

### 4.8 AFC システム

本 AFC システムは、衛星中継器の周波数変換器の周波数変動を補償するためのシステムである。

移動体衛星通信において移動地球局は、簡易かつ小形が望ましく、負担を極力軽減させる必要がある。また、EMSS で行う低速データ伝送時には、特に特性の劣化要因となる位相ジッターの量を低く抑える必要がある。本 AFC システムはこれらを考慮しており、次の特徴を有する。

(1) 中継器に起因する周波数変動への対処のための AFC は、すべて、海岸/航空地球局と衛星間のフィードリンクにおいて行い、このための移動局の負担は不必要である。

(2) 制御用の局部発振器に位相ジッターの少ない周波数シンセサイザを使用する方式を採用している。

なお、移動局（飛行機など）が高速で移動する場合に比較的大きなドップラシフトが生じる。これに起因する周波数変動は、移動体の動きによって異なるため、移動局及び海岸/航空地球局受信系で受信 AFC で対処することとし、各復調器に AFC が用意されている。

#### 4.8.1 システムの概要

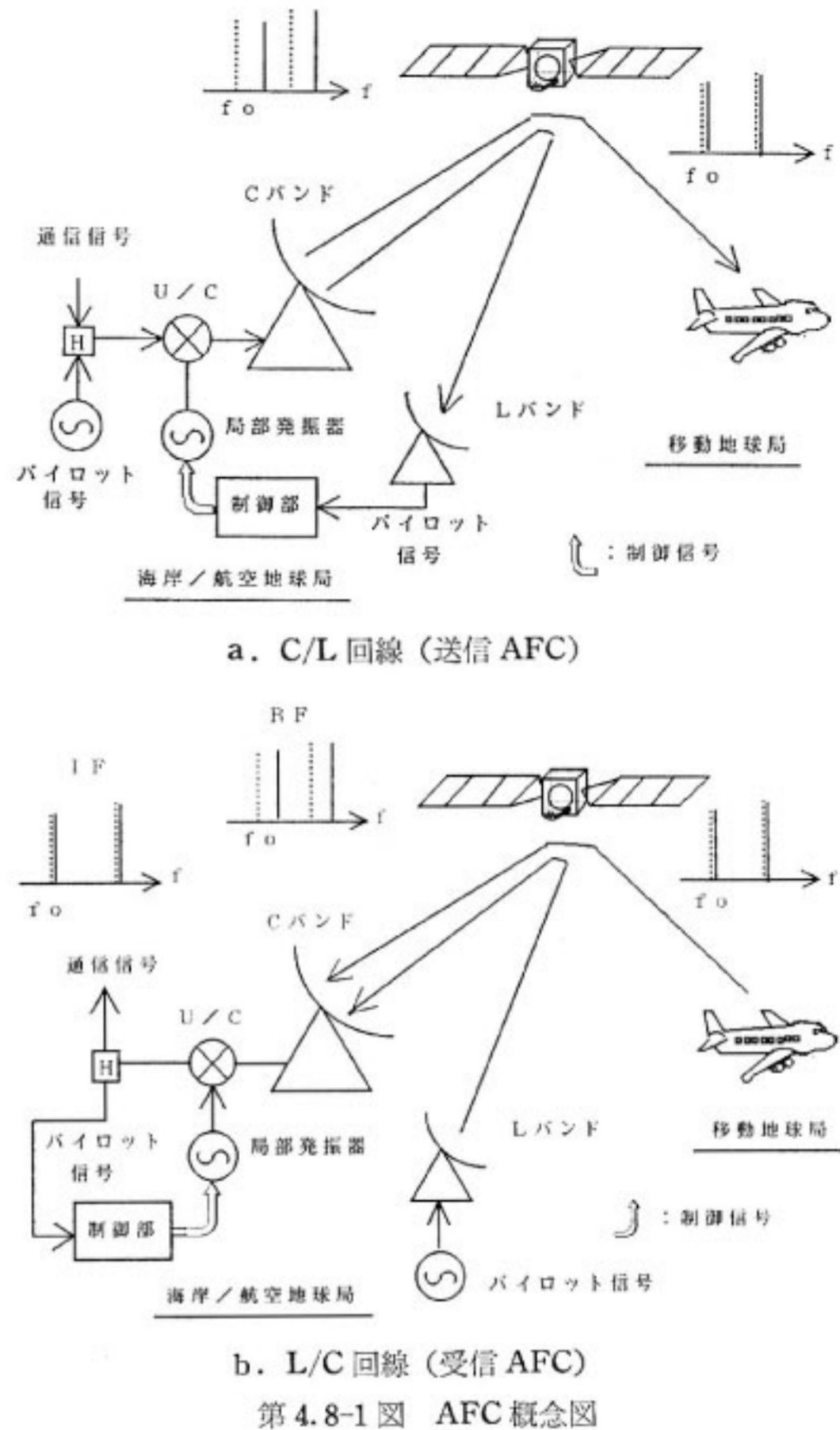
本 AFC システムの概念図を第 4.8-1 図に示す。

海岸/航空地球局で行う AFC は、フォワードリンク (C/L 回線) の送信 AFC 及びリターンリンク (L/C 回線) の受信 AFC である。

C/L 回線での AFC としては、インマルサットで使用しているオープンループ AFC がある。これは、Cバンドで固定周波数のパイロット信号を送信しLバンドで受信したときの規定周波数からのずれを測定し、その値を使って通信波のCバンド送信周波数を補正する方式である。この方式ではLバンドで受信されるパイロット信号の周波数は制御されず常に衛星の周波数変換器の周波数のずれに相当する周波数オフセットが存在することとなる。

本 ETS-V/EMSS 実験においては、デジタル制御により周波数安定度を向上し狭帯域伝送に対応し、かつパイロット信号の周波数をLバンドにおいて常に規定値とすることでパイロット信号を使用した電測を可能にするため、従来のアナログ制御オープンループ AFC をやめ、デジタル制御クローズドループ AFC とした。

