

委10-2

技術試験衛星II型

(ETS-II)「きく2号」

ミリ波伝搬実験総合報告

昭和53年6月7日

郵 政 省

電 波 研 究 所

目 次

1. 実験の概要	畚野 信義	(1)
2. アンテナ装置とその特性	○手代木 扶 藤田 正晴	小室 英雄 鈴木 良昭 (14)
3. 受信装置とその特性	○木村 繁 黒岩 博司	林 理三雄 吉村 和幸 (23)
4. 降雨強度分布測定装置とその特性	○阿波 加純 田中 浩*	手代木 扶 小室 英雄 (31)
5. 実 験 経 過	○林 理三雄	石沢 禎弘** (44)
6. データ収集処理と特徴的な現象	○篠塚 隆 川崎 捨義	中村 健治 井原 俊男 (51)
7. データ統計処理	○犬木 久夫	高橋 寛子 (62)
8. 対流圏伝搬特性	○井原 俊夫 篠塚 隆	古浜 洋治 青山 伸一 (76)
9. 降雨レーダデータの利用	○中村 健治 小池 国正	田中 浩* 黒岩 博司 (89)
10. 電離圏伝搬特性	○藤田 正晴 阿波 加純	小川 忠彦 新野 賢爾 (99)
11. 実験結果のまとめと今後の計画	古浜 洋治	(110)

* 名大へ出向 (53. 3. 1 付) ** 宇宙開発事業団 ○ 発表者

技術試験衛星Ⅱ型(ETS-Ⅱ)「きく2号」ミリ波伝搬実験総合報告

1. 実験の概要

1.1 はじめに

技術試験衛星Ⅱ型(ETS-Ⅱ)「きく2号」は、昭和52年2月23日打上げられ、3月5日我国最初の静止衛星となった。この衛星は、Nロケットにより打上げられる最初の実用静止衛星となる実験用静止通信衛星(ECS)のために、静止軌道への投入技術の修得等を目的として、宇宙開発事業団(NASDA)により計画された。郵政省は、これを用いてECSの予備実験を行うために、ビーコン送信機の搭載をNASDAに依頼した。これにより、ETS-Ⅱから送信される3波(1.7, 11.5, 34.5 GHz)の位相のそろったビーコンを用い、電波研究所では、昨年5月9日から実験を行い本年5月8日1年間の定常実験を終了した。この機会に本実験の内容と本日迄に得られた成果について、総合的な報告を行い、広く御意見を頂く今後、CS, BS, ECSと続く一連の通信放送衛星計画による実験への参考としたい。又、特にこれら衛星計画を含む電波研究所におけるミリ波準ミリ波の、伝搬特性の研究についての将来計画について検討したい。

1.2 経緯

約10年前の計画発足以来のECSの

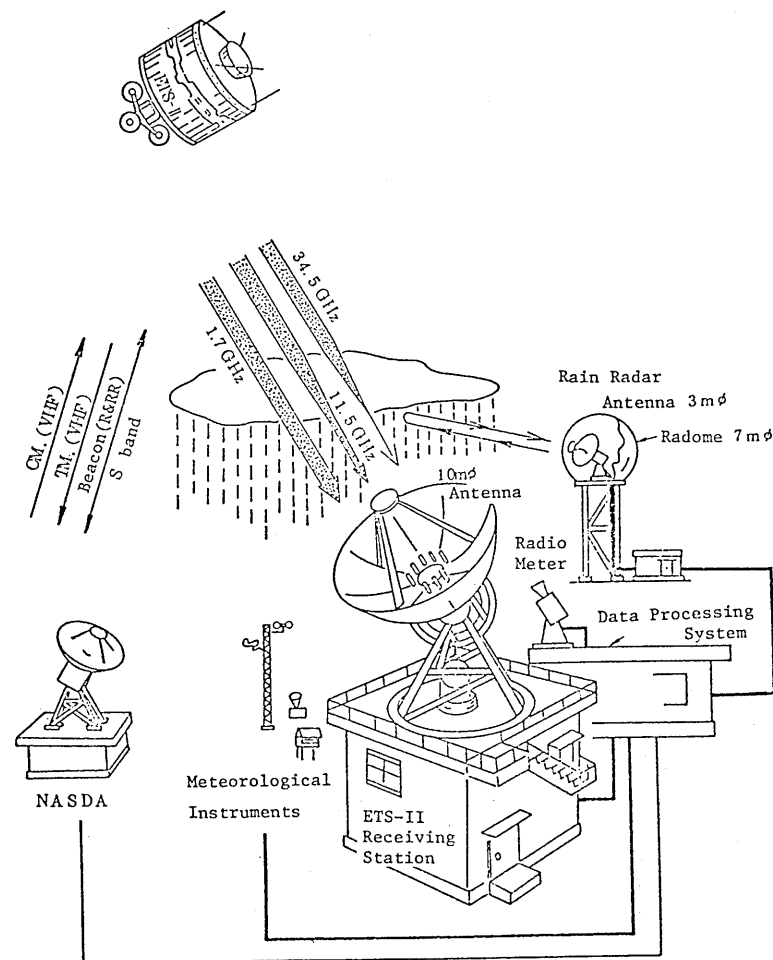
歩みは、我国の宇宙開発の歩みの縮図といえる。ロケットの開発状況、外国の衛星通信の進展状況に応じ計画の見直しが行われてきた。マイフロ波からミリ波に至る様々な周波数を含む当初のECS計画は、昭和48年のCS, BS計画の独立により、根本的なミッションの再検討が昭和49年度に行われた。時を同じくしてETS-Ⅱの基本設計の結果、ビーコンの送信電力が予定より小さくなることになった。そのため従来のETS-Ⅱ伝搬実験用施設として、主局4.5mφアンテナとその周辺に3~4個の1.2mφアンテナを配置するというシステムでは、十分な降雨マージンがとれないことになり、ETS-Ⅱ実験についても修正が必要となった。ECS実験は、ミリ波衛星通信の開発に重点を置くことになったこと、ETS-Ⅱ実験のみを目的とする施設の整備が諸般の事情で無理になったこと等も含め、ETS-ⅡECS実験計画全体について、徹底的な検討を行った。その結果、昭和49~50年度において、現在のETS-Ⅱ/ECSシリーズの実験計画及び実験施設の計画の基本的な考え方、方針とともに具体的な実験システムの構成、所要経費等の算定と実験及び施設整備のタイムテ

ケーブルがほぼ固まった。オ1.1図に、ETS-II実験システムの構成を、オ1.1表にETS-II/ECS計画の歩みの概要をおす。

1.3 ミリ波による衛星通信

ミリ波の電波は、大気中の酸素と水蒸気により、オ1.2図に示すような特徴的な減衰を受ける。水蒸気の吸収は大気中に含まれる量即温度の変化により変動する。これら減衰は、当然大気密度の

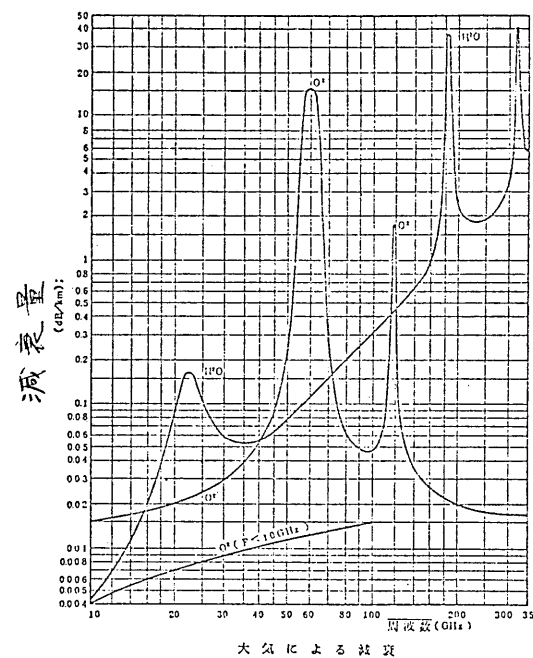
ETS-II PROPAGATION EXPERIMENT



オ1.1図 実験システム構成図

オ1.1表 ECS/ETS-II 計画年表

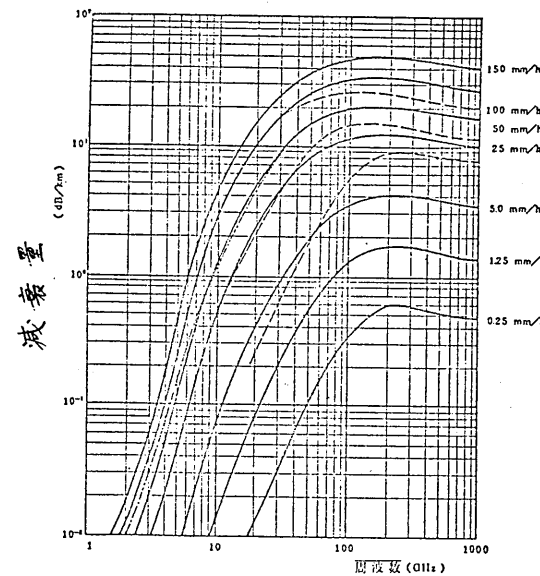
年度	衛星打上げ	ECS 計画スタート	代表的な衛星
42			INTELSAT-II Diademe(加) ATS-3
43			INTELSAT-III
44			APOLLO月着陸機あすみ(日) ATS-5 中国初の人工衛星
45			しんせいの(日)
46			INTELSAT-IV ERTS ANIK(加)
47			
48			Westar ATS-6 Symphonie
49			
50	ETS-I		Aryabhat Viking Satcom ラドカ(ソ連)
51	ISS		CTS(加) Marisat Comstar パラパ(インドネシア)
52	ETS-II		エクラン(ソ連)
53	CS BS		SIRIO(伊)
54	ECS		
55			



オ1.2図 大気によるミリ波の減衰

高い地表近くで主として起るため、衛星通信では衛星仰角が大きいかほど減衰は小さく、垂直方向では酸素約4km、水蒸気約2kmの地表面伝搬による減衰と等価な程度の減衰が発生する。ETS-II, ECSの仰角は約47度である。

ミリ波は雨、雪、氷晶等に依り減衰、散乱等その伝搬特性に影響を受ける。ミリ波を通信に使用しようとするための最も大きな障害となるものである。雨による減衰特性の概要はオ1.3図に示される。雨滴の大きさがミリ波電波の波長に比べ無視できないことからこれらの影響が起こる。したがって、雨滴の大きさとその分布、形状、温度等はミリ波伝



オ1.3図 降雨によるミリ波の減衰

搬特性に重大なかわりを持つ。雨、雪、氷晶等その状態と性質によりミリ波の受ける散乱や吸収は大幅に異なる。これらについて理論的な計算や模擬実験等が行われているが自然現象において、その時点における伝搬路上の状態を雨滴の大きさや形に至るまで知ることは非常にむずかしい。ETS-II実験では伝搬路上の雨等の量を正確に把握するほか、周辺の状態から雨の性質を知ることにより従来のものより一歩進んだ結果を得ようとしている。

衛星通信は地上通信に比べ大気中を伝搬する距離が短いため、ミリ波通信に有望であると考えられている。ミリ波

を通信に用いるには雨による劣化が最も大きな障害となるが、広い地域に降る雨は普通その密度が比較的薄く、ミリ波に与える影響もさほど大きくはない。ミリ波伝搬に重大な障害を与えるのは主に地域的な豪雨である。この種の雨は雨域が大体数km以下であるが普通、15km程度以上離れた二つの場所が同時に降る確率は非常に小さい。したがって衛星通信のように高仰角の伝搬経路を持つものは、十分離れた二つの地点に地上局を設けるといづれか一方が雨の影響を受けずに通信することができ、この二つの局を地上連絡回線が結び実効上一つの局として有機的に機能させることができれば雨の影響を全く受けないミリ波衛星通信回線を得ることになる。

1.4 計画の基本方針

実験を計画し、施設を整備するにあたって以下の基本的な考え方に沿って行った。

(1) 上に述べたように位相のそろったミリ波を含む広い周波数範囲の電波を持った伝搬実験を目的とする衛星計画は、世界でも例のないことである。この特徴を十分利用して最大限のインフォメーションを得ることに留意して実験施設を計画する。

