

Monitoring weitreichender Gebiete durch SAR-Video Echtzeitprozessierung auf Kleinflugzeugen

STEPHAN PALM^{1,2}, WINFRIED JOHANNES¹, NILS POHL¹ & UWE STILLA²

Luftgetragene Echtzeit-SAR Verarbeitung und bodengestützte Echtzeit-Beobachtung von großen Gebieten durch einen wetterunabhängigen und ferngesteuerten Radarsensor bietet eine Vielzahl von neuen und interessanten Anwendungen. Erreicht wird dies durch einen kompakten und leistungsstarken Radarsensor und einem weitreichenden digitalen Datenlink. In diesem Paper wird die Systemkonfiguration sowie die wesentlichen Schwerpunkte der Signalverarbeitung für eine Realzeitverarbeitung und Darstellung der SAR-Video Bildgebung beschrieben. Erste Ergebnisse des operationellen Sensors werden gezeigt und mit hochaufgelösten Daten verglichen. Weitere zukünftige Entwicklungsschritte und Einsatzmöglichkeiten werden aufgezeigt.

1 Motivation

Der Einsatz eines echtzeitfähigen, wetterunabhängigen und kompakten Radarsensors auf einem Kleinflugzeug bietet neue Möglichkeiten der bodengestützten Überwachung und Aufklärung des Zielgebiets. Typische gepulste X-Band Radarsensoren erfordern wegen ihres Ausmaßes, der Stromversorgung und ihres Gewichtes normalerweise den Einsatz größerer Trägerplattformen. Die Verarbeitung der erfolgten Radarsensordaten erfolgt in der Regel nach Landung der Maschine und Auslesung der Daten in einem anschließenden Post-Processing am Boden. Je nach Fluggeometrie ist das Ergebnis meist ein hochaufgelöstes, statisches SAR-Bild des Zielgebiets.

Der Einsatz moderner Millimeterwellentechnologie und das Prinzip der FMCW-Technik erlauben dagegen die Realisierung kompakter und leichter Radarsensoren, welche für den Einsatz auf kleinen Trägerplattformen bis hin zu Modellflugzeugen geeignet sind. Dieser miniaturisierte Sensor ermöglicht einen deutlich flexibleren und kostengünstigeren Einsatz.

Vielversprechende Ansätze für eine Realzeitprozessierung der Rohdaten sind eine hochparallele Prozessarchitektur unter Verwendung von Multi-Core Plattformen (Vlothuizen & Ditzel, 2009) oder GPUs (Capozzoli & Curcio, 2012). Die Echtzeitfähigkeit der SAR-Bildgebung in diesem Paper wird durch eine Millimeterwellen optimierte SAR-Signalverarbeitung an Bord der Trägerplattform erreicht. Dies erlaubt eine sofortige Abbildung des überflogenen Zielgebietes unter Ausnutzung kleiner Subaperturen ohne besondere Hardwareanforderungen.

Um einem Operator am Boden das Echtzeit-Monitoring zu ermöglichen, wird ein weitreichender digitaler Datenlink eingesetzt, welcher die soeben prozessierten SAR-Bildstreifen über eine Reichweite von mehr als 100 km übertragen kann. Auch Daten, welche über Gefahrengebiete erfolgen werden, sind somit in Sicherheit, selbst bei Verlust der Trägerplattform.

1) Fraunhofer Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR, Fraunhofer Straße 20, 53343 Wachtberg; E-Mail: stephan.palm@fhr.fraunhofer.de

2) Technische Universität München; Email: stilla@tum.de

Die einzelnen Teilbilder werden dabei am Boden zu einer kontinuierlichen, dynamischen Video-Sequenz verarbeitet von theoretisch unlimitierter Länge und ermöglichen so am Boden die Betrachtung eines Echtzeit SAR-Videos des gerade überflogenen Gebietes. Dem Operator ist es dadurch möglich, bei Bedarf in die weitere Flugführung einzugreifen, den Sensor zu modifizieren, sowie die Daten in einer weiteren Stufe zu verarbeiten.

