

## 3-5 航空機搭載3次元高分解能映像レーダ(Pi-SAR)システムの開発

### 3-5 Development of Airborne high-resolution multi-parameter imaging radar SAR, Pi-SAR

梅原俊彦 浦塚清峰 小林達治 佐竹 誠 灘井章嗣 前野英生  
増子治信 島田政信

UMEHARA Toshihiko, URATSUKA Seiho, KOBAYASHI Tatsuharu, SATAKE Makoto,  
NADAI Akitsugu, MAENO Hideo, MASUKO Harunobu, and SHIMADA Masanobu

#### 要旨

通信総合研究所及び宇宙開発事業団は1993年から1996年にかけて、Xバンド及びLバンドの航空機搭載合成開口レーダを共同で開発した。このレーダは地表面分解能がX/Lそれぞれ1.5/3mと非常に高分解能である。また、両バンド共にポラリメトリック機能を有しており、さらにXバンドはクロストラックインターフェロメトリの機能を有し、地表面高度を2mの精度で観測可能である。両システムは、小型のジェット飛行機であるガルフストリームⅡに搭載される。本稿ではこれらのシステム及び処理システムについて報告するとともに、性能の評価結果を記す。

The airborne X/L-band Synthetic Aperture Radar system (Polarimetric and Interferometric SAR, Pi-SAR) was developed by the Communications Research Laboratory and National Space Development Agency of Japan in their joint project from 1993 to 1996. The resolution of the X-band image is about 1.5m and L-band is about 3.0m. Both SARs can make fully polarimetric observations. The X-band SAR has a cross-track interferometric function that measures the ground height with accuracy of 2m. These systems are installed in the airplane, Gulfstream II. In this paper we describe our Pi-SAR system and the ground processing system. In addition, we also discuss the performance of our system by using the Pi-SAR data.

#### [キーワード]

合成開口レーダ, 高分解能, ポラリメトリ, インターフェロメトリ, 2周波  
Synthetic Aperture Radar(SAR), High-resolution, Polarimetry, Interferometry, Dual frequency

## 1 はじめに

近年、地球環境に対する取組は世界的な問題として注目されている。その中でも、砂漠化等のモニタリング、火山噴火や地震、森林火災の状況把握等に対し、リモートセンシング技術は大いに期待されている。観測手段として電波を利用する利点は、雲等の天候に左右されないこと、昼夜を問わず24時間観測が可能である点にある。マイクロ波を用いたリモートセンサの一つであ

る合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)は、航空機や人工衛星からマイクロ波を送信し、地表面あるいは物体から反射して戻ってくるエコーを受信し、映像としてとらえることのできるセンサであるが、開口合成やパルス圧縮といった高度な信号処理を施すことにより、非常に高い分解能を得ることができる。SARで観測される映像は、一見、モノクロの航空写真のように見えるが、マイクロ波を用いているため、雲などの天候や昼夜を問わず映像を取得で

きるところに大きなメリットがあるだけでなく、光とマイクロ波の散乱・反射特性の違いから、光のセンサと違う識別能力を持っている。SARは既に人工衛星に搭載され、実用として利用されはじめているが、航空機搭載型は観測ごとに分解能、観測幅、入射角等、最適なパラメータを選択した観測が可能で、観測幅を抑えれば衛星搭載型の約10分の1以下程度の高い分解能での観測も可能であり、ハードウェアを工夫することにより先進的な機能での応用実験を試みることができる。また、衛星が数日に一度程度、毎回ほぼ決まったコース、ほぼ決まった方向からデータを取得するのに対し、航空機は、迅速にかつ様々な方向からの観測も可能であり、例えば災害などの場合には、毎日あるいは一日に何度も観測するといった機動的な観測が可能である。

こうした航空機SARの持つ多様性や先進的な技術の検証を行うために、通信総合研究所は宇宙開発事業団と共同して、1993年度よりXバンド及びLバンドの航空機搭載3次元高分解能映像レーダ(Pi-SAR: Polarimetric and Interferometric SAR)の開発を共同して進め、様々な観測実験を行ってきた。このレーダは、実験的な目的のみならず実用的な検証を目的としているため小型ジェット機に搭載され、約40,000feet(12,000m)の高さから、航空機の左側斜め下の地上の様子を最大約40kmの幅で観測することができる。さらに、インターフェロメトリとポラリメトリという二つの先進的な機能を有しており、世界的に見ても最先端をいく多機能で高性能なレーダである。本論文では、Pi-SARシステム、データ処理システム、データ処理内容について報告するとともに、観測結果から得られたPi-SARシステムの評価について述べる。

## 2 映像レーダと合成開口の基礎

### 2.1 マイクロ波映像レーダ

マイクロ波映像レーダは、図1のように航空機又は衛星の進行方向の真横斜め下に向けてパルスを照射し、地面からのエコーを得る。レーダパルスの受信時間はレーダから地表面までの距離と比例するため、受信データはレーダの進行

方向に直行する地表面の散乱プロファイルとなる。そして、レーダがアジマス方向に移動することにより、2次元の地表の映像を得ることができる。この映像の分解能は、レンジ方向には、レーダのパルス幅によって、アジマス方向には、アジマス方向のアンテナビーム幅によって決まる。したがって、一般に、映像レーダでは、アジマス方向が非常にシャープで、それに直行する方向は、進行方向の左又は右のみに幅を持った“ファンビーム”と呼ばれるパターンアンテナが採用される。パルス幅を狭くするとレンジ方向の分解能は向上するが、送信電力が低下するためS/Nが劣化する。また、アジマス方向の分解能はビーム幅で決まるため航空機の高度に比例してビームの幅は広がり、結果として分解能は劣化する。そこで、高高度での分解能を維持するためには、アジマス方向のビームを鋭くすることが求められ、大きなサイズのアンテナが必要となる。以前、当所が開発した映像レーダの場合、高度3,000mで入射角60度に対し約60mの分解能を得るために、アンテナ開口は、約3.5mにもなっている[1]。これに対し、アジマス方向の移動を利用して、後で等価的な開口を持つアレイアンテナとして合成しようというのが、次に述べる合成開口レーダ(SAR: synthetic aperture radar)である。

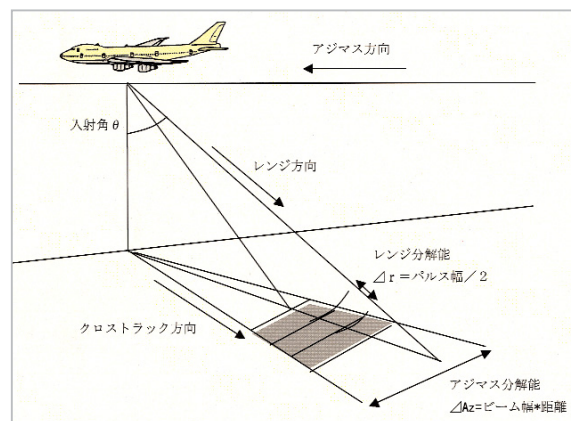


図1 映像レーダの原理

### 2.2 合成開口レーダ(SAR)

アジマス方向に比較的幅広いビームをもって飛翔体が右から左に移動するとき、一つのターゲットに着目すると、図2に示すようにターゲットは飛翔体が1から3へ飛んでいる間ビームを照

