

高分解能合成開口レーダの信号処理技術

若山俊夫*
大石 昇**
長谷川秀樹**

Signal Processing for High-resolution Synthetic Aperture Radar

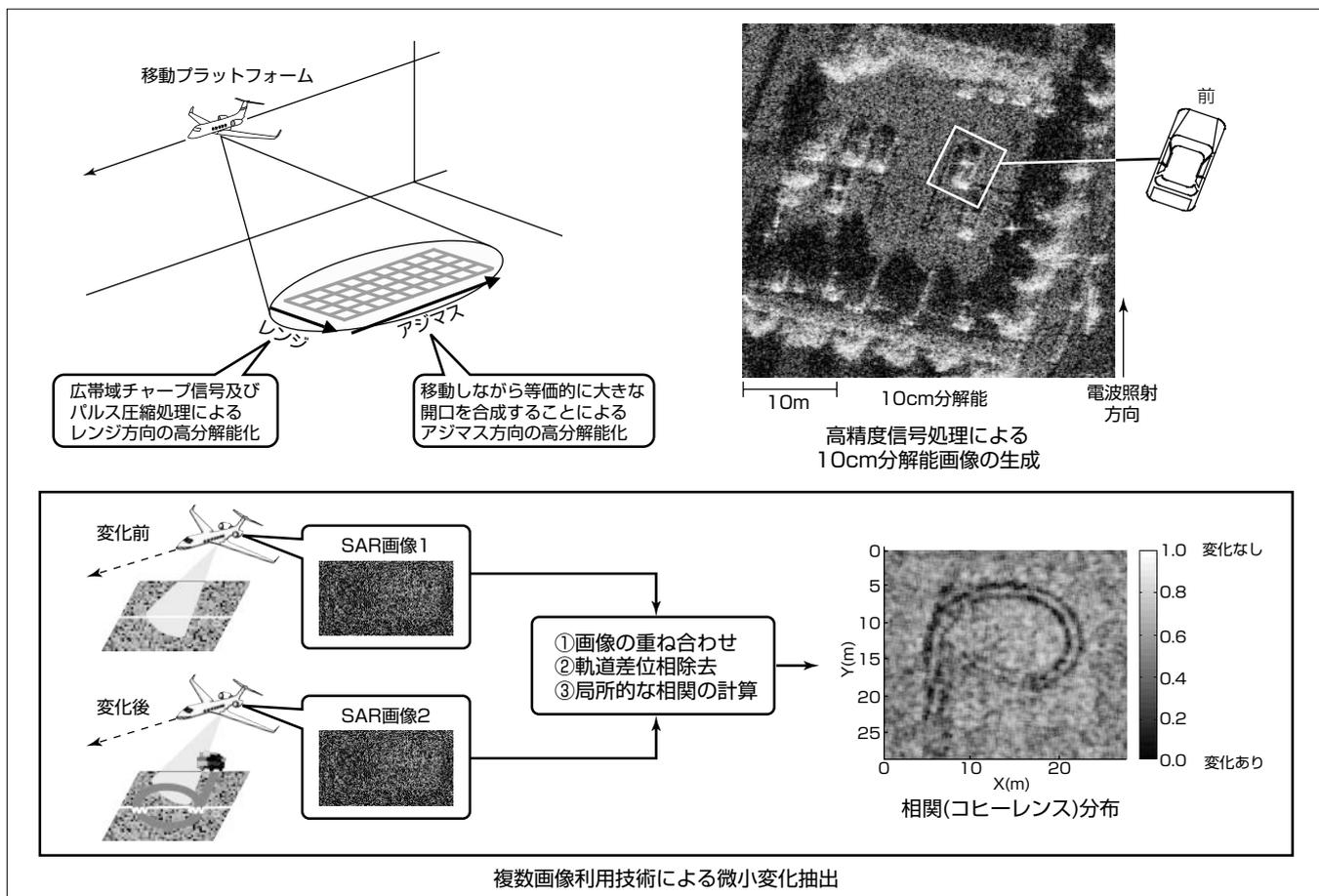
Toshio Wakayama, Noboru Oishi, Hideki Hasegawa

