

オンボード地表面エコー検出アルゴリズムの開発

古津 年章^{*1} 真鍋 武嗣^{*2} 岡本 謙一^{*3} 川西 登音夫^{*4}

(1996年5月17日受理)

DEVELOPMENT OF ONBOARD SURFACE ECHO DETECTION ALGORITHM

By

Toshiaki KOZU, Takeshi MANABE, Ken'ichi OKAMOTO, and Toneo KAWANISHI

An algorithm onboard the TRMM Precipitation Radar (PR) is developed which detects the surface echo peak position in a radar echo range profile. The purpose of the surface echo peak detection is to determine the range window in which "oversample" data is collected. The surface echo position in the range profile is variable due to the systematic change of satellite geodetic altitude and surface topography, and this dynamic control of the oversample range window contributes significantly to the reduction of PR data rate that should be sent to the ground station. The algorithm employs an α - β tracking filter and has three functions; surface tracking, lock-off detection and tracking filter initialization. The performance of the algorithm is evaluated by a simple analysis based on the frequency response function of the α - β tracking filter and the spatial frequency spectrum of a typical surface topography in Japan, and by a series of computer simulations using the topographic data and airborne radar data. Optimum tracking and lock-off detection parameters are also investigated through the simulations. The results indicate that the algorithm is expected to work properly over ocean and relatively flat land areas, and not only no-rain and weak rain conditions but also severe convective storms having several kilometer cell size.

[キーワード] レーダ地表面観測, 追尾フィルタ, TRMM, 降雨レーダ.

Radar surface measurement, Tracking filter, TRMM, Rain radar.

1. はじめに

TRMM 降雨レーダ (Precipitation Radar; PR) による降雨強度導出においては, 降雨エコーのみならず地表面および海面エコー (以下地表面と海面をまとめて "表面" と呼ぶ) の測定が極めて重要である. これは, PR の使用している周波数が 13.8 GHz と比較的高く, 強雨時 (概ね 20 mm/h 以上) では降雨減衰の補正が必

要となることと関係する. 一般に, 降雨減衰のない雨の頂上から順に降雨エコー強度を用いて降雨減衰を推定していく手法は極めて不安定であり, わずかな測定誤差などにより容易に発散する⁽¹⁾. それを避けるため, PR では表面エコー強度の降雨域と無降雨域との差 (dB 単位) を利用して推定した (この手法を表面参照法と呼ぶ) 降雨によるレーダ視線方向の積分減衰量を, 降雨減衰補正時の制限条件として与えている⁽²⁾. そのため表面エコー測定精度が重要となるのである. また, PR は降雨レーダであると同時に約 4 km とかなり高い地上分解能を持つマイクロ波散乱計であり, 表面観測データを海上風, 土壌水分などの物理量抽出に利用できる可能性がある⁽³⁾.

*1 地球環境計測部 電波計測研究室

*2 電磁波技術部 ミリ波技術研究室

*3 地球環境計測部

*4 宇宙開発事業団

更に基本的な用途として、地表面散乱断面の地球規模のデータベース構築にも重要である。

PRは受信機の帯域制限フィルタ出力で距離250mに相当する 1.67μ 秒のパルス幅を持ち、その分解能で降雨および表面の観測を行う。すなわち、250mの幅で平均されたレーダ反射因子の距離方向プロファイルを測定する性能を有する。一般にこの性能を十分生かすには、シャノンのサンプリング定理より、レーダ受信機から出力されるビデオ信号の最大周波数成分の2倍でサンプルすることが必要である。PRでは降雨の垂直方向変動成分が一般にはそれほど大きくなく、特に斜め方向に観測した場合には垂直分解能がアンテナビーム幅の影響で劣化するためそれほど短いサンプルは必要ない。これらの点を考慮するとともに、降雨レーダに割り当てられた約93kbpsというデータレートの制限を満たすため、250m毎のサンプルを行っている⁽⁴⁾。しかしながら表面エコー並びに小入射角での降雨エコーについては、空間周波数が高く250m間隔のサンプルでは十分エコープロファイルが再現できない恐れがあるため、部分的に250mより短い間隔でサンプルすること（以下オーバーサンプルと呼ぶ）が望ましい。この場合、あまりオーバーサンプルを行う距離範囲が大きいと、データレートをむやみに増加させるので、“必要最小限”の領域を抽出する必要がある。しかし、衛星高度（衛星から表面までの距離）は、海陸の変化や緯度により変化するため、パルス送信時刻を基準として測ったオーバーサンプルすべき範囲のPRからの距離は、最大15km程度も変化する。そのためオーバーサンプルする距離範囲（レンジウィンドウ）をダイナミックに制御する方式を開発した。

以下本論文では、まず表面エコーのサンプル間隔とエコー強度推定誤差の関係を検討し、それに基づいて決定されたPRのデータ取得方法について述べる。次にレンジウィンドウを制御するために必要な表面エコー追尾アルゴリズムを説明する。更に、そのアルゴリズムの性能評価と最適な追尾パラメータ決定のために行った解析並びにシミュレーション結果を示す。最後に、本アルゴリズムのオンボードでの性能評価並びにパラメータ調整手法について議論する。

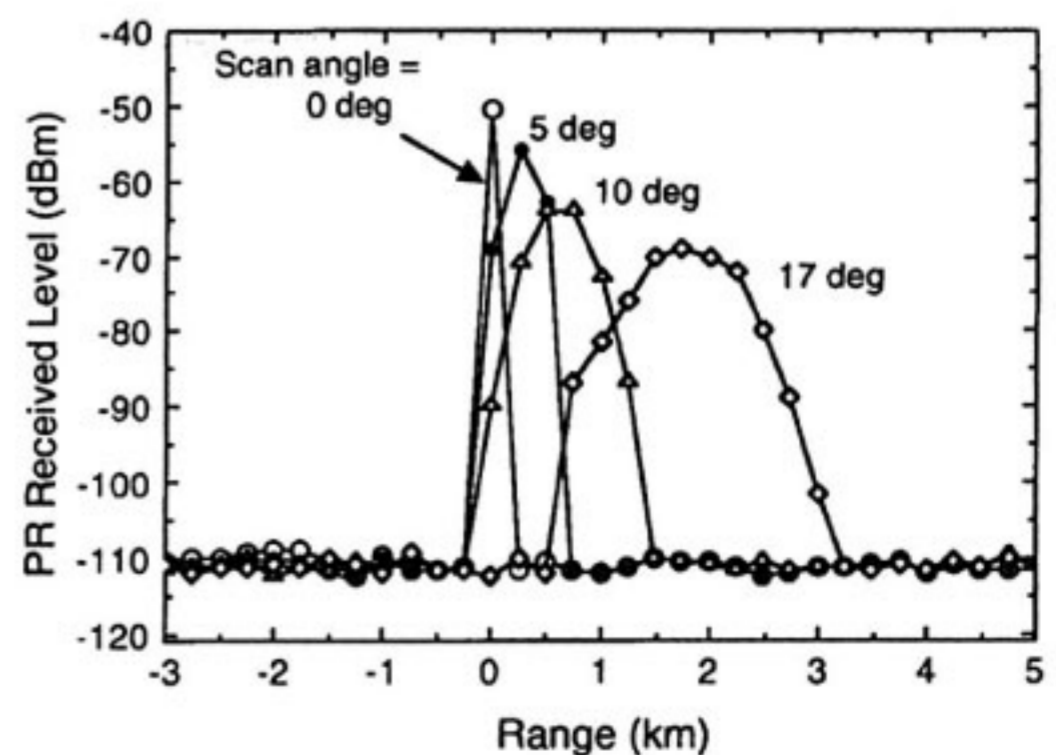
2. サンプル間隔の検討

PRで観測される地表面エコーは、小入射角ではフットプリント（FOV）がアンテナビーム幅で制限される（ビーム制限FOV）。一方、入射角10度以上では衛星進行方向（Along-track方向）がアンテナビーム幅、それと直交する面内の地表での方向（Cross-track方向）がパルス幅で制限される“半パルス制限”FOVとなっ

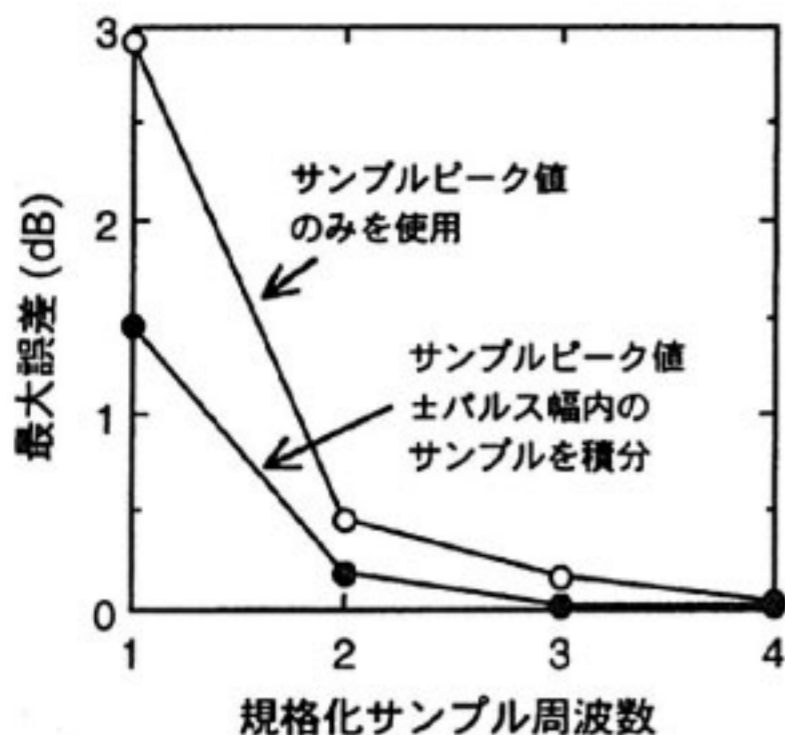
ている⁽⁵⁾。第1図は、入射角によって表面エコーのレンジプロファイル（250m間隔）がどのように変化するかを示したものである。半パルス制限FOVでは、表面エコーは、概ねCross-track方向のアンテナパターンに対応して変化しており、250m間隔のサンプルでも十分表面エコーの形やピーク値を推定できる。一方、入射角0度付近では、表面エコーは鋭いパルス状となっている。これはビーム制限FOVでは、FOV内の距離方向の広がりがほとんどなく（入射角0度では10m程度）、表面エコーはほぼ点散乱体からのエコーと等しくなるためである。サンプル間隔に対する要求条件が最も厳しくなるこの条件について、必要なサンプル間隔を検討した。

PRでは、受信機の帯域制限バンドパスフィルタ出力波形は概ねガウス型となっている。ガウス波形を仮定して、サンプル間隔をパルス幅（-6dB幅）と同じ、 $1/2$ 、 $1/3$ と狭くしていった場合（それぞれ2倍、3倍のオーバーサンプル）、受信レベルがサンプルタイミングによりどの程度ばらつくかをシミュレーションにより検討した。その結果を第2図に示す。この図では、単にサンプルしたピーク値を測定値として用いた場合並びにピーク値±パルス幅の間のサンプルを積分した場合の2とおりにしてPeak-to-peakのばらつきが示されている。この結果から、2倍のオーバーサンプルでのばらつきは、Rayleighフェージングによるばらつき約0.7dBと比較して小さく、実用上十分な精度が得られることがわかる。

斜め入射の場合、表面エコーはアンテナビームの広がりによりレンジ方向に広がってくる。表面エコーの波形は近似的に往復アンテナパターンとパルス波形のたたみ込み積分で表現されるが、アンテナパターンもパルス波