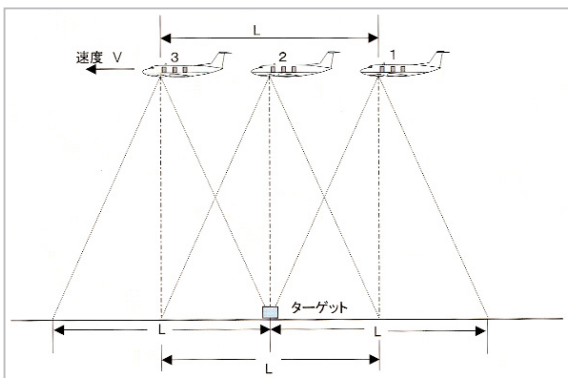


図2 アジマス方向処理概念図

射し続けられる。すなわち、アンテナの開口面を実効的にLの大きさに合成した、あるいは飛翔体の軌道上に1~3に展開されたアレイアンテナの各素子において、受信信号を記録していったと考えることができる。

この仮想的なアレイアンテナ素子の合成処理を施すことによりアジマス方向の分解能は、高度によらず、アンテナの実開口長の半分となる。つまり、SN比を考慮しなければ、小さいアンテナほど分解能としては有利になることを示している。レンジ方向の分解能を上げるためには、パルス圧縮の技術を利用する。SARでは一般的にFMチャープ圧縮が利用される。FMチャープ圧縮は、長いパルスをFM変調して送出し、受信機側ではそれと反対の周波数遅延特性を持ったフィルタ(マッチドフィルタ)を通すことによって、等価的に幅が狭く、かつ振幅が大きいパルスに圧縮する技術である(図3)。一方、先に述べた合成開口処理は別の見方をすれば、飛翔体が運動することによって地上との相対速度によって生じるドップラ効果による位相の変化がFM変

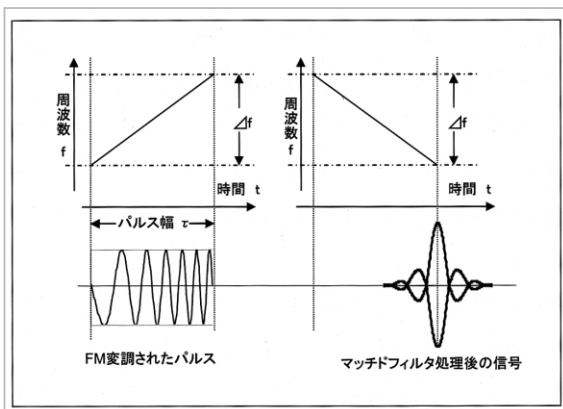


図3 チャープ圧縮の概念図

調と同じ形となることを利用し、これに対して適当なマッチドフィルタにより処理したものと理解することができる。この意味で合成開口処理はアジマス圧縮と呼ばれる。

このようなレンジ圧縮及びアジマス圧縮処理を行うには、レーダの受信機の信号強度だけでなく、位相まで含めた波形をデータとして取得する必要がある。したがって、装置は実開口レーダに比べ複雑で、記録・処理するデータの量も非常に多くなる。しかし、非常に高い分解能を得られるだけでなく、位相データを利用した新たな機能を持つことが可能である。そのうちインターフェロメトリとポラリメトリは地表面の観測に対し大きな長所を持っている。

(1) インターフェロメトリ

図4に示されるようにクロストラック方向に二つアンテナを配置して観測すると、この二つのアンテナで測定した信号の位相差は $2\pi$ の整数倍の不定性は持っているが、各アンテナとターゲットの距離の差によって生じる。つまり、二つのアンテナで受信したデータの位相差 $\phi$ を精度よく計測することができれば、(1)式から地表の各点の入射角 $\theta$ を求めることができ、(2)式から最終的にターゲットの高さを非常に高い精度で推定することができる[4]。

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) \quad \text{-----(1)}$$

$$h = H - R \cos \theta \quad \text{-----(2)}$$

ただし、 $\lambda$  : 波長

B : アンテナ間の基線長

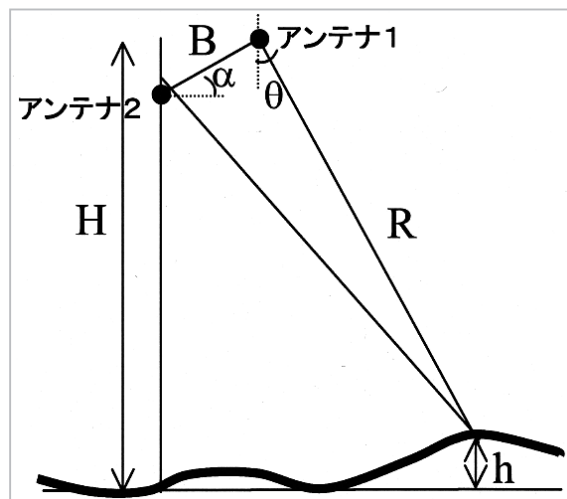


図4 高度計測の概念図

$\alpha$  : 基線が水平線となす角度  
 H : プラットホームの高度  
 R : レンジ距離

を示す。

(2) ポラリメトリ

偏波とは、空間のある点において電界ベクトルが時間とともに変化する軌跡のことであり、一般的には楕円偏波として表され、この楕円偏波の特殊な場合として円偏波、直線偏波がある。レーダの送信アンテナと受信アンテナのそれぞれに、水平偏波及び垂直偏波の二つの直交する成分をほぼ同時に送受する機能を持つことができれば、送信と受信に垂直・水平の2成分を組み合わせた四つの成分を持つ「散乱行列」を得ることができる。この散乱行列が位相関係を保った複素数である場合には、その合成により任意の偏波を受けたターゲットからの散乱(楕円偏波)を計算することができる。つまり、散乱行列から見れば形式上の情報量は4倍であるが、各々が複素振幅を持っているため、この要素間の関係

から散乱係数だけでなくターゲットの偏波に関する全ての情報が引き出せる点がポラリメトリの重要なポイントである。

### 3 Pi-SARシステム

航空機搭載3次元高分解能映像レーダ(Pi-SAR)は、通信総合研究所と宇宙開発事業団が共同で開発を進めてきたシステムで、Xバンド(波長3.14cm)とLバンド(波長23.6cm)の2周波で同時に地表面を観測可能である。水平分解能はXバンドが1.5m、Lバンドが3mでありそれぞれポラリメトリ(水平偏波と垂直偏波を送受信)観測が可能である。また、Xバンドにおいては二つのアンテナを用いて地表面高度を求めるインターフェロメトリ機能を有している。表1にPi-SARの主要諸元を示す[5]。図5に示すブロックダイアグラムのように、送信信号はXバンドで100MHz、Lバンドで50MHzのチャープ信号としてアンテナに給電され地表に向けて送信される。地表面

表1 Pi-SARの主要諸元

	X-band SAR			L-band SAR	
Center Frequency	9.55 GHz			1.27GHz	
Peak Power	6.3kW			3.0kW	
Bandwidth	100MHz			50MHz	
Antenna(L×W)	1.05m × 0.19m			1.55m×0.65m	
Incidence Angle	10 to 75 degrees variable			20 to 60 degrees fix	
Observation Modes	2CH Polarimetry or Interferometry	4CH Polarimetr y	6CH Polarimetry and Interferomet ry	1CH	4CH Polarimetr y
Swath Width(slant) (speed : 220m/s)	20.6/42.9 km	9.4/20.4 km	5.6/12.9 km	42.9 km	20.4 km
Range Resolution	1.5/3 m	1.5/3 m	1.5/3 m	3/5/10/20m	3/5/10/20m
Azimuth Resolution (4-look Processing)	1.5/3m			3/6 m	
Interferometry Baseline Accuracy in height	Cross-track 2.3 m less than 2m (rms.)				
Sampling frequency	123.45/61.725 MHz			61.7/30.9 MHz	
Quantization bits	8 bits for both I and Q			8 bits for both I and Q	
Platform	Gulfstream II				

