

フィーダリンク地球局アンテナ追尾制御装置

吉村 直子* 田中 健二* 山本 伸一*
若菜 弘充*

(1994年1月24日受理)

ANTENNA TRACKING CONTROL EQUIPMENT IN FEEDER-LINK EARTH STATION

By

Naoko YOSHIMURA, Kenji TANAKA, Shin-ichi YAMAMOTO,
and Hiromitsu WAKANA

A feeder-link earth station for S-band and O-band intersatellite communication experiments utilizing the ETS-VI satellite has been installed in the Kashima Space Research Center of the Communication Research Laboratory. The 5 m ϕ -Cassegrain antenna of this earth station has a receiving antenna gain of 59.0 dBi, a 3 dB beamwidth of 0.2 degrees and an automatic tracking capability for satellites.

For the tracking method, a step-track (step-by-step tracking) algorithm using a received beacon or telemetry signal is adopted. Antenna tracking is achieved by comparing the maximum received signal level before and after the tracking step. The antenna tracking accuracy is estimated to be within 0.02 degrees rms when the wind conditions are less than 20 meters per sec, while the rotation rate of the antenna is 0.0073 degrees per sec on the Az axis and 0.0058 degrees per sec on the El axis. Considering this accuracy and the antenna beamwidth, we will be able to carry out satellite communication experiments under fairly constant receiving signal power conditions within 0.2 dB rms. This antenna tracking equipment can also track the CS-3 satellite as well as the ETS-VI satellite.

This paper presents the antenna tracking equipment in feeder-link earth station.

[キーワード] フィーダリンク地球局, 衛星間通信, アンテナ追尾, ステップトラック方式.

Feeder-link earth station, Intersatellite communication, Antenna tracking, Step tracking.

1. はじめに

技術試験衛星 VI 型 (ETS-VI) 衛星間通信用フィーダリンクは, 上り回線 30 GHz 帯, 下り回線 20 GHz 帯の Ka バンドを使用しており, そのためのフィーダリンク地球局が鹿島宇宙通信センター CSBS 実験庁舎東側に設置されている. アンテナは直径 5 m のカセグレ

ンテナビーム半値幅は 0.2 度である. アンテナ追尾方式としてはステップトラック制御による追尾方式を使用している.

ETS-VI からは常時 19.450 GHz のビーコン信号 (垂直偏波) が送信されているが, フィーダリンク地球局が通信信号 (水平偏波) 用に水平偏波系でのみ構成されているため, ETS-VI の追尾においてはビーコン信号によるステップトラックアンテナ追尾を行うことができない. そのため 20.170 GHz で送信されている Ka バンドテレメトリ信号 (水平偏波) を用いてアンテナ追尾を行っ

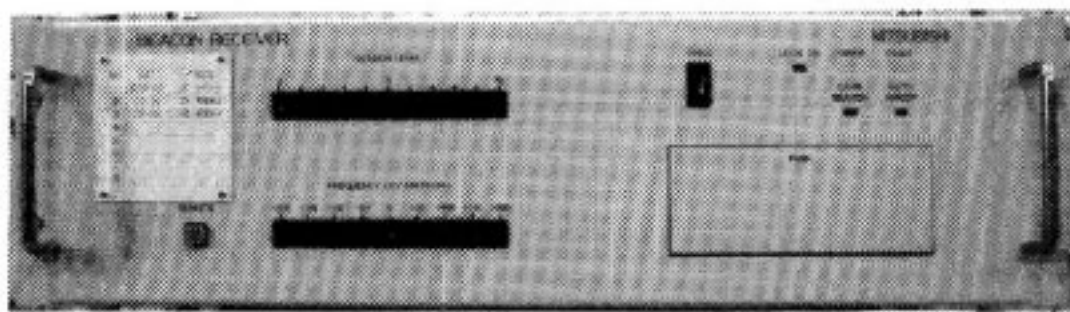
* 関東支所 宇宙通信技術研究室

ている。また、フィーダリンク地球局アンテナは、CS-3a および CS-3b 衛星にも指向することができ、このときは追尾信号として両衛星の 19.450 GHz のビーコン信号（右旋円偏波）を用いてアンテナ追尾を行うことが可能である⁽¹⁾。

本論文ではアンテナ追尾装置の構成と性能、およびアンテナ追尾アルゴリズムについて述べる。

2. アンテナ追尾制御装置の構成

アンテナ追尾制御装置は、衛星からの信号を受信し検波信号を出力する追尾受信部、受信信号強度とアンテナの方位角、仰角情報に基づいてステップトラック制御を行うアンテナ駆動制御部、方位角および仰角軸の駆動モータの制御を行う駆動モータ制御盤から構成される。



