

GAMMAソフトウェアでのSentinel-1サポート

Urs Wegmüller, Charles Werner, Tazio Strozzi, Andreas Wiesmann,
Othmar Frey, Maurizio Santoro

Gamma Remote Sensing AG, Worbstrasse 225, 3073 Gümligen, Switzerland

抄録

新たなSentinel-1 SARセンサを使って得られた最初の結果は非常に期待できるものですが、TOPSモードで取得される特別な干渉用ワイドスワスデータは、通常の高分解能のStripmapモードデータを利用した干渉SAR処理よりも複雑になります。各バーストにおけるアジマススペクトルのランプの急激さが位置合わせ(co-registration)の条件を非常に厳しくしています。個々のバーストデータとサブスワスデータを整合のとれたモザイクに結合するには、データやメタデータの取り扱いにおいて注意深い「ブックキーピング(データ管理)」が求められ、膨大なファイルサイズや高速データ処理には高い処理能力が必要です。これらの課題を考慮したとき、ソフトウェアによる優れたサポートがより重要になります。この寄稿では、GAMMAソフトウェアにおけるSentinel-1のサポートについて解説します。GAMMAソフトウェアは研究者やサービスプロバイダに使われる高レベルのソフトウェアパッケージであり、SARやInSAR、PSI、オフセットトラッキングの研究や処理に使用されています。

© 2016 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).
Peer-review under responsibility of the organizing committee of CENTERIS 2016

キーワード: Sentinel-1, InSAR, PSI, オフセットトラッキング, スプリットビーム干渉法, GAMMAソフト

1. はじめに

2014年4月3日、欧州宇宙機関(ESA)は、IWS(Interferometric Wide Swath)モードを第一取得モードとする2機構成のSentinel-1(略称S1)衛星のうちの第1号を打ち上げました。IWSモードでは、通称TOPSモード[1]を使用してデータが取得されます。TOPSとはアジマス方向に段階的に走査を行う地表面観測(Terrain Observation with Progressive Scans)の略語です。IWSモードの長所の1つは、およそ250kmにわたる広範囲なスワス幅(レンジ方向の画像シーンの幅)です。S1はCバンドを使用し、12日の軌道回帰日数で運用されています。2016年春に無事打ち上げられたS1Bとの連携により、回帰日数は6日に短縮されています。2機の衛星が飛行する軌道軌跡の管は非常に狭く(百m程度)、TOPSモードでのバーストはほぼ完全に同期しており、SARによる干渉を可能にしています。

GAMMAソフトウェアは高度なソフトウェアパッケージであり、SARやInSAR、PSI(Persistent Scatterer Interferometry)関連の業務において、研究者やサービスプロバイダ、ユーザをサポートします。この寄稿では、S1 IWSデータを使って、干渉処理、オフセットトラッキング、PSI及び関連して使われた手続きにおいて、GAMMAソフトウェアが提供する諸機能について説明します。

2. S1 IWSデータ処理と基本機能

S1 IWSデータは、RAW(生データ)、SLC(シングルルック複素データ)、GRD(グラウンドレンジデータセット)プロダクトとして入手可能です。S1 IWS RAWデータは、特定の用途にのみ配布されます。現在、GAMMAソフトウェアでは、S1 IWS SLCとGRDデータの使用がサポートされています。GRDプロダクトは、GAMMAソフトウェアでインポート、キャリブレート、ジオコードが可能です。GRDプロダクトは、後方散乱係数の解析や氷河の移動を測量するなどのオフセットトラッキングに使用されることがあります。

S1 IWS SLCプロダクトは、3つの「バーストSLC」のセットで、各「バーストSLC」にはサブスワス上の多数のバーストが含まれています。図1はサブスワスIW1のバーストSLCの例です。図2に示される通り、各個別のバーストでカバーされる領域はアジマス方向(次のバーストとの間)とレンジ方向(隣のサブスワスとの間)の両方で重なります。GAMMAソフトウェアにおいて、IWS SLCデータをインポートすると、3つのサブスワス画像データと関連するパラメータファイル(関連するメタデータを含む)から構成される「バーストSLC」として格納されます。インポートの段階で、ラジオメトリック較正が適用されます。「バーストSLC」を処理する機能では、SLCとMLIのモザイク画像(図3)を生成することも出来ます。両データともに1つのパラメータファイルを持つ1つのデータファイルになります。同じバースト、サブスワスからのピクセル(ルックス)のみが1個のMLIピクセルに置き換えられるように、オーバーラップ部のデータは切り取られます。S1 IWS SLCデータは図形的、およびラジオメトリック的な基準が非常に高いため、生成されたモザイクは一般にレンジとアジマスの両方で継ぎ目がありません。MLIモザイクは、GAMMAソフトウェアで使われる通常の手順でジオコーディングできます。データと共に配布されるS1のステートベクタを使用するか、またはデータ取得の数日後に利用可能になるOPODプレジジョン・ステートベクタを追加することもできます。通常はジオコーディングに精度向上処理を適用しなくても、2~3メートル以上の精度で位置合わせが可能です。さらに、GAMMAソフトウェアには、シングルバーストに対応するSLCデータをパラメータファイルと一緒に個別のSLCモザイクデータファイルの中に抽出し、バーストSLCや個々のバーストからアジマススペクトル変動に関連する位相ランプを除去するプログラムが含まれています。

