigen Lösung des Gleichungssystems sind in [Lösler und Hennes, 2008] beschrieben und erfolgreich in [Lösler, 2008] angewandt worden.

3. Vermessung

Das 20m VLBI-Radioteleskop in Onsala steht innerhalb eines schützenden Radoms, was für stabile Umgebungsparameter beim Messen sorgt. Für lokale Vermessungsarbeiten stehen innerhalb des Radoms fünf stabile Vermessungspfeiler sowie drei vermarkte Bodenpunkte zur Verfügung. Zunächst wurde eine Netzmessung mit dem Lasertracker durchgeführt, um die acht Punkte koordinatenmäßig in einem lokalen Netz zu bestimmen. Der außen gelegene IGS-Referenzpunkt wurde anschließend durch eine an dieses Radomnetz angeschlossene Messung mit dem Lasertracker erfasst, da dieser durch einen Vermessungsbolzen, siehe Abbildung 3, materialisiert und somit direkt bestimmbar ist.



Abbildung 3: Lasertracker vor IGS-Monument (links), CCR-0.5'' auf IGS-Referenzbolzen (rechts)

Die gegebene Möglichkeit mit Zwangszentrierung auf den Vermessungspfeilern innerhalb des Radoms zu arbeiten, kann bei Verwendung eines Lasertrackers nicht genutzt werden, sodass das Instrument stets frei im Netz stationiert wurde.

Die Herausforderung bei der Bestimmung von Punkten bzw. Messmarken am Radioteleskop lag in den beengten räumlichen Verhältnissen. Die Elevationsachse befindet sich in einer Höhe von ca. 15m. Die Vermessungspfeiler, die auf der 3m hohen Radommauer stehen, sind lediglich 9m von der Azimutachse entfernt. Der Lasertracker misst ausschließlich auf spezielle Reflektoren. Würden Standardreflektoren, sogenannte Corner-Cube-Reflektoren (CCR), die einen Öffnungswinkel von $\pm 30^\circ$ haben, an der Elevationskabine angebracht

werden, so würde der Messstrahl selbst bei einer senkrechten Position des Lasertrackers zur Rotationsebene beim Drehen des Radioteleskops um die Elevationsachse abreißen und eine Punktbestimmung in allen möglichen Elevationspositionen unmöglich machen. Aus diesem Grund wurden Cat-Eye-Reflektoren (CER), die mit einem gesamt Arbeitsbereich von 120° spezifiziert sind, magnetisch am Teleskop befestigt.

Der zweite limitierende Faktor ist der Lasertracker selbst. Dieser hat einen eingeschränkten vertikalen Arbeitsbereich von $\pm 45^\circ$ und ist daher nicht in der Lage, Punkte in der Nähe der Elevationsachse anzumessen. Gelöst wurde dies durch einen Pfeileradapter, der den Lasertracker in horizontaler Ausrichtung im Netz platzierte (siehe Abbildung 4, links). Da der Lasertracker über keinerlei Horizontiereinrichtungen verfügt und mittels Transformation im Netz stationiert wird, ergeben sich hierdurch auch keine Diskrepanzen innerhalb der Netzauswertung. Zur Stabilitätsüberwachung der geeigneten Standpunkte wurde ein Zwei-Achs-Neigungssensor eingesetzt und auf dem Lasertracker platziert (siehe Abbildung 4, rechts). Eine 48-stündige Voruntersuchung ergab, dass keine Langzeitstabilität gewährleistet ist. Die Dauer der Vermessungsarbeiten war daher auf ein Minimum zu reduzieren, um den Neigungseinfluss auf die Messung gering zu halten. Durch gezielte Verfahrungen des Teleskops betrug die Gültigkeitsdauer eines Standpunktes im Schnitt lediglich 30 Minuten.