要 旨

合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar : SAR)は、航空機、衛星などの移動プラットフォームに搭載して観測を行い、対象の二次元の高分解能画像を得る画像レーダである。SARは天候、昼夜によらず観測が可能であるため、災害監視、地形図作成、土地利用調査、海上監視などへの活用が期待されている。このようなSARの有効性が認識されるにつれて、建物や車両などの地上構造物の画像化も可能となる高分解能なSARのニーズが高まっている。

三菱電機は世界トップレベルの10cm分解能の航空機搭載合成開口レーダを国内で初めて開発し、フライト試験によって10cm分解能が得られること、さらに車両などの目標の大きさや形状をレーダ画像から判読できることを確認した。また、高分解能画像の高度な活用例として、地表面

の微小な変化の検出を可能とするコヒーレント変化抽出の技術を開発した。これは、同一の地表面を異なる時刻に観測し、観測時刻間に生じた地表変化を検出する技術である。電波画像の輝度だけでなく、位相情報をも利用することによって、レーダ波の波長オーダー(cmオーダー)の微小変化を抽出することが可能となる。しかし、2回の観測間でプラットフォームの移動軌道に差があると、その差による位相差も生じる。そこで、軌道差による位相差成分を観測画像から取り除き、地表面変化による位相差成分のみを抽出する信号処理アルゴリズムを開発した。航空機フライト試験で、小型車両の通行跡を自動的に抽出することに成功した。



高分解能合成開口レーダによる微小変化検出

合成開口レーダはパルス圧縮処理とアジマス圧縮処理(合成開口処理)によって地表面の高分解能画像を得る。レーダ画像の各画素は振幅と位相の値を持つ。微小変化抽出技術では、位相差も考慮した相互相関を算出することによって、波長オーダーの微小な変化を高分解能に抽出することが可能である。

*情報技術総合研究所(工博) **鎌倉製作所

1. ま え が き

合成開口レーダ(SAR)は、航空機、衛星などの移動プラットフォームに搭載して観測を行い、二次元の高分解能画像を得るレーダである⁽¹⁾。SARは天候、昼夜によらず観測が可能であるため、光学と異なる運用が可能である。このようなSARの有効性が認識されるにつれて、建物や車両などの地上の構造物の画像化も可能となる高分解能なSARのニーズが高まっている。

SARの分解能の動向として、1990年代前半は1m程度の分解能が高分解能の代表であった。しかし、1990年代後半になって、30cm級分解能のSARが米国で開発された⁽²⁾。さらに、2000年以降は、更なる分解能の向上が検討されており、米国、独国などで10cm分解能のSARが開発されている⁽³⁾⁽⁴⁾。このような状況下で、当社は2004年に国内で初めて30cm分解能の航空機搭載SARを開発し、これを用いて三次元の地形データを得る干渉SAR(インターフェロメトリSAR)の検証などを行った⁽⁵⁾。2007年には更なる高分解能化を図り、国内で初めて10cm分解能のSAR画像の撮像に成功した⁽⁶⁾。

本稿では、2章でSAR信号処理の一般的な原理、及び当社が開発した信号処理方式を説明した後、3章で10cm分解能SARを用いたフライト試験で得られたデータ例について述べる。

2. SARの信号処理

2.1 画像再生処理

SARは地表面を距離(レンジ、プラットフォーム移動と垂直な方向)と角度(アジマス、プラットフォーム移動と平行な方向)の二次元で分解することによって、地表面画像を得る。したがって高分解能画像を得るためには、距離及び角度の高分解能化が必要となる。SAR信号処理では、距離はパルス圧縮によって、角度は合成開口処理によって高分解能化する。

パルス圧縮は、送信パルス内に何がしかの変調を施し、受信時に受信信号と送信波形の相関処理を行うことによって、送信パルス幅で決まる分解能よりも高い距離分解能を得る。変調方式としては、直線的な周波数変調が多く用いられる。

