Erkennung von Gebäudestrukturen anhand von Mustern punktförmiger Reflektoren in SAR-Bildern

Dipl.-Ing. Alexander Schunert, Dr. Eckart Michaelsen,
Dipl.-Ing Jan D. Wegner und Prof. Dr. Uwe Sörgel

Moderne weltraumgestützte SAR-Sensoren wie etwa TerraSAR-X sind in der Lage eine geometrische Auflösungen im Bereich eines Meters oder besser zu erzielen. Dadurch sind Gebäudedetails wie Fenster oder Balkone in den Daten zu erkennen. Aufgrund ihrer vorzugsweise rechtwinkligen Anordnung, die eine starke Reflexion zum Sensor bewirken kann, prägen sie sich häufig als sehr helle Linien oder Punkte aus, die sich deutlich vom dunkleren Hintergrund abheben. Da solche Gebäudestrukturen in der Regel langlebig sind, können deren Signale in vielen Fällen als sogenannte Persistent Scatterer (PS) fungieren. Dabei handelt es sich um Reflektoren, die eine sehr stabile Phasenhistorie aufweisen und sich somit gut für eine interferometrische Auswertung eignen, die sich über Jahre erstreckt. Bedingt durch die übliche Bauweise von Gebäuden treten solche PS zudem in regelmäßigen Mustern auf. So kann man oftmals vertikale und horizontale Reihen von PS an Fassaden beobachten, die durch Fensterreihungen hervorgerufen werden. Die Tatsache, dass bestimmte PS auf einem Gebäude liegen stellt dabei eine nützliche Information dar, die in den aktuellen Auswertealgorithmen jedoch nicht verwendet wird. Wir demonstrieren in diesem Aufsatz eine Möglichkeit, die in einem Stapel von Interferogrammen identifizierte PS-Menge, zu sinnvollen Einheiten zu gruppieren. Dafür verwenden wir ein Produktionssystem, das Konzepte der menschlichen Wahrnehmung verwendet, um regelmäßige Strukturen in einer Menge von Basisobjekten (in diesem Fall den PS) zu finden.

1. Einleitung

Seit der Einführung der PS-Technik gegen Ende der 1990er Jahre, wurden einige sehr eindrucksvolle Ergebnisse zum Studium von Oberflächenbewegung präsentiert (siehe Colesanti et al. (2003); Ferretti et al. (2000); Ferretti et al. (2001) und Hooper (2006)). Die PS-Technik ermöglicht dabei die Ableitung von Bewegung und Höhe für eine Menge von Radarzielen, deren Reflexionseigenschaften zeitlich konstant sind. Diese werden als Persistent Scatterer bezeichnet.

Die in einer Szene gefundenen PS weisen häufig eine recht hohe Signalamplitude auf und prägen sich in den Amplitudenbildern als auffällige Punkte aus. In hochauflösenden Radardaten der neuen Generation, die im feinsten Modus eine Bodenauflösung von etwa einem Meter aufweisen, zeigen sich eine ganze Reihe solcher Ziele. Nach (Bamler et al. 2009) kann schon eine trihedrale Struktur mit einer Seitenlänge von 6 cm ein hinreichend starkes Signal erzeugen. In Städten ist also mit einer sehr hohen PS-Dichte zu rechnen. Typische Strukturen, die einen PS verursachen können, sind Fenster oder Balkone. In Abb. 1 ist das mittlere

