

開口面合成レーダ(SAR)の画像処理

能美 仁 加藤史朗 伊藤陽康 柳瀬武紀
内藤憲二 花本真一 (日本電気)

1. 概要

近年、リモートセンシングのセンサとして、全天候型高分解能センサである開口面合成レーダ(Synthetic Aperture Radar, 以下SARと略す)が注目されてきた。

SARは1978年に米国が打ち上げた海洋観測衛星Seasatに搭載され、短期間ではあったがデータが取得された。その受信信号から再生された画像は、従来のLandsatセンサの画像よりも分解能が高く、また興味深い性質を備えている。

SAR画像処理では出力画像を得るまでに莫大な演算を必要とし、従来は光学処理によるものが殆どであった。しかし、融通性、再現性、精度の点でデジタル処理への期待が大きい。

今回、SAR基本アルゴリズムの確認、SARシステムパラメータの検討、SARデジタル処理技術の確立を目的として、SAR受信信号を模擬した擬似データの生成とその画像処理から成るSARデジタルシミュレーションを行なった。擬似データは画像再生処理アルゴリズムの確認、SARシステムパラメータの検討に用いられるばかりでなく、画像再生処理装置の較正にも用いられる。

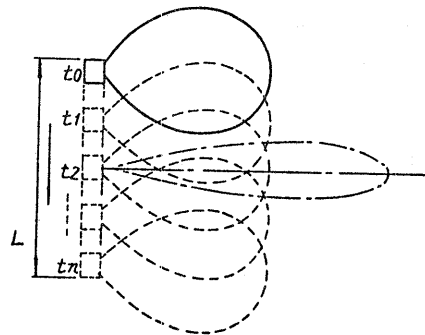
ここでは、SARの原理、擬似データの作成モデル、再生アルゴリズムを概説すると共に、シミュレーション実験の結果を示す。

2. SARの原理

開口面合成レーダ(SAR)は、サイドスキャンレーダの一種であり、航空機又は衛星等の移動プラットフォームに搭載され、地上の写真を電波で撮る装置である。

通常のレーダは、送信パルスがアンテナから放射され、目標からの反射波が受信される。送信から受信迄に要する時間は目標までの距離に比例し、距離分解能は送信パルスの実効パルス幅に比例する。方位はアンテナの向きにより求められる。方位分解能はアンテナのビーム幅により決定され、分解能を高めるには大口径のアンテナが必要である。

SARでは比較的小口径のアンテナを用いて、図1に示すようにプラットフォームの移動を利用して実効的に多素子アレイアンテナを合成させている。SARがプラットフォームの移動に従って $t_0, t_1, \dots, t_n$ の各点で送信パルスを放射し、目標からの反射波を受信する。各時点での受信信号として振幅情報と



L: 合成開口長

図1 開口合成の原理

位相情報が記録される。これらの得られた情報を処理することにより大口径アンテナと等価な高方位分解能が得られる。

一、方位分解能向上のためには、パルス圧縮技術が用いられる。パルス圧縮技術は、送信尖頭電力を電力を増大させる代わりにパルス幅を長くして平均電力を増大させ、同時にこの長いパルス時間内に適当な変調を与えることにより、その占有帯域幅を広くし、短いパルス幅と等価な分解能を得る方法である。図2にパルス圧縮について示す。周波数スペクトルが時間的に順次配列された伸長パルス(チャープパルス)が送信され、受信時には周波数対時間遅延特性が逆である分解遅延線を通すことにより、信号内の全スペクトルが一点に集積され尖鋭なパルスが出力される。

以上のように、SARは信号処理技術で、実効的に大口径アンテナと極めて短いパルスを作ることにより、高方位、距離分解能を得ることが出来る。

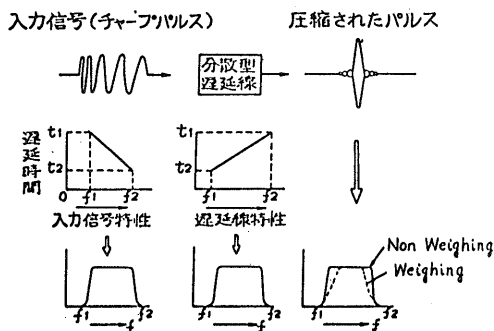


図2 パルス圧縮の原理

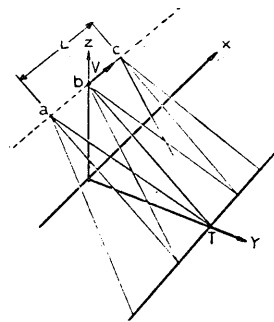
3. 擬似データの生成

シミュレーションは、人工的にSAR受信信号(デジタルホログラム、以下擬似データという)を生成する部分と、この擬似データを処理する部分から成る。今回のシミュレーションはSAR基本アルゴリズムの確認、衛星の運動、および地球自転の画像に対する影響の検討、処理システムの検証を目的としており、擬似データ生成にあたっては上記の事項を考慮してシミュレーションモデルを決定した。