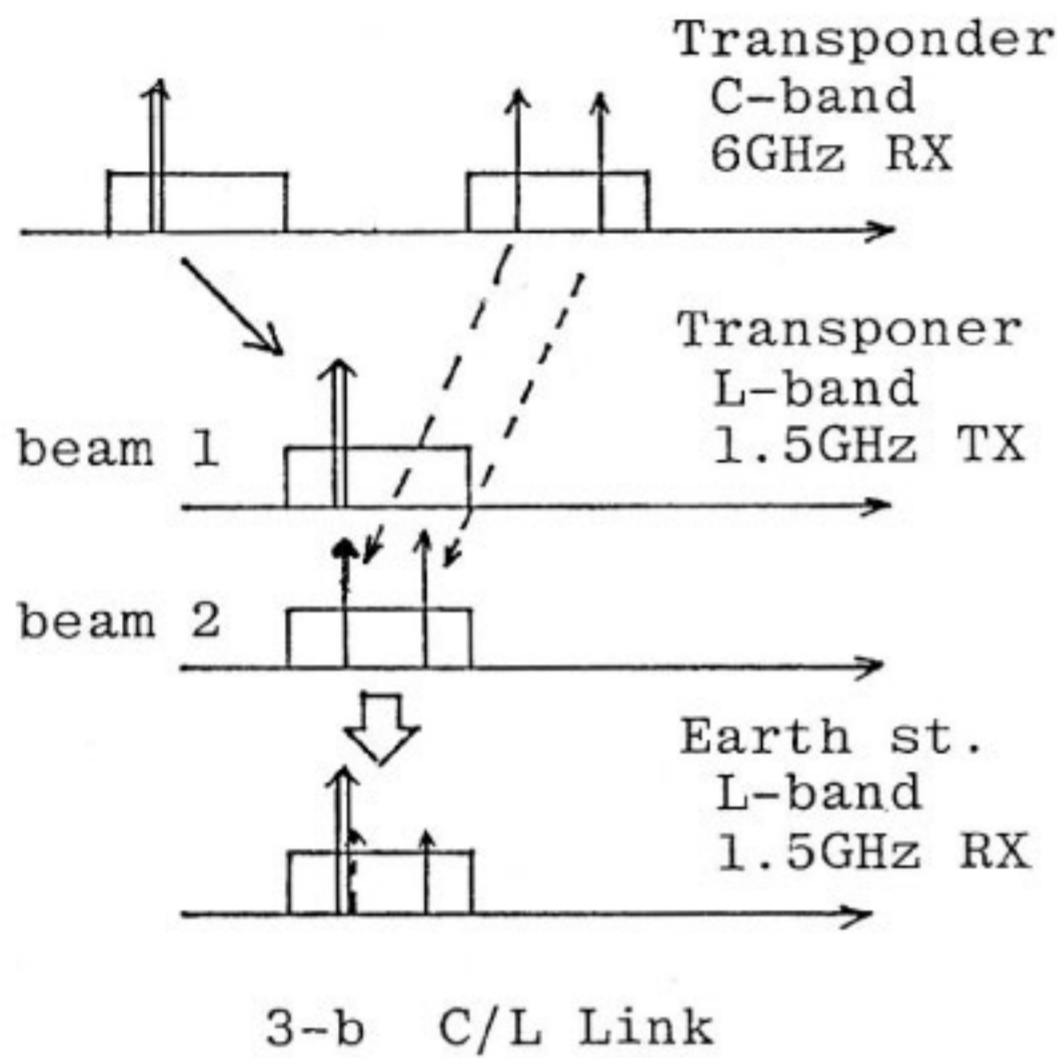
C/L 回線においては、C/L 回線に送信されたパイロット信号を用いてLバンドの受信周波数が規定値となる



ようにCバンドアップリンクの送信周波数を制御する。その制御は、Cバンド送信系の周波数変換器の局部発振周波数の調整による。また、L/C 回線のパイロット信号を用いて、リターンリンクのCバンド受信 IF 周波数が規定値となるようにCバンド受信系の周波数変換器の局発信号の周波数を制御する。これは通常の AFC と同じであるが、ここでは上記の送信 AFC と区別するため受信 AFC と呼ぶことにする。

周波数を制御するCバンド系の周波数変換器は、送信系では第1周波数変換器 (70 MHz/1.7 GHz 変換用) であり、受信系では第2周波数変換器 (1.7 GHz/70 MHz 変換用) である。パイロット発振器の出力は、70 MHz IF 帯で通信信号と合成する。したがって、C/L 回線において、Cバンドアップリンクのパイロット周波数は、通信信号と共に制御され、衛星のLバンド中継器出力のパイロット周波数は、通信信号と共に常に一定となる。ただし、この方式を使用する場合、他の地球局において、受信するLバンドパイロット信号からは、中継器局部発振周波数の変動量を知ることができない。オー

井口政昭 (宇宙通信部 衛星通信研究室), 門脇直人 (鹿島支所 第二宇宙通信研究室), 鈴木龍太郎 (宇宙通信部 移動体通信研究室)



第 4.8-2 図 C/L 回線周波数変換の概要

プンループ AFC の場合は、パイロット送信局以外の主局でも周波数オフセットが測定できるので複数主局運用の場合は、オープンループ AFC を使用するが、クローズドループの AFC 場合で、同時に他の海岸/航空地球局を運用する場合には、別途その海岸/航空地球局においてパイロット信号を用意する必要がある。

AMEX の Lバンドのビームは、南北二つのマルチビームである。ビームごとに衛星中継器の系が異なるのでそれぞれのビームごとに AFC を行う必要がある。したがって、C/L 回線と L/C 回線併せて計 4 系統となる。ここで、海岸/航空地球局が設置される鹿島は、南ビームのサービスエリア外であるが、海岸/航空地球局の Lバンド系のアンテナ径を移動局のそれに比較して大きいものを用意することにより、鹿島局 1 局で南北両ビームに対応できる。

