

Antennennachführung auf Fahrzeugen zur mobilen Satellitenkommunikation

Antenna Control on Vehicles for Mobile Satellite Communication

Dipl.-Ing. Tobias Zaiczek, Dr.-Ing. Olaf Enge-Rosenblatt, Dipl.-Ing. Matthias Franke, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Institutsteil Entwurfsautomatisierung, 01069 Dresden, Deutschland;

Dipl.-Ing. (FH) Mario Lorenz, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Projektgruppe Drahtlose Verteilsysteme / Digitaler Rundfunk DVT, 98693 Ilmenau, Deutschland;
olaf.enge@eas.iis.fraunhofer.de

Kurzfassung

Moderne Kommunikationsmittel sind heutzutage üblicherweise nahezu ständig und überall verfügbar. In Ausnahmesituationen (z.B. nach Naturkatastrophen) ist dies jedoch nicht unbedingt gegeben. Der erfolgreiche Einsatz von Rettungskräften hängt dann wesentlich von ausreichenden Kommunikationsmöglichkeiten via Satellit ab. Hier bieten schnell bewegliche Antennen auf Fahrzeugen eine sehr wichtige Option. Im Beitrag wird eine regelungstechnische Lösung für eine Antennennachführung auf Fahrzeugen zur mobilen Satellitenkommunikation vorgestellt. Es werden zwei verschiedene Systeme betrachtet, die wahlweise für verschiedene Einsatzfälle (Fahrzeugstillstand, Fahrt auf Straße, Fahrt im Gelände) geeignet sind. Für die Antennenregelung werden drei Betriebsmodi (Initialisierung, Open Loop, Closed Loop) und die entsprechenden Reglerstrukturen vorgestellt. Die konkrete Gestaltung der Regler ist abhängig von den jeweils zur Verfügung stehenden Eingangsgrößen (Messgrößen, Schätzgrößen). Ausgewählte Simulationsergebnisse werden angegeben.

Abstract

Nowadays, modern communication means are nearly permanently available. However, in exceptional circumstances (e.g. disaster scenarios), this is not necessarily true. A successful operation of rescue forces depends substantially on sufficient communication capabilities via satellite. Fast movable antennas on vehicles may offer a good option. In the paper, a solution for satellite tracking of antennas on vehicles for mobile satellite communication is introduced. Two different systems are considered, which are selectively suitable for different driving modes (vehicle's standstill, driving along a road, driving off-road). Three modes of operation (initialization, open loop, closed loop) and appropriate controller structures are introduced. The controllers' concrete layout depends on the input quantities (measurement, estimation) available at the relevant mode of operation. Selected simulation results are given.

1 Einleitung

Die ständige Verfügbarkeit moderner Kommunikationsmittel (Mobilfunk, Internet) ist heutzutage eine Selbstverständlichkeit. In Katastrophenfällen wie bspw. Erdbeben muss jedoch mit einem Ausfall der bestehenden terrestrischen Kommunikationsinfrastruktur (GSM, UMTS, Festnetz) gerechnet werden. Für den schnellen und koordinierten Einsatz von Rettungskräften ist in solchen Fällen aber eine zeitnahe Kommunikation entscheidend, um neben der notwendigen sprachlichen Verständigung auch bestimmte Daten (z.B. aktuelles Kartenmaterial, Fotos von Vor-Ort-Situationen etc.) über größere Distanzen austauschen zu können.

Hochmobile und breitbandige Kommunikationsmittel, die unabhängig von den terrestrischen Gegebenheiten einsatzfähig sind, bilden damit die Voraussetzung für eine effektive Einsatzplanung und -durchführung. Für diesen Zweck soll eine im Ka-Band (20...30 GHz) operierende Satellitenkommunikation von Fahrzeugen aus realisiert werden.

