

合成開口レーダ画像の再生処理用ソフトウェアの開発

伊藤陽介*

個別の合成開口レーダ(SAR)には、高精度な観測時刻やSTCなどの固有のセンサ情報をアジマスライン毎にもち、これらの情報を SAR データ処理に含めることによって画像情報の精度をより高めることができる。本研究では、固有のセンサ情報を用いて SAR 画像を再生処理するソフトウェアを新たに開発することを目的としている。ドップラ周波数をベクトル表記で算出する方法と地上ターゲットの位置推定方法を述べた後、開発した SAR 画像の再生処理用ソフトウェアの構成を示すとともに、日本の地球観測用人工衛星 JERS-1 と ALOS に搭載された SAR によって取得された生データとそれに含まれる固有のセンサ情報を用いて再生処理したスラントレンジ画像を示し、本ソフトウェアの有用性を明らかにする。

[キーワード: 合成開口レーダ, 再生処理, 生データ, スラントレンジ画像]

1. はじめに

深刻化する地球環境問題の現状をグローバルに把握する手段として人工衛星による地球観測技術が利用されている。地球観測に用いられるセンサは、太陽から放射されたエネルギーを計測する受動型と、センサのアンテナからマイクロ波を地球に向けて放射し対象物体で散乱したマイクロ波を計測する能動型に大別される。受動型センサは太陽光線が必要とするため夜間の観測ができないことに加え、雲や霧などの気象条件に著しく影響を受けるという問題があった。

一方、能動型センサの場合、昼夜の区別なく常時観測できるため限られた人工衛星の観測時間を有効活用できるとともに、日照時間の短い高緯度地域の観測に有効である。さらに、大気中の粒子の大きさと比較して十分波長の長いマイクロ波を用いることによって、雲や霧、小雨に影響されにくく、降水量の多い熱帯雨林地域の観測にも適している。

能動型センサの一種である合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)では、センサが移動することによって発生するドップラ効果によって変調されたマイクロ波をパルス圧縮技術により分解能を向上させる合成開口処理を用いて空間分解能を向上させている。また、水平偏波と垂直偏波の組み合わせによる多偏波 SAR、同一地域を複数観測して得られる干渉 SAR、及び、両者の組み合わせなど、SAR データに含まれる情報の高度な利用方法が研究されている¹⁾。

このように高度化する SAR データの解析処理方法を用いて各種情報を抽出する手法を研究開発する場合、観測データの信号処理に関する理論的なアプローチに加えて、検証実験に用いるソフトウェアも並行して開発する必要がある。とくに、アンテナで受信され検波・デジタル化された生データから SAR 画像を再生処理する方法は、

すべての高次処理結果の基礎となる重要なものである。

SAR 画像再生処理方法として、これまで様々な手法が考案されている^{2, 3)}。SAR 画像を再生処理するソフトウェアには、ソースコードを含めて無償で公開されている ROI_PAC^{4, 5)}や STP^{6, 7)}などがある。

一方、個別の SAR には、高精度の観測時刻や STC(Sensitivity Time Control), AGC(Automatic Gain Control)などの固有のセンサ情報をアジマスライン毎にもち、これらの情報を SAR データ処理に含めることによって画像情報の精度をより高めることが期待できる。ROI_PAC や STP などのソフトウェアではこれらの固有のセンサ情報は有効活用されていない。本研究では、日本の地球観測用人工衛星 JERS-1^{8, 9)}と ALOS に搭載された SAR¹⁰⁻¹²⁾に対応する固有のセンサ情報を用いて SAR 画像を再生処理するソフトウェアを新たに開発することを目的としている。本論文では、SAR 画像の再生処理に関連する計算式を示した後、開発したソフトウェアの構成とその適用例について述べる。

2. SAR 画像の再生処理に関連する計算式

SAR 画像の再生処理に関する理論は、参考文献 2, 3)などに詳述されている。本章では、これらの文献で示されていない地球の自転を考慮したドップラ周波数の推定方法をベクトル表記で算出する方法と、地上ターゲットの位置推定時における楕円体高の高精度化の方法について述べる。

2. 1 ドップラ周波数の推定

人工衛星の軌道情報として、観測した時間を含む離散時刻における位置ベクトルと速度ベクトルが SAR リーダファイルに含まれる。各ベクトルは地球の重心を原点 **O** とする ECR 座標系(Earth Centered Rotating Coordinate)とする。特定のアジマスラインを観測した人工衛星の位

$$f_{DC0} = \frac{2|\mathbf{V}_s|}{\lambda} \sin \theta_{sq} \quad (9)$$

となる。 \mathbf{P}_o は静止しているので速度ベクトルは $\mathbf{V}_o = \mathbf{0}$ となり、(7) より

$$f_{DC0} = -\frac{2}{\lambda r} (\mathbf{P}_o - \mathbf{P}_s) \cdot (-\mathbf{V}_s) \quad (10)$$

となる。レンジ長の関係式

$$r^2 = (\mathbf{P}_o - \mathbf{P}_s) \cdot (\mathbf{P}_o - \mathbf{P}_s) \quad (11)$$

と、地球回転楕円体上の楕円体高 h [m] に \mathbf{P}_o が存在すると仮定すると

$$\frac{p_{ox}^2 + p_{oy}^2}{(a+h)^2} + \frac{p_{oz}^2}{\{(1-f)(a+h)\}^2} = 1 \quad (12)$$

が成り立つ。ここで、 a と f は地球回転楕円体の長半径と扁平率を示す。(10)～(12)を連立させて \mathbf{P}_o を得る。

つぎに、地上ターゲット \mathbf{P}_o が、地球の自転によって運動し、その角速度 [rad/sec] が

$$\omega_e = \frac{2\pi}{24 \times 60 \times 60} + \frac{2\pi}{365.24219 \times 24 \times 60 \times 60} \approx 7.29211 \times 10^{-5} \quad (13)$$

で与えられる場合、 $\tilde{\mathbf{V}}_o = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P}_o$ 、 $\tilde{\mathbf{A}}_o = \boldsymbol{\omega} \times \tilde{\mathbf{V}}_o$ となる。こ

こで、 $\boldsymbol{\omega} = [0 \ 0 \ \omega_e]^T$ である。ただし、SAR のヨー角を調整し、地球の自転による地上ターゲットの運動をキャンセルするヨーステアリング・モードが正常に動作している場合、 $\tilde{\mathbf{V}}_o = \mathbf{0}$ 、 $\tilde{\mathbf{A}}_o = \mathbf{0}$ とする。したがって、 \mathbf{P}_o に対

