

FORSCHUNGSBEITRAG ZU RAUMFAHRTTECHNIK



Nach Abschluss seines Studiums der Telekommunikationstechnik an der Sapienza Universität von Rom in Italien verbrachte Michelangelo Villano ein Jahr bei der Europäischen Weltraumorganisation (European Space Agency – ESA/ESTEC) in den Niederlanden, wo er Verarbeitungsalgorithmen für Eissondierungsradare entwickelt hat. Seit September 2009 ist er Wissenschaftler beim Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), wo er an innovativen Konzepten für Radar mit synthetischer Apertur (SAR) zur Beobachtung der Erde arbeitet. In seiner Doktorarbeit, die er 2016 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verteidigt hat, erforscht er das Verfahren des gestaffelten SAR, das derzeit als grundlegender Erfassungsmodus der Tandem-L-Mission angesehen wird. Im Frühjahr 2017 war er Gastwissenschaftler beim NASA Jet Propulsion Laboratory in Kalifornien, USA.

MICHELANGELO VILLANO

RADAR MIT SYNTHETISCHER APERTUR: EINE LEISTUNGSSTARKE TECHNOLOGIE ZUR BEOBACHTUNG DER ERDE AUS DEM ALL

Radare mit synthetischer Apertur (SAR) ist ein Verfahren der abbildenden Mikrowellenfernerkundung, bei dem von einem Flugzeug oder Satelliten aus in kurzen Zeitabständen Radarpulse ausgesendet, anschließend die von der Erde rückgestreuten Radarechos kohärent empfangen und zu zweidimensionalen Radarbildern verarbeitet werden. Hierbei wird die im empfangenen Signal auftretende Dopplerverschiebung aufgrund der Sensorbewegung relativ zum Boden genutzt, um in Flugrichtung eine Auflösung jenseits der Beugungsgrenze der Radaranterie zu erzielen [1]. Da Mikrowellenpulse dichte Wolken und sogar Regen weitgehend ungestört durchdringen, ist es hierdurch möglich, mit Satelliten unabhängig von Wetter und Tageslicht hochaufgelöste Bilder der Erdoberfläche aufzunehmen. Darüber hinaus eröffnet die kohärente Kombination mehrerer SAR-Bilder zusätzliche Möglichkeiten zur Gewinnung einzigartiger Informationen. So ermöglicht der Vergleich von zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen SAR-Bildern die Vermessung kleinster Verformungen auf der Erdoberfläche, wobei hier aus dem Weltall Entfernungsdifferenzen mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich erfasst werden können. Ein anderes Beispiel ist die Erstellung hochgenauer digitaler Höhenmodelle durch die Kombination von zwei Radarbildern, die aus leicht unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen wurden. Mit Hilfe der SAR-Tomographie, bei der nicht nur

zwei, sondern eine größere Anzahl von Radarbildern kombiniert werden, kann sogar die innere Struktur von halbtransparenten Streumaterialien wie Wald, Eis oder trockener Boden vermessen werden. Aufgrund seiner vielfältigen Anwendungen ist die SAR-Fernerkundung heutzutage eine bewährte und vielgenutzte Technik, die aus der Erdbeobachtung nicht mehr wegzudenken ist [2].