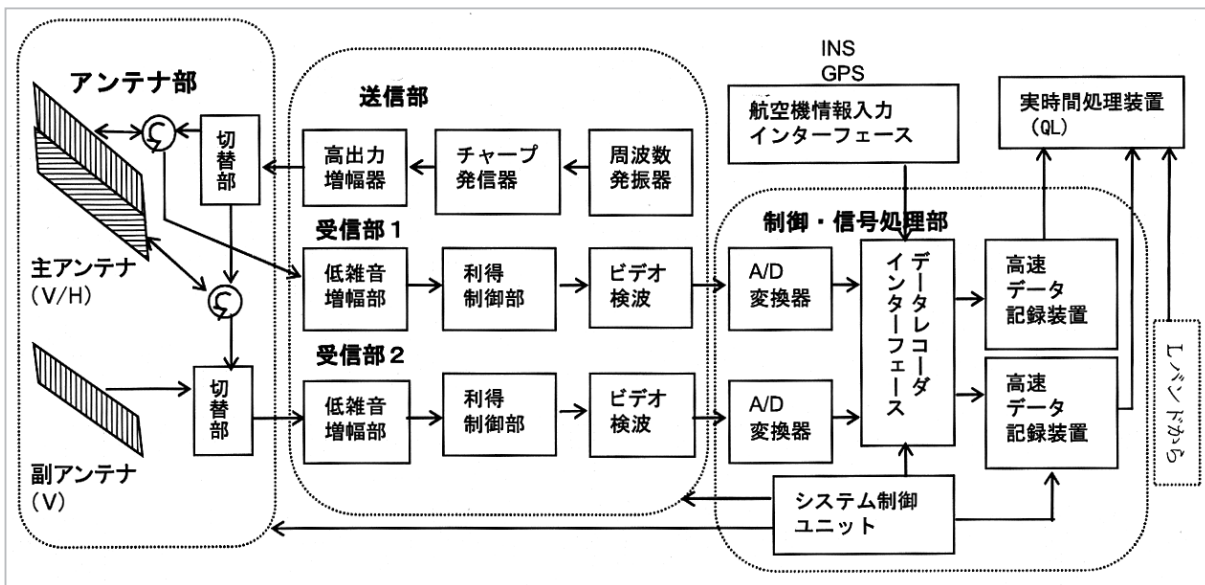


図5 Xバンドレーダのブロック図

で反射された電波はアンテナから受信機内で位相を保存したまま、受信利得等を適正に処理されて、A/D変換される。このデータは航空機の姿勢等の補助データと共にレコーダで記録される。テープに記録されたデータは読み出し用のヘッドで即時に読み出され、実時間処理装置に送られる。実時間処理装置はX、Lバンドの任意の偏波について処理を行い、画面上に表示する機能を持っている。

Lバンドのシステムでは、従アンテナがなく、またデータレコーダが1台であることを除けばほぼ同様のブロックダイアグラムとなる。これらのシステムは双発ジェット機である、ガルフストリームIIに同時に搭載される。このため、高高度からの観測が可能であり、観測高度12,000m、速度220m/sが標準的な観測パラメータとなっている[6]。

### 3.1 アンテナ系

Xバンドのアンテナはポラリメトリ機能の実現のために、主アンテナには垂直偏波、水平偏波の2本のアンテナを上下に配置した。また、インターフェロメトリのために必要な従アンテナには、受信感度の高い垂直偏波を採用した。(4)式に示したように主従アンテナ間の距離(基線長)に比例して位相変化が大きくなり、高さ計測精度は向上するが、航空機の振動によるアンテナ位置の変動も誤差となるため、できるだけ二つ

のアンテナを離し、かつ安定に取り付けることが必要となる。そこで、図6に示すようにつり下げた結果、Pi-SARのアンテナ間距離は2.3mとなった。アンテナの大きさは、利得やレドームの大きさを考慮し、垂直方向に19cm(6λ)、水平方向105cm(30λ)とし、アジマス方向にはビーム幅約2.5度のペンシル型のビームを形成した。また、エレベーション方向にはターゲットまでの距離に係わらずほぼ同様の受信強度となるように、受信強度の距離依存性を相殺するコセカント二乗型のファンビームを形成し、-10dB幅で約40度を確保している。アンテナの構造は、100MHzの周波数掃引に対して放射素子面における位相を揃えるために中央から1/2分配を繰り返す方法を採用し、最終的に八つのサブアレイ構成となっている。また、観測対象、観測モード



図6 アンテナ概観図

による入射角選択性を広げるため、ロール角をアンテナビークで40度から65度まで可変とした。ヨー角についても、アンテナが航空機の偏流角にかかわらず進行方向に対して平行となるように±6.5度の範囲で可変とする2軸角度可変機構を有している。

LバンドはXバンドに比べて波長が長く、アンテナサイズが大きくなることから、一つのアンテナで水平、垂直偏波の両方の送受信を可能とするマイクロストリップアンテナを用いた。パッチエレメントは垂直／水平直交直線偏波の交差偏波を抑えるために方形エレメントとした。パネル上のアンテナ素子及び給電部の実装は、誘電体ハニカムを使用した多層構造とし、軽量高剛性のアンテナサブパネルを形成した。アンテナのエレベーション方向のチルト角は38度とし、10dB幅で約40度(22度から58度)を確保している。図6に航空機に取り付けたアンテナ概観を示す。

レドームは、電波透過性の良好なガラスクロスとエポキシ樹脂のサンドウィッチ構造であり、電波減衰率は0.1dB程度である。Xバンドでは垂直、水平それぞれのアンテナの短軸開口径が20cmで、ヨー角可変としたためにレドームの直径は45cmとなった。また、Lバンドでは航空機の胴体に直接取り付けることにより、空気抵抗を抑えた形とした。

### 3.2 送信系

発信器は12.34MHzを基本周波数として、送信系に必要な8種類の周波数を内部で作成し出力している。基準信号は、高安定度を保つために水晶振動子を温度制御する方式の高安定水晶発振器を使用し、周波数の短期安定度は $10^{-10}$ rms/secを確保している。チャープ発生器では、基準トリガによってあらかじめEPROMに書かれた波形データを読み出すことによってチャープ信号を発生させ、基準信号を用いて実際に送信する周波数(9.55GHz又は1.27GHz)に変換した後、必要な増幅を行っている。

高出力増幅器は安定性と周波数による出力変動を抑えるためにXバンドはTWT(Traveling wave tube)を用いておりアンテナ端出力約6kwを得ている。また、Lバンドはトランジスタ型ハ

イパワーアンプで3kwを得ている。増幅された信号は、アンテナ切替えスイッチにより垂直、水平偏波アンテナのどちらかに供給される。また、増幅後の信号の一部をカップラーにより分岐し、送信電力の変動を補正するための送信出力モニタ値として取り込んでいる。

Lバンドでは単体動作のほかに、Xバンドから供給される基準周波数によって送受信のタイミングを同期した観測を可能としている。また、2004年に打ち上げが予定されている衛星に搭載される合成開口レーダ(ALOS/PALSAR)のシミュレーションのために、チャープ幅を抑えた低分解モード(10m、20m)も選択可能である。

### 3.3 受信系

受信系はX/Lバンド共にポラリメトリ機能を実現するために垂直偏波と水平偏波を同時に受信し、それぞれを独立に扱うために、同一構成のチャンネル1と2の二系統を有している。つまりチャンネル1で垂直偏波の、チャンネル2で水平偏波からの信号を処理する。ただしXバンドでは、一度の観測でのインターフェロメトリとポラリメトリを同時に観測することを可能とするため、チャンネル1は主アンテナの垂直偏波固定であるが、チャンネル2は主アンテナの水平偏波と従アンテナの垂直偏波の信号をパルスごとに切り替えるモード及びインターフェロメトリ単独としてチャンネル2を従アンテナ専用とするモードも用意されている。