In diesem Beitrag wird eine regelungstechnische Lösung für eine Antennennachführung auf Fahrzeugen zur mobilen Satellitenkommunikation vorgestellt, die bzgl. der Nachführdynamik besonders hohen Anforderungen gerecht wird. Nach einigen allgemeinen Ausführungen zum Satelliten-Tracking werden zunächst die beiden untersuchten Antennentypen vorgestellt. Anschließend werden die Modellierung und die Vorgehensweise bei der Auslegung der Regler dargelegt. Schließlich werden einige Simulationsergebnisse angegeben.

2 Satelliten-Tracking

Bei der Satellitenkommunikation müssen hinsichtlich der Antennenausrichtung auf den Satelliten exakt definierte Genauigkeiten eingehalten werden. Um benachbarte Satelliten nicht in ihrer Funktion zu beeinträchtigen, muss die Leistung, die nicht in Richtung des Satelliten abgestrahlt wird (Off-Axis-Emissionen) in dem Maße begrenzt werden, wie es internationale Normen vorschreiben (vgl. [2] und Bild 1).

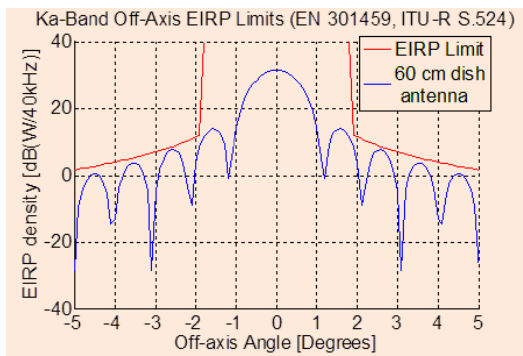


Bild 1 Erlaubte Verteilung der Antennenleistung und tatsächliche Verteilung einer Beispiellantenne

Die Anforderungen an ein System zur Antennennachführung ergeben sich deshalb aus der zu erwartenden Dynamik des antennentragenden Systems. Im Falle eines Fahrzeuges ist zwischen verschiedenen Szenarien des Antennenbetriebes zu unterscheiden:

1. Stillstand (unterbrochen vom gelegentlichen Versetzen des Fahrzeuges an einen anderen Standort),
2. Fahrt auf einer (relativ ebenen) Straße mit mittlerer oder hoher Geschwindigkeit (gekennzeichnet durch geringe und langsame Lageänderungen des Fahrzeuges),
3. Fahrt im Gelände mit mäßiger Geschwindigkeit (gekennzeichnet durch große und hochdynamische Lageänderungen des Fahrzeuges).

Für jeden Betriebsfall soll ein Maximum an Kommunikationsbandbreite hergestellt werden. Der erste Fall gilt etwa für eine regionale Leitstelle. Hier ist eine so genannte High-Gain-Antenne (HG-Antenne) sinnvoll. Der hohe Antennengewinn erfordert relativ große mechanische Abmessungen, erlaubt dafür eine sehr hohe Datenrate und ermöglicht somit eine Kommunikation mit vergleichsweise hohem Komfort. Infolge des Betriebs der Antenne während des Fahrzeugstillstandes ist die Dynamik der Positionsregelung unkritisch. Für den zweiten und dritten Betriebsfall sind bei der Wahl der Antenne zunächst Kommunikationsbandbreite und Bauhöhe gegeneinander abzuwägen. Hoher Bandbreite bei der HG-Antenne steht eine günstige flache Form der Low-Profile-Antenne (LP-Antenne) gegenüber. In Abhängigkeit der zu erwartenden Einsatzszenarien müssen auch dynamische Eigenschaften beachtet werden (ausreichend schnelle Positionsregelung).

Für die Positionsregelung der Antenne ist die Kenntnis der aktuellen Abweichung der Antennenausrichtung (Sende- und Empfangsrichtung der Antenne) vom Satellitenvektor (Vektor in Richtung des Satelliten) notwendig. Zu deren Bestimmung gibt es unterschiedliche Verfahren z.B. das Conical-Scan-Verfahren, das Step-Tracking oder sogenannte Monopuls-Methoden. Diese Verfahren werten die Stärke des einfallenden Satellitensignals in unterschied-

