

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 98 (2000)

Heft: 6

Artikel: Theoretische Schätzung der 2D-Positionsgenauigkeit bei der Flächennavigation in der Luftfahrt

Autor: Cerniar, M. / Geiger, A. / Buchanan, T.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235653>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Theoretische Schätzung der 2D-Positionsgenauigkeit bei der Flächennavigation in der Luftfahrt

Das Verkehrsaufkommen im Luftraum steigt zusehends an. Lösungen zur besseren Nutzung des Luftraumes sind gesucht. Man ist bestrebt die Flugzeiten zu verkürzen, um einerseits die Wirtschaftlichkeit zu fördern, andererseits um die Umweltbelastung zu reduzieren. Eine anvisierte Änderung betrifft die Flugroutenwahl im oberen Luftraum. Die Flugzeuge sollen in Zukunft nicht mehr auf fixen über Navigationsstationen führenden «Luftstrassen» zirkulieren, sondern virtuellen, der Flugstrecke angepassten Waypoints folgen können. Neue Empfängertypen für «klassische» Radionavigation sowie die GPS-Technologie ermöglichen die angestrebte Art der Navigation. Die «klassischen» Radionavigationsverfahren basieren auf Distanz- und Azimutmessungen. Hier wird gezeigt, wie die Geodäsie mit Parameterschätztechniken einen Beitrag leisten kann zur Überprüfung und Analyse der Navigations-Genauigkeiten konventioneller Radionavigationssysteme.

Le volume du trafic aérien croît sans cesse. On est entrain de chercher des solutions permettant une meilleure utilisation de l'espace aérien. On s'efforce à raccourcir les temps de vol, d'une part afin d'accroître la rentabilité, d'autre part pour réduire la charge sur l'environnement. Une des modifications envisagées concerne le choix des routes aériennes dans l'espace aérien supérieur. Dorénavant, les avions ne doivent plus circuler dans «des voies aériennes» fixes par rapport à des stations de navigation, mais suivre des balises virtuelles (waypoints) adaptées aux routes aériennes. De nouveaux types de récepteurs pour la radio-navigation «classique» ainsi que la technologie GPS permettent le nouveau genre de navigation envisagé. Les systèmes de radio-navigation «classique» se basent sur la mesure des distances et azimuts. Dans cet article, on démontre comment la géodésie peut contribuer, avec des techniques d'estimation de paramètres, au contrôle et à l'analyse des précisions de navigation des systèmes de radio-navigation conventionnels.

Il traffico nello spazio aereo continua ad aumentare e si è alla costante ricerca di nuove soluzioni per sfruttarlo adeguatamente. Infatti, si tenta di comprimere i tempi di volo per promuovere, da un canto, la redditività e, dall'altro, ridurre l'impatto ambientale. Un'alternativa proposta risiede nella scelta delle rotte di volo, cioè in futuro i velivoli non dovranno più circolare su dei «corridoi aerei» fissi, ma dovrebbero seguire dei «punti di passaggio» virtuali, adattati ai singoli percorsi di volo. Nuovi tipi di ricevitori per la radionavigazione «classica» e la tecnologia GPS permettono questo genere di navigazione. I processi «classici» di radionavigazione si basano sulla misurazione della distanza e degli angoli azimutali. Qui di seguito si indica come la geodesia, con le sue tecniche di stima dei parametri, fornisca un suo contributo per verificare e analizzare la precisione di navigazione dei sistemi convenzionali di radionavigazione.

M. Cerniar, A. Geiger, Th. Buchanan, M. Scaramuzza

Einleitung

Mit dem Beginn des Linienverkehrs in der Luftfahrt wurde die Installation von Navigationshilfen notwendig. Fortschritte der Radiotechnik erlauben eine zusehends verbesserte Standortbestimmung der Flugzeuge, basierend auf den von «klassischen» Radionavigationsanlagen (Very high frequency omnidirectional range (VOR) bzw. distance measuring equipment (DME), Abbildung 1 zeigt das VOR in Kloten) ausgestrahlten Richtungs- bzw. Distanzinformationen. Die gebräuchlichen Positionierungsmethoden und -verfahren erlauben jedoch nur eine durch die Standorte der Funkfeuer gegebene Punkt zu Punkt Navigation.