それぞれのチャンネルにおいて得られた受信信号はリミッタ、バンドパスフィルタを通して、初段の低雑音増幅器に入力される。初段の増幅器には低雑音タイプのFETアンプを用いており、雑音指数を3dB以下に押さえている。その後利得制御部において周波数変換を行った後STC(Sensitive time control)及びAGC(Auto gain control)回路を通して最終的にはベースバンドで、90度位相の異なる二つの成分(I:同相、Q:直交)に分けてA/D変換することにより位相情報を持った複素信号を得ている。

### 3.4 制御及び信号処理装置

本システムは位相の変化による観測対象物の識別を行うことを目的としているため、すべて

の装置が完全に同期している必要がある。これを実現するため、すべての装置は周波数発信器から得られる基準信号によって制御されている。また、X側で発生させた1MHz、123MHzのクロックをL側に供給することによって、X、Lバンドの同期運転を可能としている。

航空機の場合、衛星と比較すると姿勢変動が短周期で発生する。そのため、航空機搭載合成開口レーダでは、できるだけリアルタイムな航空機の姿勢データが必要である。そのため、位置・姿勢情報を得る慣性航法装置(INS)はやGPS等の非常に高精度なセンサーシステムを同時に搭載し、これらのデータを信号処理装置に取り込み、受信機で得られたI、Qデータと併せてデータレコーダに記録している。

合成開口レーダの特徴の一つとして、そのデータ量の大きさがある。航空機で約3分間の観測飛行を行うと、データ量はXバンドで12GB程度、Lバンドで6GBにも達する。これらの記録のために、高速データ記録装置(DIR-1000)をXバンドで2台、Lバンドで1台利用している。このレコーダの転送速度は1台で256Mbpsである。記録媒体であるカセットの容量は1本当たり90GBと大容量であるが、連続的に観測するとすれば、約50分間で一杯になってしまう。

### 3.5 実時間処理装置

航空機搭載SARの特徴として、災害等に対する機動性が挙げられる。そのためにはリアルタイムで災害状況を把握する必要がある。これらの要求に対処するために2000年に実時間処理装置を追加した。この装置は観測によって得られたX、Lバンドの任意の偏波のデータをクイックルックとして再生処理可能である。ただし、データ量、処理速度の関係から、レンジ方向のデータ数を1024点に固定しており、分解能(最高2.5m)によって処理の幅が異なってくる。表2にスイッチによる設定パラメータを示す。レコーダでテープに書かれたデータを再度読み出して実時間処理装置に転送しているため、レコーダに書かれたデータが正しいかどうかのチェックも兼ねることができる。処理された映像は画面に表示されるとともに約1画面ごとのデータを光磁気ディスクに保存する機能を有している。ま

表2 実時間処理装置選択パラメータ

入力選択	表示分解能	処理領域(レンジ)
X1-VV	2.5m (X)	2.56km
X1-HV	5m (X,L)	5.12km
X1-VM	10m (X,L)	10.24km
X2-VH	20m (X,L)	20.48km
X2-HH		
X2-VS		
L-VV		
L-VH		
L-HV		
L-HH		

た、観測とは切り離れた形としてレコーダでテープを再生することによる処理も可能であり、テープに記録されたデータのチェック機能も併せ持っている。

## 4 観測計画とオペレーション

航空機搭載SARによる観測を行う場合、事前に航空管制局へ飛行コースを通知する必要がある。アジマス方向に対し合成開口を行うことから航空機は観測エリアで直線飛行する必要がある。観測対象エリアが多い場合は、エリア間の移動時間をできるだけ短くするような観測順を決定することが望ましい。また、後述するように観測パラメータの多様性に加えて、機上でのオペレーションは観測飛行開始前のパイロットとの応答等、準備で多忙であり、こうした中で設定ミスを少なくするとともに、設定に必要な時間を短縮しているために事前に入力した観測パラメータを読み込み、設定することとした。以下に、観測計画の策定と、実際のオペレーション手順を述べる。

### 4.1 観測計画

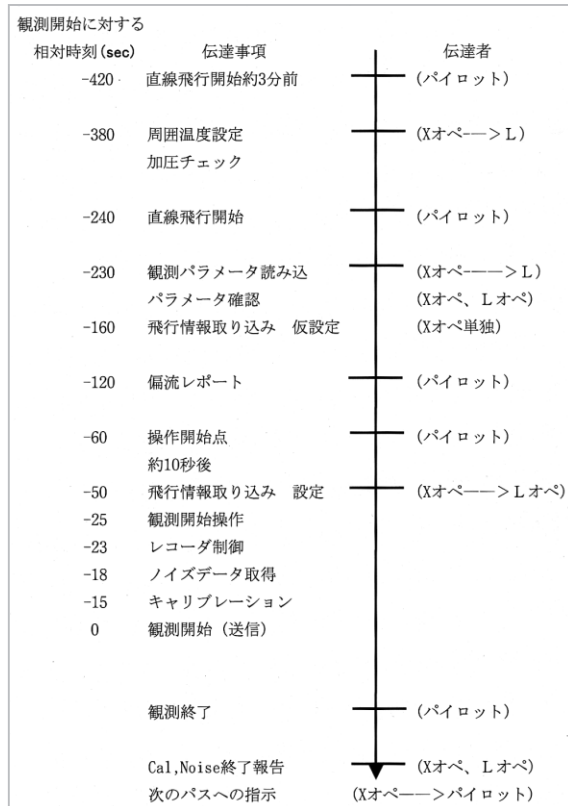
航空機搭載SARは航空機の斜め左方向を一定の幅で観測するため、事前にその観測エリアを含む航空機の飛行コースを作成する必要がある。そのためには観測点の緯度経度情報が必要である。また、ターゲットの後方散乱断面積は入射角依存性があるため、観測入射角も必要となる。特にXバンドではアンテナロール角が

可変であり、観測領域がアンテナゲインの高い位置になるように、アンテナロール角を考慮する必要もある。さらに、ターゲットによっては観測方位(電波の到来方向)も重要なパラメータである。この他、山岳地帯においては航空機の高度と地表面入射角のジオメトリから観測開始距離を設定すると、地表面高度分だけ航空機高度が実効的に低くなることから、スラント距離が異なりターゲットがレンジ内から外れることが考えられる。これらを考慮して、観測パラメータを設定する必要がある。また、急峻な山岳部では斜面によるフォアショートニングやシャド等が生じないような観測入射角を選択することも需要である。こうして1日当たり、数点から十数点の観測パスを作成し、効率的な飛行順を決定する。SAR搭載航空機であるガルフストリームは高度12,000mで約220m/secの飛行が可能であり、この場合の航続時間は約4時間程度である。これは航続距離に換算すると3,000km以上であり相当のエリアが観測可能である。ただし、実際には各フライトパスの前に航空機が偏流角を含めて安定するまでのリードを必要とし、さらに上昇・下降や観測間の飛行、旋回等で実際の観測時間は約半分となる。

#### 4.2 オペレーション

観測計画の作成によって、航空機の直線飛行開始位置や、観測モード、観測開始距離、観測幅等の事前に決定可能なパラメータについては事前にパラメータファイルとして作成しておくことが可能となる。実際の観測飛行時はこのパラメータファイルを読み込み、観測モードを設定することにより時間を短縮するとともに、パラメータ設定ミスを防いでいる。観測当日は、天候と飛行経路の確認等を行った後、離陸前にINS、GPSの起動を行う。Xバンドの導波管は放電を防ぐために窒素による加圧を離陸前から行う。各観測パスに近づくと、オペレータは表3に示すフローで特にパイロットからの情報を基にオペレーションを行う。パイロットは直線飛行開始点に到達すると、コースを外れないように偏流を安定させ、オペレータにレポートする。Xバンドオペレータは、この時点でアンテナのロール角と偏流補正のヨー角の仮設定を行う。そ