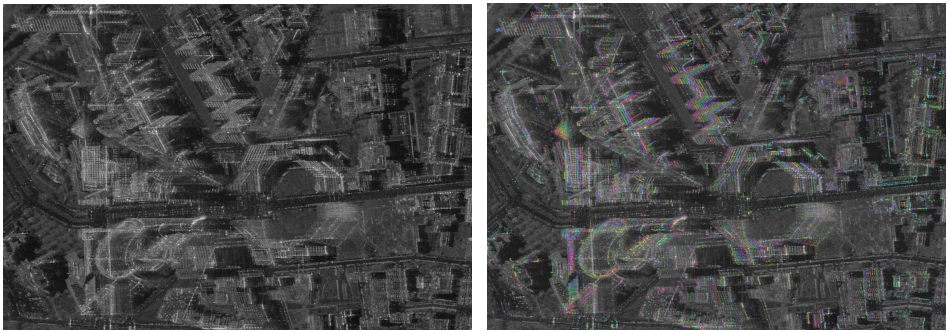


Abbildung 1: Auf der linken Seite ist das mittlere Amplitudenbild einer Szene um den Potsdamer gezeigt. Auf der rechten Seite sind die Phasenwerte eines Interferogramms für die extrahierten PS-Kandidaten farbig vor dem Hintergrund des mittleren Amplitudenbildes dargestellt. Der Stapel umfasst 20 Aufnahmen und erstreckt sich vom Februar 2008 bis Ende Januar 2009.

Amplitudenbild eines Stapels, bestehend aus 20 Bildern, auf der linken Seite abgebildet. Zeitlich erstrecken sich die Aufnahmen des Stapels über einen Zeitraum von etwa einem Jahr (Februar 2008 bis Ende Januar 2009). Auf der rechten Seite sind die Phasenwerte für die extrahierten PS-Kandidaten farbig kodiert vor dem Hintergrund des mittleren Amplitudenbildes dargestellt. Der verwendete Datenstapel wurde vom TerraSAR-X Sensor aufgenommen und weist eine Bodenauflösung von etwas mehr als einem Meter auf. Die gezeigte Szene umfasst unter anderem den Potsdamer Platz und hat eine Ausdehnung von etwa 600 Metern in jeder Richtung. Es fällt auf, dass die PS-Kandidaten vor allem an den Fassaden der Gebäude zu finden sind und oft auffällige regelmäßige Muster bilden. Dieses lässt sich durch den normalerweise geordneten und oftmals symmetrischen Aufbau von Bauwerken erklären: Fenster oder Balkone sind gewöhnlich gleichmäßig auf der Fassade angeordnet.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit nutzen wir diese Erscheinung aus, um die PS in sinnvolle Untermengen zu gruppieren. Dazu verwenden wir ein Produktionssystem, das aus einem Satz von Basisobjekten (in diesem Fall den PS) durch Anwenden von Gruppierungsregeln (den sogenannten Produktionen) Stück für Stück komplexere Objekte erzeugt.

Die gefundenen Muster können dann in die PS-Auswertung einbezogen werden, was vor allem erweiterte Möglichkeiten für die Modellierung der untersuchten Zielgröße ermöglicht.

2. Persistent Scatterer Interferometrie

Die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) kann als Erweiterung der klassischen SAR-Interferometrie gesehen werden (Bamler et al. 2009). Dabei wird ein Stapel von Interferogrammen verwendet, um Höhe und Bewegung (in Blickrichtung des Sensors) für eine Menge von zeitlich stabilen Radarzielen abzuleiten. Dabei mindert die Beschränkung der Analyse auf die PS den Effekt der Dekorrelation, der durch zeitliche Änderung und Blickwinkelabhängigkeit der Szenen-Reflektivität entsteht. Die Nutzung eines Interferogrammstapels ermöglicht

weiterhin die Trennung des Nutzsignals von Störeinflüssen wie der variablen atmosphärischen Laufzeitverzögerung, die vom Wasserdampfgehalt der durchquerten Atmosphärenschichten abhängt.

Um diese Trennung zu erreichen, nutzt man die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Korrelationslängen der einzelnen Effekte aus. So wird die Bewegung oft als Funktion der Zeit bzw. zeitlicher Tiefpassanteil modelliert, während man die Atmosphäre als zeitlichen Hochpass- und räumlichen Tiefpassanteil betrachtet. Die Schätzung der Zielgrößen erfolgt dann mit Methoden der Signalverarbeitung. Weitere Informationen zur PS-Prozessierung finden sich in (Colesanti et al. (2003); Ferretti et al. (2000); Ferretti et al. (2001);Hooper (2006) und Liu et al. (2009)).