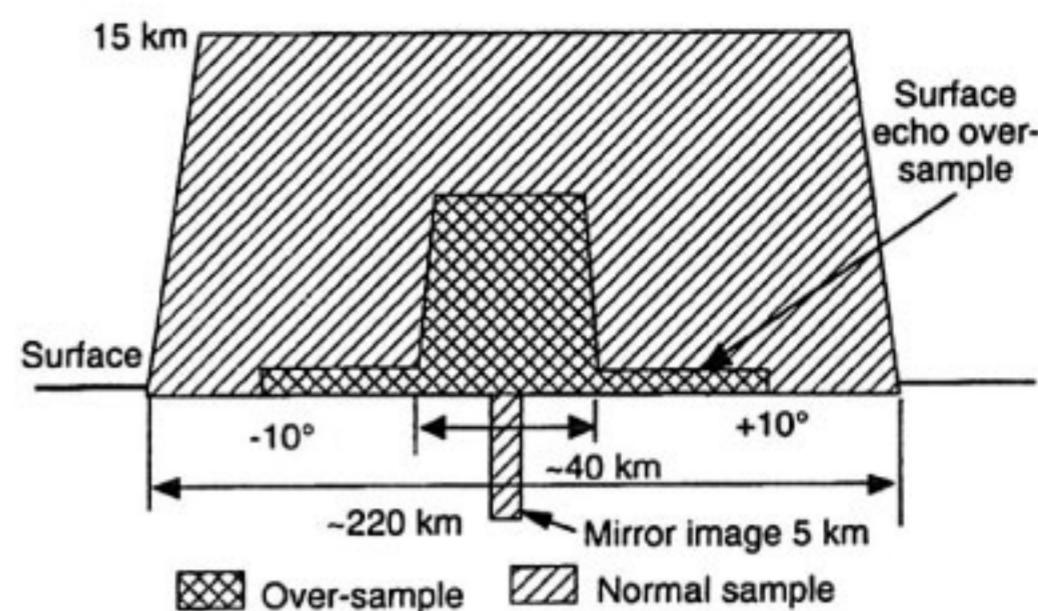


第1図 入射角による表面エコーのレンジプロファイル（250m間隔）の変化。細かい変動は、Rayleighフェージングを模擬するために加えたガウスノイズである。横軸は、PRからの距離であり、基準点直下方向の表面位置としている。（NASA/GSFC R. Meneghiniによる）



第2図 サンプルタイミングによる受信レベルのばらつき

形もガウス型で近似できるため、一般に表面エコーのレンジプロファイルはやはりガウス型となる。従って、表面エコープロファイルの幅がパルス幅の2倍程度に広がる入射角以上ではオーバーサンプルは不要となる。TRMM レーダの場合、その入射角は10度付近になる⁽³⁾。そのためオーバーサンプルデータの取得は、入射角10度以内、直下点を中心とした計29角度ビン（±9.94度以内）において行うこととなっている。この場合、表面エコーのピーク値を中心に±0.625 kmの範囲でオーバーサンプルデータを収集する。一方、降雨プロファイルのオーバーサンプルは、表面エコーより優先度が低いと判断し、データレートの割当て限度内で許容される範囲として、直下点を中心とした計11角度ビン（±3.55度以内）、高度は表面エコーピークから7.5 km以下とされた。このように決定されたレンジウィンドウの概念を第3図に示す⁽⁴⁾。注意して頂きたいのは、250 m 間隔のノーマルサンプルを行うレンジウィンドウは、衛星の高度変動があっても表面から高さ15 kmまでのデータが保証されるように、実際は広めに（約30 km）設定されて



第3図 PRレンジウィンドウの概念

いるのに対して、オーバーサンプルされるウィンドウは衛星高度変動（すなわち表面エコーの存在するレンジビン）に対してダイナミックに制御されていることである。

3. 表面エコー検出アルゴリズム

上に述べたオーバーサンプルデータ収集レンジウィンドウの制御のため、表面エコーを検出し、その位置（レンジビン番号）を出力するアルゴリズムを開発した。これと類似した目的のアルゴリズムは既にレーダ高度計用にいくつか開発されているが、本アルゴリズムの要求性能は、高度計アルゴリズムと比較して、距離決定要求精度は百倍以上粗い。一方、本アルゴリズムでは高度計に比べて数十倍以上大きな高度変動に対応し、降雨減衰により短時間表面エコーが検出不能となっても表面位置を見失うことなく、エコー回復後直ちに正しい表面エコー位置を出力できる性能が要求されている。このような、本アルゴリズムへの要求条件を第1表に示す。

表面エコー検出アルゴリズムは、PRのシステム制御・データ処理部のソフトウェアの機能のひとつとして組み込まれており、表面エコー強度がピークとなるレンジビ

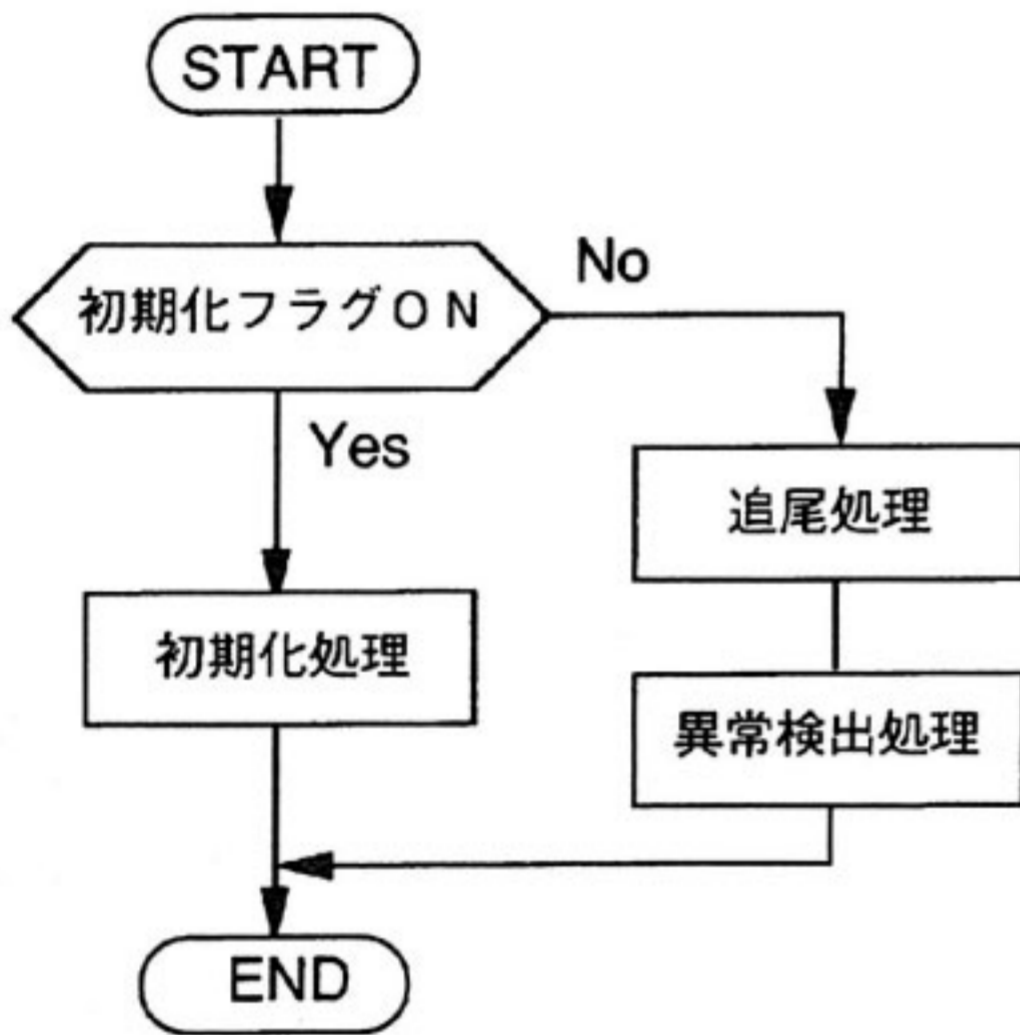
第1表 オンボード表面エコー検出アルゴリズムへの機能・性能要求

項目	機能・性能要求
動作アンテナ角度ビン	直下を中心とした29角度ビン（走査角：0 ±9.94度）
検出精度	±1レンジビン（±125 m）
動作表面状態	海上および陸上（比較的緩やかな丘陵地域、例えば中国地方南部山地など）
降雨下での動作	降雨減衰により表面エコーレベルが降雨エコーレベルより小さくなった場合、もしくは3スキャン程度ノイズレベル以下になった場合でも検出異常とならないこと
動作状態モニターおよびアルゴリズム初期化	表面検出アルゴリズムの動作状態を監視し、検出異常の状態になった場合には、初期化など適切な処置をとること

ン（以下表面エコー位置と呼ぶ）の追尾を行い、正確に表面エコー位置を検出するための「追尾アルゴリズム」、追尾が異常であるかどうかを判断する「異常検出アルゴリズム」、並びに追尾を開始させる場合や追尾が異常となった場合に正常な状態に追尾処理を復帰させる「初期化アルゴリズム」から構成される。第4図に表面エコー検出アルゴリズムの全体フローチャートを示す。

3.1 追尾アルゴリズム

無降雨時には一般に表面エコーレベルが最も強いので、



第4図 表面エコー検出アルゴリズムの全体フローチャート

全レンジビンのレベルを比較し、その中の最大値をとるレンジビン表面エコー位置とする単純なアルゴリズムがまず考えられる。しかしこれは、各アンテナ角度ビンで120~140個もあるレンジビンのデータを比較するのは処理時間が長すぎることで、降雨による減衰によって必ずしも最大値をとるレンジビンが表面位置に対応するとは限らないことにより、採用することは出来ない。表面

位置を安定に検出するため、各走査角における表面位置は1スキャン毎にそれほど大きく変化しない、すなわち比較的平坦な地形を前提として次のスキャンにおける位置を予測し、その周りでのみピークサーチを行う手法を採用した。この予測を行う表面位置「追尾」フィルタとしてはいくつか考えられる。そのトレードオフを第2表に示す。検討の結果、最もアルゴリズム構成が単純な α - β フィルタを採用した。

α - β フィルタは、次のスキャンにおける予測位置 X_{p+1} を、現在のスキャンにおける平滑位置 X_s および平滑化位置変化率 V_s から予測するフィルタであり、次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$X_{p+1} = X_s + V_s T \quad \dots\dots(1)$$

$$X_s = X_p + \alpha(X_m - X_p) \quad \dots\dots(2)$$

$$V_s = V_{s-1} + \beta(X_m - X_p) / T \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 X_m は観測位置、 T はデータサンプル間隔、 α 、 β は追尾定数であり、それぞれ位置および速度の平滑化ゲインに関するパラメータである。また、最初の平滑速度 V_1 は、追尾フィルタの初期化（後述）によって与えられる2スキャン分の表面位置データを H_1 、 H_2 として

$$V_1 = (H_1 - H_2) / T \quad \dots\dots(4)$$

となる。 α 、 β 値については、これまで一般的に最適と考えられる値が検討されており、定常誤差と過渡応答のいずれに対しても妥当な動作を示す意味で、

$$\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha) \quad \dots\dots(5)$$

がよいとされている⁽⁶⁾。PRでも、設計時点ではこの値を暫定値として採用したが、後述するシミュレーションにより、その仮定の妥当性を検討した。追尾アルゴリズムのフローチャートを第5図に示す。予測位置を中心と