また、第 4.8-2 図に示すように両ビームに対して、Cバンドアップリンクでは使用する周波数帯が異なるが、Lバンド帯では同一周波数帯を使用する。したがって、C/L 回線の Cバンドアップリンクの海岸/航空地球局 IF 帯において周波数が同一であれば Lバンド帯では信号が同一周波数に重なる。そこで、C/L 回線のパイロットが重ならないようにするために Cバンドフィーダリンクの 70 MHz 帯パイロット発振器は北ビームと南ビームで周波数が異なるものを用い、各ビームにそれぞれ 1 信号のみを通信信号と合成している。一方、L/C 回線における Lバンド系のパイロット発振器は、南、北ビームとも一つの周波数で共用している。

本 AFC システムは、パーソナルコンピュータとスペ

クトルアナライザ及び局発用シンセサイザを用いたデジタル制御 AFC 方式を採用している。70 MHz IF 帯のパイロット受信周波数を測定し、その規定値からのずれに応じて、周波数変換器の局発信号用のシンセサイザの発振周波数の制御を行う。したがって、本 AFC システムは、ハードウェアと共にソフトウェアが重要な役割を果たす。

また、本 AFC 方式の地球局システムへの適用は、初めての試みであり、有用性、システムの最適な制御パラメータ等を運用実験により確認する必要がある。そこで、本システムは、実験の結果の解析のために各種制御パラメータ及び制御結果のデータをデータ収集システムに転送する機能を有する。

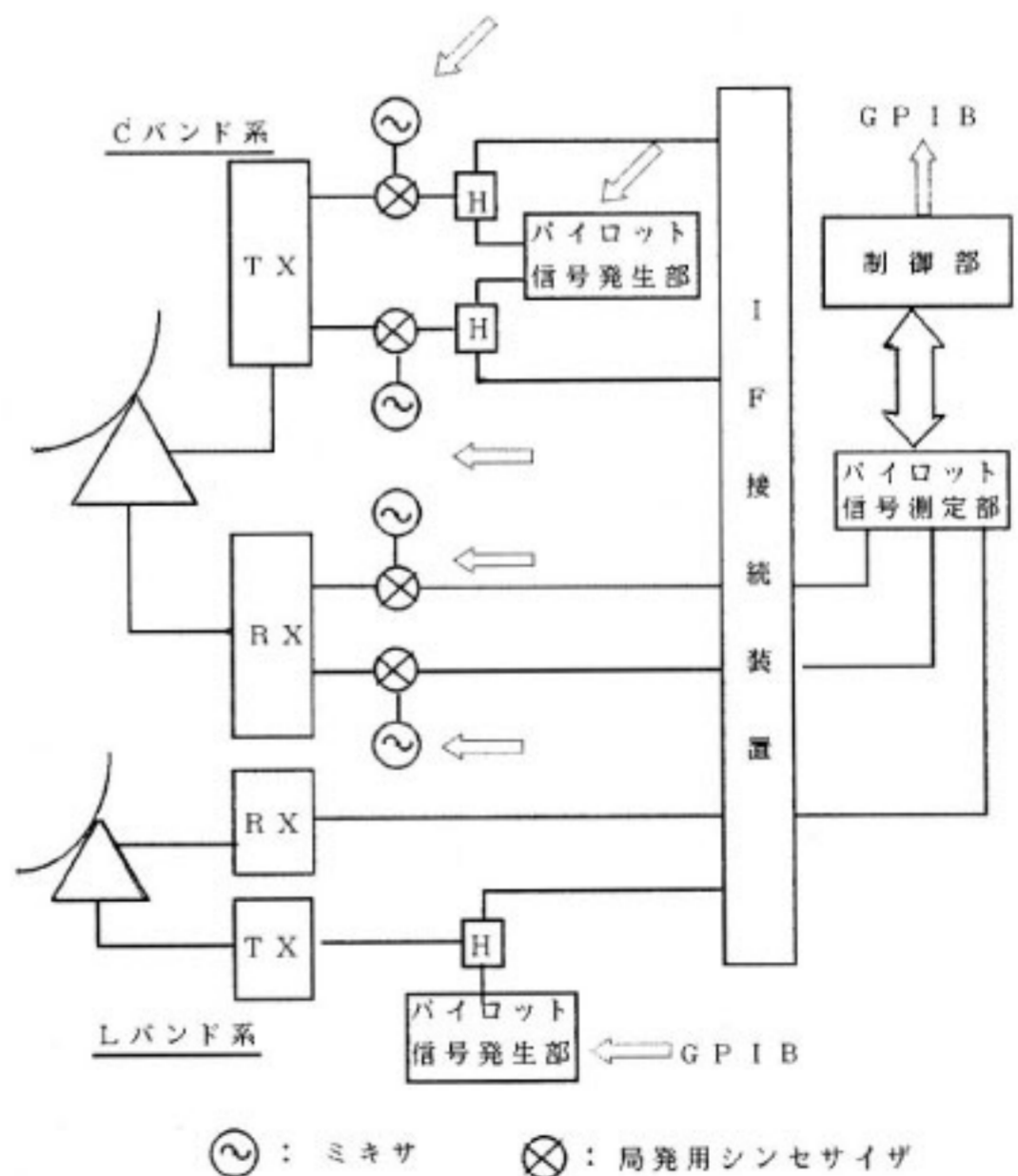
4.8.2 ハードウェア構成

本 AFC システムは、アンテナを含む Lバンド RF 系と Cバンド RF 系、パイロット信号測定部、局発信号発生部、Lバンド用と Cバンド用の各々のパイロット信号発生部及び共通の制御部から構成される。本 AFC システムのハードウェアの全体構成を第 4.8-3 図に示す。以下に各部の概要を説明する (RF 系については 4.2 及び 4.3 を参照)。