3.1 幾何学的モデル

a. 理想化モデル

基本アルゴリズムの確認には、衛星の高度変化、速度変化、ターゲットの移動等を含む理想化したSARモデルを考える必要がある。図3に理想化モデルを示す。衛星はX軸に平行に等速度で運動しており、ターゲットはTに固定されている。ここではSARアンテナは、 $a \sim c$ までの距離にターゲットを照射できるとしている。衛星がbにきた瞬間を $t=0$ とすると、衛星から送信した電波はターゲットで反射しF0ドップラー周波数変移を受け再び衛星に受信される。



T: ターゲット位置 V: 衛星速度

図3 理想化モデル

ここで F_D は次式のように示される。

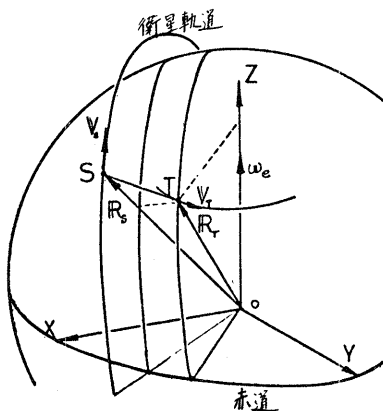
$$F_D = \frac{-2v}{CR} F_c \quad (3-1)$$

但し v : 衛星速度 C : 光速
 R : 衛星ターゲット間距離
 F_c : 送信キャリア周波数

なおこのモデルのシミュレーションに関しては別途⁽⁴⁾詳細に報告されている。

b. 誤差要因を含むモデル

主要誤差要因のシステムに対する影響を検討するため、実際の衛星の軌道および地球の自転を考慮したモデルを図4に示す。衛星は、わずかに離心した円軌道上を移動し、基準座標として地心を原点とした慣性座標系で考えた。



S : 衛星位置
 T : ターゲット位置
 R_s : 衛星位置ベクトル
 R_t : ターゲット位置ベクトル
 V_s : 衛星速度ベクトル
 V_t : ターゲット速度ベクトル
 ω_e : 地球自転ベクトル

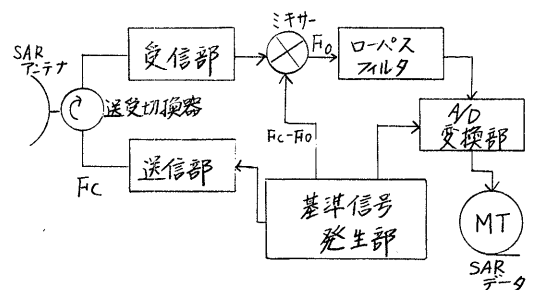
図4 誤差要因を考慮したモデル

時刻 $t=0$ における衛星の位置を S 、ターゲットを T とし、それぞれの位置ベクトルを R_s, R_t とする。又、衛星の速度ベクトルを V_s とする。シミュレーションにおいては $(R_s \times V_s) \cdot (R_t \times R_t) = 0$ となる時点時刻 0 としている。このモデルでドップラ周波数 F_D は次式で示される。

$$F_D = \frac{2F_c}{C} \frac{|V_s - V_t|^2 + ((V_s - V_t) \cdot (R_t - R_s))}{|V_s - V_t| |V_s - V_t| \cdot (R_t - R_s)} \quad (3-2)$$

3.2 信号モデル

シミュレーションを行うSARシステムのモデルを図5に示す。送信波形は図6のような線形FM信号であり、ターゲットで反射され、時間遅れと共にドップラシフトを受け受信される。受信信号は周波数変換後サンプリングされ、6ビットデジタルデータに量子化される。送信されたパルスがターゲットで反射し、再び受信されるまでに要する時間を TR とすると、周波数変換後のローパスフィルタ出力 $f(t)$ は次式で表わされる。



