

7. 鹿島降雨レーダ

——降雨強度分布測定装置とその特性——

田中 浩* 手代木 扶** 阿波加 純***

篠塚 隆*** 小池 国正****

1. ま え が き

降雨強度分布測定装置は、通常の気象用レーダの機能に降雨強度を定量的に測定できる機能を付加した装置のことである⁽¹⁾。本装置を鹿島支所に設置した目的は、現在、既に我が国初の静止衛星として電波を送り続けているETS-II衛星、更に今後一連の打上げが予定されているCS、BS及びECSの各衛星の実験計画の重要な部分を占める伝搬実験において、ミリ波や準ミリ波の降雨減衰を調べるために、各衛星と地上局を結ぶ電波伝搬路に沿う降雨強度分布を測定するとともに、周囲の降雨情況をも必要に応じて観測することである。

従来、電波の降雨減衰実験では、地上に設置された雨量計で降雨強度を測定してきた。雨量計は依然として広範囲に使われているが、測定領域が電波の伝搬路に沿っているという保証がない。気象用レーダを使用すれば伝搬路上を測定領域とすることはできるが、レーダは雨量計のような直接測定装置ではなく遠隔測定装置であるために、降雨強度をレーダ反射因子(Z因子)との関係や装置の諸定数を明確にしなければならない。降雨強度と反射因子との関係を決めるために数多くの観測がなされてきたにもかかわらず、降雨タイプによってかなりの差がある。鹿島支所でも同様の実験が行われたが、これについては阿波加ほか⁽²⁾によってまとめられているので参照されたい。

レーダ波は雨滴ばかりではなく周囲の地形や建築物などによっても散乱される。これはグランド・クラッタと呼ばれているが、特に低地にレーダを設置する場合は、そのために雨域からの散乱波が消されてしまうことが多い。鹿島支所の周囲はなだらかな松林の丘陵が続き、海岸にはコンビナートの巨大な煙突や建築物が連なり、決して良い設置条件ではない。本装置を鹿島支所に設置す

ることを決定した時点で課せられたテーマは、悪い設置条件のもとで、観測に値するデータをどのような手段で取得するかということであった。それに対する解答の第1は、塔を建ててレーダアンテナをその上に設置することであった。鹿島地方の丘陵は数十mの起伏しかないので、10mを越す塔を建てるだけでも眺望は格段に良くなると考えられた。解答の第2として、従来のPPI(Plan Position Indication)方式をやめてCAPPI(Constant Altitude PPI)方式^{(3),(4)}を採用したことである。CAPPI方式というのは、レーダアンテナでほぼ全天をスキャンしてデータをコンピュータに記憶しておき、最後に任意の高度面のデータだけを取りだしてマップを作る方式である。第3の解答として、晴天時のグランド・クラッタをあらかじめ測定しておいて、時々刻々得られるデータ値から差し引くことを考えた。このように3段階のクラッタ除去操作を行った結果、十分解析に値するデータを得ることに成功した。

気象用レーダを伝搬実験と組み合わせて使う場合、アンテナのスキャン形式は従来のものに比べて複雑にならないを得ない。したがって、本装置の特色の一つが比類のない機能の多様性にあるのは当然である。スキャン形式の中でも伝搬路上の降雨強度を求めるモード(P_m モードと呼ぶ)は、伝搬実験には最も重要である。このほかに仮局を想定して、その地点と衛星を結ぶ路上の降雨強度を求めるモード(P_s モードと呼ぶ)や、任意の方位の鉛直断面内の反射因子を求めるモード(RHIモードと呼ぶ)のデータが得られる。二つの高度面のCAPPIモードのデータを含めて、これらのモードのデータがコンピュータと連動して効率的に取得できるようになっている。

グランド・クラッタ除去や多モード機能を支えるものはコンピュータによる本装置全体の集中監視と完全プログラム制御である。近年、特に発達の著しいデジタル処理技術とソフトウェアシステムこそ従来のアナログ式気象用レーダに対して本装置の面目を躍如たらしめて

* 第二特別研究室

** 衛星研究部 通信衛星研究室

*** 鹿島支所 第一宇宙通信研究室

**** 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

いる。

気象用レーダを使って降雨強度を測定する試みは近年世界各国で行われるようになった。西ドイツ⁽⁵⁾でも面積雨量を測定して洪水警報等に利用する目的で降雨強度の量的測定が行われている。カナダのマギル大学のグループは以前から伝搬実験のためのレーダシステム^{(4), (5)}を開発してきており、最近地上マイクロ回線の伝搬実験に応用して成果を得ている。米国でもATS-6衛星を使用した20及び30GHzミリ波の伝搬実験⁽⁶⁾では、ロスマン地球局に降雨レーダを設置して地上の雨量計との比較測定を行っている。我が国でもKDDに設置された2周波レーダ⁽⁷⁾を使った降雨減衰の実験が既に行われているが、Z-R関係におけるパラメータの設定を含めたデータの蓄積が望まれている。以上述べたように、気象用レーダによる降雨強度の定量的測定は今後ますます発展してゆく機運にある。

本論文では2.で降雨強度の算出方式が、3.で本装置の構成と概要が、4.で本装置の多様な機能が、5.で本装置の運用体系が詳細に説明される。

2. 降雨強度の算出方法

気象用レーダの受信電力を決めるレーダ方程式は次のように書ける。⁽⁸⁾

$$\bar{P}_r = \frac{CF^2Z}{r^2} \times 10^{-0.2 \int_0^r (K_r R^\alpha + K_a) dr} \dots\dots(1)$$

ただし

\bar{P}_r ; 受信電力の平均値 [W]

C ; レーダの諸元により定まる定数

F' ; 補正項

Z ; レーダ反射因子 [mm⁶/m³]

r ; 反射点までの距離 [km]

$K_r R^\alpha$; 降雨による減衰係数 [dB/km]

K_a ; 大気による減衰係数 [dB/km]

である。レーダ反射因子 Z 及び定数 C は次のように与えられる。

$$Z = BR^\beta \dots\dots(2)$$

$$C = \frac{P_t G_0^2 h \theta_0^2 \pi^3}{2^{10} (\log_e 2) \lambda^2} \cdot \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \times 10^{-17} \dots\dots(3)$$

ここで B, β は雨のタイプによって決まる定数で、 Z を mm⁶/m³, 降雨強度 R を mm/h の単位で表すと B は 70~400, β は 1~2 の間の値を取ると言われており、平均的な雨では $B=200, \beta=1.6$ である。また C における内容は

P_t ; 送信電力 [kW]

$G_0=10^{G/10}$; アンテナゲイン [G =dB]

$h=c\tau$, τ ; パルス幅, c ; 光速 [h =m]

θ_0 ; ビーム幅 [ラジアン]

λ ; 波長 [cm]

ϵ ; 雨滴の複素誘電率

である。これらの具体的な数値は第3表より次のように与えられる。

$$P_t = 250 \text{ [kW]}$$

$$G = 40.8 \text{ [dB]} \rightarrow G_0 = 1.202 \times 10^4$$

$$h = 2.998 \times 10^8 \text{ [m/s]} \times 0.5 \times 10^{-6} \text{ [s]}$$

$$= 1.499 \text{ [m]}$$

$$\theta_0 = 1.41 \text{ [deg]} = 2.46 \times 10^{-2} \text{ [rad.]}$$

また

$$\left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 = 0.93$$

$$\lambda = 5.625 \text{ [cm]}$$

これらの数値を式(2)に代入すると $C = 4.212 \times 10^{-11}$ となる。

本装置で使用する周波数 (5 GHz 帯) では式(1)における減衰項を無視できる。両辺の対数をとる

$$10 \log Z = 10 \log \bar{P}_r - 10 \log CF^2 \dots\dots(4)$$

デシベル単位に直すととなる。実際には対数増幅器を通したあとで受信電力の平均を行っているので、式(4)は次のように書くことができる。

$$10 \log Z = 10 \log \bar{P}_r + 20 \log r - 10 \log CF^2 \dots\dots(5)$$

いま P_r の確率分布を指数分布と仮定すると

$$10 \log \bar{P}_r = 10 \log \bar{P}_r - 2.5 \dots\dots(6)$$

なる関係が得られるので、これを式(5)に代入して式(4)を考慮すると

$$10 \log F = 10 \log F' - 2.5 \dots\dots(7)$$

となる。ここで F を四つの部分に分ける。すなわち

$$10 \log F = 10 \log F_1 + 10 \log F_2 + 10 \log F_3 + 10 \log F_4 \dots\dots(8)$$

これらはそれぞれ次のように説明できる。

$10 \log F_1$; 導波管系損失 [-6.3 dB]

$10 \log F_2$; 地上雨量計との比較により求めらる伝搬路に原因をもつ補正項 [-9.8 dB]

第1表 T-R管の放電による損失

距離 (km)	10 log F ₄ (dB)
0.25	-12.5
0.5	-4.5
0.75	-1.8
1.0	-0.8
1.25	-0.5
1.5	-0.5
1.75	-0.5
2.0	-0.2

$10 \log F_3$; 式(7)における -2.5 dB

$10 \log F_4$; T-R管 (送受切替管) の放電による影響。 $r \geq 2 \text{ km}$ で無視できる。

第1表参照。

結局全体として $10 \log F = -18.6 \text{ dB}$ である (ただし $r \geq 2 \text{ km}$)。

なお, F_1, F_2 については阿波加ほか⁽²⁾ を参照されたい。

本装置のデジタル処理システムでは $10 \log \overline{P_r}$ は次のようにして求めている。

$$10 \log \overline{P_r} = A_1 P_0 + A_2 + P_s - 30 \quad \dots\dots(9)$$

ここに

P_0 ; 8 bit の A/D 出力 (0~255)

A_1 ; 1 bit の重み (0.3152)

A_2 ; $P_0=0$ のときの受信電力 (-104.4 dBm)

P_s ; 送信電力偏差 ($P_s = 10 \log \{P_t/250\}$, $P_t = [\text{kW}]$)

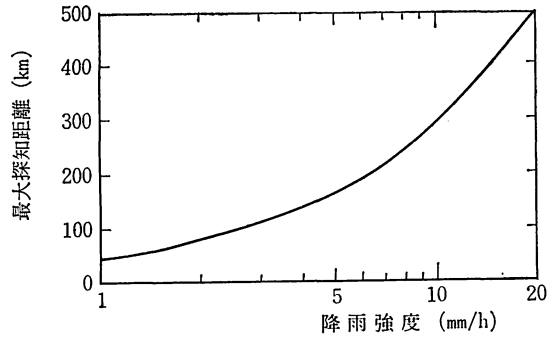
また式(9)の最後の -30 は dBm を dBW に換算するためのものである。

以上で $\log Z$, すなわちレーダ反射因子 Z が求まり, これより式(2)を用いて降雨強度を算出できる。

次に最大探知距離を求める。既に与えられた数値を代入して式(5)を変形すると

$$\log r = \frac{\log Z - \log \overline{P_r} - 12.24}{2} \quad \dots\dots(10)$$

となる。最小受信感度は $-102.7 \text{ dBm} = -132.7 \text{ dBW}$, したがって $\log \overline{P_r} = -13.27$ となり, $Z = 200R^{1.6}$ として降雨強度に対する最大検知距離 r_{max} を求めると第1



第1図 降雨量に対する最大探知距離の関係

第2表 降雨強度分布測定装置の一般的性能

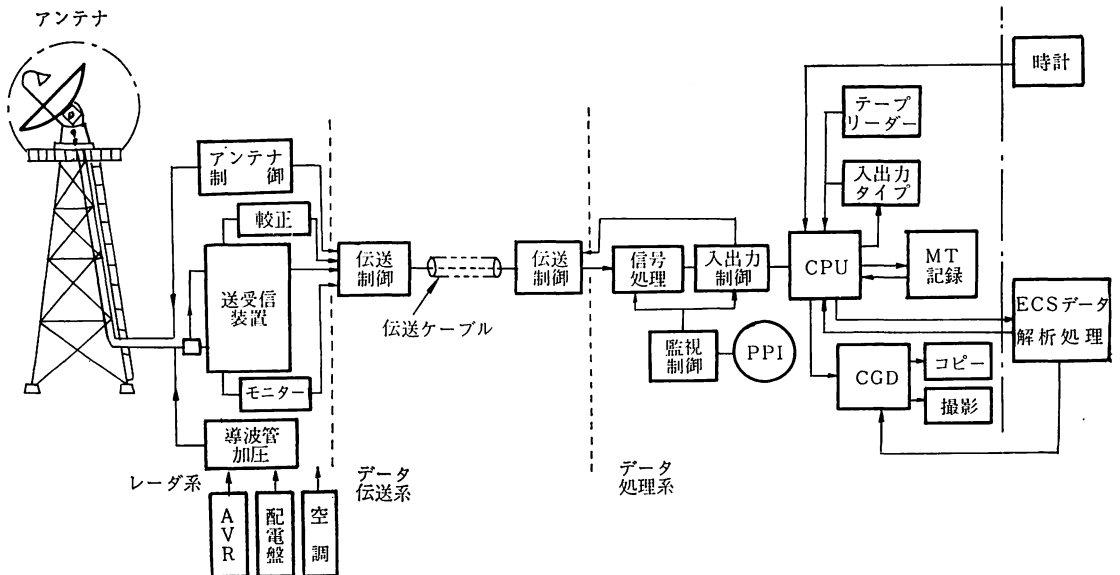
項目	性能
使用周波数	5330±10 MHz
最大探知距離	100 km 以上 (但し観測対象降雨量 1 mm/h で)
最小探知距離	300 m 以下
平均化パルスヒット数	32 以上
最小データ取得間隔	250 m 以下
雨量強度観測可能量	最小 0.1 mm/h, 最大 150 mm/h