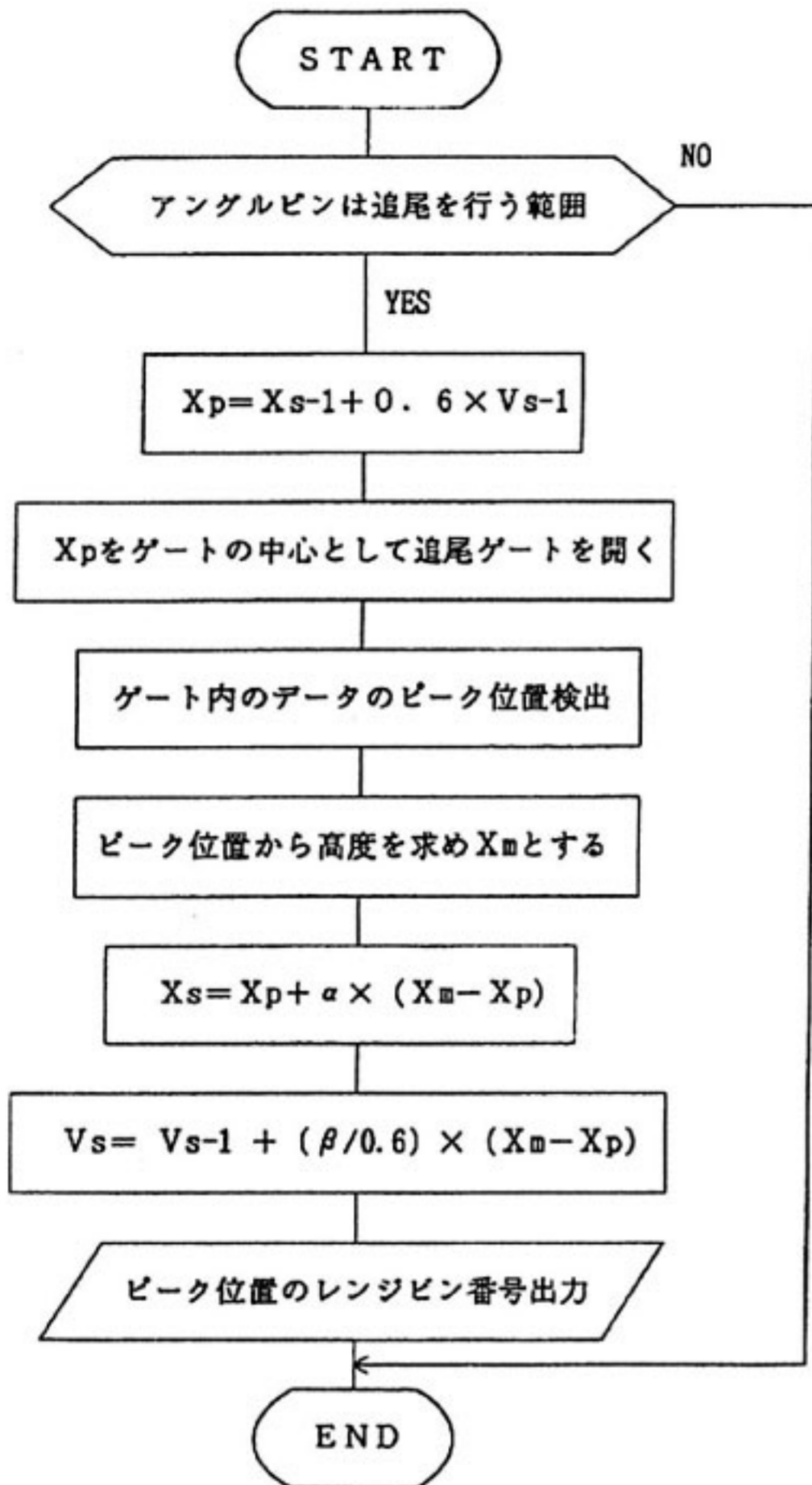
第2表 表面位置「追尾」フィルタのトレードオフ

方式	追尾の精度		処理時間	アルゴリズム	メモリサイズ
	起伏の少ない地形	起伏の激しい地形			
α - β	等速直線運動に向いているために精度は良好。	等速直線運動に向いているため精度は悪い。	小	単純	小
α - β - γ	加速度が一定の運動に向いているため精度は良好。	加速度が一定であるような変動に対しては精度はよい。	中	α - β よりは複雑	中
カルマン	推定誤差の分散を最小にするフィルタであるため精度は良好。		大	複雑	大

したゲート（レンジウィンドウ）を開き，その中でのエコーレベル最大値を持つレンジビン番号を観測位置として出力する。

3.2 異常検出アルゴリズム

異常検出アルゴリズムは，表面エコーの追尾が異常で



第5図 追尾アルゴリズムのフローチャート

ある場合に，それを検出するアルゴリズムである。しかし，追尾フィルタ自体は常にその予測が正しいとして動作しているため，追尾が異常かどうか判断するには，表面エコーや降雨エコーの統計的特性を考慮した別の観点での判断が必要となる。そのため，表面エコー位置検出アルゴリズムへの要求条件である「海上および陸上（比較的緩やかな丘陵地域）で正常に追尾する」ことを考慮し，急峻な山岳地域では必ずしも追尾を継続させることは必要ないという条件で，表面エコーの位置ならびにレベルのスキャン間の変化量から，追尾異常を検出する方式を採用した。

追尾が異常となる（表面を捕捉できなくなる）状況と

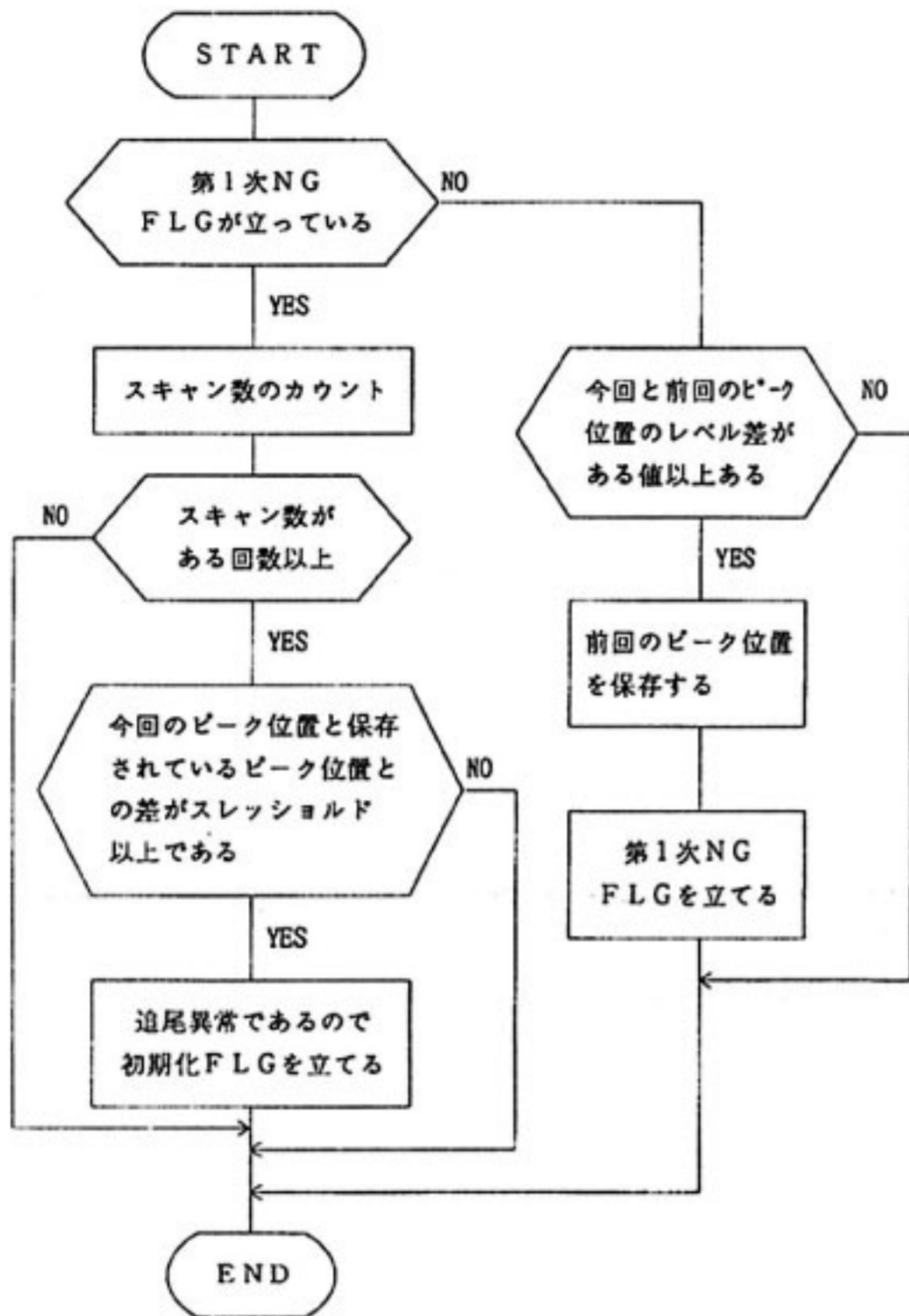
しては，以下のような場合が想定される。

- (1) 降雨減衰により表面エコーが弱くなる，あるいは検出できなくなった時，降雨エコーあるいはノイズレベルのピークを表面エコー位置として出力しつつ，次の位置を予測するうちに予測位置が実際の表面位置からずれて，追尾フィルタが表面を見失う（表面エコー位置が予測されるレンジウィンドウの範囲の外側となる）。
- (2) 表面位置が急激に変化する場合（急峻な山岳地帯），表面位置のスキャン毎の変化が急激過ぎて追尾フィルタの応答時定数では追随しきれなくなり，結果として追尾フィルタが表面を見失う。

これらの状況に陥ったことを認識するため，まず表面エコーレベルのスキャン間の変動量をモニターする。これは表面エコーが降雨減衰しているかあるいは表面エコーを追尾しきれなくなり，雑音か降雨エコーを表面エコーと誤判断しているかの1次的“警告”フラグとなる。もし，単に降雨減衰しているだけであれば，レベルは下がっても表面位置の変動は（急峻な山岳地帯以外では）それほど大きくないはずであるから，そのまま追尾を継続する。一方，上記のような原因で追尾フィルタが表面を見失った場合は，表面エコー位置は降雨エコーのピークや雑音レベルのピークに追随し，表面を捕捉していた時の位置からの“位置ずれ”は異常に大きくなるはずである。そのような場合，追尾フィルタはミスロックあるいはロックオフした（追尾異常）とみなし，初期化フラグを出力する。なお，降雨減衰により表面エコーが雑音レベル以下となるような強雨の範囲は大きくても数km程度と想定され，このような場合に追尾フィルタが表面を見失うことはないと考えている。異常検出アルゴリズムのフローチャートを第6図に示す。ここで，異常検出性能を規定するため設定すべきパラメータは，警告フラグを出力する“レベル差”，異常と判断するまでの待ち“スキャン数”，待ちスキャン経過後に異常かどうか判断するピーク位置“シフト数”の3つである。

3.3 初期化アルゴリズム

α - β 追尾フィルタの初期化は，位置のみならず速度の初期値を得るために2スキャン分のデータが必要である。初期化アルゴリズムのフローチャートを第7図に示す。直下点での表面エコーの検出は，通常の追尾の場合と異なり，全レンジビンデータを参照して，その最大値を表面エコー位置とする。それ以外のアングルビンでは，直下での表面エコー位置から開始して，隣接するアングルビンの表面位置は，その前のアングルビンでの表面位置と概ね同じと仮定し，その回りにサーチウィンドウ（70レンジビン幅）を開き，その中でのエコーレベル最大値を表面位置とする。それを2回繰り返す。もし山岳



