Genau

© PhotoDigital

© DigitalStock

Die Positionsbestimmung mittels Satellitennavigation ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Die kleinste Ungenauigkeit in der Messung führt zu einem großen Fehler. Denn es werden Signallaufzeiten gemessen, also die Zeitspannen, die zwischen dem Aussenden und dem Empfangen eines Signals vergehen. Der Empfänger führt diese Messungen zeitgleich für mindestens vier Satellitensignale durch. Aus diesen Zeitspannen ermittelt er die jeweiligen Entfernungen (pseudo-ranges) zwischen sich und den Satelliten. Dazu wird die gemessene Signallaufzeit mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale, also der Lichtgeschwindigkeit, multipliziert. Schließlich errechnet der Empfänger aus den erhaltenen Entfernungen seine eigene Position.

Schon kleinste Fehler bei der Messung der Signallaufzeit zeigen eine große Wirkung: Beträgt der Messfehler 1 Mikrosekunde (µs), so wird der pseudo-range-Fehler bei 300 Metern liegen. Das ist für Anwender der Satellitennavigation nicht akzeptabel. In handelsüblichen Empfängern liegen diese Messfehler typischerweise bei nur 10 Nanosekunden (ns; 1 ns = 10^{-9} Sekunden, also ein Milliardstel einer Sekunde), sodass der pseudo-range-Fehler in der Größenordnung von nur noch 3 Metern liegt.

Die Signalstruktur in Satellitennavigationssystemen macht es möglich, diesen Fehler so gering zu halten. Allerdings ist dies meist nur in störungsfreien Umgebungen möglich. Doch Störungen, die die Signallaufzeit verändern, sind nahezu allgegenwärtig: Signale werden durch Bauten abgeschattet, Signalechos entstehen. Wenn das vom Satelliten abgestrahlte Signal den Empfänger nicht auf direktem Weg, sondern nur über Umwegpfade erreicht, ist auf Grund des längeren Ausbreitungsweges die Signallaufzeit länger. Der Empfänger wird in diesem Fall einen zu großen Wert für den pseudo-range ermitteln. Ein Positionsfehler größeren Ausmaßes ist die Folge.

ist nicht genau genug

Weltweit einmalige Messkampagne für die Satellitennavigation der Zukunft

Von Uwe-Carsten Fiebig, Alexander Steingaß und Andreas Lehner

Selbst dann, wenn eine direkte Sichtverbindung zwischen Empfänger und Satellit besteht, können Signalechos, die beispielsweise durch Reflexionen an Gebäudefassaden entstehen, die Positionsbestimmung beeinträchtigen. Dies umso mehr, wenn die Umwegpfade kurz sind und Echos somit unmittelbar nach dem direkt empfangenen Signal am Empfänger ankommen. In solchen Fällen funktioniert die Synchronisation, die für die hochgenaue Messung der Signallaufzeit von entscheidender Bedeutung ist, nicht mehr einwandfrei.

Mehrwege-Empfang verfälscht die Signale

Erreicht das vom Satelliten abgestrahlte Signal den Empfänger auf mehreren Wegen, spricht man von Mehrwege-Empfang. Im Mobilfunk ist der Mehrwege-Empfang allgegenwärtig, aber mittlerweile nicht mehr sehr problematisch.

Man kann ihn sogar ausnutzen, um die Qualität der Verbindung zu steigern. In der Satellitennavigation ist Mehrwege-Empfang jedoch sehr störend. Es müssen geeignete Methoden gefunden werden, die Signale so zu verarbeiten, dass sie nicht mehr verfälscht sind. Dazu ist eine genaue Kenntnis der Mehrwege-Ausbreitung notwendig. Um diese Kenntnis zu erlangen, hat das DLR-Institut für Kommunikation und Navigation im Herbst 2002 zwei aufwändige, in ihrer Genauigkeit einmalige Messkampagnen für verschiedene Szenarien durchgeführt.

Die erste dieser Kampagnen wurde im September 2002 in München und Umgebung realisiert. Darin wurden die typischen Ausbreitungsbedingungen für städtische, vorstädtische und ländliche Gebiete ermittelt – die Experten sprechen hier auch vom landmobilen Ausbreitungsszenario oder Übertragungskanal. Die zweite Messkampagne folgte im Oktober 2002 im ESA-Auftrag unter der Leitung der Grazer

Forschungseinrichtung Joanneum Research. Sie hatte die Erfassung der Mehrwegeausbreitung bei aeronautischen Anwendungen zum Ziel. Denn selbst ein Empfänger, der auf einem hoch über den Wolken fliegenden Flugzeug indoor montiert ist, wird durch Mehrwege-Empfang – verursacht durch Reflexionen am Flugzeug selbst – beeinträchtigt.