図のようになる。この図より 100 km 先の最小検知降雨強度 R_{min} (100 km) は

$$R_{\text{min}}(100 \text{ km}) = 2.6(\text{mm/h})$$

となることが分かる。

以上はクラッタの影響を無視しているが, ソフトウェア



第2図 システム系統図

第3表 レーダ系の性能

項目	性能
アンテナ装置	
直径	3 mφ 円形パラボラ
偏波	水平偏波
利得	40.8 dB (5330 MHz)
ビーム幅 (電力半値幅)	1.41° (水平面内) 1.43° (垂直面内)
第1 サイドロープレベル	-25 dB以下 (レドーム設置下において)
レドーム直径	7 m
耐風速性	65 m/s (瞬間最大風速)
電力透過率	平均 90% 以上 最少 85% 以上
サイドロープレベルの上昇	サイドロープを上昇させる散乱波レベルは、主ビームより 28 dB 以下
ビームシフト	±0.1° 以下
定在波比	1.4 以内
塔高	13 m
アンテナ制御装置	
アンテナ指向範囲	方位角 0~360°, 仰角 0~90° (プログラム制御方式, 2軸独立走査可)
指向精度 (3σ 値)	±0.3°
駆動速度	方位角 6 rpm (最小値) 仰角 7.9°/sec
指向角度読取り精度	0.1°
指向指令信号	方位角 14 ビット, 仰角 12 ビット
送受信装置	
尖頭出力	250 kW
パルス幅	0.5 μsec
繰返し周波数	900 pps
中間周波数	30 MHz
受信帯域幅	2.25 MHz
雑音指数	7.7 dB
最小受信電力	-102.7 dBm
対数増幅器直線性	75 dB の範囲にわたって 0.5 dB 以内



第3図 レーダ系の外観図。手前がレーダシェルタ。

アでは P_m モード, CAPP I モードともクラッタを除去することができるよう設計されている。

3. 装置の構成と概要

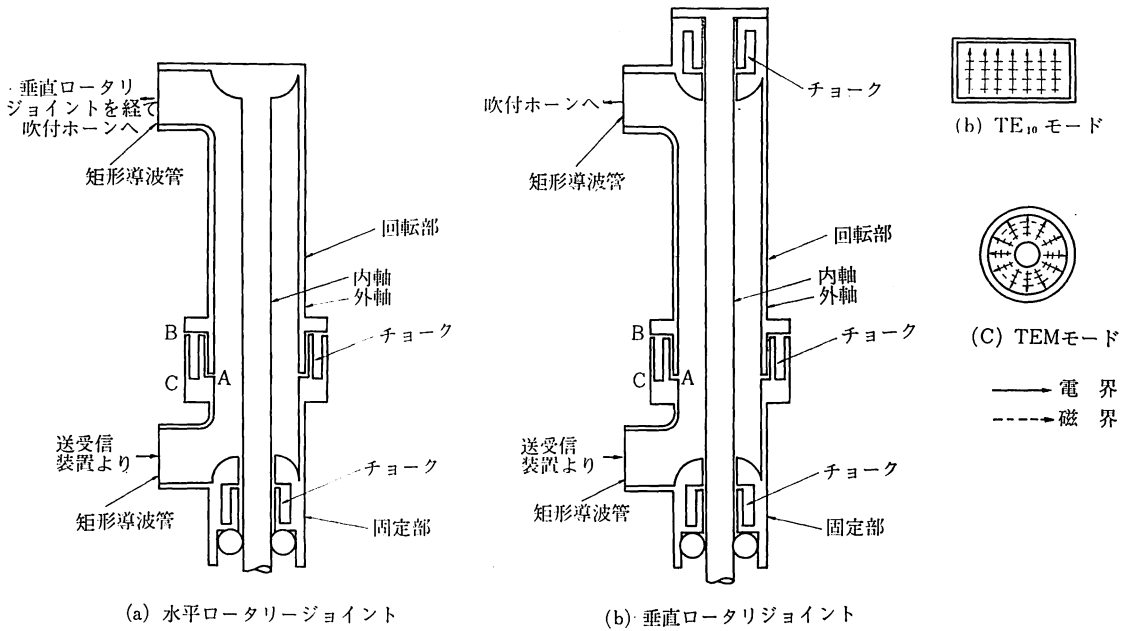
本装置の全体的な系統は第2図に示されるように大別してレーダ系, 伝送系及びデータ処理系から構成され, その一般的性能は第2表に示される。

3.1 レーダ系

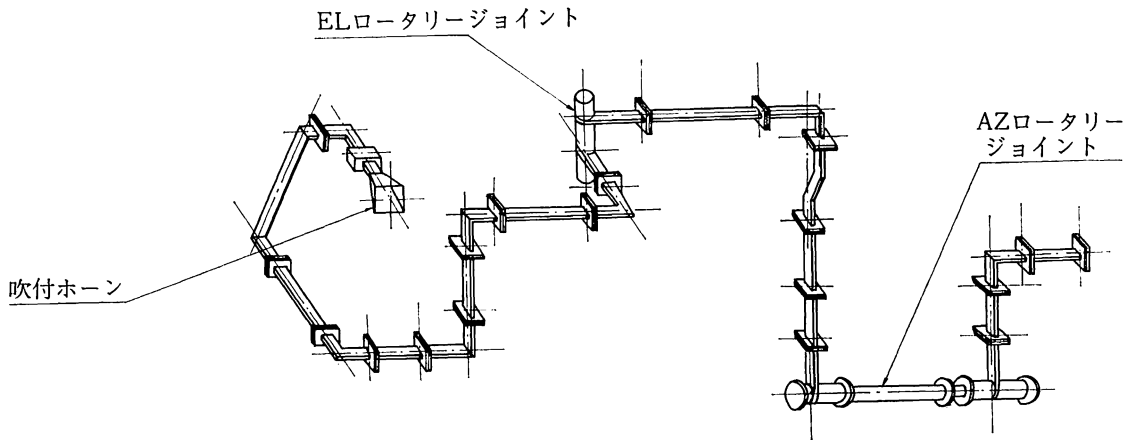
レーダ系はアンテナ装置, アンテナ制御装置, 送受信装置等から構成されており, 外観を第3図に示す。レーダ鉄塔の高さは約 13 m で, 直径 7 m のレドーム内に直径 3 m のアンテナが納まっている。送受信装置, アンテナ制御装置等は移動可能なシェルタ内に収納され, レーダ鉄塔のすぐ隣りに設置されている。レーダ系の性能を第3表に示す。

アンテナ装置では, 送受信装置から送られてくるマイクロ波を水平, 垂直各1個のロータリジョイントを通して一次放射器に送り, 反射鏡に反射させて空間に放射する。アンテナは水平, 垂直の2方向に回転するので, マイクロ波伝送路は矩形導波管から軸対称のモードを与えるような伝送系に変換しなければならない。本装置では同軸管を使用し, 回転結合部を単純化した。第4図に示

すように, 矩形導波管内を進行する TE_{10} モードを同軸線に TEM モードに変換している。第5図に導波管系の接続図を示す。アンテナは 3 mφ のパラボラ反射鏡と吹付けホーンよりなる。反射鏡は直径 3 m, 焦点距離約 1 m の回転放物面で, 骨組は耐食アルミニウムの溶接構造とし, 鏡面にはアルミニウムパンチドメタルを使用しており, また, 吹付けホーンはその開口部をマイカ板で覆っている。アンテナの外観を第6図に, そのパターンを第



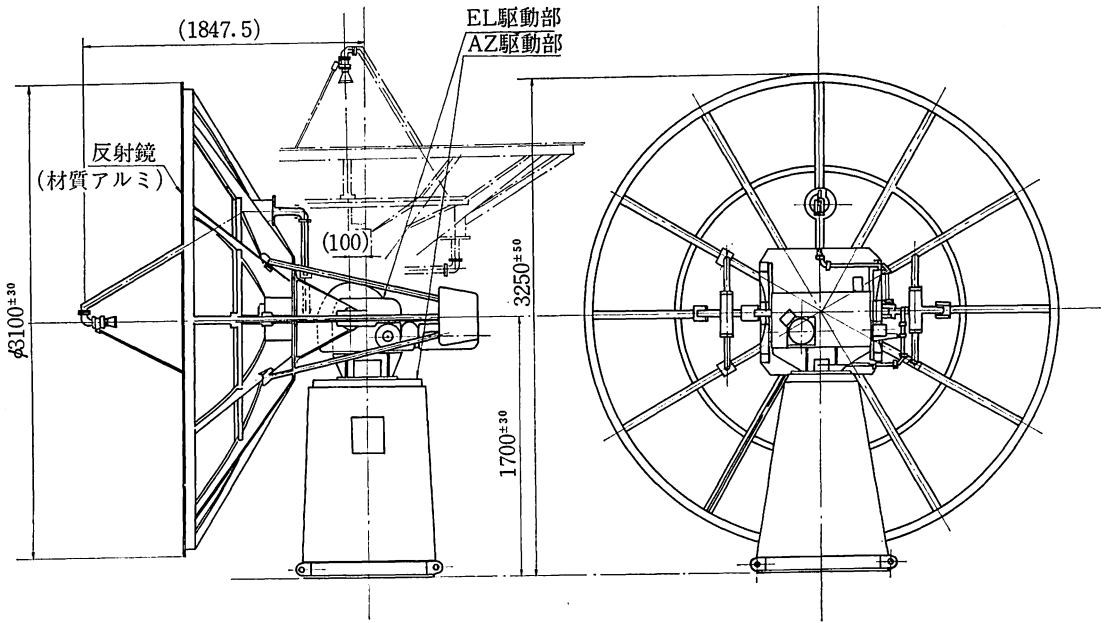
第4図 ロータリジョイント



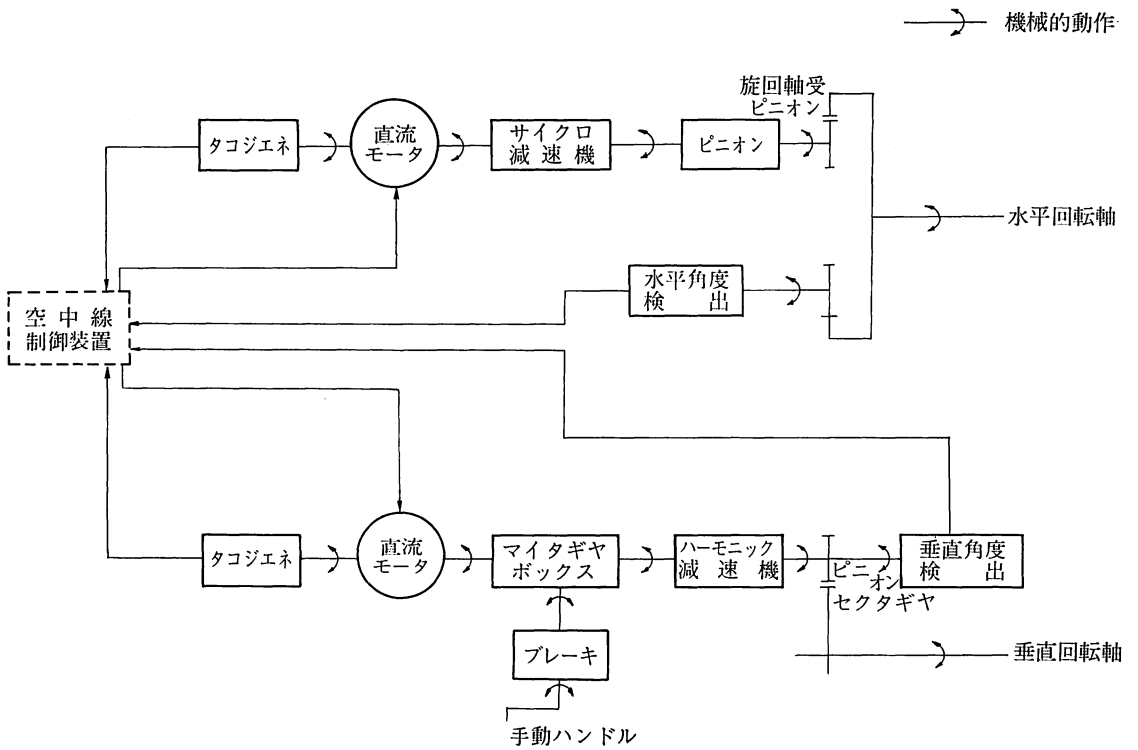
第5図 導波管系接続図

7図に示す。レドームはアンテナを風圧、ちり、雨等から保護するためのもので、ガラス繊維を基材にした2枚の薄いポリエステル樹脂板の間にウレタンフォームのコアをはさんだサンドイッチ板からできているパネル(2種、24枚)をボルト、ナット等で組み立ててある。天頂には換気口が取付けられ、その上に避雷針を立ててレドームを保護している。パネルの接合部はコーキングを施して防水しており、パネル表面には電波特性に優れた耐候性樹脂をコーティングしている。第8図はアンテナ駆動部の系統図である。水平駆動部では、駆動用DCモータによってサイクロ減速機に回転を伝え、減速されてピ