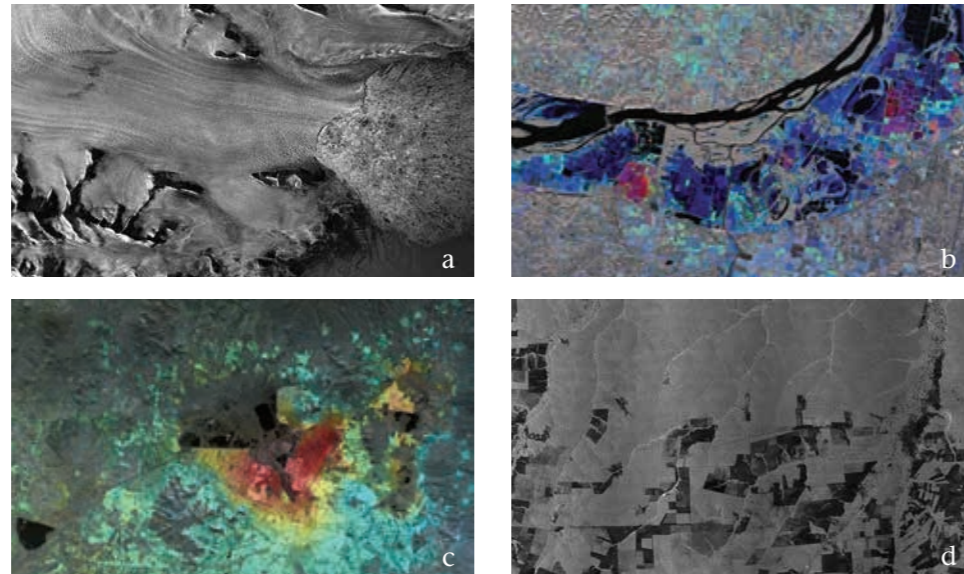
Stand der Technik

Seit dem Start des ersten zivil genutzten Radarsatelliten im Jahr 1978 wurden mehr als 30 weitere SAR-Satelliten im Weltraum eingesetzt. Hiervon sind derzeit noch 15 in Betrieb, die allesamt in den letzten zehn

Kurzzusammenfassung:

Das Radar mit synthetischer Apertur (synthetic aperture radar – SAR) hat sich bei der Beobachtung der Erde als Schlüsselinstrument der Fernerkundung erwiesen. Dennoch sind herkömmliche SAR-Systeme insofern begrenzt, als eine große Abdeckung nur zum Preis verminderter Auflösung erreicht werden kann. Gestaffeltes SAR (staggered SAR) überwindet diese Einschränkung mittels digitaler Strahlformung und kontinuierlicher Variation des Pulswiederholintervalls (pulse repetition interval – PRI). Gestaffeltes SAR ist auch der grundlegende Aufnahmemodus für die geplante Tandem-L-Mission, deren leistungsstarke Technik wöchentlich hochauflösende Bilder unseres ganzen Planeten liefert und dadurch die Messung einer Reihe essentieller Klimavariablen ermöglichen wird.

Abbildung 1:
Beispiele für die Anwendung von TerraSAR-X zur Beobachtung der Umwelt. (a) Beobachtung des Drygalski-Gletschers, Antarktis. (b) Kartierung von Hochwasser des Mississippi, USA. (c) Messung der Bodenabsenkung in Mexiko-Stadt, Mexiko. (d) Beobachtung der extensiven Abholzung in Mato Grosso, Brasilien.



Jahren gestartet wurden und sich durch eine räumliche Auflösung auszeichnen, die mindestens eine Größenordnung über der der Sensoren der ersten Generation liegt. Neben der Auflösungsverbesserung in dem Bereich von wenigen Dezimetern war die im Jahr 2010 gestartete TanDEM-X-Mission eine weitere wichtige Innovation, da hier erstmals zwei Radarsatelliten in enger Formation fliegen, um ein globales digitales Höhenmodell mit noch nie dagewesener Genauigkeit und Auflösung zu generieren [3].

Hochmoderne SAR-Sensoren bieten eine hohe Flexibilität im Hinblick auf Auflösung und Abdeckung, denn sie können durch den Einsatz phasengesteuerter Antennen mit elektronischer Strahlschwenkung in unterschiedlichen Aufnahmemodi betrieben werden. Beispielsweise kann der deutsche Radarsatellit TerraSAR-X im (gleitenden) Spotlight-Modus eine Auflösung von 1 m erzielen, wobei die Szenengröße auf 10 km beschränkt ist, oder alternativ im ScanSAR-Modus einen 100 km breiten Streifen abbilden, wobei sich in diesem Fall

die Auflösung auf 16 m verschlechtert. Spezielle Experimentalmodi ermöglichen sogar eine noch höhere Auflösung (0,2 m im Staring-Spotlight-Modus) und einen noch breiteren Streifen (bis zu 260 km im breiten ScanSAR-Modus) sowie vollpolarimetrische Aufnahmen.