Die rasche Zunahme des interkontinentalen Flugverkehrs erfordert zudem eine genauere Navigation in Gebieten, wo keine bodengestützten Navigationshilfen zur Verfügung stehen. Dies bewog die Hersteller von Navigations-instrumenten eine vom Boden unabhängige Navigationshilfe, die heute nach wie vor eingesetzten inertialen Navigationssysteme (INS), zu entwickeln. Der grosse Vorteil von INS ist die Unabhängigkeit von terrestrischen Navigationsanlagen. Vom Prinzip her lässt die Inertialpositionierung eine Flächennavigation zu. Allerdings wirkt sich die grosse Driftrate so negativ auf die Genauigkeit aus, dass die INS-Verfahren im dicht beflogenen Luftraum im kontinentalen Bereich nur sehr beschränkt einsetzbar sind. Obwohl Satellitentechnologien verstärkt in die Flugnavigation eingebunden werden, wird man im kontinentalen Bereich nicht gänzlich auf die Positionsstützung durch terrestrische Anlagen verzichten.

Mit der immer grösser werdenden Rechenleistung der Bordcomputer konnten in neuerer Zeit die Messungen von VOR und DME dazu benutzt werden, analytisch die 2-dimensionale Position des Flugzeuges in einem bestimmten Umkreis um die Bodenanlagen zu bestimmen. Dies ermöglicht, von der Punkt zu Punkt Navi-

gation abzukommen und zur eigentlichen Flächennavigation (Area Navigation, RNAV) überzugehen, welche den Luftraum besser ausnutzt und somit die Kapazität im Luftverkehr steigern kann. Um die Sicherheit für RNAV zu garantieren, wurde das Konzept der Required Navigation Performance (RNP) entwickelt. Dieses schreibt unter anderem vor, dass unabhängig vom benutzten Navigationssystem für bestimmte Lufträume ein Flugzeug während 95% der Zeit sich innerhalb eines vorgegebenen Radius um die Sollposition befinden muss. Auf Grund solcher Vorgaben können Klassen von Lufträumen für bestimmte Flugoperationen definiert werden. Diese Klassierung erfordert die Kenntnis der mit den heutigen Navigationsanlagen erreichbaren Genauigkeiten. Hierfür wurden an der ETH Zürich Vorarbeiten geleistet.

Das Untersuchungskonzept

Im Rahmen einer Diplomarbeit [Cerniar, 1998] an der ETH Zürich wurden erste Untersuchungen der Positionierungsgenauigkeit durchgeführt. Ziel der Arbeit war unter anderem, die theoretische Schätzung des Positionsfehlers bei der Flächennavigation mit «klassischen» Radionavigationsanlagen für den ganzen Schweizer Luftraum durchzuführen. Dabei wurden verschiedene Aspekte berücksichtigt:

Anzahl der Bodenfunkfeuer

- Je nach Flugzeugbordempfänger können 1, 2 oder mehr Stationen gleichzeitig empfangen und entsprechende Messungen durchgeführt werden. Mehrfachempfänger erlauben auf Grund der Überbestimmung eine Berechnung einer im statistischen Sinne optimalen Position.

Strategie der Stationswahl

- Zur Berechnung werden die dem Flugzeug nächstgelegenen Stationen verwendet. Diese Wahl ist zwar schnell, aber liefert nicht immer die bestmögliche Position.



Abb. 1: VOR/DME Station Kloten. Die Antenne der DME-Anlage ist als Stab in der Mitte des (VOR) Antennenkranzes sichtbar (Foto: Christoph Zehnder, swisscontrol).

- Zur Berechnung wird die geometrisch günstigste Konfiguration von Bodenstationen gewählt. Dies ergibt die fehlertheoretisch optimalste Lösung

Genauigkeiten der Bodenstationen

- Um eine realistische Abschätzung der Positionsfehler zu erlangen, werden die durch die ICAO festgesetzten Genauigkeitsstandards für VOR und DME berücksichtigt. Der Winkelfehler des VOR wird dabei mit zunehmendem Abstand eine wachsende Unsicherheit bewirken.