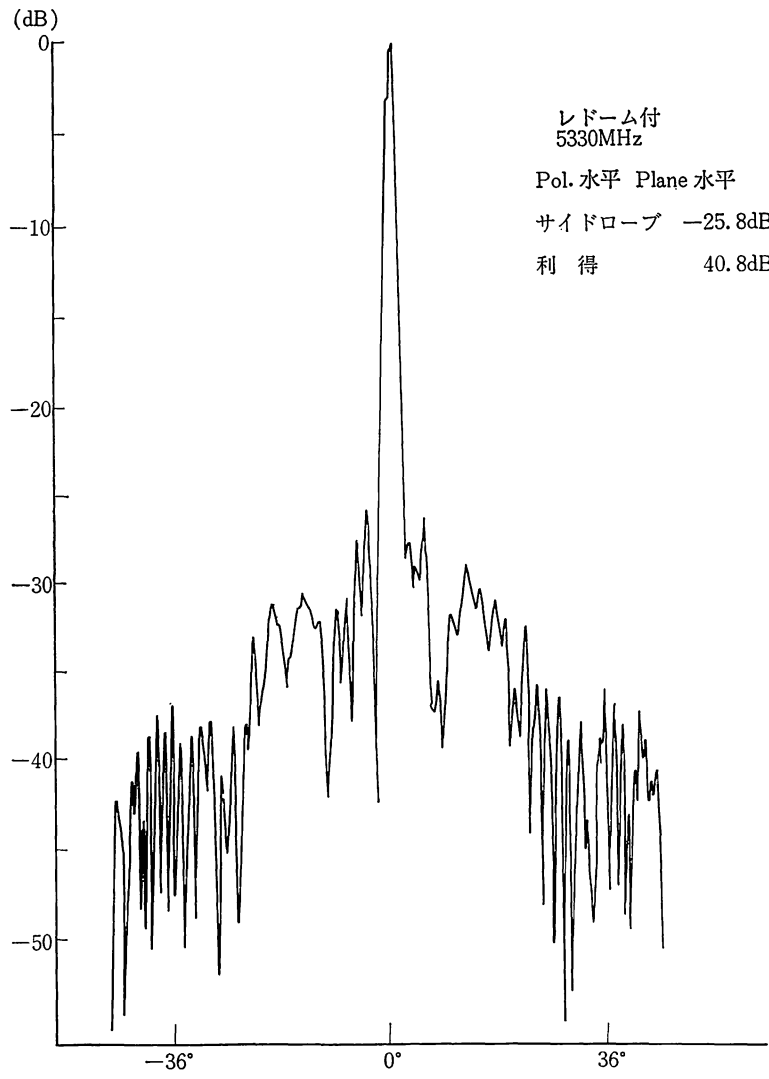
ニオンを回転する。ピニオンは水平回転軸になっている旋回軸受の外側にある A_2 歯車にかみ合っており、旋回軸受を回転させる。角度検出部は A_2 歯車とかみ合っていて、水平回転軸と1:1のシンクロと1:36のシンクロがあり、空中線制御装置に空中線の方位角を伝送する。垂直駆動部では、駆動用DCモータによってマイタギャボックスの入力軸が回転され、出力側は2方向に別離し、片側はブレーキにつながっており、もう一方はハーモニック減速機を回転させる。減速されたハーモニック減速機の出力軸にピニオンがあり、そのピニオンにセクターギヤがかみ合っていて垂直回転軸を回す。ブレー



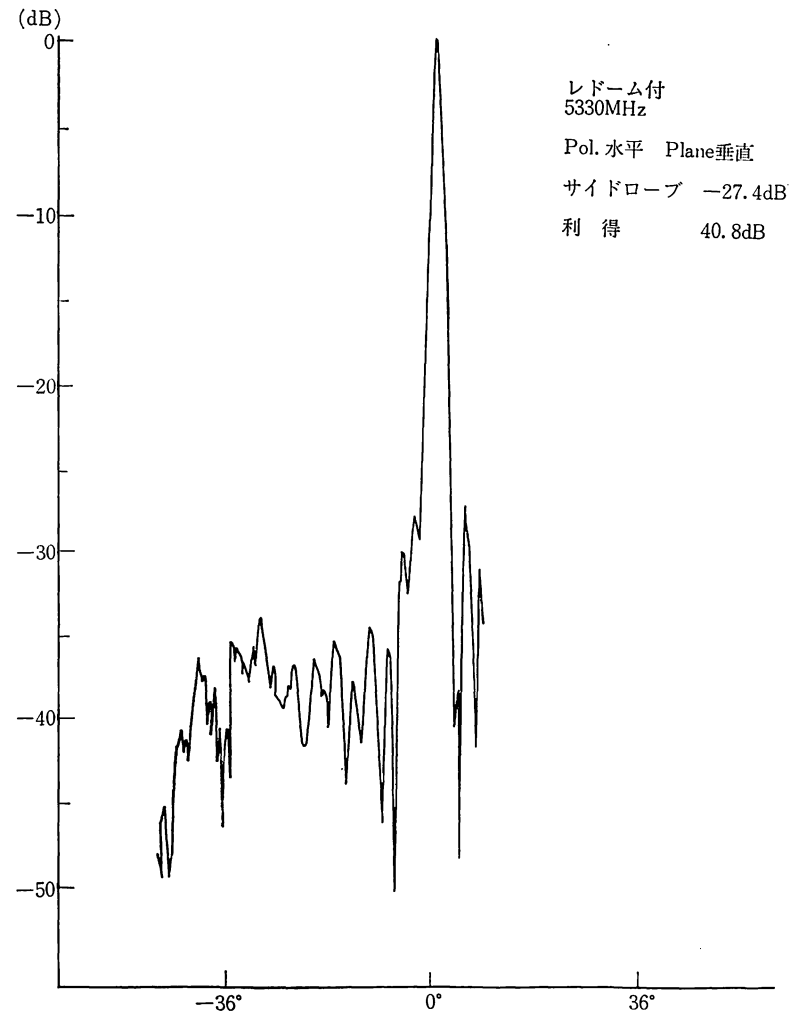
第6図 アンテナ外観図



第8図 アンテナ駆動部系統図



第7図(a) アンテナパターン

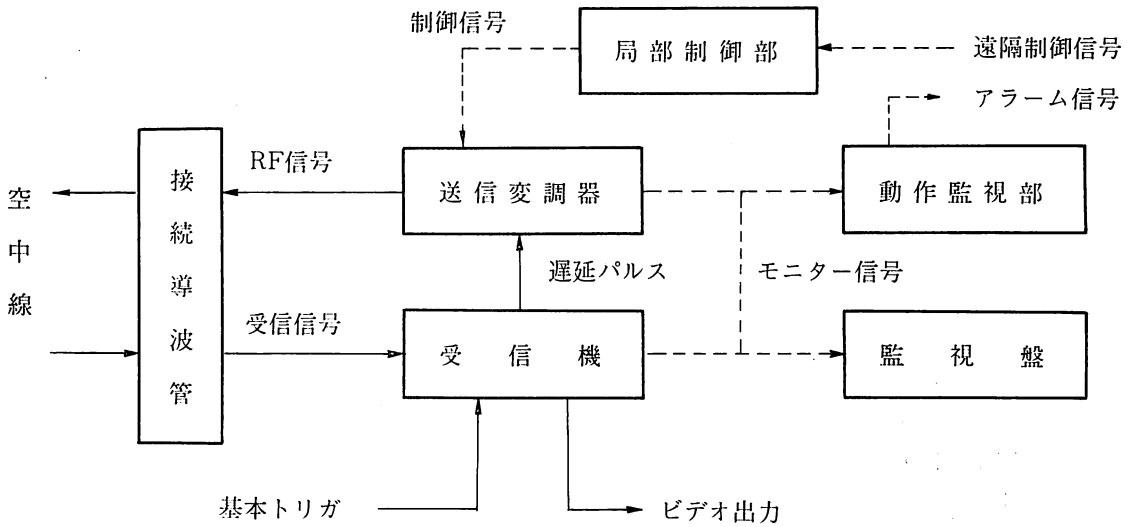


第7図(b)

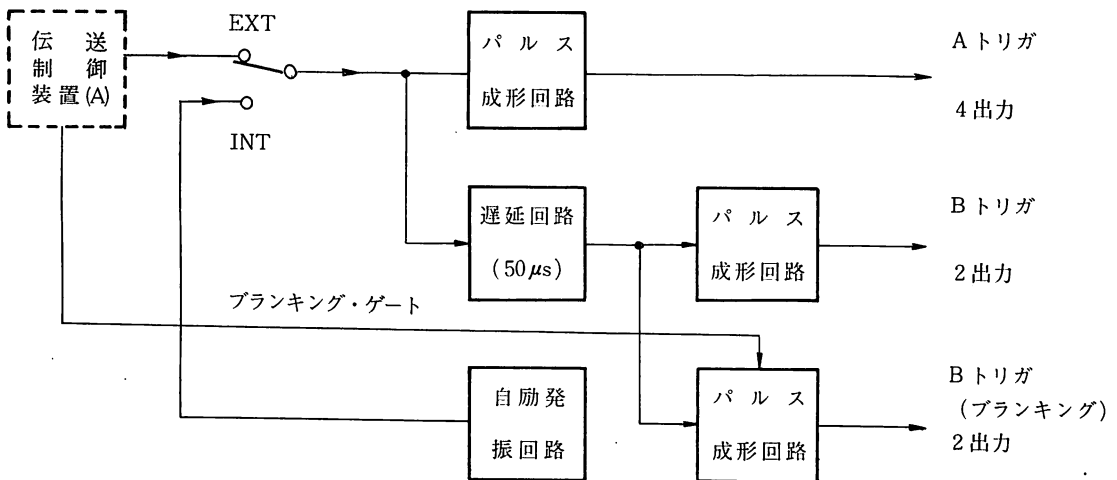
キはスプリング制動式を使用しており、電源が切断すればスプリングによりブレーキに力が加わり、空中線のオーバーランを防ぐ。角度検出部は水平角度検出部と同様である。このほか、電波を停止させる仰角 ($0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 以下) で働くカムとスイッチがあり、 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の範囲までカムを調節することにより電波を停止させることができる。

アンテナ制御装置は、データ処理系の中央処理装置から送られてくる P_m , P_s , C 及び R の各モード制御信号と、 A_z , E_l のデジタル角度データを受け各モードに対応したアンテナ駆動信号を発生し、それによってアンテナを制御する装置である。方位角は $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 、仰角は $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ まで設定できる。 P_m モード及び C モードのときは、誤差信号として負の一定の直流電圧が直流増幅

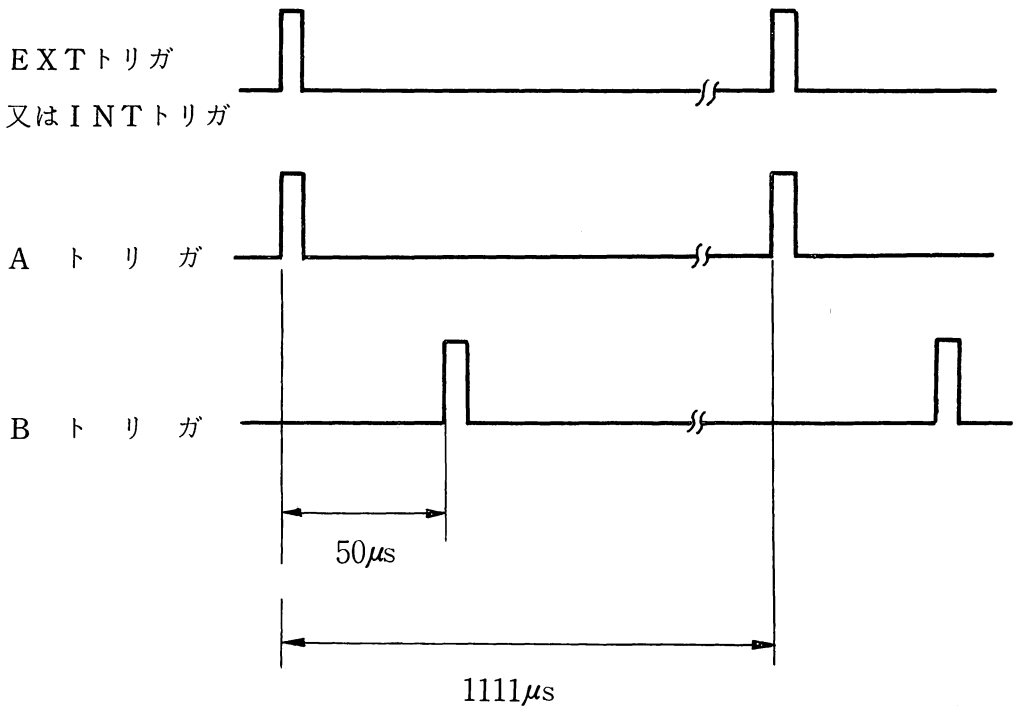
回路に送られて、アンテナは停止することなく一定の速度で連続回転する。回転速度の設定は、角度表示部にある速度調整用の可変抵抗により直流電圧を調整することにより行う。この直流電圧 (速度命令) は、タコジェネレータの出力と比較されるが、サーボ系のループ利得は非常に大きいので、モータは命令と等しいタコジェネレータ出力を得る回転速度で回転する。仰角方向には機械的な制限が2段階設けられている。1st LIMIT は仰角が約 -1° , $+91^{\circ}$ になると動作してアンテナが停止し、ブレーキがかかる。仰角が約 -3° , $+93^{\circ}$ になった場合は2nd LIMIT が動作し、制御部の電源がOFFとなってブレーキがかかる。この2nd LIMIT は、空中線制御系が完全に誤動作し、1st LIMIT の制限角を越えてもコントロール系がOFFにならず、アンテナに動作



