



カット ニカラガアのマナグア市周辺のレーダー映像 (Westinghouse社 提供)

I. はじめに

SLAR は Side Look(ing) Airborne Radar の頭文字をとった リモートセンシングの方法名であって [sla:] と読まれるが これは Radar が Radio Detection and Ranging からつくられた略成語であることと同じである。他の多くのリモートセンシング用語と同様 SLAR にもまだ完全に 固定した邦訳はないが 今のところ “側面(方) 走査(監視) レーダー”が一応の定訳となっている。ただし これは直訳としてももちろん正しいけれども 機能あるいは用途としての観点からはむしろ ground mapping radar や imaging radar などから意識した(地形) 図化用レーダー あるいは(高精度) 映像レーダーなどの呼名の方が判りやすく 実際的でもあろう。

もっとも SLAR は 現在半ば代名詞化してはいるものの ground mapping radar のなかのあくまでも一型式にすぎないことは認識しておく必要がある。また Airborne の A を省略した SLR という表現も時折みかけが SLAR との相異はまったくなく、

SLAR は単にリモートセンシングの一角を形成しているだけでなく その実用化の進展の度合いにおいて またその将来性あるいは取得する情報量の豊富さにおいて 古い歴史を有する普通写真をのぞけば 数あるリモートセンシング技術のなかでも 赤外線映像や多波長域写真と並び現在 その効果が高く評価されつつあるものである。リモートセンシングについての全般的な解説は 本誌だけでもすでに数回にわたって掲載されているので (No. 182 No. 195 No. 196 No. 198 No. 200 No. 204 No. 220) ここでは深く立ち入らない。

しかし SLAR に関しては まとまった形での紹介としては松野 (1973) 西尾 (1972) の二編が知られてい

駒井二郎

るにすぎず その後の進歩も非常にいちじるしいので ここに SLAR の近況について やや詳細な展望を試みることにしたい。ただ赤外線関係や多波長域写真がわが国でもすでに旺盛な活動をみせているのに反し SLAR はまだ外国の技術であり リモートセンシングに関心を寄せはじめてからまだ日も短い筆者の底の浅さはともかく SLAR 関連の資料そのものが当面 断片的な寄せ集めの域を出ないため 全体として統一均斉を

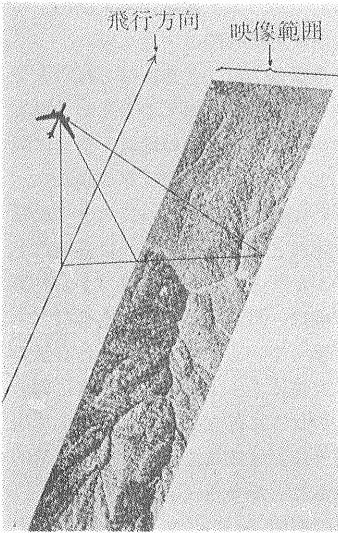
欠いた結果となっていることはあらかじめお断りしておきたい。 実例を適宜 なるべく多く織込んでゆくが これは映像技術としての性格もさることながら 筆者自身をも含めて SLAR に興味を抱かれる読者のほとんど 100パーセントが おそらくは user としての立場にあるものと考えられるからでもある。 なお紙数の都合上 地表面の粗さの影響や陰影効果 偏波面の応用 開口合成法の詳細 あるいは case history の類などは 次回以降にゆずることとした。

本稿は陶山物理探査部長ならびに松野応用地質部長のご示唆により執筆した。 内外の諸文献は一括して最終回に列挙する予定であるが 参考とした資料の多くは両部長より貸与されたものである。 また一貫して多大のご指導・ご援助を仰いだ。ここに厚くお礼申し上げる。

II. SLAR とは一発展の背景

SLAR はみずから保有する送信(照明)源によって電磁波エネルギーを放射し 目標からの反射(散乱)波を受信する “能動的(active)” 方法に属し かつ非写真映像(nonphotographic imaging)系の一種として分類されるものである。そしてSLARの動作原理・装置の構成等は ひとくちに言えば パルスレーダーの拡大延長とみなすことができるし 用途面からみれば空中写真測量における航空カメラを “ある程度” 代替するものといえよう。

すなわち第1図に示すように 航空機の進行方向と直交して斜め下方に向け扇状にするどいビーム幅をもつマイクロウェーブの電磁波エネルギーを断続的に放射し 地表上の一定区域を面積的に走査(scan, paint)してゆく。この電磁波エネルギーの大部分は地上物体(対象物目標)によって散乱してしまうけれども 一部は反射してアンテナ方向へともどってくる(echo, return)。



第1図
SLAR の概念
(松野原図一部修正)

この反射信号の伝播時間はアンテナ～対象物間の往復距離に 信号強度 (振幅) は対象物の反射特性にそれぞれ対応するから これを受信して適切な電子工 (光) 学的処理をほどこせば 通常のスリップ空中写真にほぼ類似した ひとつづきの帯状映像がえられることになる。たとえば水陸の境界部などは このレーダー映像中でもっとも顕著な濃淡コントラストを生ずる目標のひとつであり その他さまざまな地形 岩石 植生など地上の変化がそれぞれ固有の物理・化学的特性を反映しつつ記録されてゆく。したがって基本的には SLAR は航空・航海用 あるいは気象用として用いられているパルスレーダーと何ら変わるところはない。

しかしながら船舶・航空機などのように 通常 点源とみなして差支えない目標からの孤立した反射信号を複雑ではあるにしても一応 “定常的(stationary)” と考えてよい背景雑音中から検出する場合と異なり 地形図の代替として通用するほどの あるいは少なくともオルソフォト (正射投影写真) に匹敵するような 高い精度のレーダー映像を実現するのは必ずしも容易なことではない。第一 SLAR が必要とする反射信号は 他のレーダーでは “ground clutter” としてむしろその除去に腐心されている雑音の一種である。統計的性質を巧みに利用してこれと孤立波信号との識別を図る手法は他型式のレーダーでは有効であるが SLAR ではこの手は使えないし 入り組んだ個々の目標を歪みなく再生 (restitute) して結像させるには いろいろな点で技術的困難を伴う。

地表は各種の散乱体が多種多様に組み合わせたいわば “array” として取り扱わねばならない拡がりをもった目

第1表 レーダーによく使われる周波数 (波長) 帯の呼称

バンド幅	周 波 数	波 長
UHF	300～1,000MHz	1m ～30 cm
L	1,000～2,000MHz	30 ～15 cm
S	2,000～4,000MHz	15 ～7.5 cm
C	4,000～8,000MHz	7.5 ～3.75cm
X	8,000～12,500MHz	3.75～2.4 cm
Ku	12.5～18 GHz	2.4 ～1.67cm
K	18 ～26.5 GHz	1.67～1.13cm
Ka	26.5～40 GHz	1.13～0.75cm
ミリ波	>40 GHz	<0.75cm

標であり その反射特性はきわめて複雑な様相を呈するのが常である。気象レーダーも “拡がりのある目標” を検知対象としてはいるが 所要分解能の苛酷さにおいて SLAR には遠く及ばない。

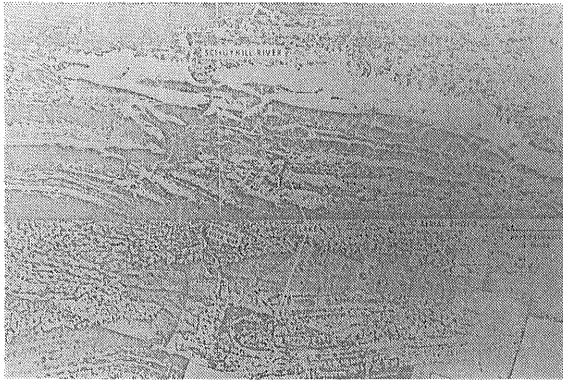
装置の原理上 SLAR が航空カメラと根本的に異なる点は カメラが本来 “角度測定” に帰するのに対し レーダーは “距離測定” にもとづいていることである。

映像という “波動の放射強度の空間的分布” を求めるためには われわれは観測点からの距離と方向によって定まる点での波動の強度を知ればよい。このような方向 (角度) と強度はカメラを含めての “受動 (passive)” 方式にも共通しているが SLAR では角度測定とはまったく独立に距離測定を行なう点がユニークであり ときにはドップラー速度の測定をも併用して 映像の質を高める方法がとられている。

この SLAR が映像表示方式のリモートセンシングの領域で急速な進出をみせはじめたのは 一にかかってその使用波長からもたらされる大気中微粒子に対する貫通力にある。従来の空中写真では手に負えなかった対象地域で写真の代役をつとめつつ ある条件下では写真以上の有効な成果をおさめてきたといつてよい。

SLAR が使用する電磁波エネルギーは 俗にセンチ波とかミリ波と呼ばれているマイクロウェーブで ほぼ 0.5 cm (≒60GHz) から10cm (3,000MHz) の範囲におよぶ。周知のように最近でこそミリ波レーダーも各方面で使用されるようになってはきたが 通常の船舶・航空機用などでは依然 3cm～10cm の波長域が主流を占めているのが現状である。第1表として SLAR 関係の資料にひんばんに出てくるレーダー技術独特の波長帯の呼称を示す。

一部の型式では 70cm 以上という長波長の実験も報じられてはいるが 実用されている SLAR では大体にお



第2図 植生被覆を貫通した SLAR 映像(上)の例 下は同一地域の空中写真 (BADGLEY et al. による)

いて X Ka Ku バンドのものが多く、隣接したこの下のサブミリ波は遠赤外線 ($5.5\mu\sim 1,000\mu$) として分類される領域であって とくに SLAR の波長帯とも多少重複する 3cm \sim 0.1cm 帯は passive radar の適用範囲でもある。

したがって当然ながら SLAR は 隣接する長短両波長域に相備わる得失を併せ保有することとなった。

すなわち SLAR 映像の解像力(分解能)は 空中写真に比較すれば若干 劣るもの その見返りとしてレーダー技術が発祥以来 最大の特色としてきた暗(透)視性をもつ。よく知られているように赤外線もある種の大気中の微粒子—たとえばモヤの類を貫通するし 夜間といえども観測可能な特性をうたわれてはきたが 今日ではこの特質は必ずしも高い評価を受けているとはいえない。これに対し SLAR では 積乱雲や雨雲がよほど分厚く覆っているような場合以外は天候にかかわりなく撮像可能という 実用上きわめて重要な性質を備えている。また今のところ事実上 唯一の能動的非写真映像系である SLAR は 太陽光線や物質の熱放射のように 天然の電磁波エネルギーを利用する受動方式に宿命的な時間・季節的変動から免れることができる。こ

