

Echtzeitvisualisierung von SAR-Effekten mittels programmierbarer Grafikhardware

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Timo Balz
aus Stuttgart

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Fritsch
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Alfred Kleusberg

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Dezember 2007

Institut für Photogrammetrie
der Universität Stuttgart

2007

Zusammenfassung der Arbeit

Für die Entwicklung neuer SAR-Systeme sowie bei der Interpretation und Auswertung von SAR-Daten sind SAR-Simulatoren wichtige Hilfsmittel. Die Berechnungszeit der SAR-Simulation spielt dabei, sowohl für viele wissenschaftliche Anwendungen als auch für die Sensorentwicklung eine eher untergeordnete Rolle. Diese Anwendungen benötigen möglichst realistische SAR-Simulationsergebnisse. Das andere Extrem stellt die SAR-Echtzeitvisualisierung dar. Hierbei spielt die exakte Simulation eine Nebenrolle, stattdessen besteht das Ziel darin, SAR-Effekte in Echtzeit zu visualisieren. Jedoch sind damit weder neue Sensoren noch neue Konfigurationen zu simulieren bzw. zu entwickeln. Die Anwendungsbereiche liegen in der interaktiven Anwendung, z.B. bei der SAR-Auswertung, oder in der Bereitstellung simulierter Daten für automatische Mustererkennungsverfahren. Auch für die Missionsplanung oder für die Lehre und Ausbildung ist die Rechenzeit ein entscheidender Faktor. In diesen Fällen können Abstriche bei der Simulationsgenauigkeit hingenommen werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Echtzeitvisualisierung von SAR-Effekten für die oben genannten Anwendungen. Denn mittels der immer leistungsfähigeren und flexibler programmierbaren Grafikkarten können SAR-Effekte in Echtzeit visualisiert werden. Dies ist beispielsweise in der Missionsplanung ein entscheidender Vorteil. Durch die hohe Berechnungsgeschwindigkeit können eine Vielzahl möglicher Sensorparameter und Flugbahnen vor der eigentlichen Befliegung getestet werden, um so die optimalen Einstellungen für den jeweiligen Flug zu ermitteln. Die SAR-Effektvisualisierung in Echtzeit erlaubt die schnelle Verfügbarkeit von Sichtbarkeitsanalysen und damit höchste Effizienz bei der Missionsplanung. Dadurch können unnötige und teure Fehler bei der Datenaufnahme vermieden werden.

Bei der Lehre und Ausbildung ist die Interaktivität von enormer Bedeutung. Die Echtzeitvisualisierung erlaubt die verständlichere Präsentation unterschiedlicher SAR-Effekte. Durch die Möglichkeit, bestimmte Effekte in der Simulation an- oder abzuschalten, können die unterschiedlichen Effekte separat oder im Zusammenspiel betrachtet werden. Dies verspricht einen größeren Lernerfolg.

Radarbilder unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht von den Bildern passiver Fernerkundungssysteme. Die Abbildungsgeometrie eines Radarbildes ist in Flug- und Entfernungsrichtung unterschiedlich. In Entfernungsrichtung basiert die Abbildung auf einer Laufzeit- bzw. Distanzgeometrie. In Flugrichtung basiert die Abbildung hingegen auf dem Dopplereffekt. Bei der Simulation von SAR-Bildern müssen diese Unterschiede berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Rückstreuung von Mikrowellen gibt es in der Radarsimulation unterschiedliche Konzepte. Es gibt Ansätze, die auf der Auswertung von Labormessungen, auf physikalischen Modellrechnungen oder auf Ableitungen von Methoden der Computergrafik beruhen. Daneben sind die durch die Abbildungsgeometrie auftretenden radiometrischen Mehrdeutigkeiten sowie das Speckling zu berücksichtigen.

Die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Computergrafik erlaubt eine immer realistischere Darstellung virtueller Welten. Vor allem Computerspiele nutzen 3D-Grafikkarten zur Visualisierung komplexer Szenen. Zudem wird die Rechenleistung der modernen Grafikhardware zur Datenvisualisierung, aber auch zur Lösung mathematischer Probleme verwendet. Die programmierbaren Grafikkarten der neuesten Generation liefern ein Vielfaches der Rechenleistung handelsüblicher CPUs. Für wissenschaftliche Anwendungen ist dies, vor allem auf Grund des sehr günstigen Verhältnisses von Preis zu Rechenleistung, lukrativ. Die massiv parallel arbeitenden Grafikkarten sind für einige rechenintensive Anwendungen besonders geeignet und lassen sich dank ihrer flexiblen Programmiermöglichkeit für eine Vielzahl von Anwendungen nutzen.

Diese Technik kann auch zur Darstellung von Radardaten benutzt werden. Hierfür sind allerdings einige Anpassungen nötig. Diese sollen dynamisch und in Echtzeit erfolgen. Für die Geometrie übernimmt der sogenannte Vertex-Shader der Grafikkarte diese Aufgabe. Die dynamisch veränderten Geometrien werden an den Pixel-Shader weitergereicht. Dieser ist für die Berechnung der Radiometrie zuständig. Durch die flexible Programmierbarkeit der Pixel-Shader können unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Rückstreuung elektromagnetischer Wellen implementiert werden. Um die realistische Darstellung in Echtzeit zu ermöglichen, werden Methoden der Computergrafik adaptiert. Eine Anpassung an die SAR-Geometrie und Radio-

metrie ist erforderlich. Dadurch lassen sich auch komplexe Szenen, bistatische Sensorkonfigurationen oder die Auswirkungen der Bewegungen von Objekten in der Szene visualisieren.