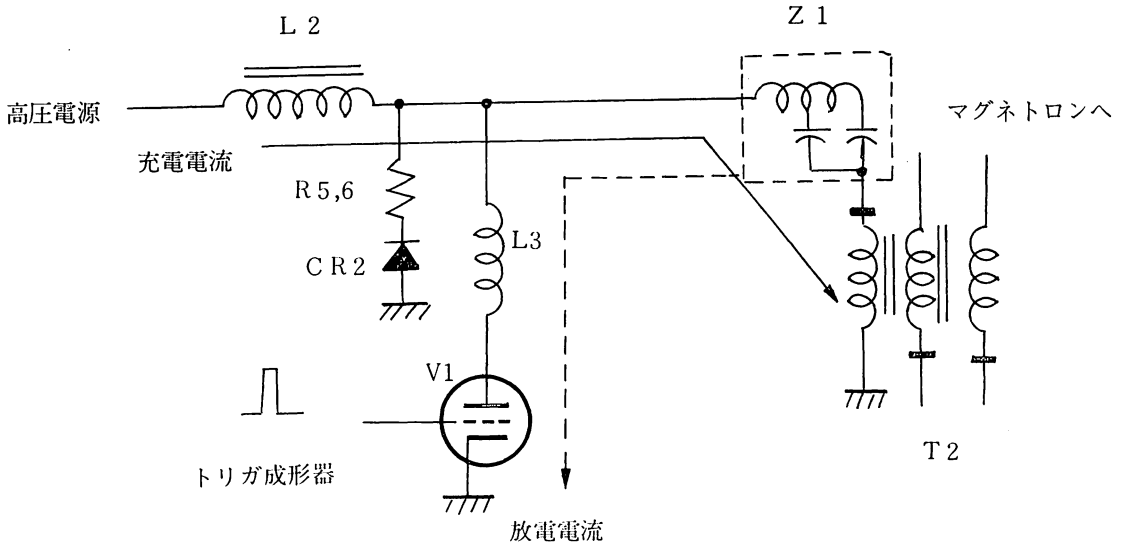
第9図 送受信装置の構成



第10図 トリガ発生回路系統



第11図 トリガのタイミング

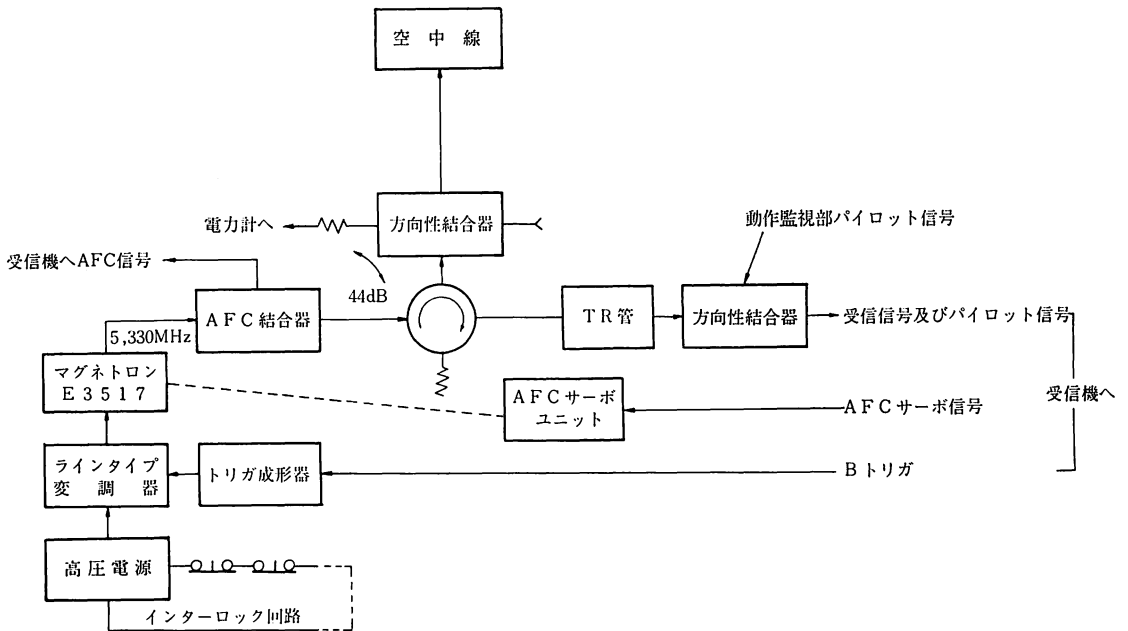


第12図 変調回路

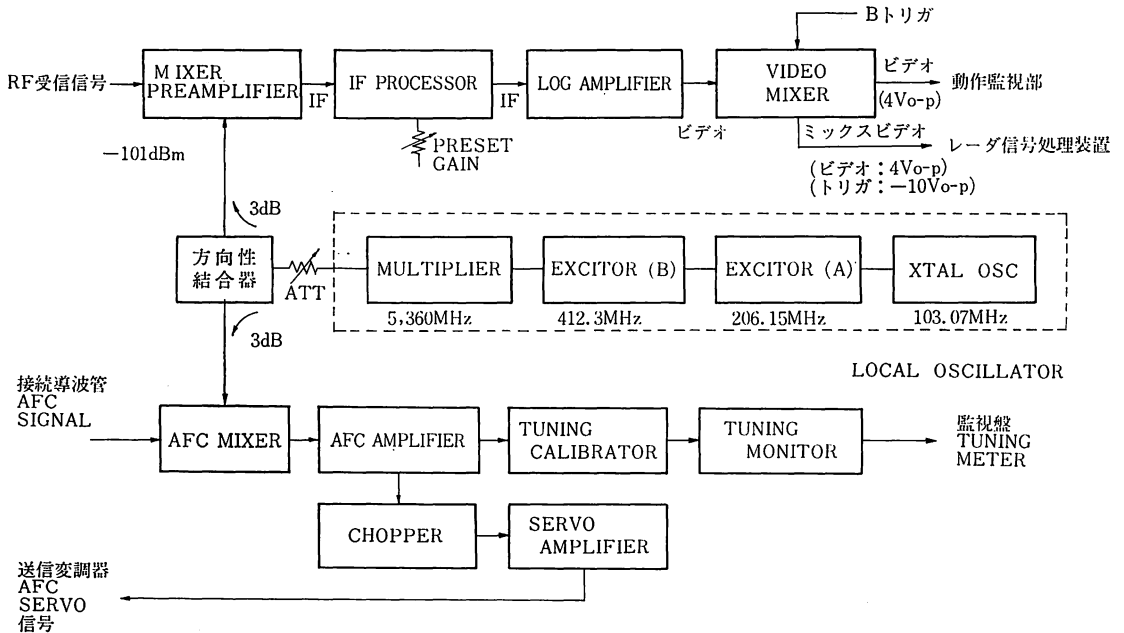
信号が伝わったままの状態が万一生じた場合、危険を防止するために制御部の電源をOFFにするものである。

送受信装置はレーダ系の中核をなすもので、その構成は第9図に示されている。これらの動作は、トリガ部、送信部、受信部、動作監視部等に大別することができる。トリガ部では伝送制御装置より作られるEXTトリ

ガを入力として、受信機内の同期パルス発生回路でAトリガ及びBトリガの2種類のトリガ信号を発生する。Aトリガより約50μsec遅れてBトリガが発生している。Aトリガは受信機内及び動作監視用として、Bトリガは他施設への妨害を防ぐために送受ブランキングのゲートにより制御される。トリガ部の系統を第10図に、タイ



第13図 送信系統図



第14図 受信系統図

ミングを第11図に示す。

送信部では、受信機出力のBトリガ信号を送信変調器のトリガ成形器でラインタイプ変調器のサイラトロンを駆動するレベルまで増幅する。ラインタイプ変調器は充電線輪、パルス成形回路、サイラトロンで構成されている。パルス成形回路は、高圧電源の電圧の約2倍に共振

充電される。この充電電圧はサイラトロンの動作で放電し、パルストランスの二次巻線に負電圧(約26kV)を発生してマグネトロンを発振させ、5330MHz、0.5μsec、250kWの出力を得ている(第12図参照)。マグネトロンにはE3517の同軸型マグネトロンを採用し、長寿命、高安定化を図った。同軸型マグネトロンは外部同軸空洞

で負荷変動に対して周波数安定度が良く、不要発振モードが外部に出ないため高調波が発生しないなどの特長を持つ。また、受信機内で水晶発振出力を通信した局発信号と送信信号を比較し、送信周波数が常に 5330 MHz になるよう、マグネトロンキャビティをコントロールする MAG AFC を採用した。マグネトロン出力は、接続導波管内の送受切換器のサーキュレータを通して空中線に接続される。送信部の系統を第 13 図に示す。

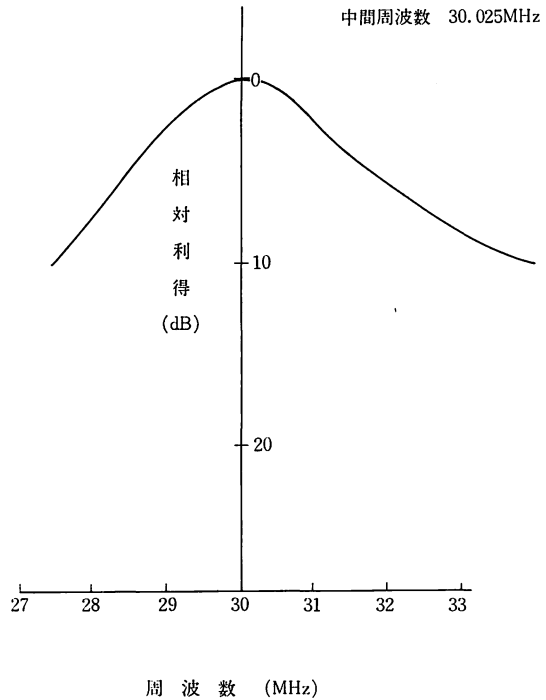
アンテナで受信された降雨等の反射 RF 信号は、送受切換器のサーキュレータまで送信信号の逆経路を進行し、更に T-R 管を通して受信部に接続される。受信機のミキサにはバランス型ミキサを使用し信号対雑音比の改善を行っている。受信 RF 信号 (5330 MHz) はミキサで局発信号 (5360 MHz) と混合検波され、30 MHz の IF 信号に変換される。IF 信号はプリアンプと対数増幅器で増幅される。この増幅段は対数特性を持っており、ダイナミックレンジは 80 dB 以上、その内の 70 dB の範囲では対数特性の偏差を ±0.5 dB 以内に抑えて信号の高忠実度化を図っている。対数増幅器の後段には検波器があり、ビデオ信号に変換され、次段のビデオミキサで 4 V_{o-p} のビデオ出力を得る。ビデオ信号は、負極性に反転した B トリガと混合され、ミックスビデオ信号として伝送ケーブルを経てレーダ信号処理装置に送られる。受信部の系統を第 14 図に、IF 部の帯域特性を第 15 図に、対数増幅器の特性を第 16 図に、ミックスビデオ信号波形を第 17 図に示す。

3.2 伝送系

伝送系はレーダ系とデータ処理系とをつなぐ部分であり、その性能を第 4 表に示す。

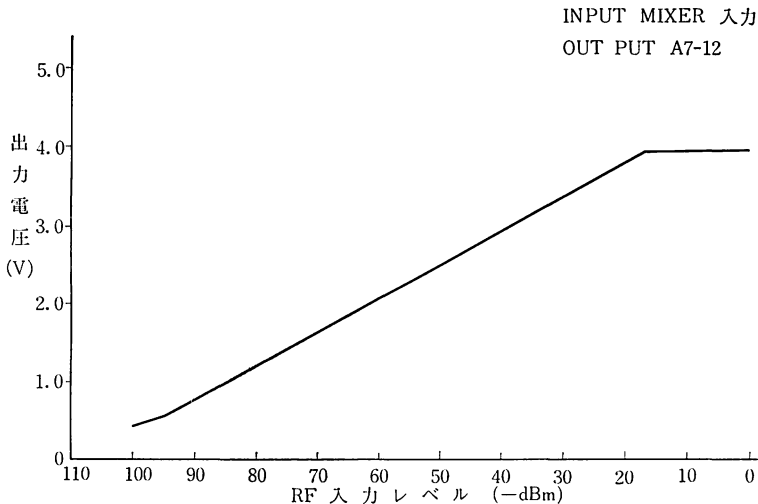
レーダ系から放射された 250 kW の高周波パルス電力

帯域幅 2.25MHz
中間周波数 30.025MHz

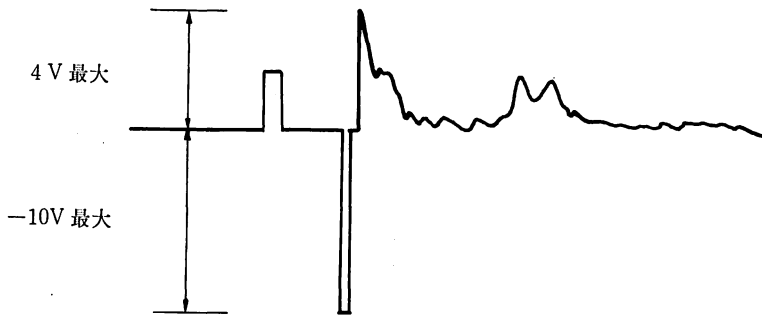


第 15 図 中間周波数帯域特性

は、雨滴等で反射されて送受信装置に戻ってくるが、そこで検波・増幅された降雨強度信号は、ビデオ信号として得られる。伝送系は、このビデオ信号を同軸ケーブルを通して 26 mφ 庁舎に送出する。また、制御信号等は専用信号線を通して送られる。伝送ケーブルの長さは約 1 km である。



第 16 図 対数増幅器特性



第17図 ミックスビデオ信号波形

第4表 伝送系の性能

項目	性能
伝送方式	直接伝送方式(ビデオ信号) シリアル伝送方式(制御信号)
伝送信号	ビデオ信号;同軸ケーブル 制御信号等;専用信号線
伝送速度	7,200 bps(制御信号)
ケーブル長	約 1 km

第5表 データ処理系の性能

項目	性能・規格
中央処理装置(CPU)	
語の構成	16ビット
記憶容量	64kバイト
入出力制御装置	コモンバス方式 入出力8ビット並列
信号処理装置	
A/D変換	分解能 8ビット サンプル間隔 1.67 μsec(250 m)
平均化	32ヒットランニング平均化方式
周辺装置	
紙テープ読取装置	1式
入出力タイプライタ	1式
磁気テープ記録装置	2式
カラーグラフィックディスプレイ装置(CGD) ハードコピー装置 (撮影装置付き)	1式 1式
モニター用PPI装置	
直径	30 cm
表示範囲	半径 25 km, 50 km, 100 km
操作卓	ステータスの監視とシステムの制御操作

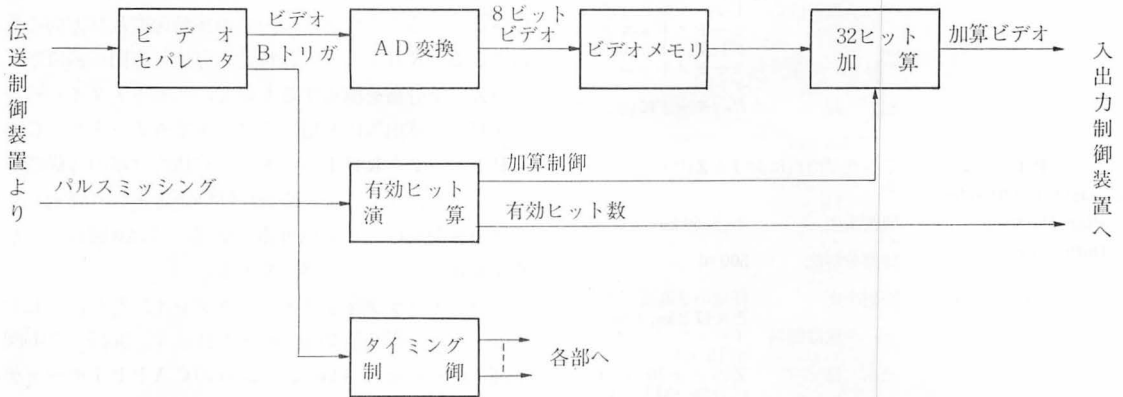
3.3 データ処理系

データ処理系は、信号処理装置、監視制御装置、中央処理装置(CPU)、モニター用PPI装置、カラー・グラフィック・ディスプレイ(CGD)装置、磁気テープ装置(MT)、ハードコピー装置等から構成され、26mφ庁舎内に設置されている。データ処理系の性能は第5表のとおりである。第18図はデータ処理系の一部の写真で、左からモニター用PPI装置、監視制御装置、カラー・グラフィック・ディスプレイ装置である。