(2) 実験期間に制約がある（当初予定は6か月間）ので、ミリ波伝搬特性の測定に際し、博物学的データの蓄積に終らないよう、即自然現象と伝搬特性との1

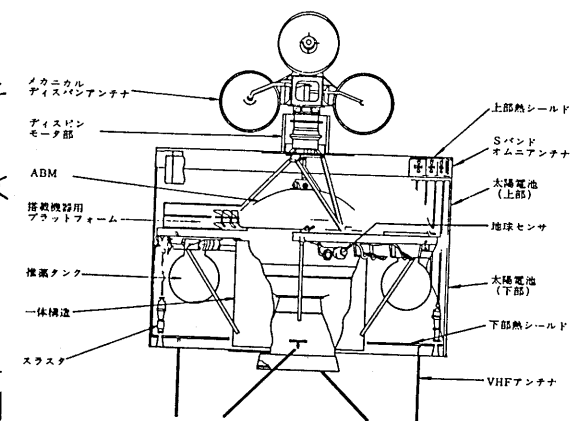
対1の対応関係を把握することを目的とする。このため、自然現象特に降雨の状態とできるだけ正確に知るための施設の整備に力を入れる。

(3) ミリ波大口径アンテナをはじめ数多くの工学的研究開発要素が含まれている。それら施設の整備に際しては積極的に新しい試みを取り入れていく。

1.5 衛星

ETS-IIはオ1.4図に断面図を示すように、3つの反射鏡からなる機械式デスパンアンテナを持つ円筒形のスピン安定衛星である。衛星システムのブロックダイアグラムをオ1.5図に主要諸元の概要をオ1.2表に示す。

伝搬実験用送信機は、オ1.6図に示すように一つの水晶発振器からの信号を連倍し、1.70500GHz、11.50875GHz、34.52625GHzを作り、それぞれのMDAへ供給している。従って



オ1.4図 ETS-IIのプロフィール

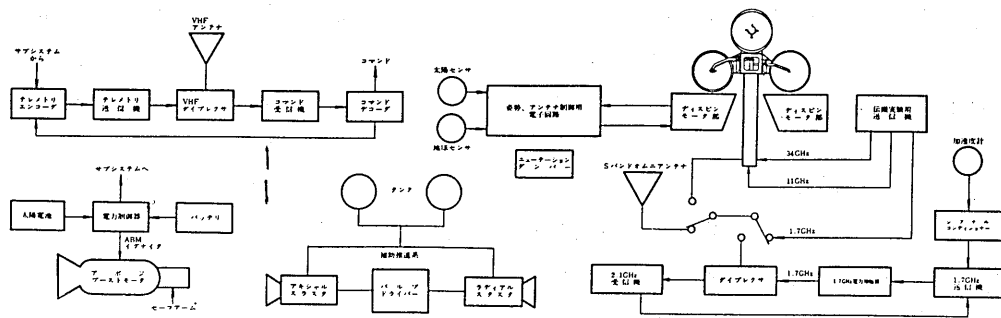


図1.5 衛星のブロックダイアグラム

表1.2 衛星の諸元

直径：約1.4 m

高さ：約1.8 m

重量：約130 Kg (軌道上)

約254 Kg (打上げ時)

電源系

バス電圧：29.4 ± 0.2 V_{DC}

太陽電池起電力：約100 W

二次電池：3 AH NiCd 2系統

二次推進系：一液式ヒドラジン

姿勢・軌道制御系

スピン率：100 ± 15 rpm

姿勢検出センサー：地球センサー、太陽センサー

熱制御系：ヒータ及び受動形

伝搬実験用送信機 (PET)

周波数 GHz EIRP (公称値) dBm

1.70500 +28.0

11.50875 +46.0

34.52625 +50.0

コマンドにより、1.7 GHz と 34.5 GHz は

300 Hz 100% AM変調可。

Sバンド中継器

ビーコン：1.7 GHz

測距：帯域中 8.2 MHz

周波数 2.1 GHz (上り回線)

1.7 GHz (下り回線)

機械式デスパンアンテナ (MDA)

Sバンド、Xバンド、Kバンド 各ディッシュ形
リフレクター

Sバンドオムニアンテナ

スピン軸に垂直な方向への放射パターンをもつ
リングアレイ ±30° パターン > -10 dB

VHFオムニアンテナ

4素子アンテナ

テレメータ系

周波数：136 MHz 帯

送信出力：2 W

エンコーダ：64 words / Frame
8 bits / word

データ速度：250 bits / sec

チャンネル：128 words

アナログ：96 チャンネル

デジタル：87 ビット

コマンド系

周波数：148 MHz 帯

変調方式：PCM / FSK / AM / PM

チャンネル数：128

方式：2種のトーン ("1": 8600 Hz, "0": 7400 Hz)

静止位置：東経 130 ± 0.5 度

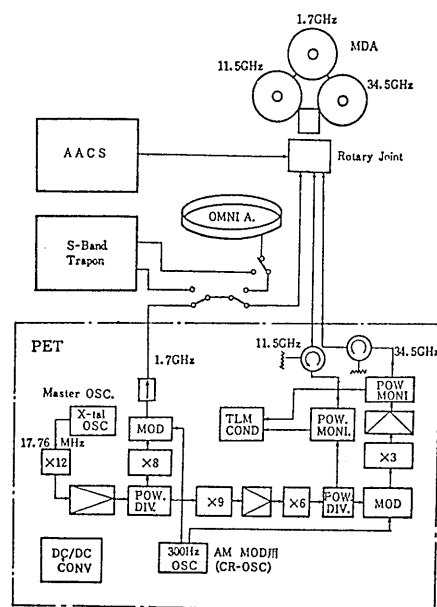
軌道保持：緯度方向 ± 1.0° 以内

経度方向 ± 0.5° 以内

アンテナ角度制御範囲：東西方向 ± 4° (0.2° ステップ)

姿勢決定精度：0.1° (3σ)

ミッション期間：1年以上 (PET: 6ヶ月以上)



※1.6図 PETブロックダイアグラム

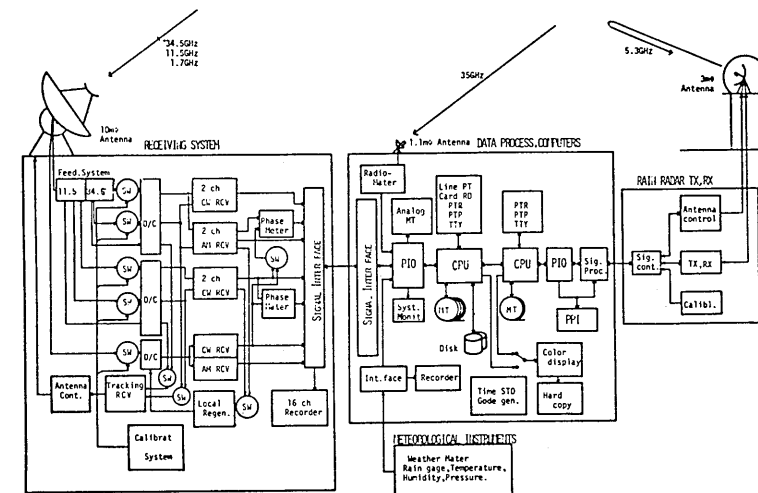
これら3波のビーコンは、位相が互に一定の関係を保ち送信されている。ミリ波の降雨マージンを改善するため1.7GHzと34.5GHzの2波はコマンドにより300Hzの100%振中変調をかけることができる。

1.6 実験システム

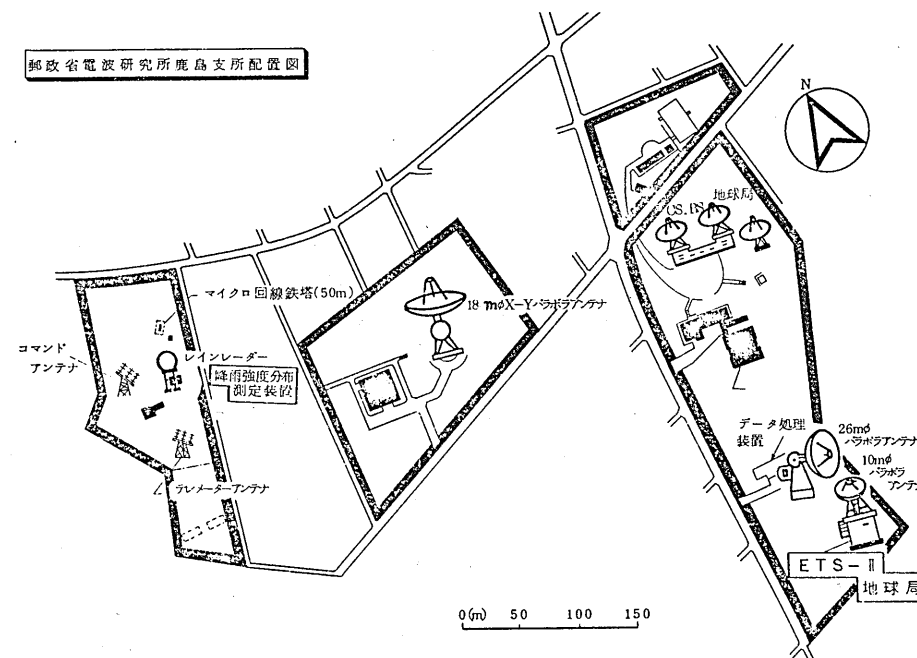
ETS-II実験に用いられる地上システムは※1.1図に示すように、10mφアンテナを持つ主受信局、多機能降雨レーダ、35GHz帯天空雑音温度測定装置(ラジオメータ)、各種気象測器(気温、湿度、気圧、風向、風速、雨量)データ処理、制御用計算装置からなる。実験システムのブロックダイアグラムを、

※1.7図に示す。受信装置、アンテナ制御装置は10mφアンテナ下の方舎に収められ、検出信号はデータ処理装置の設置された26mφアンテナ方舎までケーブルで送られる。降雨レーダはアンテナ及び送受信装置が約1kmの長さのケーブルで、26mφ方舎にあるデータ処理制御計算装置と結ばれている。鹿児島支所における各施設の配置図を※1.8図に示す。35GHz帯ラジオメータは、26mφ方舎の屋上に置かれ衛星方向に固定した天空雑音温度を測定する。気象測器は26mφアンテナ南側に設置されているが、雨量計は転倒マス型1台の他に、即応型雨量計が受信局及び伝搬路下の中学校等3か所計4台設置されている。即応型雨量計は、ジョーブで集めた雨がその先端から、均一の大玉状の水滴となり落ちるところを光学的に計数するもので、わずかの雨でも1分毎の雨量として測定値を得ることが出来る。データ処理・制御用計算装置は、降雨レーダ用と受信信号用の2台があり、両者は通信制御装置を通して接続され、データや制御信号の交換のほかラインプリンターやカラーグラフィックディスプレイ装置の相互使用が可能となっている。又、互に相手側で記録された磁気テープを解読使用できる。これらの他に、標準型及び長時間型アナログレコーダがあり、長時間型は約1週間データを一本のテープに連続記録することができる。

これら実験システムの整備において、



※1.7図 実験システムのブロックダイアグラム



※1.8図 実験施設配置図

特に配慮したものや、新しい試みを行ったもの等の例をあげると

(1) ミリ波大口径アンテナに高い鏡面精度を得るため、設計、製作、測定に注意を払った。特に測定については鏡面精度の光学的特性を仰角 90° の他に 45° 度についても行った。又、アンテナ特性の測定には地上コリメーションの他、ヘリコプター、衛星電波も使用した。

(2) 広範囲にわたる多周波を一つのアンテナで受信するため及びECS実験への改造を容易にするため、給電系の構成を工夫し、新しい試みを行った。

(3) 衛星から送信される3波のビーコンの位相がそろっているから、地上の受信装置中で相互の位相関係を保つことができれば、衛星の動きによるドップラー効果等を無視することができ伝搬媒質による位相への影響を知ることができる。このため1.7 GHz又は11.5 GHzの受信電波から衛星の厚周波数を再生し、これを全受信系の基準信号とするような受信装置の構成を採用した。

(4) ミリ波によるアンテナの自動追尾を行った。

(5) 多様な機能を持つ特殊な降雨レーダを製作し、降雨の状態がより正確に把握できるようになった。

(6) データはすべて計算機により収集され、実験は原則として無人で24時間運用することができるようになった。

(7) 即応型の雨量計を採用することにより雨の変動状態が少しい雨量のときも

正確にわかるようになった。

これら実験システムを用いた伝搬実験を行う場合の回線設計例を表1.3表に示す。カッコ内はそれぞれ衛星フライトモデルと地上局の実測値及びそれより算出した降雨マージンであり、本実験の実際の性能に相当する。