Das in bisherigen PS-Ansätzen verwendete Modell, behandelt die Phase der einzelnen PS mehr oder weniger unabhängig. Einzig die Annahme, dass benachbarte PS eine ähnliche atmosphärische Laufzeitverzögerung aufweisen müssen, bezieht eine räumliche Abhängigkeit mit ein. Dabei wird ein großer Teil des vorhandenen Wissens, das gerade in Städten genutzt werden könnte, nicht verwendet. Nimmt man als Beispiel eine Gruppe von PS, die auf einem Gebäude liegen, liegt die Vermutung nahe, dass die Bewegungsmuster dieser PS einer gemeinsamen Gesetzmäßigkeit folgen.

Eine Segmentierung der PS in Gruppen würde vollkommen neue Möglichkeiten für die Modellierung des betrachteten Deformationsphänomens mit sich bringen. In Gernhardt & Hinz (2008) wird z.B. vorgeschlagen, die Bewegung eines Hauses als Starrkörperbewegung zu modellieren. Mit einer genügenden Menge von PS auf einem Haus würde sich die Anzahl der zu schätzenden Parameter deutlich verringern, was positive Auswirkungen auf Genauigkeit und Kontrolliertheit der Parameter hätte.

3. Gruppierung

Die Gruppierung der PS wird im Rahmen dieser Arbeit mit einem Produktionssystem durchgeführt. Dabei werden aus Primitivobjekten (in diesem Fall den PS) durch Anwenden von Regeln (den sogenannten Produktionen) sukzessive komplexere Objekte erzeugt. Das verwendete System setzt sich dabei aus einer Wissensbasis, die aus mehreren Regeln besteht, und einer Steuerung, die für die Reihenfolge der Regelanwendung zuständig ist, zusammen (Michaelsen et al. 2009).

Eine Übersicht über die verwendeten Regeln gibt Tabelle 1. Für jede Produktion ist dabei die Art der beteiligten Objekte (Spalte Teile), die Bedingungen, unter denen die Regelanwendung erfolgt, und das Ergebnis angegeben.

Die meisten Regeln basieren auf geometrischen Bedingungen und haben ihren Ursprung in der Gestalt-Psychologie (Michaelsen et al. 2006). Darüber hinaus wird in den Produktionen (P1-P3) auch die Phaseninformation der PS berücksichtigt.

Die Reihenfolge der einzelnen Produktionen wird hauptsächlich über eine zugeordnete Bewertung geregelt. Diese kann sowohl von der Bewertung der beteiligten Basisobjekte als auch von der Plausibilität der angestrebten Produktion abhängen. Die Priorität der Produktion

Tabelle 1: In der Gruppierung verwendete Produktionen. Es ist jeweils das Ergebnis, die Bedingungen, unter denen die Regel angewendet wird und die Teile, die durch die Produktion gruppiert werden, angegeben.

	Produktionen		
	Ergebnis	Bedingung	Teile
P1	Spot	proximity & similar phase	PS,..., PS
P2	Row	proper spacing & similar phase	Spot, Spot
P3	Row	good continuation & similar phase	Row, Spot
P4	Lattice	proper spacing & lighting direction	Row, Row
P5	Lattice	good continuation	Lattice, Row

P3 könnte sich z.B. aus dem Abstand des beteiligten Spots von der angestrebten Linie, der Ähnlichkeit der mittleren interferometrischen Phase von Spot und Linie und den Einzelbewertungen der bestehenden Linie und des hinzuzufügenden Spots ergeben. Das so gegebene Produktionssystem würde zunächst Spots aus den extrahierten PS bilden (P1). Dabei würden PS, die räumlich benachbart sind und eine ähnliche Phase aufweisen, bevorzugt gruppiert werden. Dieses geschieht so lange, bis das Zusammenfassen zweier Spots zu einer Linie (P2) günstiger ist. Die entstandene Linie ermöglicht nun auch die Anwendung von P3. Liegt also ein Spot in guter Näherung auf der Verlängerung dieser Linie, bekommt die entsprechende Produktion eine hohe Priorität. Das Verfahren endet definitiv, wenn keine weiteren Gruppierungsmöglichkeiten vorhanden sind. Im Anwendungsfall könnte man das Programm aber jederzeit (oder aufgrund anderer Kriterien) stoppen, da die Anzahl möglicher Produktionen gewöhnlich sehr groß ist.