Die Echtzeitvisualisierung hat jedoch auch ihre Grenzen. Im Gegensatz zu der üblicherweise in SAR-Simulatoren verwendeten Ray-Tracing-Methode werden bei der auf der Grafikkarte berechneten Rasterisierung die Strahlen nicht verfolgt. Deswegen können keine Mehrfachreflexionen dargestellt werden. Für die Missionsplanung z.B. spielen die vorhandenen Einschränkungen jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der SAR-Effektvisualisierung in Echtzeit und Ergebnissen von anderen Simulatoren zeigt, dass die Unterschiede gering sind. Dies gilt insbesondere für natürliche Objekte. Künstliche, vor allem metallische, Objekte weisen jedoch eine Vielzahl von Mehrfachreflexionen auf. Die Unterschiede in den Simulationsergebnissen sind in diesen Fällen weit ausgeprägter.

SAR-Effektvisualisierung in Echtzeit eröffnet dem Nutzer eine Vielzahl neuer Möglichkeiten. Die Interaktivität der Simulation führt zu Verbesserungen in der Missionsplanung, der Lehre und bei der Auswertung von SAR-Daten. Die fehlenden Mehrfachreflexionen sind für viele Anwendungen irrelevant. Von der rasanten Entwicklung im Bereich der Computergrafik kann die SAR-Simulation profitieren. In Zukunft kann durch Fortschritte in der Hardwareentwicklung mit noch realistischeren Ergebnissen gerechnet werden.

Summary

SAR simulators are important tools for developing new SAR systems as well as for analyzing acquired SAR data. The time needed to calculate the simulation is not crucial for most scientific applications or in sensor design. For these applications, the SAR simulation has to be as realistic as possible. The other extreme is the real time visualisation of SAR effects. Here the realism of the simulation is not crucial, but the visualisation must be in real time. It is not possible to develop new sensors using the visualisation of SAR effects only. Real time SAR simulations are useful for interactive applications, like assisting the analysis of SAR data and creating simulated data for pattern recognition applications. Furthermore, applications like mission planning, education and training require fast calculation and interactivity. However, these applications accept less accurate simulation results.

This thesis will discuss the development of the real time visualisation of SAR effects for those applications. Using the more and more powerful and flexible graphics processing units (GPU), it is possible to visualise SAR effects in real time. For mission planning as an example, real time visualization is crucial. With faster visualisations, many different sensor properties and flight paths can be tested to evaluate the optimal parameters, before flights actually take place. The fast availability of shadow and layover analysis guarantees the highest efficiency in mission planning. This reduces unnecessary and expensive errors during data acquisition.

In training and education users should be able to interactively change simulation parameters and see the results in real time. This improves the user's experience and learning results. Furthermore, the ability to switch particular effects on or off (e.g. the speckle noise) guarantees a deeper understanding of each single effect and the complete processes during SAR data interpretation.

Radar images differ in many ways from images acquired by passive sensor systems. The imaging geometry of a SAR system is different in azimuth and range directions. In range direction the placement of objects depends on the distance between objects and the sensor. In azimuth, the geometry is based on the Doppler Effect. All radar simulations must consider the Doppler Effect. There are different methods for calculating the microwave backscattering. Some are based on lab measurements, others base on physical models, and further methods are derived from computer graphics. Furthermore, the radiometric ambiguities, as well as speckling, have to be considered.

Rapid development in computer graphics enables greater and more realistic visualisation of virtual worlds. Computer games, a widely popular application, use the power of modern 3D graphics cards for rapid visualisation of complex scenes. GPUs are also used for visualizing scientific data and solving mathematical problems. GPUs of the latest generation have more computational power than standard CPUs. Due to their comparably cheap prices, programmable graphic cards are especially lucrative for scientific applications. Massive parallel graphic processing units are particularly suitable for the calculation of intense applications and are useable for a variety of applications, due to their flexible programmability.

GPUs can also be used for visualizing radar images. However, some adjustments are necessary. For instance, the geometry of SAR images is different, because in range direction the geometry is based on the time of flight (TOF) of the signal. The radiometry is also different due to the different wavelengths of the signal. Geometry and radiometry must be adapted in real time. Geometry is adapted in the vertex stage of the graphics card using so called vertex shaders. The dynamically adapted geometry is piped into the fragment stage where pixel shaders are used to calculate the radiometry. Because of the programmability of these shaders, different models for backscattering electromagnetic waves can be implemented. Different approaches to computer graphics used in a variety of computer games are adapted to realise visualisation of SAR data in real time. These approaches, however, must be modified in order to use them for SAR geometry and radiometry. By further modifying these approaches, complex scenes, bi-static missions, or effects of moving objects can be visualised.

Real time visualisation used on graphics cards does have some limits. Current GPUs are based on rasterization. Unlike in ray tracing, the paths of the rays are unknown. Therefore multiple reflections cannot be visu-

alised. However, these limitations are not very important in most applications. For instance, mission planning does not require visualization of multi-bouncing. By comparing the results with SAR simulators based on ray tracing, only small differences are visible when natural landscapes are simulated. In contrast, by simulating man made objects, especially metallic objects, huge differences occur.

Visualisation of SAR effects in real-time offers a huge variety of new possibilities to users. Interactivity improves mission planning tools, as well as the analysis of SAR data. Moreover, fast and interactive visualisations offer many training and education benefits. Compared with the possibilities from the real time visualisation capability, the absence of multi-bouncing is only a minor problem. SAR simulations can greatly benefit from the tremendous development in computer graphics. Due to ongoing hardware development, even more realistic results are expected in the near future.