Sichtbarkeit der Bodenstationen

- Die topographische Charakteristik der Schweiz beeinflusst die Berechnungen massgebend. Beispielsweise kann ein VOR in Norditalien von einem über dem Schweizer Mittelland auf mittleren Höhen fliegenden Flugzeug nicht mehr empfangen werden, da die Alpen dieses Signal abschirmen.

Das Referenzsystem

Um die Untersuchungen weltweit anwenden zu können, wurden alle Beobachtungsgleichungen und mathematischen Formeln in Kugelkoordinaten formuliert. Auf die strengere ellipsoidische Berechnung, etwa im globalen Referenzsystem WGS-84, wurde der Einfachheit halber verzichtet. Die Kugelnäherung ruft einen kleinen systematischen Effekt hervor, welcher einen vernachlässigbaren Einfluss auf die geographische Zuordnung des Positionsfehlers hat. Die Grös-

se des Positionsfehlers wird dadurch aber nur unwesentlich verfälscht.

Das stochastische Modell

Die Schätzung des Positionsfehlers basiert auf dem Prinzip der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten. Die Messfehler der VOR- und DME-Messungen können als normalverteilt und unkorreliert angenommen werden. Die Kofaktorenmatrix ist daher diagonal (mit den a-priori Standardabweichungen für die jeweilige Messung in den Diagonalelementen). Die Genauigkeit der DME-Distanzmessungen beinhaltet sowohl einen konstanten Fehler wie auch einen mit der Distanz linear wachsenden Fehler. Laut technischen Spezifikationen beträgt der 1σ -Distanzfehler je nach Distanz zwischen 25 und 100 m. VOR-Azimumessungen weisen einen Winkelfehler von 1° (1σ) auf. Mit Hilfe dieser a-priori Genauigkeitsangaben können die Diagonalelemente der Gewichtsmatrix bestimmt werden.

Das funktionale Modell

Für das Aufstellen der Matrix der linearisierten Beobachtungsgleichungen (Systemmatrix), muss die beobachtete Grösse als Funktion der unbekannten Parameter beschrieben und danach linearisiert werden. Für das DME ist deshalb die Distanz, respektive für das VOR das Azimut, in Funktion der unbekannten geographischen Länge und Breite der Flugzeugposition auszudrücken. Wie bereits erwähnt, erfolgen die Formulierungen in Kugelkoordinaten. Damit können die Techniken der sphärischen Trigonometrie angewendet werden.

Positionsgenauigkeit

Mit der Systemmatrix und der Gewichtsmatrix lässt sich nun sehr einfach die Normalgleichungsmatrix und daraus die Kofaktorenmatrix der unbekannten Parameter und folglich die Kovarianzmatrix der Position berechnen. Die Diagonalelemente der Kovarianzmatrix geben die gewünschte Auskunft bezüglich der zu erwartenden Positionsfehler in Nord- (σ_N), beziehungsweise Ost-Richtung (σ_E). Aus diesen zwei Werten lässt sich ein mittlere

rer Punktfehler σ_{pos} (Wurzel aus Quadratsumme von σ_N und σ_E) berechnen. Somit kann jeder untersuchten Position im Luftraum ein einziger Fehlerwert zugeteilt werden. Da das RNP Konzept der ICAO vorschreibt, dass sich ein Flugzeug während 95% der Zeit innerhalb eines bestimmten Fehlerkreises um die Sollposition aufhalten muss, ist es sinnvoll den berechneten Fehlerwert umzuformen, damit er mit diesen Anforderungen verglichen werden kann. Es kann gezeigt werden, dass die Wahrscheinlichkeit, sich innerhalb eines Kreises mit Radius $2\sigma_{\text{pos}}$ zu befinden zwischen 95.4% und 98.2% variiert, je nach Verhältnis zwischen σ_N und σ_E . Somit befinden wir uns mit der Angabe einer Fehlergrösse von $2\sigma_{\text{pos}}$ auf der sicheren Seite.