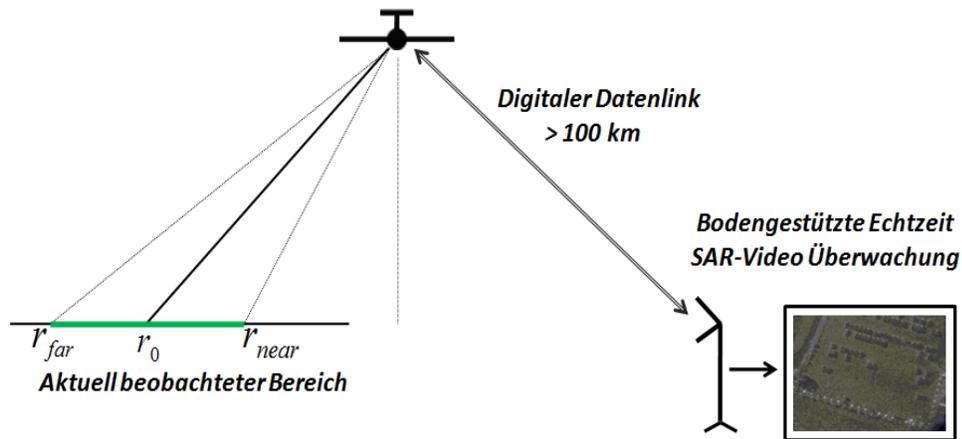


Abb. 1: Echtzeitfähige SAR-Video Beobachtung.

2 Sensorsystem

Der miniaturisierte SAR Sensor MIRANDA35 basiert auf der FMCW Technik und kann dank moderner Millimeterwellenkomponenten sehr kompakt und stromsparend gebaut werden. Das folgende Kapitel soll daher einen Überblick über mögliche Trägerplattformen und Anforderungen an das Inertialsystem aufführen.

2.1 Eigenschaften der Trägerplattform

Mit einem Gesamtgewicht des Sensors und IMU unter 15 kg kann das System flexibel an Bord von Kleinflugzeugen integriert werden. Abb. 2 zeigt das Ultraleichtflugzeug Delphin mit eingebautem Sensorsystem unter der Tragfläche. Erfolgreiche Messungen wurden im letzten Sommer auch bereits auf einer DA42 MPP in der Schweiz getätigt. (Johannes et al., 2014). Der speziell für den UAV Gebrauch entwickelte Radarsensor SUMATRA94 ist dagegen mit 4 kg Gewicht zusätzlich für den Einsatz auf Modellflugzeugen geeignet - die geringe Sendeleistung schränkt das System allerdings von der Reichweite ein (Essen et al, 2009).



Abb. 2: Ultraleichtflugzeug DELPHIN mit eingebautem Sensor MIRANDA35.

2.2 Anforderungen an das Inertialsystem (IMU)

Insbesondere der kombinierte Einsatz von Kleinflugzeugen und Millimeterwellensensoren erfordert eine hohe Güte an das an Bord der Plattform befindliche Inertialsystem. Der eigentliche SAR Prozess, die Fokussierung in Azimut, erfordert entweder einen ideal linearen Flugweg oder eine sehr genaue Kenntnis der abweichenden Bewegung. Typischerweise wird zur kohärenten Phasenintegration eine Genauigkeit von $\lambda/10$ innerhalb einer synthetischen Apertur verlangt. Mit einer Wellenlänge λ von 8,5 mm im Ka- bzw. 3,2 mm im W-Band ist diese Genauigkeit über einen kompletten Flugstreifen in der Regel nicht möglich. Darüber hinaus sind insbesondere Kleinflugzeuge viel empfindlicher gegenüber plötzlichen Windbewegungen und weisen daher deutlich stärkere Turbulenzen und Beschleunigungen als größere Flugzeuge auf. Driftbewegungen von 12° bis 15° sind häufig zu beobachten. Andererseits reichen bei diesen Wellenlängen in den betrachteten Flughöhen bereits Integrationsstrecken von einigen zehn Metern aus, um eine Auflösung bis in den Bereich von 15 cm zu erreichen. Dabei werden im Post Processing Aperturen von 1.5° bis 2.0° in Azimut prozessiert, für das Echtzeit SAR werden bei einer reduzierten Auflösung Subaperturen von 0.2° - 0.4° berechnet. Innerhalb dieser Intervalle ist eine kohärente Phasenintegration mit einem guten Inertialsystem auch bei dieser Wellenlänge problemlos möglich.