1.7 実験の運用

衛星打上げ後各種のテストを終え、4月下旬より連続実験に入り、食時、測距時等を除き1日24時間ベースで実験を行ってきた。

表1.4表に示すようにデータは主に、200 msec毎にサンプリングされ、1分毎に取得されるデータシステムのステータス信号等とまとめて磁気テープに記録される。又、降雨レーダの各種降雨パターンは、12分毎又は、1分毎にラインプリンター、カラーグラフィックディスプレイ及びそのハードコピーに表示、出力される。

ETIS-II実験終了後CS、BS、ECSの実験が行われるが、これら衛星の伝搬実験のデータは電気信号でこのシステムのデータ処理装置へ送られ収集処理される。これによりETIS-IIをはじめとするこれら衛星計画における伝搬実験の実行とデータの利用を統一的に行うことが出来る。

取得されたデータは、各データの1日の時間変化とデータ間の相互関係が把握できるようなXYプロッター表示(日報)

表1.3 回線設計例

	1.7 GHz	11.5 GHz	34.5 GHz	Spec.
Sat.eirp (dBm)	28.0 (34.5)	46.0 (50.1)	50.0 (54.3)	() : FMの実測値
Point.error (dB)	0.1	0.5	1.0	
Parth loss (dB)	188.8	205.4	214.9	
Atmos.loss (dB)	0.1	0.2	0.5	
Rec.Ant.gain (dB)	41.0 (40.0)	59.8 (60.8)	68.7 (69.7)	() : 実測値
Feeder loss (dB)	3.0	1.0	1.0	
Track.error loss (dB)	0	0.1	0.5	
Rec.Power (dBm)	-123.0	-101.4	-99.2	
Rec.Noise Temp. ($^{\circ}$ K)	170(2)	860(6)	2000(9)	() = NF[dB]
Ant.Noise Temp. ($^{\circ}$ K)	10.	20.	30.	
Rec.System Noise Temp. (dB $^{\circ}$ K)	320.0	935.7	2083.6	
Rec.Noise Power Dens. C/No (dB)	25.05	29.71	33.19	
Rec.Noise Power Dens. C/No (dB)	-173.55	-168.9	-165.4	
CW-mode (PLL)				
PLL B.W. (dBHz)	27.0(500)	30.0(1000)	30.0(1000)	() = Hz
C / N (dB)	23.6	37.5	36.2	C/N=2dB
PLL hold limit (dBm)	-148.7	-136.9	-133.4	
Req.PLL margin (dB)	7.0	7.0	8.0	
PLL thresh. (dBm)	-141.7	-129.9	-125.4	
PLL thresh.margin (dB)	18.7 (22.0)	28.5 (33.2)	26.2 (31.5)	
AM-mode				
AM mod.loss (dB)			-4.0	
Req.AFC loop hold S/N			4.0	
IF B.W. (dBHz)			40.0	10 KHz
After Det.B.W. (dBHz)			0.	1 Hz
AFC hold limit C/No			24.	
AFC hold margin (dB)			42.2 (47.5)	

1か月間のデータによる統計処理(月報)が行われている。

強い降雨等特殊な現象の時の特別なデータ処理等が行われている。これらのオフライン処理は計算時間、プログラム等に誤算があり、実験初期一時混乱があったが以後順調に処理とデータの利用が

実験は当初6か月間の予定であったが、実験が好調に行われ貴重な成果が出ていること等から、宇宙開発委員会始め各方面から延長の要望があり、1年間の実験とした。ECS計画の検討が進み、施設

表1.4 取得データ一覧表

装置	データ	測定頻度	測定範囲	量子化単位
受信装置	34.5GHz 受信信号 CW波出力レベル	200mSec毎	0~-40dB	1dB
	34.5GHz 交差偏波	"	"	"
	11.5GHz 受信信号	"	"	"
	11.5GHz 交差偏波	"	"	"
	1.7GHz 受信信号	"	0~-30dB	"
	34.5GHz 受信信号/交差偏波 位相差	"	-180°~+180°	2°
	11.5GHz " " "	"	"	"
	1.7GHz 受信信号/34.5GHz 受信信号位相差	"	"	"
	1.7GHz " /11.5GHz " "	"	"	"
	振中変動高感度受信機	200mSec毎	0~-50dB	1dB
設置	34.5GHz 受信信号 AM波出力レベル	200mSec毎	0~-50dB	1dB
	34.5GHz 交差偏波	"	"	"
	11.5GHz 受信信号 CW波	"	0~-40dB	"
	11.5GHz 交差偏波	"	"	"
	1.7GHz 受信信号 AM波	"	0~-30dB	"
天候観測装置	標準抵抗雑音温度出力	200mSec毎	293~303°K	1°K
	35GHz 天候雑音温度出力	"	160~70°K	5°K
	"	"	70~40°K	3°K
	"	"	40~0°K	1°K
降雨観測装置	Pm データ	1分毎	0~150mm/h	0.1mm/h
	CAPPI データ	12分毎	"	10段階表示
	RHI データ	"	"	"
気象計	風向・風速・温度・湿度・雨量・気圧 (主局の位置) 雨量 (伝搬路下の3点)	1分毎 打点記録計		

整備のスケジュールの詳細が決まり延長が可能となった。6か月から1年への実験期間延長は伝搬実験として単に2倍にデータ量が増したという以上の大きな意味を持つ。

1.8 成果の概要

ET S-II 実験は衛星の成功と相まって予期以上の成果をあげてきた。ミリ波衛星回線伝搬実験として、定常的な実験を行い1年間でテストタイムが数4時間を超える密度の高いものとなった。衛星が好調であるにもかかわらず、地上局をECS実験に改造使用する必要から実験を打ち切ることには残念であるが、本実験は長時間の統計データを得るより、むしろ、気象状態と伝搬特性の関係の把握に重点を置いて計画したものであり、降雨レーダ等を駆使して行った実験は所期の目的を達するに十分な成果を得てきた。昨年8月は例年になく降雨が多かったことから降雨とミリ波伝搬特性について、予想以上の豊富なデータを得ることができた。又、台風が近くを通り、台風時の伝搬特性ばかりでなく、地上局の運用等についても貴重な経験を得た。対流圏における伝搬特性の他に電離圏での伝搬特性からその性質や原因について興味ある結果を得た。これらの中には予期していなかった発見や優れた成果が

あり、又、2月15日の強い磁気嵐に伴う現象等貴重なデータも含まれている。

実験の成果は次々とまとめられ、内外の学会、研究会ですでに数多く発表され、高い評価と大きな反響を得ている。取得された膨大なデータから今後更に多くの成果が導き出されるであろう。ET S-IIの成果は後に続く衛星計画の実験により効果的に行うために貴重なものとなるであろう。

1.9 おわりに

表1.5表には現在までに計画あるいは実験されたミリ波準ミリ波の実験衛星とその周波数である。これから明らかになようにET S-II実験は世界的にもまれな計画である。今後更にCS, BS, ECS

ECSによるミリ波準ミリ波の伝搬実験のデータを加え、統一的に有効に利用することにより他の追従を許さぬ経験と成果を得ることができようであろう。

ET S-IIミリ波伝搬実験が成功裡に行われたのは、電波監理局、宇宙開発事業団をはじめとする関係機関、関係会社の方々及び電波研究所内の多くの方々の御協力、御援助によるものである。あまりにも多く、個々の名をあげる事ができないが、我々の胸には深く刻まれている。心から感謝の意を表する。又、ET S-II実験の準備、実行はその作業の規模に比べ非常に少ない人員で行われてきた。これを可能にした所内、ET S-II/ECSグループの人々の努力と献身に敬意を表する。

表1.5 実験衛星と使用周波数

ATS-V	15	↑	32
ATS-VI	4 ↑	20	30
ATS-VI	4 ↑	↑	↑
CTS	12 ↑	13	18
COMSTAR	19	29	
ETS-II	1.7	11.5	34.5
OTS	11 ↑	↑	↑
SIRIO	12	↑	18
CS	4 ↑	20	↑
BS	12 ↑	↑	30
ECS	4 ↑	32 ↑	↑

↑:UP LINK ↑:DOWN LINK

2. アンテナ装置とその特性

2.1 要求された条件

昭和51年秋、ETS-IIを用いたミリ波、準ミリ波の伝搬実験のために直径10mのカセグレンアンテナが鹿島支所に建設された。ミリ波帯電波を用いる10m級のアンテナは世界的にも例が少なく利得、放射指向性、交差偏波識別度、アンテナ雑音温度等の放射特性や“針の光”のようなミリ波ビームの追尾、高い鏡面精度の確保などの程度の電氣的機械的性能が実現されるか計画当初大きな関心と少なからぬ不安があった。また出来上がったアンテナの特性の測定にも色々な問題が考えられこれも大きな研究課題であった。

このアンテナには次のような条件が課せられていて、これを満たすためのアンテナ方式の検討が電氣性能、機械性能の両面から行われた。

(a) ETS-II/ECS 共用

アンテナの主要部分は両衛星に対して共用する方針が立てられた。従って必要最小限の改造でECSに用いられ、かつ両衛星に対して十分な性能が得られる方式であること、受信専門のETS-IIに対しECSではHPA、LNA等の機器が使用されるので保守、運用上これらの機器が地上に固定されるのが望ましいこと等から結局4枚反射鏡を用いた集束ビーム伝送方式のカセグレンアンテナが選定された。この方式は同時にミリ波アンテナで問題

となる給電系損失を低く抑えるためにも望ましい。

(b) 多周波数帯の共用

ETS-IIでは1.7GHz, 11.5GHz, 34.5GHzと非常に隔たっている周波数が用いられるのでそのための特別な工夫が必要となる。全部の波をビームガイドで伝送させるのはガイドの径が大きくなりすぎて現実的でない。そこで11.5GHz, 34.5GHzの波はビームガイド伝送とし低周波は高周波帯のビーム伝送に妨害を与えないようビームウェストの周囲にリングアレイを置いて分波する。この方式はECSにも受継がれる。またこ

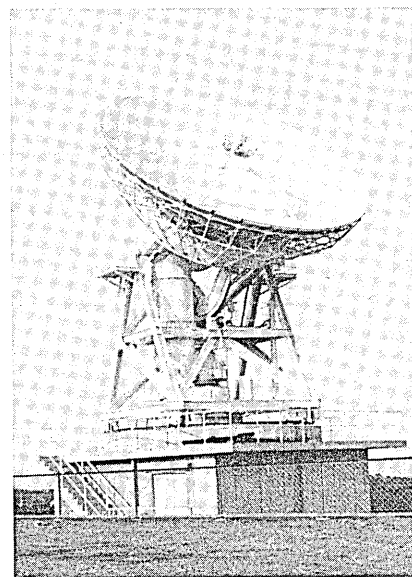


写真1. 10mアンテナの外観

のアンテナは11.5GHz, 34.5GHz いずれでも自動追尾できるように求められている。通常はミリ波で精密追尾をし豪雨時に準ミリ波による追尾に切替えられるようになっている。

(c) ミリ波使用

ETS-II、ECSともミリ波を使用する。ミリ波帯大口径アンテナでは鏡面の製作精度、自重、熱歪、風圧等による理想曲面からのずれが放射特性に大きな影響を与える。

ランダムな鏡面誤差による能率の低下 η_r は誤差を ϵ (rms)、波長を入とすると

$$\eta_r \text{ dB} = -685.8 \left(\frac{\epsilon}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

である。例えば34.5GHzで、 $\epsilon = 0.25 \text{ mm}$ では $\eta_r = -0.57 \text{ dB}$ であるが $\epsilon = 0.5 \text{ mm}$ になると $\eta_r = -2.27 \text{ dB}$ と急激に低下する。直径10mのアンテナをストレッチパネル張合せでどれだけの面精度が実現されるか多少不安であったが、パネル単体を小さくし、背骨部への据付け点を増し据付け調整を念に行えば $\epsilon = 0.25 \text{ mm}$ (rms)が十分可能であるとの見通しを得た。製作担当メーカーも $\epsilon = 0.2 \text{ mm}$ を目標とすることなので我々も意を強くしてストレッチパネルを張り合せるアンテナとすることにした。