角度分解能については、一般のレーダでは送受信アンテナのビーム幅によって定まる。ビーム幅はアンテナ開口径に反比例するため、角度分解能を高分解能化するにはアンテナ開口を大きくする必要がある。しかし、航空機や衛星などの移動プラットフォームに搭載するレーダでは、アンテナ開口径が制約される。そこでSARでは、移動しながら蓄積した受信信号を信号処理で合成することによって、大開口の受信アンテナを用いた場合と等価のアジマス分解

能を得る。レーダと目標の間の相対距離はプラットフォームの移動とともに変化する。そのため信号合成を行う際には、距離変化の影響を補償しながら行う。この補償は受信信号のサンプリング周期よりも細かく行う必要があるため、従来は膨大な演算量の信号内挿処理が不可欠であった。近年では、時空間の周波数領域で信号処理を行うことによって、内挿演算が不要な高速画像再生の手法が開発されており⁽¹⁾、データ量が膨大な衛星搭載SARの画像再生に用いられている⁽⁷⁾。さらに処理時間短縮のため、並列化に適した手法の開発なども行われている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

2.2 コヒーレント変化抽出

ここでは、複数のSAR画像を利用するSAR高機能化技術の一例として、最近注目されている変化抽出技術について述べる。膨大な画像データから変化した領域のみを抽出する技術は、災害発生領域特定の効率化に寄与すると期待される。ここでは特に、微小な地表面変化を抽出する技術であるコヒーレント変化抽出(Coherent Change Detection: CCD)について述べる⁽¹⁰⁾(図1)。

コヒーレント変化抽出は、同一の地表面を異なる時刻に観測し、観測時刻間に生じた地表変化を検出する技術である。画像間の局所的な相関係数であるコヒーレンスが変化の指標として用いられ、コヒーレンスが0に近い領域を観測間に地表変化が生じた領域、コヒーレンスが1に近い領域を地表変化が生じていない領域(無変化領域)と判断する。コヒーレント変化抽出では、SAR画像の振幅だけでなく位相の情報も利用するため、SAR画像の振幅値に現れないような送信波長以下の微小な変化も検出することが可能となる。

コヒーレント変化抽出における2回のSAR観測軌道は一致する必要があるが、実際には観測時の風の変化などの外的要因によって軌道のずれが生じる。これによって、2回の観測で得られるSAR画像の間には、地表面変化によって生じる画素値の差異のほかに、軌道ずれによって生じる画素値の差も生じる。そのため、地表面変化の有無にかかわらず画像全域のコヒーレンスが低下し、そのままではコヒーレント変化抽出での微小変化抽出が困難となる。そこで、軌道ずれによって生じる画像差異の特性を考慮して、

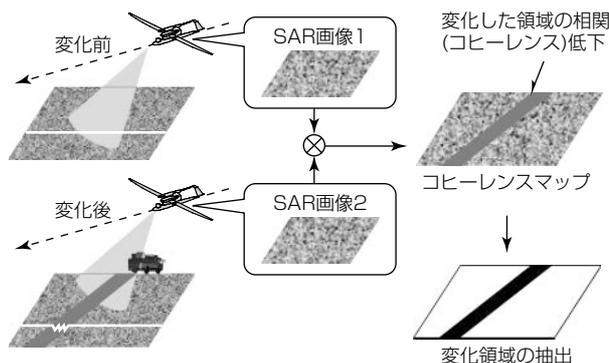


図1. コヒーレント変化抽出

軌道ずれの影響を抑圧する処理方式を新たに開発した。軌道ずれによって生じる画素値の差異は地形の起伏にも依存するため、軌道情報のみから単純にその影響を取り除くことができない。ただし、軌道ずれによって生じる位相差の空間分布は縞状となる。そのため、空間周波数領域に変換すると、軌道ずれの成分は特定の空間周波数に局在して分布する。一方、車両通行跡などのような空間的に局所的に現れる地表面変化に対応する空間周波数成分は分散して存在する。そこで、空間周波数領域で局在する成分を除去することによって、軌道ずれの影響を取り除く。

