

# 解説

## 合成開口レーダー

小野 誠

三菱電機(株)鎌倉製作所 〒247 鎌倉市上町屋 325

(1985年10月15日受理)

### Synthetic Aperture Radar

Makoto Ono

Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corp.,  
325, Kamimachiya, Kamakura 247

#### 1. ま え が き

合成開口レーダーはマイクロ波を用いるアクティブ映像センサーである。その特長は昼夜天候に左右されずに衛星高度からでもきわめて高分解能が得られることで、マイクロ波を用いているので光学センサーとは異質の情報得られるものと期待される。衛星に搭載された例は1978年米国のシーサット1号に搭載されたものがあり、その処理画像は関係者に多くの刺激を与えた。その後スペースシャトル搭載実験(SIR-A, 1982 および SIR-B 1984)が行なわれ研究活動が活発化している。わが国でも衛星搭載用合成開口レーダーの開発に着手しており、昭和53年度より宇宙開発事業団による研究開発が行なわれている。また昭和59年度よりその成果が通産省工技院に引き継がれ、大型プロジェクトとして研究開発が続けられることとなった。

この解説は合成開口レーダーの動作原理や技術上の諸問題を紹介するものである。すでに Tomiyasu<sup>1)</sup> や 畚野<sup>2)</sup> により解説が行なわれているので、ここではシステム設計の基本に重点を置いて解説することとする。なお合成開口レーダーに関する基本的な論文およびわが国の開発状況に関する主要な論文のリストをまとめてあるので参照されたい。

#### 2. 合成開口レーダーの動作原理

合成開口レーダーで高い距離分解能が得られる原理を説明する。まず航空機または衛星の進行方向と直交する方向の分解能について説明する。図1は衛星の進行方向

に直交する面内でレーダーを見た図である。衛星に搭載されたアンテナから幅 $\tau$ のパルスが送信されこれが地上の点A, Bに当たって反射し再び衛星のアンテナで受信される。A, Bの中間点と衛星のアンテナの間の距離を $R$ とすれば、電波が往復するのに要する時間はA, Bについてそれぞれ

$$T_A = (2R - d \sin \theta_i) / c$$

$$T_B = (2R + d \sin \theta_i) / c$$

で与えられる。両者の時間差は、

$$T_d = (2d \sin \theta_i) / c$$

となる。送信パルスの幅が $\tau$ であるので、A, Bの他に近傍に反射体がなければ、受信信号は時間軸上で、図2のように観測される。2点が識別できる条件は、 $\tau$ が $T_d$ より小さいことである。したがって、送信パルス幅と距離分解能の間には次式が成立する。

$$\delta_r = c\tau / (2 \sin \theta_i)$$

実際の合成開口レーダーでは、受信機の内部雑音に信号が埋もれてしまうのを防ぐため、パルス内電力を大きくする必要がある。パルス幅が狭いままで電力を大きくするとピーク電力が高くなり放電等の問題が生ずるので、チャープパルスと呼ばれるFM変調の長パルスを放射する。これは図3に示すように送信パルスの幅 $\tau$ の内で周波数を直線的に変化させ合計で帯域幅 $\Delta f$ の電波を放射する。散乱波の受信後送信時の周波数偏位と逆特性の周波数偏位を持つ分散性フィルタ(マッチドフィルタ)を通すことにより、パルス幅を圧縮して、 $\tau_c' = 1 / \Delta f$ となるパルスとするものである。系の線形性を仮定すればこれは初めから $\tau_c'$ の幅の送信パルスを放射し