その他、自重や風圧等による鏡面歪みを小さくするためにセンターハブを通常のアンテナより大きくするなど機械構造部でもミリ波を意識した設計が求められ

ている。

2.2 アンテナの構成

写真1にこのアンテナの外観、図1にアンテナの構成を示す。

このアンテナは高能率設計の鏡面修正カセグレンアンテナでマウントは全天指向型Az-E₂型式である。

11.5GHz, 34.5GHzの波はアンテナで受信された後、4枚反射鏡ビームガイドを通して伝送され一次ホーンに導かれる。一次ホーンとしてはE/H面のパ

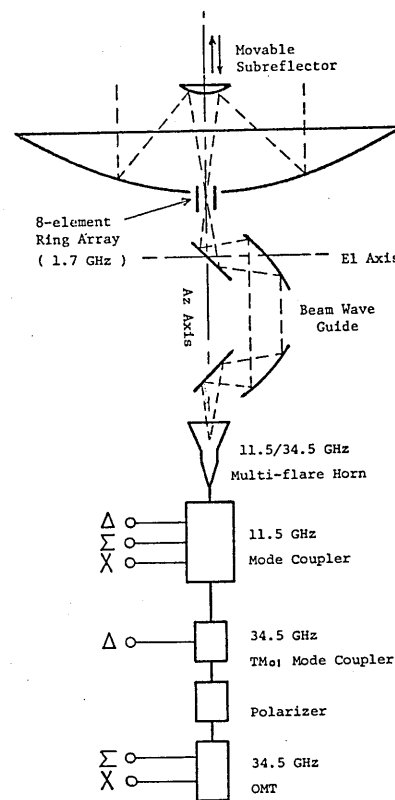


図1 アンテナ系の構成

ターンの対称性と 30 dB 以上の交差偏波識別度を確保するように設計されたマルチフレアホーンが用いられている。

1.7 GHz の分波は図 1 に示すようにカセグレンアンテナのビームウェストの周囲に 8 素子のヘリカルアンテナアレイを配置して行っている。これはビームウェストの径が波長に比例することを利用したものでリングアレイの半径を適当に選べば中を通るミリ波、準ミリ波のビーム伝送にはほとんど影響を与えない。

図 2 に 11.5 GHz のビームウェスト部の電界分布が示されている。ヘリカルアンテナの置かれた位置では 11.5 GHz のビーム強度は -30 dB 以下になっており、アレイのブロッキングによる伝送損失は 0.2 dB 以下である。34.5 GHz のビームはより集束されているのでブロッキングの影響は無視できる。

マルチフレアホーンに導かれた 2 波はその後 11.5 GHz 用ハイブリッド型分波回路で角度誤差信号 (TM₀₁ モード)、主(右旋

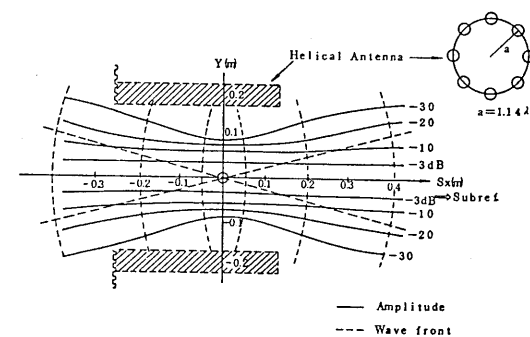


図 2 ビームウェスト部の電界分布

円偏波)、交差(左旋円偏波) 偏波が取出された後、34.5 GHz TM₀₁ モード結合器でミリ波帯追尾誤差信号を検出し、さらに円偏波発生器、OMTを通して主、交差円偏波が取出される。

鏡面精度の測定は天頂と 45°仰角で行われた。実測値から求められた鏡面精度を表 1 に示す。衛星運用仰角 (45°) でも鏡面精度は 0.25 mm RMS 以下に収まっている。

その他、このアンテナで特徴的なことはフレネル領域におけるアンテナ測定のために副反射鏡が下からのリモートコントロールで鏡軸に沿って可動できるようにになっていることである。

2.3 準ミリ波、ミリ波帯大口径アンテナの測定法

準ミリ波、ミリ波帯大口径アンテナではそれ自体の開発もさることながらその持つ電気特性を正確に把握することが容易でなく、信頼性が高くかつ

表 1 鏡面精度実測値

	単位 mm RMS	
El angle	90°	45°
パネル単体精度	0.124	0.124
パネル据付精度	0.05	0.181
測定点数	384 点	112 点
測定誤差	0.07	0.09
総合面精度	0.151	0.237

簡単な測定法を確立することは非常に重要な問題となっている。

一般にこのような周波数帯のアンテナでは遠方界測定を目安とされる Fraunhofer 距離 R_F はかなり大きくなる。例えば周波数 34.5 GHz、直径 10 m のアンテナでは R_F は 23 km にも達する。このような場所に見通しのよいコリメーション塔を得ることは極めて困難であるうえ、ミリ波を地表に沿って大気中を長距離伝搬させた場合、大気の屈折率の乱れが伝搬特性に影響を与え、それがそのままアンテナ測定に入り込む結果となる。

ミリ波帯地球局アンテナの測定法としては

- (a) 衛星電波を使った直接測定
 - (b) 近距離 (フレネル領域) における測定からのシミュレーション
 - (c) 電波星を用いた利得の絶対測定
- 等が考えられる。以下簡単に利害得失を述べる。

衛星を使用できれば (a) は最も信頼性の高い測定ができる。また他の測定法の精度を検討するときの基準になる。ただし一般には衛星打上げ後ただちに衛星の諸パラメータを測定しなければならず、打上げ前に地球局アンテナの特性を把握しておく必要がある。

(b) は簡便でかつ伝搬の影響を小さく抑えられる方法である。これについての研究が理論と実験の両面から電波研究所で行われた。

フレネル領域にある波源から被測定ア

ンテナに到来する電波の等位相面はアンテナ開口面上では図 3 に破線で示すように半径の 2 乗に比例する放物曲面となり、開口中央部と端の部分に大きな位相差が生じる。そのまま測定すれば求めようとする遠方界における放射特性とは大きな隔りができる。このときカセグレンアンテナの副反射鏡を鏡軸に沿って主反射鏡から離れる方向にわずかに動かすとこれによってアンテナの等位相面が同図の実線のように変化し、フレネル波源による開口面上の位相差を補償できる。理想的カセグレンアンテナについての解析結果では無限遠波源に対応した副反射鏡の位置から δ だけずらした場合の開口面上の位相分布 $\psi(r)$ (r : 開口面上半径) は

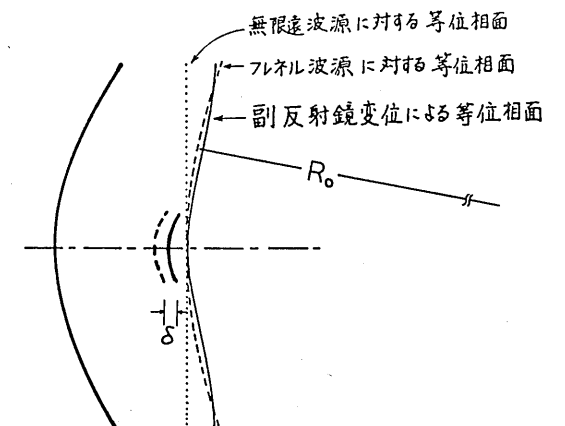


図 3 副反射鏡変位によるフレネル効果の補償

$$\Phi(r) = 4k\delta \left\{ \frac{r^2}{(2f_p)^2 + r^2} - \frac{er^2}{(e+1)^2(2f_p)^2 + (e-1)^2r^2} \right\}, \quad (2)$$

となる。ここで $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, f_p : 主反射鏡の焦点距離、 e : 副反射鏡離心率である。従って副反射鏡変位による等位相面は厳密には破線の放物曲面とは一致しないので完全な位相補償は行えないが副反射鏡の位置を最適に選ぶと十分高精度の測定が可能である。

図4は振幅、位相が均一分布のカセゲレンアンテナに対し、利得が最大になるような副反射鏡の最適変位 δ_{opt} とこのときの遠方界利得からの利得低下量 ΔG を測定距離 R_0 の関数として示したものである。また図中の○印は後節で述べる地上のコーリメーションおよびヘリコプターを使って行なったときの最適変位量の実測値で理論曲線とよく一致している。

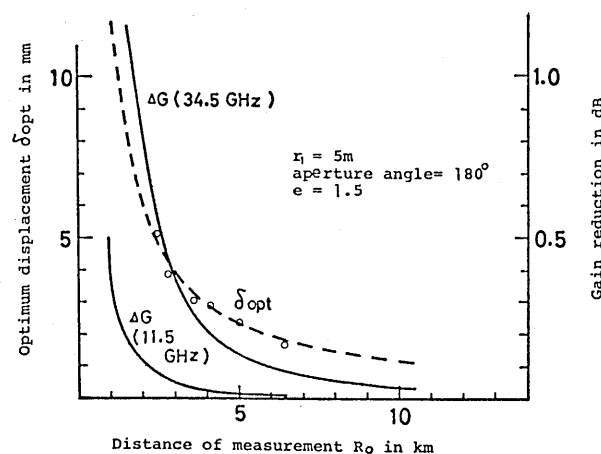


図4 最適副反射鏡変位 δ_{opt} と遠方界利得からの利得低下量 ΔG

$\Delta G = 0.2$ dB以下で測定できる距離 R_0 は Fraunhofer 距離の $1/5$ 程度でよいことが結論づけられる。

この方法はあまり高い精度は期待できないが極めて簡便で実用的な方法である。

(c)の電波星を使う方法は4GHz帯などの低い周波数帯では確立された方法である。しかしよく用いられるカシオペアA、タウラスA、等の電波星は周波数とともにフラックス密度が下り、ミリ波帯ではかなり弱くなる。またアンテナビーム幅に比した星の広がりが大きくその補正がはまりしない。金星、木星のような惑星はフラックス密度も大きく星の広がりも小さいのでミリ波帯では有望であるが強度があまり明確でないのと測定時期に制約を受けるのが難点である。ETS-II用10mアンテナではこれらの理由と広帯域低雑音受信機を備えていないことから電波星を使った測定は行れなかった。

2.4 測定されたアンテナの特性

測定は前節(a)と(b)の方法で行れた。(b)のフレネル領域における測定では約2.5km離れた工場(鹿島共同火力)の煙突を地上較正塔として用いた測定と図5に示すように発振器と3周波数用個別のアンテナを搭

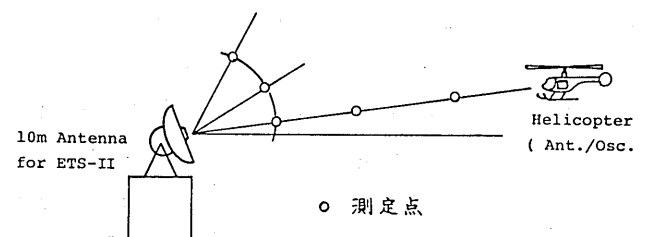


図5 ヘリコプターを用いたアンテナの測定

載したヘリコプターを適当な数カ所の点にホバリングさせ、距離や仰角を変えた測定を行なった。ヘリコプターを用いた測定の目的は測定距離を変えて実験をすることによって前節で述べた副反射鏡変位による測定の理論を検証することと測定法の信頼性を確認することおよび鏡面のたわみの影響を調べることであった。

(1) 利得

表2に各方法で行われた給電系損失を含んだ利得の推定値と測定結果を示す。推定利得はアンテナ設計段階で見積られた給電系損失、鏡面粗さによる能率低下、開口ブロッキング等を差引いた値で、衛星を用いた測定結果とよい一致を見せておりほぼ設計通りのアンテナが実現さ

れたことを裏づけている。打上げ前は約5km離れた東京電力の煙突を較正塔として用いたが、この煙突の近くには他の煙突があり、それによる散乱が到来波の波面を乱していたようで、初め副反射鏡の3次元的位置設定や

ビームガイドの反射鏡の設定はこの波を使って行なったため満足な性能が得られなかった。後ETS-II打上げ後衛星電波を使ってアンテナの調整をやり直した結果特性はかなり改善された。このことは測定環境がアンテナの測定にとっていかに重要であることを物語っている。ここで紹介するデータはすべてこの再調整後のものである。

衛星を用いた利得の測定は3回行われた。季節によってわずかの差はあるがほぼ一定した値になっている。

表2には同時に前節で述べた副反射鏡変位によるフレネル領域における測定例が示されている。共同火力の煙突を用いた値が多少低いのは距離が近い

表2 準ミリ波、ミリ波帯の利得(含給電損失)