表3 観測オペレーションフロー(観測パス毎)



の後、パイロットの操作開始点の報告を受け、観測パラメータを設定する。ただし、航空機の高度、偏流角の平均のために約10秒間の待ち時間を置くようにしている。パラメータが設定されると、SARシステムはレコーダの制御を行いテープが安定走行になった時点で、3秒のノイズ観測、15秒の受信系キャリブレーションを行った後に観測を開始する。表3に示した時間はこれらの設定に必要な最小限のタイムテーブルとなっており、オペレータは観測パラメータの最終チェックやハードの状況把握等、非常に多忙な状態となっている。

### 5 データ処理システム

SARのデータは分解能が高ければそれだけ扱うデータ量が大きくなり、データの読み込み、再生処理に多くの時間が必要である。幸い近年計算機の処理能力や記憶媒体の大容量化が飛躍的に進んできた。これに共なってSARデータ処理システムも逐次変更している。ここでは2001年度末現在のシステムについて報告する。



### 5.1 ハードウェア

航空機で得られた生データからSAR画像を再生するための処理システムの構成を図7に示す。

図において、SAR画像再生用計算機とSAR高

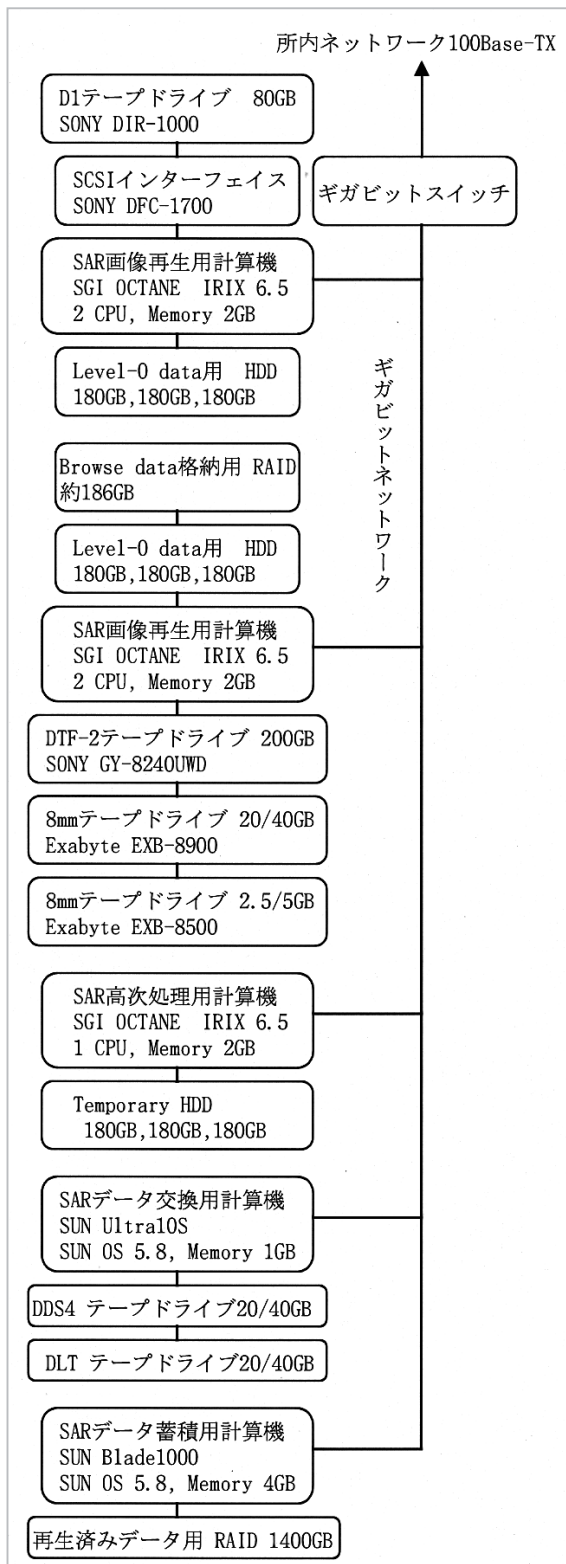


図7 SAR処理システムの構成

次処理用計算機は便宜上分類しているだけであり、計算機に特化したプログラムや処理は行っていないため、バックアップ的にはどの計算機も利用可能であり、必要に応じてハードウェアの接続等も最適化を計っている。SCSIインターフェイスを介して基本処理計算機に接続したD1テープ装置を用いて、生データの読み込みを行い規定のフォーマットに揃えるレベル0処理を行う。Xバンドの約5分間の観測データは最大19GB程度になるため180GBのハードディスクを用いてもその利用は一時ファイル的であり、レベル0処理を施したデータは容量180GBのDTFテープに記録保管している。基本処理システムは二重化しており、パラレル処理が可能である。

レベル0データを作成した後、基本的にはハードウェアのチェック、カタログ作成のために1画素が10mのBrowse処理を行う。この処理は現在観測した全パスについて行っており、カタログ情報として利用する予定である。その後、特徴的なエリア及び観測対象のエリアを画像再生処理する。標準的な処理エリアは5km×5kmであり、この1シーン単偏波の処理に約1.5時間を要している。SARの基本処理であるSSC (Single-look Slant range Complex) 処理及びMGA (Multi-look Ground range Amplitude) を施したデータはネットワークを介してファイルサーバ計算機のハードディスクに保存され、必要に応じて以降の高次処理を行っている。

### 5.2 処理ソフトウェア

SAR処理ソフトウェアは大きく分けると、

- ・レベル0データ作成 (1)
- ・画像再生処理 (2)
- ・ユーザ配布用成果物作成 (3)

の三つに分けることができる。それぞれの処理内容は以下ようになる。

#### (1) レベル0データ作成

航空機上で記録したデータテープからRAWデータを読み込み、レベル0データを作成する。具体的には受信信号データの各偏波及び観測モード(較正、雑音測定、観測)による分割が主要な処理であるが、これと同時に観測時のレーダ設定、動揺補正に必要なデータのフレームごとの飛行情報ファイルを作成している。

(2) 画像再生処理

画像再生処理は段階的に以下の四つに分類され、それぞれ出力フォーマットが異なっている。各プロダクトのフォーマット等については付録1に記す。

(a) Single-look Slant-range Complex 画像再生

再生処理の中心的な部分であり受信信号からレーダパラメータや航空機の動揺補正を行いながらレンジ圧縮やアジマス圧縮処理を行う部分であり、この処理によってデータが画像化される。この処理の詳細については後述する。

(b) Multi-look Ground-range Amplitude 画像再生

SSCデータの振幅値を計算し、マルチルック (Pi-SARでは4look) 処理を施し、スラントレンジからグランドレンジへの変換を施す。

(c) Multi-look Ground-range Polarimetric 画像処理

SSCデータをミューラー行列に変換後、マルチルック処理を行い、複素散乱行列の各成分を計算した後、スラントレンジグランドレンジ変換を施す。

(d) 干渉処理

干渉処理は、主従アンテナで得られたデータの位相差から平面位相差を除いた位相差を計算するとともにデータ間のコヒーレンスを計算し、結果として、

Multi-look Slant-range Interferometric 画像と Multi-look Slant-range Coherence 画像の二つが出力される。

そのほかに、観測状況のチェック、観測範囲の確認、カタログ作成などに利用するBrowse画像再生処理があり、Browse画像の1ピクセルは10mである代わりにレンジ方向に20km、アジマス方向に50kmの領域を1枚の画像として出力する。