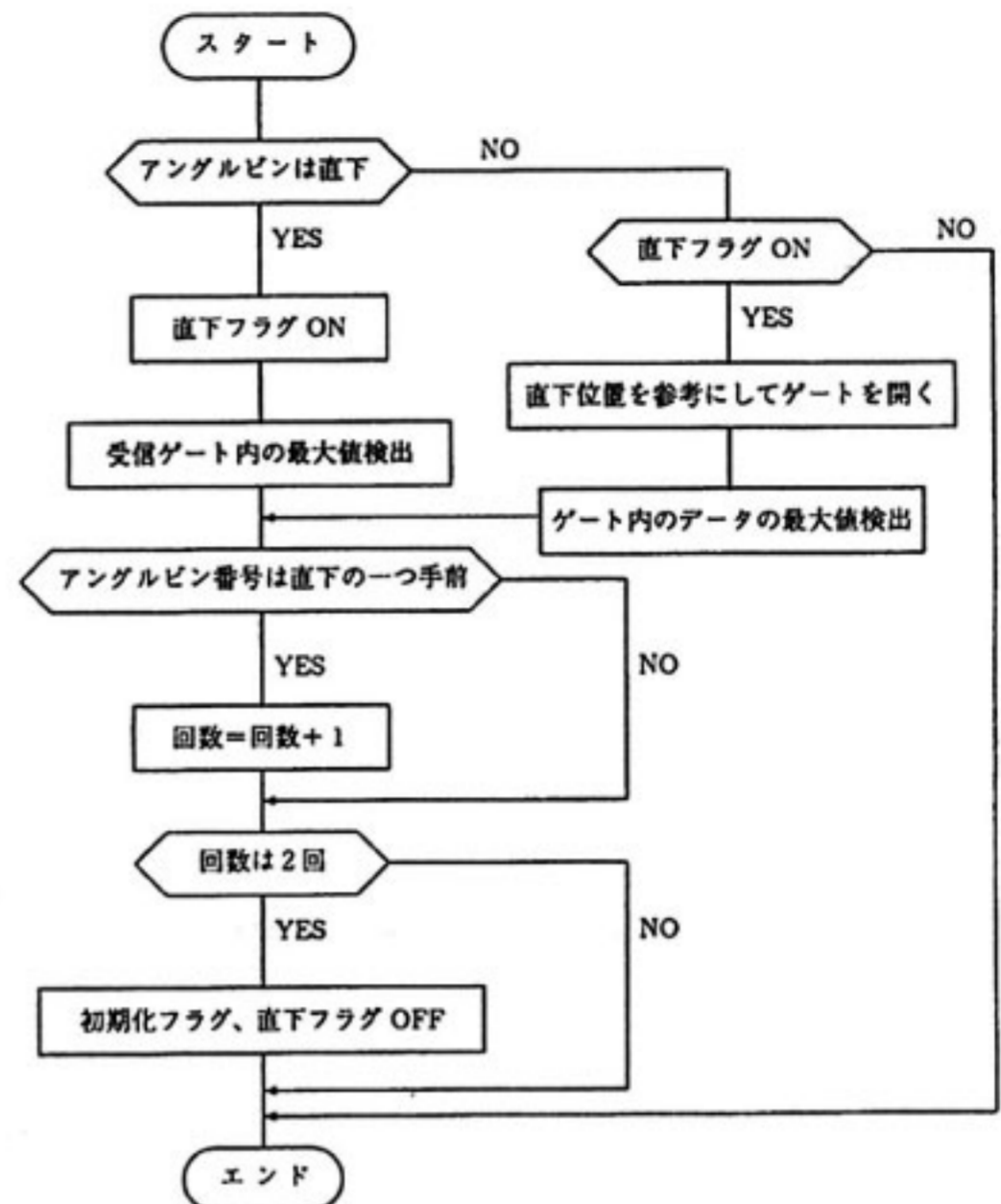
第6図 異常検出アルゴリズムのフローチャート

部で初期化が行われた場合、すぐ追尾異常となり、何回も初期化を繰り返す可能性があるが、比較的平坦な陸上と海上で表面エコーレベルを精密に求めるという目的に影響は与えない。

以上述べたアルゴリズムにおいて、追尾パラメータおよび異常検出パラメータはコマンドで可変となっている。可変パラメータと可変範囲および設計およびデータ処理部シミュレータによる基本的性能確認(4.2参照)の結果暫定的に定められた標準値を第3表に示す。

第3表 コマンドによる可変パラメータと可変範囲、並びに設計およびデータ処理部シミュレータによる基本的性能確認の結果暫定的に定められた標準値

	パラメータ	可変値	暫定標準値
追尾 パラメータ	α	0~1	0.4
	β	0~1	0.1
	ゲート幅(レンジピン)	0~255	10
異常検出 パラメータ	シフト数(レンジピン)	0~255	12
	レベル差(カウント)	0~255	29
	スキャン数(スキャン)	0~255	3



第7図 初期化アルゴリズムのフローチャート

4. 表面エコー検出アルゴリズムの性能評価と最適パラメータの決定

4.1 α - β フィルタの周波数レスポンス

シミュレーションにより追尾パラメータと追尾精度の関係を検討する前に、追尾フィルタの応答について概略の特性を解析してみる。

α - β フィルタの複素周波数特性は次式で表わせる⁽⁶⁾。

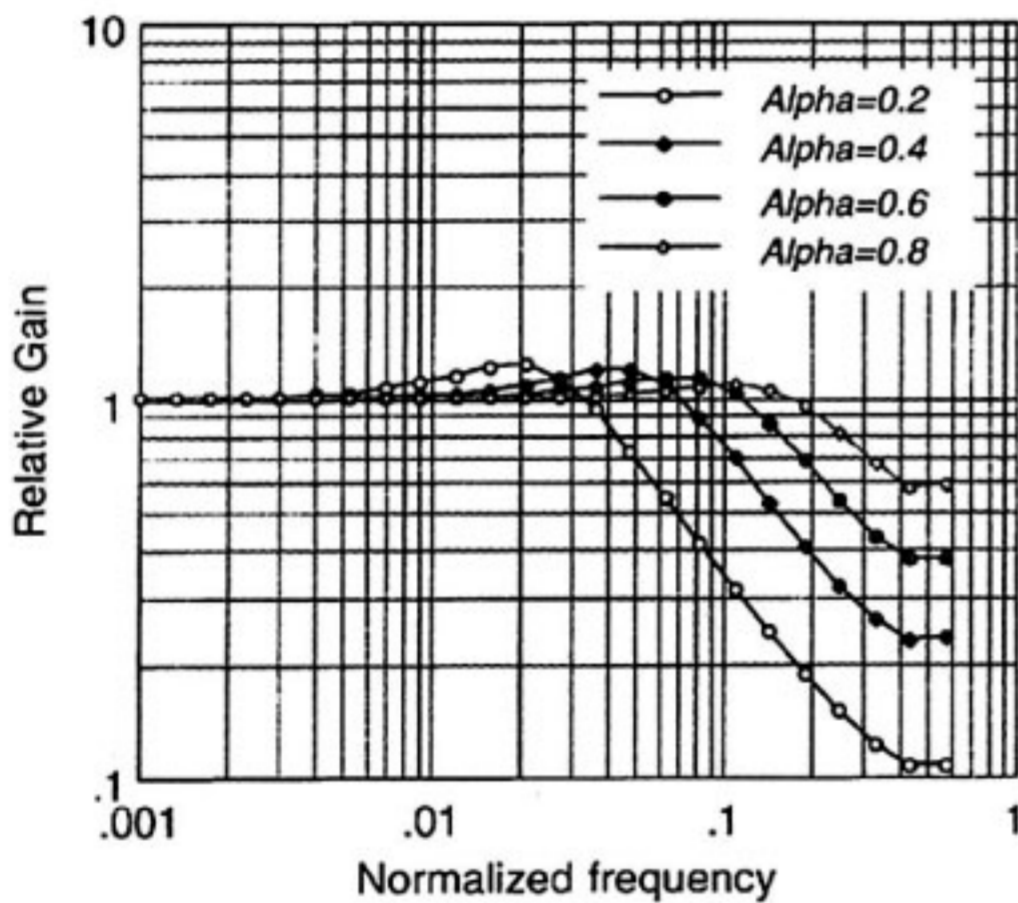
$$G_x(Z) = \frac{Z\{\alpha Z + (\beta - \alpha)\}}{Z^2 - (2 - \alpha - \beta)Z + (1 - \alpha)} \quad \dots\dots(6)$$

$$G_v(Z) = \frac{\beta Z(Z - 1)}{Z^2 - (2 - \alpha - \beta)Z + (1 - \alpha)} \quad \dots\dots(7)$$

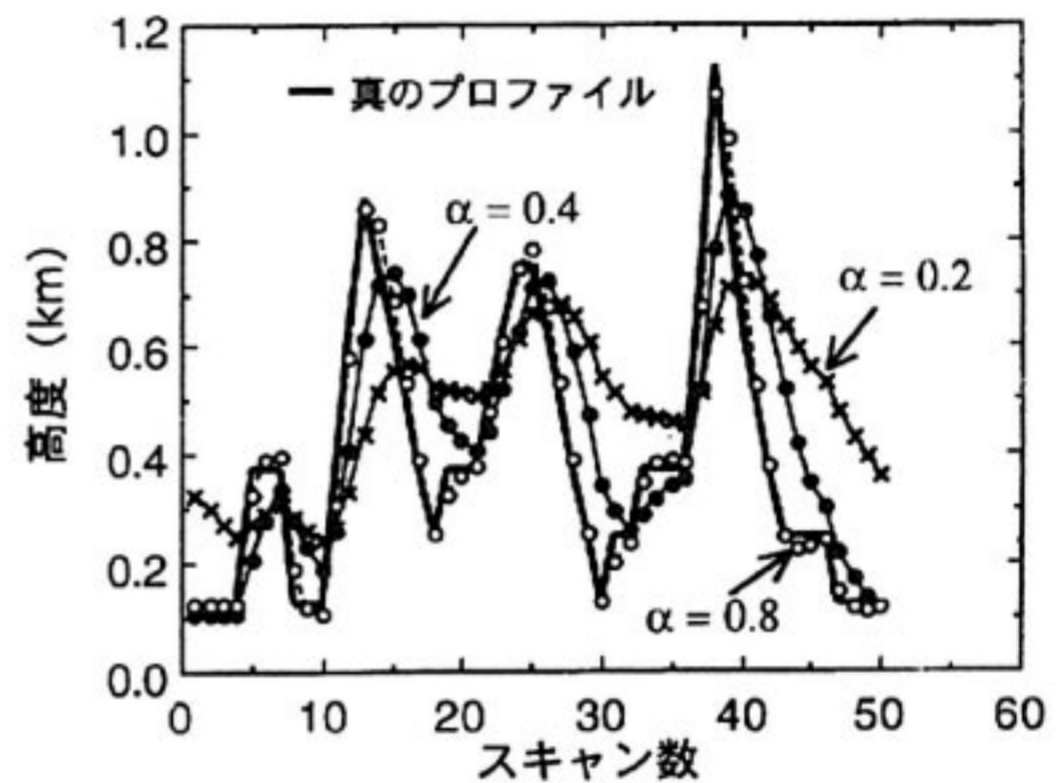
ここで、 Z は $\exp(j2\pi fT)$ であり、データサンプル周

波数 $1/T$ で規格化した周波数を F とすると, $\exp(j2\pi F)$ となる. 平滑位置に対する利得 $G_r(Z)$ を, F の関数として第8図に示す. ここで β は(5)式の値を用いている. 例えば $\alpha = 0.4$ の場合, 概ね $F = 0.1$ ($1/T$ の $1/10$ の周波数成分) まで十分応答することがわかる. 次に, 実際の表面位置空間変動スペクトルを用いて追尾性能を検討する. 第9図は, 中国地方の北部を東西に通る直線パス (第11図のパス6, 後述) のうち, 最も空間変動が激しいと判断される東部の50個 (サンプル間隔 4.3 km であり, 50スキャンに対応) のデータの空間周波数スペクトルである. この場合, スペクトル強度は概ね周波数とともに単調減少し, $F = 0.3$ で -10 dB 程度となる. この程度の周波数まで応答するフィルタを用いれば, 高度変化に追随できると想定できる. 第8図から, $\alpha = 0.8$ では, $F = 0.3$ で利得が約 0.7 となるので, $\alpha =$