第1図 追尾受信部外観

2.1 追尾受信部

フィーダリンク地球局アンテナで受信された ETS-VI からの 20.170 GHz のテレメトリ信号は、20 GHz 帯受信周波数変換部により 1.810 GHz に周波数変換され、さらにテレメトリ受信周波数変換部により 70 MHz へ周波数変換されて追尾受信部に入力される。テレメトリ信号は変調指数 0.6 rad の PCM-PM 変調で、追尾受信部ではこのテレメトリ信号の搬送波成分の受信信号強度に応じた電圧信号を取り出す。つぎに続くアンテナ駆動制御部では、この信号が最大となるようにアンテナを駆動し、自動追尾を行う。

第1図と第2図に、それぞれ追尾受信部の外観と構成図を、また第1表に主要性能を示す。

周波数変換された 70 MHz 帯のテレメトリ信号は次のように表される。

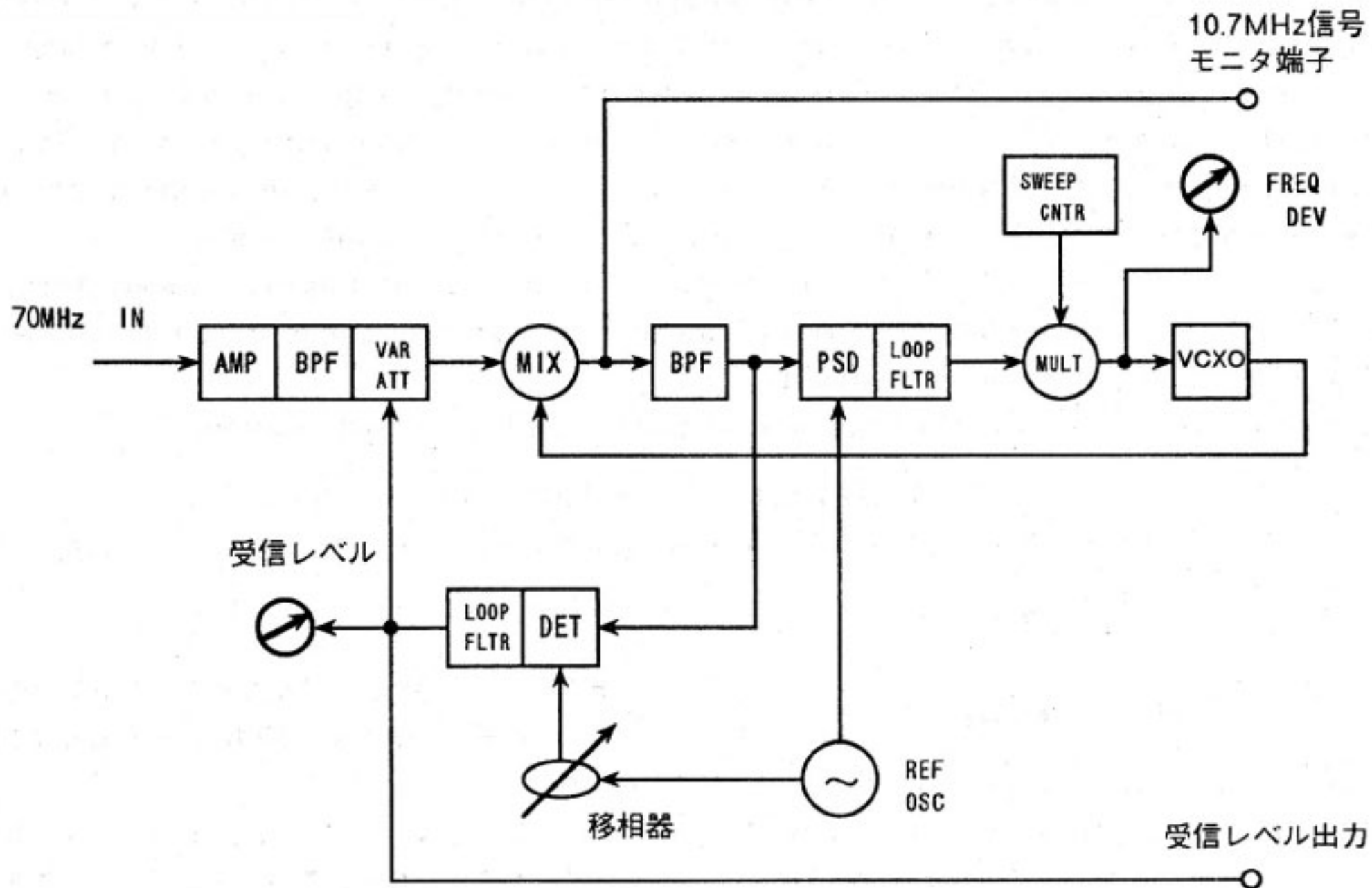
$$A = A_c \sin\left(\omega_c t + \frac{\Delta\phi}{2} u(t) + \phi_0\right) \quad \dots\dots(1)$$