Das Problem der so gegebenen Steuerung ist die enorme Rechenzeit, die benötigt wird, um eine ausreichende Anzahl höherwertiger (hier im Sinne von komplex zu verstehen) Objekte zu erzeugen.

In diesem Anwendungsfall ist man an Gittern interessiert, würde jedoch größtenteils Spots und einzelne Linien als Ergebnis bekommen.

Eine Möglichkeit die schnelle Erzeugung höherwertiger Objekte zu begünstigen, ist die Berücksichtigung der Komplexität des resultierenden Objekttyps für die Bewertung einer Produktion. Man würde dann z.B. die Bewertung von Produktionen, die ein Gitter als Ergebnis haben (P4 und P5) relativ zu Produktionen, die eine Linie zurückliefern (P2 und P3), anheben.

Der so erweiterte Gruppierungsalgorithmus tendiert nun dazu, einen Teil der Szene verstärkt zu betrachten, während andere Teile zunächst wenig oder gar nicht bearbeitet werden. Um den

Arbeitsaufwand im aktuell behandelten Teil zu verringern und damit die Bearbeitung anderer Bereiche zu begünstigen, werden mögliche Produktionen, die nah an schon durchgeführten Produktionen des gleichen Typs liegen, unterdrückt. Dieses Vorgehen wird „lokale Inhibition“ genannt und ist den Reizverarbeitungsvorgängen z.B. in der menschlichen Netzhaut entlehnt (siehe Michaelsen et al. (2009) für nähere Informationen).

Schließlich werden auch die schon gefundenen Strukturen in die Steuerung der Gruppierung einbezogen, um etwa fehlende Bestandteile für eine spätere Produktion gezielt zu finden. Dieses Vorgehen wird als anticipation oder focus of attention bezeichnet und hilft in vielen Fällen, schneller zu einem zufriedenstellenden Ergebnis zu kommen. Allerdings birgt es auch die Gefahr, Strukturen zu gruppieren, die nicht existieren (Michaelsen et al. 2009).

4. Experimente

Das oben beschriebene Verfahren zur Gruppierung wurde auf einen Ausschnitt der in Abb. 1 gezeigten Szene angewendet. Als Basisobjekte wurden PS-Kandidaten verwendet, die anhand der Stabilität ihrer Amplitude über die Zeit ausgewählt wurden. Nach Ferretti et al. (2001) weist eine geringe Variation der Amplitude über den Stapel auf ein geringes Phasenrauschen hin. Weiterhin bestimmt die Amplitudenvariation die Bewertung der PS-Kandidaten für das Produktionssystem.