lichen Richtungen aus, um Rückschlüsse auf die eigene Ausrichtung bezüglich des Satelliten zu gewinnen. Auf Einzelheiten dieser Verfahren soll hier nicht weiter eingegangen werden (siehe hierzu z.B. [3], [7] oder auch [1]). Infolge teilweiser Abschattung (durch Gebäude oder Bäume) oder starker Fehlausrichtung stehen diese Messwerte allerdings nicht ständig zur Verfügung. Deshalb ist eine Unterstützung durch weitere Messsignale am Fahrzeug unbedingt erforderlich. Bei unseren Untersuchungen wurden zu diesem Zweck ein inertiales Messsystem, bestehend aus drei Magnetometern (digitaler Kompass), drei Gyroskopen und drei Accelerometern, und hochauflösende Inkrementalgeber in den Drehgelenken eingesetzt. Die Messwerte der inertialen Messsensorik werden über ein erweitertes Kalman-Filter zusammengeführt und der Antennennachführung zur Verfügung gestellt (vgl. [5], [8]).

3 Antennen

Um die jeweilige Eignung für die o.g. Betriebsfälle festzustellen, wurden zwei unterschiedliche Antennen (mit zirkularer Polarisation) untersucht. Das ist zum einen die High-Gain-Antenne, die eine hohe Datenrate aufweist, dafür aber einen relativ hohen Aufbau auf dem Fahrzeug erfordert. Diese ist in Bild 2 dargestellt. Die Positionierung erfolgt rein mechanisch durch Verdrehung um zwei orthogonale Achsen. Diese Antennenform ist vor allem für den stationären Einsatz geeignet. Sie sollte für den ersten Betriebsfall vorgesehen werden. In Abhängigkeit vom konkreten Einsatzfall kann sie aber auch für den zweiten Betriebsfall Verwendung finden.



Bild 2 High-Gain-Antenne¹

Zum anderen wurde die LP-Antenne (vgl. [6]) untersucht (siehe Bild 3). Diese Antenne besteht aus paarweise gleich angeordneten flachen Antennenpaneelen, die mit unterschiedlichem Elevationswinkel auf einer Drehscheibe angebracht sind. Bei dieser Antennenform erfolgt nur die Azimut-Verstellung (Winkel um die Vertikalachse, siehe [9]) mechanisch, während die Elevation (Winkel in Vertikalrichtung)

¹ Quelle: TU Ilmenau, FG Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik

elektrisch über eine geeignete Ansteuerung der unterschiedlich ausgerichteten Antennenpaneele eingestellt wird. So kann ein Winkelbereich von ca. 15° bis 65° in der Elevation überstrichen werden. Die LP-Antenne ist durch eine sehr flache Bauform gekennzeichnet, erreicht aber nur geringere Datenraten. Diese Antennenform ist somit für den Einsatz während der Fahrt konzipiert. Sie sollte in jedem Fall für die dritte aber vorzugsweise auch für die zweite Betriebsart eingesetzt werden.

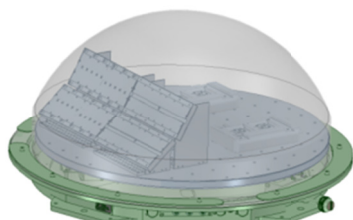


Bild 3 Low-Profile-Antenne²

Das Antennennachführungssystem soll die Antenne auf einem Fahrzeug so stabilisieren, dass diese zu jeder Zeit möglichst genau auf den Zielsatelliten zeigt und damit die abgestrahlten Off-Axis-Emissionen die zulässigen Grenzwerte der spektralen Leistungsdichte entsprechend internationaler Normen [4] nicht überschreiten. Das entspricht für die hier untersuchten Antennen des Ka-Bandes etwa einer maximalen Abweichung der Antennenausrichtung vom Satellitenvektor von $0,5^\circ$. Diese Grenze sollte möglichst permanent auch bei Bewegung des Fahrzeuges eingehalten werden, weil andernfalls die Sendeleistung drastisch verringert werden muss, was wiederum zu einer stark verschlechterten Kommunikationsqualität führt.