F_c : 送信キャリア周波数
 F_0 : オフセット周波数

図5 SAR シミュレーションモデル

表1 シミュレーション パラメータ

送信周波数	1274.83 MHz
パルス繰返周波数	1647.76 Hz
パルス持続時間	33.9 μ s
チャープ率	0.56 MHz/ μ s
オフセット周波数	11.38 MHz
サンプリング周波数	45.03 MHz
量子化	6 ビット
アンテナビーム幅	E面 $\pm 0.5^\circ$ H面 $\pm 0.5^\circ$
オフナディア角 (鉛直とビームセンタのなす角)	20.5°

$$f(t) = J \cdot X \cdot \cos \phi \quad (3-3)$$

$$\phi = 2\pi \left\{ F_c \cdot \frac{t}{T} + \frac{B}{2T} (t - T_R) \right\} (t - T_R) + 2\pi \cdot F_D (t - T_R) - 2\pi \cdot (F_c - F_0) \cdot t$$

但し J アンテナパターン関数
X 目標の振幅反射率
 $\frac{B}{2T}$ チャープFM率
パルス持続時間
 F_c 送信キャリア周波数
 F_D ドップラ周波数
 F_0 オフセット周波数

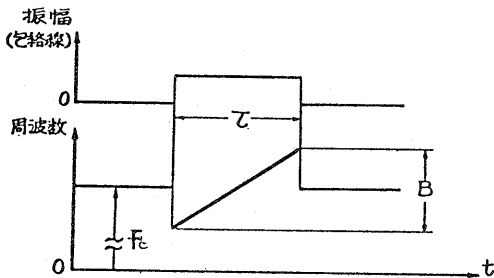


図6 送信信号モデル

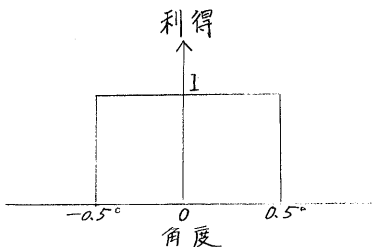


図7 アンテナパターン(E面, H面)

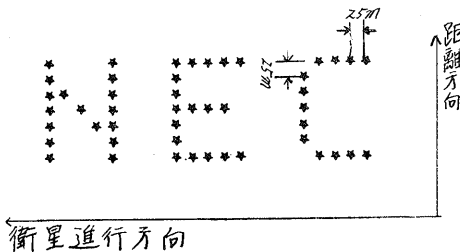


図8 目標配置図 (NEC)

今回のシミュレーションでは、目標の振幅反射率は一定とした。また、アンテナパターン関数Jは、図7に示すようにビームセンタから $\pm 0.5^\circ$ 以内で利得1、それ以外で利得を0としている。ターゲットとしては1点、4点、および図8に示すように点ターゲットで構成した“NEC”を用いた。

擬似データは $t=0$ を中心に、約5秒間に相当する範囲で作成したが、実際にターゲットがアンテナビームに照射されるのは、約5秒間のみである。

今回のシミュレーションに用いた主要パラメータを表1に示す。

4. 画像処理

SARの画像処理は2次元に広がった点目標の受信記録ホログラムを距離方位各方向に圧縮し画像再生を行うこと、および衛星の高度変化、姿勢誤差、地球の自転などによる画像歪みの補正を行うことであるが、ここでは画像再生のみについて検討を行った。

圧縮は、受信信号と、処理システム内で発生した点ターゲットからの反射

信号 $f(t)$ の共役関数 $f^*(t)$ との相互相関をとることで行なわれている。実際にコンピュータで数十点以上のデータに関し相関を行なう場合には、FFTを用いて周波数領域で行なうと高速化できる。擬似データ画像処理では、データ数が距離方向4096、方位方向8192もあるため、受信信号と $f^*(t)$ の相互相関と等価な受信信号と $f^*(t)$ との畳込積分をFFTを用いて周波数領域で行なっている。