(1) パイロット信号測定部

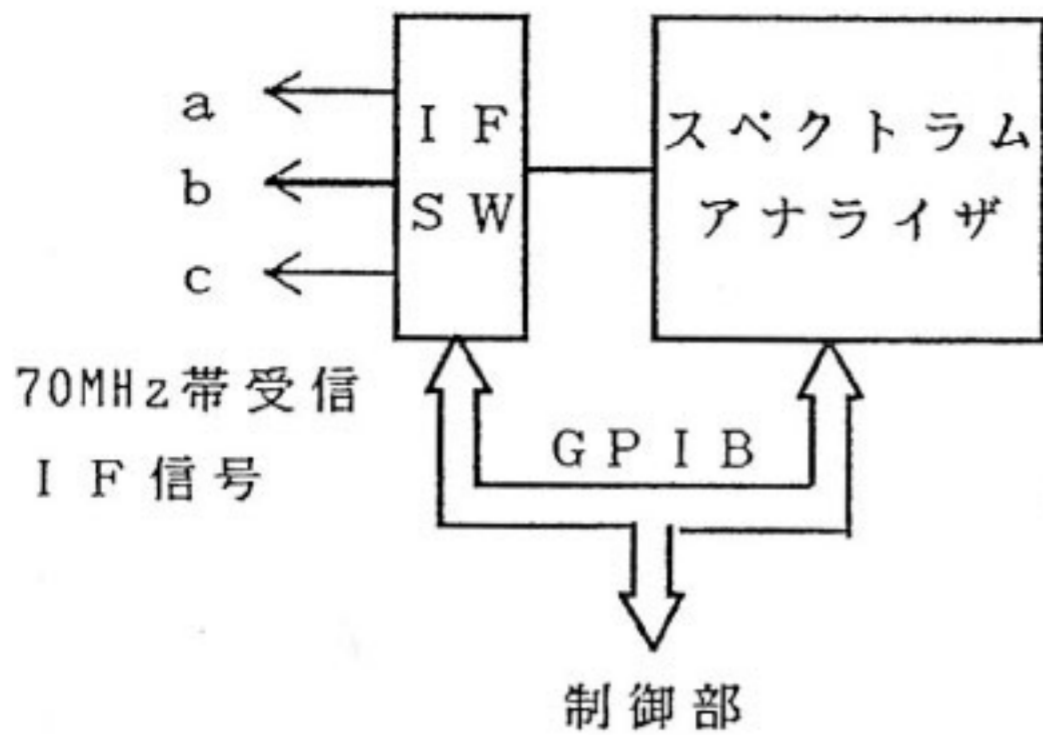
本部は、IF 信号切り替え用 SW とスペクトルアナライザから構成される。その構成を第 4.8-4 図に示す。

IF 信号切り替え用 SW は、Cバンド 2 系統と Lバンド 1 系統の 70 MHz 帯出力の計 3 系統の受信 IF 信号を

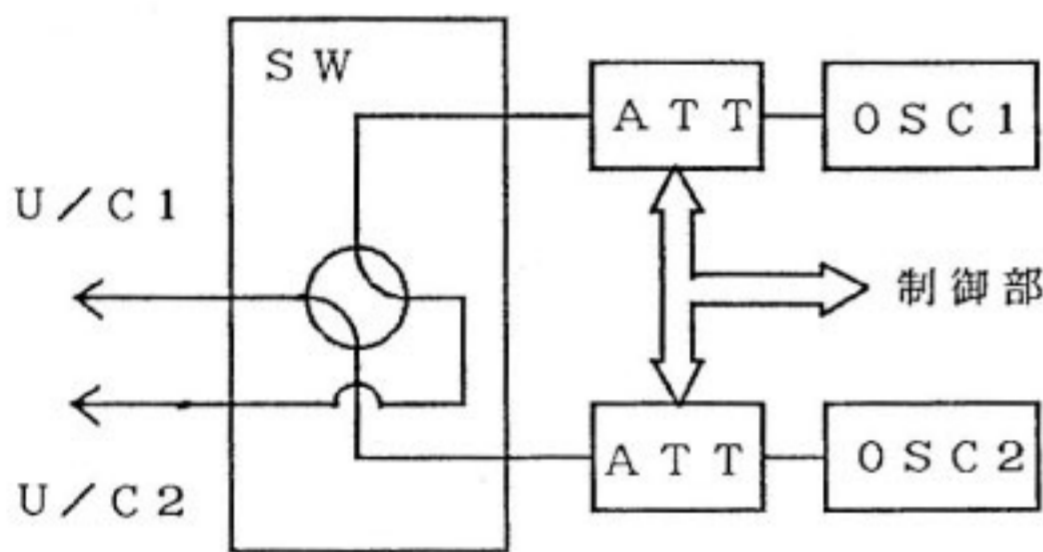


第 4.8-3 図 AFC システムハードウェア構成





第4.8-4図 パイロット信号測定部構成



第4.8-5図 Cバンド用パイロット信号発生部構成

スペクトルアナライザに切り替え選択して入力するためのものである。受信 IF 信号は、IF 接続装置の受信部からそれぞれ分岐する。本 SW は、GPIB により遠隔制御が可能であり、制御部から制御される。また、パネル面において手動での制御も可能である。

スペクトルアナライザは、パイロット信号の周波数を測定するものである局発信号用にシンセサイザを使用し、高精度の周波数測定が可能である。また、GPIB による遠隔制御とデータ収集が可能である。

(2) 局発信号発生部

本部は、送信及び受信の 70 MHz/1.7 GHz 帯の周波数変換器用の局発振信号を供給するもので、シンセサイザ 4 台で構成され、最小の周波数設定分解能は 1 Hz である。これらのシンセサイザも制御部から GPIB により制御される。

(3) パイロット信号発生部

Cバンドアップリンク (C/L 回線) 用のパイロット信号発生部の構成を第 4.8-5 図に示す。2 系統のパイロット発振器と遠隔制御のアッテネータ及びパイロット信号切り替え用 SW から構成される。

Lバンド (L/C 回線) 用のパイロット発生部は、Cバンド用と同様の 1 系統のアッテネータ及びパイロット発振器で構成される。

第4.8-1表 パイロット発振器主要諸元

	Cバンド用		Lバンド用
	OSC1	OSC2	
出力周波数 (MHz)	70.95	70.90	70.90
周波数安定度	±5×10 <sup>-9</sup> 以下/週		
出力電力	0 dBm		
出力インピーダンス	75 Ω		
出力 VSWR	1.3 以下		
方式	70 MHz 帯 PLL (VCXO, 原振; 10 MHz)		
使用電源	AC 200 V		

