

ANWENDUNG VON MODERNER RADARTECHNIK IN DER STRÖMUNGSANALYSE

APPLICATION OF THE MODERN RADAR TECHNOLOGY FOR THE ANALYSIS OF THE TURBULENT THERMAL CONVECTION

R. Zetik*, E. Lobutova und C. Resagk****

* Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau

**Fakultät Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau
rudolf.zetik@tu-ilmenau.de

Schlagworte: 3D PTV, Radartechnik
Key words: 3D PTV, radar technology

Zusammenfassung

In dem Artikel wurde eine neue Messmethode für die Strömungsanalyse vorgestellt. Die Methode basiert auf der Anwendung von der UWB Radar-Technik. Anhand der 3D Radar-Lokalisierung von einem Tracerpartikel, das sich mit der Strömung bewegt kann die Luftströmungen in großen Räumen analysieren werden. Die Methode wurde in einem 3 m x 4 m x 3 m großen Raum getestet.

Einleitung

Die Analyse von kohärenten Strukturen in turbulenten Strömungen in Luft und Wasser stellt seit vielen Jahren eine große Herausforderung für die Strömungsmesstechnik dar. Insbesondere bereitet die berührungslose Untersuchung von thermischen Konvektionsströmungen in großen Räumen Probleme, da hier wegen der Komplexität und Instabilität der Geschwindigkeitsfelder nur 3D-Verfahren zu quantitativen Ergebnissen führen. Dafür werden bisher optische Feldmessverfahren wie 3D-PTV eingesetzt (Lobutova et al. 2008), welche je- doch einen sehr großen Aufwand an Aufnahme-, Beleuchtungs-, und Bildverarbeitungstechnik erfordern. Eine interessante Alternative stellt die junge Ultra-Breitband(UWB)-Radartechnik dar. UWB-Sensoren nutzen die Eigenschaften elektromagnetischer Felder mit extrem großer Bandbreite (Zetik et al. 2007). Sie dienen dazu, Informationen über den Zustand ihrer Umgebung zerstörungsfrei, berührungslos und mit hoher Auflösung zu gewinnen. Neben den Anwendungen in der Bauindustrie, Lebensmittelindustrie, Landwirtschaft, Biotechnologie, Medizin, im Umweltschutz, können UWB-Radar-Sensoren zur hochauflösenden Objekterkennung und Positionsbestimmung im Nahbereich dienen.

UWB Radar Technik in Strömungsanalyse

UWB-Radar-Sensoren nutzen elektromagnetische Wellen (EM) im gesamten Frequenzband von 100MHz über 10GHz. Damit erreichen sie eine relative Bandbreite fast bis 200%. Die große absolute Bandbreite erlaubt eine sehr gute Entfernungsauflösung. Das ermöglicht Lokalisierung und Identifizierung von benachbarten Objekten. Im Gegensatz zu den schmalbandigen Systemen arbeiten sie präzise und stabil auch in einer Umgebung mit vielen Reflexionen und gewinnen deutlich mehr Information über die Testobjekte. Im Fall einer Messung mit hohem SNR (Signal-Rauschen Verhältnis) und präzise Kalibrierung kann man sogar eine Entfernungsgenauigkeit unter einem Millimeter erreichen. Die tiefen Frequenzen in den Radarsignalen erlauben eine gute Durchdringung durch nichtmetallische Materialien und damit ermöglichen Erkennung und Lokalisierung von Objekten auch durch nichtmetallische Hindernisse wie z.B. Wände. Alle diese Eigenschaften prädestinieren die UWB-Radar-Sensoren für den Einsatz als Lokalisierungssysteme, die auch in Gebäuden einsatzfähig sind.

In der Strömungsmesstechnik können mit dieser UWB Technik Luftströmungen in großen Räumen mittels geeigneten Tracerpartikeln dreidimensional detektiert werden. Hierzu kommen metallisierte, heliumgefühlte Latexballons mit einem Durchmesser von ca. 20 cm zum Einsatz. Das System ist in der Lage, die Bewegung einzelner Ballons über einen langen Zeitraum zu verfolgen und die Ortskoordinaten zu berechnen. Das Messszenario ist auf Abb. 1 dargestellt. Eine Sende Antenne (Tx) sendet eine EM Welle. Die Welle ist von einem metallisierten, heliumgefühlten Latexballon reflektiert und mit mehreren Antennen (Rx1-Rx4) empfangen. Von den gemessenen Impulsantworten wird die Entfernung vom Ballon zu den Antennen bestimmt. Aus den Entfernungsdaten und den bekannten Antennenkoordinaten sind die Ortskoordinaten des Latexballons leicht zu bestimmen. Das 3D Verfahren benötigt mindestens 3 Kanäle (Empfangsantennen) um die Ortskoordinaten eindeutig zu bestimmen. Mit mehreren Antennen erhöht man die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit von der Schätzung.