Falluntersuchungen

Die oben beschriebenen Grundlagen wurden in einem Computerprogramm umgesetzt, mit dem man sich sehr schnell ein Bild über die Situation in einem bestimmten Luftraum verschaffen kann. Bei den Berechnungen im schweizerischen Gebiet wurden sowohl die DMEs und VORs im Inland wie auch diejenigen im nahen Ausland berücksichtigt. Verschiedene Kombinationen von Vorgaben und Randbedingungen, die oben erläutert sind, liefern die Grundlagen zur Berechnung der theoretischen Positionierungsfehler in unterschiedlichen Flughöhen. Als Beispiel einer ganzen Serie von Falluntersuchungen zeigt Abbildung 2 das Ergebnis der Berechnungen auf Grund der Auswahl der jeweils besten geometrischen Konfiguration von zwei DMEs und zwei VORs. Die Höhe wurde über das ganze Gebiet auf die Flugfläche 100 (ca. 3050 m) fixiert.

In dieser Figur treten zwei Effekte besonders gut in Erscheinung.

- Erstens wurden auf Grund der «Punkt zu Punkt» Navigationskonzepte die DMEs und VORs in einer «Kette» entlang den «Luftstrassen» aufgereiht. Aus heutiger Sicht bietet diese geometrische Anordnung für die Flächennavigation Nachteile, indem nicht die opti-

Abb. 2: Theoretische 2-sigma Werte für die Genauigkeit der Positionierung mit Doppelkanalempfängern (2

VOR/DME). Die Flughöhe entspricht dem FL 100 (Flight Level 100, ca 3050 m). Dieses Bild ergibt sich, wenn der Bordempfänger permanent zu den zwei optimalst gelegenen Bodenstationen misst (Cerniar, 1998; GGL-ETHZ).

malsten Positionsgenauigkeit erreicht werden können. Besonders deutlich ist dies von Fribourg (FRI) in süd-westlicher Richtung und von Zurich-East (ZUE) in östlicher Richtung sichtbar. Im Gegensatz dazu ist die geometrische Anordnung im Raume Zürich und südlich von Basel optimaler.

- Zweitens tritt der Einfluss der Topographie, insbesondere der Alpen, deutlich zum Vorschein. Beispielsweise sind die VOR/DME Stationen von Sion (SIO) und Montana (MOT) nur gerade im Rhonetal empfangbar. Hier muss aber hervorgehoben werden, dass diese zwei Anlagen nicht der Flächennavigation, sondern als Landehilfen für den Flugplatz Sion dienen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass der Positionsfehler bei der Flächennavigation mit konventionellen Radionavigationshilfen einfach und schnell auf theoretischem Wege flächenartig geschätzt werden kann. Verschiedene Randbedingungen, wie die geometrische Konfiguration der terrestrischen Navigationsanlagen gegenüber dem Flugzeug oder die Topographie können berücksichtigt werden. Das Ergebnis gibt direkt darüber Auskunft, ob die Anordnung der DMEs und VORs den Anforderungen für Operationen basierend auf RNP genügen oder nicht. Das Programm kann aber auch dazu dienen, zukünftige Anordnungen von Navigationsanlagen

oder Änderungen und Ergänzungen der jetzigen Anlagenkonfiguration zu optimieren, um neue, die Kapazität des Luftraumes steigernde Operationen zuzulassen. Zum effektiven Einsatz dieses Planungshilfsmittels in der Luftfahrt, bedarf es dessen Validierung. Diese könnte beispielsweise mit Hilfe der Flugvermessung erfolgen. Erweiterungen des Programms sollten in Bezug auf die Beeinflussung der Signalausbreitung durch Gelände und Atmosphäre und die Berechnungen auf dem Ellipsoid angestrebt werden. Für eine erste Abschätzung der Situation im Schweizer Luftraum zeigt das angewendete geodätische Verfahren hilfreiche und brauchbare Ergebnisse.

Dipl. Ing. Mario Cerniar¹
Dr. Alain Geiger
Geodesy and Geodynamics Lab
Institut für Geodäsie
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich
e-mail: geiger@geod.baug.ethz.ch

¹ jetzt bei Kägi Vermessungen AG
Spannortstrasse 5
CH-6003 Luzern
e-mail: m.cerniar@okg.ch

Thomas Buchanan
Head of PANS-OPS Office Switzerland
Dr. Maurizio Scaramuzza
swisscontrol
Case Postale 796
CH-1215 Genève 15
e-mail:
thomas.buchanan@swisscontrol.com
maurizio.scaramuzza@swisscontrol.com