ただし ω_c : 70 MHz 帯搬送波角周波数

$\frac{\Delta\phi}{2}$: 変調指数

$u(t) = -1 \text{ or } 1$ (Hi or Lo) : テレメトリ入力

ϕ_0 : 初期位相



PSD : Phase Shift Detector
SWEEP CNTR : sweep center

第2図 追尾受信部構成図

第1表 追尾受信部の主要性能

テレメトリ信号	周波数	70MHz	
	入力レベル	-76dBm~-36dBm	
	ダイナミックレベル	40dB以下	
	受信スレッシユホールド	45dB・Hz以下	
追尾可能周波数範囲	±200kHz		
出力信号レベル	信号形式	DC	0~10V/40dB
		10.7MHz	-20dBm標準

第2表 追尾受信部の表示項目

表示項目	機能
BECON LEVEL	受信信号の受信電力表示
FREQUENCY DEVIATION	受信信号の受信周波数のノミナル値からの偏差表示
FREQ	選択されている受信信号の表示
REMOTE	制御モードの選択及び表示
FAULT	追尾受信部に少なくとも1つ異常があることを示す
LOCK ON	位相同期ループが同期状態であることを示す
AUTO SWEEP	ロックオフ時のオートスイープ機能が起動可能であることを示す
CARR SEARCH	キャリアサーチ機能が起動中であることを示す

また、基準発振器と VCXO の出力をそれぞれ

$$A_{REF} = A_r \sin(\omega_r t + \phi_r) \quad \dots\dots(2)$$

$$A_{VCXO} = A_v \sin\{(\omega_c - \omega_r)t + \phi(t)\} \quad \dots\dots(3)$$

ω_r : 基準角周波数

$\phi_r, \phi(t)$: 初期位相

とすると、VCXO 周波数と入力信号の積をとって帯域通過フィルタを通すとその出力は

$$A_{BPF} = \frac{A_v A_c}{2} \cos\left\{\omega_r t + \frac{\Delta\phi}{2} u(t) + \phi_0 - \phi(t)\right\} \quad \dots\dots(4)$$

となる。この信号の位相を基準発振器信号の位相と比較してフィルタを通すと、基準発振器と追尾受信部への入力信号との位相差に応じた誤差電圧が出力される。これが零になるように位相同期ループが動作する。

位相同期状態にあるときの帯域通過フィルタの出力

$$A_{BPF} = \frac{A_c A_v}{2} \cos\left(\omega_r t + \frac{\Delta\phi}{2} u(t) + \phi_r\right) \quad \dots\dots(5)$$

と基準発振器の $\frac{\pi}{2}$ 移相器出力信号との積を取ってフィルタを通すとその出力は

$$A_{out} = \frac{A_r A_v A_c}{4} \cos \frac{\Delta\phi}{2} u(t) \quad \dots\dots(6)$$

となる。変調指数が 0.6 rad と小さいのでフィルタの出力は入力信号の振幅に比例した電圧信号となる。この電圧が追尾受信部に表示されるとともに、アンテナ駆動制御部に追尾信号として出力される。

追尾受信部に入力される受信信号の基準周波数 70 MHz からのずれは SWEEP CNTR に記憶される。この基準周波数からのずれは衛星ごとに異なっており、これを記憶することにより衛星の捕捉を迅速かつ確実にしようとするものである。

追尾受信部では追尾受信部の状態、追尾信号の受信レベル、基準周波数からの偏差が前面パネルに表示される。テレメトリあるいはビーコン信号の標準入力電力は、-76 dBm から -36 dBm であり、40 dB のダイナミックレンジを有する。この信号電力はユニット前面のパネルに液晶で表示される。追尾可能周波数範囲は、受信信号周波数の基準値から ±200 kHz で、この周波数がオートスイープモードにおける中心周波数となる。オートスイープモードでは、この中心周波数の ±60 kHz を周波数サーチする。中心周波数は VCXO 周波数の制御電圧によりパネルに表示される。対象とする衛星ごとにこの中心周波数を記憶することができ、それにより自動捕捉の確実性を向上している。ただし、この時の各衛星の中心周波数とは、追尾受信部に入力される 70 MHz 帯に周波数変換されたビーコンあるいはテレメトリ信号の周波数のことである。したがって、追尾受信部における中心周波数の変更は、受信周波数変換部の変換周波数を制御するものではない。例えば、ETS-VI と CS-3 では異なる RF 周波数の信号を使ってアンテナ追尾を行なうので、追尾する衛星を変更する際には追尾受信部で中心周波数の設

定を変更するとともに、20 GHz 帯受信周波数変換部の変換周波数を変更して追尾に用いる信号を 70 MHz 帯に変換する必要がある。

追尾受信部はリモート制御とローカル制御が可能であり、ユニット前面のリモート/ローカル切り替えスイッチにより選択できる。リモート制御モードでは、システムコントロールユニットなどからの制御データにより自動的に制御状態の設定、変更を行う。また、ローカル制御モードでは、ユニット前面スイッチからのデータの設定により制御を行う。