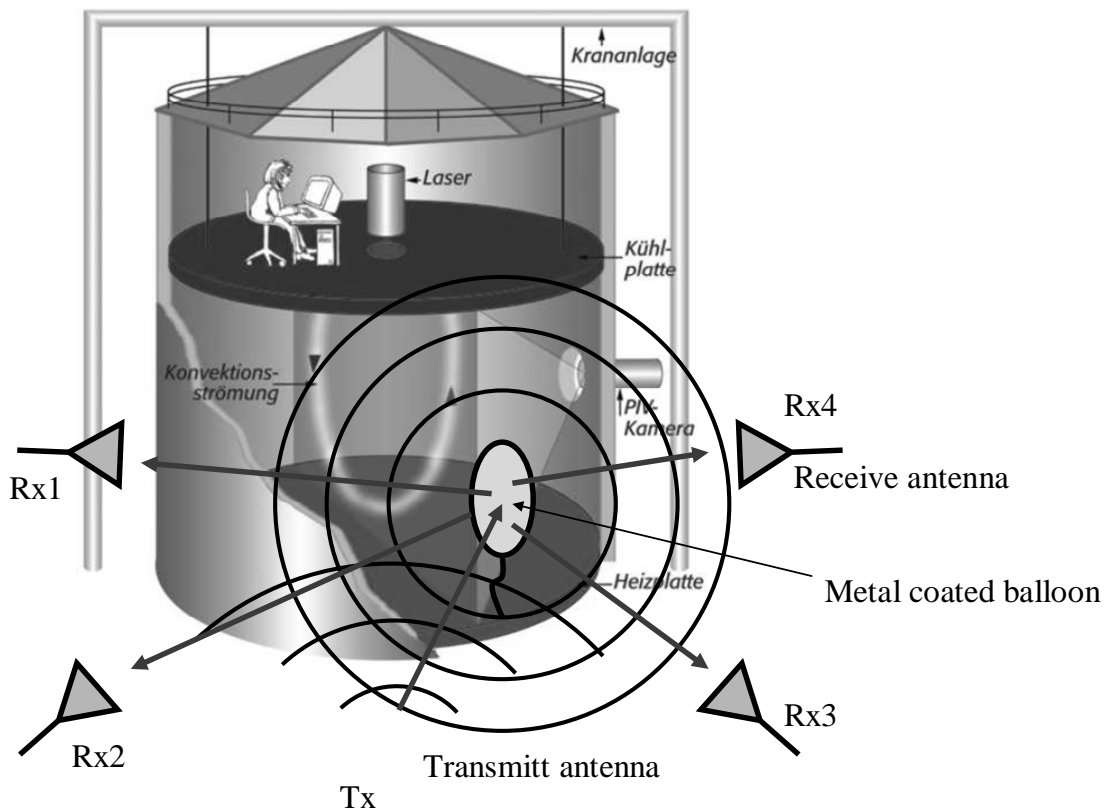


Abb. 1: Messszenario für die Strömungsanalyse am Beispiel des Konvektionsexperiments „Ilmenauer Fass“

Messverfahren

Die vorgeschlagene Messmethode für die Strömungsanalyse besteht aus folgenden Schritten:

- Messung,
- Parameterschätzung,
- Datenfusion.

In dem ersten Schritt misst man mit dem UWB-Radar die Impulsantworten während der Bewegung des metallisierten, heliumgefühlten Latexballons. Die Echtzeitmessung ist durch eine große Messgeschwindigkeit des UWB Radars ermöglicht. Zum Beispiel können M-Sequenz-Radarsysteme (Sachs et al. 2007) eine Impulsantwort in 56 ns messen. In diesem Fall kann man trotz der Bewegung des Latexballons das Messszenario als eine statische Umgebung betrachten und damit ist der Messfehler vernachlässigbar. Die Messung ergibt eine Reihe von unkalibrierten Impulsantworten. Zuerst muss man die Impulsantworten kalibrieren. Damit wird der Einfluss vom Messsystem (Radar, Messkabel, Antennen) beseitigt. Ein Beispiel von kalibrierten Daten ist auf Abb. 22 dargestellt worden. Die hori-

zontale Achse ist die Zeit von der Messung und die vertikale Achse ist die Zeitverzögerung. Die Impulsantwort ist die vertikale Linie, dessen Amplitude dunkel dargestellt ist.