(3) ユーザ配布用成果物作成

ユーザ配布用成果物作成処理は基本的にデータを圧縮してCD-ROM等での配布を容易にする処理であり、圧縮方式は米国JPLにより提案されたSIR-C “SLC” quad-pol data方式を用いている。この方式により5km×5kmの4chSSC画像

(8byte×4)の元データでは2048MBであったものを各画素10byteに圧縮し、640MB(CD1枚)に収めている。

5.3 SSC画像再生処理

ここでは、実際の再生処理の中心となるSingle-look Slantrange Complex画像再生に関して述べる。

(1) レンジ圧縮処理

レコーダに記録されているI、Qデータは90度位相の異なる振幅データである。よって複素数に変換する。ここで、A/D変換機の特性のばらつきを補正するためにI、QそれぞれのDCバイアス(0レベル調整)及び利得の補正を行っている。次に受信機で通過している増幅器、減衰器等の利得・位相変化について補正する。このあと2.2でマッチドフィルタ処理として述べた、レンジ圧縮処理を行うが、実際にはレンジ参照関数を用いた周波数領域での相関演算である。レンジ参照関数のフーリエ変換結果を $S_{ref}(f_r)$ 、受信波のフーリエ変換結果を $S_{rev}(f_r)$ 、周波数領域での窓関数 $W(f_r)$ とすると、

$$S_{rc}(f_r) = W(f_r) S_{rev}(f_r) S_{ref}^*(f_r)$$

(\*は共役複素数)

として求まる $S_{rc}(f_r)$ を逆フーリエ変換することによってレンジ圧縮信号を得る。

(2) ラジオメトリック補正

レンジ圧縮後の信号に対して、受信機以外の補正である送信レベル補正、アンテナエレベーション補正、電波伝搬路長による減衰補正を行う。

(3) 航空機動揺補正

航空機の動揺(高度等の位置ずれ、姿勢変動)は、スラントレンジピクセルの移動及び位相回転を伴うため、アジマス圧縮前に行う必要がある。航空機の参照軌道における送信アンテナ位置(クロストラック方向をy(左を+)、上下方向をz(上方を+))からの動揺による送信アンテナの位置ずれをそれぞれ $\Delta y_{trans}(y)$ 、 $\Delta z_{trans}(y)$ 、同様に受信アンテナの位置ずれを $\Delta y_{rev}(y)$ 、 $\Delta z_{rev}(y)$ 、ルック角を $\theta(\tau)$ 、マイクロ波の波長を $\lambda$ とするとスラントレンジの移動量 $\Delta r(t, \tau)$ 、位相回転量 $\Delta \phi(t, \tau)$ は、

$$\Delta r(t, \tau) = [\Delta y_{trans}(t) * \sin \theta(\tau) - \Delta z_{trans}(t) * \cos \theta(\tau)] + [\Delta y_{rcv}(t) * \sin \theta(\tau) - \Delta z_{rcv}(t) * \cos \theta(\tau)]$$

$$\Delta \phi(t, \tau) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r(t, \tau)$$

で表される。これらの補正量のうち位置情報はレーダの受信信号データと同時に記録しているINSの慣性加速度を積分して求めたものをGPS単独測位データの情報に合わせ込んで求める。また、姿勢データはINSのジャイロで検出した角加速度を積分して求めている。送信パルスはこの位置情報を基にリサンプリングする必要があるため、上記航空機情報のデータを用いて、直線位相特性を持つFIR(Finite Impulse Response)フィルタを用いて位相特性を保持するようにリサンプリングを行っている。また、フィルタ長とサンプリング間隔は可変となっている。

#### (4) ドップラーセンタ周波数推定

ドップラーセンタ周波数の推定は航空機の姿勢、速度等が正確であればやすく求めることが可能である。しかし一般的には航空機の姿勢は厳密に測定することが困難である。そこでPi-SAR処理システムでは、ドップラーセンタ周波数推定の代わりに、上記航空機動揺補正によって得られた位置情報を用いて、INSの時間遅延やドリフトを考慮して詳細な参照軌道を作って画質を保っている。

ただし、ドップラーセンタ周波数推定を用いた処理も可能であり、この場合は以下の手順となる。レンジ圧縮後の観測データのアジマスラインの信号をドップラ周波数領域に変換しパワーを求める。これとドップラ周波数に対応した往復のアジマスアンテナパターンの相関を取り、最も大きな相関となる周波数を求める。ただし、この値はパルス繰り返し周波数の整数倍の不定性を持つ。そこで、航空機の姿勢から求めたドップラーセンタ周波数を用いて、不定性を確定することにより推定している。これらは、幾つかの異なるレンジ位置において推定され、最小二乗法で内掃した形で用いられる。

#### (5) レンジマイグレーション補正

地表面のある点から航空機の軌跡を考えると、スラントレンジ距離は真横に位置したときを最小とした2次式で表される。そこでアジマス圧縮

の前処理として、処理帯域の範囲でレンジ距離を補正(並べ替え)する必要がある。この補正をレンジマイグレーション補正という。処理では時間領域のデータを周波数領域に変換し、等ドップラ周波数での移動量を計算し、アジマスライン上にターゲットの情報がすべて含まれるようにしている。

#### (6) アジマス圧縮処理

ドップラーセンタ周波数及び航空機の平均速度からアジマス参照波を生成し、レンジマイグレーション補正後の信号と相関演算を行うことによりアジマス圧縮処理を行う。この処理もレンジ圧縮と同様に周波数領域での相関演算を行っており、アジマス参照波のフーリエ変換結果を $S_{refaz}(f, \tau)$ 、レンジマイグレーション後の信号のフーリエ変換結果を $S'_{rcz}(f, \tau)$ 、窓関数を $W(f)$ とすると、それらの相関演算結果

$$S_{ac}(f, \tau) = W(f) S'_{rcz}(f, \tau) S_{ref-az}^*(f, \tau)$$

(\*は共役複素数)

から、アジマス圧縮信号は $S_{ac}(f, \tau)$ を逆フーリエ変換することによって求まる。

## 6 Pi-SARシステムの評価

### (1) 分解能

一般に合成開口レーダの分解能は、前述したように、スラントレンジ方向の分解能は $\Delta r=c/2B$ で表される。ここで $B$ はチャープ周波数掃引幅(帯域幅)である。また、アジマス分解能(シングルルック)は $\Delta Az=D/2$ である。ここで $D$ はアンテナ実開口長であり、アンテナの実際の長さの1.2倍程度である。一般的な解析に用いる処理プロダクトでは、アジマス方向の分解能をレンジ方向と同じ程度になるようにマルチルックを行い、スペckルノイズの低減を計っている。

Xバンドでは周波数掃引幅100MHz、アンテナ長1.05mより $\Delta r=1.5m$ 、 $\Delta Az=0.63m$ 、Lバンドでは周波数掃引幅50MHz、アンテナ長1.55mより $\Delta r=3.0m$ 、 $\Delta Az=0.93m$ 程度が期待される。SARの分解能を評価するためには、バックグラウンドの散乱が弱い場所での点ターゲットが必要である。CRLではシステムの較正実験として鳥取砂丘にコーナリフレクタを設置した実験を行

った。その時のデータを図8に示す。これより分解能の評価を行った結果Xバンドでレンジ方向約1.5m、アジマス方向83cm、Lバンドでレンジ方向約2.9m、アジマス方向1.2mであり設計値とほぼ一致する良好な結果を得ている。