周波数	推定利得	衛星電波使用			フレネル領域での測定 (副反射鏡変位法)		
		1977/4	1977/8	1978/3	ヘリコプター $R_0=5.0\text{km}$ $El=10.0^\circ$	地上較正塔 $R_0=4.0\text{km}$ $El=23.5^\circ$	地上較正塔 $R_0=2.5\text{km}$ $El=2.78^\circ$
11.5GHz	59.97 dB	60.14dB	60.1 dB	60.1 dB	—	—	60.1 dB
34.5GHz	68.97 dB	69.0 dB	68.8 dB	68.8 dB	68.8 dB	69.1 dB	68.4 dB

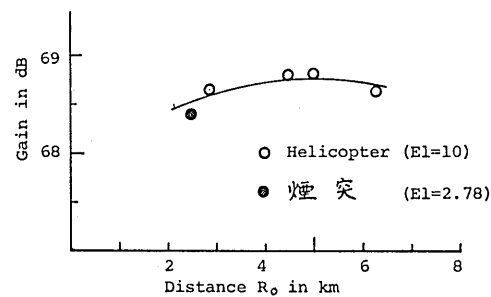
ため、副反射鏡変位によっても補償しきれない開口面上の位相誤差が大きいと考えられる。図4から読みとった $R_0=2.5\text{ km}$ におけるFraunhofer利得からの低下量 $\Delta G=0.5\text{ dB}$ を加えるとほぼ衛星によるデータと一致する。

次にヘリコプターと地上校正塔を用いた副反射鏡変位によるミリ波の測定で、距離と仰角の違いによる影響について述べる。

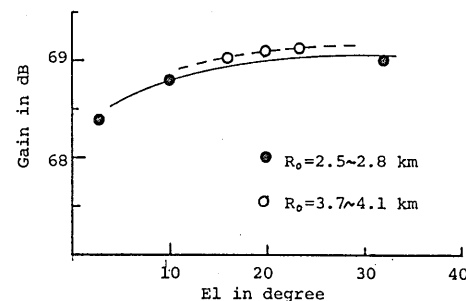
図6(a)は 10° 以下の仰角で距離を変えた場合の測定例である。図4から距離が

図6 フレネル領域における 34.5 GHz の利得

(a) 低仰角における距離特性



(b) 仰角特性



長くなるにつれ利得は上るはずであるが $R_0=7\text{ km}$ では逆にやや下っている。これはミリ波電波が大気中を伝搬する距離が長くなるにつれ、吸収やシンチレーションなど媒質の影響を受けるためと考えられ、結局この測定法自体の誤差と伝搬の問題からこれには測定に適した距離範囲のあることがわかる。

図6(b)は距離一定で異なる仰角における利得のデータである。距離はヘリコプターのホバリングの際、適当な目標を選ぶ必要があって、全く同一にはならなかったが一般に $2.5\sim 2.85\text{ km}$ および $3.7\sim 4.1\text{ km}$ の範囲内のデータはそれぞれ同一距離のグループに属するとみなしてまとめられている。なお距離測定は鹿島支所に設置されている降雨レーダを使って行なった。仰角と利得には明らかに相関が認められ、仰角の高い方が利得が高くなっている。これは低仰角なほど鏡面のたわみが大きく、ミリ波ではその効果がはっきり出てくることがわかる。

結論として、表2や図6からわかるように副反射鏡変位によるフレネル領域での測定は測定距離を適当に選べば十分に高い精度の測定が可能であり、この方法は測定の簡便さから実用的価値は大変に大きい。

(2) 近軸指向性

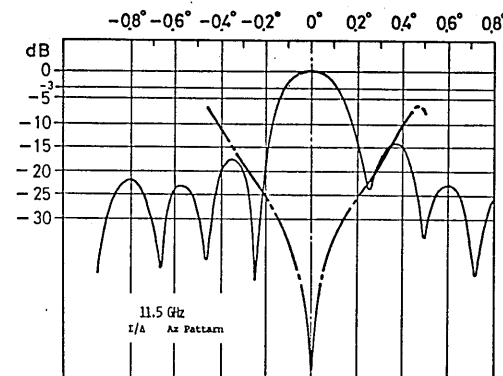
図7(a),(b),(c),(d)は衛星を使って測定した 11.5 GHz と 34.5 GHz における近軸の和および差指向性である。和

指向性のビーム幅は 11.5 GHz で 0.18° 、 34.5 GHz で 0.06° 、また差指向性のヌル軸は両周波数で完全に一致しており、ヌルデプスはいずれも 40 dB 以上になっている。

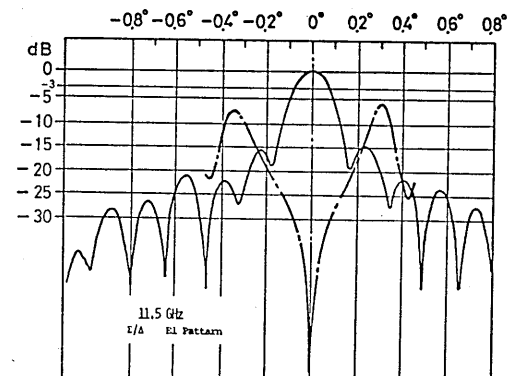
副反射鏡変位法でフレネル領域においても指向性の測定を行ったがサイドローブの谷が埋って浅くなる以外は概ね衛星を用いた測定データに近いものが得られている。

図7 近軸指向性

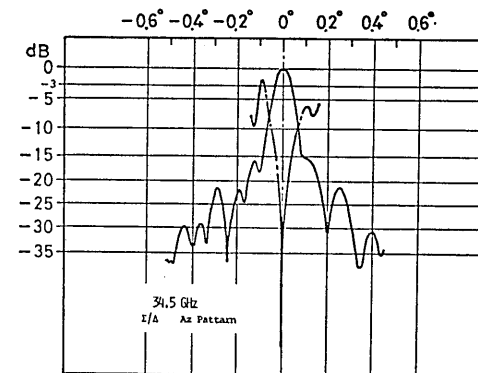
(a) 11.5 GHz Az パターン



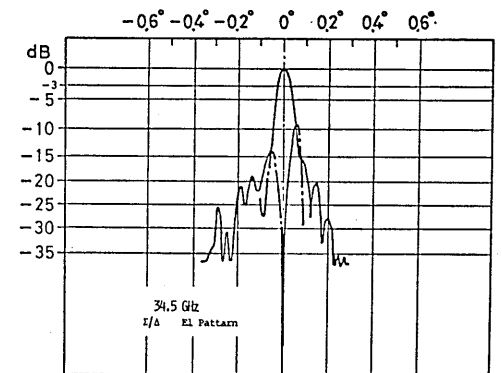
(b) 11.5 GHz El パターン



(c) 34.5 GHz Az パターン



(d) 34.5 GHz El パターン



測定は地上較正塔に設置された円偏波特性の良好なコルゲートホーンより送信し、10mアンテナの主および交差偏波端子の出力レベルを比較して行われた。その結果、ビーム中心方向の交差偏波識別度は11.5 GHzで33 dB、34.5 GHzで32 dBであった。

(5) アンテナ雑音温度

1.7 GHzと11.5 GHzはY-ファクタ法、34.5 GHzはディック形ラジオメータ法で測定した。衛星運用仰角に近い45°の値は1.7 GHz(ハイブリッド出力端で) 142°K, 11.5 GHz(給電端で) 57°K, 34.5 GHz(給電端で) 64°Kである。

2.5 おわりに

以上 ETS-II実験のために建設された多

周波数帯共用10mアンテナの設計方針、構成およびその性能について述べた。準ミリ波、ミリ波を使用するアンテナはマイクロ波帯のアンテナに比べて設計、製作はもとより特性の測定等に難しい問題があり、それらを克服するために多くの研究開発が必要であったことがおわかりいただけたであろう。

現在、このアンテナはこれに続く高感度受信機と共にその秀れた性能を十分に発揮して数々の貴重な伝播データを取得する中核的役割を果たしている。

表3にこのアンテナの主要性能をまとめてこの稿を終える。

表 3 ETS-II 用 10m アンテナの主要性能

周波数	1.7 GHz	11.5 GHz	34.5 GHz
利得(含給電損失)	40.2 dB	60.1 dB	68.8 dB
ビーム幅	1.1°	0.18°	0.06°
雑音温度 ($E_t=45^\circ$, 晴天時 含給電損失)	142°K (ハイブリッド出力端)	57°K (給電端)	64°K (給電端)
交差偏波識別度	—	33 dB	32 dB
差パターンマルテパス	—	40 dB	40 dB
給電損失	3.60 dB (同軸線路)	0.7 dB	0.7 dB
V.S.W.R.	1.2 以下	1.1 以下	1.1 以下
鏡面精度	主反射鏡 ($E_t=45^\circ$) 0.237 mm rms 副反射鏡 0.076 mm rms		

3. 受信装置とその特性

3.1 まえがき

ETS-IIから送信される三波1.7 GHz, 11.5 GHz 及び34.5 GHzのビーコン波は、一つの水晶発振器(1770 MHz)を原振振器として一定の虚倍次数関係にある互いにコヒーレントな信号である。またその送信電力はEIRPでそれぞれ28 dBm, 46 dBm, 50 dBmと非常に低いレベルである⁽¹⁾。衛星-地上間の電波伝搬特性を観測するためには、衛星EIRPは出来るだけ高いレベルの方が有利であるが、他機器とのトレードオフからETS-IIでは、上記の送信レベルに決定された。目標としているミリ波34.5 GHzの伝搬、特に降雨マージン20 dB以上は確保したいと言う事から、搭載用ビーコン発振器(PET)及び地上受信系を一体として考え、高感度化を図った。前章で述べてある様に高利得アンテナ⁽²⁾を用いる事の他に受信機も出来るだけ高感度化をするため、PETは三波コヒーレントとし、受信機はPETに同期させ、常に中間周波数(IF)は一定になる様に狭帯域化を図る。また局発源は全て同一発振源(PET)とし、各周波数帯間の位相のずれや不安定さを極力さける様に設計されている。

更に高感度化の為にPETの内

34.5 GHzと1.7 GHz信号をAM変調し、受信側はAFC付の位相同期検波受信機(PLL受信機⁽³⁾)により1 Hzまで帯域幅を狭められる様考慮した。この他伝搬データとして重要なものは出来るだけ収集できる様になっている。また極力省カ化で出来る様自動的に追尾周波数が切替わる事や局発源或周波数もスレッショルドを割れば自動的に他方に切替えられる様にしてある。

ここでは、上記の如く非常に特徴のあるこの受信装置の構成及びその特性等について報告する。

3.2 装置の構成

図3.1 図に回路構成概略図を示す。ミリ波10 m アンテナで受信される入力される信号は、34.5 GHz 及び11.5 GHz帯では、主偏波成分信号(Σ 信号)、交差偏波成分信号(X 信号)及び自動追尾用誤差信号(Δ 信号)である。また1.7 GHz 受信入力信号は主偏波成分信号である。

自動追尾は34.5 GHz 及び11.5 GHz 信号のどちらでも可能で、2CH追尾方式をとっているが、34.5 GHz 及び11.5 GHz 受信機は3CHづつの周波数変換器(D/C)を備えている。各D/Cの前段から疑似衛星と見なせる較正装置からの信号がスイッチ(SW)を介して入力され、受信信号強度を較正で与る。受信信号の較正はデータ-処理用計算

稼から自動的にこなす事も出来る。

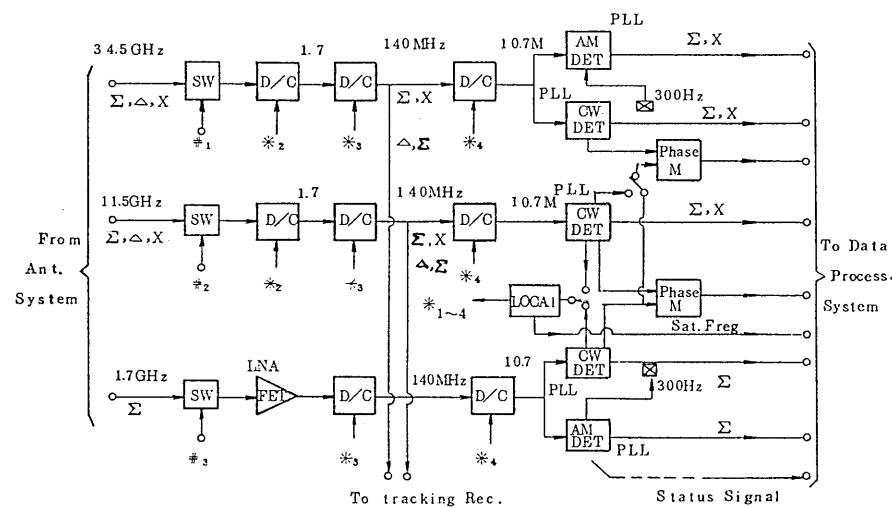


図 3.1 図 回路構成概略図 井1:校正信号, 井2:局発信号

140 MHz に変換された信号の一部 (Σ, Δ) は追従受信機に入力され、他の Σ, X 信号は狭帯域 CW 波 PLL 受信機及び AM 波受信機に入力される。その出力は、信号ケーブルにより実験室のデータ処理装置へ伝送され収集処理される。局発信号は降雨減衰に強い 1.7 GHz または 11.5 GHz 受信信号から再生されると同時に、PET の原振周波数が 17.76 MHz $\times$ 6 $\approx$ 106 MHz 帯で Σ となる。また各波信号間及び $\Sigma-X$ 間の位相変動も測定される。