Ziel des zweiten Schritts ist es, von den kalibrierten Messdaten ausgewählte Parameter zu schätzen. Es gibt ganze Reihe von möglichen Parametern, die die Information über der Position von dem Latexballon beinhalten. Amplitude, Empfangsrichtung, oder Zeitverzögerung einer EM Welle, die auf dem Latexballon reflektiert wird, beinhalten Information, die für die Ortbestimmung notwendig ist. Die Zeitverzögerung ist in der UWB Radartechnik ein bevorzugter Schätzparameter, da die UWB Radartechnik durch eine ausgezeichnete Zeitauflösung gekennzeichnet ist. Um die Zeitverzögerung der EM Welle, die von einer Sendeantenne ausgesendet ist und von dem Latexballon zu der Empfangsantenne reflektiert wird bestimmen zu können, muss man diese Welle aus den Messdaten separieren. Der Latexballon ist aber nur ein kleines Objekt, welches die ankommende EM Welle in alle Richtungen streut. Die gesuchte reflektierte EM-Welle ist anderen deutlich stärkeren Signale die von anderen größeren Objekten (z. B. Wände) überlagert. Diesen Effekt kann man in Abb. 2 beobachten. Die dargestellten Messdaten beinhalten:

- eine direkte Welle, die sich von der Sendeantenne zu der Empfangsantenne ausbreitet (eine horizontale Linie um die Zeitverzögerung 5,ns),
- eine Anzahl von starken Reflektionen von verschiedenen Objekten der Umgebung (z.B. um die Zeitverzögerung 8,ns, 10,5ns)
- ein zeitveränderliches Signal, das von einem Latexballon reflektiert worden ist (sinusförmig und sehr schwach, ca. 8ns)

Dieses Problem lässt sich mit einer in der Radartechnik bekannte Methode lösen. Diese Methode wird häufig als Hintergrundabzug bezeichnet (Piccardi 2004) und ist für eine Detektion von bewegten Objekten in einer statischen Umgebung entwickelt worden. Die statische Umgebung wird als Hintergrund bezeichnet, er verursacht immer die gleichen Signale in den gemessenen Impulsantworten. Die statischen Komponenten werden dann von gemessenen Impulsantworten abgezogen. Damit lassen sich die schwache zeitveränderliche Signale in den Messdaten hervorheben. Abb. 3 zeigt die Messdaten nach einer Signalverarbeitung mit Hintergrundabzug. Alle statischen Komponenten in den Impulsantworten sind verschwunden und schwache Reflektionen sind jetzt deutlich zu erkennen. Von diesen Daten kann man die gesuchte Zeitverzögerung mit Hilfe von Matched Filter, Maximum Likelihood basierten Methoden oder einfache Maximumsuche zu schätzen.

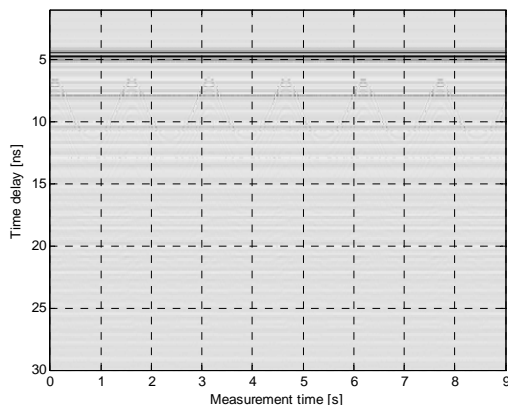


Abb. 2: Kalibrierte Impulsantworten

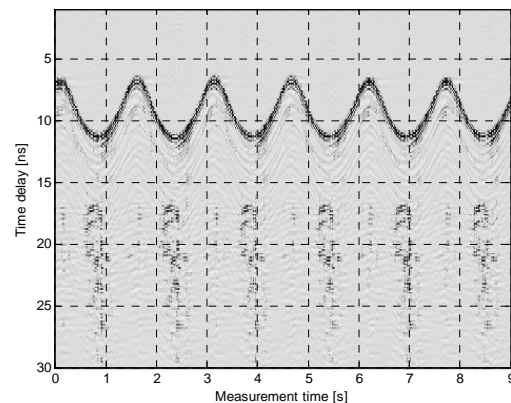


Abb. 3: Impulsantworten nach dem Hintergrundabzug

Die geschätzte Zeitverzögerung ist mit der Entfernung vom Latexballon zur Sende- und Empfangsantenne verknüpft. Für eine gegebene Zeitverzögerung und eine bestimmte räumliche Anordnung von Sende- und Empfangsantenne bestimmt die Zeitverzögerung nicht die Ortskoordinaten des Ballons, beschränkt aber die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Ballonposition auf einen Ellipsoid. Das Ellipsoid wird mit folgender Gleichung beschrieben:

$$\frac{(x - x_i)^2}{a_i^2} + \frac{(y - y_i)^2}{b_i^2} + \frac{(z - z_i)^2}{c_i^2} = 1$$

Hier sind $[x, y, z]$ die unbekanntes räumlichen Koordinaten des Ballons, $[x_i, y_i, z_i]$ sind gemittelte Koordinaten von der Sende- und Empfangsantenne, a_i, b_i und c_i sind die Achsen des Ellipsoids, die von der gemessene Zeitverzögerung bestimmt sind. Um eine genaue Position von dem Latexballon bestimmen zu können, muss man die Daten von mehreren Antennepaaren zusammenfügen. Diese Datenfusion ist das Ziel des dritten Schritts des Algorithmus. Es gibt mehrere Methoden wie man ein Gleichungssystem, das aus elliptischen Gleichungen besteht, lösen kann. Für mehrere Details wird der Leser auf (Sayed et al. 2005) hingewiesen.

Messbeispiel

Als Messgerät wurde ein mehrkanaliges UWB Messgerät (Sounder), das in Echtzeit messen kann benutzt. Der Sounder (Kmec et al. 2005) wurde an der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit MEODAT GmbH entwickelt und hergestellt. Der Sounder hat 2 Sender und 4 Empfänger. Er kann bis 50 Impulsantworten per Sekunde messen. Die Länge der Impulsantwort beträgt ca. 585 ns. Damit lassen sich theoretisch Objekte in einen Raum bis zu 50 m x 50 m x 50 m Größe eindeutig lokalisieren.



Abb. 4: UWB Messgerät

Die Erprobung der neuen Messmethode in der Strömungsanalyse erfolgte zunächst in einem 3 m x 4 m x 3 m großen Raum mit einer Sende- und zwei Empfangsantenne. Mit zwei Kanälen (1 Sende- und 2 Empfangsantennen) lässt sich nur eine 2D Lokalisierung realisieren. Deswegen wurde einen metallisierten Latexballon an einem Faden befestigt und entlang einer horizontalen kreisförmigen Bahn bewegt. Alle drei Antennen wurden in gleiche Höhe in dem Raum angeordnet. Die Messanordnung ist auf Abb. 5 gezeigt.

Die gemessenen und verarbeiteten Daten wurden schon auf Abb. 2 und 3 vorgestellt. Die Zeitverzögerungen wurden mit einer einfachen Maximumssuche geschätzt, danach interpoliert und mit einem Median-Filter geglättet. Die daraus resultierenden Entfernungskurven für beide Empfangsantennen sind auf Abb. 6 zu sehen.