のため24時間稼働が可能であって 観測作業を制約するものは航空機と乗員の航続可能時間にすぎない。

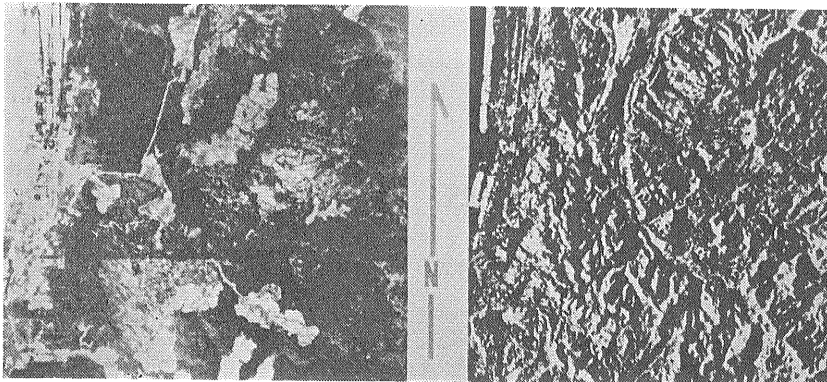
しかもこの SLAR の貫通力は ときにはこれら大気中の妨害要素だけでなく 植生や乾燥土壌もある程度突き抜けて 間接的ながら表層被覆下の地質・構造に関する知見をもたらすことさえ珍しくない(第2図)。

また電磁波エネルギーの反射は水分によって大きく影響されるため 農林・土木などの分野でとりわけ重要な土壌の性質を推定する手がかりともなり 水系パタンの識別とともに植生図の作成は SLAR がもっとも得意とする観察(判読)対象となっている。この水分含有量の差は たとえば断層破砕帯に沿ってしばしば顕著に認められるから 火成岩株のように孤立した岩体の識別や岩相の大まかな区分と併せ検討することにより地質構造的要素も明瞭に把握されることが多い(第3図)。

また航空機の側方を“照明(射)”してえられる SLAR の映像は これに類似の例として低い太陽角度によって撮影される LSAP (Low Sun Angle Photography) とよく対比される(第4図)。このため陰影部の情報は失われる反面 地形に表われた断層や褶曲を反映した地質構造が一段と強調されて 映像上に記録される特性も認められる。

映像がえられたのちの解析方法は大体において通常の写真判読と共通しているが 一測線のカバーする範囲がたとえば幅20マイルといった具合に非常に広いため 普通のモザイク写真では不可避であった階調の不連続変化を免れうるのも見逃せない特徴のひとつといえよう。バラバラに撮影された空中写真の判読で見落されていた大規模構造が SLAR により発見された例は少なくないのである。

また SLAR の搭載機(vehicle)も別に航空機に限定されてはおらず 宇宙船でもよい。SLAR における最大の問題点は 前記の通り分解能の不足にあるが 厳密



第3図 空中写真(左)では判然としないう大規模構造の表われている SLAR 映像(右)の例 オレゴン州 Seaside 付近

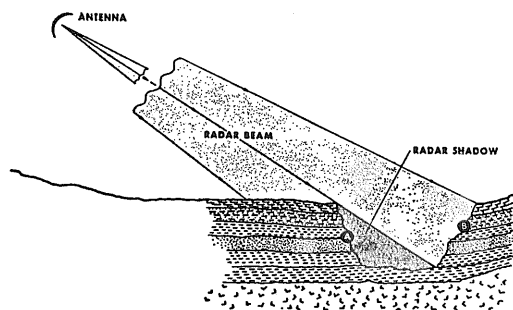
な意味では可視光線写真には所詮及ばないにしても 小縮尺の写真判読に期待される程度の情報をうるには充分満足できるレベルには達している。 少なくとも白黒の赤外線写真に遜色ない分解能をえていることは事実で通常写真と SLAR 映像とを並置すれば専門家でも一瞬戸まどうほどにまで改良されてきた。

反面 SLAR 映像の立体観察は 現在ではまだ普通写真ほどには活用されてはいないが 着実に研究が進められている (LAPRADE, 1963; ROSENFELD, 1968). たとえばオーストラリアの Mt. Isa では部分的な重複部分を立体視して 岩相の識別に優秀な成績を収めたことが報じられており (MAFFI, 1972) 定量的な等高線図化さえ試みられているほどである (MOORE, 1962; NORVELLE, 1972). とくに最近ではこの立体観測の日常作業化が急速に進んでおり ストリップ毎に50%~60%の重複撮像が標準的となるような趨勢にまでいたっている。

しかもこのことによって 解析の労力が普通写真のそれより30%~40%も減少することが一部では実際に確められている。 また商業的に確立したとはいいがたいが立体視によらずして陰影の長さから地物の比高を求める方法も一応 可能である (LAPRADE et al. 1968; LEWIS et al. 1973).

追ってふれるが SLAR ではこのほか偏波面の活用などによって 普通写真にはみられなかった独特の利点もあり 測線方向の設計からはじまって映像の作成過程および判読等の面において SLAR 個有のものが少ない。 たとえば測線方向についていえば 第4図からも明らかなように適正 (走向と平行) にとれば地形の起伏を明確に浮彫りにすることができる代り 誤ればまったく情報を消してしまっておそれも生ずる。 これをさけるため たがい直交する二方向の測線パターンを設定するなどの工夫が必要となってくるのである。

以上のような性格を備えた SLAR が 主として軍事上の応用面において多大の価値を有することは容易に理解される。 事実 他の大部分のリモートセンシング技術と同様 SLAR もまた軍事上の要求によって開発された技術であり 1950年代の初期にはすでに爆撃照準用としての原型が完成していた。 この映像がかなりの精度を以て地形 (質) や植生に関するデータを提供しうることはすぐに認識され 性能の向上とともに 森林・農業・土木・交通・資源探査のような平和的利用に対しても 転用の道を検討されはじめたのはごく自然な成行きであった。 また受動系ではあるが電波天文学もこの種のマイクロウェーブ応用の一連の延長線上にあるし 能動系では月や惑星探査に強固な地歩を築き上げたレーダ一天文学 あるいは地形調査・海況測定などに利用を考

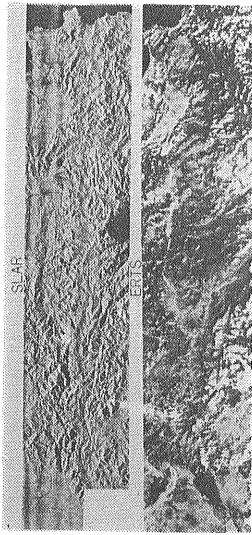


第4図 陰影部における情報の消失 (RYDSTROM による)

えられている scatterometry や 精密電波高度計などの諸分野で マイクロウェーブの伝播におよぼす媒質や対象物の物理・化学的性質の影響に関するばう大なデータが蓄積されていった (たとえば COSGRIFF et al. 1960; LUNDIEN JR. 1966). しかし 最初に整理された形でレーダー映像の地質調査への応用を積極的に打ち出したのは 1964年の第3回環境のリモートセンシングシンポジウムにおける SIMONS ならびに CAMERON であつたと思われる。 翌65年6月には NASAの Earth Resources Survey Program により他の各種リモートセンサとともに SLAR の性能試験が行なわれ さらにその翌年の66年の分と合わせれば全米45州にわたって112時間 数十万平方マイルのレーダー映像がえられた。 このデータは一部が公開され 米国地質調査所やカンサス大学などの官庁・教育機関がただちに SLAR の地質分野に果すべき役割等について 綿密な評価を行なっている。

また同じく1965年11月には 東部パナマー北西コロンビアにおいて有名な RAMP 計画 (Radar Mapping of Panama) が実施され そのめざましい成果は一躍 斯界の注目を集めることとなった。 この60年代の前半から後半にかけては SLAR が非軍事的利用面でも急速に実用化の段階に入ってきた高度成長期であつた。 とくに1969年 軍事機密の制限が大幅に解除されてからはメーカー各社をはじめとより 各大学 研究機関 NASA 沿岸測地局などの活動はますます加速の度を強めていったのである。

この進展にいち早く着目した欧米の空中探査請負企業は相次いで SLAR の導入を図り 全世界にわたって活発な商業サービスを展開しつつある。 たとえば米国の Aero Service 社は1970年末 Goodyear Aerospace 社と提携し 同社の GEM システム (X バンド 波長 3.12cm) を Caravelle ジェット機に搭載して南米北部 (ブラジル ベネズエラ) の調査を行ない なかでもベネズエラでは公共土木省より25万平方キロを受託して縮尺25万分の1地形平面図 地質図 水系図を編集し終つ



第5図 SLAR 映像と ERTS 映像の比較 (Aero Service 社提供)

た。また1971年秋英国の Hunting Geology and Geophysics 社は Westinghouse / Autometrics 社が AN/APQ 97 (Kバンド 波長 0.86cm 航空機: DC6B) を使用して調査した ニカラグア全土 119,000 平方キロの判読作業を分担している。さらに Grumman Ecosystems 社でも1971年末 A26の改装機に Motorola 社の APS-94D を装備して Daedalus 赤外線走査装置との同時観測を行なえる体制に入り ここに SLAR の現用三大シ

ステムはいずれも調査企業との連繫を確立して受注を競うこととなった。

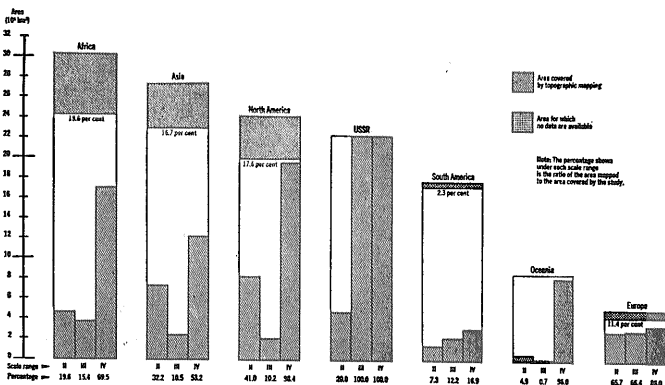
かくして北米大陸はもとより 上記のほかにも SLAR はインドネシア エクアドル ペルー オーストラリア 英領ソロモン等の各地に続々と投入され 多大の成果をおさめていったのである。たとえばエクアドルの Oriente では これまで専ら白黒赤外線写真によって行なわれていた水系図についても SLAR はこれをしのぐ能力を有することを立証し しかも水系パターンからこれを支配するドーム構造の検出によって新油田の発見をみちびいている。また米国南西部の既知油田帯を規制する断裂系の解析も普通写真では不可能であったものといわれ西イリアンでも濃密なジャングル被覆下の石灰岩中の貫入岩の分布を明らかにする等々 SLAR の活躍は枚挙にいとまがない。Westinghouse の実績だけでも1965年の発足以来 73年初頭までにカバーした総面積は 1,83