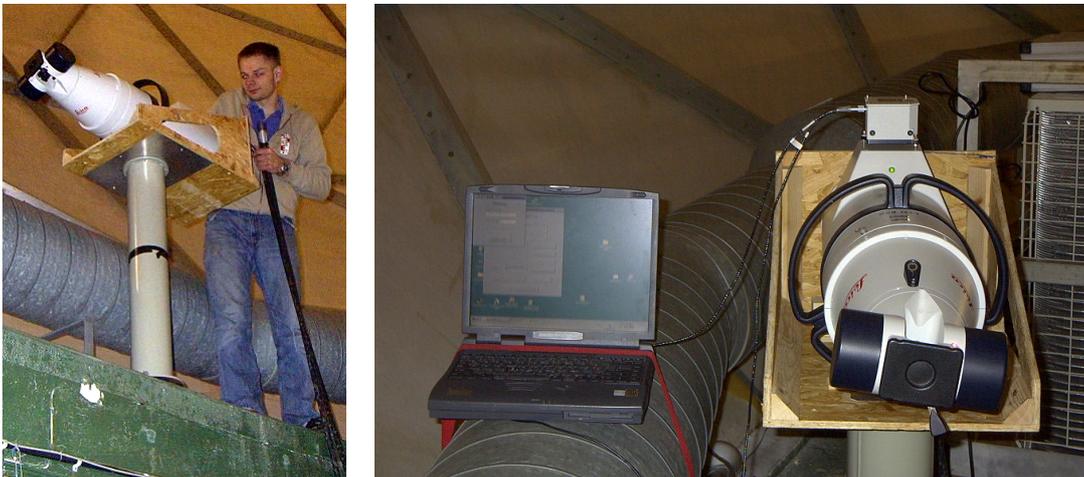


Abbildung 4: Trackerinitialisierung (links), Neigungssensor auf Tracker zur Stabilitätskontrolle (rechts)

Beobachtet wurden pro Teleskopseite zwei diametral angeordnete Cat-Eye-Reflektoren (CER) in 10 Azimutpositionen zu je 18 Elevationsstellungen. Da jeder CER bei Drehung um die Elevationsachse lediglich einen Viertelkreis beschreibt, wurde in einer zweiten Messkampagne diese Anordnung um 90° gedreht und die 3D-Punktbestimmung erneut durchgeführt. Insgesamt wurden somit acht Messmarken in 720 unterschiedlichen Positionen bestimmt. Diese recht symmetrisch gewählte Messanordnung soll zum einen vergleichbare Bedingungen zur konventionellen Bestimmungsmethode schaffen und zum anderen für eine gute verteilte Punktwolke sorgen. Hierdurch ist eine Beurteilung des Auswerteverfahrens an sich als auch eine Analyse möglicher Differenzen zum herkömmlichen Modell gewährleistet. Darauf basierend kann dann die Versuchsanordnung und die Wahl geeigneter Messmittel im Hinblick auf ein permanentes Monitoring zukünftig untersucht werden.

4. Auswertung

Der Lasertracker besitzt keine Möglichkeit, horizontalisiert zu werden und wird daher stets über eine Transformation im Netz frei stationiert. Das lokal aufgespannte Koordinatensystem des Lasertrackers ist daher ein echtes räumlich-kartesisches Koordinatensystem, in dem, im Gegensatz zur Vorgehensweise bei konventionellen Instrumenten, keine Lotrichtungen bei

der Auswertung zu berücksichtigen sind und vergleichbar mit einem geozentrischen Koordinatensystem wie bspw. dem ITRF. Ein Anschluss an das bereits vorhandene Vermessungsnetz ist daher nur bedingt möglich. Da jedoch lediglich die Beziehungen zwischen den Referenzpunkten interessant sind und weniger die absoluten lokalen Koordinaten, erscheint eine freie Netzausgleichung, dessen Ergebnis letztlich in jedes beliebige Datum überführt werden kann, am dienlichsten. Als datumsgebend wurden zweckmäßigerweise alle Netzpunkte gewählt, die vermarktet waren. Dies waren neben den acht Punkten im Radom sechs weitere Punkte im Außenbereich. Bei der Schätzung der Varianzanteile bei der Netzauswertung zeigte sich, dass der Lasertracker in nicht-spezifizierter Ausrichtung und bei instabilen Umgebungsbedingungen, wie sie bei der Messung außerhalb des Radoms vorherrschten, seine spezifizierte Genauigkeit nicht mehr erreicht.