パイロット発振器の主要性能を第 4.8-1 表に示す。三つのパイロット発振器は、出力周波数が異なるだけで構造及び他の性能は同一である。アッテネータは、パイロット信号レベルの制御用であり、1 dB ステップで最高 100 dB までパネル面における手動及び GPIB による遠隔で制御可能なものを使用している。

Cバンド用のパイロット信号切り替え用 SW は、二つのパイロット信号の出力を南、北ビームに対応する 2 系統の IF 帯の送信通信信号と任意に切り替えて合成できるようにするものである。その制御は、パネル面で手動で行い、切り替え状態は、監視制御装置によりモニターされる。

各パイロット信号は、Cバンドでは 70 MHz/1.7 GHz の U/C に、Lバンドでは U/C に入力され 70 MHz 帯の通信信号と合成される。

(4) 制御部

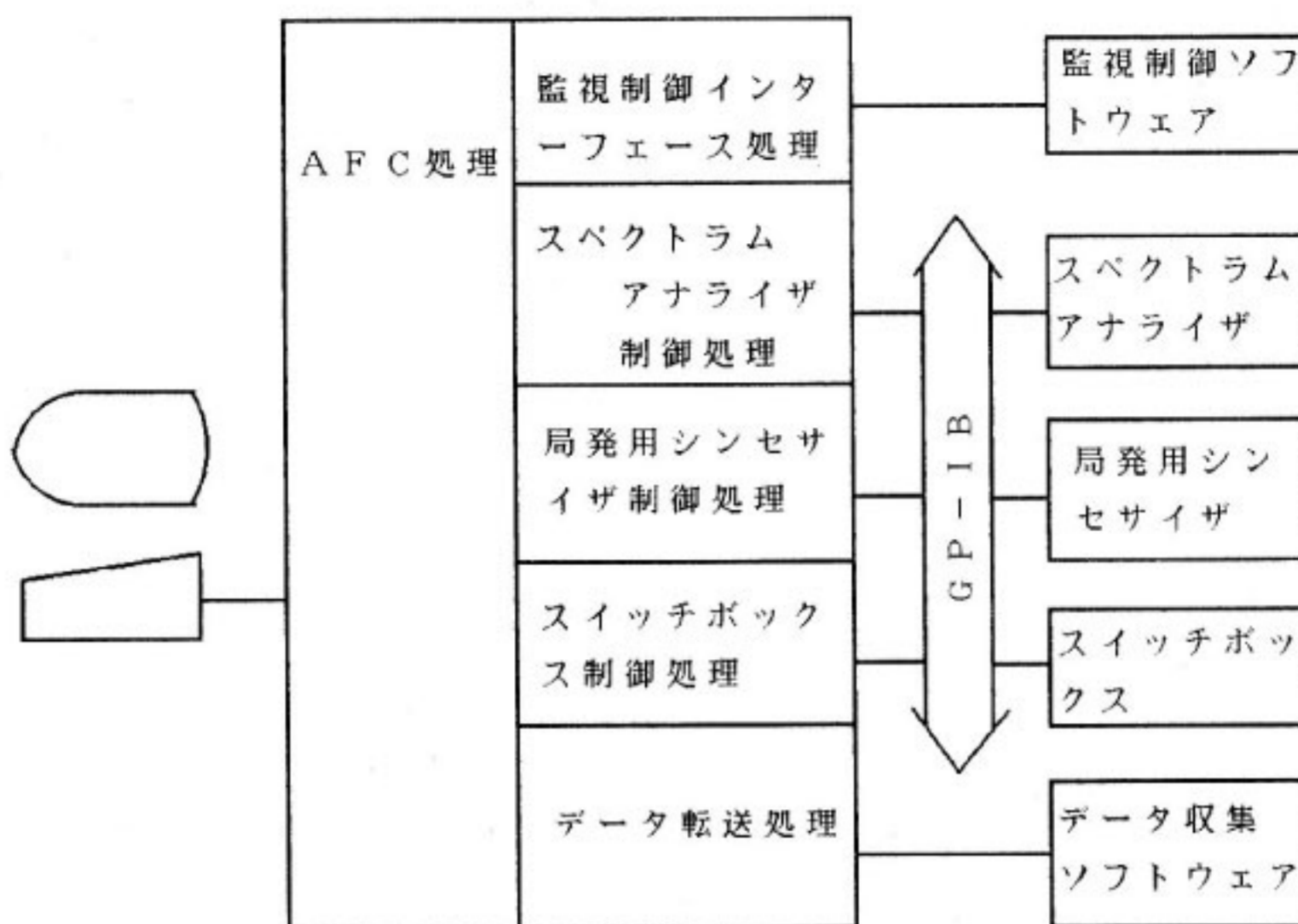
制御部は、卓上型のパーソナルコンピュータシステムで実現している。本制御部と各ハードウェア間は GPIB により接続される。データ収集システム及び監視制御システムとの間は、RS-232C により接続されデータの受渡しが行われる。

4.8.3 ソフトウェア構成

本ソフトウェアは、AFC を効率よく処理するために各処理ごとに C 言語で記述されたモジュールに分割されている。第 4.8-6 図に本ソフトウェアの構成の概要を示す。

- a AFC 処理は全体を統括するソフトウェアである。
- b スペクトラムアナライザ制御処理、アッテネータ制御処理、スイッチ制御処理及び局発用シンセサイザ制御処理は、AFC 処理の要求に基づき、該当する各ハードウェア制御の処理を行う。
- c 監視制御インターフェース処理は、監視制御システムからの要求に基づきアッテネータを制御するためのインターフェース処理を行う。

AFC 制御ソフトウェア



第 4.8-6 図 AFC ソフトウェア構成

d データ転送処理は、AFC 処理の制御パラメータ、制御結果をデータ収集システムに転送する処理を行う。起動は、AFC 本システムの方からオペレータのキー入力による割り込みで行う。転送するデータの項目については、4.9 のデータ収集システムにおいて説明する。