Als integriertes Inertialsystem wird das mit Faserkreisel arbeitende AeroControl von der Firma IGI benutzt, welches die für die Echtzeitprozessierung benötigten Navigationsdaten in einer separaten Schnittstelle online liefert. Die Spezifikationen des Systems sind in Tabelle 1 aufgeführt (AeroControl Specs, IGI, Kreuztal).

Tab. 1: Spezifikationen des Inertialsystems

Position	0.05 mm
Geschwindigkeit	0.005 m/s
Roll / Pitch	0.004°
True Heading	0.01°

2.3 SAR Sensor

Das Radar Front-End besteht im Wesentlichen aus einer Signalverarbeitungseinheit, einer Hochleistungsendstufe und zwei Antennen - einer Sende und einer Empfangsantenne - welche

im Pot unterhalb der Tragfläche integriert sind. Die Mittenfrequenz des Systems beträgt 35 GHz bei einer maximalen Bandbreite von 1 GHz und einer entsprechenden Range Auflösung von 15 cm. Um trotz limitierter Stromversorgung ein optimales Signal-zu-Rausch Verhältnis zu erreichen werden stark bündelnde Schlitzantennen verwendet mit einem Öffnungswinkel in Azimut von ca. 3°. Diese beschränken zwar bedingt durch ihre Konstruktion die maximale Systembandbreite, erlauben durch ihre Bündelung aber problemlos Flüge bis zu 1800 m Flughöhe über Grund.

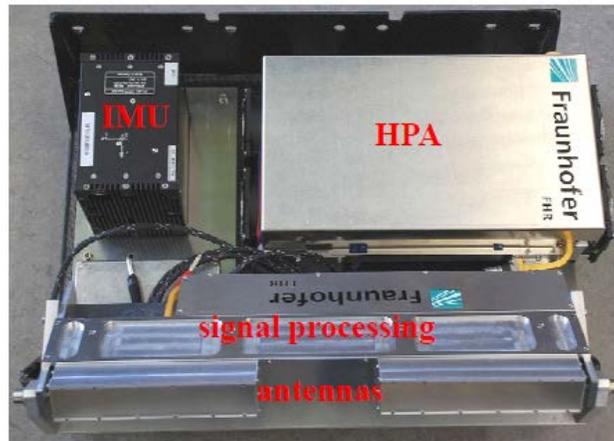


Abb. 3: SAR Sensor im geöffneten Pot.

3 SAR Prozessierung und Übertragung

Das folgende Kapitel beschreibt die SAR Echtzeitprozessierung und Projektion der Bilder unter Ausnutzung der im Millimeterwellenbereich gültigen Näherungen. Eine tiefere Beschreibung der Signalverarbeitung ist in (Palm et al., 2014) gegeben.

3.1 Rohdatenverarbeitung

Der FMCW Sensor sendet kontinuierliche Pulse $S_{(e)}(t)$ der Form

$$(1) S_e(t) = \exp\{-(2\pi i f_0 t + \pi i k_r t^2)\}, t \leq T,$$

wobei T die Dauer des Pulses, $k_r=B/T$ die Chirprate, B die Signalbandbreite und f_0 die Trägerfrequenz des Systems ist. Im Gegensatz zu gepulsten Systemen, welche die komplette Signalleistung in einen zeitlich möglichst kurzen Puls konzentrieren müssen, wird bei der FMCW-Technik über die gesamte Pulsdauer gesendet, was eine deutlich reduzierte unmittelbare Sendeleistung ermöglicht, ohne an Signalstärke zu verlieren. Eine Hochspannungsversorgung ist als Konsequenz nicht mehr nötig.