7,800平方キロに達し Aero Service にいたってはわずか16ヶ月で実に 5,000,000 平方キロという驚異的な作業量を記録している。欧米以外ではリモートセンシングをもっとも熱心に推進しているブラジルではとくに政府関係者の絶大な信用を博し その広大な先カンブリア紀楯状地中央部の開発計画に資源探査衛星 ERTS の映像(縮尺25万分の1)による予察 および測線間隔 1km ~2kmの空中磁気探査と並行して SLAR による縮尺10万分の1図の作成が決定されている(1972 RADAM 計画—Radar in Amazon)。これらはそれぞれの持味に応じ ERTS (多波長域カメラによる地図作成) SLAR (地図ならびに浅部地質構造判読) による地表付近の情報収集とともに 空中磁気探査により地下深部の解明を併せて既存データにとぼしい未開地の総合的基礎資料の作成を目的とする。この三者の組合せが果してどのような実り多い成果をもたらすかはまことに興味深いものがあり 今後 この種処女地域に対する開発プロジェクトの先行調査における標準的パターンとなる可能性も強い(第5図)。またさきほどのニカラグアは 国土全域を SLAR でカバーした最初の国でもある。

III. SLAR の応用と限界

さて前節の概要だけからでも SLAR が現在の空中探査技術のなかに占めている位置はおのずから明らかであり 今後果すべき役割についても多言は要さないであろう。それは地球上ほぼ4分の3を上回る広大な未開発地域における先行的予察調査に画期的な転機をもたらすものである。第6図は1970年度の国連資料で いろいろな縮尺の地形図の各大陸における整備状況を示しているが 14万分の1から253,440分の1という小縮尺図ですら アジア極東地域は半分強をカバーしているにすぎず 南米にいたってはわずか20パーセントにも満たぬ実情が観察されよう。また米陸軍のデータでは 世界の全陸地面積の約20パーセントは後記のパナマの例のように常時 視界不良の状態にあるといわれている。

SLAR 映像の実例はすでに第2 3 5図(および表題カット)にもかかげたが その威力がもっとも劇的に発揮された例としてこのパナマ調査の成果をやや詳しく観察してみよう。これはすでに諸所の英(邦)文誌にも再三 紹介されとりわけ 第7図は「Photogrammetric Engineering」(Vol. 35, No. 7, 1969)の表紙を飾ったほどであるが SLAR が

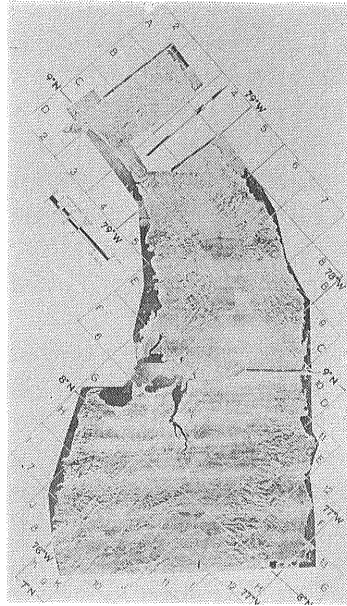


第6図 縮尺別に区分した各大陸毎の地形図整備状況 (World Cartography Vol. X 国連 1970 年より)
I 1: 40,000~1: 75,000 II 1: 100,000~1: 126,720

マッピングを唯一の目的として適用された最初の歴史的調査でもあるので 重複をもちえりみずここに転載することとする。

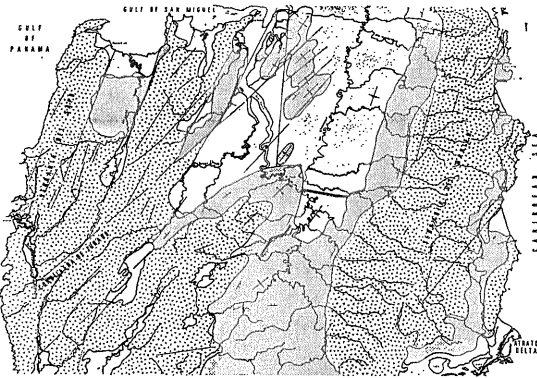
第8～11図は第7図のモザイクから解析された地質図地形区分図 植生図 水系図を示す(原図縮尺:25万分の1)。6,600平方マイルにもおよぶこの地域は年間を通じほとんど常時 厚い雲に覆われているため 米空軍が1947年以来 20年にわたってわずか15%～20%をカバーしたにすぎない名うての難所であった。それがSLARでは 約4時間の実飛行時間によって全域を撮像し終ったのである。本観測に先き立ち 6回の予察飛行を行なって最適測線方向などを吟味したが これを勘定に入れたとしてもまことに驚くべき高能率というほかない。

同じく前記ニカラグアの場合でも 調査日数で7日飛行時間で78.6時間を要したにすぎなかった(観測能率:1,500 平方キロ/時間)。そして現地の地質技術者が普通写真と野外踏査によって6年間を費したのとまったく同量の地質構造データが 2週間で提供されたという。この高能率は時速400mphのCaravelle ジェット機を使用した南米北部の調査ではさらに飛躍的に向上し 1時間当りの撮像量は何と8,000平方マイルに達した。



第7図
パナマ東部-コロンビ
ア北西部の SLAR 映
像モザイク (WING et
al. による)

SLARのこの高い作業能率は これまでの空中写真測量 あるいは写真地質調査についてのイメージを根底か



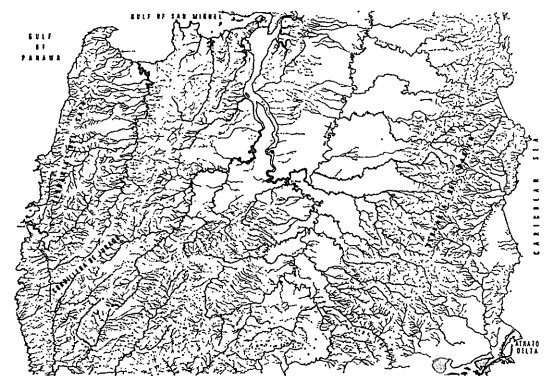
第8図 第7図の解析図(地質)



第9図 第7図の解析図(地形)



第10図 第7図の解析図(植生)



第11図 第7図の解析図(水系)

らくつがえすものである。SLARの装置自体は通常の空中写真撮影に用いられる航空カメラよりはるかに高価ではあるが 天候待機による写真ならびに航空機の滞留費の節減は調査コストのきわめて大幅な低下をもたらす。よく知られていることとは思われるが 地形(質)図化に使用する空中写真の撮影に際して課せられる気象条件の制約は局外者の想像を絶するものがあり 空中物理探査における位置標定のように画像が多少不鮮明であっても とにかく航跡さえ許容誤差範囲内で把握できれば用の足りる場合とは根本的に趣きを異にする。

たとえば空中写真の仕様書では通例 雲量2以下の快晴日が指定されるが わが国の全国平均でこの条件を満たすのは年間せいぜい40日程度にすぎず かつ陰影効果をさけるため季節・時間帯にもかなりの限定を余儀なくされてしまう。本邦では調査経費の積算に際し 天候待機日数が撮影所要日数の数十倍にとられることもまれではなかった。

これが多くの発展途上国を含む低緯度帯では一段と深刻さの度を増し パナマの例のように いかにも長期間天候の好転を待っても徒労に終る場合が決して少なくない。またそこまで極端でなくとも 局地的に常時 視界が不良で 他の大部分の調査地域の撮影が早々と終了しているにもかかわらず全体の足を引張っている "nuisance area" なる部分があちこちに散在する場合もしばしば生ずる。これら発展途上国があらゆる開発計画の基礎たるべき地形図さえ欠いている実情は 経済的理由もさることながら実はこのへんにも原因の一端が潜在している場合が少なくない。折角 豊富な天然資源の高いポテンシャルを予想されるにもかかわらず 空中写真や地形図の不備のため みすみす人跡未踏の奥地深くに眠る状態に放置せざるをえなかった。

SLARの全天候性はこの問題を一気に解決する。それは積乱雲以外の大多数の雲 霧 煙の類を透視し ときには植物被覆をさえも突き抜けて未知の地質構造や地図情報を得ることができる。熱帯・亜熱帯地方ではかりに気象条件に恵まれ首尾よく写真撮影に成功したとしても 地表の多くは濃密なジャングルに覆われ 地形測量や森林判読ならともかく 地質調査に関していえばえられる情報量は必ずしも充分とはいえない場合があった。SLARはこの障壁もある程度 克服している。この植生や土壌に対する貫通性については批判や反省も少なくなく たしかに過大評価は許されないけれども SLARが独立した探査技術として立派に一本立ちできる資格のあることを暗示するものであろう。

もちろん第8~11図に表現されたデータの質に 一抹

の物足らなさがあるのは否めない。調査目的にもよるがとくに基本図としての地形図としてはやはり5万分の1程度が欲しいところであるのに反し SLARが提供できるもっとも精密な縮尺は通常 20万~40万分の1程度で撮像される原因図を引き伸ばしても10万分の1が精一杯であろう(5万分の1に拡大しても "acceptable" との主張もあるが……)。しかし地形図はおろか 略集成の小縮尺空中写真モザイクさえも満足にはそろっていないような あるいはあってもきわめて不完全な未開発地域のジャングル 沼沢地 砂漠 高山地帯等において たとえ第一次近似にすぎないとしてもこのように多彩なデータがさしたる operation の困難も伴わずに しかも低廉な費用で迅速に inventory できる便益は図り知れないものがある。現にパナマの例では とくに水系図に関して既存資料の少なからぬ誤りが発見されたといわれている。

因みに SLAR の調査コストは システムの種類や仕様の内容によってかなりの幅があるものの 一例をあげれば 調査面積250,000平方キロに対し162,500ドル(@0.65ドル/平方キロ) 500,000平方キロでは287,500ドル(@0.57ドル/平方キロ)という数字が公表されており 個々の側面においての空中写真との優劣はともかく 総合的評価を試みたときの cost-effectiveness の優位は歴然としている。[さらに概念的なコストとして BADGLEY and VERT(1966)は 普通写真の約6ドル/平方キロに対して SLAR の約1ドル/平方キロという数字をあげている] SLAR は普通写真が適用不能な場合にのみ 一時しのぎの便法として採用を考慮されるような域はすでに脱却したとみてよいであろう。外見上の類似性が多分にあっても SLAR 映像による波動情報はあくまでも空中写真とは別個のものであり たとえ写真撮影が可能であっても SLAR を重複して実施する価値の認められるケースは多々考えられる。

SLARは軍用として長年月にわたる "試用期間" を経てきただけに 平和的利用に技術移転された直後ですらも装置の信頼性・安定性は当初より "実験室" の域を脱しており ルーチン作業としてのシステムはほぼ問題なく確立していた。もちろん今後ともハードウェアの日進月歩はつづけられよう。その成果がまた新たな応用分野を切り開いてゆくのも自然な展開ではあるが 当面 SLARのこれから託される楽しみは 主として利用面の開拓にかけられているといっても過言ではない。

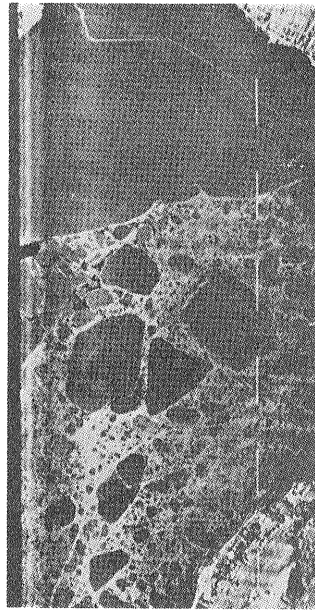
たとえば前記の赤道地帯とは対照的に 極地方を含む高緯度帯でSLARへの活動の場が期待されている。すなわちこれらの地方では 可視光に依存するリモートセ

ンシングは暗く長い冬の期間中ほとんど用をなさない。加えて地形図ももちろん不備である。だが SLAR ならば濃霧を通して氷雪の移動状況を監視し海陸の交通確保に有益な貢献をなしうるであろう。この方面への SLAR の応用にもっとも力を入れているのは広大な北辺領土を有するカナダであってたとえば同国の Ice Division of the Atmospheric Environment Service は1972年4月 SLAR を“most valuable tool”と激賞している。第12図はカナダ空軍が撮像したもので浮氷や船舶が霧中でも明瞭に認められる好例である。〔地理的環境を同じくするソ連でも海水観測への SLAR の適用が報じられており(第7回国連アジア極東地域地図会議 1973)北東部海岸やアラスカを有する米国も早くからこの方面に多大の努力を傾注している (PARKER, 1965 BRADIE, 1967)].