第2表に追尾受信部ユニット前面パネルにおける表示項目とその内容について示す。

2.2 アンテナ駆動制御部

アンテナ駆動制御部の外観と構成図をそれぞれ第3図と第4図に、主要性能を第3表に示す。

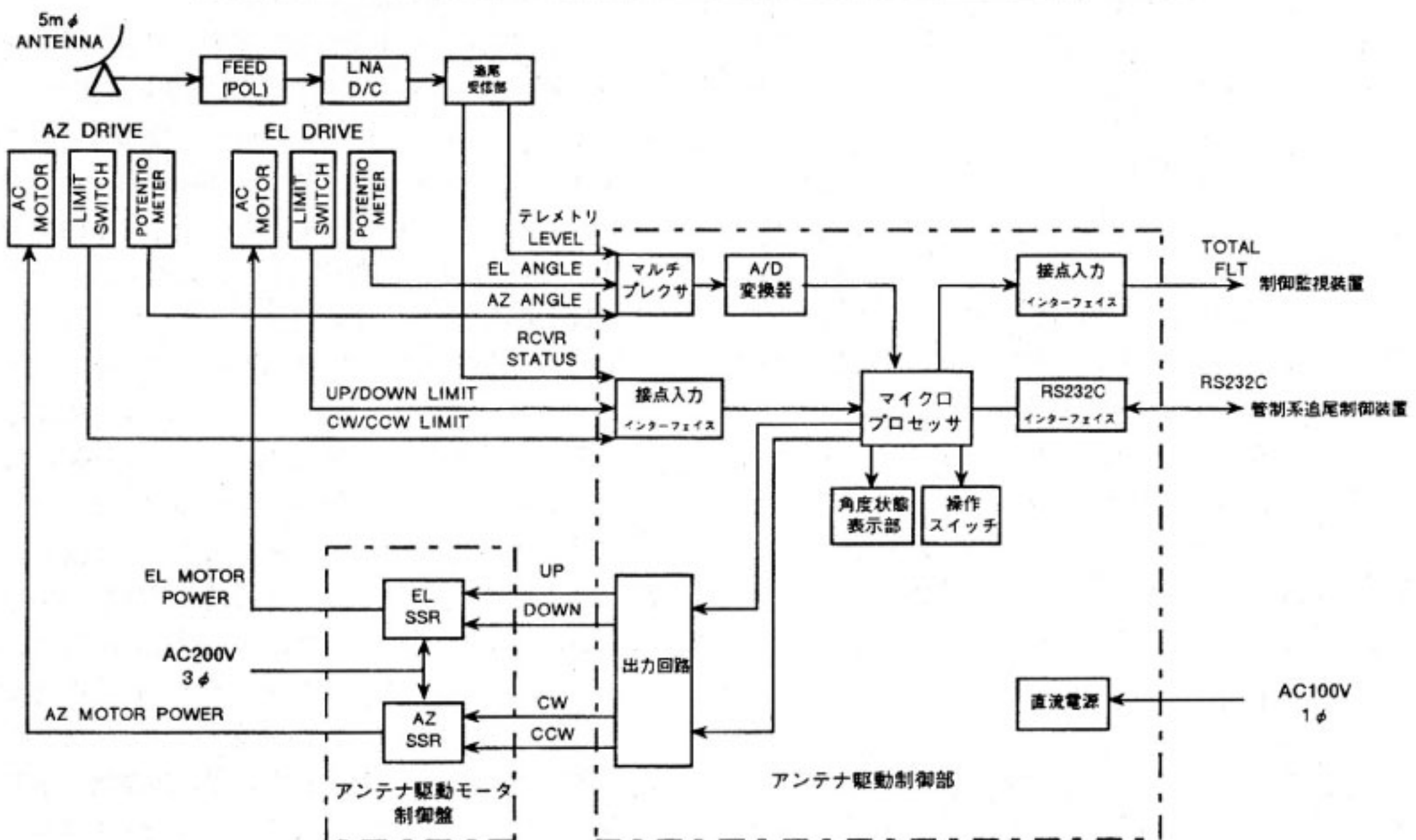
追尾モードとして AUTO, MANUAL, PRESET の3つのモードがある。AUTO モードでは追尾受信部からの受信信号が最大となるようステップトラック方式で自動追尾を行う。MANUAL モードでは Az/EI 各軸独立に手動でアンテナを駆動する。PRESET モードでは軌道計算により衛星をプログラム追尾するが、この軌道計算は管制系に含まれている追尾制御装置⁽²⁾によって行い、この装置からの指令角度によりアンテナを駆動する。



第3図 アンテナ駆動制御部外観

第3表 アンテナ駆動制御部の主要性能

追尾モード	AUTO	追尾受信部からのテレメトリ信号が最大となるようにステップトラック追尾を行う
	MANUAL	Az/EI 方向独立に手動で駆動する
	PRESET	追尾制御装置からの指令角度に応じてアンテナを駆動する
駆動速度	Az 軸	0.0073° / sec
	EI 軸	0.0058° / sec
角度表示分解能		0.01° / sec
追尾精度		0.02° rms (20m/s 平均風速時)