4.8.4 AFC 手順

(1) AFC 手順の概要

本システムは、オペレータのキー入力による制御開始要求に基づき、基本的に自動で必要な手順を踏み制御を開始し、同一ソフトウェアの管理下に同時に AFC が必要な全回線（最高 4 回線）を切り替えて制御を継続するシステムである。

AFC 処理が実行する内容は、基本的に、周波数のずれを自動的に補正することを繰り返す動作（ロック動作）と、回線ごとに開始要求を受け付けてから前者の動作を開始するまでの動作（捕捉）に分けられる。

ロック動作は、回線ごとにスペクトルアナライザで受信パイロット信号の IF 周波数を測定し、測定した周波数の規定周波数からのずれを求め、計算結果に基づき局発信号用のシンセサイザの出力周波数を制御する動作である。制御が必要な回線が複数ある場合、切り替えて順次実行される。

捕捉動作は、パイロット信号を捕捉するための動作である。まず、制御する回線に適合するように局発信号用のシンセサイザの発振周波数を設定し、受信 IF 信号をスペクトルアナライザで観測する。観測したスペクトルからパイロット信号を判定し、パイロット周波数が十分

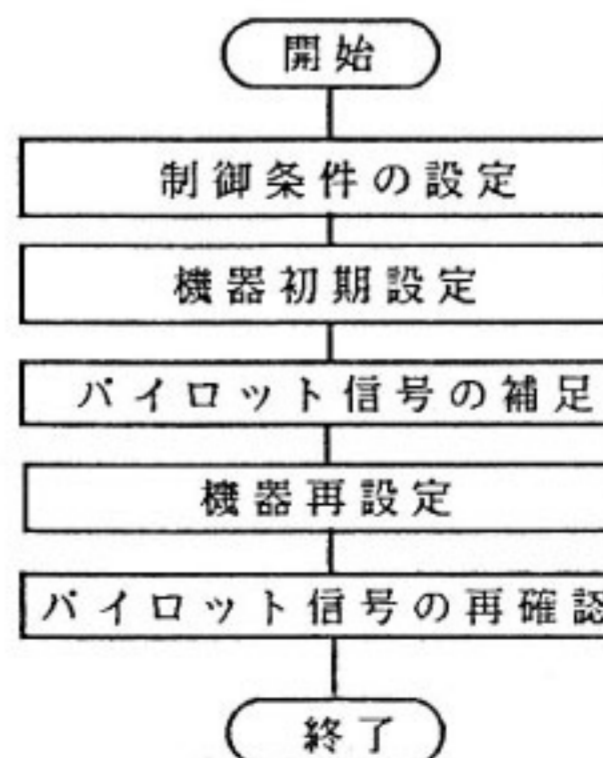
な分解能で測定できるようにスペクトルアナライザの設定を行う。設定が終了し、捕捉した信号がパイロット信号であることを再確認した後、自動的にロック動作に移行する。本動作は、各回線ごとに制御の最初に実行されるものであり、ここでは初期接続と呼ぶ。

(2) 初期接続

初期接続のソフトウェアは、キーボード上の回線ごとに指定するファンクションキーの押し下げによる割り込みで起動する。初期接続動作の概要を示すフローチャートを第 4.8-7 図に示す。以下、フローチャートに従い各動作を説明する。

(a) 制御条件の設定

「制御条件の設定」は、各種ハードウェアや本 AFC 処理の制御パラメータの初期値を設定するものである。



第 4.8-7 図 初期接続手順フローチャート



L / C - 1 設定画面 1987/12/04 10:05:59

1. 基準周波数	70.900000 MHz	11. ロックウィンドウ	1 Hz
2. ローカルOSC制御範囲	100 Hz	12. 異常偏移幅	100 Hz
3. ローカルOSC最大補正值	1 Hz	13. 異常偏移回数	10
4. ローカルOSC補正時間	5 s	14. 異常レベル幅	10 dB
5. 初期ウィンドウ	10 Hz	15. 異常レベル回数	10
6. 最大ウィンドウ	1 MHz	16. 収束	
7. しきい値 (C/N <sub>0</sub> )	35 dBHz	* [1] 基準周波数との差	5 Hz
8. ローカルOSC出力レベル	14 dBm	[2] 回数	2 s
9. ローカルOSC設定方法		[3] 時間	
[2] システム既定値	1779.750000 MHz		
10. ATTの設定方法			
[3] 設定減衰量	20 dB		

CL-1 CL-2 LC-1 LC-2 SEND MEA. SET. CONT STOP INT.

第 4.8-8 図 初期接続における設定画面

初期接続の起動時に、前回設定したデータが初期値としてディスクからロードされ、第 4.8-8 図に示すような設定画面をディスプレイに表示する。第 4.8-8 図は L/C 回線の例である。オペレータは、設定画面を使用して各制御パラメータの値を必要に応じて変更する。設定画面の左半分は主に初期接続に必要な制御パラメータであり、右半分はロック動作を規定する制御パラメータである。指定すべき設定が完了した時、オペレータはファンクションキーで次の動作への移行を指示する。

(b) 機器初期設定

「機器初期設定」は、パイロットアッテネータを制御し、パイロット信号を U/C に送出し、シンセサイザの発振周波数を上記の制御条件に基づき設定する。設定後、「パイロット信号の捕捉」に移行する。

次にオペレータは、監視制御システムの使用により地球局送信系を操作して使用する回線に対応するパイロット信号を送信する。

(c) パイロット信号の捕捉

「パイロット信号の捕捉」は、受信 IF 信号のスペクトルの中から周波数が未確定なパイロット信号を以下に示す方法で検出するものである。

はじめに、スペクトルアナライザで受信 IF 帯のスペクトルを測定する。スペクトルアナライザのセンター周波数は、第 4.8-8 図の設定画面に示す（以下第 4.8-8 図を設定画面という。）「基準周波数」、スパン周波数は、設定画面に示す「初期ウィンドウ」である。次にこのスペクトルから以下に示す方法で信号のリストを求める。雑音電力密度を全スペクトルの加重平均とバンド幅から求める。次にスペクトルアナライザの機能（ピークサーチ及びセカンドピークサーチ）を用いて、スペクトルの極大点を求める。各々の極大値と上記の雑音電力密度から各々の C/N<sub>0</sub> を求めて、これら各々の C/N<sub>0</sub> が設定画