この種の海況通報が常時利用できるようなれば海上船舶は砕氷船なしの自力航行が可能となり巨大な経済的利益を生むことは想像にかたくない。また北極海での石油探鉱が活発になってゆくに連れリグをこれら氷塊の漂遊から守るのも SLAR に期待される任務のひとつとなろう。さらに公害防止の面からは油類を含む海洋廃棄物の監視などにも役立つことが考えられる。米国の沿岸警備隊の依頼を受けた Aerojet Electrosystems が Motorola に発注した SLAR は同社の 94D の改良版であるがはっきりと“oil slick detection”を標榜した一例である。

その他野生動物の移動状況領海内の漁業活動調査捜索・救援作業洪水・地震活動の監視等々きわめて広汎多岐な分野が提案されていながら SLAR の利用面の開拓はまだ緒についたばかりである。この意味でわれわれは SLAR だけに限定せずレーダー技術全体の地学における応用の動静を注視する必要がある。たとえば SLAR では氷の厚さそのものは出しにくいのが 35~440MHz 帯の電波高度計の改良が考えられておりまたガスレーザー高度計による微地形の測定も65年以来推進されてきた。この実用化に成功すればたとえば重力探査における隘路の筆頭に数えられている水準測量までエアボンで行なえることが見込まれるしとりわけ radar scatterometry の進展は SLAR の映像情報にもうひとつ別の次元のデータを提供するものであってはなはだ夢の多い可能性に満ちあふれているといえよう。

本節までが SLAR のいわば総論であるがその終りに際しなお二三の横顔について言及しておく。まずこれまでにも再三ふれてきた通り SLAR について論ずる場合毀誉褒貶いずれの側に立つにせよ常に念頭におかれるのは普通写真との比較であった。前述の諸点の



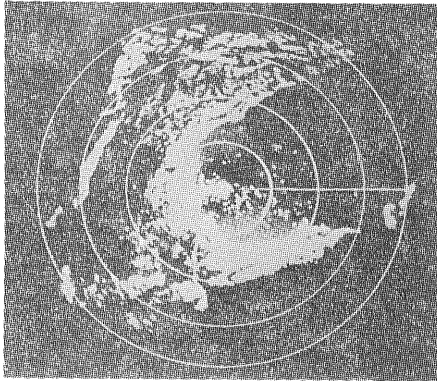
第12図 機上で観察された浮氷や船舶などの Real time 映像 (Canadian Electronics, 1972)

ほかにもうひとつ忘れてならないのは SLAR が本質的にリモートセンシングとして最も重要な属性の一つであるテレメータリングに適していることである。

天候や時間帯による制約とならんで空中写真につきまとうてきた難点は出力が最初から写真という光学的表示形式をとるためそのままではテレメータリングやリアルタイムの諸分析に不向きな点にあった。これは気象などによる障害

ほどには目立っていないけれども宇宙観測のように検知距離が“天文学的”に増大しかつ分析手法も高級化してゆくに連れこれから派生する不便さも案外小さくはなかったのである。もちろん映像として固定したのちあらためて何らかの手段によりアナログまたはデジタルの電気信号に変換し直すことは可能で実際にも盛んに利用されているけれども、データが最初から電気信号として与えられる有利さはいうまでもない。情報処理工学において電気エネルギーが他の伝達媒体にまさる最大のポイントはこのテレメータリングの容易さにあった。SLAR では後記の地形補正などの問題さえ解決すれば中間段階としての映像化の過程を経由せずに直接磁気テープに収録されたデータから地形図を作成することも夢ではない。

またこれまでの説明から SLAR は近年海洋開発において大きな比重を占めてきた Side Scanning Sonar (Bottom Sonar, Lateral Echo Sounder—本誌 No. 132) に多くの面で共通していることに気がつかれたことと思われる。海洋では海水層の不透明性のためいわば全域が常時厚い雲に覆われているようなものでありとくに深海域での水中写真撮影の困難さは空中写真の比ではない。1961年 Side Scanning Sonar の出現はそれまでの測深器による“線的”な海底地形調査技術に革命的変革をもたらし海底を“面的”な二次元画像として



第13図
PPI映像

とらえるのに成功した。今日では Side Scanning Sonar は 近代的な海洋観測船には不可欠の常備機器である。電磁波と超音波のちがいはあるが 概念的には軌を同じくする SLAR がこれからの空中探査に果たすべき役割は自明といえる。

以上 主として普通写真との対比を軸としてSLARの特色を強調してはきたが さればとて SLAR の普及により在来の空中写真がまったく駆逐される運命にある訳では毛頭ない。しばしば指摘されるごとくりモートセンシングがいかに発展したところで 地表踏査が不要になる筈もなかった。SLAR と空中写真の関係もこれに似ており 今後ともリモートセンシングの中核としての普通写真の地位は不動であろう。実際 数々のユニークな長所にもかかわらず 映像系としては生命ともいふべき分解能は 将来とも SLAR は写真のそれに限りなく漸近することはあっても 凌駕するとは考えにくい。特殊な場合をのぞき 調査の第一段階としてはやはり通常の空中写真撮影が 可能な限り先導すべきであって SLAR は総合的空中探査の一環として他の各種空中物理・地化学探査の類とほぼ同列に考えるのがさしあたり至当といえよう。

ただそれはそうとしても 気象条件に恵まれぬ未開発地域での general reconnaissance の道具として 他に打つべき適切な手段が見当たらない場合 とにもかくにも SLAR が空中写真を“実質的に代替”していることもまた動かしたい事実であり かつて英領ギアナの地質調査所長で 国連のエチオピア鉱物資源開発プロジェクトを担当した M. KAYE などは はっきりと“alternative to air photography” と断言してはばからない。

IV. 装置概要

レーダー工学として包含される技術体系は 進歩のいちじるしく速い電子工学のなかでもとりわけ最先端をゆ

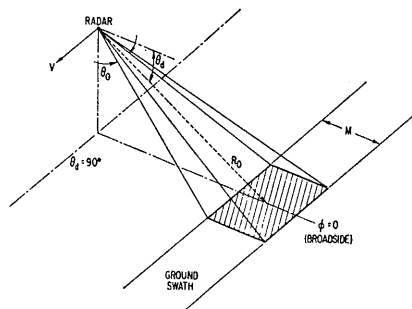
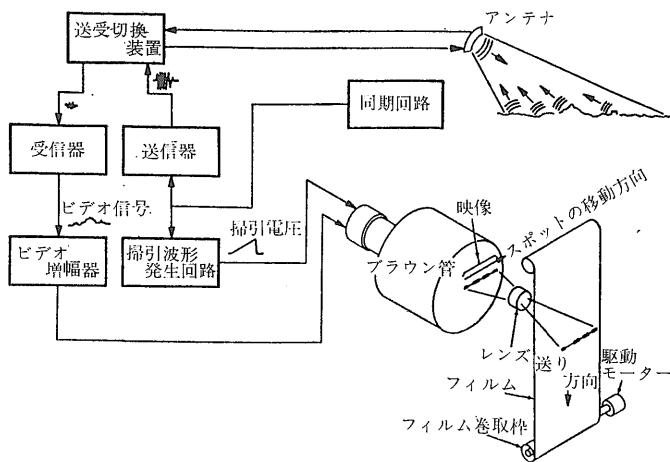
くものであり 間口も奥行もきわめて深くかつ広い。このなかにあつて表示型式の点で過去・現在を通じもつとも多用され またわれわれにも種々の面でなじみ深いのは PPI (Plan Position Indicator) の映像であろう (第13図)。

1941年 米国で考案されたこの直視的なディスプレイは 日本の電波探知機などに採用されていたAスコープ方式にくらべ多くの点ですぐれていた。この極座標で表わされたPPI方式の映像としての質はさておき CRT 管面に明滅する市街地 山岳 海陸境界線等の諸目標は大まかながら自己の位置を中心に置いた空中写真そのものである。

したがって初期の ground mapping radar が 映像の再生過程 (restitution) について PPI 表示を基盤として種々開発を進められてきたのも当然であったといえる (HOFFMAN, 1958)。しかし たとえば 1956年 PPI Radar Presentation Restitutor と名づけられた装置にしても それなりの成功を一応はおさめたものの同時にこの種目的に対する PPI の限界を暴露する結果ともなり以後 PPI は作図用レーダーとしては 二度とかえりみられることなく今日にいたっている。ほとんど唯一の例外といつてよいのは ほかならぬ前記の Cameron で 1965年 PPI を若干 改良した形で水理学・地質学への応用を論じたが これもその後の発展はみられない。それでも概念的には SLAR を PPI からの自然な延長の産物として理解することは依然 有用であつて 的外的な認識ではない。

このほかにも SLAR に適した処理方式を模索してさまざまな方向からのアプローチが試みられた。たとえば1960年に発表された Radar Sketching Device (CLAVELOUX 1960) は 早くいえば Overhead Projector の変形であり、1962年の試作にかかわる Optical Mechanical Device (CRANDALL, 1963) は字義通り機械—光学系の工夫によって SLAR 映像に付随する各種偏歪の修正を狙つたものであつた。

冒頭にこの発展過程をたどつたのは 歴史的な経緯を振り返つてみる意義よりもむしろ SLAR の死命を制する鍵が反射信号を受信したあと いかになまなく正確に鮮鋭な映像を再現させるかという “コヒーレントな検波後の処理技術” にかかっていることを強調したいからで SLAR では他のいかなるリモートセンシング技術よりもハードウェア自身ならびにハードのなかでのソフト的なデータ処理機構についての理解を深めておく必要性が痛感されるのである。以下 順序として最初に装置の構成・内容等につきその輪廓を素描してゆく。