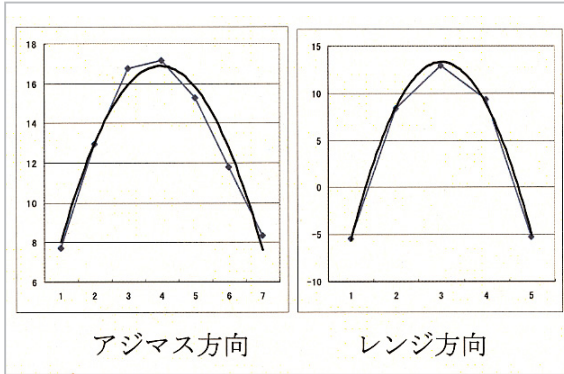


図8 CRからの応答(X-band)

(2) 最小受信感度

SARシステムでは各観測前後に内部キャリブレーションと雑音測定を行っている。このデータから最小受信感度を見積もることが可能である。雑音測定については、受信機の出力端でのパワーを算出しており、レベルダイアグラムから見ると、-77dBから-87dBの間におさまっている。また、キャリブレーションデータの例を図9に示す。これによると、入力レベルが-88dB程度からほぼ直線性を持っていることが判るため、最小受信感度は雑音とほぼ等価(-87dB)であると思われる。これは目標値の-80dBm以下を十分満足した結果となっている。

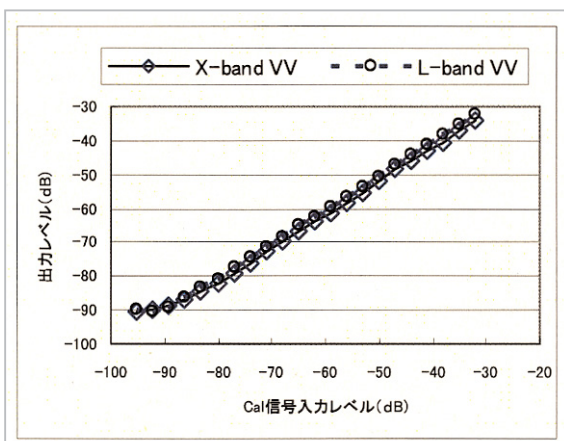


図9 受信機入出力特性

(3) グランド投影位置精度

Pi-SARのデータ処理においてグラウンドレンジへの投影処理は、処理領域で地表面高度が一定と仮定し、スラントレンジデータを航空機高度と各点の入射角で地表面に投影している。そこでグラウンドレンジのピクセル位置評価のために、秋田県大潟村でコーナリフレクタをレンジ方向に約10kmにわたって数個設置し、GPSでの位置情報との比較を行った。その結果、グラウンド投影位置精度は航空機の高度の誤差に比例し、航空機に同時に搭載しているGPS高度を用いてグラウンド投影を施すと、その高度誤差が反映されるため、十分な精度が得られないことが分かった。幸いPi-SARではインターフェロメトリ処理によって得られる軌道縞から、航空機の高度を推定することが可能である。この推定により求めた高度情報によりグラウンド投影を行うと、1ピクセル程度での精度が得られることが分かった。つまり、地表面高度を正確に求めること及び地表面高度が再生画像内で変化する場合に、地表面投影処理を各ピクセル位置の高度データを用いて投影する処理を施さないと誤差が生じることが分かった[7]。

(4) インターフェロメトリ

2.2 (1)式によってインターフェロメトリにおける誤差評価を行うと、位相測定誤差 $5^\circ$ 、高度12,000m、入射角45度で観測した場合の高度推定誤差は3.2mとなる。実際の観測データから得られる高度情報の精度を評価するために、秋田県大潟村で得られた観測データにインターフェロメトリ処理を施し高度を求め評価を行った。大潟村は干拓地であるため地上高の変動が極めて少ないと考えられる。また水田一枚の単位が $90\text{m} \times 150\text{m}$ と非常に大きく、Pi-SARの分解能であれば一つの水田内で十分なサンプルが取得可能である。そこで、入射角の異なる数点について平均値と標準偏差を求めた。その結果を表4に示す。

ただし、インターフェロメトリ処理の時点でアジマス、レンジ共 $2 \times 2$ の平均化を施しており、ピクセルスペーシングは2.5mとなっている。今回の統計処理で用いたピクセル数は約600点である。得られた結果は、入射角の浅い方が高度変化に対する位相変化が敏感であり、誤差が少な

表4 大瀧村の入射角による平均高度と分散

Inc. Angle	Normal		Ave. 3x3 pixels	
	Average	S. D.	Average	S. D.
25 deg.	7.94m	1.50	7.92m	0.56
30 deg.	8.27m	2.54	8.24m	0.90
35 deg.	6.20m	3.00	6.16m	1.12
40 deg.	5.66m	4.13	5.68m	1.14
45 deg.	6.78m	5.09	6.74m	1.35
50 deg.	7.96m	6.00	8.08m	1.57
54 deg.	5.42m	7.02	5.30m	1.98

いことを示しており、またある程度の平均化により高度精度が向上することを示唆している。幸い、Pi-SARは高分解であるから、高度情報を抽出する場合には必要に応じて、 $(5\text{m})^2$ から $(10\text{m})^2$ 程度の平均化を行うことにより所望の精度を得ることが可能と思われる。

#### (5) ポラリメトリ

ポラリメトリについては、前述したように四つの複素数の成分を持つ散乱行列で表すことができるが、これらの成分の絶対値及び成分間の定量的な関係をできるだけ正確に計測する必要があり、そのため既知のターゲットを用いた外部較正が必要である。一般的には点ターゲットであるコーナリフレクタ (Corner Reflector, CR) や能動型反射器 (Active Radar Calibrator, ARC) 等を用いて各チャンネルの絶対値を求めるほか、チャンネル間のインバランス (位相、振幅) 等を推定する必要がある。Pi-SARにおいても鳥取砂丘やサロマ湖の氷上においてCRやARCを用いて較正実験を行っている[8]。これらの実験により求めたX、Lのゲインインバランス等は較正係数として公開している (Pi-SARデータ集配布CD、CRL wwwページ)。両周波数共、クロストークは無視できる程度のものである。Lバンドについてはパッチアンテナを用いており、異なる偏波間においてもアンテナ位置が変化しないが、Xバンドについては偏波ごとに異なった位置にあるアンテナを用いている上、ロール角が可変であるため、位相に関してはアンテナ位置補正を行

う必要があり、この補正も必要である[9]。さらに、厳密なポラリメトリックな較正には、こうした標準ターゲットを映像内の多数の入射角領域に置いて計測することが必要であるが、こうした実験は現実的でない。そこでVan ZylらはJPLのAIRSARに対して自然ターゲットを併用した較正を行っている[10]。しかし、日本国内にはこれに必要な広範囲で様な散乱ターゲットを得ることが困難であり、代替的な手法の開発を進めている。

## 7 まとめ

通信総合研究所及び宇宙開発事業団で開発した航空機搭載合成開口レーダはこれまでの観測データから、処理を含めた総合的なシステムとして開発目標をほぼ満たしていることが確認された。レーダの較正係数についても鳥取砂丘でのコーナリフレクタのデータを用いて算出している。ハードウェアについては、基本システムに対して、新たに実時間処理装置を加えることにより、緊急時への対応、監視等の目的への適応力がより鮮明となった。また、膨大な量の処理を行うためのシステムの更新も随時行っており、処理ソフトウェアの改修についてもほぼ一段落したと思われる。

今後は、ハードウェアの面では、アロングトラックインターフェロメトリの可能性、データのリアルタイム伝送等が検討項目としてあげることができる。また、今までに得られたデータを含め、Pi-SARの観測データをより有効に利用するために、アプリケーション寄りの研究機関と共同で研究を進めていく必要がある。また、潜在的ユーザがPi-SARデータに触れる機会を増やすために、森林、農地、海洋等、色々な地域を含むデータをCD-ROMに収録し、配布している。Pi-SARデータに興味を持つ研究者が増えることにより、合成開口レーダを用いた各種研究がより発展すれば幸いである。