3.3 回路構成とその特徴

34.5 GHz のオ 1 周波数変換器 (1st MIX) は効率の良いフィルタ型で GaAs ショットキバリアダイオード (SBD)

を用いる事により変換損失 5.5 dB 以下を得ている。また 11.5 GHz は動作の安定なサーキュラータ型で GaAs SBD を用い 4 dB 以下の変換損失を得ている。また局発再生回路では

元の周波数となる 106 MHz 帯をステップリカバリーダイオードを用い 15 GHz 帯まで広帯域化している。更に連帯する場合には GaAs バラクタダイオードで広帯域化し所要の局発信号を得ている。

(1) 共通局発再生回路

図 3.2 図に CW 波 PLL 回路を含めた局発再生回路の構成図を示す。この図では 17 GHz 帯受信信号から 106 MHz を再生する場合を示している。全ての受信 CH は 17 GHz から 140 MHz に変換される。その局発周波数に端数を生じ、それを補うため、 f_c , f_r なる独立発振器を用意し、それ等の周波数変動、位相変動は、ループ回路により打消される様に構成してある。SW1, SW2 を同時に切替える事により 1.7 GHz から 11.5 GHz に再生信号源 (VCXO) を変えられる。

この様な PLL 受信機では、そのループ等

価雑音帯域幅 (B_c) で感度が決定される。即ち狭くすればそれだけ C/N が良く高マージンを得る事ができる。

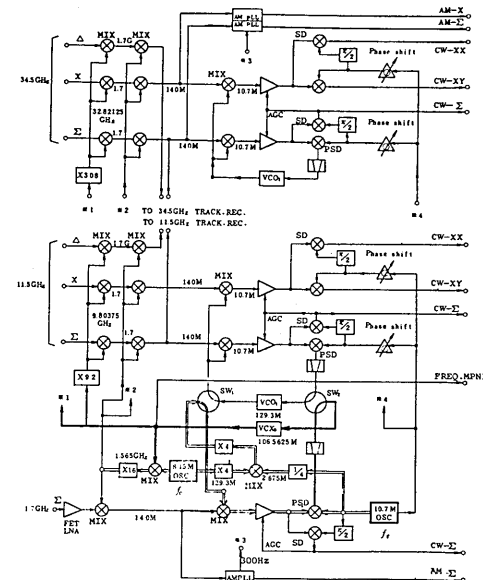


図 3.2 図 局発再生回路構成図 (CW 波 PLL 回路を含む)

PET の短期周波数安定度は当初約 $\pm 10^{-7}$ rms/sec とされていたが 34.5 GHz では最小限 34.5 GHz $\times$ $2 \times 10^{-7} = 6.9$ kHz 程度の PLL 帯域幅が必要であらうと考えたが、図に示す方法により、IF 周波数を常に一定に保ち 500 ~ 1000 Hz まで狭帯域化出来た。PLL 帯域幅を 6.9 kHz とすれば 1 kHz にした場合に比較し約 8.4 dB マージンがなくなり、図 3.1 表に示す回線設計例から 34.5 GHz の PLL スレッシュホールドマージンは、26.2 - 8.4 = 17.8 dB と減少してしまう事になる。即

表 3.1 表 回線設計例

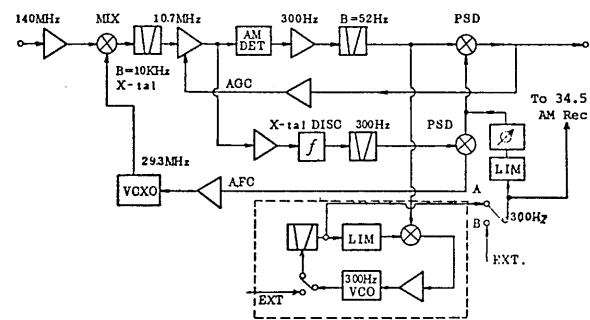
	1.7 GHz	11.5 GHz	34.5 GHz	Remarks
SAT. EIRP (dBm)	28.0 (+8.5)	46.0 (+4.07)	50.0 (+4.34)	(): FM data
ANT. POINT LOSS (dB)	0.1	0.5	1.0	Altitude: 35800km
PROP. LOSS (dB)	188.8	205.4	214.9	
ATOM LOSS (dB)	0.1	0.2	0.5	
EARTH ST. ANT. GAIN (dB)	41.0 (40.02)	59.8 (60.8)	68.7 (69.7)	(): Meas. Values
FEEDER LOSS (dB)	3.0	1.0	1.0	
TRACK LOSS (dB)	0.0	0.1	0.5	
REC. POWER (dBm)	-123.0 (-115.3)	-101.4 (-95.3)	-99.2 (-94.0)	(): NF (dB)
RX NOISE TEMP. (K)	170(2)	850(6)	2000(9)	
ANT. NOISE TEMP. (K)	10	20	30	
RX SYS. NOISE (K)	320	935.7	2083.6	
REC. NOISE PW. DENS. (dBm/Hz)	-173.55	-168.9	-165.4	
C/N ₀ (dB-Hz)	50.5 (58.3)	67.5 (72.6)	66.2 (71.4)	
PLL RX BAND WIDTH (dB-Hz)	27.0	30.0	30.0	
C/N (dB)	500.23.6	1000.37.5	1000.36.2	
PLL HOLD LIM. (dBm)	-148.7	-136.9	-133.4	C/N: 2dB
PLL MARGIN (dB)	7.0	7.0	8.0	
PLL THRESHOLD (dBm)	-141.1	-129.9	-125.4	
PLL THRES. MARGIN (dB)	18.7 (26.4)	28.5 (33.6)	31.2 (35.5)	
AM DET RX AM DET. LOSS (dB)	4.0		4.0	
AFC LOOP HOLD S/N	4.0		4.0	
IF BANDWIDTH (dB-Hz)	40.0		40.0	10kHz
AFTER DET BW (dB-Hz)	0.0		0.0	1 Hz
AFC HOLD LIM. C/N ₀ (dB-Hz)	24.0		24.0	
AFC HOLD MARGIN (dB)	26.6 (34.3)		42.2 (47.5)	

ち降雨減衰測定レンジが少なくなる。図 3.2 図の方法により狭帯域高感度化を図っている。

(2) AM 波検出回路

図 3.3 図に AM 波検出回路の構成図を示している。この回路は図 3.2 図中の AM-PLL の 1 CH 分に相当する回路である。入力される AM 波は、まず AM 検波器で 300 Hz の信号を再生する。同時に 10.7 MHz 帯の IF 信号で分岐しクリスタルディスクリミネータでキャリア変動に比例する 300 Hz の変動を 300 Hz と比較検波し、10.7 MHz の AFC とする。受信レベルの下限値は AFC ループのスレッシュ

ールドレベルで決まる。このように記
の方式により AFC ループの帯域幅を
1Hzまで狭帯域化出来た。この時、



オ3.3図 AM波検波回路

オ3.1表に示す様に42dBの降雨マ
ージンが得られ、CW波受信時に比
較し約16dBのマージンが得られる。
なお300Hz信号再成は、1.7GHz受信
信号で行ない、34.5GHz AM受信機
の基準参照信号として使用している。
降雨による減衰Aは後章で詳しく議
論されるはずであるが、おおよそ式
の関係がある。(4)

$$A = 0.8 R^{\beta} L \quad (\text{dB})$$

34.5GHzでは $\beta \approx 0.24$, $\beta \approx 1.02$,
Rは降雨強度(mm/h), Lは雨域の
距離(Km), ETS-II電波を受信する場
合 $L \approx 4\text{km}$, $\beta \approx 1$ と考えると、CW
波受信時のマージン26.2dBでは
R $\approx 27\text{mm/h}$ までの降雨まで測定で
きる事になる。またAM波受信機で
は42.2dBのマージンがあるのでR
 $\approx 44\text{mm/h}$ までは測定出来る。

ここで述べている降雨は瞬時の降雨量を問
題にしている事に注意すれば、瞬時に4Km
の範囲にわたって44mm/hもの雨が降っ
ている事は一般的には考えられない
ので、AM波及びCW波受信機を備
えることで、ほぼ全降雨時の実験
データが得られる筈である。
さらに幸な事にオ3.1表に示す
様に各信号とも実際のETS-IIのEI
RPはSPEC値よりかなり良好な
値を示している(1)ので、更に大きな
降雨減衰の測定範囲が得られてい
る。

例えばCW波受信で34.5GHzの降雨マージ
ンなら33mm/hの降雨まで、またAM波受
信時の47.5dBのマージンなら48.5mm/h
まで測定可能である。今雨域の距離 $L \approx 4$
Kmと仮定したが、これは雨のタイプ及び季節
節によっても異なり、後章にて詳述される。

オ3.2表に測定データの種類を
示す。

オ3.2表 測定データの種類

Apparatus	Data
Receiver	34.5GHz co pol. (Σ)
	34.5GHz cross pol. (X)
	11.5GHz co pol. (Σ)
	11.5GHz cross pol. (X)
	1.7GHz co pol. (Σ)
	1.7GHz co/cross phase diff.
Highly sensitive AM receiver	34.5GHz co pol.
	34.5GHz cross pol.
	11.5GHz co pol.
	11.5GHz cross pol.
	1.7GHz co pol.
	11.5GHz co/cross pol. phase diff.

(3). 受信信号強度校正装置(CAL)

CALは衛星と同様一つの発振器からの信
号を歪倍増幅し、互いにコヒーレントな信

号である。発振源は衛星周波数と全
く同じものである。較正は予動及
データ処理装置のコムピュターか
らリモートで行なう事ができる。

較正レベル範囲は、34.5GHz及び

11.5GHz系は $-90\text{dBm} \sim -130\text{dBm}$,

1.7GHz系は $-110\text{dBm} \sim -140\text{dBm}$ まで

2dBステップで較正される。またX

チャンネルは Σ 信号レベルより -40dB

低いレベルで行なわれる。

3.4 装置の特性

(1). 周波数変換部の特性

34.5GHz系及び11.5GHz系の周波数
変換部(オ1-MIX)は直接変換方式であ
る。(34.5GHzはフィルタ型、11.5GHzはサ
ーキュレタ型)、ミキサダイオードは
SBDを用い、後段に低雑音の1.7G
Hz帯用GaAs-FET-Amp(NF=2dB,
G=27dB)が接続され、総合NFとし
て、 Σ , X, Δ チャネルそれぞれ
7.85dB(11.5dB), 7.56dB(10dB),
7.72dB(10dB), また11.5GHzはそれ
ぞれ5.3dB(6dB), 5.17dB(6dB), 5.6dB(6dB)
が得られた。1.7GHzのNFは1.9dB(2dB)
である。

入出力特性は34.5GHz帯用は Σ , X
及び Δ チャネルで入力レベル -60dBm
 $\sim -130\text{dBm}$ の範囲で直線性が良い。
この時の出力レベル範囲は $+10\text{dBm} \sim$
 -60dBm である。しかし、各チャネ
ル間でそれぞれ2dB程の入出力の差
がある。11.5GHz帯用は入力レベル

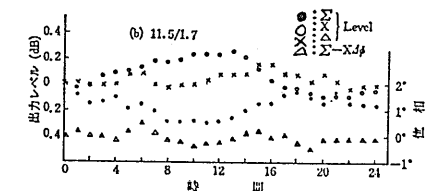
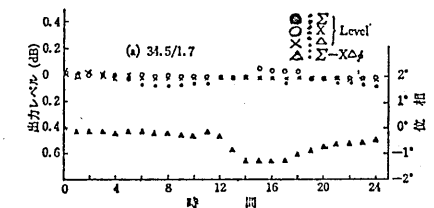
$-70\text{dBm} \sim -130\text{dBm}$ 範囲で直線性が良く、各
チャネルとも同一の特性を持っている。