Das simultan empfangene Echosignal $S_r(t)$ in der Empfangsantenne ist das entsprechend des Zielgebiets komplex gewichtete, zeitverschobene Sendesignal $S_e(t)$. In Dechirp-on-Receive Systemen wird das Empfangssignal anschließend mit dem unmittelbaren Sendesignal gemischt, was zu einer deutlichen Reduktion der benötigten Abtastrate führt. Das so generierte

Zwischenfrequenz Signal wird anschließend abgetastet, in Abhängigkeit der eingestellten mittleren Zielentfernung durch den lokalen Oszillator f_{LO} frequenzverschoben, und digital gespeichert.

Das resultierende abgespeicherte Zwischenfrequenzsignal $S(t)$ eines einzelnen Punktziels in Distanz $x \in \mathbb{R}$ innerhalb eines Sendechirps ist damit die abgetastete Version von

$$(2) S(t) = \exp\{i2\pi f_0 t_r(t)\} \times \exp\{-i\pi k_r(t_r(t))^2\} \times \exp\{i2\pi t(k_r t_r(t) - f_{LO})\},$$

wobei $t_r(t) = \frac{2r(x, p_s(t))}{c_0}$ die Zeitverzögerung zwischen Plattformposition $p_s(t)$ und Ziel (Hin- und Rückweg) darstellt. c_0 bezeichnet dabei die Lichtgeschwindigkeit und r die Entfernung. Die eigentliche, von der Entfernung des Ziels abhängige Zwischenfrequenz, wird im dritten Exponentialterm aus Gleichung (2) sichtbar. Diese ist eine sinusförmige Schwingung mit der Frequenz $k_r t_r(t) - f_{LO}$ aus der sich die Entfernung des Ziels berechnen lässt.

Die ersten beiden Exponentialterme sind dagegen die charakteristische Phasenverschiebung eines Punktziels entlang der synthetischen Apertur in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz f_0 und der eingesetzten Bandbreite B des Sendesignals.

3.2 Kompensation der Bewegungsfehler

Die Kompensation der zum idealen Flugweg abweichenden Bewegungsfehler nimmt innerhalb der Echtzeitprozessierung einen wichtigen Stellenwert ein. Klassische SAR Algorithmen verwenden mehrstufige, häufig entfernungsabhängige Kompensationsverfahren. Diese sind allerdings deutlich rechenintensiver. Um eine zeitlich möglichst effiziente Korrektur dieser Phasenfehler zu erreichen, wird in dem vorgestellten Verfahren nur der Fehler für ein in der Mitte des Beams befindliches Ziel berechnet. Durch den Gebrauch der schmalen Subaperturen von nur einigen Metern und der gerechneten reduzierten Auflösung sind die dadurch entstehenden Fehler vernachlässigbar.

Innerhalb einer Apertur wird daher aus dem kontinuierlichen Fluss der Navigationsdaten die Radialgeschwindigkeit v_r in Richtung des mittleren Zieles bestimmt. Für einen einzelnen Chirp wird dann die Radialgeschwindigkeit $v_r(n)$ als konstant angenommen, was bei der relativ geringen Geschwindigkeit von Kleinflugzeugen ausreichend ist.

Mit $n \in \mathbb{N}$ als Pulsindex ergibt sich das bewegungskompensierte Signal $S_{mc}(n, t)$ zu

$$(3) S_{mc}(n, t) = S(n, t) \times \exp\{i \frac{4\pi}{c_0} (f_0 + k_r t) \times (v_r(n)t + T \sum_{m=1}^{n-1} v_r(m))\}, t \leq T.$$

Das Rohdatensignal $S(n, t)$ kann damit als ein in Fast Time eindimensionales und kontinuierliches Signal interpretiert werden. Auch die Driftbewegung, welche in Folge der langen Pulsdauer bei FMCW Systemen innerhalb eines Sendechirps hervorgerufen wird und bei gepulsten Systemen vernachlässigt werden kann (Start-Stop-Approximation), wird damit korrigiert.