信号処理装置は、伝送系を通して送られてきたビデオ信号をA/D変換し平均化処理した後、中央処理装置に送りこむもので、ビデオ分離部、AD変換部、ビデオメモリ部、32ヒット加算部、有効ヒット演算部、タイミング制御部からなる(第19図参照)。ビデオ分離部は、送受信装置から伝送されてくるトリガとビデオの混合信号(トリガ;負極性、ビデオ;正極性)を受け、ビデオとトリガに分離して、それぞれ整形、増幅するものである。伝送路が長いと信号にHUMがのることがあるので、これを除去するためにHUM信号だけを伝送し、これとビデオ信号とをかけあわせてHUMを相殺している。AD変換部は、受信機対数増幅器からのビデオ信号のオフセット電圧及び利得を調整し、クロックレート1.667 μsec(600 kHz)で距離方向にサンプリングし、振幅を8ビット(256段階)にAD変換する。ビデオメモリ部は、AD変換部からの8ビットのデジタル信号を単位距離ごとに32ヒット記憶する。32ヒット加算部は、ビデオメモリ部から出力される32ヒットのビデオ信号の加算を行う。入出力制御装置へは、加算ビデオをそのまま出力し、モニター用PPI装置へは、デジタル的に振幅を6ビットだけシフトさせて1/32の平均化を行って出力する。有効ヒット演算部は、レーダ送信機からのパルスミッシング情報により、加算処理を行っている32ヒットの中で有効なヒットの数を演算する。タイミング制御部は、Bトリガにより、レーダ系タイミングに同期して、レーダ信号処理装置の各回路を動作させる



第18図 データ処理系の一部。左からモニター用PPI装置，監視制御装置及びカラーグラフィックディスプレイ装置。



第19図 信号処理装置の系統図

ために必要なクロック，トリガ等が発生する。

中央処理装置は，信号処理装置で得られた32ビット加算ビデオと有効ヒット数より

$$\frac{\text{加算ビデオ}}{\text{有効ヒット数}} = \text{平均化ビデオ}$$

の演算を行う。この信号は，更にプログラムに従って種々の処理を受け，目的とする電波伝搬路上の降雨強度分布あるいは周辺の気象状況を把握するためのデータとしてファイルされる。このデータファイルに基づき，カラー・グラフィック・ディスプレイに対する表示，磁気テープへの記録及びECSデータ収集解析処理装置へのデータ伝送等が行われる。多モードデータ取得のために，中央処理装置からのプログラムされた角度信号でレーダアンテナの制御を行う。

監視制御装置では，アンテナの指向角度の表示及びス

テータスの各項目が正常か否かの表示を行い，システムの動作状況を集中的に監視できる。また，操作卓において全システムの操作を行うことができる。

4. 機能

降雨強度分布測定装置は，ミリ波・準ミリ波の電波伝搬に大きな影響を与える降雨強度の分布を，衛星電波伝搬路上及びその周辺について精密に測定するために，コンピュータを用いてアンテナ制御を行い，取得したデータを目的に応じて取捨選択し，必要な計算処理を行って第6表に示す P_m モード， P_s モード，CAPPIモード及びRHIモードの4種類のデータを得る機能を有する。

P_m モードでは各衛星とその地上主局（鹿島）間の電波伝搬路上250 m おきのレーダ反射因子（Z因子）及び

第6表 データモードの概要

データモード	概 要
P_m モード	各衛星と鹿島地上局を結ぶ伝搬路上のZ因子を測定し、降雨強度を算出する。
	観測範囲 250 m~20 km
	観測距離間隔 250 m
	衛星指定数 最大4衛星(任意の組合せ可)
	データ取得間隔 1分
	記 録 Z因子→MT, 降雨強度→MT, CGD, ハードコピー
P_s モード	各衛星と副局間の伝搬路上のZ因子を測定し、降雨強度を算出する。
	観測範囲 250 m~20 km
	観測距離間隔 250 m
	衛星指定 特定の1衛星(固定)
	データ取得間隔 1シーケンス(Cモードスキミング)又は1分(P_s モードスキミング)
	記 録 P_m モードと同じ
CAPP Iモード (Constant Altitude Plan Position Indication)	一定高度平面内におけるZ因子を測定する。
	観測範囲 半径 50 km
	観測分解能 500 m
	観測高度 任意の2高度(たとえば2 km, 6 km)
	データ取得間隔 1シーケンス(通常12分)
	記 録 Z因子を10段階に分類→MT, CGD, LP, ハードコピー
RHIモード (Range Hight Indicator)	特定の方位、方向の鉛直断面内のZ因子分布を測定する。
	観測範囲 高度15 km, 半径50 km
	観測分解能 500 m
	データ取得間隔 1シーケンス(Cモードスキミング)又は1分(RHIモードスキミング)
	記 録 CAPP Iモードと同じ

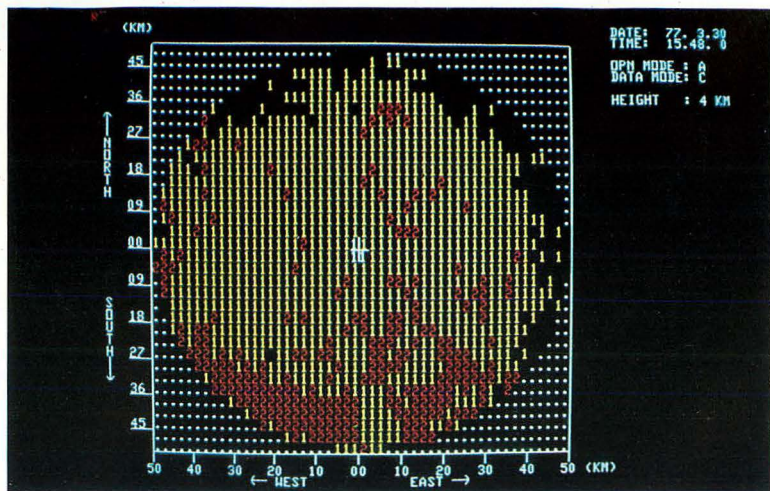
それより算出される降雨強度(単位; mm/h)の測定を行う。 P_s モードでは特定の衛星とその地上局(ECS副局等)間について P_m モードと同じ測定を行う。この P_m , P_s モードにより地上雨量計では得ることのできない高仰角衛星電波伝搬路上の降雨強度分布に関するデータを取得できる。CAPP Iモードは任意の2高度

第7表 Z因子の10段階分類

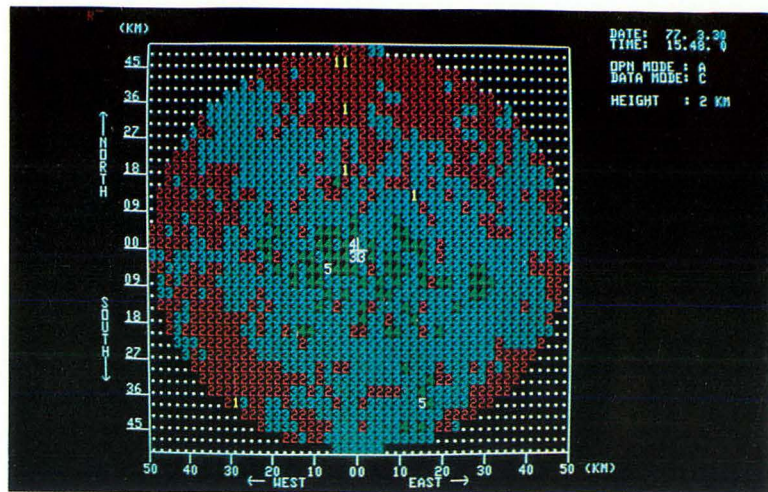
識別数字	降雨量(mm/h)
0	0
1	0~1
2	1~2
3	2~4
4	4~8
5	8~16
6	16~32
7	32~64
8	64~128
9	128以上

面(例えば2 kmと4 km)におけるZ因子を求めるもので、これにより全般的な降雨の状態が把握でき、また異なる時刻に得られた図形を時間的に早いものから遅いものへと並べることにより、雨域の移動速度及び方向を算出できる。RHIモードは特定の方位・方向の鉛直断面内のZ因子分布を測定するもので、サイト・ダイバーシティ利得の算出等にも用いることができる。また、CAPP IモードとRHIモードより立体的な降雨の構造が分かるので、対流性降雨や層状性降雨等という降雨のタイプの識別を行うことが可能となる。第20図は、これら4種類のモードの概略図である。

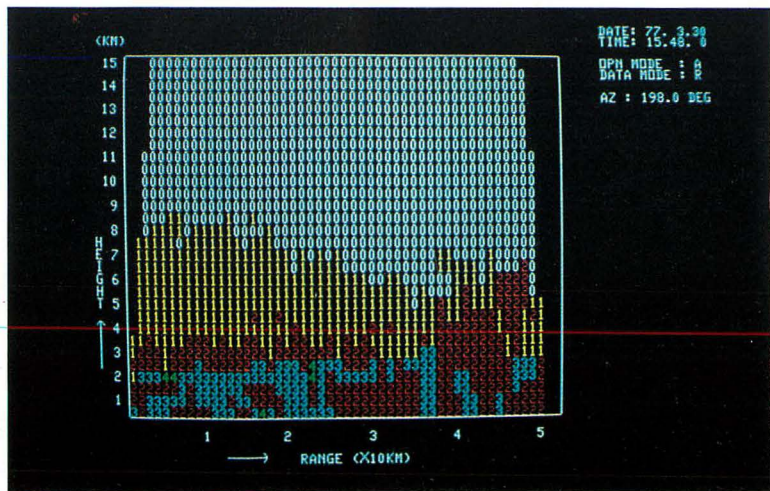
カラー・グラフィック・ディスプレイに写し出された各モードの一例を第21図(a)~(d)に示す。(a)図及び(b)図は高さがそれぞれ4 km及び2 kmのCAPP Iモードデータであり、観測で得られた降雨強度を0~9の10段階の数字で分類し、色別表示したものである。降雨強度と識別数字の対応は第7表のとおりである。(b)図の高度2 kmのCAPP Iモードデータを見るとわかるように、降雨強度の強いところ、すなわち、緑色の数字4で示された部分は、全体に比べて狭い部分に集中している。また、2か所ほど白色の数字5という特に強い降雨も見えている。(c)図はRHIモードデータであり、約2 kmの高さにレーダ反射の強い所が見える。これは水の粒子が融解中のためレーダ反射因子が大きくなったもので、ブライトバンドと呼ばれるものである。ブライトバンド以上の高度からの反射は主として雲中の氷晶によるものと考えられる。ミリ波の減衰に寄与するのは雨滴が主で、ブライトバンド以上の高度の雲の影響はほとんど無視できる。したがって、レーダから得られる降雨強度とミリ波の減衰とを比較する場合には、どの高さまで雨が降っており、また、どの高さから雲になっているのかという



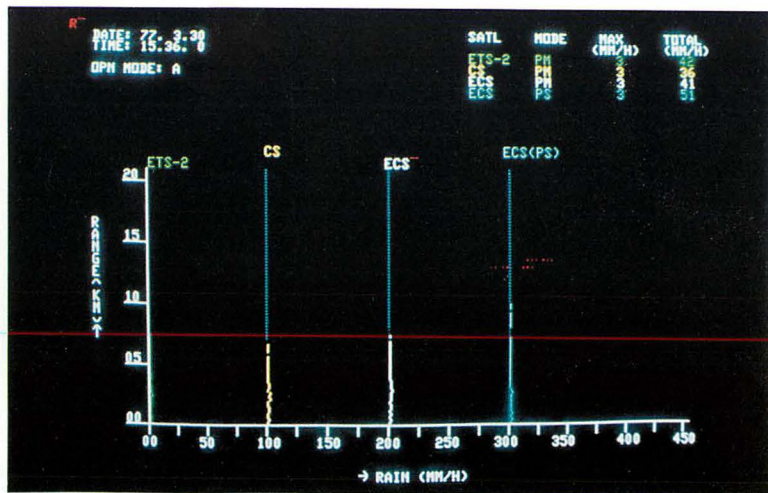
(a) CAPPI モードデータ (高度 4 km)



(b) CAPPI モードデータ (高度 2 km)