するドップラ中心周波数の推定値 \hat{f}_{DC} として、(7) より

$$\hat{f}_{DC} = -\frac{2}{\lambda r} (\mathbf{P}_o - \mathbf{P}_s) \cdot (\tilde{\mathbf{V}}_o - \mathbf{V}_s) \quad (14)$$

が得られる。

最後に、ドップラ中心周波数が \hat{f}_{DC} であり、かつ、静止している地上ターゲット \mathbf{P}_t を求める。(7) に $\mathbf{V}_t = \mathbf{0}$ を代入して

$$\hat{f}_{DC} = -\frac{2}{\lambda r} (\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_s) \cdot (-\mathbf{V}_s) \quad (15)$$

を得、(11) と (12) と同様の方程式

$$r^2 = (\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_s) \cdot (\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_s) \quad (16)$$

$$\frac{p_{tx}^2 + p_{ty}^2}{(a+h)^2} + \frac{p_{tz}^2}{\{(1-f)(a+h)\}^2} = 1 \quad (17)$$

を(15)と連立させて \mathbf{P}_t を求める。 \mathbf{P}_t に対するドップラ周波数の変化率は、 $\mathbf{A}_t = \mathbf{0}$ と \hat{f}_{DC} を用いて(7)、(8)より

$$\hat{K}_a = -\frac{2}{\lambda} \frac{\mathbf{V}_s \cdot \mathbf{V}_s + \mathbf{P}_r \cdot \mathbf{A}_s - \left(-\frac{\lambda \hat{f}_{DC}}{2}\right)^2}{r} \quad (18)$$

と推定できる。

なお、軌道情報の精度が低い場合やあらかじめ θ_{sq} を正

確に推定することが困難な場合、生データを使って推定されたドップラ中心周波数を用いる^{3, 15)}。

2. 2 地上ターゲットの位置推定

SAR の観測情報から地表ターゲットの位置を推定するために、連立方程式(10)～(12)と(15)～(17)を解く必要がある。両者は同様な方法が適用できるため、本節では後者について述べる。

Newton-Raphson法を適用して(15)～(17)を満たす \mathbf{P}_t の近似解を求める。(15)～(17)に対応する関数をそれぞれ

$$f_1(\mathbf{P}_t) = \begin{cases} \frac{2}{\hat{f}_{DC} \lambda r} (\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_s) \cdot (-\mathbf{V}_s) + 1 & |\hat{f}_{DC}| \geq 1 \\ \frac{2}{\lambda r} (\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_s) \cdot (-\mathbf{V}_s) + \hat{f}_{DC} & |\hat{f}_{DC}| < 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$f_2(\mathbf{P}_t) = \frac{(\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_s) \cdot (\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_s)}{r^2} - 1 \quad (20)$$

$$f_3(\mathbf{P}_t) = \frac{p_{tx}^2 + p_{ty}^2}{(a+h)^2} + \frac{p_{tz}^2}{\{(1-f)(a+h)\}^2} - 1 \quad (21)$$

とする。 $\mathbf{P}_t^{(k)} = [p_{tx}^{(k)} \ p_{ty}^{(k)} \ p_{tz}^{(k)}]^T$ 、 $k=0$ を初期値とし、

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial p_{tx}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial p_{ty}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial p_{tz}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial p_{tx}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial p_{ty}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial p_{tz}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} \\ \left. \frac{\partial f_3}{\partial p_{tx}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} & \left. \frac{\partial f_3}{\partial p_{ty}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} & \left. \frac{\partial f_3}{\partial p_{tz}} \right|_{\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_t^{(k)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_{tx}^{(k)} \\ \Delta p_{ty}^{(k)} \\ \Delta p_{tz}^{(k)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{P}_t^{(k)}) \\ f_2(\mathbf{P}_t^{(k)}) \\ f_3(\mathbf{P}_t^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

を解き、 $\Delta \mathbf{P}_t^{(k)} = [\Delta p_{tx}^{(k)} \ \Delta p_{ty}^{(k)} \ \Delta p_{tz}^{(k)}]^T$ を得る。このベクトルを用いて、

$$\mathbf{P}_t^{(k+1)} = \mathbf{P}_t^{(k)} + \Delta \mathbf{P}_t^{(k)} \quad (23)$$

とする。(22) と (23) を繰り返し適用し、収束条件 $|\Delta \mathbf{P}_t^{(k)}| < \varepsilon_p$ を満たす近似解を $\hat{\mathbf{P}}_t$ とする。ここで、 ε_p は近似精度を示す定数である。

(21)では緯度によって変化する卯酉線曲率半径 N を考慮していないため、この方法で得られた $\hat{\mathbf{P}}_i$ の楕円体高 \hat{h} に誤差を含む。そこで、(21)の右辺第1項と第2項の分母をそれぞれ、 $(N+h)^2$ 、 $\{(1-f)^2 N + h\}^2$ に置き換え、再び近似解を求め、楕円体高の残差 $|\hat{h} - h|$ が規定値以下となるまで繰り返す。ここで、 $\hat{\phi}_i$ は $\hat{\mathbf{P}}_i$ の緯度であり、

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - 2f(1-f)\sin^2 \hat{\phi}_i}} \quad (24)$$

である。

なお、レーダの放射方向を考慮した初期値 $\mathbf{P}_i^{(0)}$ は、つぎの手順により求める。まず、 \mathbf{P}_s から緯度 φ_s 、経度 λ_s を求め、その位置において楕円体高が 0[m] の点を \mathbf{P}_{nadia} とする。 $\angle OP_s \mathbf{P}_i$ で示される地上ターゲットまでのオフナディア角 γ は、

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{|\mathbf{P}_s|^2 + r^2 - |\mathbf{P}_{nadia}|^2}{2|\mathbf{P}_s|r} \quad (25)$$

である (図 1)。つぎに、速度ベクトル \mathbf{V}_s を回転軸として、レーダの放射方向が進行方向に対して右手側のとき $\theta = -(\pi - \gamma)$ 、左手側のとき $\theta = \pi - \gamma$ だけ \mathbf{P}_s を回転させたベクトルを

$$\mathbf{U} = \left(\mathbf{V}_s^T \mathbf{V}_s (1 - \cos \theta) + \begin{bmatrix} \cos \theta & v_{sz} \sin \theta & -v_{sy} \sin \theta \\ -v_{sz} \sin \theta & \cos \theta & v_{sx} \sin \theta \\ v_{sy} \sin \theta & -v_{sx} \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \right) \mathbf{P}_s \quad (26)$$

で求め、

$$\mathbf{P}_i^{(0)} = \mathbf{P}_s + r \frac{\mathbf{U}}{|\mathbf{U}|} \quad (27)$$