Im Anschluss werden die Daten durch einen vereinfachten Range-Doppler Algorithmus fokussiert und das nach der Bewegungskompensation entstandene Zero-Doppler Profil geometrisch ausgerichtet. Dabei wird im Gegensatz zu konventionellen SAR Algorithmen aus Effizienzgründen nur eine auf das mittlere Ziel berechnete Azimut-Fokussierung genutzt. Dies erlaubt die Azimut Kompression vor der Range Transformation zu berechnen, was eine Beschleunigung der Rechenzeit von bis zu 35% erbringt.

3.3 Projektion der Bilder

Die einzelnen fokussierten SAR Subaperturen werden in Echtzeit auf der Plattform prozessiert, im Anschluss auf eine flache Ebene projiziert und einem Multilookprozess unterzogen. Die Orientierung der Ebene wird dabei kontinuierlich an die realen Fluglageparameter angepasst, so dass die Projektion immer senkrecht zur aktuellen Fluggeometrie ist. Dies vereinfacht die Sicht des Operators, da somit der Nah- und Fernbereich immer gleichbleibend definiert sind. Außerdem ermöglicht dies eine einheitliche Projektion der Szene unabhängig von der Flugrichtung. Nachdem die Radarkeule einen Zielbereich überstrichen hat, werden die bis dahin fokussierten Teilstreifen zeilenweise über den digitalen Datenlink zusammen mit den zugehörigen GPS/IMU Daten zur Bodenstation übertragen und dort wieder in richtiger Reihenfolge zusammengesetzt und visualisiert. Das Ergebnis ist ein sich dynamisch aufbauendes kontinuierliches Video Signal des überflogenen Zielgebiets. Bei einer typischen Rohdatenrate von 12-15 Mbyte/sek reduziert sich so die zu übertragende Datenrate auf wenige kByte/sek. Abb. 4 zeigt die Signalverarbeitungsschritte und die aktuellen Kommunikationsschnittstellen zwischen Bodenstation und Plattform.

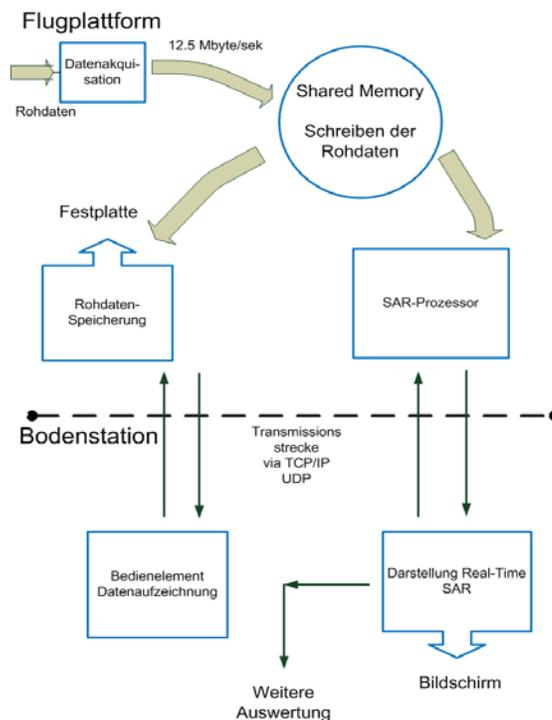


Abb. 4: Schematische Darstellung der Signalverarbeitungsschritte für die Echtzeitprozessierung.

4 Ergebnisse

Die nachfolgende Abb. 5 zeigt Screenshots der Echtzeit SAR-Videos. Die Flughöhe beträgt dabei 1200 m bei einer Streifenbreite von 1000 m und einer gerechneten Auflösung sowie Bodenpixelgröße von 2 m. Die Flugbewegung ist dabei von rechts nach links und wird durch die in rot markierte Uhrzeit erfasst. Zwischen dem ersten und dritten Ausschnitt beträgt die Zeitdauer ca. eine halbe Minute – der jeweilige Versatz ist durch den blauen Pfeil markiert.