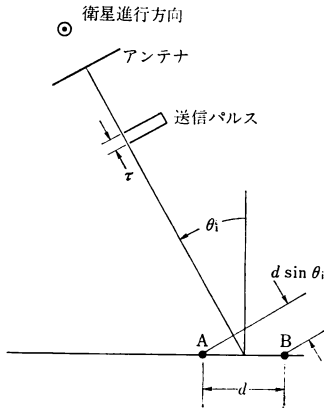


図 1 レンジ方向距離分解能の原理

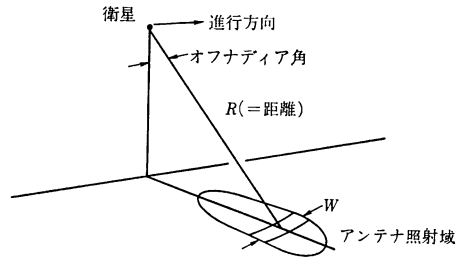


図 4 アジマス分解能の原理

うに、衛星から見て異なる距離にある点の識別について述べたことになる。衛星から見て等距離にある2点の識別は、上述の方法ではできないことになる。これを識別するには、アンテナのビーム幅を狭くして、衛星から見て等距離にある同心円上の一部のみを照射するようにする。

その照射域の幅は図4に示すように  $W$  で与えるものとすれば、 $W$  は次式を満足する。

$$W = R \cdot B_w$$

ここに  $B_w$  は衛星の進行方向に計ったアンテナのビーム幅で使用する電波の波長とアンテナ寸法で決まり、次式で与えられる。

$$B_w = \lambda/l$$

ここに  $\lambda$  は電波の波長、 $l$  はアンテナの実寸である。 $W$  が 25 m となるようなアンテナ寸法を実際に求めてみると、 $R$  が 1,000 km という実際の衛星に近い値で、波長が 0.235 m (Lバンド) とすると、アンテナ長  $l$  は 9.4 km という大型なものになってしまう。合成開口レーダーは、この 9.4 km という長大アンテナを小さいアンテナを用いて信号処理で作り出すのがその名称の由来である。すなわち、小さい寸法  $l_a$  のアンテナを多数並べて、同位相で給電してやれば長さ  $l$  の長大アンテナとして働くことになる。

もしも観測対象が止まっていれば、長さ  $l_a$  の1個のアンテナを時分割で使用し、位相情報を貯えておき、後で信号処理をしてもまったく同じ結果を得ると考えられる。合成開口レーダーでは、衛星または航空機の移動を利用して、この時分割送受信を行なう。図5はこれを模

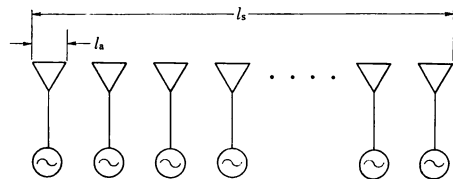


図 5 小アンテナの同時使用

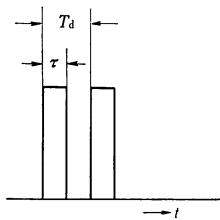


図 2 2目標の分離

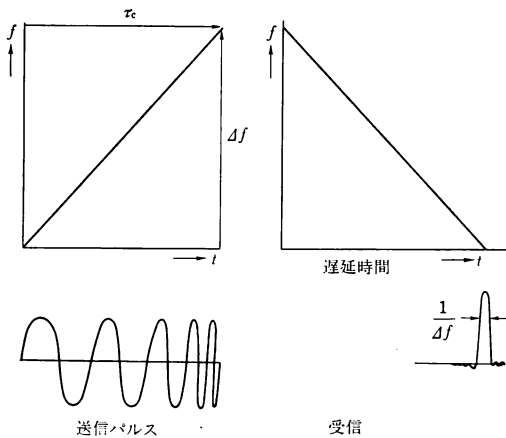


図 3 チャープパルスの圧縮原理

て、その反射波を受信するのに等しい。しかもエネルギー保存則から、大電力のパルス電波を放射したのに等しくなる。実際の反射波では、 $\tau_c c / (2 \sin \theta_i)$  より短い間隔で生じた反射は重なってしまうが、 $\tau_c c / (2 \sin \theta_i)$  より大きい間隔であれば圧縮処理後分離される。以上で、衛星の進行方向と直交する方向の分解能についての説明が終わるが、これは通常のパルス圧縮レーダーとまったく同じである。これまで衛星の進行と直交する方向の分解能という説明をしたがより厳密に言えば、図4に示すよ