面の「しきい値」より大きいスペクトルの周波数及びその電力のリストを作成する。これを信号のリストとする。

次にパイロットアッテネータを制御して、パイロット信号の送信を停止する。その後、上記と同様の方法で信号のリストを作成する。

以上の方法で求めた二つリストを比較し、パイロットが送信されているときに存在し、パイロット信号の送信を停止したときに消失する信号を選び出す。その信号の測定値をパイロット信号の周波数及び電力とみなし、パイロット信号が検出されたとする。

ここでパイロット信号が未検出の場合、パイロット信号の周波数が「初期ウィンドウ」の範囲外にある可能性がある。そこで、パイロット信号を検出するまでウィンドウ、つまりスペクトルアナライザのスパン周波数を設定画面に示す「最大ウィンドウ」まで順次拡大して、上記の動作を繰り返す。「最大ウィンドウ」においてもパイロット信号が検出されない場合、ディスプレイに AFC アラームを表示し、オペレータの指示を待つ。オペレータは、手動でパイロット信号を捕捉することを試み、検出することができれば、制御をソフトウェアに戻す。

(d) 機器の再設定

パイロット信号の周波数と設定画面に示す「基準周波数」との差からパイロット信号の周波数偏移量を求め、局発用シンセサイザの出力周波数をこの偏移量だけ現在の設定からオフセットさせる。さらにパイロットアッテネータを制御してパイロット信号を送信する。

(e) パイロット信号の再確認

スペクトルアナライザのセンター周波数を「基準周波数」とし、その測定周波数範囲（スパン）を設定画面に示す「ロックウィンドウ」で指定される周波数範囲に設定してスペクトルを測定する。ピークサーチを用いて測

定されたスペクトルの最大の電力及びその周波数を求める。

次にパイロットアッテネータを制御して、パイロット信号の送信を停止する。その後、上記と同様の方法でスペクトルの最大レベルとその周波数を求め、更に再度パイロット信号を送信し、同様の測定を行う。これら3回の測定からパイロット信号の送信を停止したときのみの値が異なることを確認する。この確認が可能となればパイロット信号が再確認されたとする。

次にパイロット信号送信時の周波数と設定画面の「基準周波数」との差からパイロット信号の周波数変移量を求め、局発用シンセサイザの出力周波数をこの変移量だけオフセットさせる制御を実行する。

なお、パイロット信号が再確認されない場合、AFCアラームをディスプレイに表示し、初期接続動作を停止する。

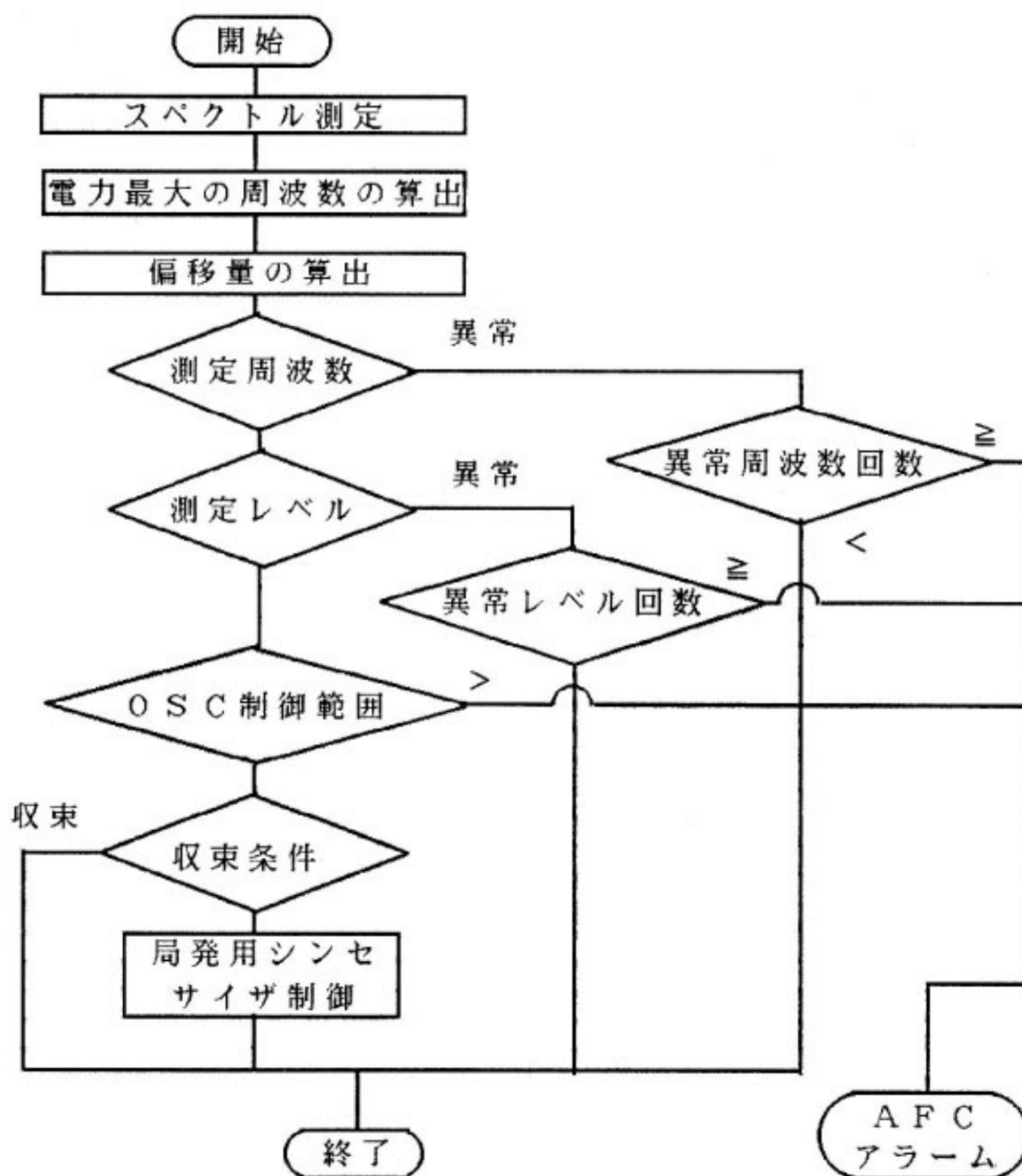
(3) ロック動作

初期接続が終了して制御が可能な回線が存在する場合で、他の回線の初期接続が要求されていない場合に、ソ

フトウェアは以下の動作を繰り返して実行する。制御可能な回線が複数存在する場合は、各回線ごとに以下の動作を順次繰り返す。その動作の概要を示すフローチャートを第4.8-9図に示す。