第4図 アンテナ駆動部構成図

AUTO モードでの信号の流れを簡単に説明すると、追尾受信部からの受信レベルとアンテナ角度情報が A/D 変換されてマイクロプロセッサに入力される。ここで軸の駆動方向などを決定し、アンテナ駆動モータ制御盤にアンテナ軸駆動信号を送る。これを受けてアンテナ駆動モータ制御部からアンテナを駆動する。

アンテナ駆動制御部は、アンテナ追尾制御に関する状態の表示と操作機能、シーケンス制御機能及びステップトラック制御機能の3つの機能を有する。

2.2.1 表示/操作機能

次の状態表示と状態の選択が可能である。

- (a) 方位角軸 (Az 軸), 仰角軸 (El 軸) のアンテナ指向角度表示
- (b) 受信レベル表示
- (c) Az 軸, El 軸のアンテナ制御系異常表示
- (d) 追尾モードの選択・表示
- (e) MANUAL モード時の Az 軸, El 軸の駆動選択・表示およびリミット表示

2.2.2 シーケンス制御機能

アンテナ駆動及び追尾制御に関する全体のシーケンスの管理を行う。マイクロコンピュータを使用して追尾モード選択、駆動指令制御を行い、ステップトラック制御用信号、モータ駆動信号、アンテナ駆動制御部の動作状態を出力している。

2.2.3 ステップトラック制御機能

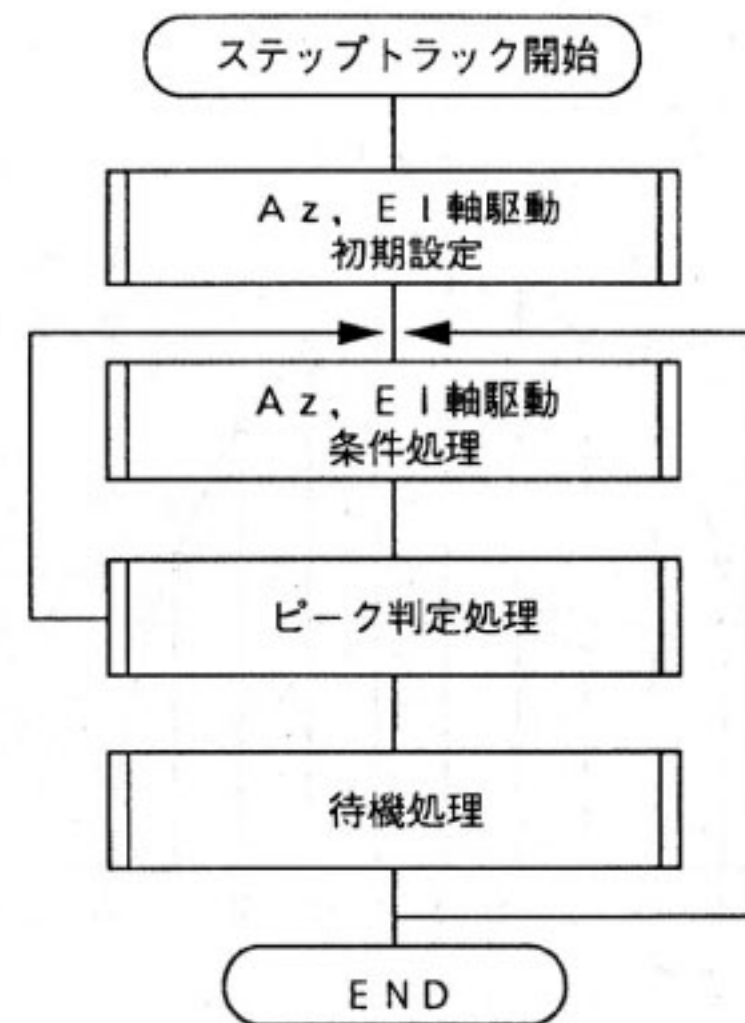
自動追尾制御方式としてステップトラック制御方式を用いている。これは、追尾受信部より入力されるアナログ受信信号を A/D 変換し、アンテナ駆動前の受信信号レベルと駆動後の受信信号レベルとを比較し、受信信号レベルが最大になるようにアンテナ駆動部を制御し、自動追尾を行うものである。ステップトラック制御のフローチャートを第5図に示す。アンテナの駆動は Az 軸, El 軸を交互に行ない、それぞれ駆動前後の受信信号レベルを比較し、駆動後にレベルが増加していれば次回の駆動方向を同方向に、減少していれば逆方向に決定する。