3. Sentinel-1を使ったIWS干渉処理

TOPSの干渉では、アジマス方向に数千分の1ピクセルの精度という極めて正確な位置合わせが絶対必要条件です[2]。それが満たされない場合、連続するバーストの間で位相ジャンプが観察されます。この必須とされる位置合わせの精度を確保するために、シーン毎に地形の影響を考慮した方法を使用します。それに加え、通常は、最初にマッチング処理、次にバーストのオーバーラップ領域の干渉位相を考慮したスペクトルダイバーシティ法[3]といった変換の精度向上処理について決められます。全3つのサブスワスや複数バーストを含んだ、より大きな画像区画に対して精度向上のために適用されたのは、スラントレンジ内やアジマス内での一定のオフセットです。

図4にマッチング処理(1/100アジマスピクセル程度の精度)による精度向上後に計算された差分干渉画像(インターフェログラム)、図5にスペクトルダイバーシティ法による精度向上後の最終的な差分干渉画像を示します。以下の位相フィルタリング、位相アンラッピング(最小コストフローアプローチの使用など)、位相一変位変換、コヒーレンス推定は、従来のストリップマップ干渉法に対して行うものと同じです。図6にはコヒーレンスに(赤)、後方散乱に(緑)、後方散乱の変化に(青)を使用した、対応するジオコード済RGB合成画像を示します。

Sentinel-1A (S1A)と2016年4月25日に打ち上げられたSentinel-1B (S1B)の間のセンサ間干渉画像でも全く同様の処理工程が使えます。両衛星を利用できることの最大の利点は、より短い6日間の時間基線長の干渉画像を生成できることにあります。図7に2016年8月24日、イタリア中部で発生した地震による変位を示すS1A-S1B差分干渉画像の例を示します。