第15図 SLAR による測定の geometry

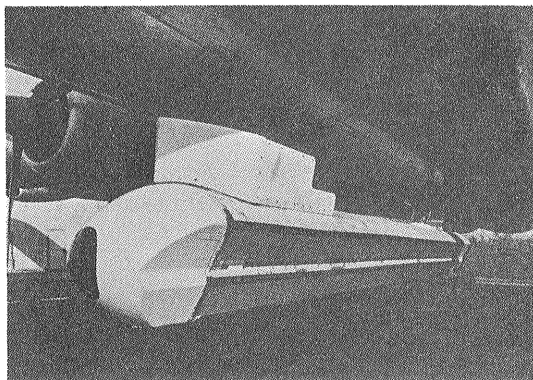
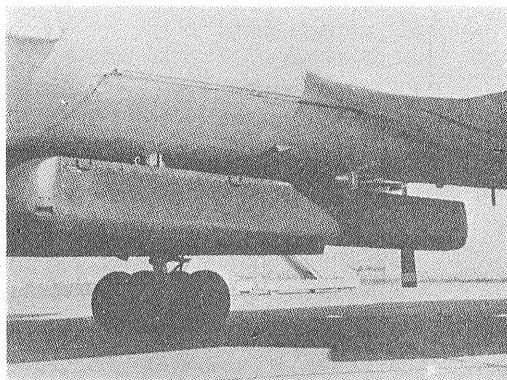
第14図 SLAR 装置のブロック図 (Motorola社 資料)

まず装置全体のブロック図を第14図に 観測に際しての geometry を第15図に示す。SLAR にもいくつかの種類があるが 基本的には各システムもほとんど変わらない。

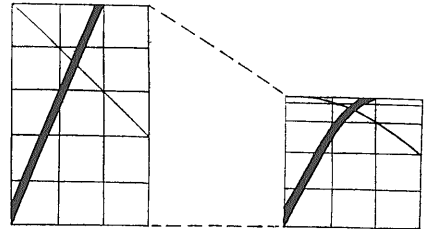
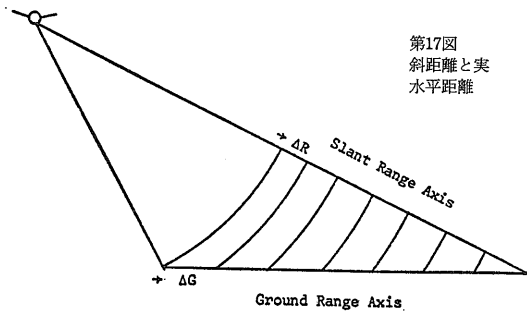
SLAR のアンテナは通常 機体下部の機軸方向に沿って固定され 電磁波エネルギーのビームは航空機の進行方向と直角の斜め下方へ向けて打ち出される。このビームは Motorola の AN/APS94D のように機体の両側へ同時に放射してゆくことも可能であるが どちらか片側にのみ限定している方が多い。もっともその場合でもあとでモザイクをつくるためにはすべての映像の陰影が同一方向にそろっているのが一般には望ましいから 飛行中でも簡単に切り換えられて往復測線を無駄なく能率的に測定できるようになっている。

アンテナはたとえば Westinghouse の AN/APQ97 の場合 反射器付スロット導波管を使用し サイズは20.4 cm×4.26m にも達するがこれでもずいぶん短くなった方で 初期にはこの数倍の長さを有していたのである。ただこのアンテナサイズは測定方式によって異なり 後述する Goodyear の開口合成アンテナ (Synthetic Aperture Antenna) などでは 3.12cm という比較的長い波長を用いながら 長さは4フィートにすぎない。いずれにしても SLAR のアンテナは細長い直線状をなし ローリング ピッチング ヨーイングの全部 あるいは少なくともその一部に対してジャイロ安定化を図るのが常である。第16図は APQ97 と APS94 のクローズアップであるが このように pod の外観は大差ない。またアンテナは送受別々に設置する場合 (bistatic) もあるが普通は1個で共用してデュプレクサにより交互に切り換えており 送信出力はピーク値でたとえば100kW (APQ97) あるいは180kW~250kW (APQ69) 程度で 平均出力は 10~12W ぐらいである。

地表上一定の面積をカバーするためにはビームが連続的に諸目標を走査してゆかねばならないが 航空機の進行方向 (azimuth axis) における走査は航空機自身の前進運動によって自動的に行なわれ 一方 機軸と直角方向 (range axis, look direction) の走査は アンテナ~目標間を折り返すパルス群がさまざまな経路を通ることによって異なる伝播時間でもどってくるため これまた特別な掃引機構は要しない。アンテナパターンは azimuth



第16図 SLAR アンテナ-APQ-97 (上) と APS-94 (下)



第18図 実水平距離における映像の歪曲 (INNES による)

axis に対してはできるだけ鋭いビームとするが range axis を含む平面においてはいわゆる「cosec 自乗」型のファンビームとする。すなわち 検知距離 R_s は 飛行高度を h 伏角 (depression angle) を φ とすれば $R_s = h \operatorname{cosec} \varphi$ で表わされることになるが ここでレーダーの設計によく使われる次の「レーダー方程式」が必要となってくる。

$$S = \frac{PG^2\lambda^2\sigma_0}{(4\pi)^3 R_s^4} \dots \dots \dots (1)$$

- ただし
- S : 受信強度
 - P : 送信電力
 - G : 主ビームのアンテナ利得
 - σ_0 : 目標の散乱断面積
 - λ : 送信波の波長
 - R_s : アンテナ～目標間の距離

したがって今 k_1 k_2 を定数として $G = k_1 (h \operatorname{cosec} \varphi)^2 = k_2 \operatorname{cosec}^2 \varphi$ となるようにアンテナパタンを設計すれば この G を (1) 式に代入して求められる通り 他のパラメータが動かぬ限り φ の如何にかかわらず地上目標は一樣な信号強度を以って受信されることになり 各目標間の単なる遠近の差によって生ずるべき信号の変動を免れることができる。

なお (1) 式はまた最大検知距離を求める関係式でもあるが 所要縮尺や飛行高度ともならみ合せて映像の質の低下をきたさぬよう 用途に適した設計を行なう。Goodyear のシステムでは実水平距離で 25 マイル Westinghouse では 20km の程度におさめているのに対し Motorola は Radar Surveillance Set と銘打った軍用そのままの version だけに 片側だけで 100km をカバーしている。

第15図にみられる通り 航空機の進行とともにある幅をもった「測帯 (ground swath)」がこの両方向の走査によりくまなく覆われてゆく。ビーム方向はレーダー

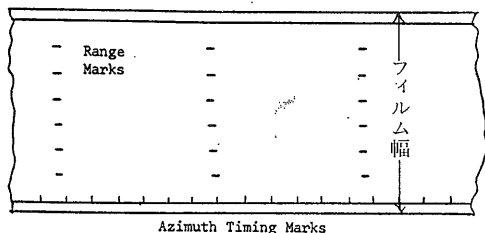
～目標間の相対的位置で決定され 伏角は $0^\circ \sim 90^\circ$ の間で任意にえらぶことができる。しかし航空機の真下付近は対地距離の時間測定が曖昧となるから多少の空白を残し逆に水平に近い入射角は遠距離になることによる信号強度の低下と同時に陰影効果の関係上 これもさけた方がよい。このため最近点 (near slant range) で $75^\circ \sim 80^\circ$ 最遠点 (far slant range) で $20^\circ \sim 30^\circ$ 程度にとどめるのが通例のようである。

なお slant range (斜距離) とはアンテナ～目標間の直距離を指し これがそのまま使えれば概念としてはもっとも簡単であるが 判読上 必要とされるのはむしろ ground range (実水平距離) の方ではある (第17図)。

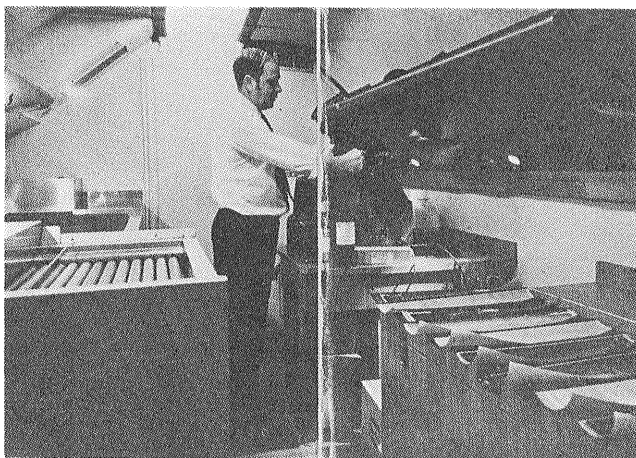
一方 ビームの方位角も航空機の機首直前方から機尾後方まで任意であり 事実 FLAR (Forward Looking Airborne Radar) などという変形まで製作されているほどであるが 普通は常識的にもっとも分解能のよい進行方向と直角な側面 (方) すなわち "side looking" をとる。

第14図のブロック図にもどると受信されたマイクロウェーブ信号はスーパーヘテロダイン検波されてビデオ信号となり CRT を輝度変調する。この光点の集合が測定範囲内の地物に対応する訳であるが PPI がアンテナを機械的に回転させ自己の周囲 360° を表示したのに対し SLAR は CRT 管面上で一定の水平方向に単掃引させる。しかし信号は垂直偏向回路ではなしに CRT の制御格子に加えるから A スコープではなく 強いてたとえるならば身近かな例としてテレビ受像機 あるいはレーダー工学では B スコープとか E スコープと呼ばれている形式に近い。なおアンテナ端子における受信信号の強度は約 10^{-12}W の程度といわれている。

この掃引の開始時期はパルスの送信と同時に あるいは最初のエコーが受信された瞬間のどちらでもよい。管面上の掃引長も自由であるが たとえば Westinghouse の方式では起伏の少ない平坦地域において約 12 マイル相当とし 全体の縮尺がほぼ 25 万分の 1 になるよう設計されている。ただ CRT 管面上の掃引が単なる直線だとさきほどの斜距離と実距離との関係上 地形が平坦な場



第19図 レンジマークと飛行方向タイミングマーク



第20図 DC-6B 機内の処理室

合といえども等間隔に分布する目標群が映像上で等間隔にならない。すなわち一種の歪みが発生するので若干のシステム とくに“実開口アンテナ方式 (Real Aperture Antenna System)”では双曲線状掃引を行って実距離に結びつくよう工夫をこらしている。第18図はこの歪みを説明しているが SLAR のようにとくに線構造の判読を重視する技術ではこの問題は格別に慎重な配慮を要する。前述の RAMP 計画は二回に分けて行われたのであるが 67年度のデータは斜距離そのままの表示だったため第18図から明らかなように近距離で縮尺の圧縮が生じ 69年度の第二次調査では双曲線掃引に改良してこれを防いだともいわれている。とにかく映像記録上にはレンジ方向と azimuth 方向にそれぞれ正確なタイミングマークを打っておかねばならない (第19図)。