Die Daten von TerraSAR-X werden für ein breites Anwendungsspektrum genutzt. Beispiele sind wiederholte Beobachtungen der sehr schnellen Bewegung des Drygalski-Gletschers, Antarktis [Abbildung 1 (a)], die Kartierung der Flut des Mississippi, USA [Abbildung 1 (b)], die Messung der Bodenabsenkung (bis zu 10 cm in vier Monaten) als Folge der Wassergewinnung in Mexiko-Stadt, Mexiko [Abbildung 1 (c)] und die Beobachtung der extensiven Abholzung in Mato Grosso, Brasilien [Abbildung 1 (d)]. Im letztgenannten Fall erscheinen Rodungen auf dem Radarbild als rechteckige, relativ dunkle Zonen in der ansonsten homogenen Waldfläche. Dagegen ist die Erfassung großer Gebiete mit optischen Satellitenkameras wegen der dichten Wolkenschichten in tropischen Regionen nur sehr selten möglich.

Obwohl er sehr leistungsstark und flexibel ist, hat TerraSAR-X auch einige grundlegende Beschränkungen. So ist die Streifenbreite im sogenannten Stripmap-Modus, der eine Auflösung von 3 m ermöglicht, auf 30 km beschränkt. Ferner kann der Satellit wegen seines hohen Leistungsbedarfs nur für 3 Mi-

nuten während seines 100-minütigen Umlaufs um die Erde betrieben werden. Hieraus folgt, dass TerraSAR-X etwa ein Jahr benötigt, um die gesamte Landmasse der Erde mit einer Auf-

lösung von 3 m einmal abzubilden. Auch neuere SAR-Satelliten, wie Sentinel-1 und ALOS-2, sind bezüglich ihrer Aufnahmekapazität beschränkt, da hier ebenfalls nicht gleichzeitig eine hohe Auflösung erzielt und ein breiter Streifen abgebildet werden kann. Diese Beschränkung ist von grundlegender Natur und auf das Aufnahmeprinzip des SAR zurückzuführen. Eine Möglichkeit zur Überwindung dieser Grenze besteht aus einer Flugkonstellation von SAR-Satelliten, wie bei Cosmo-SkyMed und Sentinel-1 praktiziert. Diese Lösung gestattet eine Steigerung der Abbildungskapazität um einen Faktor gleich der Anzahl der Satelliten in der Konstellation, wird aber schnell sehr kostspielig bis undurchführbar, wenn die Kartierungskapazität um ein oder sogar zwei Größenordnungen gesteigert werden soll.

Tandem-L

In den letzten Jahren ist in der wissenschaftlichen Gemeinde das Interesse am Verständnis und der Quantifizierung von dynamischen Prozessen gestiegen, die innerhalb

„SAR liefert unabhängig vom Tageslicht, von der Wolkendichte und den Wetterbedingungen hochaufgelöste, zweidimensionale Bilder.“