とする。

表 1 処理対象とする SAR データ

人工衛星	センサ	観測モード	提供機関
JERS-1	SAR	単一偏波 (HH)	JAXA, ERSDAC
ALOS	PALSAR	高分解能モード 単一偏波 (HH または VV)	JAXA, ERSDAC
		高分解能モード 2 偏波 (HH+HV または VH+VV)	
		ポラリメトリモード (HH+HV+VH+VV)	

3. SAR 画像の再生処理ソフトウェアの構成

SAR のアンテナで受信されたマイクロ波は、中間周波に変換された後、位相検波器によって振幅と位相成分が検出される。直交検波により同相 (I, In Phase) 成分と直交 (Q, Quadrature Phase) 成分に分けて検出されベースバンド信号となり、前者を実数部、後者を虚数部とする複素数データとして得られる。この複素数データを生成データと呼び、再生処理を施すことによって SAR 画像を生成できる。

SAR 画像を再生処理するアルゴリズムは、参考文献 2, 3) に示されているように 2 次元データ上で相関処理を行う方法と、レンジ方向とアジマス方向にわけて 1 次元データ上で相関処理を行う方法に大別される。大きなスクイント角を持たない SAR の場合、後者の相関処理を周波数領域で行うレンジ・ドップラ法 (RD 法) が多用され、画像精度を向上させるための補正処理手段も提案されている

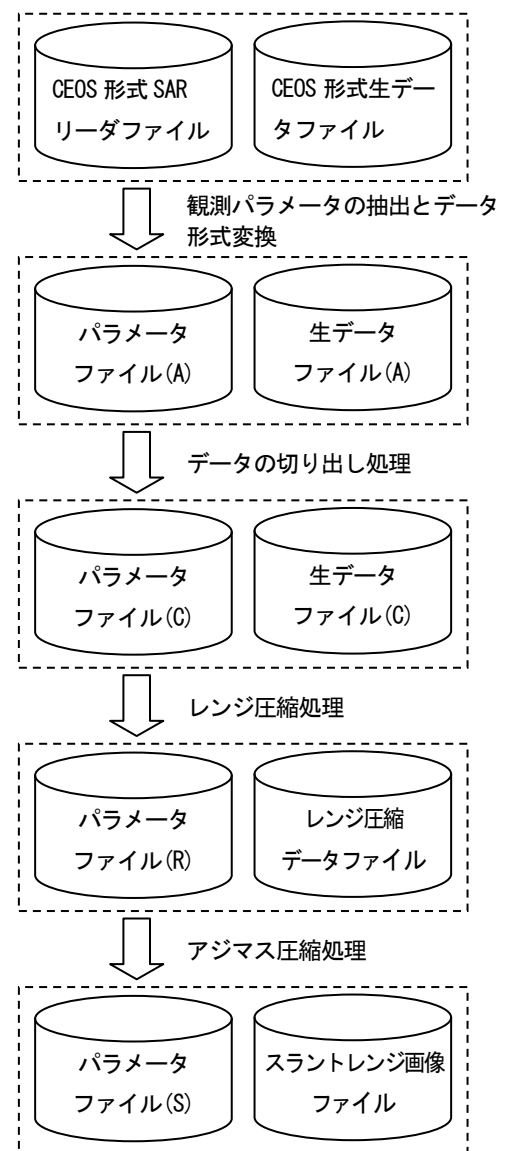


図 2 RD 法による SAR 画像の再生処理の流れ

^{13, 14)}。ここでは、RD 法に基づいて SAR 画像を再生処理するソフトウェアの構成を述べる。

本ソフトウェアで処理可能な SAR データの種類を表 1 に示す。図 2 は、RD 法による SAR 画像の再生処理の流れをパラメータとファイルの関係で示している^{17, 18)}。

3. 1 観測パラメータの抽出とデータ形式変換

表 2 に示す設定項目に従って、SAR データの提供元から配布される CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) 形式 SAR リードファイルから SAR のパラメータや軌道情報などの観測パラメータを抽出するとともに、RD 法に必要なパラメータを算出する。CEOS 形式生データファイルの各レコードのヘッダ部分には、観測時の情報が各 SAR 固有の形式で記録されている。開発したソフトウェアでは、高精度な観測時刻、STC、AGC などの情報を用いている。STC の設定値は、観測領域に応じて変更されており、それに応じてニアレンジ長も変化する。CEOS 形式生データファイルを生データファイル(A)に変換する場合、STC の変化に応じてレンジ方向にシフトすることによってニアレンジ長を調整できる。生データファイル(A)に記録される観測データの I 成分と Q 成分のデータ型は、それぞれ整数型 1 バイトである。

マイクロ秒オーダの高精度な観測時刻は、生データファイルに記録されている固有のセンサ情報から抽出して生データファイル(A)に記録する。JERS-1 の SAR の場合、記録されている時刻精度に離散的な誤差が含まれているためシーンを通して時刻情報を収集し、最小二乗法を適用して時刻の内挿を行っている。

SAR 画像の再生処理では、あらかじめ推定されたドップラ中心周波数の値を設定パラメータに含みパラメータファイル(A)に記録している。SAR リードファイルは、バイナリ形式であり可読性が低いため、階層的にパラメータを記述可能なテキスト形式のパラメータファイル(A)に再構成する。本パラメータの記述方式は、米国 Vexcel 社製 SAR プロセッサのファイル形式に準拠し、その一部を拡張している¹⁶⁾。

3. 2 データの切り出し処理

処理領域などを含む処理パラメータを表 3 に従って設定し、データの切り出し処理を行い、パラメータファイル(A)に処理パラメータを追加したパラメータファイル(C)を作成するとともに、生データファイル(A)の矩形領域を切り出し、観測データのデータ型を保持したまま生データファイル(C)を作成する。

3. 3 レンジ圧縮処理

生データファイル(C)のレコード毎に記録されているレ

ンジ方向の観測データを読み出し、表 4 に示す処理設定に従うレンジ圧縮処理を行う。パラメータファイル(C)にレンジ圧縮処理に関連するパラメータを追加するとともに、生データファイル(C)からレンジ圧縮したレンジ圧縮データファイルを作成する。

まず、パラメータの指定に従って、I 成分と Q 成分の直流成分の除去ならびにバランス調整を行う。地上からのノイズ波による影響を小さくするため、スパイク状のパワースペクトルをもつ特定周波数成分をフィルタリングするとともに、ライン毎に AGC による補正も行う。