4 Modellierung

Für die Auslegung der Antennenantriebe und den durchzuführenden Reglerentwurf wurden zunächst Systemmodelle für beide Antennennachführungssysteme entworfen. Zur Modellierung der Mechanik wurde jeweils ein räumliches Mehrkörpersystem eingesetzt, wobei die Fahrzeughalterung, die Azimut-Aufhängung (Drehtisch) und im Falle der HG-Variante auch die Elevationsaufhängung mit Parabolantenne jeweils durch einen Starrkörper repräsentiert wurden. Die einzelnen Körper wurden dabei durch reibungsbehaftete Drehgelenke (Stribeck-Reibung) miteinander verbunden.

Zur mathematischen Beschreibung wurde ein Fahrzeugkoordinatensystem eingeführt (positive x-Achse in Fahrtrichtung, positive z-Achse nach unten). Das Antennenkoordinatensystem leitet sich daraus durch entsprechende Verdrehungen ab. Dabei zeigt die positive x-Achse im Falle der HG-Variante entlang der

Sende- und Empfangsrichtung der Antenne (siehe Bild 4), während sie im Falle der LP-Variante der Projektion der Sende- und Empfangsrichtung auf die Grundfläche des Drehtellers entspricht (Bild 5).

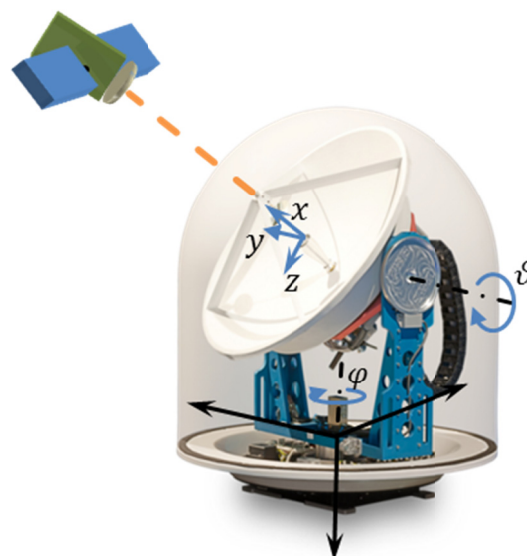


Bild 4 Koordinatensystem an der HG-Antenne

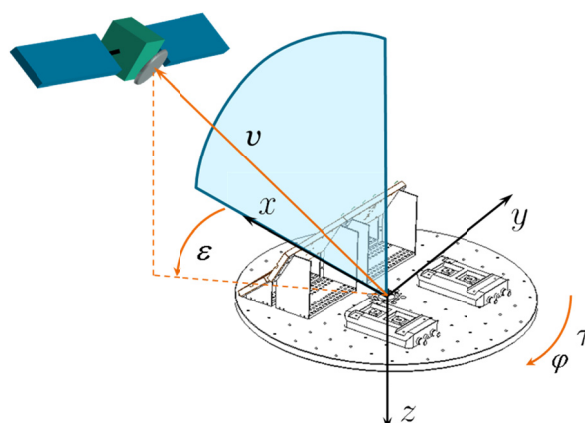


Bild 5 Koordinatensystem an der LP-Antenne

Als Referenzkoordinatensystem wurde das Navigationskoordinatensystem verwendet (positive x-Achse nördlich, positive z-Achse in Richtung der Erdbeschleunigung, vergleiche [9]). Die Erdrotation wurde vernachlässigt. Das Referenzkoordinatensystem kann damit als Inertialsystem betrachtet werden. Der Zielsatellit als geostationärer Satellit wird somit inertial fest. Ziel der Regelung ist es, die Antenne unabhängig von der Bewegung des Fahrzeuges möglichst stabil in Richtung des Satelliten auszurichten, d. h. eine Bewegung bezüglich des Referenzkoordinatensystems möglichst zu verhindern. Die Bewegung des Fahrzeuges muss dabei als Störung angesehen werden, die über die Aufhängung der Antenne entweder direkt oder indirekt deren Bewegung beeinflusst (z.B. infolge Reibung). Einflussfaktoren sind dabei neben der Fahrbahn das dynamische Ver-