オ3.3表に周波数変換部の特性概要を示
す。

オ3.3表 周波数変換部特性概要

ITEM	34.5GHz MIX	11.5GHz MIX	1.7GHz MIX	REMARKS
First MIX Diode	GaAs S.B.D	GaAs S.B.D		each channel
Conversion Loss (dB)	<5.5	<4		the same as above
First MIX back stage AMP	GaAs FET AMP	GaAs FET AMP		the same as above
First MIX back stage AMP NF (dB)	-1.9	-1.9	-1.29	the same as above
First Input NF (dB)	Σ ch: 5.35 Δ ch: 5.35 Xch: 5.2	Σ ch: 3.6 Δ ch: 4.15 Xch: 4.30	Σ ch: 1.7	
Input VSWR	Σ ch: 1.19 Δ ch: 1.19 Xch: 1.19	Σ ch: 1.06 Δ ch: 1.15 Xch: 1.09	Σ ch: <1.2	
Output VSWR	Σ ch: 1.093 Δ ch: 1.058 Xch: 1.082	Σ ch: 1.10 Δ ch: 1.08 Xch: 1.07	Σ ch: <1.2	
First MIX section Gain (dB)	Σ ch: 68 Δ ch: 65 Xch: 62	Σ ch: 68 Δ ch: 68 Xch: 68	Σ ch: 70	

オ3.4図に出力レベル変動及び位相変動
特性を示してある。



オ3.4図 出力レベル変動及び位相変動

レベル変動は34.5GHz回路で約 $\pm 0.1\text{dB}$, 11.5GHz
用で約 $\pm 0.3\text{dB}$ 以下に保たれている。また位
相変動は34.5GHz用で約1.5度以内、11.5GHz用
で約1度以下に保たれている。

(2), 位相同期型信号検出部の特性
 図3.5にCW波受信位相同期検
 波回路を示してある。

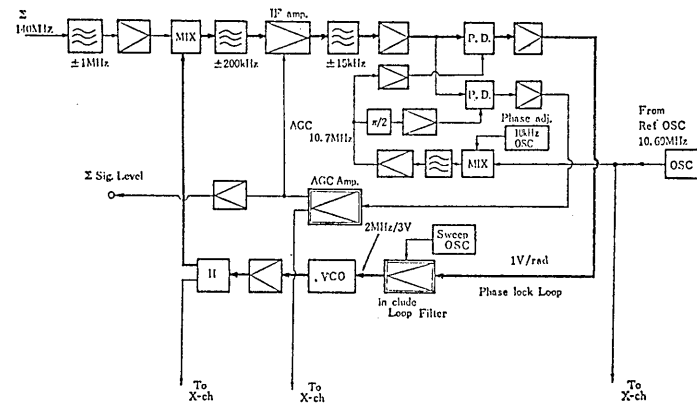


図3.5 位相同期検波回路

140MHzの入力IF信号は129.3
 MHzの局発信号と混合され10.7MHz
 のIF信号となってP.D.で位相検波さ
 れる。このP.D.は34.5GHz及び11.5GHz
 系とも同一性能で検波感度は1V/rad
 である。PLLループフィルタはIC化さ
 れた回路で構成されており、時定数
 T_1 , T_2 はそれぞれ抵抗値を変え
 ることによって各周波数帯受信用PLLの
 等価帯域幅を三段に切替えられる。
 その一つを任意に選択できる。
 このPLLのVCOはFETを使用したコ
 ルピッチ型のLC発振器で周波数コ
 ントロールにはバウタダイオード
 を使用している。VCO変調感度は
 $2\text{MHz}/3\text{V}$, また発振周波数は125.8
 MHzである。同期を容易にするため
 に, 10.7MHzのIF信号にAGCをかけ

てある。このAGCはIF Amp内のPINダイオ
 ードに加えられIF Amp出力レベルが-10
 dBmになる様に設計さ
 れている。AGCの時定
 数はMOS FETを使用
 したスイッチでオン
 の時30msec, また両
 方がONの時3000msec
 になる様に設計され,
 このどちらかに切替え
 られている。

図3.6図にPLLの
 出力電圧安定度及び
 位相安定度を示す。

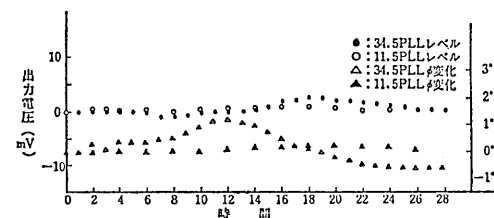


図3.6 出力電圧及び位相安定度

140MHz入力からRF入力換算-90dBm相
 当の信号(PLL入力信号-30dBm)を入力した
 時, 出力電圧が5V(dBリニア)またスレッ
 ショールドレベル34.5GHz(-131.3dBm($B_L=1000\text{Hz}$)),
 11.5GHz(-134.3dBm($B_L=500\text{Hz}$))相当の信
 号(PLL入力レベル-80dBm)を入力した時
 出力電圧が0Vになる様に調整した時の出
 力電圧及び位相の変化を示している。5V
 出力時 電圧変化は34.5GHz及び11.5GHz
 とも殆んどない。0V出力時には34.5GHz
 系で3mVpp また11.5GHz系で0.1mVppであ

る。この3mVの変化は入力レベルに
 換算して約0.3dBmの変動と考えられ
 る。

位相変動は34.5GHz系で約1度
 以内, 11.5GHz系で約1.5度以内
 に抑えられている。図3.3表に各受
 信系の位相同期信号検出器の特性概
 要を示しておく。

表3.3 位相同期信号検出器
 の特性

ITEM	34.5GHz PLL	11.5GHz PLL	1.7GHz PLL
Input Frequency (MHz)	140×10^{-6}	140×10^{-6}	140×10^{-6}
Input Impedance (Ω)	50	50	50
Output Impedance (Ω)	500	500	500
Equivalent Noise B.W. (Hz)	500 1000 3000	100 500 1000	30 100 500
Threshold Input Level(dBm)	-128.3 -131.3 -128.3	-130.5 -134.3 -134.9	-146.1 -146.1 -142.5
Output Level Max (V)	5V(dB Linear)	5V(dB Linear)	5V(dB Linear)
Output Time Constant (Sec)	0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1.0, 3.0, 10.0	the same as left	the same as left
AGC Time Constant (mS)	30, 3000	the same as left	the same as left
PLL Lock Range (MHz)	Lock out +2.66, -2.56 Lock in +1.70, -1.93	Lock out +6.09, -4.95 Lock in +3.76, -3.27	Lock out +0.81, -0.83 Lock in +0.19, -0.24

ITEM	AM-PLL
Input Frequency (MHz)	140
Input Impedance (Ω)	75
Output Impedance (Ω)	<1K Ω
AGC Loop B.W. (Hz)	1, 5
Input Modulation Frequency (Hz)	300×10^{-2}
Threshold Input Level(dBm)	-148.3
Output Time Constant (Sec)	same as CW-PLL
Output Level Max (V)	same as CW-PLL

(3), 受信測定系の入出力特性
 図3.7図に受信系の総合入出力特
 性を示してある。

1.7GHz系信号(Co-POL)入出力特
 性は-135dBm以下の入力信号で急
 に劣化する。これは前置増幅器とし
 て使用しているFET-Ampの特性の
 ためである。しかし図3.1表に示す
 回線設計例に示される様に晴天時受
 信レベル-115.3dBmで, 2の周波

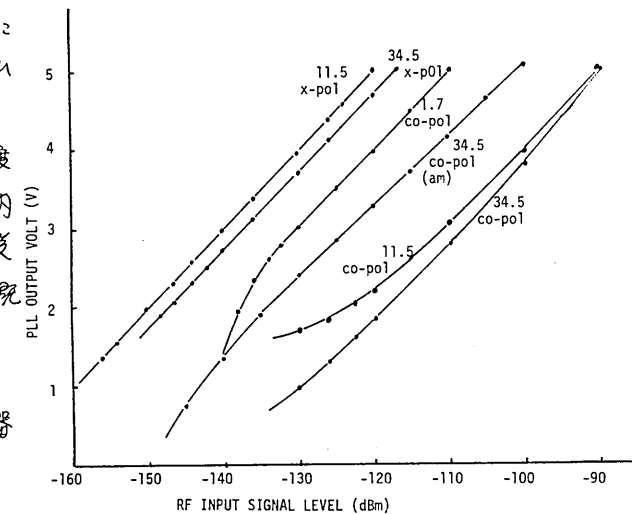


図3.7 受信系総合入出力特性

数帯では降雨による減衰は殆んどし
 ない。この入出力特性の直線範
 囲で十分動作可能であり, 測定テ
 ータには支障はない。11.5GHz系42
 ネルの入出力特性にも言えること
 入力信号-120dBm以下ではその直線
 性は良くないが, 晴天時受信レ
 ベルが-96.3dBmであり, 2の周波
 数帯においても降雨による減衰は

200mm/hの雨でも数dBと考えられる事
 から, 十分直線範囲で動作してまた取得テ
 ータの直線性は十分保たれる。

34.5GHz系42チャンネルは入力信号-130dBm
 以下では直線性は良くない。しかしこのレ
 ベルは, ほぼスレッショールドレベル(-131dBm)
 に近い値であり, 特に問題になる事はない。
 またAM波は受信入力レベル-135dBm以
 下でも十分受信可能となり, 非常に高感度
 である。またスレッショールドレベルはCW

波受信系に比べ 10 dB 以上改善される。表 3.4 表にこの受信装置三波の主な入出力特性の概要を示してある。

表 3.4 表. 入出力特性の概要

ITEM	34.5GHz RX	11.5GHz RX	1.7GHz RX	REMARKS
Input Frequency (GHz)	34.5625±3.5MHz	11.50875±1.15MHz	1.7050±170KHz	
Input Level (dBm)	CW: -90~-131.3 AM: -90~-148	CW: -90~-134.3	CW: -110~-142 AM: -110~-153	Lower Limit Threshold Level or P.L. B.W.
Input VSWR	<1.12	<1.1	<1.2	
First IF (MHz)	1.7050	1.7050	1.7050	
Second IF (MHz)	140	140	140	
Third IF (MHz)	10.7	10.7	10.7	
Noise Figure (dB)	Zch: 7.85 Xch: 7.56 Δch: 7.72	Zch: 5.3 Xch: 5.7 Δch: 5.6	Zch: 1.9	
Gain Stability	±0.1 dB/h	±0.1 dB/h		
Input-Output Linearity	±0.3 dB/day ≤±0.2 dB	±0.3 dB/day ≤±0.2 dB		Input Level -90~-130dBm

3.5. あとがき

三波の受信装置について、特徴、構成及び特性等について述べたが、ETS-II 伝搬実験においては、降雨時には 1.7GHz 系はほとんど減衰しないまた 11.5GHz 系も多少減衰しない。しかし、実際の実験測定では 34.5GHz 系は 30dB 以上の降雨減衰を受ける事もあった。この様に降雨減衰を受けた場合でも、確実にデータを得るためには、局発再生を 1.7GHz 系あるいは 11.5GHz 系で行ない確実に局発信号を供給する事で十分信頼性の高いデータが取得出来た。この時の各受信装置のパラメータは前記回線設計例で使用した設定値で十分であった。

データ及びその処理等については後章で詳細な報告が行なわれるだろう。

文献

(1). "実験用静止通信衛星搭載用通信機器仕様書", NASDA-SPC-1044 宇宙開発事業団(昭和51年3月)

(2). 藤田, 手代木ほか: "ETS-II 伝搬実験 2. 受信アンテナ系" 信学会総合全国大会 S10-18 (昭和53年度).