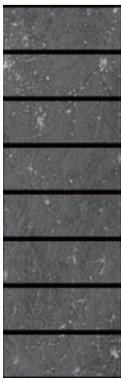


図1. IW1 SLCバースト

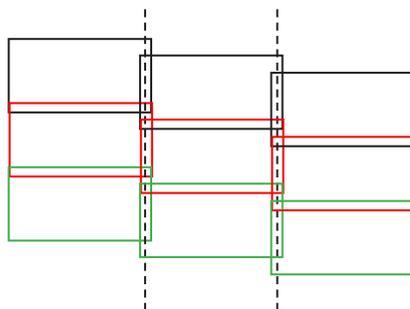


図2. バーストとサブスワス間に小さなオーバーラップをもつSentinel-1のバースト構造

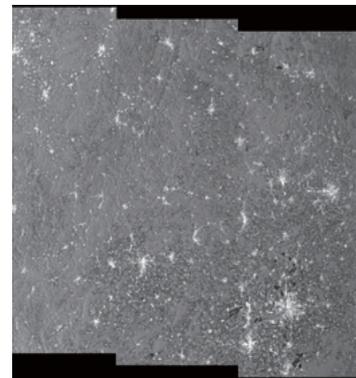


図3. 各10バーストをもつ3つのサブスワスからなる「Sentinel-1 TOPSのフルシーン」のMLIモザイク

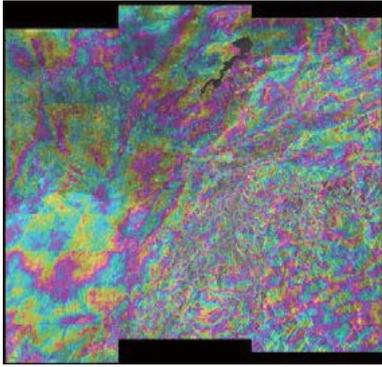


図4. S1 TOPS差分干渉画像、マッチングによる位置合わせ処理後。隣接するバースト間で複数の位相ジャンプがはっきりと見てとれる。

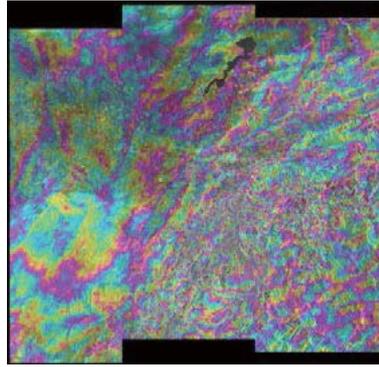


図5. S1 TOPS差分干渉画像、スペクトルダイバーシティ法による位置合わせ処理後。バースト間、隣接するサブスワス間で位相がよく合っている。

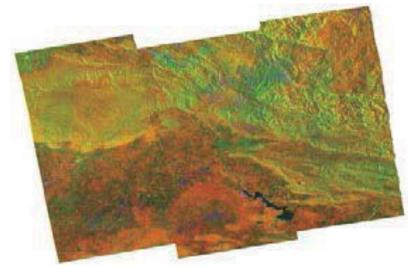


図6. S1 IWSのジオリファレンス済みRGB合成画像。コヒーレンス(赤)、後方散乱(緑)、後方散乱の変化(青)。

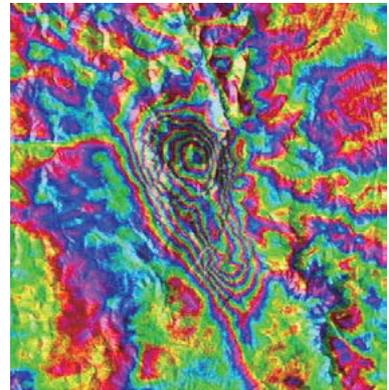
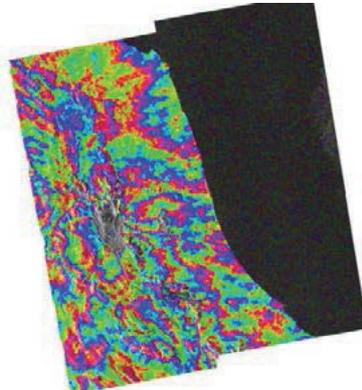
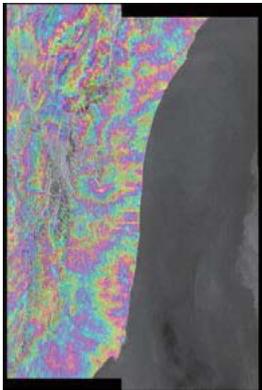


図7. イタリア中部の地震によるS1A-S1B TOPS 6日間の差分干渉画像(昇交軌道(Ascending)、20160822–20160828)。左の画像は、複素数値の差分干渉位相。中央の画像は、アンラッピング処理、若干のフィルタリング処理後の差分干渉位相(6.28ラジアン/カラーサイクルの周期カラースケールを使用、ラップ位相に対応)。右の画像は、主な変動パターンを拡大した区画。

4. 干渉時系列解析

GAMMA IPTA(干渉ポイントターゲット解析)ソフトウェアでは、シングルルックやマルチルック干渉位相を使用したり、シングルリファレンススタックやマルチリファレンススタックを使用して、変動時系列を得るための異なる干渉時系列解析アプローチをサポートする幅広いツールがサポートされています。S1 IWSデータによる初期テストでは、12回という比較的少ない反復観測からなるメキシコシティ上のスタックを使用しました。メキシコシティ地域ではスタックが小さいこと、また地面の変動がかなり大きかったことからSBAS法(Small Baseline Differential SAR Interferometry、短基線長解析)とPSI法の両方にマルチリファレンススタックを使用しました。

時系列解析の入力データとして、S1 IWS SLCの全画像を1つの参照シーン(20151015)と位置合わせしました。これについてはスペクトルダイバーシティ法による精度向上処理などの3章で説明した方法を用いまし

た。これは差分干渉画像モザイクでも確認できたのですが、非常にうまく機能しているのが、バースト境界やサブスワス間で認められる位相ジャンプがなく、市街地でのコヒーレンスが非常に高いことから確認されました。SBAS法とPSI法では、位置合わせしたSLCモザイクのアジマス位相ランプをデランプ(ランプ除去)し、メキシコシティ上を一般的な16000×5000ピクセルの区画に切り抜きました。以下では、使用したSBAS法とPSI法、および得られた成果について説明します。