² Quelle: TU Ilmenau, FG Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik

Für die Geschwindigkeitsregelung wurden zunächst nur die Informationen des dreiachsigen Gyroskops als Messwerte herangezogen, also die Komponenten ω_x , ω_y und ω_z des Drehvektors $\boldsymbol{\omega}_{Ant}$ bezogen auf das Antennenkoordinatensystem. Aus der Forderung, dass die zeitliche Änderung dieses Winkels durch einen Wert $\dot{\epsilon}_{ref}$ von der überlagerten Positionsregelung vorgegeben wird, folgt für die Abweichung $\Delta\dot{\varphi}$ der zu regelnden Drehgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ des Drehtellers von der benötigten Drehgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_{ref}$ folgende Beziehung:

$$\Delta\dot{\varphi} = -\omega_z + \frac{v_z}{v_x}\omega_x - \dot{\epsilon}_{ref} \sqrt{1 - \left(\frac{v_z}{v_x}\right)^2}$$

Diese Abweichung sollte möglichst klein bleiben, was durch den Einsatz eines PID-Reglers entsprechend

$$\tau = K_p \Delta\dot{\varphi} + K_i \int_{t_0}^t \Delta\dot{\varphi} dt' + K_d \frac{d\Delta\dot{\varphi}}{dt}$$

erreicht wird. Die Komponenten v_x und v_z des Satellitenvektors \boldsymbol{v} im Antennenkoordinatensystem müssen einer entsprechenden Lageschätzung entnommen werden. Diese kann direkt auf der Grundlage der HF-Empfangseinheit erfolgen oder über eine Sensorfusion in einem erweiterten Kalman-Filter (vgl. z.B. [5], [8]).

Für die Entwicklung der Positionsregelung wurde nach einer Gegenüberstellung von verschiedenen Verfahren letztlich ein mechanisches Schwenkverfahren mit integrierend wirkendem Schätzalgorithmus für den Satellitenvektor ausgewählt und implementiert. Der Trajektoriengenerator erzeugt dabei ein zur Ausgangslage symmetrisches Schwenksignal, das der Positionsregelung überlagert wird. Damit der Geschwindigkeitsregelkreis der vorgegebenen Schwenkbewegung folgen kann, muss ein hinreichend glatter Verlauf vom Trajektoriengenerator erzeugt werden. Neben dieser Sollvorgabe berechnet der Trajektoriengenerator gleichzeitig Schätzwerte für die aktuelle Position innerhalb der Schwenkbewegung, die zur Schätzung der Lageabweichung benötigt werden. Der für die Simulation implementierte Positionssensor schätzt ausgehend von der Stärke des HF-Empfangssignals die Abweichung zur idealen Ausrichtung auf den Satelliten. Auf der Basis dieser Schätzwerte wurde ein PD-Regler entworfen, der über den Geschwindigkeitsregelkreis die Position regelt.

Wird für eine gewisse Zeit ein sehr kleiner Positionsfehler geschätzt, so wird die Positionsregelung abgeschaltet und der Schwenkvorgang beendet. Die Ausrichtung auf den Satelliten erfolgt dann allein

durch den Geschwindigkeitsregelkreis („Open Loop“). Sinkt das Empfangssignal unter einen Schwellwert ab, beginnt der Schwenkvorgang abermals. Nach einer entsprechenden Einschwingzeit des Schätzers wird die Positionsregelung wieder zugeschaltet. Dieses Vorgehen bietet mehrere Vorteile. Durch das fehlende Schwenken werden bei guter Ausrichtung die Antriebe geschont, die aufgenommene Leistung in den Antrieben reduziert und die Empfangs- und Sendeleistung erhöht. Erst wenn die Antenne deutlich von der idealen Ausrichtung abweicht, wird die Positionsregelung wieder eingeschaltet, um korrigierend einzugreifen.