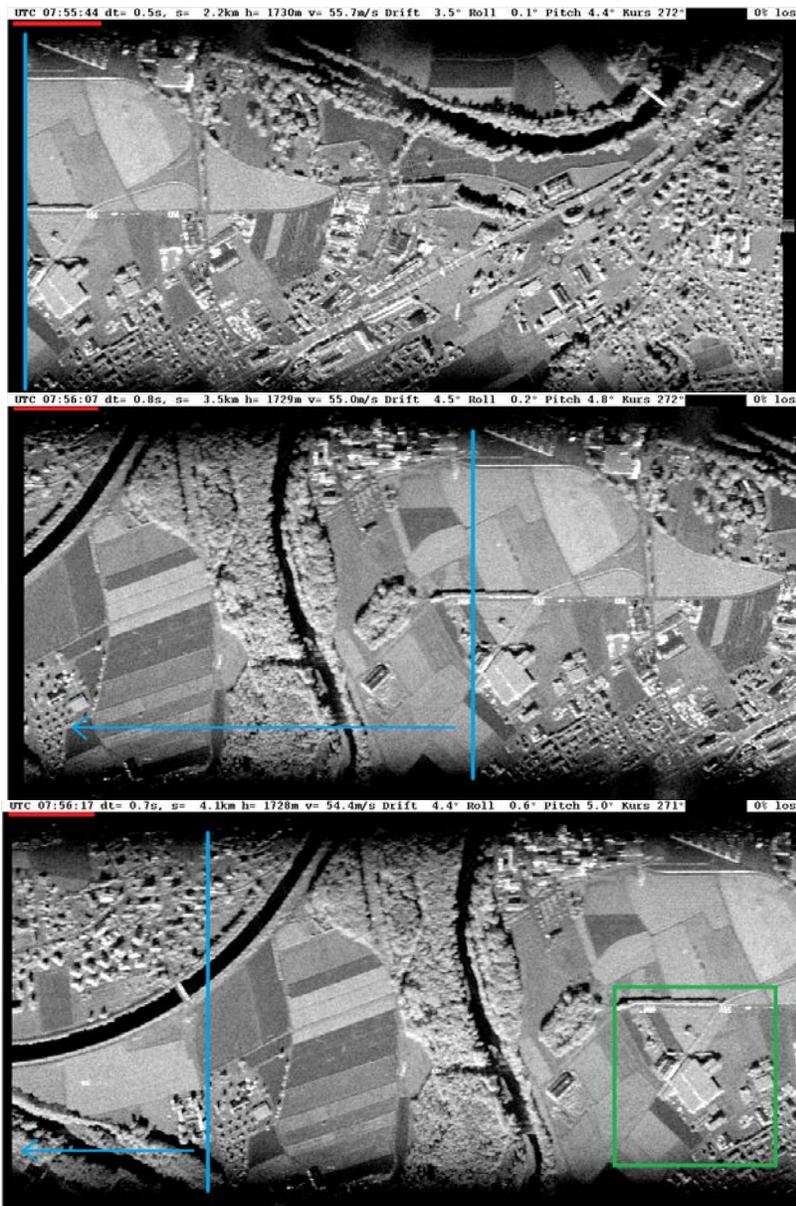


Abb. 6: Vergrößerter Ausschnitt einer Szene in Echtzeit-SAR (oben, 2m) und hochaufgelöst im Post Processing (unten, 25cm). Die Detailtreue und der Kontrast können durch die hochaufgelöste Berechnung deutlich verbessert werden. Hochspannungsleitungen (rot markiert) sind in beiden Bildern erkennbar.

Abb. 5: Echtzeit SAR: Die drei Bilder zeigen einen um jeweils wenige Sekunden versetzten Screenshot des SAR Video Signals von oben nach unten. An der oberen Leiste sind die aktuellen Navigationsdaten eingeblendet, die Uhrzeit ist rot markiert. In blau ist der jeweilige Versatz zwischen den Einzelsequenzen und der neu prozessierte Ausschnitt dargestellt. Das Flugzeug bewegt sich dabei von rechts nach links. Der grüne Bereich wird in Abb. 6 detailliert als Echtzeit- wie auch als hochaufgelöstes SAR Bild gezeigt.