図9に画像処理システムのフローを示す。処理は、レンジ圧縮、コーナーターニング、アジマス圧縮に分かれており、データはMTで受け渡される。

レンジ圧縮は、送信パルスのチャープ変調波から尖鋭なパルスに圧縮する部分で、2次元ホログラムとして広がっていたターゲット情報がレンジ方向に圧縮される。この段階でMTには、レンジ方向にデータが格納されているが、アジマス圧縮で方位方向に読むためコーナーターニングを行ないデータ格納方向を変える必要がある。アジマス圧縮は方位方向に広がっているターゲット情報を一点に圧縮する。方位方向データの周波数成分は、衛星の軌道、ターゲットの速度等で異なり、FFTの処理帯域に入るより周波数シフトを行ない補正を行なう必要がある。周波数シフトされたデータは、フーリエ変換後レンジカーバチャ補正されマッチドフィルタと演算が行なわれる。レンジカーバチャ補正は、図10のように衛星の進行に従ってターゲットとの距離が2次関数的に変化するため、その距離変化に相当するレンジ方向サンプル数だけずらし方位方向のデータ入力を行なうものである。レンジカーバチャ補正を行なう際、その距離サンプルの中間にあるターゲットからの情報は、アーティファクトの影響を低減させるためキュービクコンボリューション

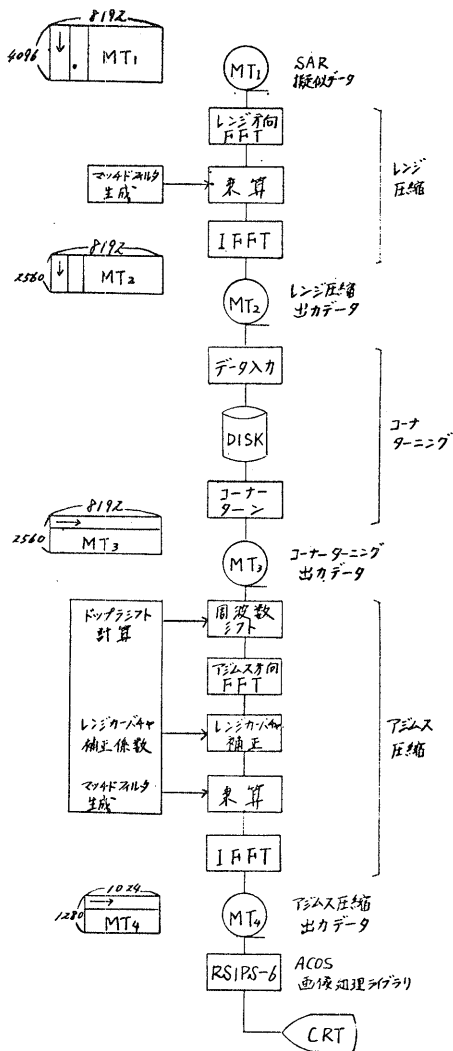


図9 SAR画像処理システム

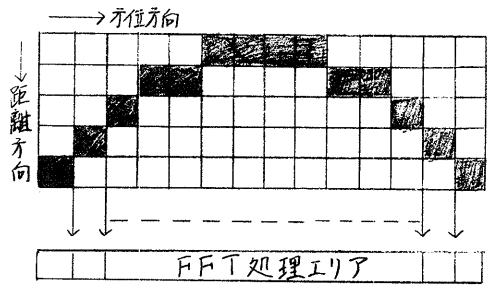


図10 レンジカーバチャ補正

により補間して求めている。アジムス圧縮に用いるマッチドフィルタは、距離方向に処理を進めるに従い変える必要がある。この処理では、ビームセンタにあるターゲットからのドップラ周波数が、FFTの周波数分解能以上変化した時に生成しなおしているが、さらに計算周波数を荒くしても画像に対する影響はあまりないと考えられる。前述の二つの幾何学的モデルにおけるドップラ周波数とレンジカーバチャをそれぞれ図11、図12に示す

レンジ圧縮、アジムス圧縮共にマッチドフィルタの精度はそれ程必要でなく、0.5%以下の誤差ならば画像への影響は無視することが出来る。図11からわかるように、ドップラ周波数は時間と共にほとんど直線に変化しており、その変化率は約500 Hz/secである。図11のドップラシフトの傾きに誤差がある場合、画像のボケとなり縦・上下方向に誤差を持つ場合、主に画像がシフトする。図12よりレンジカーバチャは、地球の自転の影響で実際の衛星のモデルでは大きく変化している。この様な場合、アーティファクトの影響が顕著になり補正が不可欠となる。