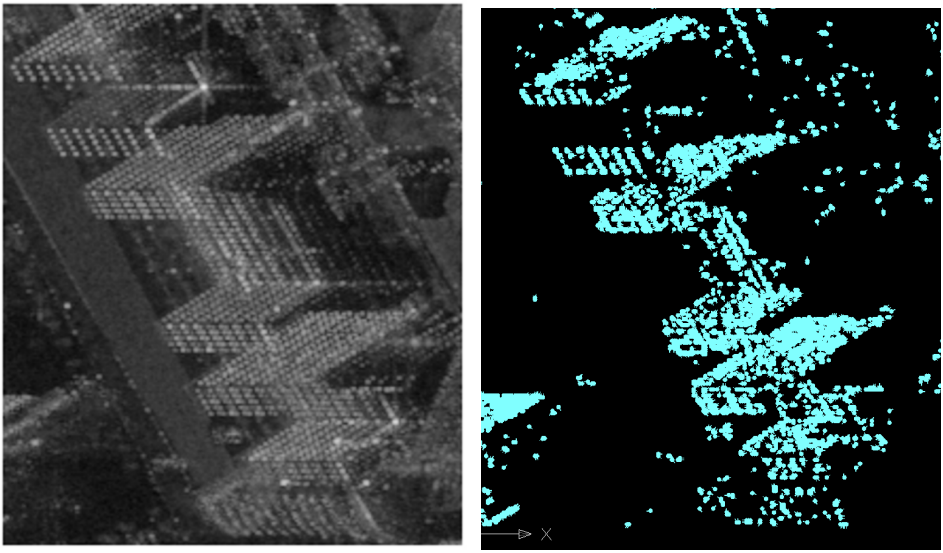


Abbildung 2: Auf der linken Seite ist das mittlere Amplitudenbild der prozessierten Teilszene abgebildet. Rechts sind die extrahierten PS-Kandidaten für den Ausschnitt dargestellt. Diese fungieren im Produktionssystem als Basisobjekte.

In Abb. 2 ist das Amplitudenbild der untersuchten Teilszene auf der linken und die extrahierten PS-Kandidaten auf der rechten Seite gezeigt. Der auffällige Gebäudekomplex ist Teil der Park Kolonnaden unweit des Potsdamer Platzes. Es ist klar erkennbar, dass die extrahierten PS größtenteils mit den hellen Punktzielen an der Fassade des Gebäudes übereinstimmen und oft in einer regelmäßigen gitterartigen Struktur vorliegen. Zur besseren Orientierung ist in Abb. 3 ein Luftbild der untersuchten Szene in Schrägsicht dargestellt. Der rote Pfeil gibt dabei die ungefähre Beleuchtungsrichtung des Sensors an. Es ist direkt einsichtig, dass die gitterartig angeordneten Fenster des Gebäudekomplexes die hellen Punktziele bedingen.



Abbildung 3: Luftbild der prozessierten Szene in Schrägsicht (© 2011 Microsoft Bing Maps). Der rote Pfeil zeigt die ungefähre Beleuchtungsrichtung des Sensors an.

Das Gruppierungsergebnis ist in Abb. 4 dargestellt. Dabei sind die PS-Kandidaten als hellblaue Punkte dargestellt. Die Phasenwerte der PS-Kandidaten (für ein Interferogramm) werden durch die Richtung des Zeigers angedeutet. Die Spots (Ergebnis von P1) werden durch orange Punkte repräsentiert. Alle Spots, die zu einer Linie gehören, sind durch grüne Geradenstücke verbunden. Die blauen Balken zeigen schließlich die Zugehörigkeit einer Linie zu einem Gitter an.

Das gezeigte Ergebnis wurde durch einen fünfzehnminütigen Lauf des Programms auf einem Standardrechner erhalten. Es sind nur die 16 besten Gruppen gezeigt. Das Resultat ist bei Weitem nicht vollständig. Allerdings sind alle gefundenen Gruppen korrekt. Ein vollständigeres Ergebnis kann natürlich durch Verlängerung der Laufzeit oder Nutzung schlechter bewerteter Gruppen erfolgen. Die Nachteile beider Maßnahmen liegen dabei auf der Hand.

