



Traditio et Innovatio

# Beyond the spatio-temporal limits of atmospheric radars: Inverse problem techniques and MIMO systems

A Dissertation

Presented to the Faculty of Computer Science and Electrical Engineering  
at the University of Rostock

by  
Juan M. E. Urco Cordero  
November 2020

# Chapter 6

---

## *Summary and conclusions*

A comprehensive understanding of the processes in the atmosphere at their different spatio-temporal scales would require global and continuous observations at high spatio-temporal resolution. Measurements at mesosphere and lower thermosphere (MLT) altitudes are hard to obtain routinely because current instruments and remote sensing techniques only provide scarce or local observations. An important investment in observational infrastructure could dramatically improve the understanding of the complex MLT dynamics. However, such deployment is prohibitively costly.

This work proposes the use of MIMO techniques to improve the capability of current atmospheric radars, with a special focus on observations of the MLT region. To show the advantage of MIMO systems over conventional techniques, Chapter 2 describes basic concepts regarding atmospheric radars and their limitations, such as the signal model, the scattering mechanisms, and state-of-the-art algorithms to estimate radar parameters. One of the main limitations of existing atmospheric radar systems is their limited spatial resolution in the horizontal direction, which restricts the characterization of small-scale and mesoscale dynamics. The spatial resolution in a radar is limited by the antenna size. To increase the spatial resolution, a larger antenna is required.

Chapter 3 introduces the MIMO technique, which is used to improve the performance of atmospheric radars, namely, the spatial resolution and observational coverage. MIMO

employs multiple transmitting antennas to illuminate the same target and multiple receiving antennas to get independent measurements. In the case of existing radars, MIMO is done by dividing the available transmitting antenna array into sub-arrays and splitting the total transmitting power among the subarrays. Depending on the transmit diversity used, MIMO might cause either a reduction in the transmitted power (time diversity) or a cross-interference between transmitted signals (waveform diversity). The calculations show that time diversity can only be applied to observe strong radar targets with long correlation times. Whereas, waveform diversity is recommended to be used in modern systems with capability to generate multiple transmit waveforms. A waveform design technique based on pseudo-random codes is proposed to reduce the cross-interference between transmitted signals due to its performance and scalability (independent of the number of transmitters). In general, waveform diversity should be used over time diversity, but it requires modern hardware and bi-static configurations.

Chapter 4 shows results of the first MIMO implementation to image PMSE in 4D using the MAARSY radar. The transmit diversity employed was time diversity since PMSE are very strong radar echoes with relatively long correlation times. This configuration lowered the time resolution and the transmitted power per antenna but it allowed to improve the radar image's spatial resolution and accuracy by a factor of 2. Additionally, the MaxEnt algorithm was employed to improve the image resolution even more. The combination of MIMO and MaxEnt resulted in PMSE measurements with an unprecedented angular resolution, six times better than the nominal MAARSY angular resolution, i.e., 0.6°. Such results allowed for the first time to resolve km-scale structures from PMSE observations [Cha+20].

Another important factor that limits the spatial resolution is associated to the dynamic nature of the structures being imaged. Drifting structures limit the spatial resolution achieved by any method. To deal with drifting structures, I am exploring tracking techniques based on Kalman Filter and the Expectation-Maximization algorithm. The results will be published in an additional manuscript.

Characterization of winds in the MLT region over a wide range of spatial scales is crucial to understand the complex dynamics in the atmosphere. Typically, specular meteor radars consisting of one transmitting antenna and five receiving antennas in an interferometric configuration are used for this purpose. Chapter 5 describes a novel technology

for detecting meteor trail echoes using both multiple transmitters and multiple receivers (MIMO) in an interferometric configuration. Compared to conventional meteor radar networks, the advantage of this novel MIMO network is the significantly higher number of Tx-Rx links, which results in more accurate and larger meteor detections per day. For the first time, a unique dataset consisting in more than 120k meteor detections in a day were collected using this multistatic MIMO meteor radar. Compared to the 10k meteor detections obtained with standard specular meteor radars, the 120k detections allowed to resolve the MLT dynamics over a wide range of spatial scales, 50 km to 500 km [Vie+19]. Although the larger number of transmitting stations operating at the same frequency in the multistatic MIMO meteor radar increases the total number of Tx-Rx links, and thus, the number of meteor detections, they interfere each other degrading the signal to interference ratio. An advanced algorithm based on compressed sensing was proposed to get rid of the cross-interference between transmitted signals and to decouple the reflected signals originated at different transmitters properly.