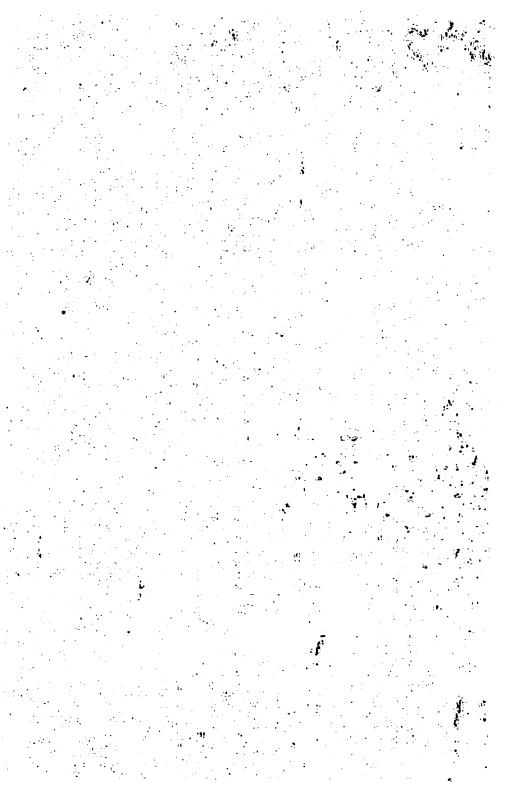
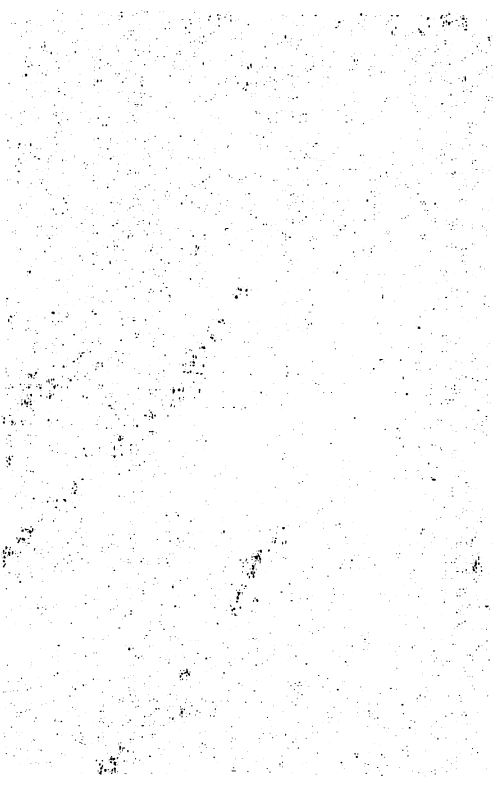
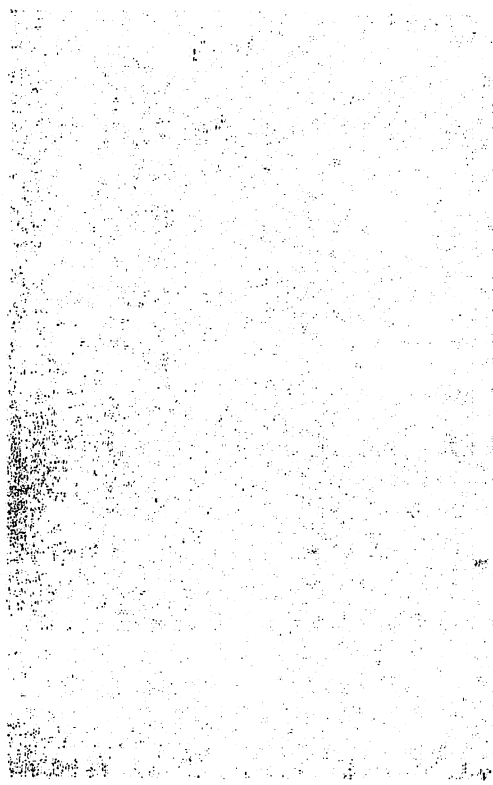


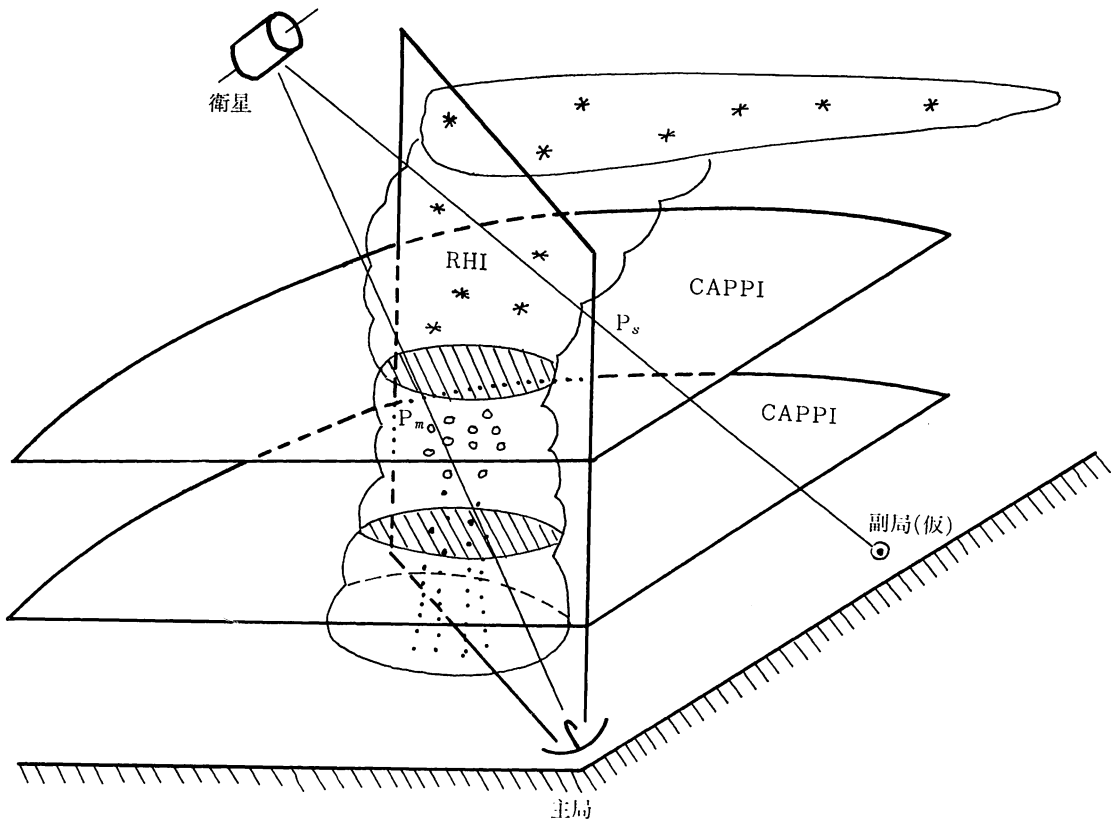
(c) RHI モードデータ



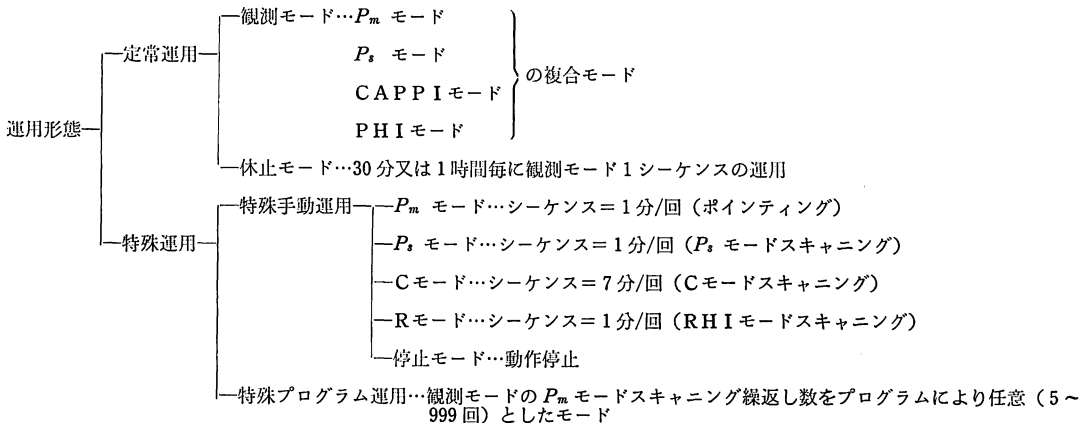
(d) Pm,Ps モードデータ

第21図 カラーグラフィックディスプレイ上のCAPPI モード、PHI モード及びPm,Ps モードデータの例。





第20図 各種モードの概略図

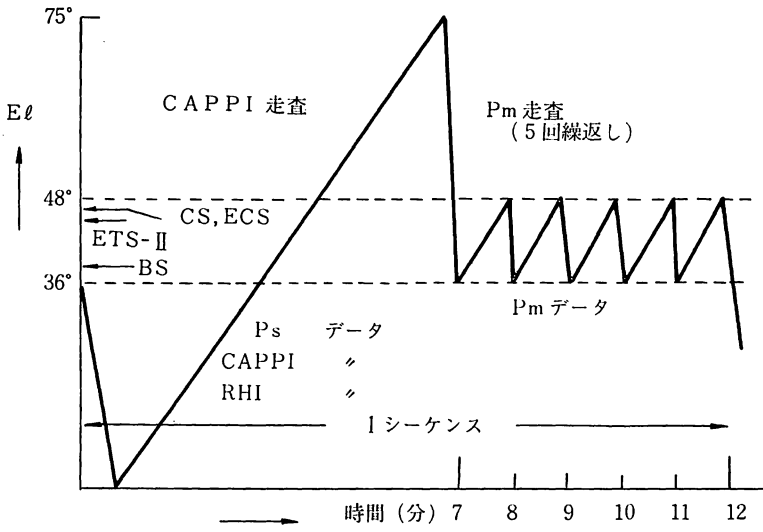


第22図 システム運用モードの系統

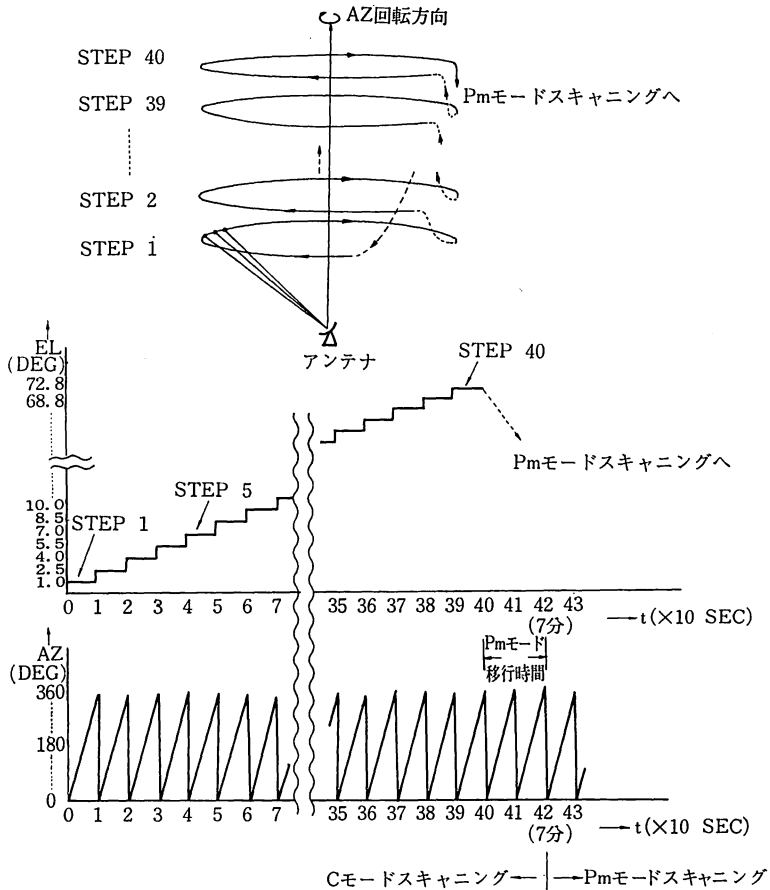
情報が必要であるが、このRHIモードデータを用いることによりその情報が得られる。RHIモードでも降雨強度を10段階に分類しているが、その分類法はCAPPIモードと同じである。(d)図はP_mモード及びP_sモードのデータで、左から、ETS-II、CS、ECSのP_mモードデータ、一番右端はP_sモードデータである。縦軸は地上局から衛星へ向けての電波伝搬路上の

距離(km)で、横軸は降雨強度(mm/h)である。ただし、図形が重ならないようにCS、ECS、ECS(P_s)の降雨量の原点をシフトしてある。

本装置ではこのほかに、グランドクラッタ除去機能、ブライトバンド除去機能、途中降雨減衰補正機能、B及びβを数段階に変えて逐次降雨強度算出を行う機能等有所する。



第23図 定常運用時の仰角変化



第24図 Cモードスキャンニング アンテナ駆動図

5. システムの運用

降雨強度分布測定装置の運用には、指定されたシーケンスに従って各種モードが切替えられ観測が行われる定常運用と、手動指定又はプログラム指定により2個以上の特定モードの観測が行われる特殊運用がある。これらの系統を第22図に示す。

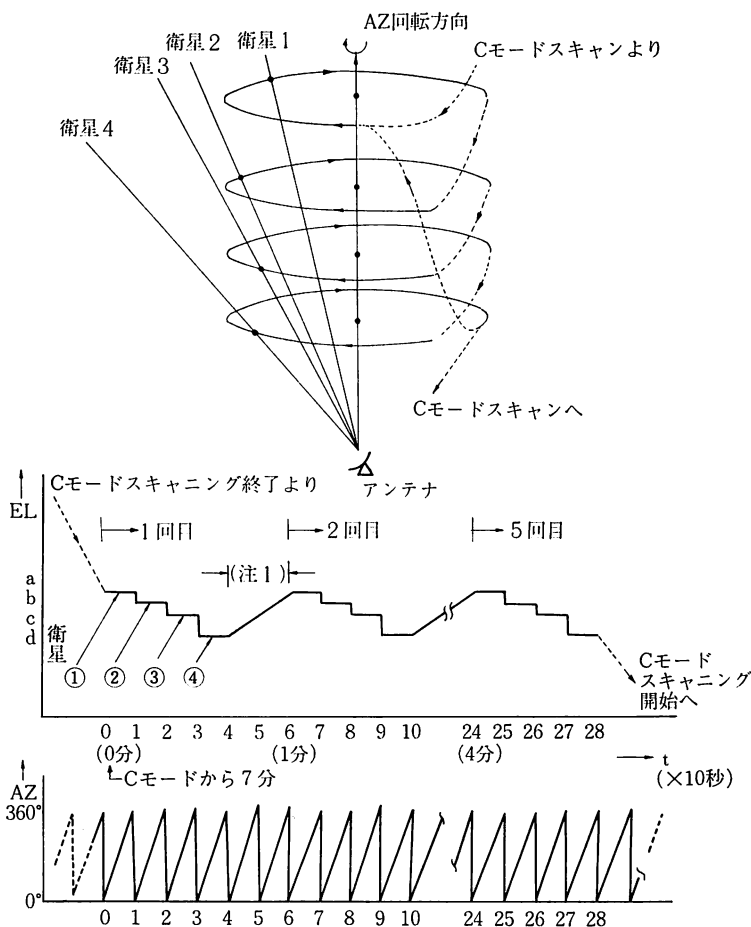
5.1 定常運用

定常運用では1シーケンス12分の観測を行う。最初の7分間で、アンテナを6rpmで回転させながら仰角を0度から約80度まで変化させて、 P_s 、CAPPI及びRHIモードのデータを取得する。これをCモード・スキニングと呼ぶ。残りの5分間で P_m モードの観測を行い、1分ごとの P_m モードデータを取得する。定常