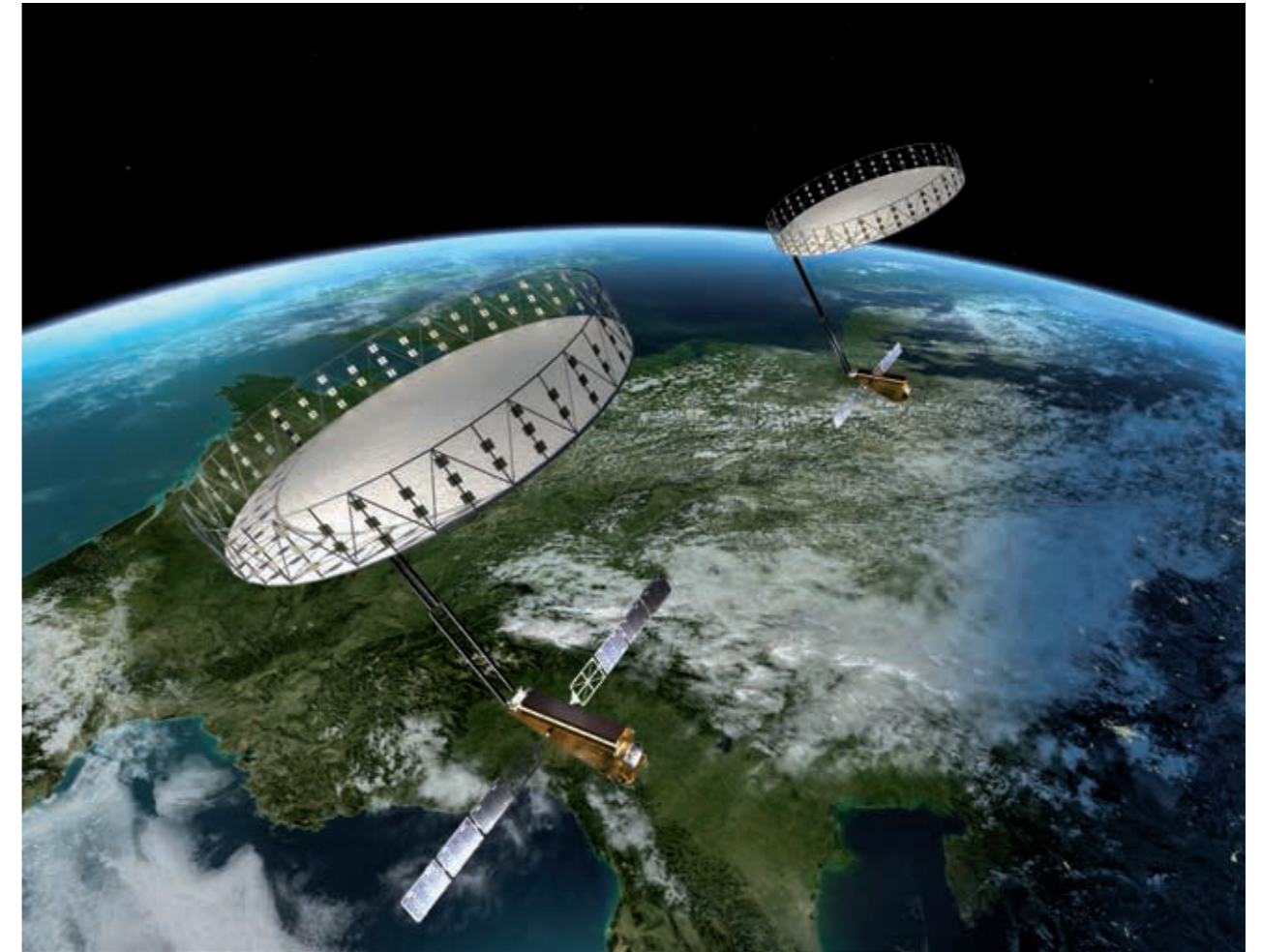
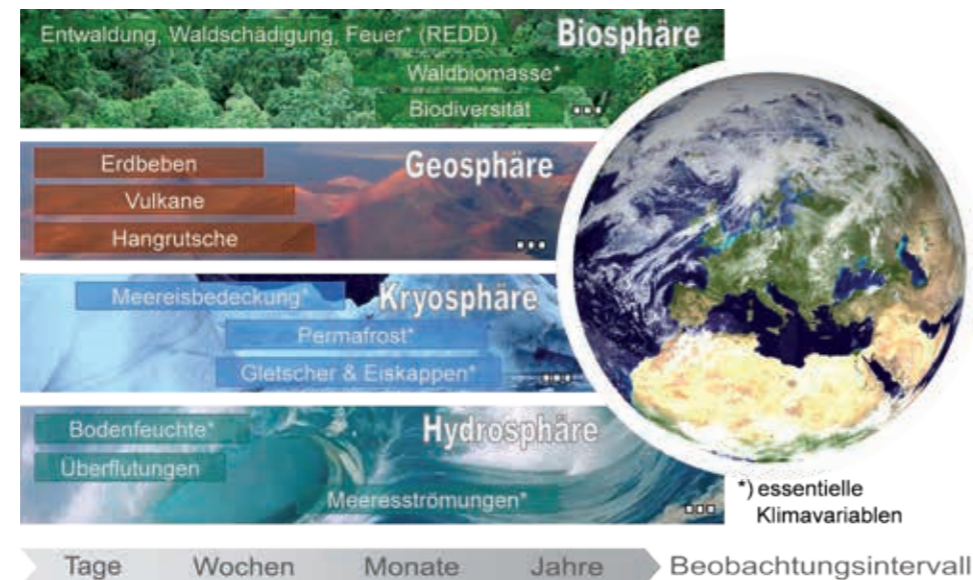
Michelangelo Villano