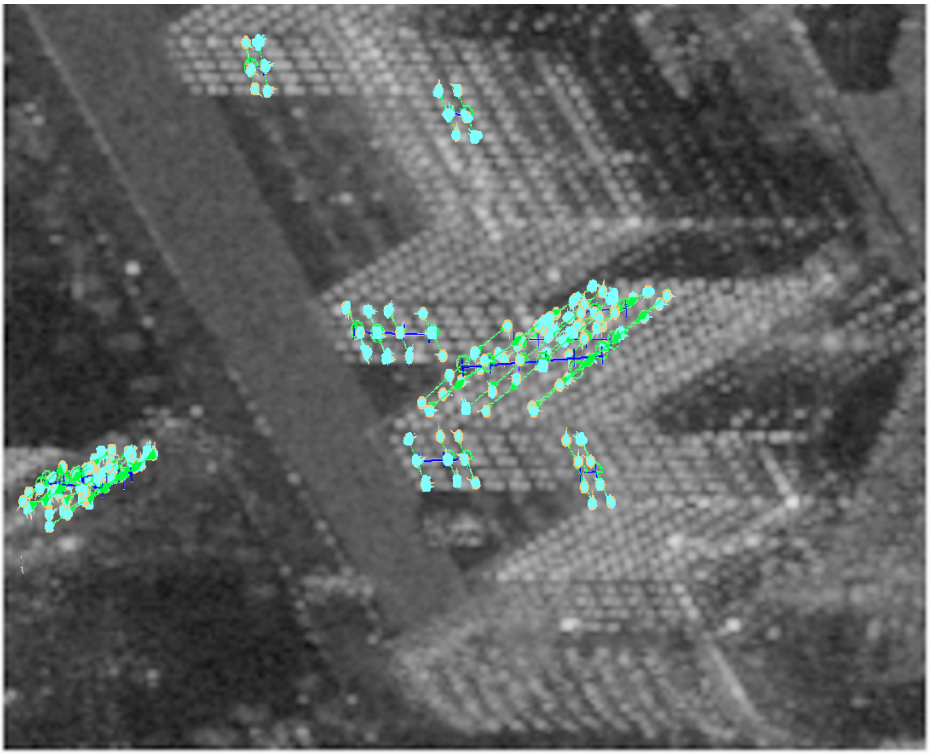


Abbildung 4: Ergebnis der Gruppierung für einen Gebäudeteil. Die gruppierten PS-Kandidaten sind in durch hellblaue Punkte dargestellt. Der Zeiger an den Punkten symbolisiert die interferometrische Phase (aus einem Interferogramm). Die orangen Punkte repräsentieren Spots (Ergebnis von P1). Alle Spots, die zu Linien gruppiert wurden, sind durch ein grünes Geradenstück verbunden. Die blauen Balken zeigen die Zugehörigkeit einer Linie zu einem Gitter an. Gezeigt sind die 16 besten Gruppen, die sich nach einer Laufzeit des Algorithmus von 15 Minuten auf einem Standardrechner ergeben haben.

Ein Problem, das die Gruppierung erschwert, ist der sogenannte Layover-Effekt. Es handelt sich dabei um eine Abbildungseigenschaft eines bildgebenden Radarsystems. Eine Dimension des Bildes stellt die Entfernung zum Ziel dar. Da der Satellit die Szene schräg von oben beleuchtet, fallen Punkte auf erhabenen Objekten und Bodenpunkte in dasselbe Pixel. Man kann diesen Effekt gut an hohen Gebäuden beobachten, die in Richtung des Sensors auf den Boden zu kippen scheinen. Dadurch überlappen sich die Fassadenteile in der untersuchten Szene teilweise, wodurch in ungünstigen Fällen die Wahrnehmung der regelmäßigen Muster erschwert wird, was immer dann geschieht, wenn zwei helle Punktziele von zwei verschiedenen Fassadenteilen in dasselbe Pixel des Radarbildes abgebildet werden. Das Resultat ist nicht notwendigerweise ein helles Punktziel, da die entsprechenden Signale komplex sind und somit die Phasen bei der Überlagerung eine Rolle spielen. Diesen Effekt kann man im zentralen

Teil des Gebäudekomplexes sehen. In Abb. 3 erkennt man ein niedriges Gebäude, das dem zentralen Gebäude vorgelagert ist. Dessen Signal mischt sich mit jenem vom oberen Teil der Fassade des größeren Gebäudes. Betrachtet man Abb. 2 stellt man fest, dass in diesem Bereich keine PS-Kandidaten gefunden wurden.