型的に示したもので、衛星に搭載されたアンテナから次に地上に向けてパルス電波を放射し、その地面からの反射波を受信して同期検波し、複素信号として、地上へ伝送して記録し、後で述べる信号処理により、図5に示した  $L_a$  という長大アンテナとして動作したのと同等の画像を得る。

実際のアンテナ寸法は小さいとはいえ長さ 10 m を越えるものとなり、通常の衛星では折りたたんで打上げ軌道上で展開するという高度な技術を必要とする。

なお、衛星の進行方向の分解能は通常アジマス分解能と称され、その理論的限界は波長に関係なく、衛星進行方向のアンテナ寸法の 1/2 となる。

### 3. パラメータ設計上の問題点

合成開口レーダーの性能を決定する主要パラメータがどのように決められるのかを述べてみたい。衛星搭載用の合成開口レーダーは航空機搭載のものより制約が厳しく、設計パラメータ間の調整がむずかしいのでここでは主として衛星搭載用という条件で検討結果を述べる。

合成開口レーダーでも他の光学センサーと同様分解能、感度、ダイナミックレンジが最終ユーザーにとって必要な値でさらに、電波反射特性の違いを生ずる入射角と周波数が前述のパラメータとほぼ同様の重みをもって考慮されなければならない。システム設計の上では衛星搭載上の制約、運用条件の制約を考慮してこれらの値を決定していかなければならない。主要パラメータと合成開口レーダーのシステムパラメータの関係を表1に示す。

衛星搭載上とくに問題となるのはアンテナ寸法と送信電力および信号伝送の速度から決まる信号帯域幅と量子化ビット数の制約である。もちろん、消費電力、重量および信頼性といった衛星搭載上の基本的制約は大きな問題であるが合成開口レーダーの本質とは関連が少ないのでここでは取り上げない。

合成開口レーダーのアンテナ寸法のうち衛星の進行方

表1 システムパラメータの相互関連

SAR の性能を表わすパラメータ	直接的に関連するハードウェアパラメータ
レンジ分解能	信号帯域幅, 入射角
アジマス分解能	アンテナ寸法, マルチルック数
感度	送信電力, アンテナ利得, 受信機感度
ダイナミックレンジ	量子化ビット数, 受信機ダイナミックレンジ

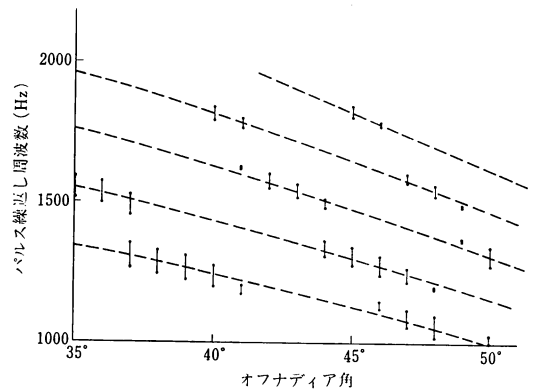


図6 パルス繰返し周波数の許容値(実線)と最良PRF(破線)

向の寸法はパルス繰返し周期と衛星速度とから若干の余裕を見込んで一義的に決定される。また、これと直交する方向の寸法は観測スウォース幅を覆うような放射特性をもつ寸法である。ところがパルス繰返し周波数は衛星高度とオフナディア角とで決まる許容値域があり任意の値をもつことはできない。その値は、以下の2条件で決められる。