5.4 Regelung der High-Gain-Antenne

Die High-Gain-Variante kann in zwei zueinander orthogonalen Achsen bewegt werden – die Elevations- und die Azimutrichtung (Winkel ϑ und φ in Bild 4). Die Antenne gilt als ideal ausgerichtet, wenn der Satellitenvektor in die Sende- und Empfangsrichtung zeigt. Für die Geschwindigkeitsregelung wird gefordert, dass sie die Antenne bezüglich der y- und z-Achse des Antennenkoordinatensystems mit den Referenzwinkelgeschwindigkeiten $\omega_{y,ref}$ und $\omega_{z,ref}$ bewegt.

Für die beiden Drehachsen ergibt sich dann eine Abweichung $\Delta\dot{\vartheta}$ bzw. $\Delta\dot{\varphi}$ der Drehgeschwindigkeit $\dot{\vartheta}$ bzw. $\dot{\varphi}$ von der notwendigen Drehgeschwindigkeit $\dot{\vartheta}_{ref}$ bzw. $\dot{\varphi}_{ref}$ entsprechend den Gleichungen

$$\Delta\dot{\vartheta} = \omega_{y,ref} - \omega_y$$

$$\Delta\dot{\varphi} \cos \vartheta = \omega_{z,ref} - \omega_z$$

mit ω_y und ω_z als den gemessenen Komponenten des Drehvektors bezogen auf das Antennenkoordinatensystem. Zwei separate PID-Regler werden eingesetzt, um die entsprechenden Abweichungen in beiden Achsen klein zu halten:

$$\tau_{\vartheta} = K_{p,\vartheta} \Delta\dot{\vartheta} + K_{i,\vartheta} \int_{t_0}^t \Delta\dot{\vartheta} dt' + K_{d,\vartheta} \frac{d\Delta\dot{\vartheta}}{dt}$$

$$\tau_{\varphi} = K_{p,\varphi} \Delta\dot{\varphi} + K_{i,\varphi} \int_{t_0}^t \Delta\dot{\varphi} dt' + K_{d,\varphi} \frac{d\Delta\dot{\varphi}}{dt}$$

Die beiden Winkelgeschwindigkeiten $\omega_{y,ref}$ und $\omega_{z,ref}$ sind die Ausgänge der Positionsregelung. Hierfür stehen im Falle der High-Gain-Antenne zwei Monopuls-Signale zur Verfügung, die innerhalb des Empfangsbereichs in zwei Achsen die Abweichung der rotatorischen Lage gegenüber der exakten Ausrichtung auf den Satelliten angeben. Zu deren Ausregelung wird ebenfalls ein PID-Regler eingesetzt, dessen Stellsignal dann als Führungssignal des zugeordneten Geschwindigkeitsreglers dient.

6 Simulationsergebnisse

Aus der Vielzahl an Simulationsergebnissen werden hier beispielhaft die zwei herausgegriffen, die für jede der beiden Antennen das Verhalten der Geschwindigkeitsregelung (Open-Loop-Modus) zeigen. Bild 7 zeigt dabei die Abweichung ϵ der LP-Antenne in Azimutrichtung bei der Fahrt durch schweres Gelände mit einem Geländewagen.

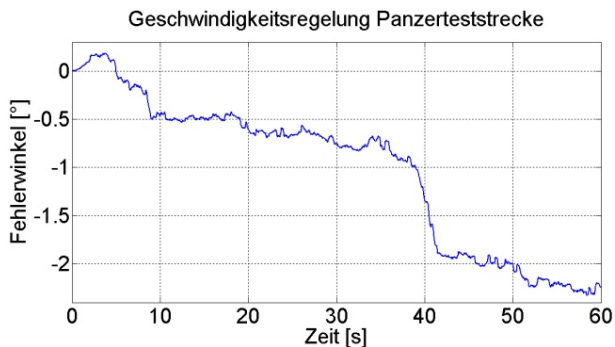


Bild 7 Fehler der Geschwindigkeitsregelung (Open Loop) in schwerem Gelände (Panzerteststrecke)

Für die Fahrtdauer von ca. 60 Sekunden ergab sich dabei für ϵ eine Standardabweichung von kleiner als 0.8° . Wie in Bild 7 erkennbar driftet die Antenne aufgrund der Grenzen der eingesetzten Sensoren in Bezug auf Rauschen und Langzeitstabilität im Open-Loop-Modus vergleichsweise schnell aus dem zulässigen Sendebereich.