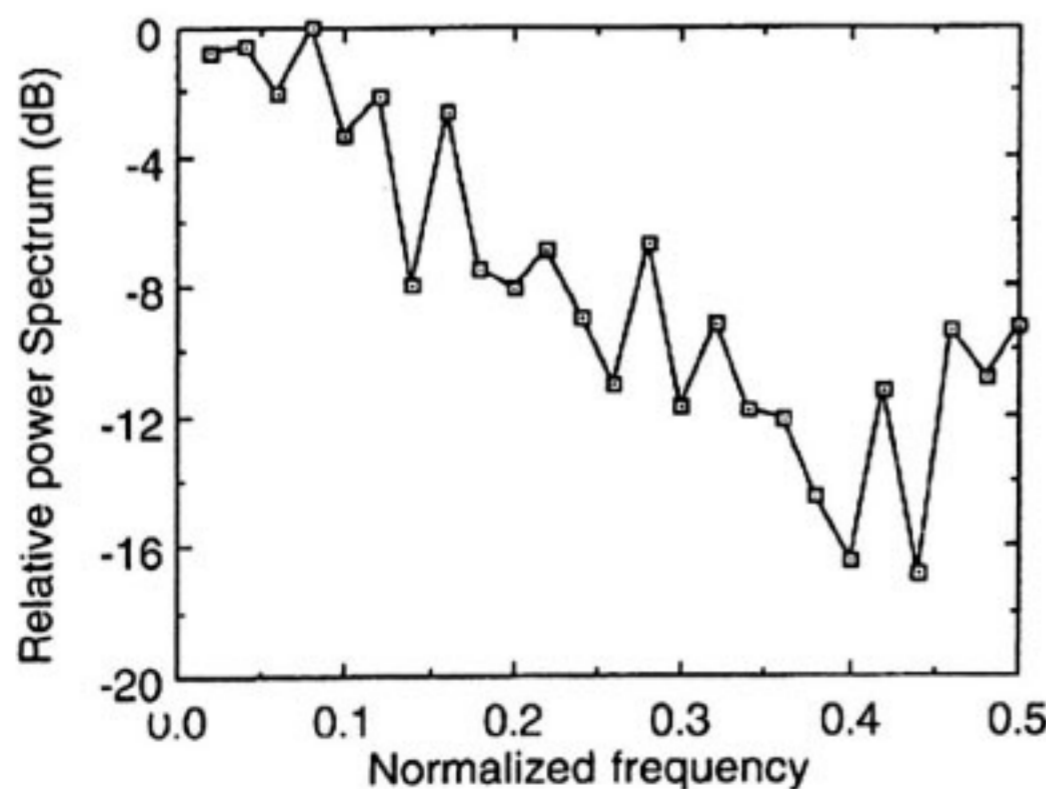
0.8 を採用すれば十分な追随が可能と予想される. それを確認するため, 第9図に示したスペクトルに平滑位置の伝達関数 (第8図) を掛けた後, フーリエ逆変換を行い (実際は第8, 9図に示した振幅だけではなく, 位相を考慮して演算を行う), フィルタ出力の高度プロファイルを求めた. その結果を第10図に示す. 予想通り $\alpha = 0.8$ では十分追随しているのに対して, $\alpha = 0.2 \sim 0.4$ では応答が遅れていることがわかる. 従って, このような急峻な地形変化に十分応答するには, α は少なくとも 0.6 程度以上は必要と考えられる. しかし, このような場合は表面エコーレベル自体の変動が大きく, 表面参照法による降雨減衰の推定は困難であるため, 表面参照法への利用を目的とした場合, α の値は 0.4~0.6 程度で十分と考えられる. その確認は, 後述するシミュレーションで行う.



第8図 平滑位置に対する利得 $G_r(Z)$ の規格化周波数 (F) 依存性



第10図 フィルタの周波数伝達関数および標高変化の空間周波数スペクトルから求めた α - β 追尾フィルタ出力の高度プロファイル



第9図 中国地方の北東部の東西方向パスにおける標高変化の空間周波数スペクトル

4.2 シミュレーションによる追尾性能の評価

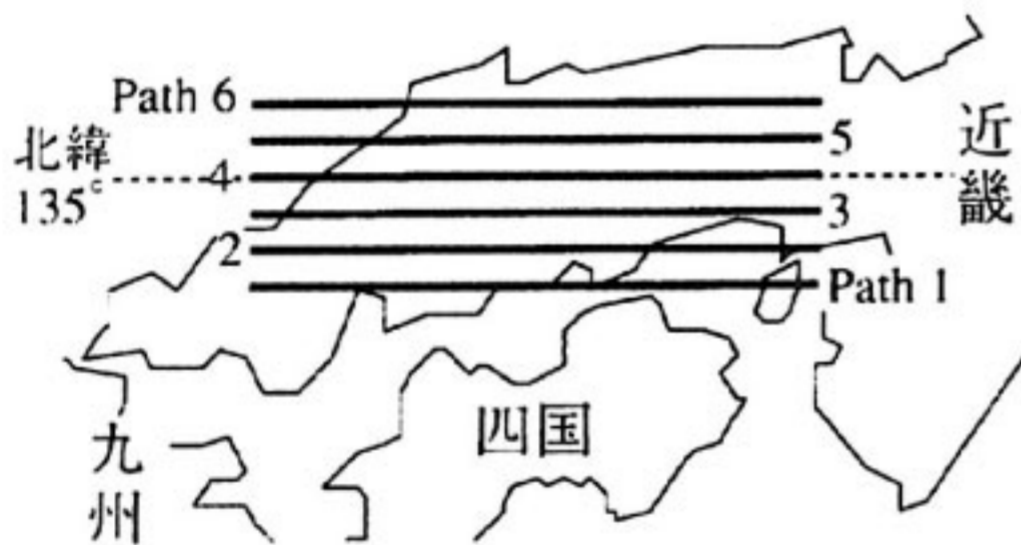
PR フライトモデルでは, 上記のアルゴリズムは, 他のデータ収集/運用制御ソフトウェアとともにプログラミングされ, PR システム制御データ処理部の 8 ビット CPU のプログラム ROM にロードされる. PR における動作をできるだけ正確に模擬するため, 本アルゴリズムの試験には, 当初 PR に使用する CPU と同一性能の“データ処理部”シミュレータを開発し, 一連の性能確認を行った. 本論文で記述するシミュレーションは, 前記の基本的性能確認終了後, 表面エコー検出アルゴリズムの性能を種々のパラメータについて試験し, 最適パラメータを検討するために実施したものである. この場合, シミュレーションの効率を上げるため, 基本的性能評価で用いた 8 ビット CPU の計算機ではなく, ワークステーション上で C 言語でプログラミングしたものを用いた.

その動作試験は、基本的な、ステップ応答、ランプ応答などを“データ処理部”シミュレータによる結果と比較することにより行った。

本アルゴリズムの性能としては、晴天時に丘陵/山岳地帯の表面位置変動にどこまで追従できるか、また降雨時に降雨減衰により表面エコーが減衰あるいは消失した場合ミスロックしないか、という2点が最も重要である。そのため、今回はこれらの性能を評価するためのシミュレーションを実施した。

(1) 丘陵/山岳地帯の追尾特性

追尾特性を評価するための地形として、今回は中国地方を東西に横切る6種類のパスを用いた(第11図参照)。これは中国地方の地形が、南部のパスは平野と比較的緩やかな丘陵および山地から成り、北に移るに従って山地が急峻になってゆくという一般的な地形のトレンドがあり、平野部から山岳地域にかけての追尾性能の違いを調べるのに適当なことから、また中国地方の中心部(パス4)は北緯35度にあたり、PRが実際に北緯35度を西から東に通過した場合の追尾特性との比較が可能となるためである。



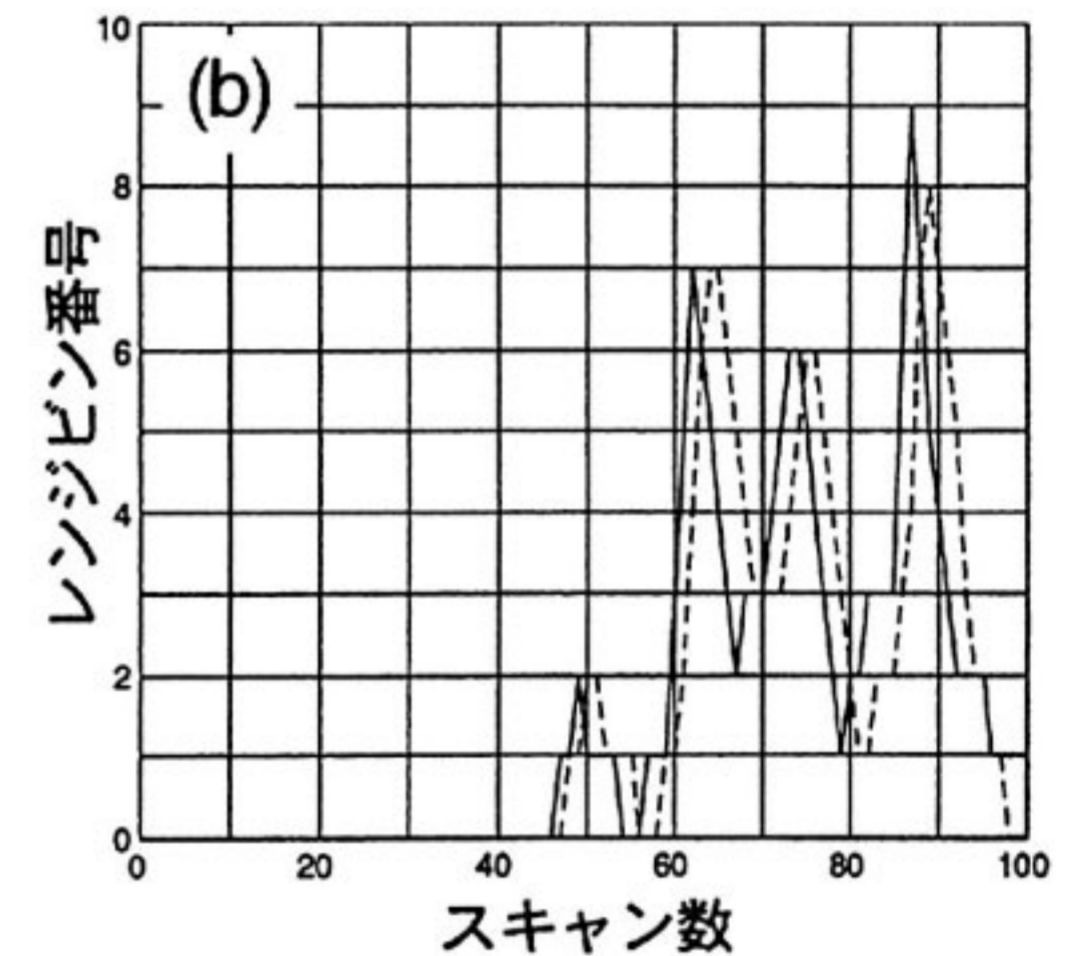
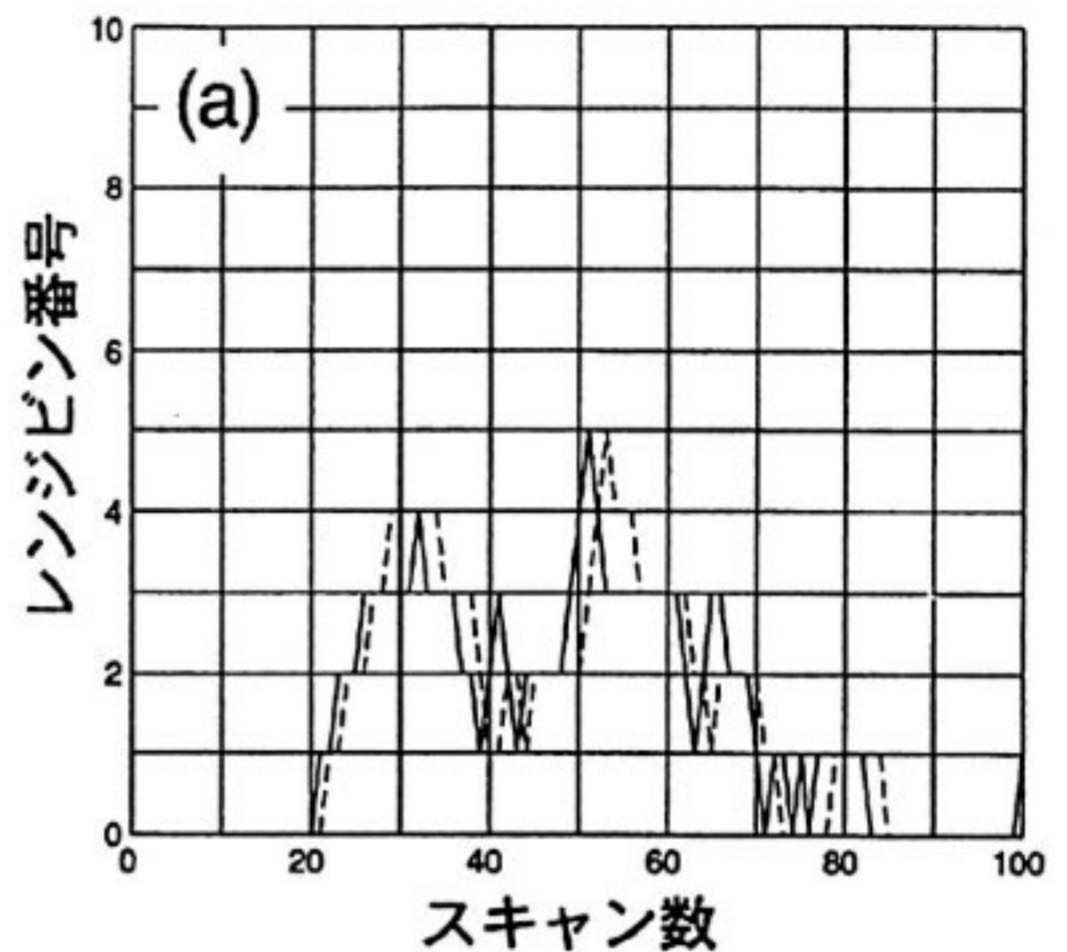
第11図 シミュレーションに用いた中国地方を東西に横切る6種類のパス