- (1) 送信パルスを放射中は受信できない。
- (2) 観測域からの反射波と直下点付近からの反射波が重なってはいけない。

この条件を満たすパルス繰返し周波数の値は図6のグラフに示すようになりかなり厳しく制限された値しか取りえない。パルス繰返し周波数とアンテナ寸法の間には次式が成立する。

$$L_a = (V_{sat} \times 2 \times O_{SR}) / PRF$$

ここに  $L_a$  はアンテナ寸法,  $V_{sat}$  は衛星の速度,  $PRF$  はパルス繰返し周波数,  $O_{SR}$  はドップラ周波数の折返しを防ぐオーバーサンプル係数である。  $PRF$  を 1,600 Hz,  $V_{sat}$  を 7.57 km/s,  $O_{SR} = 1.2$  とすると  $L_a$  は 11.4 m になる。分解能の限界はこの  $L_a$  で規定される。

つぎに伝送データレートは次式で与えられる。

$$D_s = B \times N_b \times O_{SRR} \times S \times 2$$

ここに  $B$  は信号帯域幅,  $N_b$  は量子化ビット数,  $O_{SRR}$  はオーバーサンプル比,  $S$  はデータレート低減係数である。この式から量子化ビット数を少なくすることがデータレートを小さくする方法である。合成開口レーダーは取得された生データのダイナミックレンジより信号処理を行った後のダイナミックレンジが高くなるので、生データの量子化ビット数は小さくともよいことになる。一例として原データを3ビットで量子化した場合、原データ

のダイナミックレンジは符号も考慮すると 9.5 dB であるが信号処理後は、約 40 dB のダイナミックレンジが得られる。

合成開口レーダーは同期検波によって得られた位相情報をもつレーダー信号を処理して画像再生を行なうので系の位相安定度はとくに重要である。衛星高度で用いるためには電波の往復時間内に位相がずれないことを条件として原発振器の周波数安定度に反映しているが  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  程度の非常に高い周波数安定度が必要となる。

#### 4. 信号処理

合成開口レーダーのデータを利用するにはホログラムから映像を作成する信号処理が必要である。信号処理は現状では地上で行なう。

合成開口レーダーの動作原理はマイクロ波のホログラフィと同じであるので、信号処理の過程もホログラムから映像を得るのと同じ方法が用いられる。従来実用されていた処理方式は、合成開口レーダーの受信機で得たレーダー信号を適当なフォーマットで光学フィルムへ焼き付けることにより電波から光への変換を行ない、これをホログラムとして用いるもので処理速度の点ではデジタル処理より高速である。しかし、この方法では光学フィルムの非直線性、ダイナミックレンジが小さいなどの問題がある。さらに衛星搭載合成開口レーダーの場合、処理の光学系の設計がきわめてクリティカルであるなどの問題もありシーサットの場合でも検索用データの作成に用いられている程度である。

合成開口レーダーデータのデジタル信号処理は、光学処理のように2次元的に行わず1次元的な処理に分解する。そのデータ処理量はきわめて大きくなり、たとえばシーサットの場合 75 km 四方の画像データを 25 m 分解能で得るためには、 $10^{11}$  FLOPS もの演算量となり、汎用大型計算機でも数十時間の計算時間を必要とする。計算時間を減らすためのアルゴリズムの工夫が必要となる。

図7は合成開口レーダーの画像再生信号処理の基本的な構成例を示すものである。画像再生処理の内容は、チャープパルスの圧縮を衛星の軌道上から地上の一点を見たときの距離の変化の関数を用いた相関演算である。信号処理の高速化のため相関演算は高速フーリエ変換を利用して周波数領域で実行される。