A multistatic meteor radar employing MIMO can be seen as the global position system (GPS) satellite system where a number of transmitting stations can be deployed across to a region, country, or continent. And the receiving systems can be added later according to the needs. The success of the GPS network lies in that the receivers are cheap and easy to install. Currently, there are thousands of GPS receivers on the ground and on low-orbiting satellites.

Similarly, the main advantage of the proposed multistatic MISO meteor network is that this system is scalable. We could start deploying in a continental region a few transmitting stations consisting of five antennas each and a few receiving stations consisting of one antenna each. Later, more receiving stations can be added increasing the number of measurements multiplicatively. With an efficient, cheap, and simple receiving system, the network might be extended over the whole continent. It was proved that the required receiving antenna for this system could be installed in small places like gardens, roofs, courtyards, etc., without affecting the environment. We now require to develop a cheap receiving system. The transmitting and receiving stations might be seen as a mimic of the GPS satellites transmitters and the ground based receivers of a GPS system, respectively, with a similar impact regarding observations of the atmosphere.

A natural next step of this work is the deployment of the proposed multistatic radar system to study the MLT in regional or continental scales. Although this is an ambitious

## CHAPTER 6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

plan and it is out of the scope of this thesis, the MIT Haystack observatory has recently got a proposal accepted to build a distributed MIMO meteor radar network based on the results of this work in the US [National Science Foundation, award number 1933005].

# Chapter 7

## Zusammenfassung und Fazit

Ein umfassendes Verständnis der Prozesse in der Atmosphäre auf ihren verschiedenen räumlich-zeitlichen Skalen würde globale und kontinuierliche Beobachtungen erfordern. Es ist schwierig, regelmäßig Messwerte zur oberen Atmosphäre zu erlangen, da die aktuell verfügbaren Fernerkundungstechniken wenige oder nur lokale Beobachtungen liefern. Eine Investition in die Beobachtungsinfrastruktur, die das Verständnis der komplexen Dynamik der MLT-Region drastisch verbessern könnte, ist zwar wichtig, jedoch äußerst kostspielig.

In dieser Ausarbeitung wird der Vorschlag gemacht, anhand von MIMO-Techniken die Fähigkeit von Atmosphärenradargeräten zu verbessern, die MLT-Region zu erkunden. Um den Vorteil von MIMO-Systemen gegenüber konventionellen Radargeräten aufzuzeigen, beginnt Kapitel 2 mit einer Beschreibung der wesentlichen Konzepte, auf deren Basis Atmosphärenradargeräte arbeiten, und der damit einhergehenden Einschränkungen. Da wären zum Beispiel das Signalmodel, die Streuungsmechanismen und speziell entwickelte Algorithmen zur Schätzung der Radarparameter. Die größte Einschränkung konventioneller Radargeräte ist ihre begrenzte räumliche Auflösung, bedingt durch die Größe der Antenne. Um die räumliche Auflösung zu erhöhen, müssten wir größere Antennen herstellen. Kapitel 3 stellt die MIMO-Technik vor, die genutzt wird, um die Leistung von Atmosphärenradargeräten zu verbessern, indem sie räumliche Auflösung und