参考文献

- 1 古津年章, 中村健治, 浦塚清峰, 尾嶋武之, 野尻英行, “油汚染広域監視用航空機搭載映像レーダの小型・高性能化に関する研究”, 環境保全成果報告集, pp84-1 ~ 84-12, 平成元年度.
- 2 F.T.Ulaby, R.K.Moore, and A.K.Fung, "Microwave Remote Sensing active and passive", Artech House, Inc. MA, Vol.2, 1982.
- 3 Curlander, J. C. and R. MacDonough, "Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing", John Willy & Sons, New York, 1991.
- 4 Allen, C. T., "Interferometric Synthetic Aperture Radar", IEEE Newsletter, Sept., 1995.
- 5 梅原俊彦, 小林達治, 浦塚清峰, 増子治信, “CRLにおける航空機搭載3次元SARの開発”, 信学技報, SEAN95-99, 33-38, 1995.
- 6 T. Kobayashi, et al., "Airborne Dual-Frequency Polarimetric and Interferometric SAR", IEICE Trans. Commun., Vol.E83-B, No.9, pp.1945-1954, 2000.
- 7 梅原俊彦, 前野英生, 佐竹 誠, 浦塚清峰, “航空機搭載 SAR(Pi-SAR)再生画像の位置精度評価”, リモートセンシング学会第31回学術講演論文集, 267-268, Dec.2001.
- 8 M. Satake, et al., "Calibration of an X-band Airborne Synthetic Aperture Radar with Active Radar Calibrators and Corner Reflectors", CEOS 1999 SAR Workshop, Toulouse, France, 1999.
- 9 M. Satake, et al., "Development and Experiment of Polarization Selective Corner Reflectors for Polarimetric SAR Calibration", 2001 CEOS SAR Workshop, Tokyo, Japan, 2001.
- 10 J.J.van Zyl, "Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflectors", IEEE Tans. Geoscience Remote Sensing, Vol.28, No.3, pp.337-348, 1990.

付録1 各プロダクトの書式

(1) データプロダクト

Single-look Slantrange Complex: SSC

処理内容

レンジ圧縮

シングルルックアジマス圧縮

4byte+4byte 複素数

SSC					
	帯域幅	分解能 [m]		ピクセル [m]	
		Az <sup>1</sup>	Sr <sup>1</sup>	Az <sup>2</sup>	Sr
X-SAR	100MHz	0.375	1.5	0.261	1.214
	50MHz	0.375	3.0	0.261	2.428
L-SAR	50MHz	0.750	3.0	0.522	2.428

<sup>1</sup> 窓関数無しの場合の理論値

<sup>2</sup> ノミナル値 (航空機速度, PRFによって決まる)

Multi-look Groundrange Amplitude: MGA

処理内容

SSC 画像に対しマルチルック処理

スラントレンジ-グラウンドレンジ変換

振幅計算

2byte 整数

Multi-look Groundrange Polarimetric: MGP

処理内容

SSC 画像から複素散乱行列の各成分を計算

ミューラー行列に変換後、マルチルック処理、散乱行列へ逆変換

スラントレンジ-グラウンドレンジ変換

4byte+4byte 複素数

MGA/MGP						
	帯域幅	look 数	分解能 [m]		ピクセル [m]	
			Az <sup>1</sup>	Gr <sup>12</sup>	Az	Gr
X-SAR	100MHz	4look	1.5	1.6 - 17.2	1.25	1.25
	50MHz	8look	3.0	3.2 - 34.4	2.50	2.50
L-SAR	50MHz	4look	3.0	3.5 - 8.8	2.50	2.50

<sup>1</sup>窓関数無しの場合の理論値

<sup>2</sup>入射角範囲 20 - 60 度

### ブラウザ画像

1byte 整数

画像範囲 50km (azimuth) × 20km (range)

分解能 約 10m (range) × 10m (azimuth)

### (2) データのファイル構造

上記プログラムで解凍されたファイルには、ヘッダー等の情報は無く、1アジマスライン上のデータがアジマス方向のデータ点数だけ繰り返された形式になっています。

イメージ上の座標

アジマス方向			
( 1 , 1 )	.....	( N <sub>x</sub> , 1 )	
:		:	レンジ方向
( 1 , N <sub>y</sub> )	.....	( N <sub>x</sub> , N <sub>y</sub> )	

N<sub>x</sub> : アジマス方向のデータ点数

N<sub>y</sub> : レンジ方向のデータ点数

(a) 解凍された MGP データの各ファイル中のデータの並び

Re(1, 1)	Im(1, 1)	.....	Re(N <sub>x</sub> , 1)	Im(N <sub>x</sub> , 1)
:	:		:	:
Re(1, N <sub>y</sub> )	Im(1, N <sub>y</sub> )	.....	Re(N <sub>x</sub> , N <sub>y</sub> )	Im(N <sub>x</sub> , N <sub>y</sub> )
4byte実数	4byte実数			

(b) 解凍された振幅データ(VV 偏波)ファイル中のデータの並び

Amp(1, 1)	.....	Amp(N <sub>x</sub> , 1)
:		:
Amp(1, N <sub>y</sub> )	.....	Amp(N <sub>x</sub> , N <sub>y</sub> )
4byte実数		

解凍後のデータ量は以下のようになります。

(a) nnnn\* (8byte 複素数データ \*mmmm) \*4 偏波

(b) nnnn\* (4byte 実数データ \*mmmm)

今、nnnn=4000、mmmm=3000 とするとそれぞれの容量は

(a) 4000\* (8\*3000) \*4=384MB、

(b) 4000\* (4\*3000) =48MB となります。

### (3) 処理情報

配布データには名前の最後に \_a の付いた処理情報ファイルが添付されています。主な内容は、高度や飛行速度等の観測情報、処理シーンの緯度経度、入射角やピクセル数、ピクセルサイズ、窓関数等の処理に関する情報です。このドキュメント内にも JPEG データと共にこの情報ファイルを参照できます。再生画像の解析、検討の参考情報として読まれることをお勧めします。



うめはらとしひこ  
**梅原俊彦**

電磁波計測部門環境データシステムグループ主任研究員  
地球環境リモートセンシング



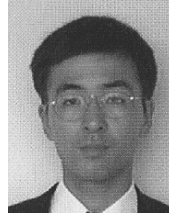
うらつかせい  
**浦塚清峰**

電磁波計測部門環境データシステムグループリーダー 工学博士  
マイクロ波リモートセンシング



こばやし たつひろ  
**小林達治**

電磁波計測部門環境データシステムグループ主任研究員 博士(理学)  
マイクロ波によるリモートセンシング



ささき 誠  
**佐竹 誠**

電磁波計測部門環境データシステムグループ主任研究員  
マイクロ波リモートセンシング



にしい あきひろ  
**灘井章嗣**

電磁波計測部門環境データシステムグループ主任研究員  
海洋物理学、海洋リモートセンシング



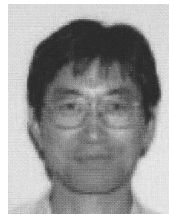
まえの ひでお  
**前野英生**

電磁波計測部門環境データシステムグループ主任研究員  
映像レーダ、リモートセンシング



まさこ はるのぶ  
**増子治信**

電磁波計測部門長  
地球環境リモートセンシング



しまだ まさのぶ  
**島田政信**

宇宙開発事業団 地球観測利用研究センター主任開発部員 工学博士  
地球環境リモートセンシング