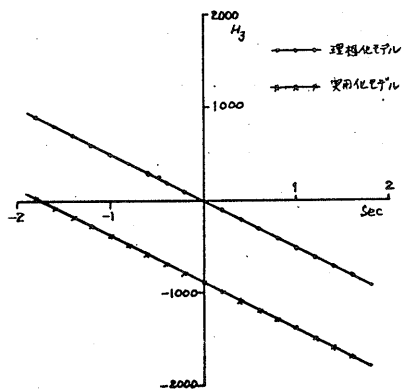


図11 ドップラ周波数変化

この処理に要する演算量は、大部分レンジ圧縮、アジムス圧縮でのFFTにおける乗算によるものと考えられる。方位方向8192点、距離方向4096点の疑似データは、Seasatのデータ18Km×18Kmの画像再生に要するデータ数に等しく、この処理演算量を表2に示す。

表2. 処理演算量

レンジ圧縮	1.5×10^9
アジムス圧縮	1.5×10^9
計	3×10^9

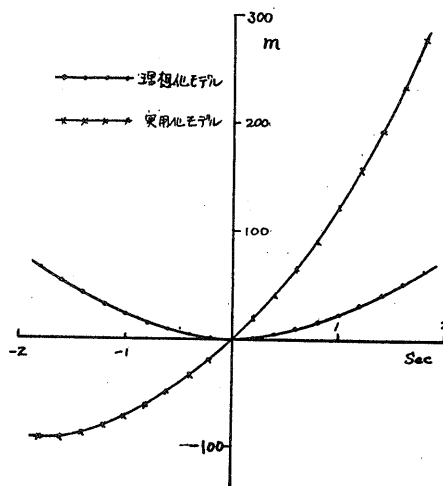


図12 レンジカーバチャ

5 シミュレーション結果

図13にシミュレーションで得られたホログラムの一例を示す。これはターゲットからの反射信号を図5のシステムで記録するのを模擬したものである。図14には点ターゲットを再生した時の振幅分布を示す。Aはアジマス方向、Rはレンジ方向を意味し、両方向ともほとんど同じように圧縮されていることがわかる。この処理では、レンジ圧縮、アジマス圧縮ともにFFTには三角形の窓かけを行なっている。

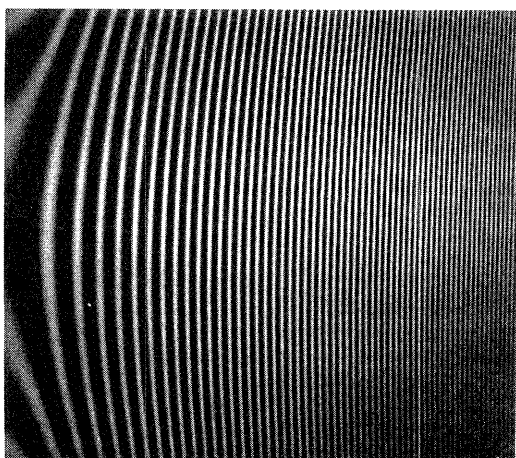


図13 ホログラム(点ターゲット)

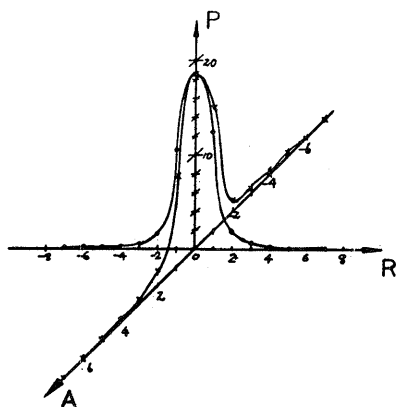


図14 点ターゲット圧縮結果

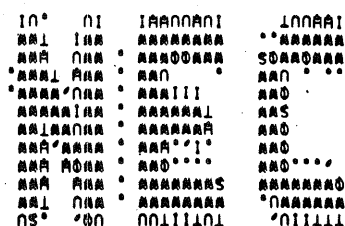


図15 理想的モデルによる再生像

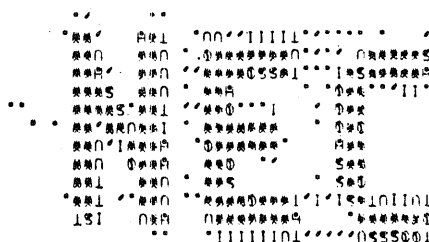


図16 実用化モデル
(アーティファクト補正あり)