Die ermittelten Koordinaten des IGS-Referenzpunktes konnten im Zuge der Netzauswertung mit einer Standardabweichung von $\hat{\sigma}_{IGS} = 0.3\text{mm}$ in allen drei Raumrichtungen bestimmt werden. Die indirekte Ableitung der Referenzpunktkoordinaten des IVS-Punktes erfolgte nach der in Kapitel 2 beschriebenen Auswertungsmethode. Hierzu wurden die Koordinaten aus der Netzausgleichung und deren vollständigen Kovarianzinformationen genutzt. Die einzelnen Antennenorientierungswinkel wurden als unkorreliert betrachtet und mit einer Standardabweichung von $\sigma_A = \sigma_E = 0.00025^\circ$ ins stochastische Modell (5) eingeführt.

$$C_{II} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_1}^2 & \sigma_{X_1Y_1} & \sigma_{X_1Z_1} & 0 & 0 & \sigma_{X_1X_2} & \cdots \\ \sigma_{Y_1X_1} & \sigma_{Y_1}^2 & \sigma_{Y_1Z_1} & 0 & 0 & \sigma_{Y_1X_2} & \cdots \\ \sigma_{Z_1X_1} & \sigma_{Z_1Y_1} & \sigma_{Z_1}^2 & 0 & 0 & \sigma_{Z_1X_2} & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{A_1}^2 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{E_1}^2 & 0 & \cdots \\ \sigma_{X_2X_1} & \sigma_{X_2Y_1} & \sigma_{X_2Z_1} & 0 & 0 & \sigma_{X_2}^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (5)$$

Die in folge von Temperaturänderungen im Radom hervorgerufenen Variationen k der Radioteleskophöhe während der Messung wurde in Onsala durch eine kontinuierliche Invardrahtmessung entlang der Azimutachse relativ bestimmt und automatisch protokolliert. Um einen absoluten Höhenbezug herstellen zu können, sind zusätzlich zwanzig Temperatursensoren im Teleskopmonument und Umgebung installiert, die ebenfalls automatisch registriert werden. Mithilfe von Gleichung (6) lässt sich die Höhenänderung k des Radioteleskops bei Vorgabe eines Ausdehnungskoeffizienten α_{Stahl} und einer Bezugstemperatur t_0 bestimmen. Da mit der Invardrahtmessung eine zuverlässigere direkte Erfassung der Höhenvariation vorliegt, muss lediglich das Offset zwischen der mit Gleichung (6) bestimmten Variation und der Invardrahtmessung berücksichtigt werden, um diese nutzen zu können. In der Auswertung wurde $\alpha_{Stahl} = 1.15 \cdot 10^{-5} \text{m/K}$ und als Bezugstemperatur $t_0 = 0^\circ\text{C}$ gewählt und die Höhe s der ermittelten Teleskoppunkte korrigiert.

$$k = \alpha_{Stahl} \cdot (t - t_0) \cdot s \quad (6)$$

Die mit dem in Kapitel 2 beschriebenen mathematischen Modell ermittelten Koordinaten des IVS-Referenzpunktes sind mit einer Standardabweichungen von $\hat{\sigma}_{IVS} = 0.1\text{mm}$ ermittelt

worden. Das bestimmte Achsenoffset zwischen der Azimut- und der Elevationsachse des Radioteleskops beträgt

$$e = -0.0062 \pm 0.0001\text{m} \quad (7)$$

und ist damit signifikant.

Für die endgültige Bestimmung des Verbindungsvektors zwischen IGS- und IVS-Referenzpunkt und dessen Kovarianzmatrix wurde das Ausgleichungsmodell (4) so erweitert, dass beide Referenzpunkte enthalten sind.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{IVS} & 0 & \mathbf{Q}_{l_{IVS}l_{IVS}} & \mathbf{Q}_{l_{IVS}l_{IGS}} & \mathbf{B}_{IVS}^T & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_{IGS} & \mathbf{Q}_{l_{IGS}l_{IVS}} & \mathbf{Q}_{l_{IGS}l_{IGS}} & 0 & \mathbf{B}_{IGS}^T \\ & & \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{IVS}^T & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{IGS}^T \end{bmatrix} & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{IVS} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{IGS} \\ & & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k \\ \mathbf{x}_{IVS} \\ \mathbf{x}_{IGS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{w}_{IVS} \\ -\mathbf{w}_{IGS} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Die sich mit Gleichung (8) ergebenden Referenzpunktkoordinaten und deren ermittelten Standardabweichungen können Tabelle 1 entnommen werden.