In anderen Fällen überlappen sich die Muster unterschiedlicher Fassadenteile zwar, löschen sich aber nicht gegenseitig aus. Die Schwierigkeit ist dann, beide Muster zu trennen, was mit rein geometrischen Bedingungen für die Produktionen nur schwer möglich ist. Schon die Gruppierung der PS zu Spots würde zu einer Vermischung von Elementen beider Muster führen. Hier hilft die Nutzung der interferometrischen Phase der PS (siehe P1-P3), da zwei PS, die auf unterschiedlichen Fassadenteilen liegen aber im Bild benachbart sind, im Allgemeinen eine unterschiedliche Phase aufweisen. Führt man die Gruppierung ohne Berücksichtigung der PS-Phase durch, ist das Ergebnis bedeutend schlechter.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde eine Möglichkeit zur Gruppierung von PS vorgestellt. Die bisher erhaltenen Ergebnisse zeigen Probleme mit der Vollständigkeit des Gruppierungsergebnisses. Zwar sind alle gefundenen Gruppen korrekt, allerdings fehlen einige wesentliche Fassadenstrukturen. Da die Gruppierung in nachfolgenden Schritten für eine erweitere Modellbildung in der PS-Analyse verwendet werden soll, ist natürlich eine weitgehend vollständige Erfassung der Fassadenstrukturen eines Hauses anzustreben. Man könnte hier bei der Gruppierungskontrolle ansetzten, indem man weitere Suchheuristiken einführt. So ist es denkbar die Gruppierung der Linien nur senkrecht zur Beleuchtungsrichtung durchzuführen und die Gruppierung der Gitter nur in Beleuchtungsrichtung. Das würde jeweils die Dimension des Suchraums von zwei auf eine Dimension verringern und damit die Rechenzeit verkürzen. Ein weiteres beschriebenes Problem ist die Überlappung der Muster unterschiedlicher Fassadenteile im Radarbild durch den Layover-Effekt. Sind beide Muster noch vorhanden, wird eine Trennung vor allem durch die interferometrische Phase der PS erreicht. Hier könnte man auch die Höhe der PS verwenden, die sich als Ergebnis einer PS-Analyse ergibt. Die Höhe bezieht im Gegensatz zur interferometrischen Phase eines Interferogramms die komplette verfügbare Information ein (also alle Interferogramme) und ist im Rahmen der Auswertung auf Konsistenz geprüft worden.

Mit einem guten Gruppierungsergebnis könnte man schließlich das Modell für die PS-Analyse verfeinern. Hier bietet sich wie schon erwähnt die Einführung eines Bewegungsmodelles für alle PS einer Fassadenstruktur an.

Literatur

Bamler, R., M. Eineder, N. Adam, X. Zhu & S. Gernhardt (2009). Interferometric Potential of High Resolution Spaceborne SAR, Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, No. 5, pp. 407-419

Colesanti, C., A. Ferretti, C. Prati & F. Rocca (2003). Monitoring Landslides and tectonics witht the Permanent Scatterer Technique, Eng. Geol., Vol. 68, No. 1-2, pp. 3-14

Ferretti, A., C. Prati & F. Rocca (2000). Nonlinear Subsidance Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , Vol. 38, No. 5, pp. 2202-2212

Ferretti, A., C. Prati & F. Rocca (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 39, No. 1, pp. 8-20

Gernhardt, S. & S. Hinz (2008). Advanced Displacement Estimation for PSI using High Resolution SAR Data, In: Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. III-1276-III-1279

Hooper, A. (2006), Persistent Scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modelling of volcanic Deformations, Dissertation, Stanford University

Liu, G., S. M. Buckley, X. Ding, Q. Cheng & X. Luo (2009). Estimating Spatiotemporal Ground Deformation With Improved Permanent/Scatterer Radar Interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 47, No. 8, pp. 2762-2772

Michaelsen, E., U. Soergel & U. Thoennessen (2006). Perceptual Grouping for automatic detection of man-made structures in high-resolution SAR data, Pattern Recognition Letters, Vol. 27, pp. 218-225

Michaelsen, E., M. Arens & L. Doktorski (2009). Interaction of Control and Knowledge in a Structural Recognition System. In: B. Mertsching, M. Hund, Z. Aziz (eds.) KI 2009, LNAI 5803, Springer, Berlin, pp. 73-90