(a) Az, El 軸駆動初期設定

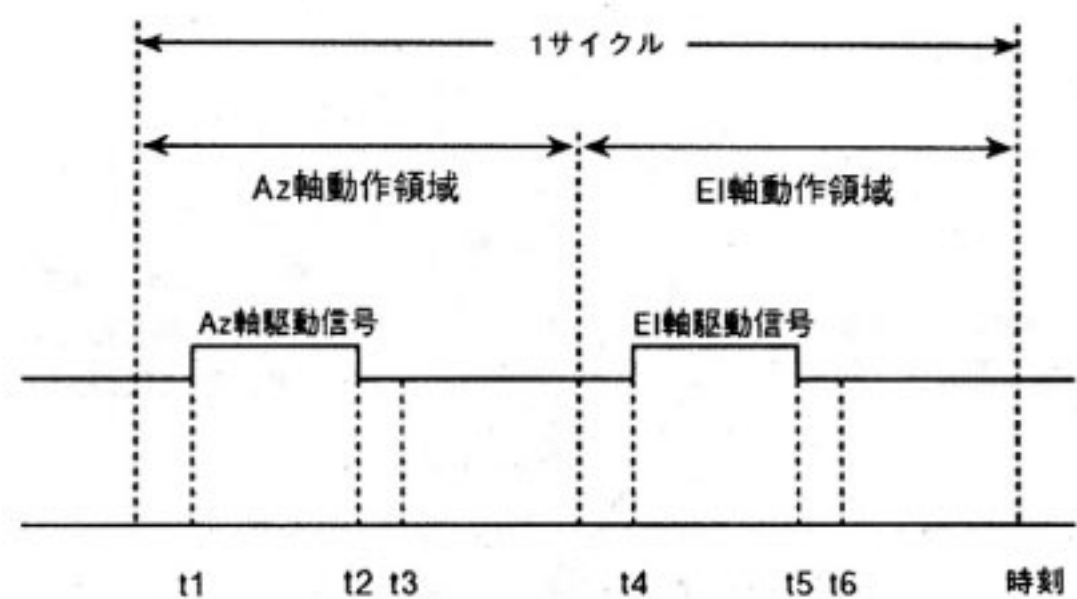
ステップトラック開始時には最初の Az 軸及び El 軸の駆動方向とともに受信レベルが増加する方向にするため、1軸の駆動で受信レベルが低下した場合には、他方の軸の駆動を禁止し、前者の軸を元の位置に戻した後に後者の軸を駆動する。両軸の駆動方向が決定した後次の処理に移る。

(b) Az, El 軸駆動条件処理

ステップトラック追尾中の Az, El 軸の駆動方向決定のための条件処理の1サイクルの様子を第6図に示す。



第5図 ステップトラックフローチャート



第6図 Az/El 軸駆動制御信号の送出タイミング

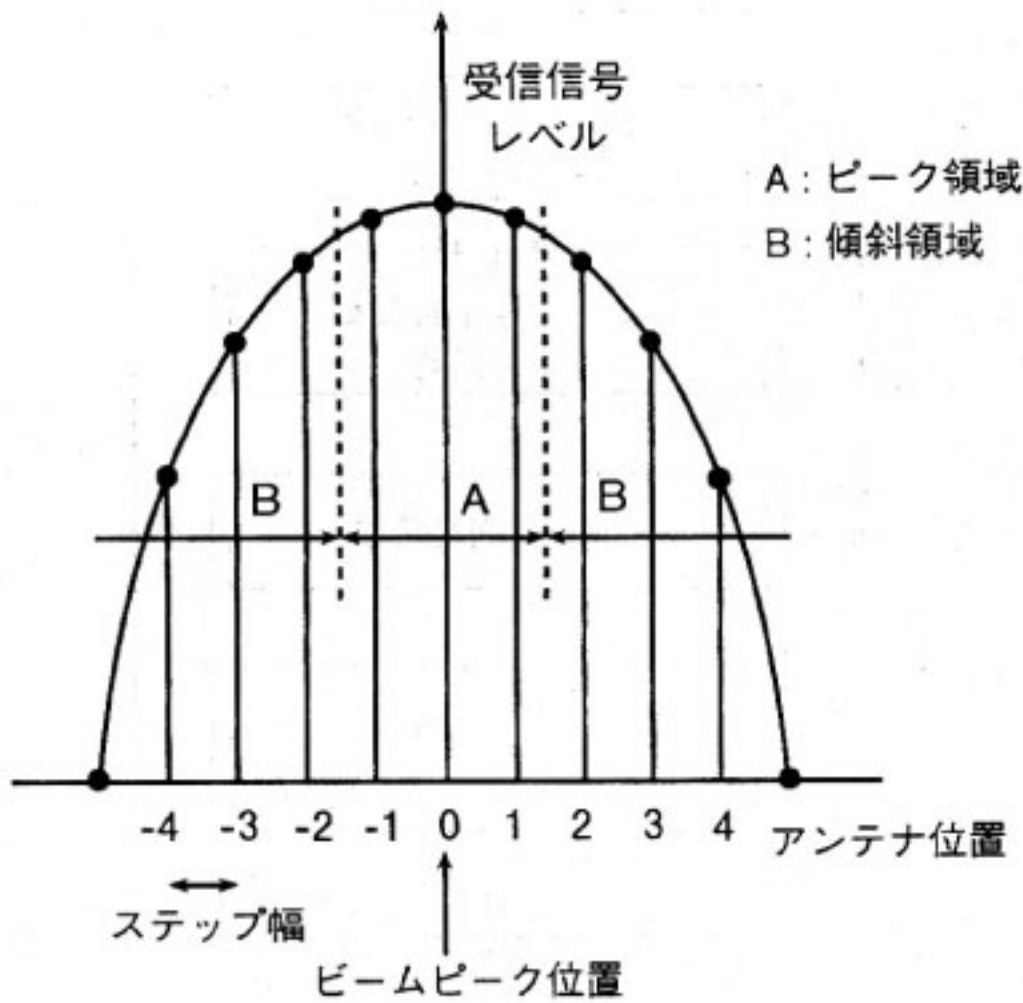
時刻 t_1 に Az 軸駆動信号が送出されると、この時刻 t_1 での受信レベルがアンテナ駆動前の受信レベルとしてメモリ領域1に記憶される。時刻 t_2 に Az 軸駆動信号は停止するが、モータ制動時間遅れによりアンテナは時刻 t_3 で停止する。この時刻 t_3 の受信レベルが駆動後の受信レベルとしてメモリ領域2に記憶される。このアンテナ駆動前後のレベルを比較して次の Az 軸の駆動方向を決定する。