#### 5. システムの実例

合成開口レーダーはこれまで、宇宙で使用された例は

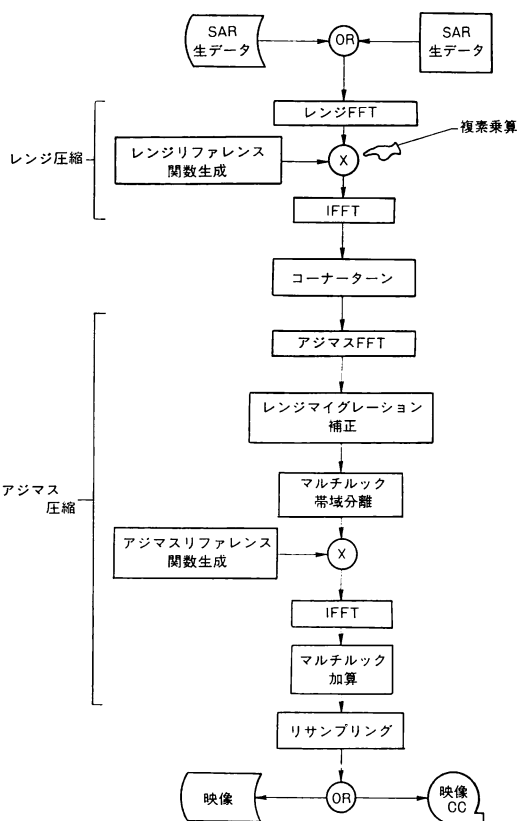


図7 信号処理のブロックシーケンス

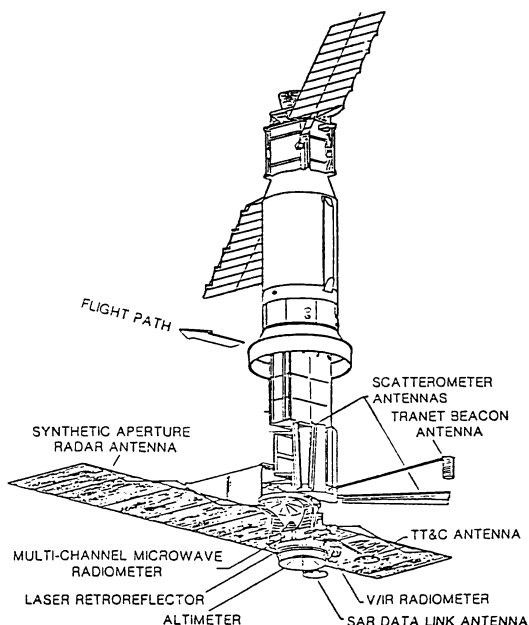


図8 シーサット1号

少ないが、今後のリモートセンサーとして次々に計画されており、注目されているセンサーである。以下にこれまでの例と今後の計画について紹介する。

図8は合成開口レーダーの宇宙での利用の評価を決定的に高めたシーサット1号の外観図である。シーサット1号の合成開口レーダーは、Lバンドで地上における電波の入射角が約25°となるように設計された分解能25mのセンサーである。打上げ1978年6月であったが衛星本体の電源系の故障により約3カ月で機能を停止してしまっ

- ・大型展開プリントアンテナの使用
- ・ソリッドステートアンプの使用
- ・アナログデータリンク
- ・同期検波を地上で行なう

などである。

アンテナは2.16m×10.74mの開口面を有しておりトランス構造の展開保持機構により8枚に分割したパネ

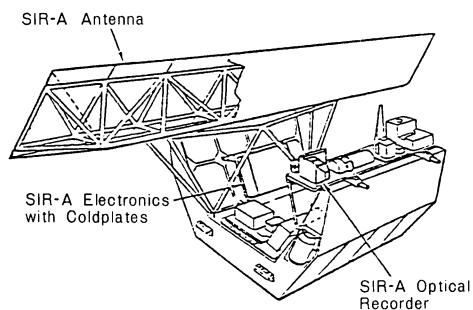


図9 SIR-Aの外観

ル状アンテナを展開する方式を用いている。分解能は約25m、オフナディア角は20°である。

つぎの例はSIR-Aである。これはスペースシャトルのパレットに搭載され1982年打ち上げられたもので、基本的にはシーサット1号のバックアップモデルを使用している。シーサットとの違いは、アンテナを固定形としたことと、搭載オプティカルレコーダを設けオンボードでデータ記録を行なうことである。オフナディア角は