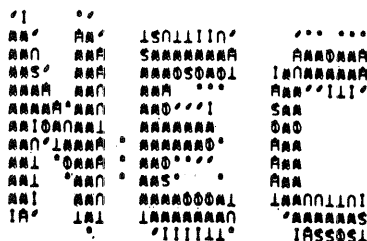


図17 実用化モデル
(アーティファクト補正あり)

図15は衛星の高度変化、地球自転を含む理想的モデルにおけるシミュレーション結果である。図16は実際の衛星の運動および地球自転を考慮したモデルであるが、アーティファクト補正を行っていないため実像のまわりにゴーストが見られる。図17は、図16のモデルにアーティファクト補正を行ったものでありゴーストが消えているのがわかる。図16、図17共に地球の自転の影響により像に歪みが生じている。

6. まとめ

SARのデジタル処理において、理想的なモデルと実際の衛星軌道を考慮したモデルについてシミュレーションを行なう報告した。デジタル処理の概要を述べると共に、画像のゴーストの原因であるアーティファクトをレンジマイクレーション補正時レンジ方向でコンボリューションを行なうことと、低減できることを示した。また、衛星の運動および地球の自転を含んだ擬似データの再生を行なえることを示した。

7. 文献

- (1) Harger, R.O.: "Synthetic Aperture Radar Systems-Theory and Design", Academic Press (1970)
- (2) Cutrona, L.J.: "Synthetic Aperture Radar", Radar Handbook, Skolnik, M.I., Ed. ch. 23,
- (3) Brown, W.M. and Forcillo, L.J.: "An Introduction to Synthetic Aperture Radar", IEEE Spectrum, 6, 9, P. 52 (Sept. 1964)
- (4) Tomiyasu, K.: "Tutorial Review of Synthetic Aperture Radar with Applications of Imaging of the Ocean Surface" Proc. IEEE, 66, 5, P. 563 (May 1978)
- (5) Moore, R.K., Ed.: "Microwave Remote Sensors", Manual of Remote Sensing, ch. 9, Am. Sec. Photogrammetry (1975)
- (6) Rose, J.R. and McCandless, W.: "System Definition of Seasat-A, An Ocean Observation Satellite" AIAA 13th Aerosp. Sci. Meeting, 75-56 (Jan. 1975)
- (7) Kirk, J.C.: "A Discussion of Digital Processing in Synthetic Aperture Radar", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., AES-11, 3, P. 326 (May 1975)
- (8) Bayma, R.W. et al.: "A Survey of SAR Image Formation Processing for Earth Resources Applications", Proc. 11th Internatl. Symp. Remote Sensing of Environ., Michigan, P. 137 (Apr. 1977)
- (9) Bennetti, J.R. and Cumming, I.G.: "Digital SAR Image Formation Airborne and Satellite Results", Proc. 13th Internatl. Symp. Remote Sensing of Environ., Michigan, P. 337 (Apr. 1979)
- (10) Klauder, J.R. et al.: "The Theory and Design of Chirp Radars", Bell Syst. Tech. J., 39, 4, P. 745 (July 1960)
- (11) Leith, E.N.: "Quasi-Holographic Techniques in the Microwave Region", Proc. IEEE, 59, 9, P. 1305 (Sept. 1971)
- (12) Lindt, W.J.: "Digital Technique for Generating Synthetic Aperture Radar Images", IBM J. Res. Develop., P. 415 (Sept. 1977)
- (13) A.B.E. Ellis: "Ground Processing of Seasat-A SAR Data at an Earthnet Station", Proc. Internl. Conf. on Spacecraft Onboard Data Management, Nice, ESA-SP-141 (Dec. 1978)
- (14) D.J. Bonfield, K.M. Harvey and J.R.E. Thomas "Synthetic Aperture Radar Real Time Processing", Proc. Internl. Conf. on Spacecraft On-board Data-Management, Nice, ESA-SP-141 (Dec. 1978)
- (15) John R. Bennett and Ian G. Cumming.: "Digital Processor for The Production of Seasat Synthetic Aperture Radar Imagery", Proc. Internl. Conf. on Seasat-SAR Processor, Frascati, ESA-SP-154 (Dec. 1979)
- (16) 内藤, 二木, 花本, 伊藤, 久田
"開口面合成レーダ(SAR)の擬似データによる画像処理" 電子通信学会画像処理研究会資料(ED80-54)
- (17) 松尾, 山根 "レーダホログラム" 電子通信学会, 昭55, 2, 20