レンジ方向の観測データ数が n_r 、レンジ参照関数長が m_r のとき、畳み込み演算に伴う無効領域は、 $n_r - m_r + 1$ だけ発生する。図 3 に示すように処理を高速化するため、レンジ圧縮処理では観測データに n_r 以上の 2 のべき乗数の最小値 n_2 となるようにゼロ・データを追加するとともに、レンジ参照関数長にも同じ長さとなるようにゼロ・データを追加し、両者を高速フーリエ変換(FFT)する。その後、成分ごとに複素乗算した後、逆フーリエ変換(IFFT)することによって畳み込み演算を行う。図 3 中の \otimes は、成分ごとの複素乗算を示す。参照関数をファールレンジ側に配置して畳み込み演算を行うと、図 3 のように無効領域が発生し、ニアレンジ側にレンジ圧縮データが生成される。

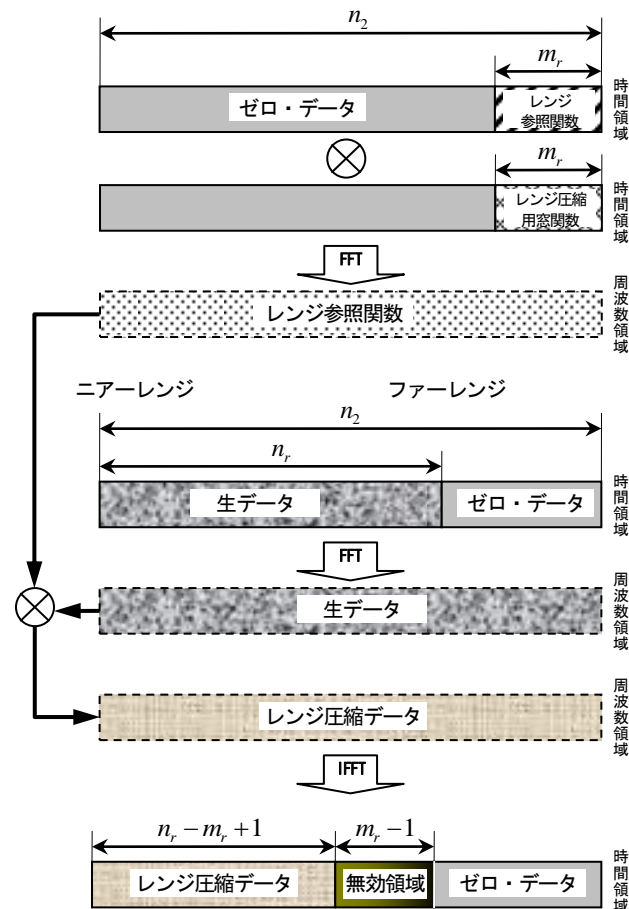


図3 レンジ圧縮処理と発生する無効領域

本ソフトウェアでは、無効領域の処理方法として「取り除く」、「ゼロで埋める」、「そのまま保持」の3種類から設定でき、レンジ圧縮処理時に発生する無効領域に関する仕組みを理解する場合に有用である。

FFTを用いて畳み込み演算する場合、窓関数を適用することによってメインローブとサイドローブの幅を一定の範囲で制御できる。本ソフトウェアでは表4に示す窓関数を選択的に適用できる。図3に示すように時間領域で発生されたレンジ参照関数には、窓関数が適用され周波数領域に変換される。

また、ドップラ中心周波数が大きい場合、2次レンジ圧縮補正を適用することによって、レンジ参照関数を発生する際のチャープ率を補正し、位相精度を高めることができる。レンジ圧縮データファイルに記録されるデータ型は、浮動小数点型4バイトの実数部と虚数部を持つ複素数型となる。

3. 4 アジマス圧縮処理

レンジ圧縮データファイルのレコード毎に記録されているレンジ圧縮された複素数型データを読み出し、表5に示す処理設定に従うアジマス圧縮処理を行う。パラメータファイル(R)にアジマス圧縮処理に関連するパラメータを追加するとともに、レンジ圧縮データファイルからアジマス圧縮したスラントレンジ画像ファイルを作成する。

(18)に示したようにドップラ周波数の変化率 \hat{K}_a は、レンジ長の関数である。どのレンジ長においてもアジマス圧縮後に得られる解像度を等しくする場合、レンジ長が長くなるとともにアジマス参照関数も長くする必要がある。あらかじめ推定されているドップラ中心周波数と観測時刻から内挿した人工衛星の位置ベクトルと速度ベクトル、及び、最も長いレンジ長を用いて、2.2節で述べた方法に基づいて地上ターゲットの位置ベクトルを求

める。この地上ターゲットにおける \hat{K}_a を求めアジマス参照関数の長さを求める。この長さにアジマス圧縮後有効となる長さを加えた値以上の2のべき乗数の最小値を n_a とする。

(3)に示したように、アジマス方向で人工衛星と地上ターゲット間の距離が変化するため、地上ターゲットを含む観測データは、レンジ方向で異なるレンジ長の位置に記録される。RD法ではアジマス方向の周波数空間上でレンジ方向の記録位置が揃うように、レンジ圧縮された複素数データを内挿処理するレンジマイグレーション補正を施す。そのため、アジマス圧縮はアジマス方向に n_a ライン毎にブロック分割して処理する(図4)。

分割した1ブロック分の処理に適用するドップラ周波数は、該当するブロックのアジマス方向の中心ラインに対して求める。レンジ毎のアジマス圧縮処理は、図4の右図に示すとおりである。アジマス方向の観測データ数が n_a 、アジマス参照関数長が m_a のとき、畳み込み演算に伴う無効領域は、 $n_a - m_a + 1$ だけ発生する。アジマス参照関数長には、 n_a と同じ長さとなるようにゼロ・データを追加し、高速フーリエ変換(FFT)する。その後、周波数領域でレンジマイグレーション補正されたレンジ圧縮データと成分ごとに複素乗算した後、逆フーリエ変換(IFFT)することによって畳み込み演算を行う。

アジマス参照関数をアジマス方向の両端に配置して畳み込み演算を行うと、図4のように無効領域が発生し、ブロックの中央部分にアジマス圧縮データが生成される。さらに、レンジマイグレーション補正の内挿処理に必要とされるレンジ圧縮データがブロックの範囲外にある場合も無効領域となる。本補正では、sinc関数($\sin(\pi x)/\pi x$)を用いて実数部と虚数部を個別に内挿処理する。本ソフトウェアでは、内挿に用いるsinc関数の点数を指定できるとともに、内挿処理を高速化するためにsinc関数値の