この辺の部分で肝要なのは受信系～ディスプレイのダイナミックレンジで 無歪 30db 以上が確保されないと映像上の微細な輝度パターンは失われてしまう。すなわち利得を雑音限界に合せば強い反射波は “bloom” して近傍の微弱な目標をマスクし 反対に利得を下げればこれまた弱い反射波は検出不能となる。また CRT スポットの大きさも重要で 分解能についてはのちに詳しく扱うが折角 他の部分で分解能の向上に努力しても最終段の CRT の電子ビームがするどく像を結べなければなんにもならない。

次に映像は航空機の対地速度に比例した速度で巻き取られるロールフィルム上に逐次 記録されてゆく。米国で用いられる典型的なフィルム幅を 13cm と記載している文献もあるが 現在 Motorola では 9.5 インチ Westinghouse では 24cm といった具合にやや広くなっており フィルム一巻の長さは検知距離約 3,000km 分に相当する。

Azimuth 軸とレンジ軸とはまったく独立であって 前者の縮尺が航空機の対地速度とフィルム巻取速度との比でまらぬのに対し 後者を支配するのは CRT の直線性

であり 電波伝播速度と CRT 掃引速度の比に依存する。レンジ軸はとりもなおさず “swath幅” にほかならない。この両軸の縮尺が原図の段階ですでに同一となるよう組み立てられるのが理想で 実際にもこの点で種々の試みがなされてはきたが 今のところ restitution の過程での補正を余儀なくされている状況にある。なおいうまでもないが対地速度は例のドップラー効果を用いて算出し フィルム巻取速度は航法装置よりコントロールを受ける。またこのドップラー周波数は別の意味で 開口合成法で巧妙に利用されていることを付記しておく。

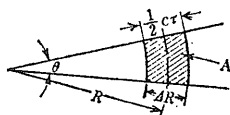
Restitution は相当に複雑な機構となるが 実用システムとしてはもちろん 準即時処理技術が完成している。APS-94D では目標地点通過後わずか数秒後には機内でハードコピーの映像を視察できるし APQ-97 でも着陸後 3 時間以内に陽画がえられるから たまたま雷雲に遭遇したりあるいは何らかの不測の事態に陥って不満足な記録となっても 再測の可否はただちに決断されてゆく (第20図)。

VI. SLAR の 特性 (I)

SLAR が測定する量は航空機から目標までの距離 (パルス遅延時間) と使用する特定の電磁波に対する目標の反射特性 (信号強度) につきるが 開口合成方式ではこの他にドップラー周波数偏移が加わる。このうち距離の方は周知の関係：

$$\Delta T = \frac{2R}{C} \dots (2) \quad \left\{ \begin{array}{l} R : \text{アンテナ} \sim \text{目標間斜距離 (m)} \\ \Delta T : \text{同伝播時間 (秒)} \\ C : \text{電波伝播速度 (} 3 \times 10^8 \text{ m/秒)} \end{array} \right.$$

によって ΔT さえ正確に求めれば決定できるが 航空機



第21図
パルスパケット

の両側にある等距離の点は区別できない。これをさけるため 航空機直下に対するビームの入射角が制限を受けることは前に述べた。

一方 反射強度の方は非常に複雑で 使用する電磁波の性質と目標の反射特性の双方が効いてくる。さきほどのレーダー方程式は広く利用されており 反射強度に関連した諸パラメータの相互関係が一目瞭然ではあるがレーダーの性能に関係する全部の要素がもれなく網羅されている訳ではない。以下 SLAR の性能を規定するいくつかの事項について個別に考察してみよう。

散乱断面積

最大の問題点は散乱断面積 (σ) とみられる。われわれが知りたい地形・地質の情報は距離およびドップラー速度をのぞけばことごとくこのなかに含まれているが解析的な取扱いはきわめて困難である。

点状とみなせる孤立的目標はもちろん 幾何学的形状をもった地物の散乱断面積を計算することはそれほど難しくはない。電磁波が物体に当たるとエネルギーの一部は熱となって吸収されるが 残りは各方向へ散乱され このうちアンテナへもどる分を「後方散乱波 (back scattering wave)」または広い意味での反射波と呼ぶ。すなわち $PG/4\pi R_s^2$ の電力を以て物体へ到達した送信エネルギーは σ 倍となって反射されてゆく。球面とか円筒のような単純物体は光学的類推によって σ を理論的に計算できるし 各種の航空機・船舶などについても実験的に目安がつけられる。

しかし SLAR の観測対象はこれらとは異なって周辺とは明確なコントラストを有しない拡がった地物であり 実際の受信信号はアンテナビーム幅 (θ) と ΔR によって包まれる「パルスパケット (pulse packet)」のなかに 分布するすべての反射体からの反射波の集合となる (第21図)。このパルスパケットの面積 A は送信パルス幅を τ とすれば第21図から明らかなように

$$A = (R\theta) (\Delta R) = \frac{R\theta C\tau}{2} \dots\dots(3)$$

この A はいわば総面積であるのでこれを単位面積当りに換算し かつ実距離に変えた平均散乱断面積または散乱係数 σ_0 は

$$\sigma_0 = \frac{2\sigma}{R\theta C\tau \sec \phi} \dots\dots(4)$$

したがって σ_0 にはこれだけでもすでにパルス幅やアンテナパタンのビーム幅 あるいは伏角などが混入してくるだけでなく σ 自体もきわめて複雑な関数形をとる。

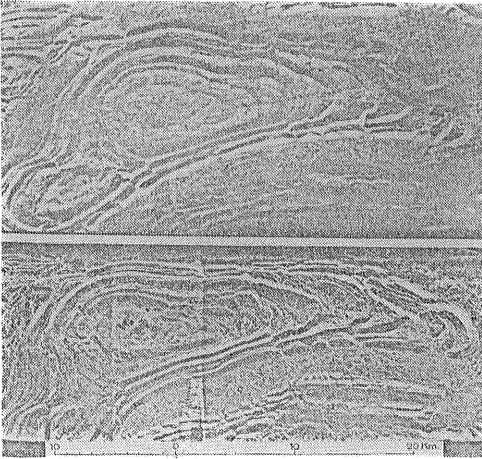
$$\sigma = f(\lambda, \phi, \rho, \delta, \epsilon, \Gamma) \dots\dots(5)$$

λ : 送信波の波長	δ : 方位角
ϕ : 伏角	ϵ : 複素誘電率
ρ : 送信波の偏波方向	Γ : 地形の粗さを表す関数

Γ ならびに σ の解析的な表現は よほど大幅な仮定を導入しない限り近似的にでも困難で いかなる形式が対象とする大地の最良の近似を与えるかは長い間の懸案となってきた。 (5)式あるいは Γ の関数形もそうであるが厄介なのは各パラメータが必ずしも独立ではないことであらう。たとえば人為的に controllable な量のひとつである λ は (1) (5)および Γ のすべてに関係しているし G にしても λ を変えれば当然 変化してゆく。さらに ϵ ももちろん λ に支配され 水分 温度 孔隙率などに支配される。

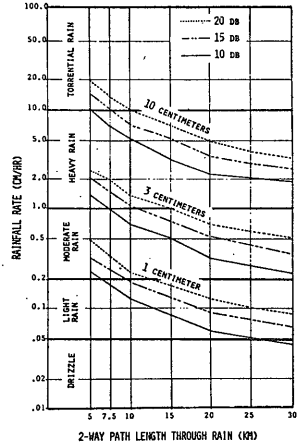
このようにして SLAR 映像におよぼす各パラメータの相互 (因果) 関係は 定量的にはもとより定性的にもまだ充分には解明されていない。白黒の普通写真でも階調の変動を生じる要因は少くないが その大部分は撮影時刻・季節・天候のような SLAR ではほとんど意に介さなくともよい性質のものであった。もっとも σ を実験的に定めようとする動きは かなり大規模に行なわれてはきた。たとえばカンサス大の MOORE (1966) は "scatterometry" の造語者であるが 周波数-入射角と散乱断面積との関係について詳細な検討を行ない 数学的モデルは不可能と断じている。この線に沿った実験データとして評価の高いのは 1960 年 オハイオ大の COSGRIFF et al. による「Terrain Handbook」と1966年 米陸軍の Waterways Experiment Station の行った報告であるが 1967年にはカンサス大の土木技術センター (CRES) から scatterometry のすぐれた基礎資料が発表され かなりの間隙が埋められた (Lundien, Masenthin)。ただこれら多くのデータはある程度やむをえないにしても 実際の SLAR が照明するよりはずっと小さいスケールで行なわれており またレーダー装置の諸パラメータをいろいろと変えるほどには地表のシミュレーションが簡単に行えないのが欠点である。

いずれにしてもこの種のデータが追い追いつき整備されてゆくにつれ SLAR においても反射信号の分析から物体の性質を推定する "signature identification" も軌道に乗る筈であるが 現在では SLAR の判読はまだ一般写真地質解析と類似の域にとどまっている。



第22図
波長による分解能の差異 (上) X
バンド (下) Kバンド
(DELLWIG et al. による)

第23図
降雨率によるレーダー波の減衰
(MEDHURST による)



次に送信波の波長であるが この選択はすでに再三くり返してきた通り SLAR の存在価値が準拠するもっとも重要な点である。それは (方位) 分解能と雑音との兼ね合いに密接に関連してくるからで この辺の事情は SLAR の核心をなす。ただし波長の選択は分解能を大きく左右はするが唯一の要素ではなく 一例として CRT のスポットサイズについては前にふれた通りである。

この波長による映像の相異がもっともあざやかに出ている例として第22図を示す。これはオクラホマ州の Tuskahoma 向斜地帯で撮像されたもので 上図は長波長の Xバンド 下図は短波長の Kバンドを使用している。ただしリニアメントの判読に際しては 低分解能の方が意味のない微地形や小河川の蛇行に惑わされずにすむからむしろ好適とする主張もある (DELLWIG et al. 1966)。

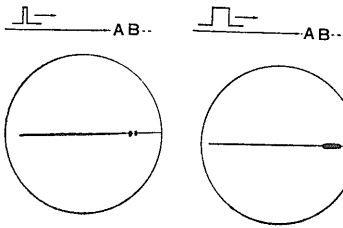
さて波長の関数としての分解能と可探深度との関係は地震探査や電磁法などの物理探査法に端的に表われているように 一般に相補の関係にある。すなわち一方をあげれば他方は低下せざるをえない。SLAR においてもこの可探深度なる概念は一応 生きていて 長波長ほどエネルギーが植生や乾燥した表土層を多少は貫通するが SLAR の波長帯ではこの意味での可探深度はたとえば土壤の場合 せいぜい数ミリメートルの程度にとどまる。かつての赤外線写真のモヤの貫通性同様 この長所は過去においてやや強調されすぎてきたキライがあるといわざるをえない。実際 米陸軍の実験 (1962) では Pバンドを用いて湿潤土に対しやっと18インチをえた旨の報告があり LYON (1972) も …… lead to a feeling of "removal" of the jungle cover …… と微妙な表現にとどめている。ただ 1cm 以上の長波長であれば "見かけ上" 少なくとも植物被覆はかなりの程度に突き抜けて土壤や岩質の geobotanical expression を明らかにして