Deutlich kleinere Werte ergaben sich bei der Abweichung für die Geschwindigkeitsregelung der HG-Antenne bei einer Autobahnfahrt des Geländewagens (vgl. Bild 8). Die Standardabweichung des Gesamtfehlers ist hier kleiner als 0.4° bei einer Fahrtdauer von 350 Sekunden.

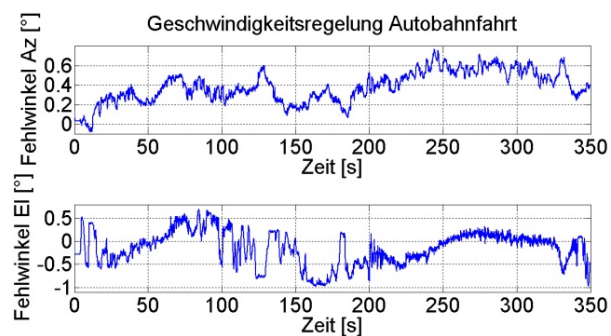


Bild 8 Fehler der Geschwindigkeitsregelung (Open Loop) bei Autobahnfahrt

Eine Verbesserung der Ergebnisse wird zukünftig einerseits durch eine fortschreitende Entwicklung der MEMS-Sensortechnologie und andererseits durch den möglichen Einsatz weiterer Sensoren (Radsensoren, GPS) erwartet.

7 Zusammenfassung

Im Beitrag werden zwei Antennen (inklusive Nachführmechanik) zur Satellitenkommunikation für den mobilen Einsatz auf Fahrzeugen vorgestellt. Die jeweiligen Nachführsysteme sind durch unterschiedliche kinematische Strukturen gekennzeichnet. Für beide Systeme werden geeignete Regelstrategien aufgezeigt, die mit Hilfe von Modellen der Antennenachführdynamik ausgelegt und getestet wurden. Die Tests erfolgten für verschiedene Betriebsmodi bzw. Fahrzeugsituationen. Ausgewählte Simulationsergebnisse werden angegeben.

Danksagung

Die Autoren möchten H. Bayer und A. Krauß von der TU Ilmenau danken, die maßgeblich die Antennen entworfen und gebaut haben.

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wurde von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 50 YB 0914 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan und M. A. Hein: A Dual-Band Multimode Monopulse Tracking Antenna for Land-Mobile Satellite Communications in Ka-Band. *EuCAP'2012*, Prague, Czech Republic, 2012.
- [2] ETSI Norm EN 301459: Harmonized EN for Satellite Interactive Terminals transmitting towards satellites in geostationary orbits in the 29.5 to 30 GHz Frequency band.
- [3] G. Hawkins, D. Edwards, J. McGeehan: Tracking systems for satellite communications. *Radar and Signal Processing, IEEE Proceedings*, vol. 135, pp. 393–407, 1988.
- [4] ITU Norm ITU-R S.524
- [5] A.H. Jaszewski: *Stochastic Processes and Filtering Theory*. Academic Press, 1970.
- [6] A. Krauss, H. Bayer, C. Volmer und et al.: Low-Profile Antenna for Mobile Ka-Band Satellite Communications. In *Proc. 32nd ESA Antenna Workshop*, Noordwijk, The Netherlands, 2010.
- [7] E.A. Marsh: *Inertially Stabilized Platforms for SATCOM-On-The-Move Applications: A Hybrid Open/Closed-Loop Antenna Pointing Strategy*. MIT, 2008.
- [8] D.H. Titterton, J.L. Weston: *Strapdown Inertial Navigation Technology*. Second Edition, AIAA and IEE, 2004.
- [9] J. Wendel: *Integrierte Navigationssysteme*. 2. Auflage, Oldenbourg-Verlag, 2011.