des Systems Erde auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen ablaufen und durch eine Vielzahl von Wechselwirkungen miteinander verknüpft sind. Viele dieser Prozesse und Interaktionen sind bislang unzureichend erforscht und verstanden. Ein wichtiger Grund für diese Kenntnislücken ist der Mangel an geeigneten Beobachtungsdaten zur Analyse solcher Wechselwirkungen. *Abbildung 2* zeigt exemplarisch anhand ausgewählter Beispiele die erforderlichen Beobachtungsintervalle, die zur systematischen

Erfassung von dynamischen Prozessen auf der Erdoberfläche erforderlich sind.

Abbildungsleistung, Auflösung und Messgenauigkeit existierender Fernerkundungssensoren sind in vielen Fällen nicht ausreichend, um verlässliche Schlussfolgerungen bezüglich der Dynamik dieser großmaßstäblichen Prozesse zu ziehen. Die Beobachtung von dynamischen Prozessen erfordert eine kontinuierliche, groß angelegte und systematisch geplante Aufnahmestrategie,

Abbildung 2:
Die geforderten Beobachtungsintervalle zur systematischen Erfassung der Dynamik einiger exemplarisch ausgewählter Prozesse auf der Erdoberfläche.



um Veränderungen verlässlich zu erkennen und mit hinreichender Genauigkeit zu quantifizieren. Je nach den zu beobachtenden Prozessen müssen Veränderungen anhand variabler Raum- und Zeitskalen erfasst und in Relation zueinander gesetzt werden. Sollen sowohl sich schnell entwickelnde, hochdynamische Prozesse, wie die Ent-

spannung nach einem Erdbeben, als auch sich langsam entfaltende Prozesse, wie die jährliche Variation der Waldbiomasse, erfasst werden, ist eine Kombination von kurzen Wiederholzyklen mit umfangreichen Aufnahmen über mehrere Jahre hinweg erforderlich.

Abbildung 3
Grafische Darstellung von Tandem-L.

„SAR ist der ideale Sensor zum zuverlässigen, kontinuierlichen und globalen Beobachten dynamischer Prozesse auf der Erdoberfläche.“

Michelangelo Villano

SAR ist das ideale Instrument, um die Erde unabhängig von Wetter und Tageslicht in regelmäßigen Abständen systematisch zu beobachten. Die derzeit verfügbaren weltraumgestützten SAR-Sensoren haben jedoch weder die Auflösung noch die Kartierungskapazität, um die wissenschaftlichen Anforderungen zur systematischen Beobachtung der in *Abbildung 2* aufgeführten dynamischen Prozesse zu erfüllen. Insbesondere wird ein SAR-Sensor benötigt, der in der Lage ist, die gesamte Erdoberfläche zweimal pro Woche mit einer räumlichen Auflösung von unter 10 m zu kartieren (das entspricht einer Kartierungskapazität, die um zwei Größenordnungen über der von TerraSAR-X liegt). Als Reaktion auf diese Anforderungen wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ein Vorschlag für eine hochinnovative L-Band-SAR-Mission, Tandem-L, entwickelt, der zurzeit eine Studie der Phase B1 durchläuft [4]. *Abbildung 3* zeigt eine grafische Darstellung von Tandem-L.