3. 航空機搭載SARを用いた検証

ここでは10cm分解能航空機搭載SARの高分解能画像例、及びコヒーレント変化抽出の適用例を示す。

3.1 フライト試験

フライト試験に用いた10cm分解能航空機搭載SARの主要諸元を表1に示す。

図2の航空機の客室にレーダの送受信機を格納し、送信用と受信用のアンテナを航空機下部にある多目的ポッドに格納した。送信波として1.5GHzの掃引周波数幅を持つ周波数変調波(チャープ信号)を用いた。画像再生の際には、航空機の動揺を高精度に補償する処理を行っている。高画質画像を得るために、合成開口長210mに対して、レーダ波の送信波長2cmよりも十分小さな誤差となる精度で動揺補償を行っている。

3.2 SAR画像の例—10cm分解能の確認

分解能を確認したデータ例を図3に示す。図3(a)の画像で、四角で囲んだ複数の点は、プール外側の金網の支柱である。このうち1点のレンジとアジマスのプロファイルは図3(b)と図3(c)であり、分解能10cmを達成していることが確認できる。図4に車両画像の例を示す。

表1. 装置の諸元

パラメータ	値
送信周波数	Ku帯
送信帯域幅	1.5GHz
送信ピーク電力	300W
アンテナビーム幅	$9 \times 10(^{\circ})$ (水平×垂直)
偏波	HH

HH : Horizontal transmit, Horizontal receive



図2. 航空機搭載SARの搭載機体

3.3 コヒーレント変化抽出実験

次に、コヒーレント変化抽出の実験結果を示す。図5は実験で、地表面に小型自動車を走行させて通過跡をつけた状況を示したものである。通過跡の幅は約16cm、深さ

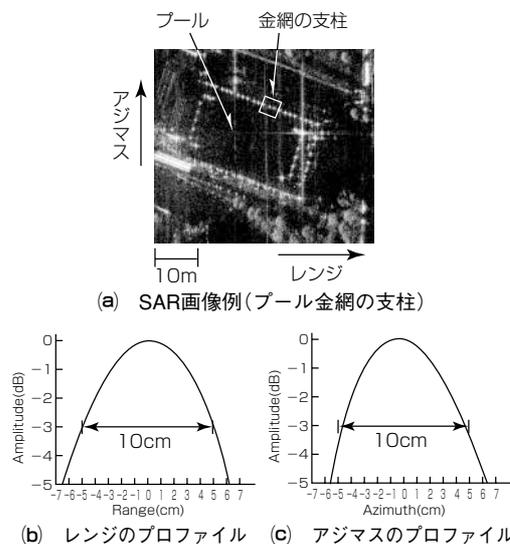


図3. 画像と分解能評価結果

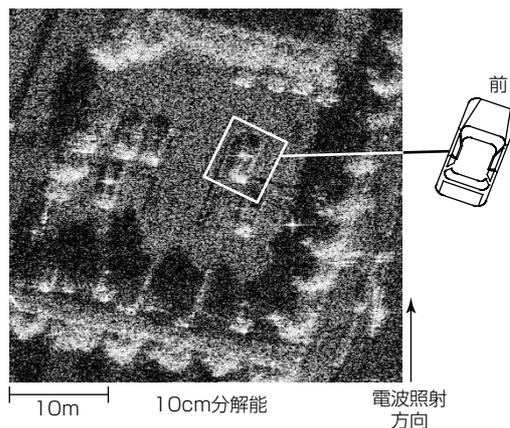


図4. SAR画像の例(車両画像)