次に時刻 t_4 にて El 軸駆動信号が送出されると Az 軸と同様の動作が繰り返されて次回の El 軸の駆動方向が決定される。

以上のサイクルがアンテナがビームピーク位置を補足するまで繰り返される。

(c) ピーク判定処理

受信ビームのピーク判定は、以下のようにして行われ



第7図 受信レベルパターンとアンテナ位置

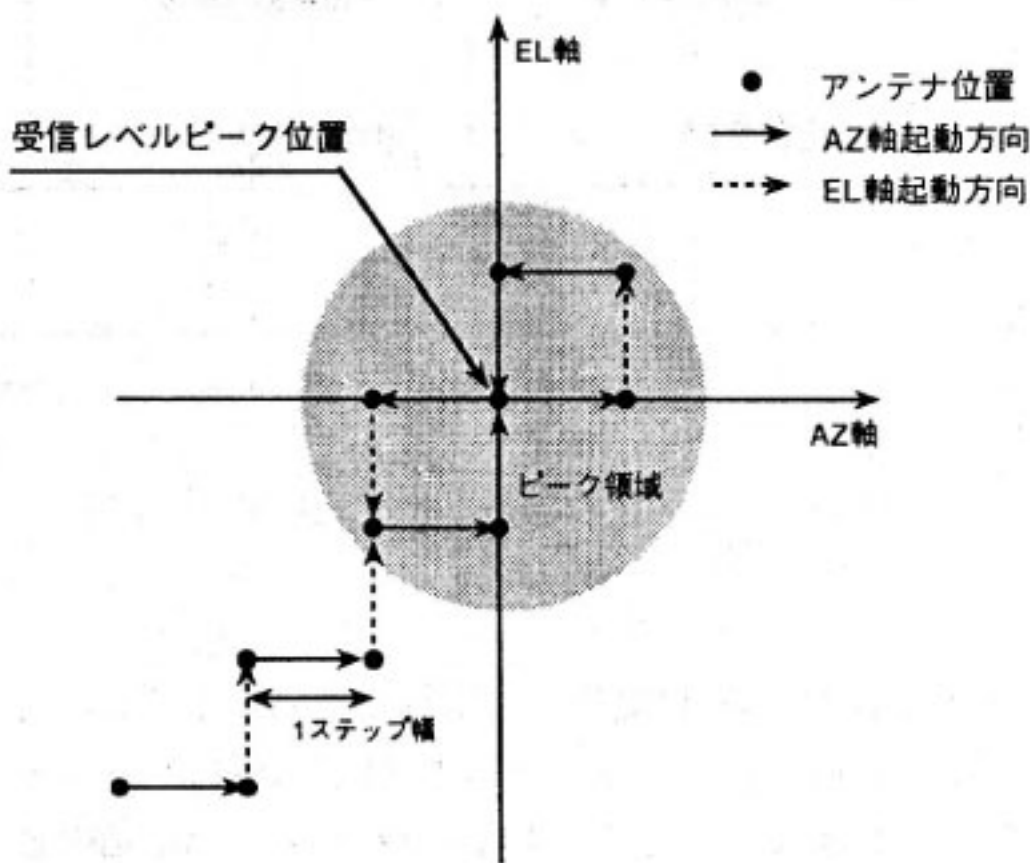
る。第7図に受信レベルパターンとアンテナ位置関係を示す。アンテナが衛星方向（ピーク位置）に向かって駆動されるときには、駆動毎に受信信号レベルが増加し、ピーク位置に達すると次の駆動により受信信号レベルは減少する。このときからピークの判定が開始される。アンテナがピーク領域（図中領域A）に連続して各軸6回存在するとアンテナは追尾を終了し、ピーク位置で停止して待機状態となる。もしピーク判定時に傾斜領域（図中領域B）にアンテナが移行した場合には、ピーク判定処理を中止し、Az, El 軸駆動条件処理に戻る。ただし、領域Aはステップトラックの約2ステップの幅に相当する。ステップトラック駆動の典型的なパターンを第8図に示す。