追尾性能を総合的に評価するため、 \tilde{R}_i および R_i を i 番目のスキャンにおける予測位置および真値として、以下の式で定義される平均誤差 ϵ 並びにランダム誤差 σ (標準偏差) を使用する。

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{R}_i - R_i) \quad \dots\dots(8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{R}_i - R_i)^2}{N}} \quad \dots\dots(9)$$

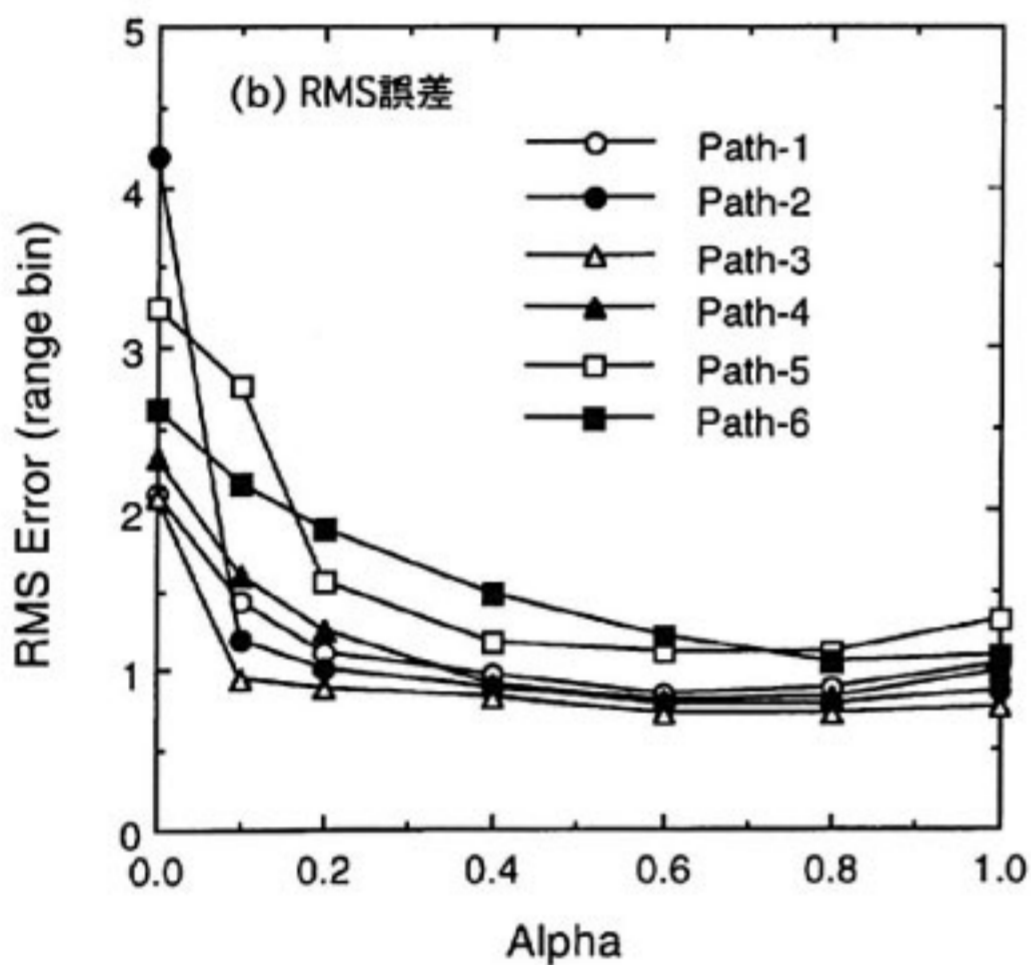
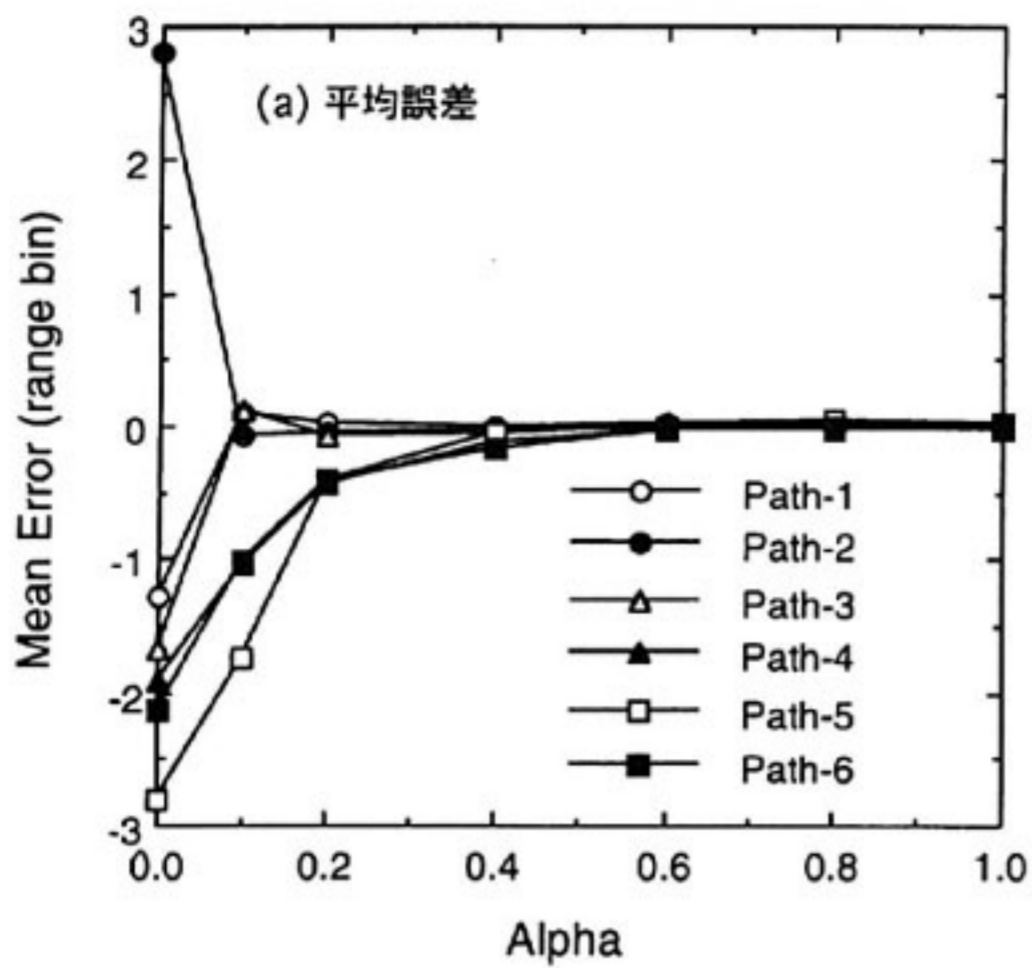
6つのパスのうち、比較的高度変化が緩やかなパス3と急峻なパス6における実際の(レンジピン間隔125mで量子化されたもの)および追尾結果(予測位置)の比較を、東西方向の高度断面として第12図に示す。追尾パラメータ α , β はそれぞれ第3表に示す標準値である。



第12図 パス3(a)とパス6(b)における実際の地表位置(実線;レンジピン間隔125mで量子化されたもの)および追尾結果(破線;予測位置)の比較

解析から予測されるように、パス6の東部では、追尾誤差が最大3レンジピンと高度変化に十分追従できていないことがわかる。

次に、 α を変化させ、 β を(5)式で与えられる値として平均誤差およびランダム誤差を調べた結果を第13図に示す。この図から、平均誤差をなくすには α は0.2以上が必要であり、またパス1~5では $\alpha = 0.4 \sim 0.8$ でランダム誤差が最小となるのに対し、パス6では $\alpha = 0.8$ 程度で最小となることがわかる。また、 α を固定して β を変えた場合のランダム誤差のパスによる変化を第14図に示す。この図から、 β の値は地形変動が緩やかなパス1~3ではあまり追尾特性に影響しない($\beta = 0$ でも顕著な追尾特性劣化はない)が、地形変動が大きくなる

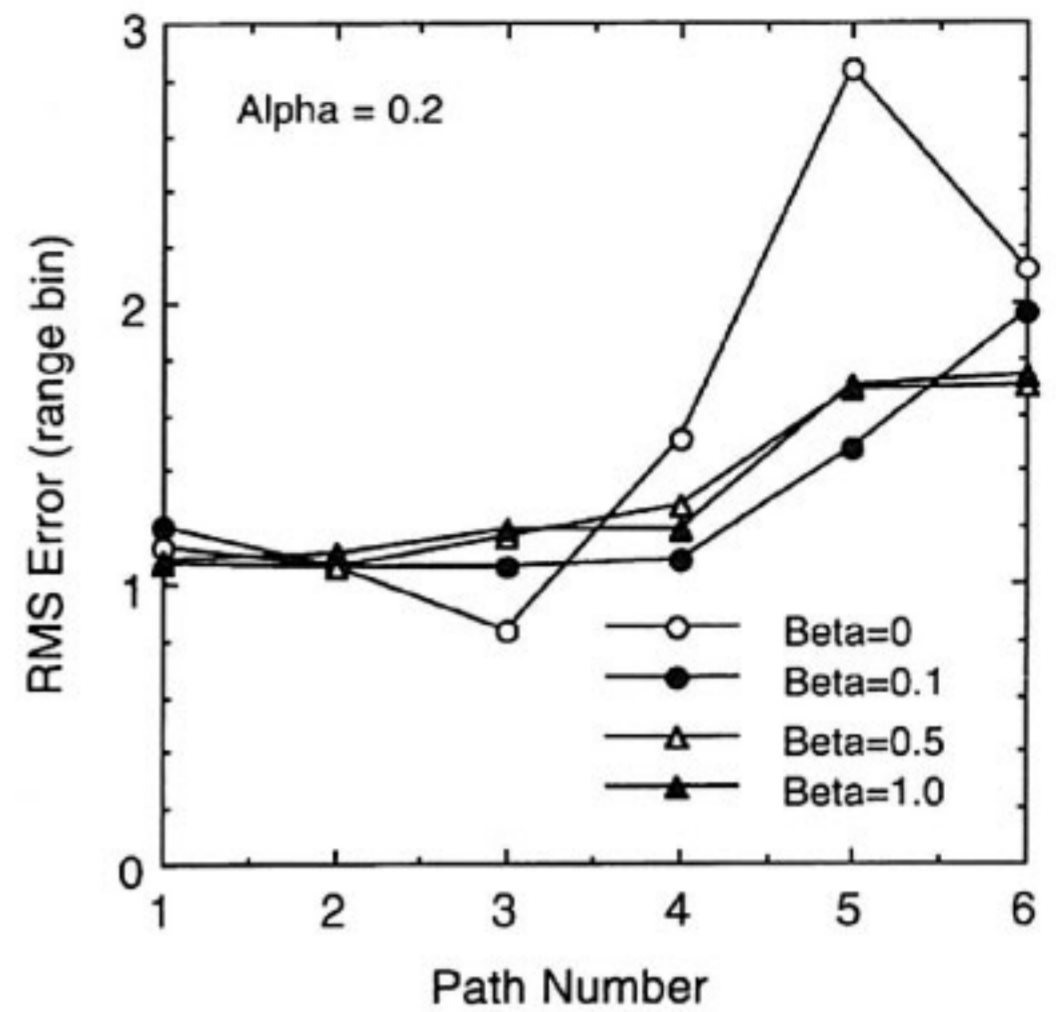


第13図 表面予測値の平均誤差および RMS 誤差の α 依存性 (β は(5)式で与えられる値)