図5. 変化抽出実験領域の状況

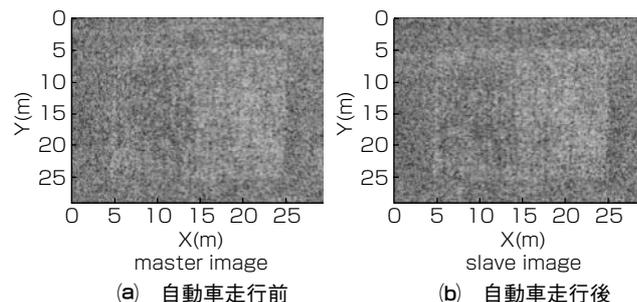


図6. 自動車走行前後の実験領域のSAR振幅画像

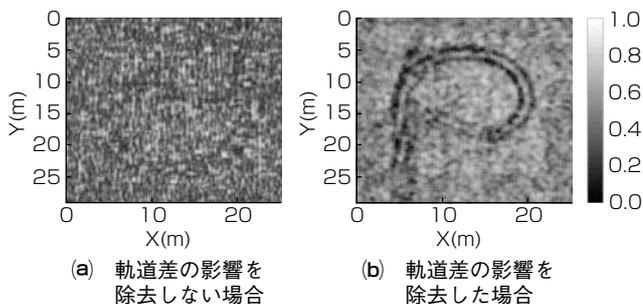


図7. コヒーレント変化抽出による車両通行跡の抽出

は1～2 cm程度であった。

実験によって取得した2枚のSAR振幅画像を図6に示す。図6(a)は自動車走行前、図6(b)は走行後の画像である。これらの振幅画像を比較しても、自動車の通行跡を確認することは困難である。

図7は図6に示した2枚の振幅画像の元となった2枚の複素画像の相互相関画像を計算したもの、すなわちコヒーレンスマップである。このうち図7(a)は軌道差の影響を除去しない場合であり、車両通行跡を視認することができない。2回の撮像間の軌道差は10m以内となっている。しかし、装置波長が約2 cmのレーダを用いて波長オーダーの地表面変化を抽出するには、十分な軌道精度ではないことが分かる。そこで先に述べたように、軌道差に生じた2枚の画像の位相差を除去する処理を行った後にコヒーレンスマップを算出したものが図7(b)である。軌道差によって生じた画像の差異が低減されることによって、車両通行跡を明瞭(めいりょう)に確認できるようになったことが分かる。

4. む す び

合成開口レーダの高分解能信号処理技術の概要を説明するとともに、当社が開発した10cm分解能航空機搭載合成開口レーダの画像例について述べた。さらに、高分解能画像の高度な活用例として、送信電波の波長オーダーの微小変化を検出可能とするコヒーレント変化抽出技術をレーダ画像に適用し、振幅画像からは視認できない車両通行跡を明瞭に抽出できることを示した。

なお、本稿で述べた変化抽出と類似した手法として、微小な時間間隔で2枚の画像を取得し、両画像の比較を行えば、静止物の画像を抑圧し、移動目標画像のみを抽出する

ことが可能となる⁽¹⁾。車両や船舶、又は海面の潮流を計測した事例もあり⁽¹¹⁾、交通状況の把握や海上監視などへの応用が期待できる。

参 考 文 献

- (1) 大内和夫：リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎，東京電機大学出版局（2003）
- (2) Tsunoda, S. I., et al : Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar, SPIE Aerosense 1999, **3704**, 1～8 (1999)
- (3) Sandia National Laboratories : Synthetic Aperture Radar
http://www.sandia.gov/RADAR/
- (4) Saalman, W., et al : Design aspect of the experimental SAR/MTI system PAMIR, Radar Conference, 25～28 (2005)
- (5) 堀内健志, ほか：航空機搭載Kuバンド合成開口レーダによる高精度三次元データの計測，電子情報通信学会技術研究報告, SANE2006-97 (2006)
- (6) 長谷川秀樹, ほか：10cm級分解能合成開口レーダ装置の開発及び画像取得結果，電子情報通信学会技術研究報告, SANE2008-1 (2008)
- (7) Mittermayer, J., et al : Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm, Proc. IGARSS2003, 1462～1464 (2003)
- (8) 高瀬成宜, ほか：高分解能合成開口レーダ観測データの画像再生処理高精度化に関する検討, 電子情報通信学会2010年総合大会講演論文集, B-2-59 (2010)
- (9) 佐藤裕幸, ほか：グラフィック用プロセッサを用いた合成開口レーダ画像再生処理，電子情報通信学会2010年総合大会講演論文集, B-2-61 (2010)
- (10) Corr, D.G., et al : Coherent change detection of vehicle movements, Proc. IGARSS 1998, 2451～2453 (1998)
- (11) 財団法人機械システム振興協会：合成開口レーダを用いた沿岸域の潮流計測・小型船舶等の検出に関するフイージビリティスタディ報告書 (2010)