Tandem-L verwendet eine entfaltbare Reflektorantenne mit einem Durchmesser von 15 m in Kombination mit innovativen digitalen Strahlformungstechniken (digital beamforming – DBF). Hierbei steigert die große Antennenapertur die Empfindlichkeit und

führt zu einer erheblichen Verringerung der benötigten Sendeleistung. Aufgrund dessen kann das SAR-Instrument praktisch kontinuierlich betrieben werden. Darüber hinaus ermöglicht die digitale Strahlformung den gleichzeitigen Empfang mit mehreren Antennenkeulen, wodurch mehrere Teilstreifen simultan abgebildet werden können. Auf diese Weise ist es möglich, eine Auflösung von unter 10 m auf einem 350 km breiten Bodenstreifen zu erzielen, wie sie für die zuvor erwähnte Mission zur Beobachtung dynamischer Prozesse auf der Erdoberfläche benötigt wird.

Gestaffeltes SAR

Eine wesentliche Innovation bei Tandem-L ist das gestaffelte SAR (staggered SAR). Um diese Technik zu verstehen, ist es notwendig zuerst eine wichtige Begrenzung des im letzten Abschnitt dargestellten Radars aufzuzeigen. So ermöglicht die Nutzung von mehreren Antennenkeulen zwar die gleichzeitige Aufnahme von mehreren Streifen; da das Radar aber nicht empfangen kann, während es sendet, sind diese Streifen durch „blinde“ Bereiche voneinander getrennt (linke Spalte von *Abb. 4*). Diese Begrenzung wird durch das gestaffelte SAR aufgehoben. Die Kernidee ist hierbei eine kontinuierliche Variation der Pulswiederholintervalle (PRI). Diese ist so ausgestaltet, dass diejenigen Bereiche, aus denen die Echos nicht empfangen wer-