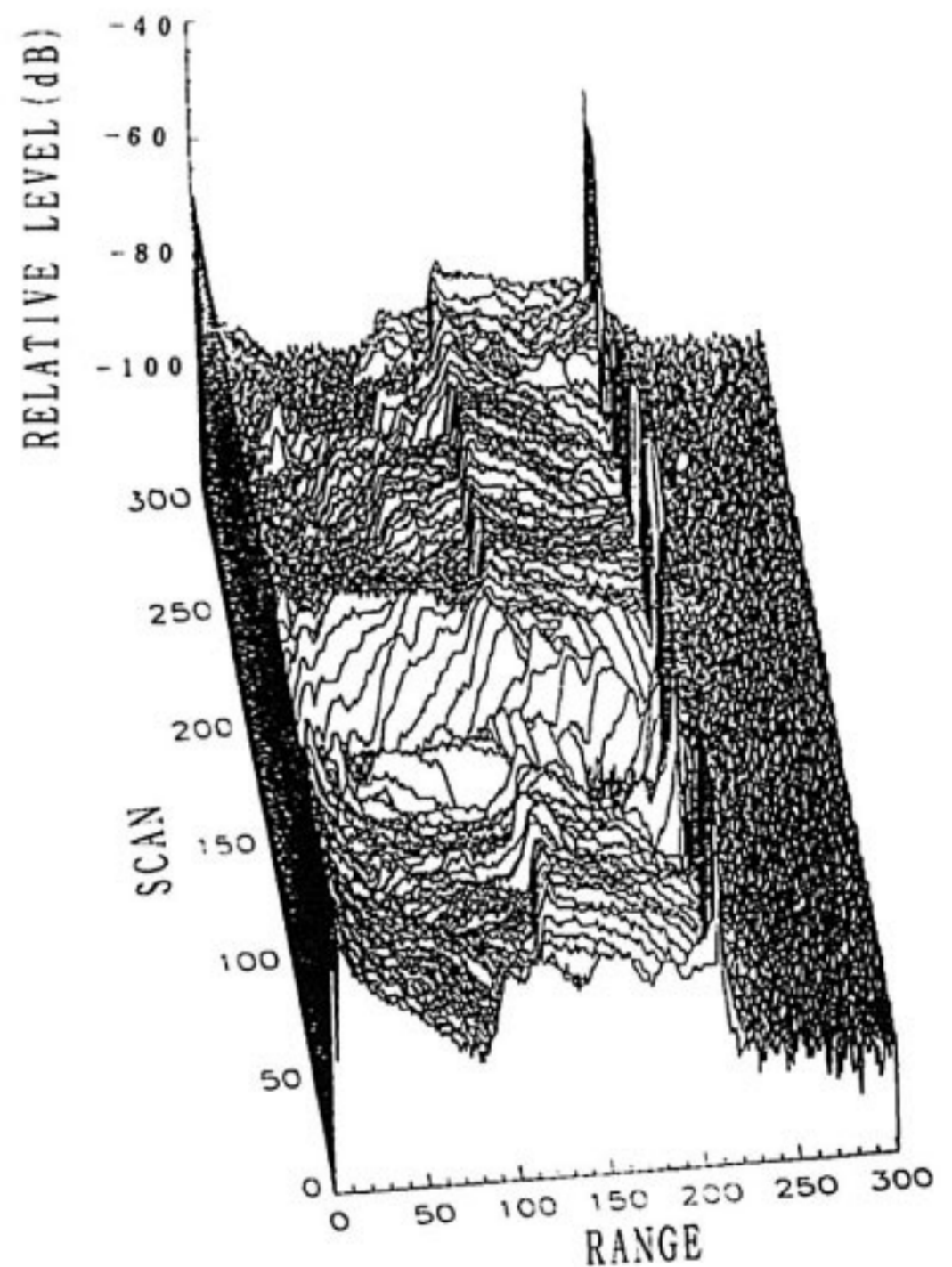
パス4~6では $\beta = 0$ とすると追尾特性が大きく劣化することがわかる。この場合でも、0以外では β の値によって追尾特性に大きな違いはみられない。従って、一般に(5)式で与えられる β 値を採用することで問題ないと考えられる。

(2) 降雨時の追尾特性

上記のシミュレーションでは、表面エコー以外にエコーは存在しないと仮定していたが、降雨時にはレンジプロファイル上で表面エコーより手前に複雑な降雨エコーが存在する。また強雨時には、降雨減衰により表面エコーが弱くなり、表面エコーより降雨エコーが強くなったり、表面エコーがノイズレベル以下となるケースも想定される。そのような場合の追尾特性を調べるため、第15図に示す航空機搭載降雨レーダデータをシミュレーションに



第14図 α を固定して β を変えた場合の RMS 誤差のパスによる変化



第15図 シミュレーションに用いた航空機搭載降雨レーダデータ。“SCAN” および “RANGE” はそれぞれ、航空機進行方向およびレーダ視線(直下)方向の距離に対応し、100スキャンは約8 km、100レンジは6 kmに対応する。

使用した。このデータは、1990年9月に沖縄東方の太平洋上の台風観測時に NASA の DC-8 に搭載された通信総合研究所の2周波降雨レーダのうち 34.5 GHz レーダ

で取得されたものである⁽⁷⁾。この周波数では、降雨減衰はPRの使用する13.8 GHzに比べて5~7倍程度大きい。例えば、降雨の高さを5 km、降雨減衰を受けない表面エコーのS/Nを40 dBとすると、35 GHzでは17 mm/h程度の降雨で表面エコーが雑音レベル以下となるが13.8 GHzでは80 mm/h程度までS/Nは0 dB以上が保持される。従って、本シミュレーションでは、13.8 GHzレーダの試験という意味では、頻度の少ない降雨強度数十 mm/h以上の強い降雨における特性を調べていることになる。第15図で、レンジビン番号220程度にある強いピークが表面エコー、その上空（レンジビン番号では小さい方）にあるエコーが降雨エコーである。降雨エコーのなかで、レンジビン140程度にみられる弱いピークが“ブライトバンド”と呼ばれる降水の“融解層”すなわち降水粒子が雪あるいは氷から水に遷移する層である。表面追尾が外れると、このブライトバンドへ追尾フィルタがミスロックする可能性がまず考えられる。

この降雨プロファイルを用いて、表面エコー位置検出のシミュレーションを行った。その1例を第16図に示す。このシミュレーションでは、 $\alpha = 0.4$ 、 β は(5)式による値としている。太い実線でマークした期間は、降雨減衰により表面エコーがノイズレベル以下になっている期間であり、その間は、レーダエコーのレンジプロファイルで最大のレベルを持つレンジが表面から降雨域（ブライトバンド）に移行するとともに、表面位置の予測値がノイズにより変動していることがわかる。しかし、大きなドリフトは起こさず、表面エコーが復帰するとともに正常な表面エコー追尾を再開している。 α の値を変えて、同様のシミュレーションを行った結果、 $\alpha = 0.6$ で短時間ロックオフが発生し、 α が0.8以上では、表面エコーがノイズレベル以下になった場合、表面位置予測値がブ

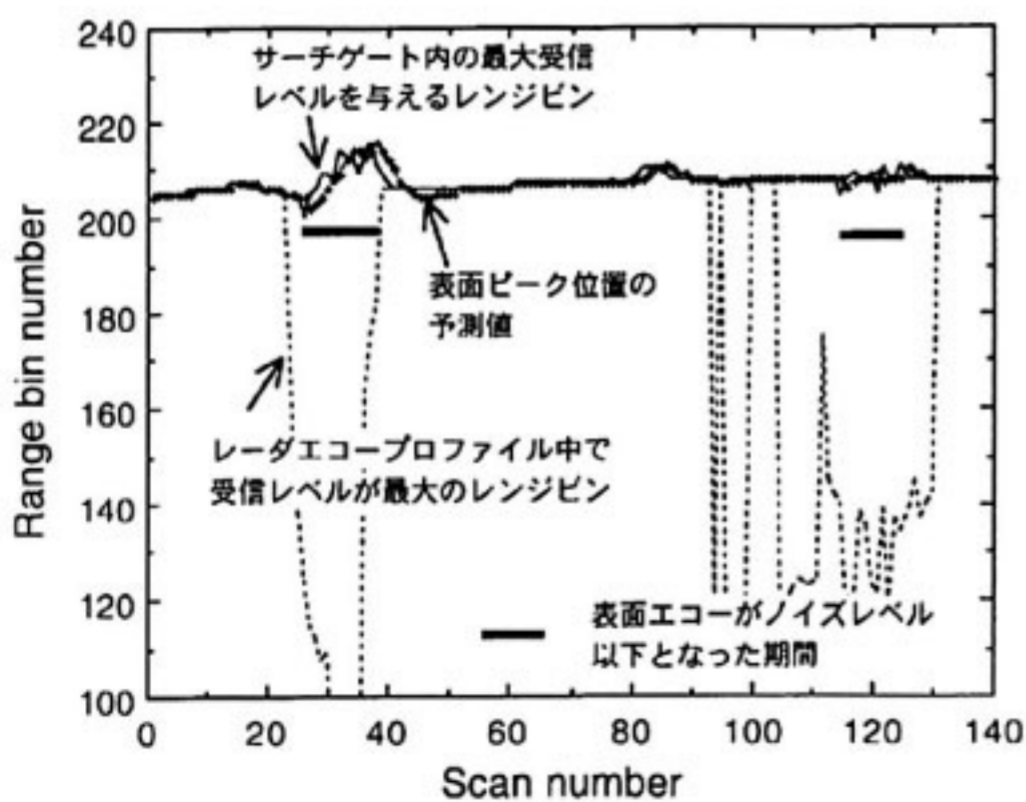
ライトバンドにミスロックしたまま長時間経過する現象が現われた（図には示されていない）。これは、 α （および β ）が大きくなるにつれて、平滑位置および平滑速度のノイズによるばらつきが増加して、表面から降雨域へ移行してしまう確率が増加するためと考えられる。この結果から、 $\alpha = 0.6$ 程度を超えると、降雨域でのミスロックが発生し易くなることを示唆している。