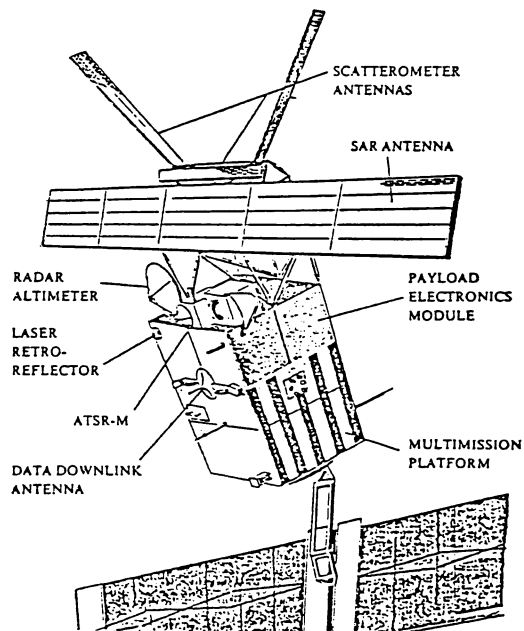


図10 ヨーロッパのERS-1の外観

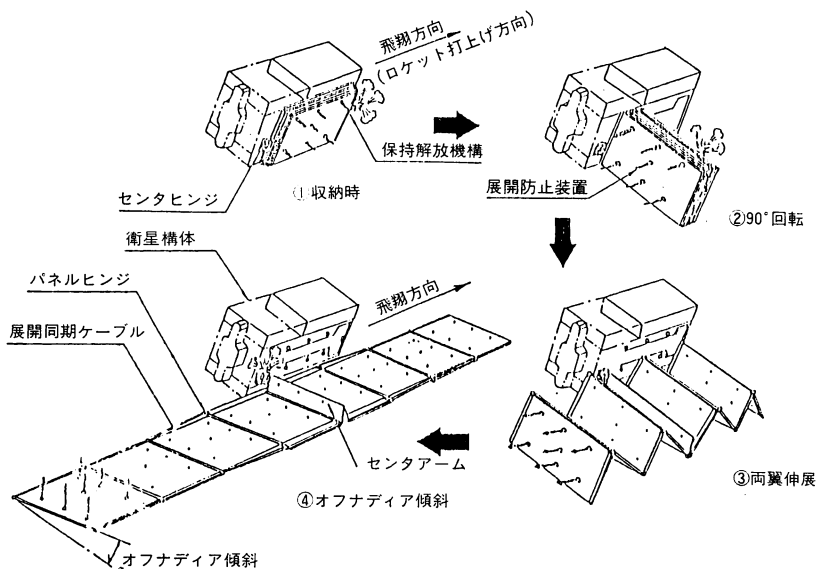


図11 わが国のSARアンテナの展開シーケンス

シーサットから大幅に変更し、 $47^\circ$  が選ばれている。図 9 は外観図である。

1984 年には同じスペースシャトルを用いて SIR-B が打ち上げられた。SIR-A との相違点はオフナディア角が可変となったこととデータをデータ中継衛星を介して地上へ伝送していることである。

ヨーロッパでは 1989 年にリモートセンシング衛星を打ち上げる予定である。この衛星は図 10 に示すような外観を持ち合成開口レーダー、マイクロ波散乱計およびレーダー高度計を備えている。

カナダにおいても 1989 年打上げを目指して合成開口レーダー搭載衛星の計画がある。これは Cバンドで氷海面上の水路を発見するのを目的としており短時間で同一地点のデータが更新できるようなシステムが工夫されている。

わが国でも現在、地球資源衛星 1 号への搭載を目指して合成開口レーダーの開発が進められている。目標性能は分解能 10~20 m、オフナディア角  $40^\circ \sim 50^\circ$  とされて



図 12 Seasat SAR Image  
Scene of Frankfurt. Processed by Mitsubishi SAR Processor.