運用時の1シーケンスにおけるレーダアンテナの仰角変化を第23図に示す。

Cモード・スキニング7分のうち、 P_m モード移行に要する時間は余裕をみて20秒必要である。したがって、データ取得のために消費できる時間は400秒(7×60-20)となる。アンテナは方位方向に6rpm(10秒/1回転)で回転しているのので、仰角切替えステップ数は40ステップ(400÷10)となる。仰角切替えは、この40ステップの最適値をテーブルとして記憶したものをを用いて実行している。また、この仰角の切替えは、アンテナの方位方向が北を向いたとき、すなわち、アンテナの方位角が0°になったときに行っている。第24図にCモード・スキニングにおけるアンテナの動きを示す。

P_m モード・スキニングは、アンテナの方位方向に



(注1) この時間(20秒)は次回の最初の衛星にアンテナELを設定するため、あるいはCモードスキニングに移行するために必要とされる時間である。指定衛星が三つのとき、この時間は30秒となり、二つのときは40秒となる。このようにして各回1分になるようにこの時間が設定される。

第25図 Pmモードスキニング アンテナ駆動図

6 rpm の一定速度で回転させておき、方位角が 0° になるたびに仰角を指定衛星ごとに順次切替えるスキヤニング方式である。 P_m モード・スキヤニングを1回行うのに1分を要するが、この時間内に指定衛星(最大4衛星)に対する P_m モードデータをすべて取得する。 P_m モードデータの取得は、一つの衛星に対して10秒、すなわち、アンテナ1回転の間に行われ、仰角が、この衛星に対する角度に設定され、方位角がちょうどこの衛星方向を向いた瞬間をねらって行われる。第25図に P_m モード・スキヤニングにおけるアンテナの動きを示す。

定常運用は更に降雨の状態により、以下に示す晴天モード、雨天モード、豪雨モードの三種に分けられる。

(a) 晴天モード

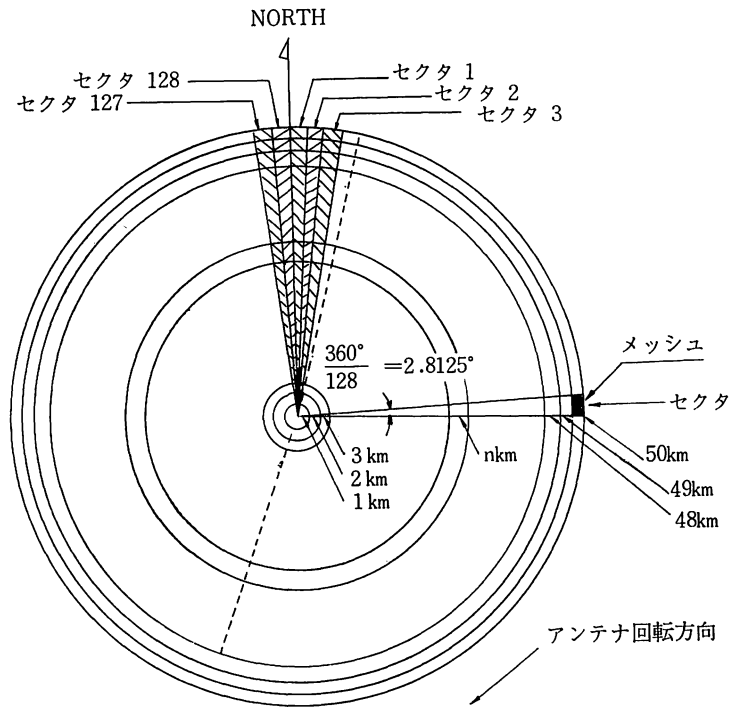
晴天、雨天、豪雨各モードの切替えの判定は、降

雨強度分布測定装置のデータにより行われる。

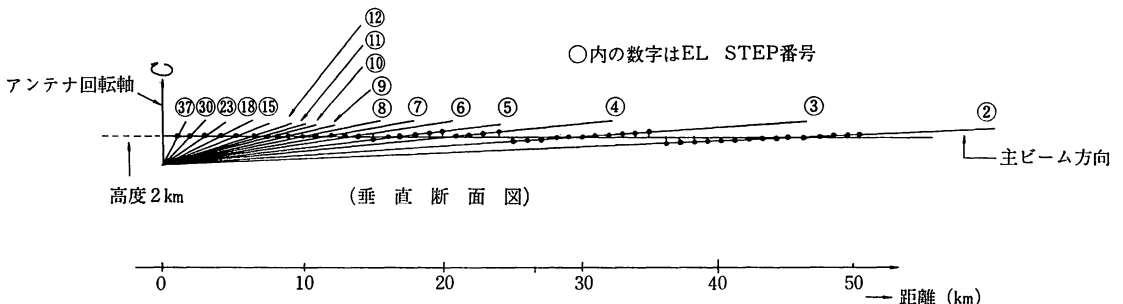
晴天モード時には1時間ごと、または30分ごとに1シーケンス12分の定常運用観測を行い、高度2kmのCAPPIモードのレーダ反射因子の総和があらかじめ設定された値以上になった場合、雨天モードに切替えられる。また、上記の状態が存在しない場合は晴天モードにとどまる。

(b) 雨天モード

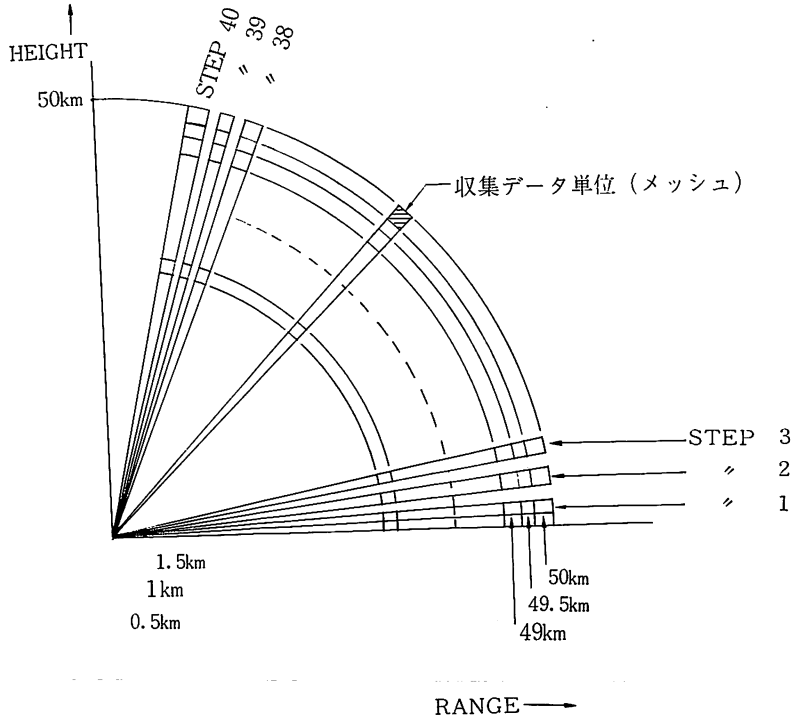
雨天モードにおいては、システムは連続して運用される。 P_m モードデータより計算される衛星電波伝搬路上の降雨量の積分値(ΣP_m)が、あらかじめ定められた値以上になると豪雨状態と判定される。この状態が1シーケンスの定常運用に5回含まれる P_m モードデータ中3回を越えると豪雨モード



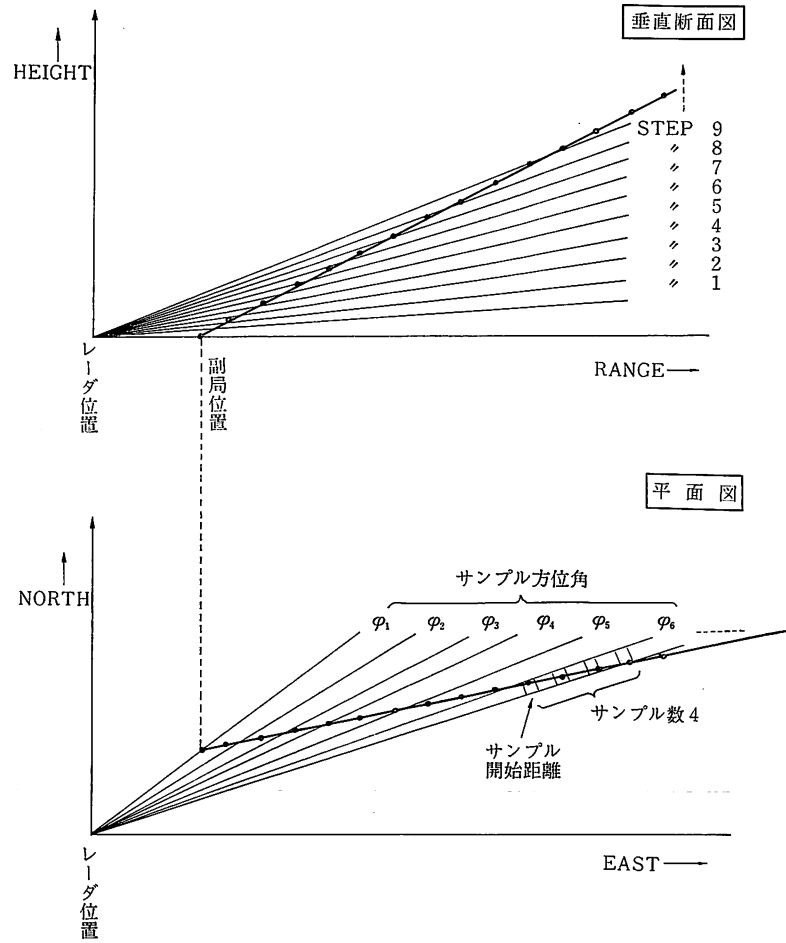
第26図 CAPPIモードデータ 収集範囲及び収集単位(平面図)



第27図 CAPPIモードデータ 高度2km に対するデータ収集方式



第 28 図 RHIモードデータ収集範囲及び収集単位 (垂直断面)



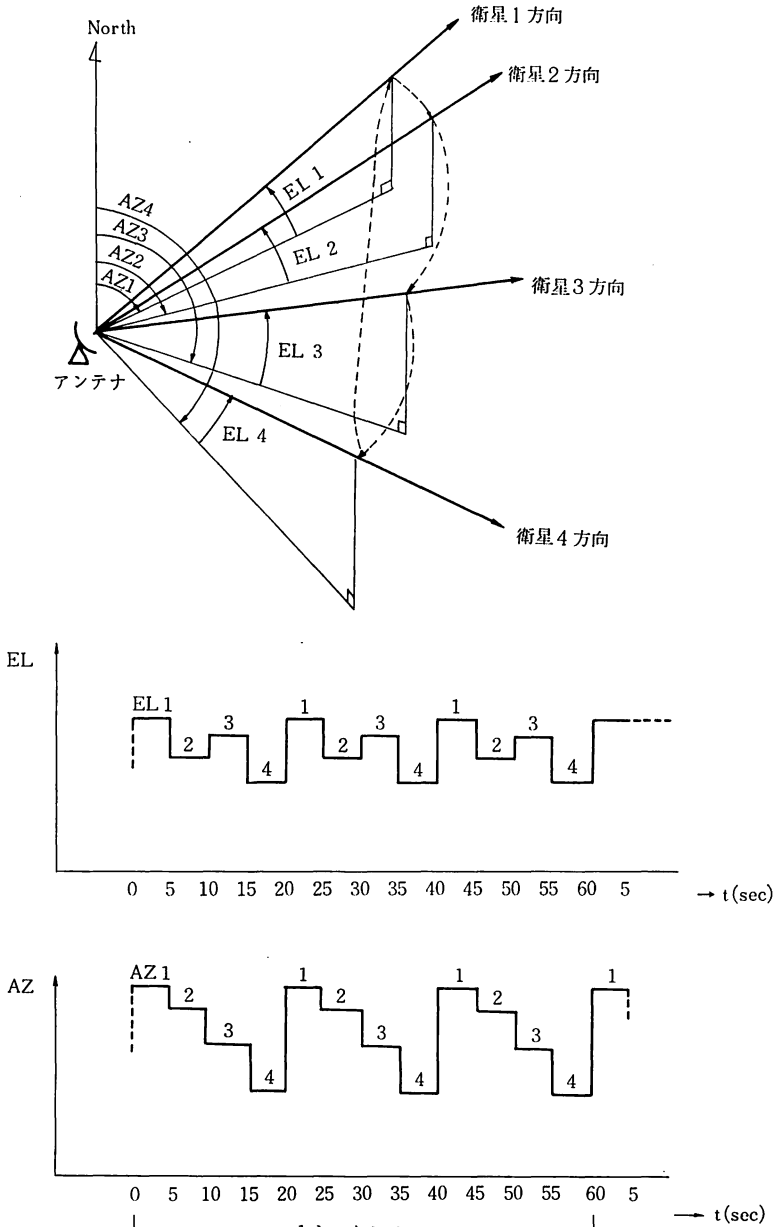
第 29 図 定常運用における Ps モードデータ収集方式

に切替えられる。

(c) 豪雨モード

いったん豪雨モードに入ると30分間継続し、30分ごとに ΣP_m がチェックされ、設定値より低い場合、雨天モードに切替えられる。豪雨モードのステータスは、ECSデータ収集解析処理装置へ送られ、電波伝搬データの早い変動を記録するアナログテープレコーダの起動用信号として用いられる。

次に各モードデータの収集方式について述べる。CAPP Iモードデータは、第26図に示されるようにアンテナ回転軸を中心とした半径50kmの範囲において収集される。データ収集単位はメッシュと呼ばれ、方位角方向 2.8125° 、水平距離方向1kmで囲まれる部分である。第27図は高度2kmに対するデータ収集方式を説明したものである。この図からわかるように、ある高度面に対するCAPP Iモードデータを収集するには、データ収集位置の仰角及び距離を知っていなければならない。こ