まず、IF信号切り替え用SWを制御し、AFC制御を行う回線の受信IF信号をスペクトルアナライザに入力する。次に受信IF信号のスペクトルを測定する。測定する周波数帯域は設定画面に示す「ロックウインドウ」で指定される周波数範囲であり、中心周波数は前述の初期接続で決定された設定画面の「基準周波数」である。測定されたスペクトルの最大の電力及びその周波数を、ピークサーチを用いて求め、この周波数の信号をパイロット信号とみなす。この周波数と設定画面の「基準周波数」との差から、パイロット信号の周波数偏移量を求める。この偏移量が設定画面に示す「収束・基準周波数との差」に比較して大きい場合にのみ、局発用シンセサイザの出力周波数をこの偏移量だけ補正する制御を実行する。

なお、前記のパイロット周波数の測定では、スペクト



第4.8-9図 ロック動作フローチャート



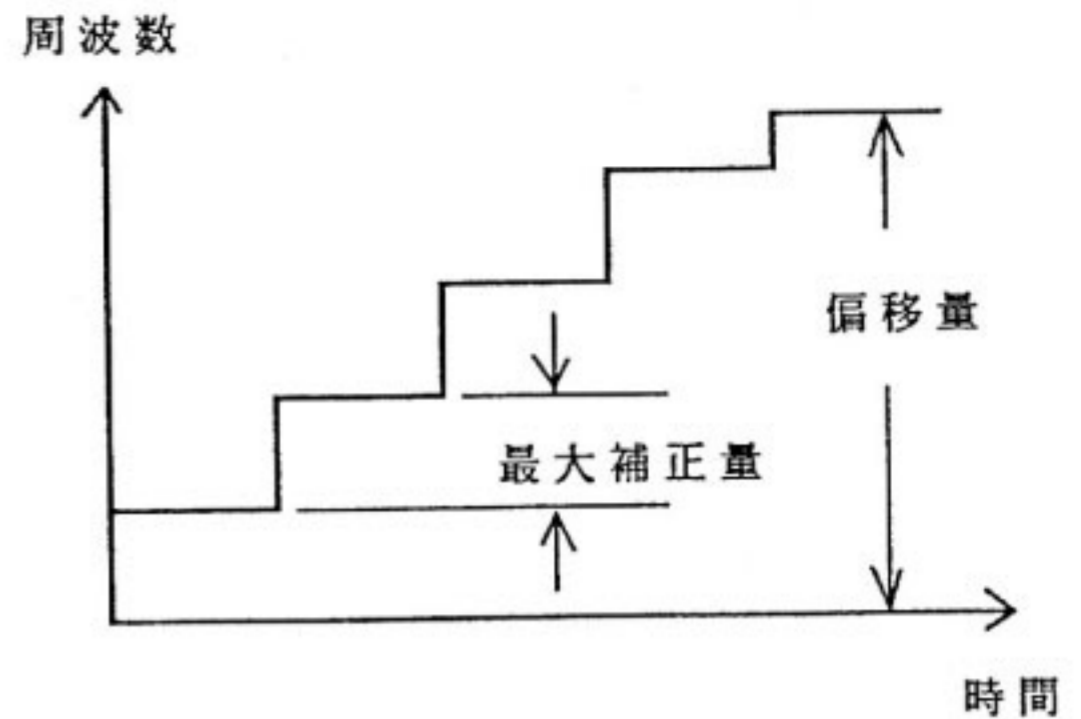
ルのピーク値から求めているために、雑音あるいは他の信号をパイロット信号と見誤る可能性がある。そこで、この誤動作を防止するために以下に示す保護を行っている。

(a) 測定の結果、制御すべき周波数偏移幅が設定画面の「異常偏移幅」を上回る場合、パイロット信号が未検出として局発用シンセサイザの制御を実行しない。さらに、パイロット信号の未検出が連続して、設定画面の「異常偏移回数」より多く発生した際、AFC アラームとする。

(b) 測定したパイロット信号レベルを前回の制御における測定レベルと比較し、その差が設定画面の「異常レベル幅」を上回る場合、パイロット信号の未検出として局発用シンセサイザの制御を実行しない。さらに、このパイロット信号の未検出が連続して設定画面の「異常レベル回数」より多く発生した際、AFC アラームとする。

また、他の中継器の保護をも考慮して、制御している局発用シンセサイザの出力周波数が、設定画面の「ローカル OSC 制御範囲」から外れる場合にも、AFC アラームとする。

AFC アラームの場合、システムのディスプレイに当該回線がアラームであることを表示し、その回線について初期接続以前の状態（未制御状態）にする。すなわ



第4.8-10図 局発用シンセサイザの周波数制御の方法

ち、その回線のロック動作はその後実行されず、AFCが必要な場合、あらためて初期接続からの動作の開始が必要となる。

局発用シンセサイザの周波数制御は、第4.8-10図に示すように設定画面の「最大補正量」の刻みで原則的に複数回で実行する。これは、局発用シンセサイザの周波数制御の結果、通信信号の位相量が大きく変化するのを防止し、時間的変化量を少なくするためである。通信信号の位相の急激な変化は、通信品質に有害な影響を及ぼす可能性がある。なお、1回の刻みに要する制御時間の最小は、約450msである。