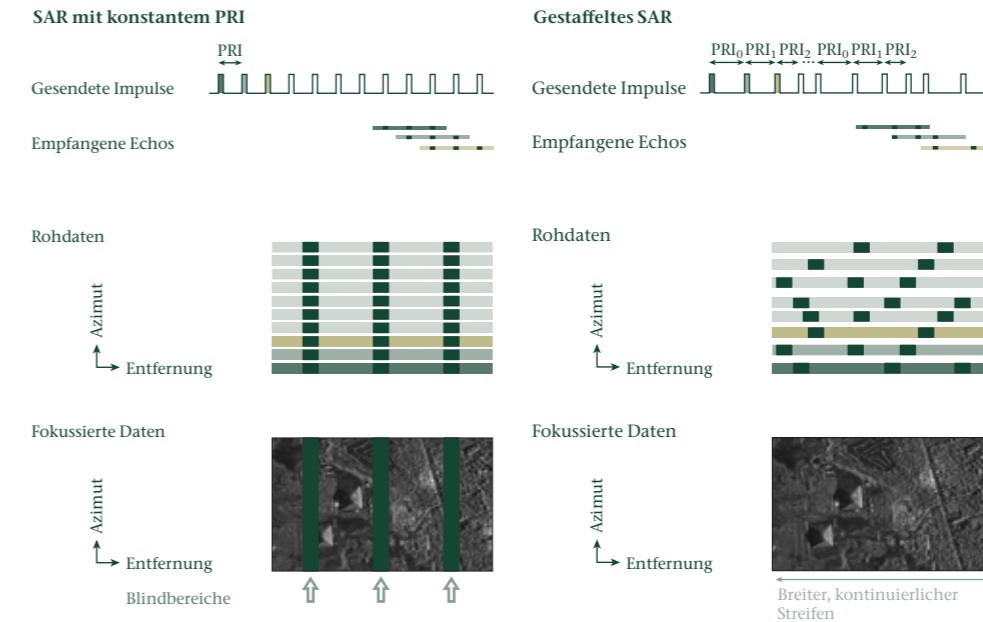


Abbildung 4 Oben: Gesendete Radarimpulse und die hierzu korrespondierenden empfangenen Radarechos (jeweils in derselben Farbe wie der gesendete Impuls). Die Blindbereiche, bei denen das Echo nicht empfangen werden kann, weil das Radar gerade sendet, sind als schwarze Lücken in den empfangenen Radarechos zu sehen.
Mitte: Radarrohdaten aus der Nebeneinanderanordnung der empfangenen Echos.
Unten: Fokussierte Daten für ein SAR mit konstantem Pulswiederholintervall PRI (*links*) und für ein gestaffeltes SAR (*rechts*).

den für jeden gesendeten Impuls an anderer Stelle zu liegen kommen (rechte Spalte von *Abb. 4*). Eine geeignete Auswahl der PRI und eine entsprechende Überabtastung des Signals in Azimut ermöglichen dann die Abbildung eines breiten, kontinuierlichen Streifens mit hoher Auflösung [6].

Die Leistungsfähigkeit eines gestaffelten SAR-Systems hängt von der verwendeten PRI-Sequenz und dem Verfahren zur Inter-

polation des nicht gleichmäßig abgetasteten Radarsignals in ein einheitliches Raster ab. Wenn PRI-Sequenzen verwendet werden, bei denen aufeinanderfolgende Azimut-Abtastwerte niemals fehlen und die empfangenen Daten unter Verwendung der optimalen, linear erwartungstreuen Interpolation (BLU) verarbeitet werden, kann gezeigt werden, dass ein SAR-Instrument mit einer 15-m-Reflektorantenne und mehreren Antennenkeulen bei geeigneter Auslegung

in der Lage ist, einen kontinuierlichen Streifen von 350 km mit 7 m Azimutaufösung in außergewöhnlich guter Bildqualität abzubilden. Das stellt im Vergleich zu den existierenden SAR-Systemen eine Verbesserung der Abbildungsleistung um fast eine Größenordnung dar.

Als Teil der Doktorarbeit wurde auch der Einfluss des gestaffelten SAR auf die Bildqualität mithilfe von Experimentaldaten untersucht. Im ersten Schritt wurden hierzu stark überabgetastete Daten des DLR-Flugzeugradars F-SAR verwendet, um äquivalente, gestaffelte SAR-Datensätze zu generieren

und die Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen PRI-Sequenzen und Interpolationsverfahren zu analysieren. Als Zweites wurde der deutsche Satellit TerraSAR-X in einem Experiment so kommandiert, dass über dem

Bodensee Daten im gestaffelten SAR-Modus gesammelt werden konnten. Die Messwerte dieser Daten zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Voraussagen aus den Simulationen [7].

Gestaffeltes SAR wird derzeit als Standardaufnahme-modus für die Tandem-L-Mission angesehen. Hierfür wurde zusätzlich ein neues Verfahren entwickelt, um die aufgrund der Überabtastung erhöhte Datenmenge an Bord

des Satelliten in Echtzeit zu reduzieren [8]. Kürzlich durchgeführte Analysen haben darüber hinaus gezeigt, dass gestaffeltes SAR auch eine attraktive Option für die NASA-ISRO-Mission NISAR ist. Diese amerikanisch-indische Mission hat in bestimmten Bereichen ähnliche wissenschaftliche Ziele wie Tandem-L, ist aber in der Leistungsfähigkeit und den verfügbaren Ressourcen begrenzt. Daher ist es bei NISAR nur möglich mit Impulsraten unterhalb des Optimums zu arbeiten, was in diesem Fall zu einer verminderten Bildqualität führen wird, dafür aber die Blindbereiche eliminiert.