4.1. S1 IWSデータを使用したSBAS時系列解析

文献[7, 8]に述べられている方法と同じSBAS法に従いました。具体的には、レンジ10、アジマス2のルック数を使用したマルチルック差分干渉位相画像を考えました。スタック全体で基線長すべてが250m未満のため、空間的な全基線長は短いです。時間によるコヒーレンスを最大にし、かつ変動位相を最小にすることで位相アンラッピングをやすくするために、可能な限り最小の時間間隔を考えました。冗長な観測を含めるため、時系列で互いに3ポジション離れるまでのシーン間のペア(例、1-2、1-3、1-4、2-3、2-4、2-5、3-4、...)、合計で30ペアを含めました。

各ペアに対して、SRTM標高データを地形の参照データとして使って差分干渉画像を計算し、位相をアンラップしました。次にアンラップした位相は、特異値分解を使って時系列に変換されました。位相の時系列の他に時系列からの位相の標準偏差といった質的情報が提供されます。アンラッピングエラーがあった領域では、時系列からの位相の標準偏差が著しく高くなるため、これらの領域の結果は除かれます。主な結果は平均変動率(図8)と変動時系列です。電波の照射方向(line-of-sight)の値を垂直方向の変位率(変動は垂直方向と仮定)に変換すると、最大で40cm/年以上の地盤沈下速度を観測しました。次のバーストとの境界には異常は認められません。また、標高補正はSVD(Singular Value Decomposition、特異値分解)の段階で推定されました。

4.2. S1 IWSデータを使用したPSI(Persistent Scatterer Interferometry)時系列解析

位置合わせをし、デランプしたメキシコシティ上のSLCモザイクのスタックは、従来のストリップマップモードデータに対して使用したのと同様にPSI法への入力データとして使用することができます。Persistent Scatterer(永続散乱体)候補を識別するのに、スペクトルダイバーシティ基準に加え、後方散乱の変動性とレベルに関する基準も適用しました[4]。点状の散乱体の識別のためにGAMMA IPTAソフトウェアで利用可能なスペクトルダイバーシティ法が使われると共に、SLCがデランプされている場合、SLCのレンジ方向のオーバーサンプリングも使用することができます。

S1 IWSデータのレンジ分解能が高いため、適合する多数のPersistent Scattererが識別されました。市街地での点密度は1000点/km²をはるかに超えることが多々ありました。PSI法をより効率的にするために、特に大きな領域を処理する場合には、まず[5]に解説された方法を使用してポイント候補リストの数を少なくします。これは、点密度が非常に高い領域では点密度を急激に下げ、点密度が低い領域では全く下げないような方法で適応的に行われます。ほとんどのIPTAプログラムでベクタデータスタックしか使用されないという事実から、処理段階の速度に関連するパラメータが領域やフルSLCのサイズではなく、ポイント候補リストのポイント数だけであることが示されます。このため、IPTAのアプローチはS1 IWSのPSIに非常に効率的です。含まれたシーン数が限られているため、SBAS法で使用されたのと同じマルチリファレンススタックを使用しました。このマルチリファレンススタックを使用して、ポイントの高さ補正、線形変動率、大気位相を推定しました。これら初期の線形変動率の推定値は、時間間隔の小さいペアを基にしているため、品質的にはあまり高くありません。これらのパラメータに加えて、この段階でもアンラップされた位相成分が提供されます。次に、この位相成分を加えて、マルチリファレンススタックの全ポイントの差分位相を出します。その後、SVDを使用して、マルチリファレンススタック位相からシングルリファレンス時系列に変換します。シングルリファレンススタックを考え、この結果に対して、追加処理を行うこともできます。この例では、スタックが小さいために追加処理は行われませんでした。他の例では、シングルリファレンススタックを使用したPSIアプローチも問題なく使用されています。

PSI法で得た平均変動率(図9)は、SBAS法で得た平均変動率(図8)と密接に対応しています。変動のない領域に注目すると、2014年10月から2015年3月の期間の12シーンのCバンドスタックでは、明らかにmm/年の精度は達していないことがわかります。このPSIの結果では、次のバーストとの間の境界に異常は見られませんでした。

上述のPSI法では、バーストのオーバーラップ領域(およびサブスワスのオーバーラップ領域)で1つのバーストデータのみが考察されます。空間的な点密度に矛盾のない結果が得られるので、これは合理的と思われる。しかしオーバーラップ領域の2つの異なるバースト(またはサブスワス)でのポイントの動きを厳密に調べるには、シングルバーストのSLCを抽出するプログラムを使用することができます。