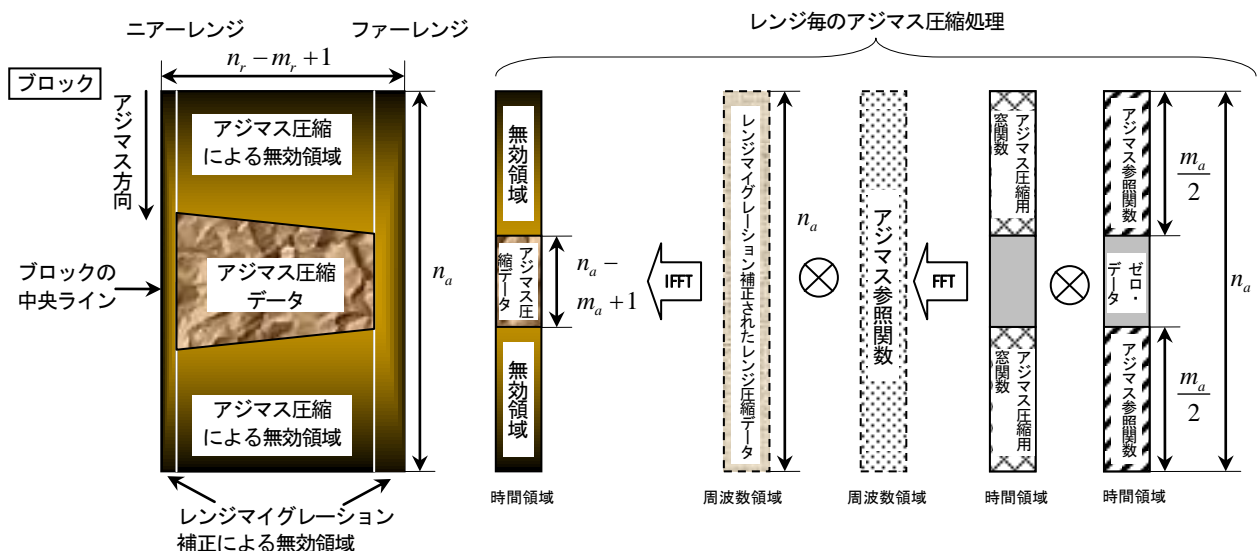


図4 アジマス圧縮処理と発生する無効領域

テーブルを作成する場合の精度をそれぞれ指定できる。

図5に示すようにブロック毎にアジマス圧縮処理されたデータは、中央に生成された有効領域から表5に示されたオーバーラップ率(%)に従ってスラントレンジ画像に統合される。最初と最後のブロックにおいて発生するアジマス方向の無効領域、及び、全ブロックにおいて発生するレンジマイグレーション補正による無効領域の処理方法に対して、それぞれ「取り除く」、「ゼロで埋める」、「そのまま保持」の3種類から設定できる。両者とも「取り除く」設定を行うと生成されるスラントレンジ画像は、図5の(a)の領域となる。この機能は、アジマス圧縮処理時に発生する複雑な無効領域に関する仕組みを理解する場合に有用である。

FFTを用いて畳み込み演算する場合、窓関数を適用することによってメインローブとサイドローブの幅を一定の範囲で制御できる。本ソフトウェアでは表5に示す窓関数を選択的に適用できる。図4に示すように時間領域で発生されたアジマス参照関数には、窓関数が適用され周波数領域に変換される。

スペックルノイズを低減するためのマルチルック処理では、アジマス参照関数を分割し、それぞれのアジマス参照関数を用いて作成したアジマス圧縮データを加算する。本ソフトウェアでは、マルチルック数の少数部分に応じて、分割したアジマス参照関数にオーバーラップ部分を設けることができる。

本ソフトウェアにおけるアジマス圧縮処理に必要なメモリ量は、最小64メガバイトである。メモリ量を指定した場合、その大きさに応じて出力データ用バッファを割り当て処理速度を向上させることができる。スラントレ

ンジ画像ファイルに記録されるデータ型は、浮動小数点型4バイトの実数部と虚数部を持つ複素数型となる。

4. SAR 画像の再生処理例

本章では、提供機関から配布された JERS-1・SAR と ALOS・PALSAR の生データを開発したソフトウェアにより再生処理したスラントレンジ画像を示す。

4. 1 JERS-1・SAR データの再生処理例

JERS-1・SAR の下降軌道において観測モードを単一偏波(HH)として1995年2月6日に観測したパスNo.72-ロウNo.243のうち鳴門海峡付近の生データ(5000アジマスライン×5000レンジビン)を再生処理したスラントレンジ画像を図6に示す。ここで、レンジ圧縮とアジマス圧縮に用いた窓関数は、それぞれカイザー窓($\alpha=2.5$)であり、アジマス方向のルック数は1(シングルルック)である。

JERS-1・SAR はヨーステアリングモードを備えていないため地球の自転を考慮してドップラ中心周波数を推定した。スクイント角を 0° とした場合、ニアレンジにおいて1886[Hz]となった。生データから推定されたドップラ中心周波数は1678[Hz]であり、その誤差は208[Hz]であった。レンジ方向の無効領域を「切り取り」、アジマス方向の無効領域を「ゼロで埋める」という設定で、本再生処理を行った。図4に示したようにレンジ長が長くなるとともにアジマス圧縮用参照関数長も長くなり無効領域が増加している。後方散乱が明確な水域と陸域との境界領域を中心としてフォーカスを目視により判読した結果、ほぼ満足できる画像が再生された。