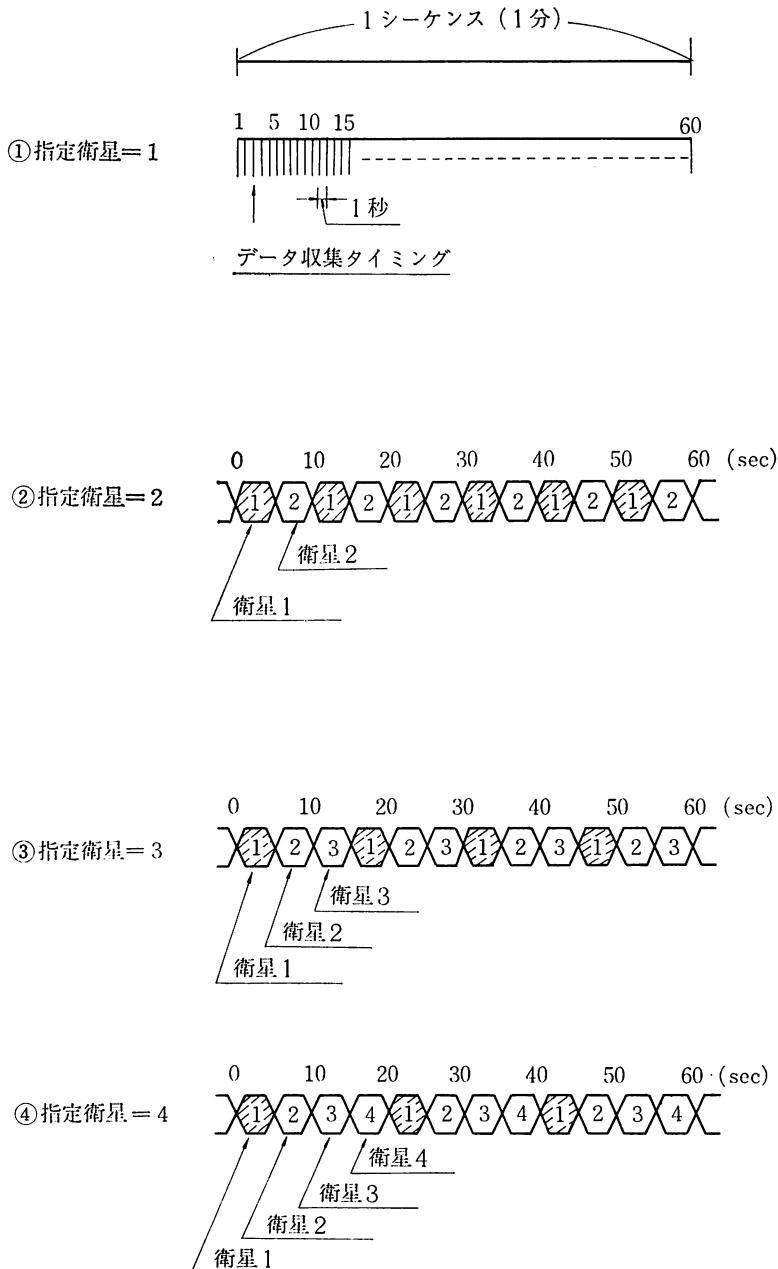
第30図 ポインティングによるアンテナスキャン説明図

のシステムでは仰角ステップ間隔（ステップ数40）の最適値を求めテーブルとして記憶する方式をとっている。

RHIモードデータは第28図に示すように、指定方位角方向の垂直断面において、1~40の仰角ステップに対してアンテナを中心とする半径500mの同心円上の空間を収集単位とし、これをアンテナから半径50kmの範囲において収集するものである。Cモード・スキヤニングでRHIモードデータを取得する場合、RHIモードデータに必要な1.5°ごとの仰角変化は、Cモード

・スキヤニングでは得られない。ステップ数は40で同じであるが、ステップ番号30~40に対応する仰角範囲でRHIモードデータに必要な仰角変化と異なるので、ここではデータの補間をしている。

Pモードデータは第29図に示すように、与えられた方位角、仰角、距離のサンプル点においてデータを収集する。これらサンプル点の値は、テーブルとして記憶している。



第31図 手動特殊運用 Pmモードデータ収集シーケンス

5.2 特殊運用

特殊運用は、手動特殊運用とプログラム特殊運用により構成される。

手動特殊運用は、 P_m モード、 P_s モード、Cモード、Rモードの各単独モードより構成される。各モードは、オペレータの指示により任意に選択できる。手動特殊運用における P_m モードは、第30図に示すポインティングによるアンテナ・スキャンングを行う。このモードのシーケンスは1分で、この間、指定された衛星に対するデータを次々に収集するのであるが、指定衛星の数によりデータ収集時間間隔が次のように変化する。

(a) 指定衛星が1個の場合

この場合は1秒ごとに指定衛星に対するデータを収集する。したがって、1シーケンスで60回収集することになる。

(b) 指定衛星が複数の場合

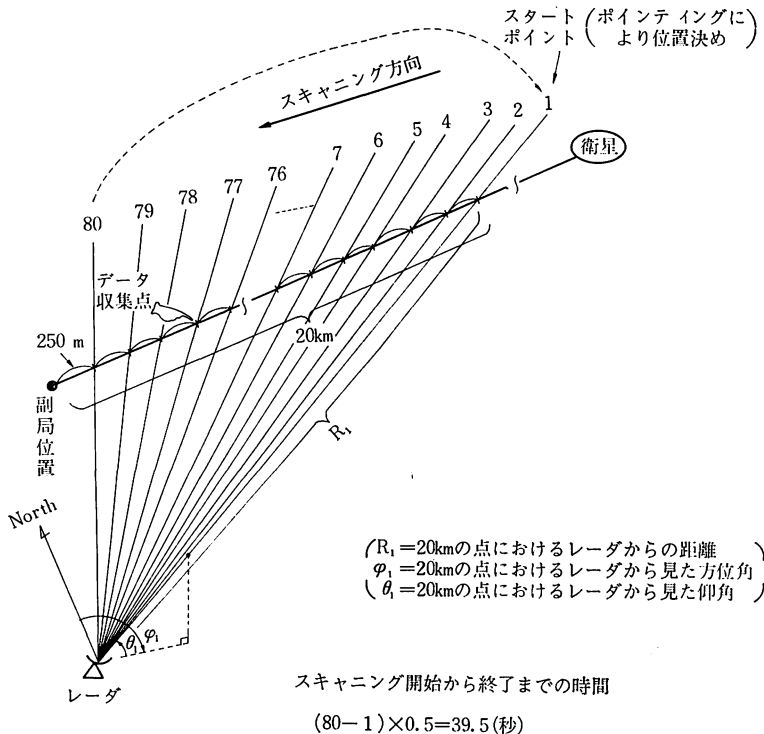
この場合は5秒ごとに指定された衛星に対するデータを次々に収集する。したがって、各衛星方向に対するデータは、指定衛星が二つの場合10秒ごと、三つの場合15秒ごと、四つの場合20秒ごとに収集される(第31図参照)。

手動特殊運用における P_s モードデータの収集は、 P_s モード・スキャンングにより行われる。これは1シーケ

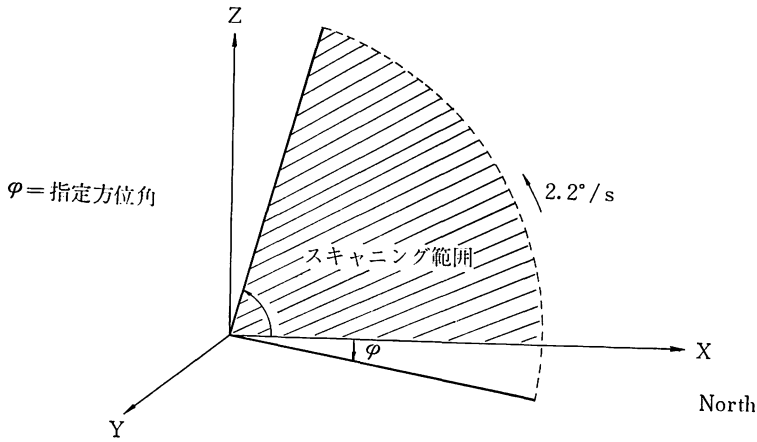
ンス1分で実行される。 P_s モード・スキャンングは第32図に示されるように、副局-衛星間の電波伝搬路上20 kmの点から250 m点に向かって、伝搬路に沿ったアンテナのスキャンを行うものである。この間、主ビームが伝搬路上250 mごとの点を通過のたびにデータの収集を行う。データ収集点の方位角、仰角、距離の値は、別途計算で求めておき、テーブルとして記憶する方式をとっている。

特殊運用におけるCモード・スキャンングは、定常運用におけるCモード・スキャンングと全く同じである。特殊運用におけるCモードは、指定されたとき1シーケンスだけ実行し、終了と同時に後に述べる停止モードに移行する。データ収集処理は指定された2高度面に対して行われる。

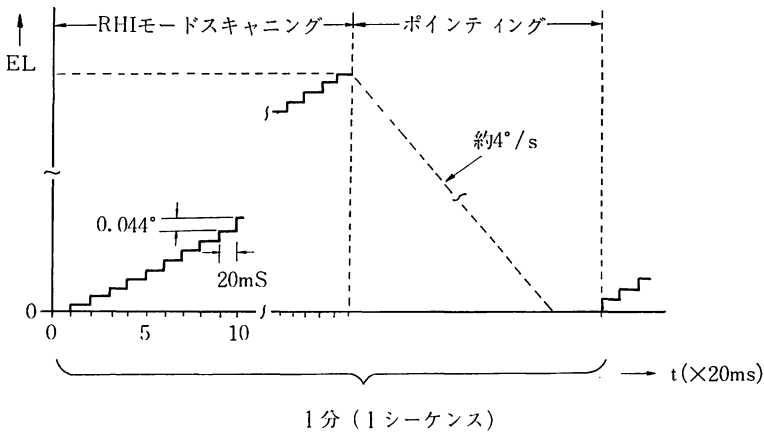
特殊運用におけるRモードのアンテナ・スキャンングは、RHIモード・スキャンングにより行われる。これは指定された方位角方向にアンテナ方位角を固定しておき、仰角を低い方から順次高い方へと切替えてスキャンングしてゆく方式である。第33図はこれを説明したもので、仰角走査範囲は $0^\circ \sim 80.8^\circ$ で $2.2^\circ/\text{sec}$ の角速度でスキャンングを行う。実際には20 msecごとに $0.044^\circ (=180^\circ/2^{12})$ の角度ステップを与えている。スキャン開始から終了まで $80.8^\circ/2.2=36.7 \text{ sec}$ を要するが、1



第32図 P_s モードスキャンング方式



第33図(a) RHIモードスキャンニング



第33図(b) RHIモードスキャンニング タイミング

シーケンスを1分とし残りの時間でスキャン開始点までアンテナをを戻す。この戻す操作はポインティングで行い、約4°/secでアンテナは下降する。

停止モードはシステムの運用を一時的に停止させる時に実行される。このモードが指定されると、カラー・グラフィック・ディスプレイ装置にシステムパラメータが自動的に表示され、各種パラメータの変更が可能となる。次に、他のモードでデータ収集を希望する場合には、必要なモード選択の後、コンピュータのスタートスイッチを押せばよい。

プログラム特殊運用は、先に説明した定常運用の観測モードに類似するもので、 P_m モード・スキャンニングの繰返し回数をシステムパラメータ設定時に任意の回数(5~999)に設定できる機能を有するほかは、定常運用観測モードと全く同一である。

6. あとがき

多目的機能を有する降雨強度分布測定装置に関して、主としてハードウェアの面から詳述してきた。本装置を支えるもう1本の柱であるソフトウェアに関しては、別の機会に譲りたいと考えている。

ETS-II衛星による伝搬実験も開始からかなりの期間を経過した。その間、本装置によって膨大なデータが蓄積された。部分的にはあるが、そのデータを使って伝搬実験項目の各種解析がなされた結果、最初の予想よりはるかに有用で信頼性のおけるデータであることが判明した。実験開始当時は、装置操作の不慣れによるミスも多少はあったが、改良されるべき部分は漸時改良され、現在ではほとんど人手を要しない装置に成長している。

本装置の仕様制定、実験計画、設計、建設、検査、保守、観測データの取得を通じて、それに協力された多くの人々には心から感謝する次第である。特に畚野主任研には、ECS衛星計画のリーダーとして御指導頂いたこと

に感謝したい。本装置の設計から建設を通じて、東芝小向工場の国分氏、中野氏をはじめとする多くの方々には、無理な注文をも心よく引き受けて頂き、同時に新しいタイプのレーダの開発に対する情熱を共有して頂いたことに対して心からお礼を申し述べたい。建設時から観測にいたる長期間にわたる鹿島支所の林室長の御尽力も多大である。このほか石田本部長以下CBE本部の各位、生島支所長以下鹿島支所の各位並びに福島第二特別研究室長にも深尽なる感謝を申述べる次第である。

参 考 文 献

- (1) 国分幹郎, 中野悟, 岡川道裕, 渡部明, 木目田信, “多機能気象レーダシステム” 東芝レビュー, **32**, 6号 504—509, (1977).
- (2) 阿波加純, 小池国正, 藤田正晴, 篠塚隆, 小園晋一, 早坂薫, 青山伸一, 田中浩, “降雨強度分布測定装置の較正” 電波研季報, **23**, 125, pp. 105—112
- (3) Marshall, J. S., “The constant—altitude presentation of radar weather patterns. Proc. 6th Weather Radar Conf., Meteor. Soc., pp. 321 (1957).
- (4) Kilambi, A. and J. S. Marshall, “A radar study of attenuation on terrestrial, microwave links”, Radio Sci., **12**(1), 53—61 (1977).
- (5) Hamilton, P. M. and J. S. Marshall, “Weather radar attenuation estimates from raingauge statistics”, Sci. Rep. MW—32, McGill Univ. Montreal.
- (6) Ippolito, L. J., “20—and 30—GHz millimeter wave experiments with the ATS—6 satellite”, NASA Tech. Note, TN D—8197, 1976.
- (7) 山田松一, 小川明義, 古田治, “二周波レーダによる降雨減衰の測定 (その1)”, 信学会研究会資料A P 77—20 (1977).
- (8) 小平信彦, 立平良三, “気象レーダ特集号” 気象研究ノート, 第112号, 1972.