5. S1 IWSのオフセットトラッキング

S1 TOPSモードのSLCデータにオフセットトラッキングを適用するための基本方針は、3章での解説の通り、最初に2つのバーストSLCの位置合わせをすることです。オフセットトラッキング処理でオーバーサンプリン

グを適用するには、SLCデータのアジマス位相ランプをまずデランプすることをお勧めします。その後、通常のストリップマップモードデータの場合と同様に、追加的な処理(品質管理、ジオコーディング、変位をメートル単位に変換、視覚化)を行います。図10はグリーンランドの一部の氷河速度マップの例です。ENVISATのASARと比較すると、S1はレンジが広いいため、レンジ方向の感度が改善されています。一方、IWSデータのアジマス分解能が低いいため、アジマス方向の分解能は低くなります。

S1 TOPSモードのGRDデータの場合、オフセットトラッキングは、ストリップマップモードデータの場合の手順を適用できます。オフセットトラッキングの主な関心対象は、変位を測量することです。しかし、電離層の影響[文献6、6章と図12も参照]の特定やレーダ測量のためにアジマスオフセットも関心対象となる場合があります。

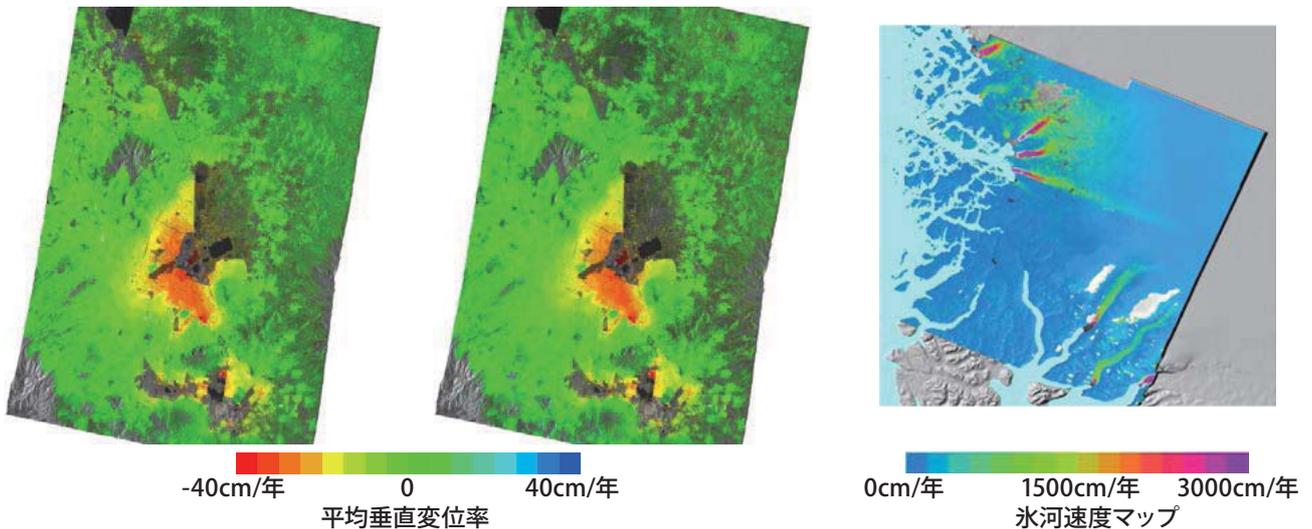


図8. SBAS法を使用し、S1 IWS SLCのメキシコシティ上の12シーンのスタックから得た平均垂直変位率

図9. PSI法を使用し、S1 IWS SLCのメキシコシティ上の12シーンのスタックから得た平均垂直変位率

図10. Greenland Mapping Project (GIMP)のDEMの起伏陰影図を重ねたUpernivik地域の速度マップ[10]