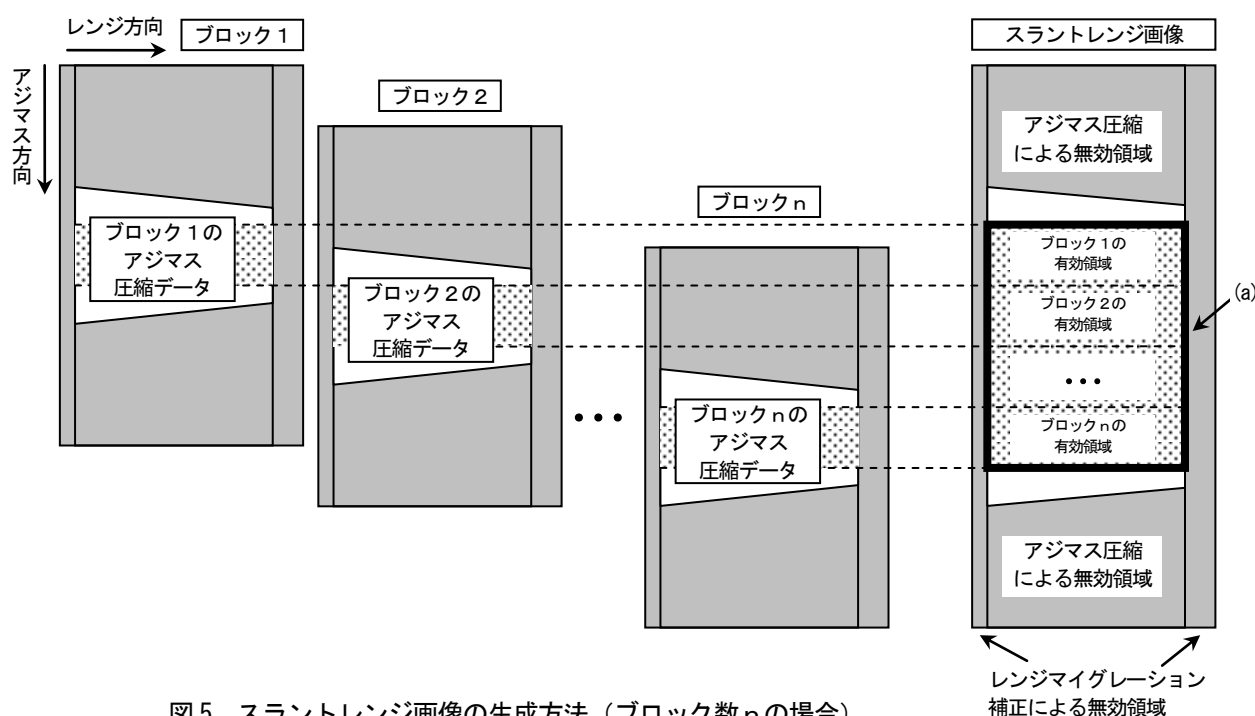


図5 スラントレンジ画像の生成方法（ブロック数nの場合）

4. 2 ALOS・PALSAR データの再生処理例

ALOS・PALSAR の上昇軌道において観測モードを高分解能モード、単一偏波(HH)として2007年11月14日に観測したパスNo.416-フレームNo.670のうち鳴門海峡付近の生データ(10000アジマスライン×10000レンジビン)を再生処理したスラントレンジ画像を図7に示す。ここで、レンジ圧縮、アジマス圧縮に用いた窓関数は、それぞれカイザー窓($\alpha=2.5$)であり、アジマス方向のルック数は1(シングルルック)である。

PALSARはヨーステアリングモードを備え、この観測では正常に動作していたためドップラ中心周波数は0[Hz]に近く、提供機関で推定された値はニアレンジにおいて19[Hz]であった。レンジ方向とアジマス方向の無効領域の設定は、4.1節と同じとし、同様な画像が得られている。

JERS-1・SARと同様な領域においてフォーカスを目視により判読した結果、ほぼ満足できる画像が再生された。本観測モードでは、JERS-1・SARと比較してアジマス方向、レンジ方向とも約2倍の解像度が得られるとともに、S/N比も改善されているため、地上物体をより明確に判読できる。

4. まとめ

本論文では、ドップラ周波数をベクトル表記で算出する方法と地上ターゲットの位置推定方法を導出した後、開発したSAR画像の再生処理用ソフトウェアの構成を示すとともに、表1に示すSARデータとそれに含まれる固有のセンサ情報を用いて再生処理したスラントレンジ画像を示し、その有用性を明らかにした。

今後、再生処理されたSAR画像の定量的な評価を行うためのSARデータのシミュレータを開発し、再生された点像の評価を行う必要がある。

謝 辞

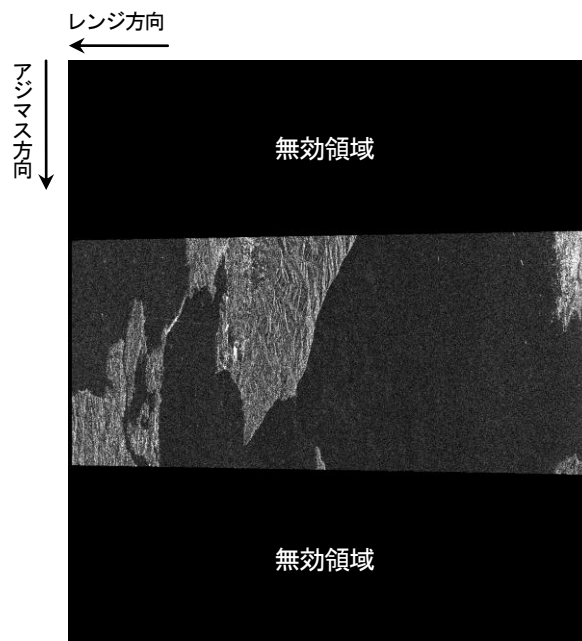
本研究は科学研究費(基盤研究(C)18500668)の助成を受けたものである。宇宙航空研究開発機構によるALOSデータ利用公募型共同研究「地球観測技術を題材とする中学校・技術教育の開発」の一環として提供されたSARデータを利用させていただいた。

参考文献

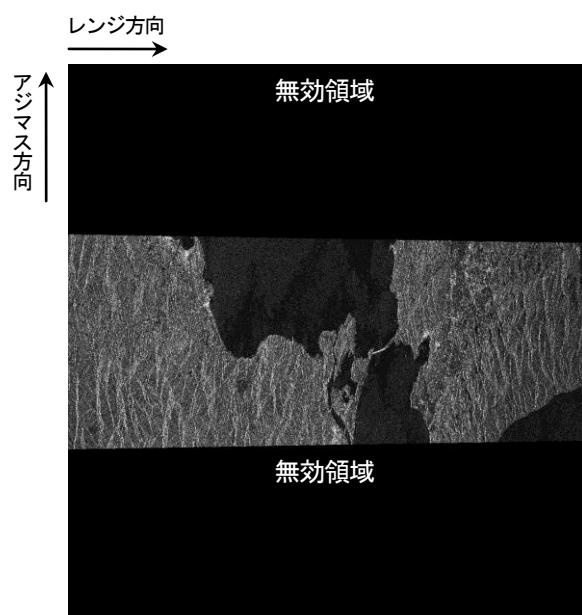
- 1) F. M. Henderson and A. J. Lewis: Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, John Wiley & Sons, USA (1998)
- 2) G. Franceschetti and R. Lanari: Synthetic

Aperture Radar Processing, CRC Press, USA (1999)

- 3) I. G. Cumming and F. H. Wong: Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data, Artech House, USA (2005)
- 4) P. A. Rosen, S. Henley, G. Peltzer and M. Simons: Updated repeat orbit interferometry package released, EOS, Trans. American Geophysical Union, Vol.85, No.5, p.47 (2004)



(下降軌道、単一偏波HH、パスNo.72-ロウNo.243、1995年2月6日、鳴門海峡付近)
図6 JERS-1・SARデータ(5000アジマスライン×5000レンジビン)のスラントレンジ画像(シングルルック)