おり Lバンドを用いる。アンテナは折りたたまれたパネルを 3 段階に分けて展開するものでその特徴ある展開シーケンスを図 11 に示す。

## 6. む す び

合成開口レーダーの紹介という内容で主として衛星搭載用という見地から原理、設計上の問題点、過去の実測等をまとめた。センサーシステムとして見ると地上の処理まで含めなければ全体がわからないため、広範囲な記述となり内容的には一般的な記述となったことをお断りしておく。最後にシーサット 1 号の合成開口レーダーの処理写真 (図 12) を示す。

## 文 献

SAR に関する主要文献リスト

- 1) K. Tomiyasu: "Tutorial review of synthetic-aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface," *Proc. IEEE*, **66**, 5 (1978) 563-583.
- 2) 畚野信義: "合成開口レーダ", 日本リモートセンシング学会誌, **1**, 1 (1971) 49-107.
- 3) R. K. Moore: *Manual of Remote Sensing* (American Society of Photogrammetry, Falls Church, Va., 1983) Chap. 9, pp. 429-474.
- 4) R. E. Collin and F. J. Zucker: *Antenna Theory, PART II* (McGraw-Hill Inc., N. Y., 1969), Chap. 27, pp. 627-634.
- 5) M. I. Socolnik: *Radar Handbook* (McGraw-Hill Inc., N. Y., 1970) Chap. 23.
- 6) W. M. Brown and L. J. Porcello: "An Introduction to synthetic aperture radar," *IEEE Spectrum*, **6** (1969) 52-62.
- 7) S. A. Hovanssian: *Radar Detection and Tracking Systems* (Artech House, Dedham, Mass., 1972).
- 8) W. M. Brown: "Synthetic aperture radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **AES-3**, 2 (1967).
- 9) R. O. Harger: *Synthetic Aperture Radar Systems, Theory and Design* (Academic Press, N. Y., 1970).
- 10) J. R. Klauder, A. C. Price, S. Darlington and W. J. Albersheim: "The theory and design of chirp radars," *Bell Syst. Tech. J.*, **XXXIX**, 4 (1960) 745-808.
- 11) G. P. Ohman: "Getting high range resolution with pulse compression radar," *Electronics*, Oct. 7(1960).
- 12) J. E. Chin and C. E. Cook: "The mathematics of pulse compression—a problem in system analysis," *Sperry Eng. Rev.*, **12**, 3 (1959).
- 13) J. G. Mehlis: "Shuttle synthetic aperture radar implementation study," NASA Contract Report, **1** (1976).
- 14) A. G. Brejcha and L. G. Keeler: "The Seasat-A synthetic aperture radar antenna," *Proc. of the Synthetic Aperture Radar Technology Conference*, March (1978).
- 15) R. L. Jordan: "Seasat-A synthetic aperture radar design and implementation," *ibid.* (1978).
- 16) E. Brookner ed.: "Present and future trends in synthetic aperture radar," *Radar Technology* (Artech