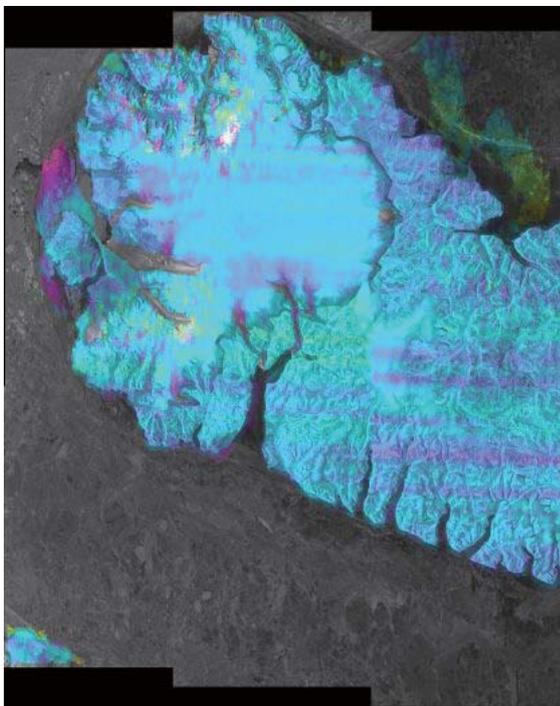
6. スプリットビーム干渉(SBI)

前述のS1 SLCの位置合わせの手順では、異なるバースト間のバーストのオーバーラップ部でSBIを使用して、アジマス方向での位置合わせへの最終的な精度向上処理が特定されます。電離層の影響を特定するためには、バースト内のSBIも関心対象となります[6]。電離層の影響の特定のため、位置合わせ済のバーストSLCは、ドップラーランプに対してデランプされます。次に、サブバンドSLCを生成するためのバンドパスのフィルタリングを含む通常のSBI法、サブバンド干渉画像の生成のための1ルック干渉画像生成、および二重位相干渉画像の計算とマルチルックを行います。図11には、明らかに電離層の影響を受けていることを示すカナダのDevon氷帽上のスプリットビーム干渉画像の例、図12には、位相ストリークが電離層を起源とする

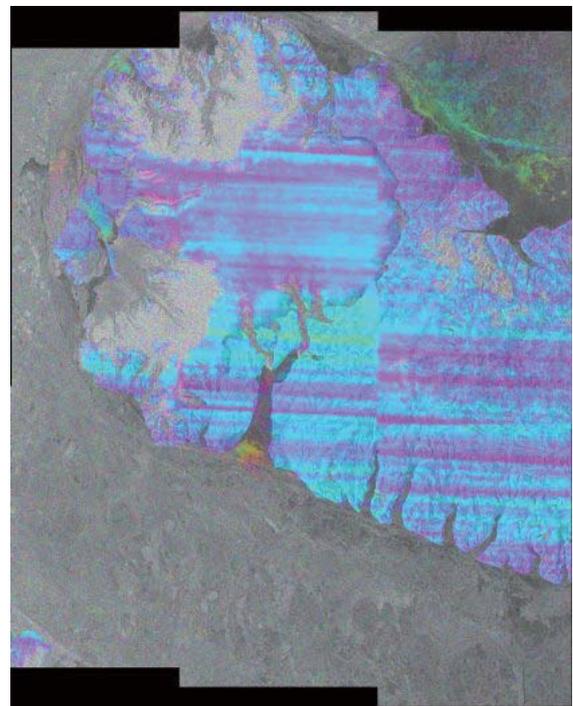
ことを裏付けるアジマスオフセットマップが示されています。

7. 結論

GAMMAソフトウェアでのS1 IWSデータを使用した干渉法やオフセットトラッキング、干渉時系列解析(SBAS法とPSI法)の手順について解説しました。「通常の」ストリップマップモードデータとの主な相違点は、IWS SLCデータの構成が3つのサブスワスとバーストから成ること、連続するバースト間の位相ジャンプ(アロングトラック(軌道に沿った)ドップラーセントロイドの変化が強いために起こる)を避けるために干渉法には極めて正確な位置合わせの精度を要することです。結果として、位置合わせの処理工程の際にバーストのオーバーラップ領域に適用するスペクトルダイバーシティ法の使用といった新しい要素を取り入れる追加的な取り扱いが必要になります。得られた結果からは、S1 IWSデータが干渉法やオフセットトラッキング、干渉時系列解析に適していることが確認されました。より大きなスタックの入手がますます可能になってきているので、ここで提示したSBAS法やPSI法のほかに、シングルリファレンスタックを使用した手法、シングルルック、マルチルックの干渉位相を組み合わせた手法[9]などと連携させた他の時系列アプローチを適用することもできます。



-0.2 0 +0.2
アジマスオフセット(SLCピクセル)



-0.5ラジアン 0 +0.5ラジアン
SBI位相(ラジアン)

原文"Sentinel-1 Support in the GAMMA Software"
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916324152>

(翻訳)株式会社オープンGIS