くれることは間違いなく 悪くとも地形的特徴の明確な把握までは十分に期待できる。

したがってこの観点からも SLAR の波長は長いほど好都合ということになるのであるが この長波長の利点は地下への浸透力よりはやはり大気中の微粒子の妨害を免れうる点につきるであろう。第23図は 1cm 3cm 10cm の波長に対し 雨の強弱に応じた減衰の度合を示しているが 横軸は雨中を通過する往復距離 (km) にとられている。1.35cm 近傍における水蒸気の吸収ピークをのぞけば 通常 これら微粒子による分子吸収は無視できるが 雨滴のように粒径が大きくなるとその反射が効いてきて目標をマスクしてしまう。気象レーダーはむしろこの現象を積極的に活用した例であるが SLAR がいかに貫通力に富むとはいってもこれらの妨害要素はもちろんに越したことはないのである。

一個の雨滴からの有効反射断面積は粒子直径の6乗に比例し 波長の4乗に反比例するが モヤ 霧の類はもとより 雨雲をのぞく大部分の雲は 3cm 以上の波長に対してはあまり影響をおよぼさないものとみてよい。さらに同図を仔細に観察すれば 豪雨の場合といえども波長が 8cm 程度となればかなり影響が軽減されることがうかがえよう。前記ニカラグアの調査では 雲の種類は明らかにされていないが ときには三層の雲が分布している場合でさえも有効な記録を得ることができたといわれており 一方 カナダ空軍の行なった海水調査に際しても 翼下にひろがる雲の厚さは ときには 6,000 ft にも達したが 撮像には何ら支障がなかったとのことである。なお雨の影響を免れる定石のひとつは円偏波を用いる方法で GCA や船用レーダーの一部で実用されているが この考え方は SLAR にも当然 転用できるものである。

一方 分解能の方からは波長はできるだけ短いことが



第24図
距離分解能

要求され 結局は両者の折衷を強いられるのであるがこれを両立せしめるもっとも単純でかつ有効なのは 多波長域写真と同じようにいくつかの周波数で同時に観測を行うことである。現に港湾レーダーやエアボン用でも超大型輸送機 C5A などは C または X バンドに加えて Ka バンドの二重装備を行なっているが SLAR では多波長のほか偏波方向の多重化という興味深い応用もあり この種の方角への傾斜は今後一段と早められることになる (Katz, 1966)。

分解能

レーダーの分解能は 一般に距離分解能 (range resolution) と方位分解能 (azimuth resolution along-track resolution) とに分類される。分解能を規定するもっとも簡単な規準は前記のバケットサイズでこれが小なるほどよくなるがこれはパルス幅 τ とビーム幅 θ に依存しそれぞれ距離分解能と方位分解能に対応している。

まず距離分解能は同一ビーム方向にあって識別しうる二個の目標間の最小距離と定義される(第24図)。これが "resolution distance" とも呼ばれる所以で用語は相当混乱しているが正しくはこの逆数が分解能を表わす。

レーダーで用いられるもっとも基本的な送信波形は第25図にかかげるようなものでありしばしば言及してきた波長とは搬送波 f_0 のそれを指しパルス幅 τ やくり返し周波数による T_0 ではない。周波数領域ではこの波形は f_0 を中心に変調波である幅 τ の矩形波に相当するスペクトラムの拡がりをもつ。充分な信号強度をう

るためにはビームは同一目標をなるべく多数回 叩く必要があり くり返し周波数は 検知距離に応じて重複を生じないように設定されるが たとえば APQ-69 では 1,000~2,000回/秒の程度である。

近接した二目標からの反射信号は時間的に相前後してアンテナに到来するから この二個のパルスが重なり合って識別がつかなくなるためには 第2番目のパルスは最低限 パルス幅 τ だけ遅れて到着しなければならない。それには2個の目標は(2)式を変形したところの

$$\Delta R_s \geq \frac{C\tau}{2} \dots\dots\dots(6)$$

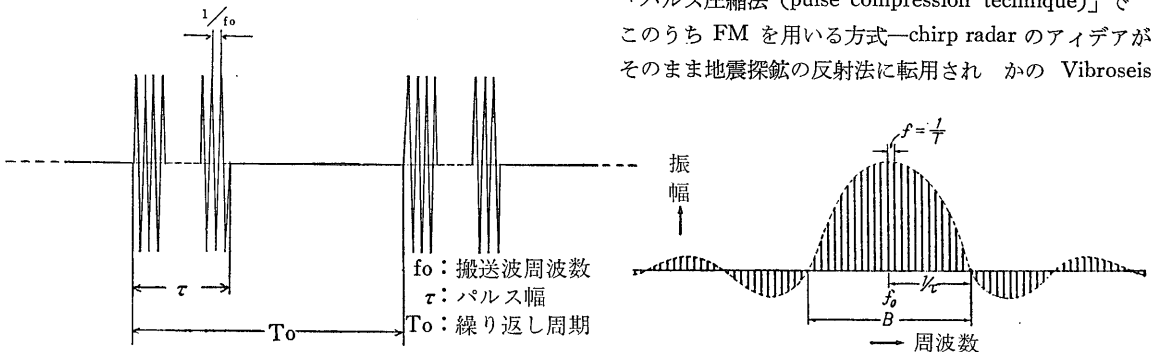
だけ離れている必要がある。この ΔR_s が斜距離分解能 P_s に通ずるものであり 実距離分解能 P_a はこれに $\sec \varphi$ を乗じて求めることができる。

したがって送信出力が許すかぎり パルス幅を細くすれば距離分解能は改善されるが 反面 この信号を歪みなく伝送 再生するためには送受信機 ディスプレイなどの所要帯域幅 W は

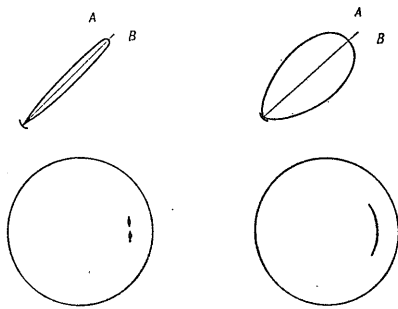
$$W \approx \frac{1}{\tau} \dots\dots\dots(7)$$

となる。すなわち τ に反比例して広い帯域をもたせる必要が生じてくるが この辺の事情はフーリエ変換による波形分析や電子回路の無歪増幅条件などの説明に関連して多くの成書に詳しいからここでは省略する。ただ距離分解能をかりに15mに設定すると 上記の諸関係からパルス幅は $0.01\mu\text{sec}$ 所要帯域は 1GHz となり この広範囲に一樣に平坦な伝送特性をもたせるのはそう簡単なことではない。同じく忠実な波形伝送を要するテレビジョンの所要帯域幅は わずかに6MHzであった。

また広帯域になるほどさまざまな種類の雑音が増加するので 多波長域レーダーにでもしない限り 結局どこかで最適の妥協点を求めざるをえない。この行詰りを打開する突破口を開いたのは 斬新な着想にもとづいた「パルス圧縮法 (pulse compression technique)」でこのうち FM を用いる方式—chirp radar のアイデアがそのまま地震探鉱の反射法に転用され かの Vibroseis



第25図 典型的なレーダー波形(左)とその周波数スペクトラム(右)



第26図
方位分解能

を生んだのであるが とにかく距離分解能に関しては比較的「いい線」を行っているといえなくはない。

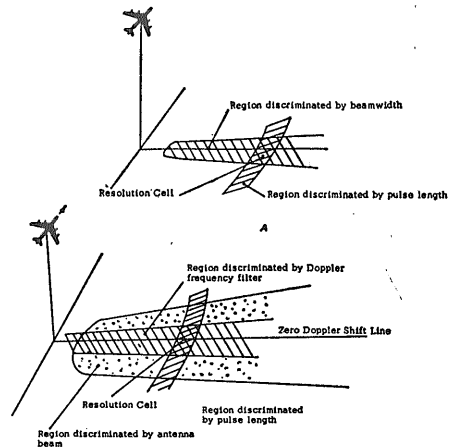
パルス幅 τ は航海用レーダーなどでは今でも $0.25\mu\text{s}$ (波長3cm)が主流を占めているが SLAR では普通 $0.01 \sim 0.1\mu\text{sec}$ の間に設計される。たとえば Westinghouse が $0.04\mu\text{s}$ (波長 0.86cm) と 航海用レーダーの約6分の1にすぎない点からも SLARの距離分解能の優秀さの一端がうかがえよう。

SLARにおける主たる難点はむしろ方位分解能の方にある。もともとどんな形式のレーダーでも一般に方位分解能は距離分解能よりはるかに劣悪であった。

方位分解能は azimuth 方向において識別可能な二目標間の最小距離と定義されるが (第26図) これは放射電磁波のビーム幅—アンテナパターンに依存し ビーム幅とは放射電力が最大エネルギーの1/2に低下するところの「半値幅」を指す。検知距離が長いほど先の方でビームは拡がり このビーム内に入った二目標は一個としてしか認識できないから ビーム幅は極力せまくするのが望ましく これは使用波長とアンテナ開口長 (D) との比にほぼひとしい ($\approx 1.22\lambda/D$ (rad))。

目標の位置を角度測定のみ依存する受動系に比し能動系の SLAR では距離測定を併用するから 本来ならば分解能はすぐれていてしかるべき筋合いのものである。レンズ アンテナともさまざまな経路によって生ずる位相差を測定しているにもかかわらず SLAR の分解能が可視光線カメラに劣り また SLAR のなかでも短波長ほど有利な理由は実はこの辺の関係からみちびかれるのであって たとえば波長 3cm に対して 1mrad のビーム幅をうるためにはアンテナ開口長は 30m を要し これはエアボン用としては prohibitive な長さといえよう。それでも方位分解能は 距離 20km ならばすでに 20m に達するのである。

これが10ミクロンの赤外線では レンズ口径は1cm程度で充分であった。光学系ではこのようにほぼ妥当な範囲内におさまるのに反し マイクロウェーブのSLAR



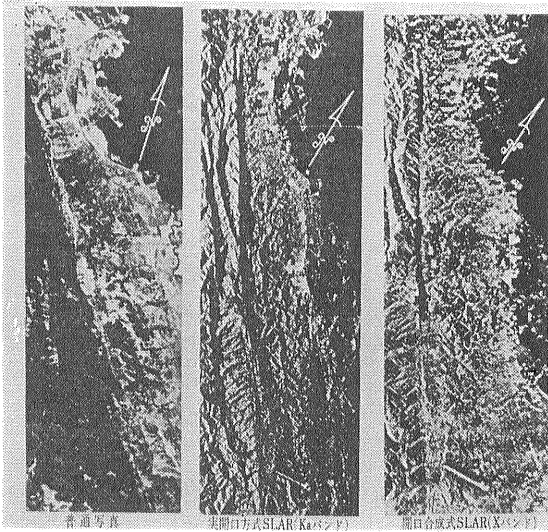
第27図
実開口方式と開口合成法における分解能の概念 (HOLTER et al. による)