Reichweite erhöht. MIMO verwendet mehrere Sendeantennen zur Ausleuchtung derselben Ziels und mehrere Empfangsantennen zum Empfangen voneinander unabhängiger Messwerte. Bei den existierenden Radargeräten wird MIMO eingesetzt, indem die zur Verfügung stehende Sendeantennengruppe in Untergruppen eingeteilt wird und die gesamte Übertragungsenergie zwischen diesen Untergruppen aufgeteilt wird. In Abhängigkeit von der verwendeten Sendediversität kann MIMO entweder eine Reduzierung der übertragenen Energie (Zeitdiversität) oder eine Kreuzinterferenz zwischen den übertragenen Signalen (Schwingungsverlaufsdiversität) verursachen. Berechnungen zeigen, dass Zeitdiversität nur zur Beobachtung von starken Radarzielen mit langen Korrelationszeiten verwendet werden kann. Schwingungsverlaufsdiversität hingegen empfiehlt sich in modernen Systemen mit der Fähigkeit, bei der Übertragung mehrere verschiedene Schwingungsverläufe zu generieren. Eine Schwingungsverlaufsgestaltungstechnik auf der Basis von Pseudozufallscodes soll aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit und Skalierbarkeit die Kreuzinterferenzen zwischen den übertragenen Signalen (unabhängig von der Zahl der Überträger) reduzieren. Grundsätzlich ist eine Nutzung der Schwingungsverlaufsdiversität der Nutzung von Zeitdiversität vorzuziehen. Dabei sind jedoch mehr moderne Hardware und bistatische Konfigurationen notwendig. Kapitel 4 zeigt die Ergebnisse des ersten Einsatzes von MIMO zur bildlichen Darstellung von PMSE in 3D unter Nutzung des MAARSY-Radars. Die dort verwendete Sendediversität war Zeitdiversität, da PMSE sehr starke Radarechos mit relativ langen Korrelationszeiten sind. Diese Konfiguration reduzierte die zeitliche Auflösung und die pro Antenne übertragene Energie, ließ jedoch eine Verbesserung der räumlichen Auflösung des Radarbilds und der Genauigkeit um den Faktor 2 zu. Zudem wurde der MaxEnt-Algorithmus verwendet, um die Bildauflösung weiter zu verbessern. Die Kombination von MIMO und MaxEnt resultierte in PMSE-Messergebnissen mit beispielloser Winkelauflösung, sechsmal besser als die Nominalwinkelauflösung des MAARSY-Radars. Durch diese Ergebnisse konnten zum ersten Mal Strukturen in Kilometerdimensionen aus PMSE-Beobachtungen aufgelöst werden. Die Charakterisierung der Winde in der MLT-Region über eine große Spanne räumlicher Skalen ist entscheidend für das Verständnis der komplexen Dynamik der Atmosphäre. Typischerweise werden zu diesem Zweck spiegelnde Meteorradiare verwendet, die aus einer Sendeantenne und fünf Empfangsantennen in einer interferometrischen Konfiguration bestehen. Kapitel 5 beschreibt eine neuartige Technologie zum Detektieren von Meteorschweif-Echos, die sowohl mehrere Sendeantennen als auch mehrere Empfangsantennen in interferometrischer Konfiguration verwendet. Der Vorteil dieser Konfiguration im Vergleich zu konventionellen Meteorradar-Netzwerken ist die deutlich höhere Zahl von Tx-Rx-Verbindungen mit dem Ergebnis genauerer und höherer Meteordetektionen pro Tag. Unter Nutzung dieses multistatischen MIMO-

Meteorradsars wurde erstmalig ein einzigartiger Datensatz von Messergebnissen aus mehr als 120.000 Meteor detektionen pro Tag gesammelt. Verglichen mit den 10.000 Meteor detektionen, die man mit standardmäßigen Spiegelmeteorradergeräten erhält, ließen diese 120.000 Detektionen die Auflösung der Energiespektren auf eine große Bandbreite räumlicher Maßstabsebenen zu. Obwohl die Vielzahl der Sendestationen bei MIMO die Gesamtzahl der Tx-Rx-Verbindungen erhöht, wird die Signal-Interferenz-Ratio vermindert. Es wird ein fortgeschrittener Algorithmus auf der Basis komprimierter Erfassung präsentiert, der die reflektierten Signale, die von unterschiedlichen Sendern stammen, entkoppelt und so die Kreuzinterferenzen zwischen den übertragenen Signalen deutlich reduziert. Ein multistatischer Meteorradar unter Anwendung von MIMO kann als ein GPS-Satellitensystem betrachtet werden, bei dem mehrere Sendestationen über eine Region, ein Land oder einen Kontinent hinweg stationiert werden können. Die Empfängersysteme können später nach Bedarf hinzugefügt werden. Der Erfolg des GPS-Netzwerkes liegt darin, dass die Empfänger billig und leicht zu installieren sind. Derzeitig gibt es Tausende GPS-Empfänger auf dem Boden oder auf tieffliegenden Satelliten. Das ist auch der Hauptvorteil des vorgeschlagenen Meteor-MISO-Systems, das aus fünf Sendeantennen und nur einer Empfängerantenne besteht. Es wurde nachgewiesen, dass die Empfangsantenne kleinräumig in Gärten, auf Dächern, in Innenhöfen usw. installiert werden kann, ohne die Umgebung zu beeinträchtigen. Ein folgerichtiger nächster Schritt dieser Arbeit ist der Einsatz des vorgeschlagenen multistatischen Radarsystems, um die MLT in regionalen oder kontinentalen Maßstäben zu studieren. Mag dies auch ein ambitionierter Plan sein, der den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen würde, so ist doch anzumerken, dass kürzlich ein Vorschlag des MIT Haystack Observatory akzeptiert wurde, ein verteiltes MIMO-Meteorradar-Netzwerk auf der Basis dieser Arbeit in den USA zu bauen.