Aus den gemessenen Daten wurden hoch auflösende Modelle entwickelt, mit deren Hilfe schließlich neue Empfängeralgorithmen getestet und optimiert werden können. Damit lassen sich die Störungen, die vom Mehrwege-Empfang verursacht werden, bestmöglich unterdrücken. Die Positionsgenauigkeit steigt deutlich.

Messung und Modellierung des landmobilen Übertragungskanals

Um die Ausbreitungsbedingungen mit hoher Genauigkeit zu ermitteln und auch schwache Signalechos zu erfassen, ist ein hinreichend starkes Empfangssignal notwendig.

Daher schied die Verwendung sowohl der GPS-Signale als auch anderer Satellitensignale zur Erfassung des Mehrwege-Empfangs aus. Eine Vielzahl von Gründen sprach schließlich dafür, einen Zeppelin einzusetzen. Dieser sollte hoch genug und in ausreichender Entfernung vom Empfänger die Messsignale abstrahlen: Ein Zeppelin vibriert kaum, was für die störanfällige Ausrüstung, zu der auch Atom-Uhren gehören, von Vorteil ist. Er lässt sich leicht in einer festen Position in der Luft halten. Und er ist leise, womit er beim stundenlangen Fliegen über bebautem Gebiet dem Helikopter klar vorzuziehen ist.

Die Distanz zwischen Zeppelin und Empfänger betrug etwa zwei bis vier Kilometer bei Flughöhen von circa 300 bis 1.500 Metern über dem Boden. Damit konnten unterschiedliche Geometrien, wie sie beim Empfang von Satellitennavigationssignalen typisch sind, untersucht werden. Das Sendesignal wurde mit 10 Watt EIRP (equivalent isotropic radiated power) und einer Bandbreite von 100 Megahertz im Frequenzbereich 1.460 bis 1.560 Megahertz abgestrahlt. Damit kann eine zeitliche Auflösung von 10 Nanosekunden erzielt werden. Mithilfe eines speziellen Algorithmus (ESPRIT-Algorithmus; ESPRIT: Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) konnten Echos unterschieden werden, die nur noch zwei Nanosekunden voneinander getrennt beim Empfänger auftraten. In zwei Nanosekunden legen Funksignale eine Wegstrecke von 60 Zentimetern zurück. Diese hohe Auflösung ist notwendig, um die von Echos erzeugten Signalstörungen untersuchen zu können.

Sowohl an Bord des Zeppelins als auch im Messfahrzeug waren Rubidium-Uhren im Einsatz. Das Messfahrzeug war neben dem Messempfänger mit seinen umfangreichen Speichersystemen zur Datenaufzeichnung mit zahlreichen Sensoren ausgestattet: GPS-Empfänger, Radsensoren, laserbasierte Kreisel, Videokamera in Fahrtrichtung, Fischaugen-Videokamera in Richtung Zenit, Synchronisationseinrichtungen für die Fusion aller Sensordaten.

Während der Kampagne wurden 60 unterschiedliche Szenarien vermessen. Sie unterschieden sich im Umgebungstyp (Stadt, Vorstadt, Land), Elevation des Satelliten bzw. Zeppelins (zwischen fünf Grad und 80 Grad) und Anwendung (Fahrzeug und Fußgänger). Der Zeppelin wurde nach jeder Messfahrt an einem anderen Ort in Stellung gebracht, wodurch die vom Messfahrzeug aus gesehene Elevation verändert wurde. Entsprechend oft musste auch die Positionierungsstation verlagert werden – eine Herausforderung für die Planer. 20 Mitarbeiter des Instituts waren für die Messungen im Einsatz.

Im Ergebnis lagen 500 GByte Messdaten vor – Datenmaterial von einzigartigem Wert für die weitere Forschung und Entwicklung. Dazu kommen noch die Videoaufnahmen und die Daten der verschiedenen Sensoren. Erste Ergebnisse konnten unmittelbar im Messfahrzeug beobachtet werden. Sie dienten dazu, die Güte der Messungen zu beurteilen und einen ersten Eindruck von den Ausbreitungsverhältnissen zu erlangen. Auf diese Weise hatten die Wissenschaftler auch die Möglichkeit, spontan kritische Szenarien genauer zu vermessen.

Der erste Schritt in der Auswertung bestand in der Vorverarbeitung der Messdaten. Das Ziel bestand darin, alle relevanten Signalechos zu extrahieren. Es folgte die aufwändige Modellierung der Ergebnisse.