ではエアボン用としてははなはだ苦しい大きさのアンテナ系を要することとなり 長波長による浸透力を得た代償をここで支払わされるのである。さらにこの方位分解能が低いと 航空機の数もあまり上げられないという二重の障害が加わる。

この苦境を救ったのが 1950年代初期の WILEY の着想に端を発し1971年軍機から開放された「開口合成法」であった。これは比較的長い時間にわたって反射信号をコヒーレントに処理する方式で アンテナの寸法を実用的な大きさとどめつつ λ/D 値を実質上 光学系のそれに近づけることに成功した。概念的には通常距離測定を位相測定で補うものであり この位相を方位角へ転換する思想に根底を置いている (第27図)。

とくに理論上では 開口合成式 SLAR の分解能は検知距離によって制限を受けないという重要な特性を示す。それには ホログラフィという新しい技術の支援を必要としたが この開口合成法は技術的にもまことに興味深いものがあるだけでなく これからの SLAR が伸びてゆく方向を示唆する有力な概念でもあるので いずれ項をあらためてやや詳述することとしたい。

この開口合成方式に対し 物理的寸法そのままのアンテナ長 (physical aperture) を以って構成する SLAR を「実開口方式 (real aperture system)」と呼び これも無用化した訳では全然ない。たとえば Motorola の APS-94D はみずからを "brute force radar" と称しながらも 開口合成法に比し準即時的データ処理 操作や保守の簡便性ならびに 低コストなどの長所をうたっており エアロコマンドーや B26 のような経済的な航空機が利用できる強味を強調している。実際 それでもビーム幅は 0.45° にすぎず $1^\circ \sim 2^\circ$ を通例とする船用レーダーなどよりはるかに小さい。同じく実開口方式



第28図 普通写真 実開口式 開口合成式 映像の比較 (サンアンドレアス断層周辺 Goodyear 社資料)

の Westinghouse でもビーム幅0.11°を以って最近点で10m 最遠点で22m という立派な方位分解能を実現している (斜距離分解能 11m)。これに対し開口合成式の Goodyear システムでは方位分解能は16m となっているが もちろんこの種の問題は使用波長とアンテナ寸法を考慮に入れなければ優劣の比較は成り立たない。とにかく特定の SLAR システムについて論ずるとき使用波長の検討とともに「実開口方式」「開口合成方式」の区別は真先に採り上げるべき二大分類となっている。

第28図は普通写真 実開口方式 SLAR (Ka バンド) ならびに開口合成式 SLAR (X バンド) の比較写真で サンフランシスコ国際空港やサンアンドレアス断層が含まれている。長波長の開口合成法による映像が短波長の実開口式に比し 格別目立った分解能の低下をきたしていないことが観察されよう。なお分解能とは関係な

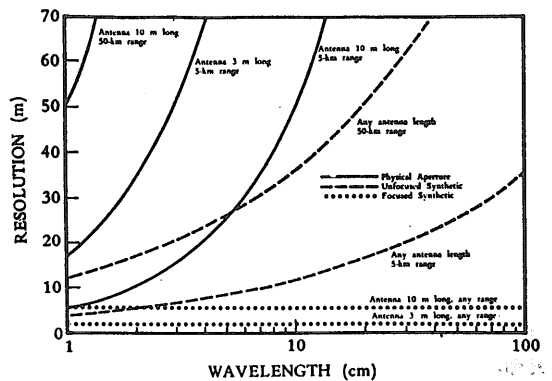
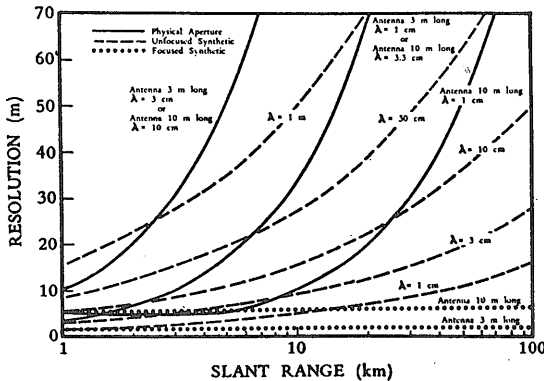
いが 実開口方式は左右の両映像にくらべ相当の歪みが生じており これも開口合成式の長所とされているもののひとつである。

第29図として実開口方式 焦点式開口合成法 非焦点式開口合成法のそれぞれについて次式より求められた波長 分解能 アンテナ長 および最大探知距離との関係を示す。

$$\begin{array}{l}
 \text{実開口方式: } r = \lambda R / D \\
 \text{焦点式開口合成法: } r = \sqrt{\lambda R} / 2 \\
 \text{非焦点式開口合成法: } r = D / 2
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 r: \text{分解能} \\
 R: \text{最大探知斜距離} \\
 D: \text{アンテナ長} \\
 \lambda: \text{波長}
 \end{array} \right.$$

これらはいずれも理論値であって これがそのまま実現できる訳ではないが全般的な傾向はあらまし見当がつく。地質調査においては できれば 10cm~30cm の分解能はぜひとも欲しいところであるが たとえば波長1cm 以上の実開口式でそれに固執すれば 50km 以上の検知距離は無理であり 一方 これを 5km で我慢すれば波長1cm で 3m 3.3cm で 10m という実現可能なアンテナ長が許容される等のことが判る。

分解能については開口合成法の項で別の角度から再論する機会があると思われるが ここで注意を要するのはこの分解能という用語がかなりルーズに使われていることである。距離分解能にせよ方位分解能にせよ 二個の目標が同一の反射強度を有するときはよいが SLAR では異なる場合の方がむしろ一般的であり このような際には分解能の考え方自身を洗い直さなければならない。ときにはそれはスポットの大きさを意味することもありこれも resolution distance と無縁ではないからほぼ同程度のオーダーの数値を示すけれども 常にそうとはもちろん限らない。これは分解能が特定のレンズ/フィルム系の記録しうる目標の大きさを計る指標として使われている空中写真からの類推により生じた混同と考えられ



第29図 最大探知距離 分解能 アンテナ長と波長との関係 (HOLTER et al. による)

るが SLAR では厳密にはあくまでも目標の大きさ如何にかかわらず 二個の目標を識別する能力を指す。

実際まぎらわしいが resolution detectability precision などの用語は本来 判然と区別されていてしかるべきものである。たとえば数百フィート離れた二個の目標は識別できなくとも 直径数フィートの片方は検出できるかも知れぬ。目標の大きさが解像距離よりも小さいからといって 検出不能とは一概にいい切れないのである。さらに具体的な例をあげるならば 金属性のフェンスが波長と共振し かつ具合のよい入射角でビームを受ければ それは映像上に明確な姿を現わすであろう。だが解像距離よりも短い間隔で配置された二本の金属柱を 二本として認識することは期待できない。

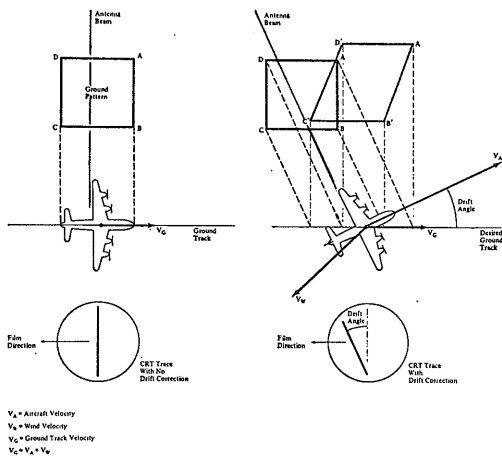
また空中写真という映像の鮮鋭度 (sharpness of image) とも混同しやすいが SLAR 映像で鮮鋭度を劣化させるのはピントではなくして背景雑音 過大信号 フィルム処理過程などである。

映像の歪み

分解能とならんで SLAR 映像の質を規定する重要な因子として「歪み (distortion)」がある。これも空中写真と異なり 記録系の設計や調整などによって直交方向の縮尺は不同となり 単に目標の形状を変えるだけでなく目標間の水平距離をも変えてしまう。実距離と斜距離の相異から生じる歪曲は前にのべたが 実開口方式に特有のものとして「斜視 (squint)」がある (第30図)。

すなわちアンテナパタンが航空機の進行方向と継続的に 90° を保持できなければ つまり偏流角を生じていれば たとえば正方形の地形が歪んだ平行四辺形として記録されていく。機体下部に懸架した十数フィートのアンテナを 偏流角に応じて自動制御するのは無理な話だからアンテナは固定しておき 航法装置から供給される偏流角データを時々刻々 CRT の偏向系に流して修正を図る。この点も開口合成法は有利で アンテナの方向不整は分解能を低下はさせるけれども歪みとはならない。

しかし一番厄介なのはこれは写真と同様 地形の起伏によって生ずる歪曲である。ただし geometry が写真とは異なる。第31図を参照すれば明らかなように 距



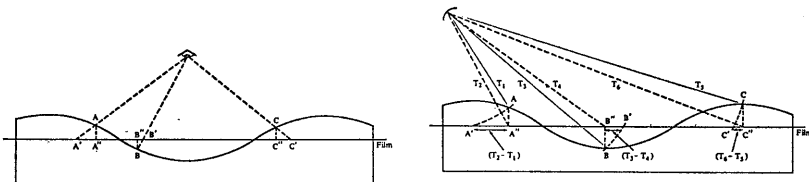
第30図 斜視 (squint) による歪曲 (Westinghouse 社資料)

離測定による SLAR では基準面より高い目標はすべて実際よりも近目に 低いものは遠目に表現されてしまう。すなわち図中 垂直空中写真では A B C の各点はフィルム上では A' B' C' に結像するが 正しい位置は A'' B'' C'' でなければならない。これに対し SLAR では たとえば A 点を正位置 A'' にプロットするためにはアンテナ〜目標間の伝播時間は T₁ でなく T₂ であるべきだが 実際には T₂ - T₁ だけ早目に A' に記録される。同様にして B についていえば T₃ - T₄ C は T₆ - T₅ だけの差を生じてそれぞれ B' C' に像を結ぶ。

この地形補正を正確に行うことは非常に難しく 地形補正を行うためにはその地形を知らなければならないという矛盾に陥る。空中写真ではこの点 オルソフォトなる巧妙な技術が考案され 写真図化の分野で急速に比重を増しつつあるが SLAR でも ortho-SLAR imagery なる概念があり 現に開発中と報じられているから実用されるのも間近いであろう (YONITOMO, 1972)。

また SLAR のように広い範囲をカバーする方式では地球の曲率も問題となり これも地形の特殊ケースと考えられるが 幸いにしてこの影響はあまり大きくないので とくに高い精度を要する場合以外は 無視してよいとされている。(つづく)

(筆者は 物理探査部)



第31図 地形の起伏による歪曲 (左) 普通空中写真 (右) SLAR 映像 (Westinghouse 社資料)