(上昇軌道、高分解能モード、単一偏波HH、パスNo.416-フレームNo.670、2007年11月14日観測、鳴門海峡付近)
図7 ALOS PALSARデータ(10000アジマスライン×10000レンジビン)のスラントレンジ画像(シングルルック)

- 5) Repeat Orbit Interferometry PACKage (ROI_PAC), <http://roipac.org/>
- 6) J. Nicoll and R. Gens: Development and application of a SAR training processor, Proceedings of IGARSS 2003, Vol. II, pp.4593-4595 (2003)
- 7) SAR Training Processor (STP), <http://www.asf.alaska.edu/softwaretools/>
- 8) 宇宙開発事業団 地球観測センター：地球観測データ利用ハンドブック-JERS-1 編一，(財)リモートセンシング技術センター(1994)
- 9) M. Shimada: User's guide to NASDA's SAR products ver.3, NDX-000291, National Space Development Agency of Japan, Earth Observation Research Center, http://www.eorc.jaxa.jp/JERS-1/user_handbook/User_handbook_sar_ver3.pdf (2002)
- 10) (独)宇宙航空研究開発機構 地球観測利用推進センター：陸域観測技術衛星(Advanced Land Observing Satellite) ALOS ユーザハンドブック, NDX-04003 6A, http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/doc/alos_use_rhb_ja_a.pdf (2007)
- 11) (財)資源・環境観測解析センター：PALSAR データ利用ガイド，http://www.palsar.ersdac.or.jp/guide/pdf/Ref_guide_V3_j.pdf (2006)
- 12) (財)資源・環境観測解析センター：PALSAR ユーザーズガイド，http://www.palsar.ersdac.or.jp/guide/pdf/U_Guide_j.pdf (2006)
- 13) M. Y. Jin and C. Wu: A SAR correlation algorithm which accommodates large-range migration, IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, Vol.22, No.6, pp.592-597 (1984)
- 14) J. C. Curlander and R. N. McDonough: Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, USA (1991)
- 15) (財)資源・環境観測解析センター：ERSDAC PALSAR プロダクツ SAR 処理アルゴリズム解説書, pp.65-90, http://www.palsar.ersdac.or.jp/guide/pdf/sar_algorithm.pdf (2005)
- 16) Vexcel Corporation: APEX 2005 SAR Processors Vexcel File Format, VX-SAR-002, http://www.palsar.ersdac.or.jp/e/guide/pdf/VX-SAR-002_62.pdf (2005)
- 17) Y. Ito, Y. Teramoto and K. Abe: Development of web-based SAR processor for education, 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, pp.2185-2187 (2007)
- 18) 伊藤 陽介, 寺本 雄平, 阿部 健治: Ajax 技術を用いた SAR プロセッサの開発, 日本リモートセンシング学会第 43 回学術講演会論文集, pp.237-238 (2007)

表2 観測パラメータの抽出とデータ形式変換における設定項目

設定項目	キーワード	データ型	設定値	処理内容
人工衛星の名称	Satellite	文字列	ALOS JERS-1	「陸域観測技術衛星(ALOS)」を指定する。 「地球資源衛星1号(JERS-1)」を指定する。
データ提供機関	Creator	文字列	JAXA ERSDAC	「宇宙航空研究開発機構(JAXA)」を指定する。 「資源・環境観測解析センター(ERSDAC)」を指定する。
SARの名称	Sensor	文字列	PALSAR JSAR	ALOSに搭載されたSARを指定する。 JERS-1に搭載されたSARを指定する。
データレベル	Level	文字列	L1_0 L0	PALSARのデータレベル(生データ)を指定する。 JSARのデータレベル(生データ)を指定する。
CEOS形式リーダファイル	LeaderFileName	文字列	パスを含むファイル名	CEOS形式リーダファイルのパスと名称を指定し、読み込む。
CEOS形式SARデータファイル	SARdataFileName	文字列	パスを含むファイル名	CEOS形式SARデータファイルのパスと名称を指定し、読み込む。
パラメータファイル(A)	OutputParmFileName	文字列	パスを含むファイル名	パラメータファイル(A)のパスと名称を指定し、書き出す。
生データファイル(A)	OutputPlainDataFileName	文字列	パスを含むファイル名	生データファイル(A)のパスと名称を指定し、書き出す。
データ形式変換のログファイル	LogFileName	文字列	パスを含むファイル名	データ形式変換のログファイルのパスと名称を指定し、書き出す。省略した場合、標準出力にログを出力する。
STCによるエコー遅延時間の補正	AdjustEchoDelay	文字列	NONE MINIMIZE_RANGE MAXIMIZE_RANGE_PADDING_B Y_ZERO MAXIMIZE_RANGE_PADDING_B Y_ZERO	STCによるエコー遅延時間によるレンジ方向の補正をしない。 STCによるエコー遅延時間によるレンジ方向の補正をレンジ長が最小となるように行う。 STCによるエコー遅延時間によるレンジ方向の補正をレンジ長が最大となるように行い、観測データの無いところは、ゼロとする。 STCによるエコー遅延時間によるレンジ方向の補正をレンジ長が最大となるように行い、観測データの無いところは、該当レンジの平均値とする。
観測領域の楕円体高	AverageTerrainHeight	数値	楕円体高	観測領域の楕円体高を指定する。
ドップラ中心周波数	DopplerCentroid	数値×3	f _{d0} f _{d1} f _{d2}	ドップラ中心周波数[Hz]をf _{d0} + f _{d1} ×r + f _{d2} ×r ² に設定する。ここで、rはレンジビニング番号を示す。

表3 データの切り出し処理における設定項目

設定項目	キーワード	データ型	設 定 値	処 理 内 容
パラメータファイル(A)	InputParmFileName	文字列	パスを含むファイル名	パラメータファイル(A)のパスと名称を指定し、読み出す。
生データファイル(A)	InputPlainDataFileName	文字列	パスを含むファイル名	生データファイル(A)のパスと名称を指定し、読み出す。
パラメータファイル(C)	OutputParmFileName	文字列	パスを含むファイル名	パラメータファイル(C)のパスと名称を指定し、書き出す。
生データファイル(C)	OutputPlainDataFileName	文字列	パスを含むファイル名	生データファイル(C)のパスと名称を指定し、書き出す。
切り出し処理のログファイル	LogFileName	文字列	パスを含むファイル名	切り出し処理のログファイルのパスと名称を指定し、書き出す。省略した場合、標準出力にログを出力する。
切り出し位置	StartAzimuthLineNumber	数値	アジマスライン番号	アジマス方向の切り出し開始位置を示すアジマスライン番号を指定する。
	NrAzimuthLines		アジマスライン数	アジマス方向で切り出すアジマスライン数を指定。省略した場合、最大アジマスライン数となる。
	StartRangeBinNumber		レンジビン番号	レンジ方向の切り出し開始位置を示すレンジビン番号を指定する。
	NrRangeBins		レンジビン数	レンジ方向で切り出すレンジビン数を指定。省略した場合、最大レンジビン数となる。