© DigitalVision

Schließlich entstand ein in seiner Genauigkeit und Wirklichkeitstreue einmaliges Modell. Seine Stärke zeigte es in der Computersimulation, wo es genutzt wurde, um neue Empfängeralgorithmen auszutesten.

In das Modell sind zahlreiche neue Erkenntnisse eingeflossen. Es konnte gezeigt werden, dass die Vorzugsrichtung, aus der Signalechos zu erwarten sind, entgegengesetzt ist zur Richtung, in der der Satellit steht. Ferner überraschte die große Anzahl von Signalechos und ihre kurze Lebensdauer. All dies steht im großen Widerspruch zu oft eingesetzten „Raytracing-Tools", die auf Grund ihrer meist fehlenden Detailtreue die Vielzahl kleiner, aber wesentlicher Reflexionselemente an Bauwerken nicht berücksichtigen können.

Für sicheren Empfang in Flugzeugen

In einer zweiten Kampagne wurden die Ausbreitungsbedingungen für den Empfang von Satellitennavigationssignalen auf Flugzeugen gemessen und modelliert. Das Messszenario unterscheidet sich stark vom oben Beschriebenen. Die für die Navigation wichtigste Flugphase ist die Landung, auf die daher das Hauptaugenmerk gelegt wurde. Auch bei dieser Kampagne konnten zahlreiche neue Erkenntnisse gewonnen werden. Überraschend war die Tatsache, dass Echos, die durch Reflexionen an den Flügeln verursacht werden, sehr selten auftreten. Rumpfechos hingegen sind sehr häufig. Dies gilt unabhängig vom Flugzeugtyp und konnte durch Bodenmessungen anhand eines Airbus A340 verifiziert werden. Auch Echos vom Boden können beim Landeanflug eine erhebliche Rolle spielen.

Das vom DLR entwickelte Kanalmodell, das zurzeit bei der International Telecommunication Union (ITU) standardisiert wird, berücksichtigt verschiedene Flughöhen, Fluggeschwindigkeiten, Roll- und Kippbewegungen des Flugzeugs, die Sinkrate beim Anflug und die Position der empfangenen Satelliten. Mit präzisen theoretischen Ansätzen, die auf Methoden physikalischer Optik beruhen, wurden die Messungen und theoretische Überlegungen von der Universität Vigo in Einklang miteinander gebracht.

Messungen für Schienenverkehr und Gebäudeinneres

Eine Vermessung weiterer Szenarien ist bereits geplant. So benötigt man für Anwendungen bei der Eisenbahn eine genaue Kenntnis der Position, die die Schiene, auf der sich der Zug bewegt, mit höchster Zuverlässigkeit identifizieren muss. Doch gerade in Eisenbahnumgebungen gibt es viele Reflektoren, wie Waggons, Oberleitungen, Masten und Gebäude, die wieder andere Einflüsse auf den Signalempfang haben, als dies in der landmobilen Umgebung der Fall ist. Eine Messkampagne für Schienenanwendungen ist daher dringend erforderlich.

Von großer Bedeutung ist auch die Ortung innerhalb von Gebäuden. Für diesen Fall gibt es ebenfalls noch keine hochgenauen und zuverlässigen Messungen. Diese Lücke will das DLR schließen. Die satellitengestützte Ortung ist im Innenhausbereich sehr schwierig, da zum einen Signalabschattungen auftreten: Eine Vielzahl von Satelliten wird nicht mehr empfangbar sein, da die Empfangsleistung zu gering ist. Zum anderen tritt massiver Mehrwege-Empfang auf, der zusätzliche Schwierigkeiten bewirkt. Das Institut arbeitet jedoch auch an Verfahren, die Ortung im Innenhausbereich mittels weiterer Sensorik zu verbessern. Dabei kommen Kurzreichweitenkommunikationssysteme wie Bluetooth, WLAN und RFID genauso in Frage wie Beschleunigungssensoren, elektronischer Kompass und Höhenmesser. Die Sensorfusion kann dann bestmöglich nach dem im DLR entwickelten Soft Location-Prinzip erfolgen. Prototypische Aufbauten wurden bereits getestet und sind sehr vielversprechend.

Autoren:
Uwe-Carsten Fiebig leitet die Abteilung Nachrichtentechnik im DLR-Institut für Kommunikation und Navigation.
Alexander Steingaß ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Nachrichtentechnik und leitete die DLR-Messkampagne.
Andreas Lehner arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter auf dem Gebiet der Mehrwegeausbreitung.