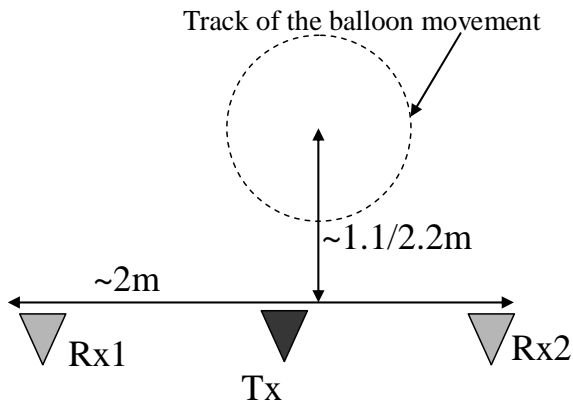


Abb. 5: Messanordnung

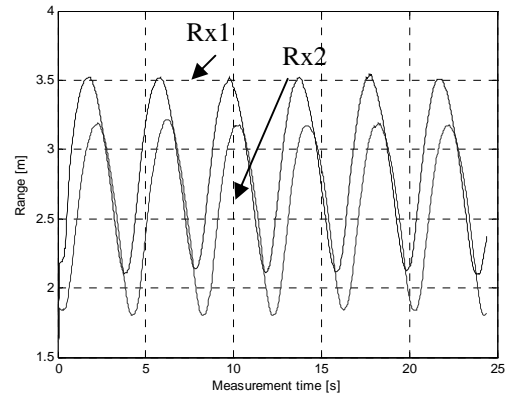


Abb. 6: Geschätzte Entfernungsdaten

Die Ortkoordinaten wurden von einem Gleichungssystem mit 2 elliptischen Gleichungen gelöst und das Ergebnis ist auf Abb. 7 gezeigt. Zuerst wurde der Ballon mit kleinerer Geschwindigkeit entlang einer kreisförmigen Bahn bewegt (schwarze Linie in der Abbildung). Danach sind die Antennen verschoben worden und die Umfangsgeschwindigkeit wurde erhöht. Der Ballon wurde zusätzlich radial ausgelenkt, so dass seine Bewegungstrajektorie unregelmäßig wurde. Beide Effekte sind auf Abb. 7 zu sehen (graue Linie). Die neue unregelmäßige Bewegungstrajektorie hat einen größeren Durchmesser.

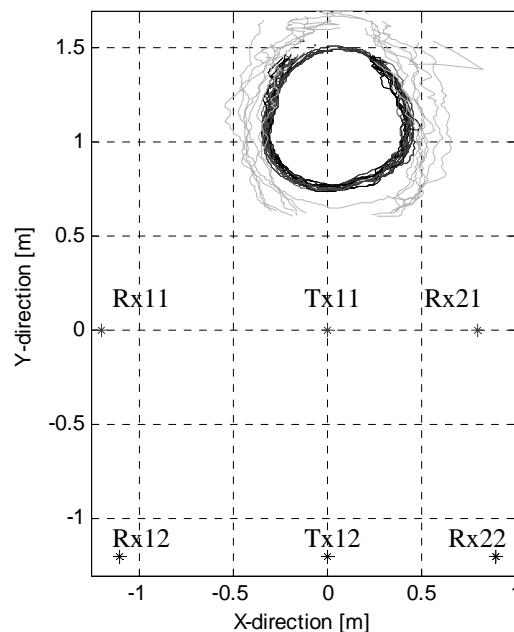


Abb. 7: Gemessene Trajektorien von einem Latexballon (schwarz - kreisförmige regelmäßige Bewegung und Antennen Rx11, Tx11, Rx21; grau - kreisförmige unregelmäßige Bewegung und Antennen Rx12, Tx12, Rx22)

Zusammenfassung

Durch die Rekonstruktion einer kreisförmigen Trajektorie eines Ballons mittels der UWB-Radar-Messdaten konnte eine räumliche Auflösung von 2 cm und eine zeitliche Auflösung von 50 Positionen pro Sekunde erreicht werden. Grundsätzlich können bei diesem Verfahren auch wesentlich kleinere Tracerpartikel verwendet werden, wenn ihre Dichte an die des Fluids angepasst werden können. In der Zukunft wird die Methode in 3D in dem Konvektionsforschungsgerät „Ilmenauer Fass“ (Abb. 1) getestet.

Dankesworte

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsarbeiten im Rahmen des EU-IST Program FP7, Projekt EUWB.

Literatur

- E. Lobutova, C. Resagk, R. Rank, D. Müller, T. Putze, H.-G. Maas, 2008: „Flow structures in air convection using 3D particle tracking velocimetry with soap bubbles and balloons“, 13th Int. Symp. Flow Visualization, Nice, accepted
- R.Zetik, J.Sachs, R.Thomä, 2007: “UWB Short Range Radar Sensing”, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Volume 9, Issue 1. April
- J. Sachs, R. Herrmann, M. Kmec, M. Helbig, K. Schilling, 2007: “Recent Advances and Applications of M-Sequence based Ultra-Wideband Sensors”, ICUWB, Singapore, September
- M. Piccardi, 2004: “Background subtraction techniques: a review”, in Proc. of IEEE SMC 2004 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, The Netherlands, October
- A.H. Sayed,; Tarighat, A.; N. Khajehnouri, 2005: “Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information”, IEEE Signal Processing Magazine, Volume 22, Issue 4, pp. 24-40 July
- M. Kmec, J. Sachs, P. Peyerl, P. Rauschenbach, R. Thomä, R. Zetik, 2005: “A novel Ultra-Wideband real-time MIMO Channel Sounder Architecture”, XXVIIIth General Assembly of URSI, New Delhi, India, October 23 –29