表4 レンジ圧縮処理における設定項目

設定項目	キーワード	データ型	設 定 値	処 理 内 容
パラメータファイル(C)	InputParmFileName	文字列	パスを含むファイル名	パラメータファイル(C)のパスと名称を指定し、読み出す。
生データファイル(C)	InputPlainDataFileName	文字列	パスを含むファイル名	生データファイル(C)のパスと名称を指定し、読み出す。
パラメータファイル(R)	OutputParmFileName	文字列	パスを含むファイル名	パラメータファイル(R)のパスと名称を指定し、書き出す。
レンジ圧縮データファイル	OutputPlainDataFileName	文字列	パスを含むファイル名	レンジ圧縮データファイルのパスと名称を指定し、書き出す。
レンジ圧縮処理のログファイル	LogFileName	文字列	パスを含むファイル名	レンジ圧縮処理のログファイルのパスと名称を指定し、書き出す。省略した場合、標準出力にログを出力する。
レンジ圧縮による無効領域の処理	RangeThrowawayRegion	文字列	ZERO	無効領域をゼロで埋める。
			CUT	レンジ圧縮データから無効領域を除く。
			KEEP	無効領域をそのままレンジ圧縮データに含める。
IQのDC成分の調整	IQ_DC_Bias	文字列	LINEBYLINE	アジマスライン毎にI及びQの平均値を求め、DC成分を除去する。
			SCENE	1シーンのI及びQの平均値から、DC成分を除去する。
IQのバランス調整	IQ_ImbalanceCompensation	文字列	LINEBYLINE	IQのバランスをアジマスライン毎に調整する。
			SCENE	IQのバランスを1シーン毎に調整する。
			NO	IQのバランスを調整しない。
レンジ圧縮に使うFFT長	LenRangeFFT	数値	2のべき乗数	レンジ圧縮に使うFFT長を指定する。必要に応じて長さは自動調整される。
レンジ方向のルック数(*1)	NrRangeLooks	数値	ルック数	レンジ方向のルック数を指定する。
レンジ圧縮に使う窓関数	RangeWindowFunc	文字列	RECT	窓関数に矩形窓を使う。
			HANNING	窓関数にハンニング窓を使う。
			HAMMING	窓関数にハミング窓を使う。
			BLACKMAN	窓関数にブラックマン窓を使う。
		文字列と数値	KAISER α 値	窓関数に α 値で指定されたカイザー窓を使う。
ノイズ除去	NoiseCut	数値	係数	指定された係数を使って異常なパワースペクトルをもつノイズを除去する。
AGC補正	AGC	文字列	YES	AGC補正を適用する。
			NO	AGC補正を適用しない。
二次レンジ圧縮補正	SecondaryRangeCompression	文字列	YES	二次レンジ圧縮補正を適用する。
			NO	二次レンジ圧縮補正を適用しない。

(*1) ルック数1のみ対応

表5 アジマス圧縮処理における設定項目

設定項目	キーワード	データ型	設 定 値	処 理 内 容
パラメータファイル(R)	InputParmFileName	文字列	パスを含むファイル名	パラメータファイル(R)のパスと名称を指定し、読み出す。
レンジ圧縮データファイル	InputPlainDataFileName	文字列	パスを含むファイル名	レンジ圧縮データファイルのパスと名称を指定し、読み出す。
パラメータファイル(S)	OutputParmFileName	文字列	パスを含むファイル名	パラメータファイル(S)のパスと名称を指定し、書き出す。
スラントレンジ画像ファイル	OutputPlainDataFileName	文字列	パスを含むファイル名	スラントレンジ画像ファイルのパスと名称を指定し、書き出す。
アジマス圧縮処理のログファイル	LogFileName	文字列	パスを含むファイル名	アジマス圧縮処理のログファイルのパスと名称を指定し、書き出す。省略した場合、標準出力にログを出力する。
アジマス圧縮によるレンジ方向無効領域の処理	RangeThrowawayRegion	文字列	ZERO	レンジ方向の無効領域をゼロで埋める。
			CUT	スラントレンジ画像からレンジ方向の無効領域を除く。
			KEEP	レンジ方向の無効領域をそのままスラントレンジ画像に含める。
アジマス圧縮によるアジマス方向無効領域の処理	AzimuthThrowawayRegion	文字列	ZERO	アジマス方向の無効領域をゼロで埋める。
			CUT	スラントレンジ画像からアジマス方向の無効領域を除く。
			KEEP	アジマス方向の無効領域をそのままスラントレンジ画像に含める。
有効領域のオーバーラップ率	EffectivePatchRate	数値	オーバーラップ率	アジマス圧縮処理の有効領域のオーバーラップ率[%]を指定する。
アジマス圧縮処理に使うメモリ	SAR_DataBufSize	数値	メモリサイズ	アジマス圧縮処理に使うメモリサイズをメガバイトの単位で指定する。
観測領域の楕円体高	AverageTerrainHeight	数値	楕円体高	アジマス圧縮時に算出するパラメータの楕円体高を指定する。
アジマス方向の解像度	AzimuthResolution	数値	解像度	アジマス方向の解像度を[m]で指定する。
アジマス圧縮に使うFFT長	LenAzimuthFFT	数値	2のべき乗数	アジマス圧縮に使うFFT長を指定する。必要に応じて長さは自動調整される。
アジマス方向のルック数	NrAzimuthLooks	数値	ルック数	アジマス方向のルック数を指定する。
アジマス圧縮に使う窓関数	AzimuthWindowFunc	文字列	RECT	窓関数に矩形窓を使う。
			HANNING	窓関数にハンニング窓を使う。
			HAMMING	窓関数にハミング窓を使う。
			BLACKMAN	窓関数にブラックマン窓を使う。
		文字列と数値	KAISER α 値	窓関数に α 値で指定されたカイザー窓を使う。
内挿処理用sinc関数の点数	NrInterpolationPoints	数値	点数	レンジマイグレーション補正に必要な内挿処理に使うsinc関数の点数を指定する。
内挿処理の精度	InterpolationPrecision	数値	精度を示す値	レンジマイグレーション補正に必要な内挿処理に使うsinc関数の精度を指定する。