Sowohl die Landschaftsstruktur als auch das urbane Gelände sind gut zu erkennen. Abb. 6 zeigt zum Vergleich einen Ausschnitt im hochaufgelösten Post Processing (25 cm Auflösung). Der Kontrast, die Detailtreue und die Bildschärfe sind deutlich besser, allerdings ist der Unterschied bei einer großen Streifenbreite und einem Bewegtbild wesentlich geringer. Selbst Hochspannungsleitungen treten im Echtzeit-SAR noch zur Geltung.

5 Fazit und weitere Entwicklungsvorhaben

Das vorgestellte voll operationelle System eröffnet durch den weitreichenden Datenlink und die Echtzeitprozessierung der Daten neue Methoden der SAR-Video Beobachtung. Über eine mehr als 100 km große Distanz kann ein Operator am Boden das gerade überflogene Gebiet beobachten und auswerten. Trotz der begrenzten Auflösung und der auf zeitliche Effizienz optimierten Signalprozessierung können beispielsweise Gebäude und Straßen visuell erkannt werden. Darüber hinaus kann der Sensor über den Datenlink ferngesteuert werden, was die Effizienz des Systems weiter erhöht. Hier sind für die Zukunft weitere Bedienelemente wie eine Lupenfunktion, welche ausgewählte, markierte Bereiche für den Operator in einer höheren Auflösung berechnet, geplant.

Wie in Abb. 4 dargestellt kann die Datenaufzeichnung vom Boden aus gestartet werden, was einen Operator zum Bedienen des Sensors an Bord der Plattform überflüssig macht. Desweiteren kann bei Bedarf sofort in die weitere Flugführung eingegriffen werden, falls in den Echtzeitdaten Probleme auftreten oder beispielsweise interessante Zielobjekte kurzfristig entdeckt und unter verschiedenen Aspektwinkeln betrachtet werden sollen.

Die Prozessierung kommt aktuell ohne zusätzliche Hardware oder Parallelisierung aus. Die Beobachtung am Boden kann von einem einfachen Laptop erfolgen. Für eine höhere Auflösung der SAR-Bilder in Echtzeit müsste man allerdings eine Parallelisierung anstreben.

6 Literaturverzeichnis

AEROCNTROL SPECS, IGI, KREUZTAL, 2014:

http://www.igi.eu/aerocontrol.html?file=tl_files/IGI/Brochures/AEROcontrol/AEROcontrol_specs.pdf.

CAPOZZOLI, A.; CURCIO, C. & LIENO, A., 2012: GPU-based ω -k tomographic processing by 1d non-uniforms ffts, in Progress in Electromagnetics Research M, vol. 23, Pages 279-298

ESSEN, H.; BRAUTIGAM, M.; SOMMER, R.; WAHLEN, A.; JOHANNES, W.; WILCKE, J.; SCHLECHTWEG, M. & TESSMANN, A., 2009: Sumatra, a W-Band SAR for UAV

Application, in Radar Conference - Surveillance for a Safer World, RADAR, Pages 1-4

JOHANNES, W.; STANKO, S.; WAHLEN, A.; SOMMER, R.; POHL, N.; WELLIG, P.; SENNHAUSER, C.;

MEIER, E. & KALLFASS, I., 2014: Implementation of a 35 GHz SAR sensor and a high resolution camera to enable real-time observation, in Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR Berlin 2014 (accepted)

PALM, S.; WAHLEN, A.; STANKO, S.; POHL, N.; WELLIG, P. & STILLA, U., 2014: Real-Time Onboard Processing and Ground Based Monitoring of FMCW-SAR Videos, in Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR Berlin 2014 (accepted)

VLOTHUIZEN, W. & DITZEL, M., 2009: Real-time brute force SAR processing, in Radar Conference IEEE, Pages 1-4