	X [m]	Y [m]	Z [m]
IVS-Referenzpunkt	90.12325	35.94974	22.75947
Standardabweichung	0.00010	0.00010	0.00008
IGS-Referenzpunkt	12.75551	23.39043	9.06529
Standardabweichung	0.00021	0.00025	0.00027

Tabelle 1: Endgültige Referenzpunktkoordinaten 2008

Die aus Formel (8) resultierende vollbesetzte Kovarianzmatrix des Verbindungsvektors ist nachfolgend aufgelistet.

$$\hat{\mathbf{C}}_{IVS,IGS} = 1.0e-9 \cdot \begin{bmatrix} 10.34 & 1.73 & 1.53 & -2.71 & 0.37 & -0.44 \\ & 9.52 & -0.79 & 0.17 & -1.69 & -3.34 \\ & & 7.22 & -0.35 & 1.12 & 5.85 \\ & & & 45.82 & 2.88 & -12.96 \\ & & & & 60.30 & -38.42 \\ & & & & & 72.97 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Der Abstand $d_{IVS,IGS}$ zwischen beiden Referenzpunkten beträgt nach Pythagoras

$$d_{IVS,IGS} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} = 79.5678\text{m} . \quad (10)$$

Die zugehörige Standardabweichung $\hat{\sigma}_{d_{IVS,IGS}}$ lässt sich mithilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes ableiten. Sie beträgt

$$\hat{\sigma}_{d_{IVS,IGS}} = \sqrt{\mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{C}}_{IVS,IGS} \cdot \mathbf{A}^T} = 0.00024\text{m} . \quad (11)$$

In Hinblick auf die geforderte Güte der Referenzpunktbestimmung bzw. des Verbindungsvektors local-tie z.B. in [Niel et al., 2004] oder [Plag und Pearlman, 2008]

konnte der Verbindungsvektor zwischen IGS- und IVS-Referenzrahmen am Raumobservatorium in Onsala mit einer Genauigkeit von unter 1mm bestimmt werden.

5. Vergleich

Im Jahre 2002 wurden die Koordinaten beider Referenzpunkt letztmalig terrestrisch bestimmt [Haas und Eschelbach, 2003]. In der Annahme, dass keine Deformationen am Radioteleskop selbst sowie in der unmittelbaren Umgebung stattgefunden haben, bieten sich als direkter Vergleich das Achsenoffset und als indirekter Vergleich der Abstand zwischen beiden Referenzpunkten an.

Referenzpunkt	X [m]	Y [m]	Z [m]
IGS	3370658.5879	711877.1097	5349786.9288
IVS	3370605.9602	711917.5650	5349830.8018

Tabelle 2: Referenzpunktkoordinaten (ITRF) 2002 [Haas und Eschelbach, 2003]

Der Abstand wird aus den in Tabelle 2 gegebenen ITRF-Koordinaten von 2002 abgeleitet, da hier identische Koordinatensystemdefinitionen vorliegen. Er beträgt $d_{IVS,IGS} = 79.5685\text{m}$. Der exzentrische Abstand zwischen beiden Radioteleskopachsen wurde 2002 mit $e = -0.0060\text{m}$ ermittelt [Haas und Eschelbach, 2003]. Im Vergleich mit den 2008 ermittelten Größen (Tabelle 3) ist zu erkennen, dass eine sehr gute Übereinstimmung vorliegt.

	2002	2008	Differenz
e	-0.0060	-0.0062	0.0002
d	79.5685	79.5678	-0.0007

Tabelle 3: Vergleich der Epochen 2002 und 2008

Es ist daher anzunehmen, dass keine Deformationen stattgefunden haben und beide Permanentstationen am Raumobservatorium in Onsala stabil stehen.

6. Zusammenfassung

An der Fundamentalstation in Onsala (Schweden) fanden im Herbst 2008 lokale Messungen zur Bestimmung des Verbindungsvektors zwischen dem IGS- und IVS-Referenzpunkt mit einem Lasertracker statt. Neben dem angewendeten neuen mathematischen Auswertemodell zur indirekten IVS-Referenzpunktbestimmung am 20m VLBI-Radioteleskop, welches erstmalig an der Fundamentalstation in Wettzell (Deutschland) erfolgreich verifiziert werden konnte [Lösler, 2008], wurden die Vermessungsarbeiten skizziert und die abgeleiteten Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Der Verbindungsvektor local-tie konnte mit einer Genauigkeit von deutlich unter 1mm mit vollbesetzter Kovarianzmatrix abgeleitet werden und entspricht damit den (zukünftigen) Anforderungen von [Niel et al., 2004] oder [Plag und Pearlman, 2008]. Ein indirekter Vergleich zu den Ergebnissen von 2002 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung und deutet auf einen stabilen Verbindungsvektor hin.