(d) 待機処理

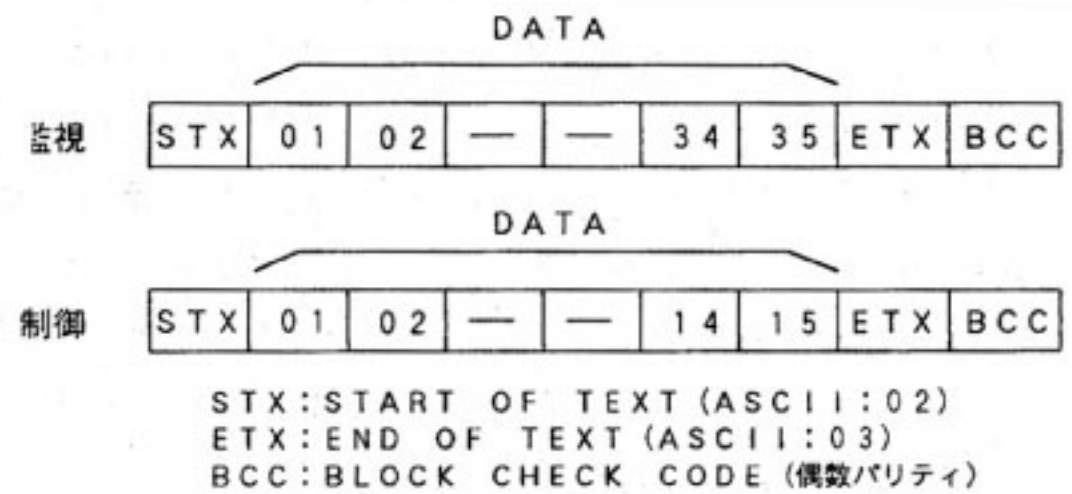
待機状態となったアンテナはあらかじめ決めておいたトラッキングインターバル時間を経過すると再び追尾状態に切換えられ、ステップトラック追尾を開始する。トラッキングインターバル時間は本装置では任意に設定することが可能であり、衛星の軌道制御状況、すなわち衛星の見かけの運動の程度に応じて決められる。

2.2.4 シリアルインターフェース

アンテナ駆動制御部は、RS232C/RS422 変換器を介して管制系に含まれている追尾制御装置⁽²⁾と接続され、アンテナ制御情報の監視と PRESET モード時の制御が行える。主なインターフェース条件を第4表に、監視制御データのフォーマットを第9図に示す。



第8図 ステップトラック駆動パターン



第9図 監視制御データのフォーマット

第4表 管制系追尾制御装置とのインターフェース条件

インターフェース方式	RS-232C 全2重, 調歩同期	
伝送速度	9600bps	
キャラクタフォーマット	キャラクタ長	7ビット
	スタートビット	1ビット
	パリティビット	1ビット (偶数パリティ)
	ストップビット	1ビット
	合計	10ビット/キャラクタ
手順	無手順 互いの伝送周期にてデータ送出する	

RS232C による 9600 bps 全 2 重調歩同期の伝送により、監視および制御とも 1 秒ごとのブロックデータ伝送が行なえる。主な監視項目は、Az/EI 軸の現在の角度、MANUAL/PRESET モード時の Az/EI 軸指定角度、選択衛星、追尾モード、テレメトリ受信レベルなどで、主な制御項目は、Az/EI 軸角度である。

2.3 アンテナ駆動モータ制御盤

アンテナ駆動モータ制御盤は、アンテナ駆動制御部より発生するモータ駆動信号により、ソリッドステートリレー (SSR) を開閉し、3 相誘導電動機に供給するモータ電源を可逆転 ON/OFF 制御するものである。

ソリッドステートリレーは、零電圧検出型を用いているので、スイッチ ON 時のサージを小さく押さえることができる。また、短絡と過負荷保護のために、サーキットブレーカーとサーマルリレーが装備されている。

3. おわりに

本論文では ETS-VI 用フィーダリンク地球局のアン

テナ追尾制御装置の性能、機能及び制御アルゴリズムについて述べた。この装置では、ETS-VI に対してはテレメトリ信号を、CS に対してはビーコン信号を用いてステップトラック方式で自動追尾を行うことができる。

追尾精度は 0.02° rms で、この追尾精度とアンテナのビーム幅 (0.2°) から追尾エラーロスを見積もることができ、0.2 dB 程度となる。

参 考 文 献

- (1) “実験用中容量静止通信衛星 (CS)・実験用中型放送衛星 (BS) 計画と電波研究施設特集号” 電波季, **24**, 131, 1978年12月.
- (2) 鈴木, 小園, 木村, 若菜, “フィーダリンク地球局追尾制御装置”, 通信総研季, **90**, 2, pp. 233-236, 1994年6月.