- House, Dedham, Mass., 1977) Chap. 18, pp. 259-262.
- 17) J. H. Mims and J. L. Farrell: "Synthetic aperture imaging with maneuvers," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **AES-8** (1971) 410-418.
  - 18) E. Brookner ed.: "Present and future trends in synthetic aperture radar systems and techniques," *Radar Technology* (Artech House, Dedham, Mass., 1977) pp. 259-263.
  - 19) L. C. Graham: "Synthetic interferometer radar for topographic mapping," *Proc. IEEE*, **62**, 6 (1974) 763-768.
  - 20) L. J. Porcello, *et al.*: "The Appollo Lunar Sounder Radar System," *Proc. IEEE*, **62**, 6 (1974) 769-783.
  - 21) K. Iizuka, *et al.*: "A hologram matrix radar," *Proc. IEEE*, **64**, 10 (1976) 1493-1504.
  - 22) R. Rawson, *et al.*: "The ERIM simultaneous X- and L-band dual polarization radar," *Record of 1975 IEEE Int. Radar Conference* (1975) pp. 505-510.
  - 23) R. A. Shuchman, *et al.*: "Contour strip mine detection and identification with imaging radar," *ibid.* (1975) pp. 516-521.
  - 24) M. Leonard, *et al.*: "Classification of freshwater ice using multi-spectral radar images," *ibid.* (1975) pp. 511-515.
  - 25) R. Jordan: "A Seasat-A synthetic aperture radar design and implementation," *Proc. of 1978 Synthetic Aperture Radar Technology Conference* (1978) pp. VI-6-1-VI-6-17.
  - 26) A. G. Brejcha, *et al.*: "The Seasat-A synthetic aperture radar antenna," *ibid.* (1978) pp. IV-2-1.
  - 27) J. C. de Leon: "Synthetic array radar to map the surface of Venus," *Microwaves*, **16** (1977) 12-14.
  - 28) 地球観測システム調査団: "地球観測システム調査報告書" (1979) p. 36.
  - 29) J. G. Mehlis: "Shuttle synthetic aperture radar implementation study," NASA Contract Report, **1** (1976).
  - 30) R. L. Jordan: "Seasat-A synthetic aperture radar design and implementation," *Proc. of the Synthetic Aperture Radar Technology Conference*, March (1978).
  - 31) Goodyear Aerospace Corp.: "Space shuttle synthetic aperture radar—Final report," Contract No. JPL-953053, Aug. (1975).
  - 32) A. G. Brejcha and L. G. Keeler: "The Seasat-A synthetic aperture radar antenna," *Proc. of the Synthetic Aperture Radar Technology Conference*, March (1978).
  - 33) Schiavone: "Low loss, flexible, lightweight corporate RF feed system for SAR antenna application," *ibid.*, March (1978).
  - 34) S. A. Hovanessian: *Radar Detection and Tracking Systems* (Artech House, Dedham, Mass., 1972).
  - 35) 日経エレクトロニクス, 9月19日号 (1977) 74-94.
  - 36) W. E. Arens: "Real time synthetic aperture radar data processing for space applications," *SPIE*, **154**, Real-Time Signal Proc. (1978).
  - 37) W. E. Arens: "Real time synthetic aperture radar data processing for space applications," *SPIE*, **154**, Real-Time Signal Proc. (1978).
  - 38) C. Wu: "A digital system to produce imagery from SAR data," *Proc. AIAA Systems Design Driven by Sensors*, Oct. (1976).
  - 39) J. C. Kirk: "A discussion of digital processing in synthetic aperture radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **AES-11**, 3 (1975).
  - 40) L. Marelli: "SAR image quality," *Proc. of Wave Guide Meeting*, ESA SP-172 (1980).
  - 41) J. P. Guignard: "Instrumentation for preprocessing of SAR data to image form," *Proc. of Wave Guide Meeting*, ESA SP-1031 (1979).
  - 42) 久田安正, ほか: "合成開口レーダ研究モデルのシステム試験法", 昭和59年度電子通信学会光・電波部門全国大会, No. 215 (1984).
  - 43) 久田安正, ほか: "合成開口レーダのアンテナ系の試作試験結果(その2)", 同上, No. 44 (1984).
  - 44) 久田安正, ほか: "合成開口レーダの逆受信機系の部分試作結果(その1)", 日本リモートセンシング学会第3回学術講演会 (1984).
  - 45) 久田安正, ほか: "合成開口レーダの送受信系の部分試作結果(その2)", 同上 (1984).
- その他多数あるが, 紙面の都合で省略する。