Zukünftige Entwicklungen

Obwohl Tandem-L ein großer Schritt nach vorne ist, erfordern einige wichtige Anwendungen eine deutlich häufigere, idealerweise tägliche Datenerfassung. Ein Beispiel ist die Messung der Bodenfeuchte zur Erforschung des Wasserkreislaufs. Die hierbei gewonnenen Daten könnten in Zukunft nicht nur wichtige Informationen für eine nachhaltige Agrarwirtschaft liefern, sondern auch zu einer verbesserten Wettervorhersage beitragen. Jedoch kann eine Mission, die diesen Anforderungen bei erschwinglichen Kosten erfüllt, nicht einfach auf der Skalierung eines klassischen SAR-Systems basieren; vielmehr werden radikal neue Konzepte und ein auf die jeweilige Anwendung optimiertes Systemdesign benötigt, um

einerseits die Kosten zu senken und andererseits den Nutzen zu erhöhen. Beispielsweise kann eine tägliche Erdbeobachtung entweder mit einem großen MEOSAR-Satelliten in hoher Umlaufbahn oder mit einer größeren Anzahl von Kleinsatelliten in einem niedrigen Orbit durchgeführt werden. In beiden Fällen werden neue Systemparadigmen

sowie disruptive Technologien und Verfahren wie aufblasbare Antennen, gemeinsame Radarkommunikationssysteme, dezentralisiertes und fraktioniertes SAR sowie spezielle Wellenformen benötigt, um die Abbildungsleistung zu erhöhen und zugleich die Systemkosten zu senken [9].

Literaturverzeichnis

- [1] C. A. Wiley, "Pulsed doppler radar methods and apparatus," U.S. Patent 3 196 436, 1954.
- [2] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek und K. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," IEEE Geosci. Remote Sensing Mag., Vol. 1, Nr. 1, S. 6–43, März 2013.
- [3] G. Krieger, A. Moreira, H. Fiedler, I. Hajnsek, M. Werner, M. Younis und M. Zink, "TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 45, Nr. 11, S. 3317–3341, 2007.
- [4] A. Moreira et al., "Tandem-L: A highly innovative bistatic SAR mission for global observation of dynamic processes on the Earth's surface," IEEE Geosci. Remote Sens. Mag., Vol. 3, Nr. 2, S. 8–23, Jun. 2015.
- [5] G. Krieger, N. Gebert, M. Younis, F. Bordonni, A. Patyuchenko und A. Moreira, "Advanced concepts for ultra-wide-swath SAR imaging," in Proc. EUSAR, Friedrichshafen, Deutschland, 2008, S. 1–4.
- [6] M. Villano, G. Krieger und A. Moreira, "Staggered SAR: High resolution wide-swath imaging by continuous PRI variation," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 52, Nr. 7, S. 4462–4479, Juli 2014.
- [7] M. Villano, G. Krieger, M. Jäger und A. Moreira, "Staggered SAR: Performance analysis and experiments with real data," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, im Druck.
- [8] M. Villano, G. Krieger und A. Moreira, "Onboard processing for data volume reduction in high-resolution wide-swath SAR," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., Vol. 13, Nr. 8, S. 1173–1177, Aug. 2016.
- [9] G. Krieger et al., "Mirror-SAR: An advanced multistatic MIMO-SAR for high-resolution wide-swath Earth system monitoring," in Proc. IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp., Juli 2017, S. 149–152.

„In Zukunft werden disruptive Technologien wie dezentralisiertes und fraktioniertes SAR zum einfachen und erschwinglichen Zugang zum Raum führen.“

Michelangelo Villano