(3) 追尾異常検出パラメータの検討

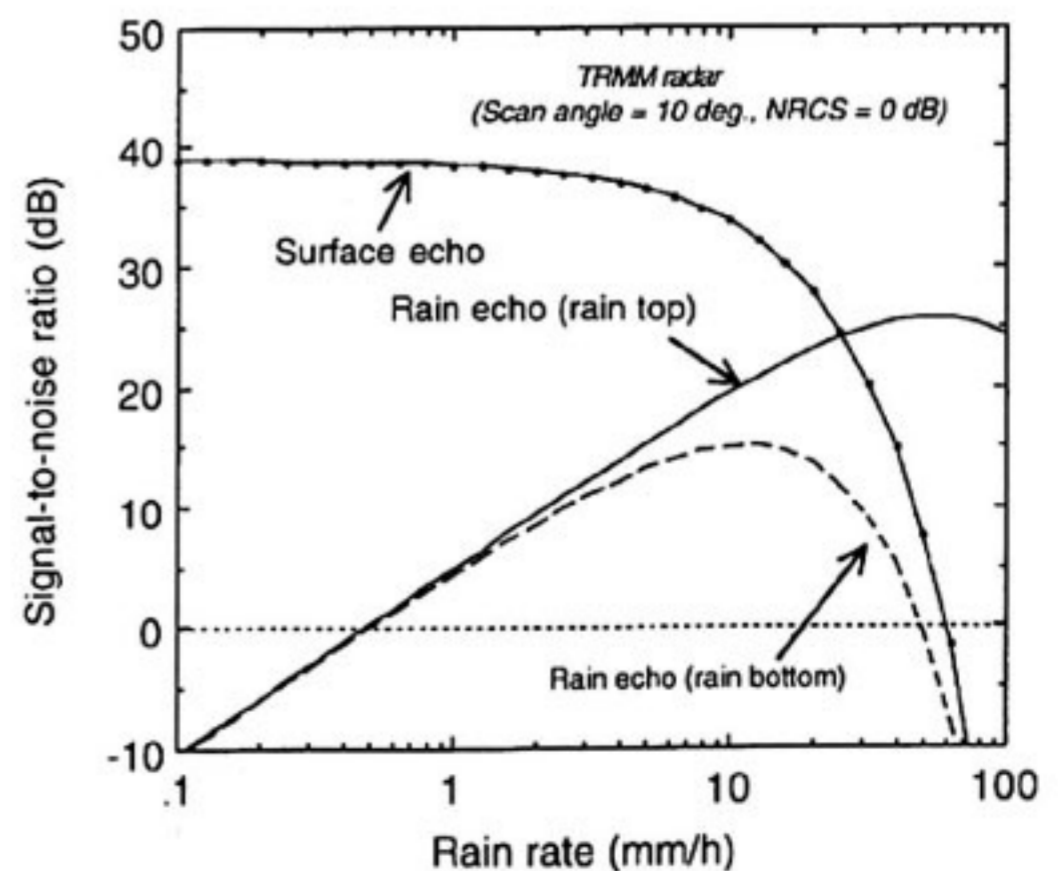
異常検出アルゴリズムにおいて、1次警告フラグを出力する“レベル差”は暫定標準値として29カウント（約10 dB）を採用している。これは追尾ループが表面エコーから外れ、降雨エコーへミスロックした、あるいは雑音レベルへロックオフした可能性を示唆するレベル差に対応したものである。

PRにおける入射角10度（表面エコー検出アルゴリズムが動作する最大の入射角）における表面エコーレベルと降雨エコーレベルを降雨強度の関数として第17図に示す。表面の規格化レーダ断面積（ σ^0 ）は、海面の場合7 dB程度と考えられるが、陸上ではもう少し小さくなることを考慮して0 dBを仮定している。表面エコーの信号対雑音電力比（S/N）は40 dB程度であり、一方降雨エコーのS/Nは26 dB程度である。すなわち、降雨減衰がないとして、表面エコーと降雨エコーのレベル差は10 dB強となる。従って、10 dB以上表面エコーレベルが下がった時、ミスロックの可能性あり？という警告を出すのは妥当と考えられる。あまり、この値が小さいと単なる表面 σ^0 の多少の変動で警告フラグが出され、異常判定/初期化が頻繁に行われる恐れがある。一方、あまりこの値が大きいとミスロックのまま、追尾を継続してしまう場合が増加する恐れがある。

次に、警告フラグが出された後、待ちスキャン数の間



第16図 降雨時における表面エコー位置検出シミュレーション結果の例。横軸と縦軸は、それぞれ第15図のSCANとRANGEに対応する。



第17図 降雨強度の関数として示した入射角10度時の表面エコーレベルと降雨エコーレベル

は異常かどうかの判断を行わず追尾を継続しているが、その主旨は、降雨減衰で表面エコーが消滅して若干の表面エコー位置の変動が生じていても異常判定とせず、表面エコーが回復し、再度追尾を開始するのを待つこと、1 スキャンの間でのエコー位置変化ではミスロックやロックオフの判断が困難であるからである。前者に関しては、PRの表面エコーがノイズレベル以下となるような強雨のセルサイズは通常数 km 以下と考えられるから、精々表面エコーの消滅期間は2～3 スキャンと考えられ、“スキャン数”もその程度にとるのが適当と考えられる。後者に関しては、“スキャン数”を大きくした場合、それに対応して異常と判定する“シフト数”を大きくすれば概ね同様の異常検出性能が得られると考えられるが、あまり“スキャン数”を大きくすると、もしミスロックやロックオフを生じていた場合、異常な追尾状態が長期間続くことになり、好ましくない。

以上の考察のもとに“スキャン数”を3に固定し、シフト数を5～15と変化させて上記の航空機データによるシミュレーションを行った結果、“シフト数”が10程度以下では表面エコー消滅あるいはそれから復帰する期間で異常判定/初期化に移行し、初期化の時点で一旦ブライต์バンドにロックして追尾を再開する現象が生じた。従って、“シフト数”は暫定標準値である12あるいはもう少し大きな15程度の値が適当と判断された。

5. 打ち上げ後の性能確認とパラメータ調整

上に述べた追尾および異常検出パラメータの検討結果から、概ね第3表に示す暫定標準値で問題ないという結論を得た。従って、TRMM 衛星打上げ直後は初期値としてそれらの値が設定されることになる。しかし定常運用開始前の初期機能確認試験時には、本アルゴリズムによる表面エコー検出機能の確認およびパラメータの最終検討が必要である。確認方法としては、次の2つの項目を考えている。

(1) 追尾精度の統計処理および異常判定/初期化の履歴解析

オーバーサンプルデータを取り出したレンジウィンドウの中心位置と実際のエコーピーク位置との差から、(8)、(9)式で定義される平均誤差、ランダム誤差が計算される。その統計処理を行い、追尾精度を評価する。また、地上のレベル1処理の段階で別の手法で計算される表面エコー位置ならびに衛星軌道情報と表面のトポグラフィックデータから計算される表面位置との差についても参考情報として同様に統計処理を行う。更に、異常判定/初期化が行われた場所、降雨の有無などを含めて履歴を記録し、妥当性を評価する。

(2) 衛星が中国地方を通過した場合の追尾データについては、追尾結果を今回のシミュレーションと比較し、追尾機能性能の詳細評価を行う。

上記の確認で、何らかの問題点あるいは再確認すべき点が見い出された場合、更に詳細な動作確認を実施する。場合によっては、シミュレーションで行ったような追尾ならびに異常検出パラメータを何とおりかに変化させ、それに対応した動作性能の変化を解析することにより、諸パラメータの値を見直すことも必要であろう。

考えられる問題点とそれに対する対応方針を以下に示す。

- 中国地方のように起伏が比較的緩やかな地形を追尾していて、ロックオフが生じる場合には、 α を大きくするか、ゲート幅を若干大きくする。但し、降雨時には降雨エコーへのミスロックの可能性が増加する。

- 降雨時に、降雨エコーへのミスロックが生じやすい場合は、 α を若干小さくして追尾フィルタの時定数を大きくする。強雨時に表面エコーが消滅している間に異常判定/初期化が発生しやすい場合は、“スキャン数”を若干大きくし、表面エコー回復まで追尾ループをホールドさせると共に、“シフト数”を若干増加させ、異常判定のスレッシュホールドを高くする。

このようなチューニングを行うことにより、更に安定な追尾特性が実現できると考えられる。

6. おわりに

TRMM 降雨レーダ用オンボード地表面エコー検出アルゴリズムとその精度評価、最適追尾・異常検出パラメータの検討結果、並びに衛星打上げ後に実施される本アルゴリズムの初期機能確認の方法について記述した。中国地方の標高データ並びに航空機搭載降雨レーダデータを用いたシミュレーションから、本アルゴリズムの性能を評価した結果、海上ならびに平野部および比較的平坦な山地において、要求条件を満足する性能が得られること、また強雨時に表面エコーがノイズレベル以下となっても、それが数スキャン以内であればミスロックすることなく、表面エコー復帰後正常に表面追尾を再開することがわかった。これらの性能を得るための追尾パラメータ、追尾異常検出パラメータについて検討し、打ち上げ前としての標準値を決定した。

これらの成果は、文書ベースで宇宙開発事業団の製作したPRエンジニアリングモデル(EM)のシステム制御・データ処理プログラム開発に反映された。EMおよびプロトフライトモデル(PFM)の試験においては、本アルゴリズムの基本的動作試験が宇宙開発事業団において実施され、正常な動作が確認されている。打ち上げ

後の初期機能確認試験においては、当所と宇宙開発事業団が協力して本アルゴリズムの試験を実施するが、当所においては定常運用段階においても定常的に本アルゴリズムの動作状態をモニタする計画である。これらの試験およびモニタを効率的に実施するため、宇宙開発事業団地球観測センターと当所をネットワークで接続し、オンラインで毎日PRデータを取得し、自動的にアルゴリズムの評価解析を行うシステムの開発を進めている。

謝 辞

本アルゴリズムの開発は、宇宙開発事業団地球観測システム本部地球観測衛星グループ(NASDA/EOS-G)との緊密なインタフェース調整のもとに実施されたものである。そのなかで、アルゴリズムおよび試験装置の開発、並びに基本的性能評価試験に多大な協力を頂いた(株)東芝の関係各位に深謝する。シミュレーションに用いた航空機データは当所関東支所地球観測技術研究室熊谷室長から提供されたものである。最後に、EMおよびPFM試験計画策定にはNASDA/EOS-G黒岩副主任開発部員の尽力が大きいこと、また本文で述べたシミュレーション実施には、当所研修生であった千葉工業大学電気工学科(1994年当時)の加藤喜宣および照下俊介の両氏の貢献が大きいことを記して深謝する。

参 考 文 献

(1) R. Meneghini and T. Kozu, Spaceborne

weather radar, Artech House, Norwood, MA, 1990.

- (2) 井口俊夫, R. Meneghini, 古津年章, “降雨強度推定アルゴリズムの開発”, 通信総研季, 42, 3, pp. 339-347, Sept. 1996.
- (3) 古津年章, 真鍋武嗣, 加藤喜宣, 照下俊介, “TRMM搭載レーダによる地表・海洋リモートセンシングについて”, 信学技報, SANE94-95, 1995.
- (4) T. Kozu, T. Kawanishi, K. Oshimura, M. Satake and H. Kumagai, “TRMM precipitation radar: calibration and data collection strategies”, Proc. IGARSS'94, pp.2215-2217, Pasadena, CA, 1994.
- (5) T. Kozu, “A generalized surface echo radar equation for down-looking pencil beam radar”, IEICE Trans. Commun., Vol.E78-B, No.8, pp.1245-1248, 1995.
- (6) T. R. Benedict and G. W. Bordner, “Synthesis of an optimal set of radar track-while-scan smoothing equations”, IRE Trans. AC-7, pp.27-32, 1962.
- (7) H. Kumagai, R. Meneghini, T. Kozu, “Preliminary results from multiparameter airborne rain radar measurement in the western pacific”, J. Appl. Meteorol., Vol.32, No.2, pp.431-440, 1993.



古津 年章
Toshiaki KOZU
地球環境計測部 電波計測研究室
マイクロ波リモートセンシング
E-Mail: kozu@crl.go.jp



岡本 謙一
Ken'ichi OKAMOTO
地球環境計測部
電波リモートセンシング
E-Mail: okamoto@crl.go.jp



真鍋 武嗣
Takeshi MANABE
電磁波技術部 ミリ波技術研究室
ミリ波電波伝搬, ミリ波構内通信システムの研究開発に従事
E-Mail: manabe@crl.go.jp

川西登音夫
Toneo KAWANISHI
宇宙開発事業団 地球観測システム本部 地球観測衛星グループ
降雨レーダの開発