Die stabilen Umgebungsverhältnisse innerhalb des Radoms sprechen für den Einsatz eines Lasertrackers. Dem entgegen stehen der erhöhte Aufwand bedingt durch die baulichen Restriktionen und der Verlust an Genauigkeit in nicht spezifizierter Lagerung bzw. bei instabilen Umgebungseinflüssen außerhalb des Radoms. Grundsätzlich erscheint die Art der Netzauswertung als lokales, kartesisches 3D-Koordinatensystem als zweckmäßig, da die abgeleiteten Ergebnisse reduktionsfrei transformiert werden können.

Die Aufstellung und Verifizierung des dargestellten mathematischen Auswerteansatzes ist der erste konsequente Schritt zur Realisierung eines Monitorings. Für eine mögliche permanente Überwachung, wie es das GGOS anstrebt, sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

Der Arbeitsbereich der eingesetzten Messmittel wurde zum Teil vollständig ausgenutzt, sodass nicht nur die Synchronisation der Instrumente sondern auch die Wahl geeigneter Messmittel zu lösende Herausforderungen darstellen.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Rüdiger Haas, der mir während der gesamten Zeit am Raumobservatorium in Schweden hilfreich zur Seite stand, sei an dieser Stelle gedankt. Auch der Leica-Vertretung in Göteborg sei ganz herzlich gedankt, die einen modernen Lasertracker LTD840 unbürokratisch zur Verfügung gestellt haben.

Dieses Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt, HE5213_2-1.

Kontakt

Michael Lösler

loesler@gik.uni-karlsruhe.de

Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)

<http://www.gik.uni-karlsruhe.de>

Literatur

Altamimi, Z., Coulot, D., Berio, Ph., Exertier, P. [2006], How can combination help to achieve consistency at the 0.1 ppb level? Proceedings GGOS-Workshop 8.-9. Oktober, München, verfügbar unter:

http://geodesy.unr.edu/ggos/ggosws_2006/position_papers/altamimi_et_al_position_paper.pdf (25. Nov. 2008).

Dawson, J., Sarti, P., Johnston, G., Vittuari, L. [2006], Indirect approach to invariant point determination for SLR and VLBI systems: an assessment. Journal of Geodesy, Vol 81, p.433-441

Haas, R., Eschelbach, C. [2003], The 2002 Local Tie Survey at the Onsala Space Observatory, Proceedings of the IERS Workshop on site co-location, Matera, Italien, 23.-24. Oktober, verfügbar unter: <http://www.iers.org/MainDisp.csl?pid=46-25777> (01. Dez. 2008)

Jäger, R., Müller, T., Saler, H. [2005], Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern, 1. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Leinen, S., Becker, M., Dow, J., Feltens, J., Sauermann, K. [2007], Geodetic Determination of Radio Telescope Antenna Reference Point and Rotation Axis Parameters. Journal of Surveying Engineering, Vol 133, p41-51

Lösler, M., Hennes M. [2008], An innovative mathematical solution for a time-efficient IVS reference point determination. Proceedings of the FIG2008 – Measuring the changes, Portugal, Lisabon 12.-15. Mai, verfügbar unter:

http://www.fig.net/commission6/lisbon_2008/papers/pas07/pas07_02_loesler_mc029.pdf (01. Dez. 2008)

Lösler, M. [2008], Reference point determination with a new mathematical model at the 20 m VLBI radio telescope in Wettzell. *Journal of Applied Geodesy* 2, p.233-238.

Ray, J., Altamimi Z. [2005], Evaluation of co-location ties relating the VLBI and GPS reference frames. *Journal of Geodesy*, Vol 79, p.189-195

Niell, A., Whitney, A., Petrachenko, B., Schlüter, W., Vandenberg, N., Hase, H., Koyama, Y., Ma, C., Schuh, H., Tuccari, G. [2004], IVS Memorandum – VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. IVS Memorandum, verfügbar unter: <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/memos/ivs-2006-008v01.pdf> (20. Nov. 2008)

Plag, H. P., Pearlman, M. [2008], The Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, The reference Dokument (v0.18)