(3). "ETS-II 特集号" 電波研季報 VOL. 24, NO. 126 (1978)

(4). 藤田, 藤田ほか: "ETS-II 伝搬実験速報" 電波研季報 VOL. 23, NO. 125 (1977)

4. 降雨強度分布測定装置とその特性

1. はじめに

ETS-II を始めとする一連の衛星実験において、ミリ波・準ミリ波が使用される。これらの電波は降雨による影響を強く受ける。衛星からの電波は地上から見て仰角約 45 度という伝搬路に沿って到来するため、地上に雨量計を設置しただけでは降雨減衰と降雨量の対応を付けることがむずかしい。そこで、昭和 51 年度に鹿島支所に降雨強度分布測定装置(降雨レーダ)を設置し、高仰角衛星電波伝搬路およびその周辺の降雨強度を測定することにした。通常の降雨レーダでは、アンテナの仰角をほぼ水平にした状態で回転しデータを取得しているが、これでは高仰角電波伝搬路に沿う降雨の状況は

わからない。そこで、アンテナの仰角の制御をコンピュータを用いて行い、多モードのデータを収集することにした。

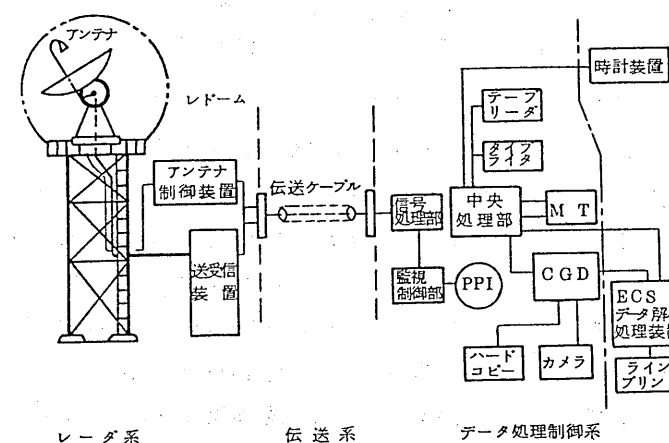
本文では、最初に装置のハードについて述べ、次いで本装置の大きな特徴である多モードデータ収集機能について述べる。最後に本装置の校正結果について報告する。

2. 装置の構成と概要

第 1 図は本装置の全体の系統を示したもので、大別してレーダ系、伝送系およびデータ処理系より構成される。システムの性能を第 1 表に示す。

(a) 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、第 2 図に示す形で管制センタの近くに設置されている。レーダ鉄塔の高さは約 13 m で、直径 7 m のレドーム内に 3 m φ のアンテナが納まっている。アンテナのパターンは第 3 図の通りで、偏波は水平偏波、ビーム幅は水平面内で 1.41 度、垂直面内で 1.43 度であ



第 1 図 システム系統図

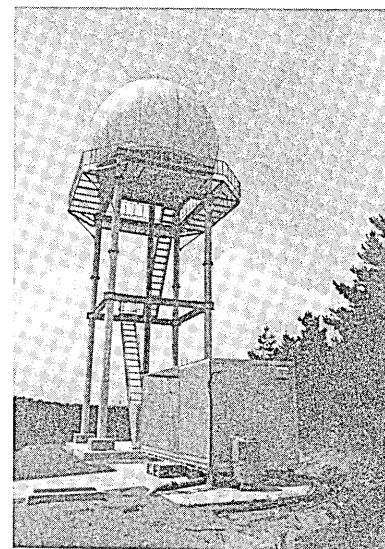
第1表 降雨強度分布測定装置の性能

(1) システム規格 および 一般的性能		送受信装置	
使用周波数	5330 ± 10 MHz	尖頭出力	250 kW 以上
最大探知距離	100 km 以上 (ただし観測降雨強度約 1 mm/h で)	パルス幅	0.5 μsec
最小探知距離	300 m 以下	繰返し周波数	900 PPM
平均化パルス	32 以上	中間周波数	30 MHz
ヒット数		受信帯域幅	2.4 MHz 以下
最小データ取得間隔	250 m 以下	対数増幅器直線性	70 dB 以上の範囲にわたって 0.5 dB 以下
雨量強度観測可能量	最小 0.1 mm/h 最大 150 mm/h	雑音指数	9 dB 以下 (ミキサ入力端)
		最小受信電力	-101 dBm 以下
		受信機校正	遠隔操作可能
(2) レーダ系		(3) 伝送系	
アンテナ装置		伝送方式	
形式	円形パラボラ	伝送信号	直接方式 ビデオ信号; 同軸ケーブル 制御信号等; 専用信号線 約 1 km
有効直径	約 3 m	ケーブル長	
偏波	水平偏波	(4) データ処理系	
利得	40 dB 以上	中央処理装置 (CPU)	
ビーム幅 (電力半値幅)	水平、垂直面内ともに約 1.5°	語の構成	
第一サイドローブレベル	-25 dB 以下 (レドーム設置下において)	記憶容量	
レドーム	直径約 7 m	16 ビット	
アンテナ制御装置		64 k バイト 以上	
アンテナ指向範囲		入出力制御装置	
方位角: 0 ~ 360°		信号処理装置	
仰角: 0 ~ 90°		A/D 変換	
指向方向制御		8 ビット	
フロッグラム制御方式、2軸独立走査可能		周辺装置	
指向精度 ±0.3° (3σ 値)		高速テープリータ	
駆動速度 方位角: 6 rpm (最小値)		入出力タイプライタ	
仰角: 4°/sec 以上		磁気テープ記録装置	
指向角読取精度 0.1°		制御部 1, ハンドラ 2	
		カラーグラフィックディスプレイ装置 (CGD)	
		装置付	
		モニタ用 PPI 装置	
		直径約 30 cm	
		操作卓	

る。なお、第1サイドローブレベルは水平面内で -25.8 dB、垂直面内で -27.4 dB、利得は 40.8 dB である。

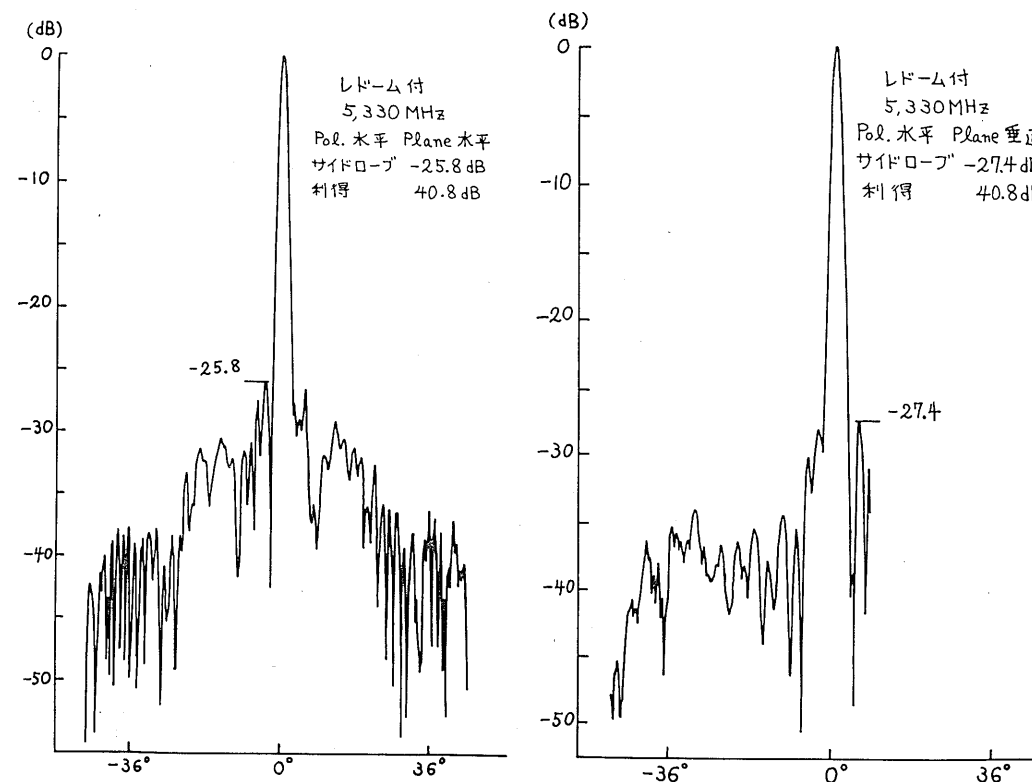
送受信装置はレーダ系の中核をなすもので、第4図に示した構成となっている。これらの動作は、トリガ部、送信部、受信部等に大別できる。トリガ部では伝送制御装置より作られる EXT トリガを入力として、受信機内の同期

パルス発生回路で A トリガ および B トリガの二種類のトリガ信号を発生する。A トリガは受信機内および動作監視に用いられる。B トリガは、遅延回路により A トリガより約 50 μsec の時間遅れで発生され、送信用トリガ信号として用いられる。送信部では、受信機出力の B トリガ信号を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

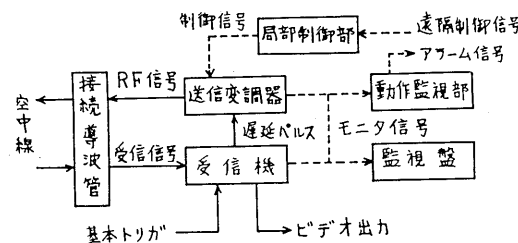


第2図 レーダ系外観図

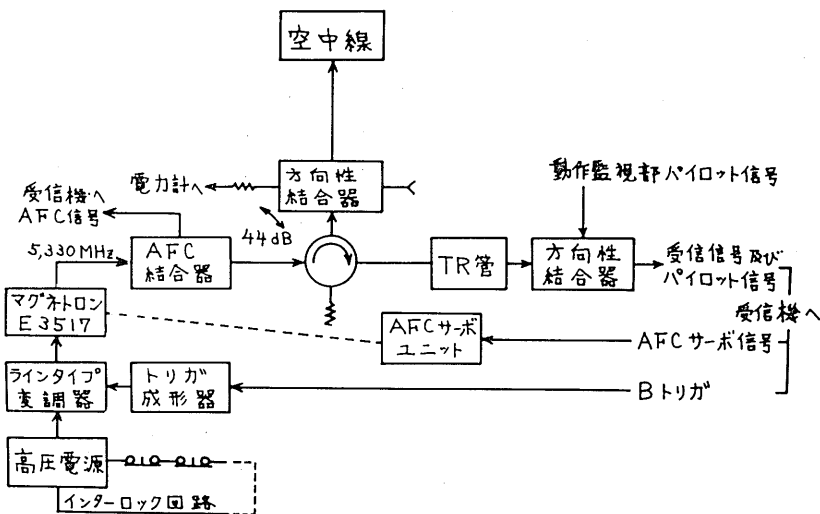
で増幅する (第5図参照)。ラインタイプ変調器は充電線輪、パルス成形回路、サイラトロンで構成されている。パルス成形回路は、高圧電源電圧の約2倍に共振充電される。この充電電圧はサイラトロンの動作で放電し、パルストランスの二次巻線に負電圧 (約 26 kV) を発生してマグネトロンを共振させ、5330 MHz、0.5 μsec、250 kW の出力を得ている。マグネトロンには、E3517 の同軸型マグネトロンを採用し、長寿命、高安定化を計った。同軸型マグネトロンは外部同軸空洞で負荷



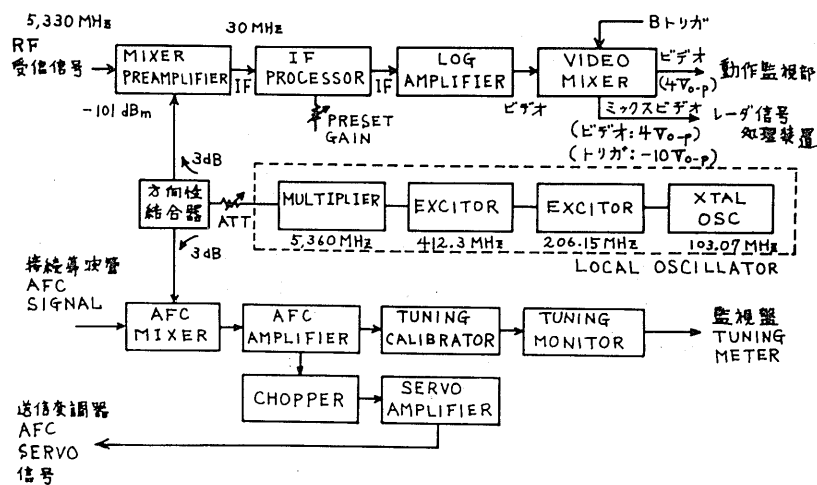
第3図 アンテナパターン



第4図 送受信部系統図



第5図 送信部ブロック図



第6図 受信部ブロック図

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もつ。また、送信周波数が常に5330 MHz となるようにマグネ

トロンのカビティを制御するMAG・AFC

を用いている。降雨等により反射されたRF信号は、アンテナから送受切替器のサーキュレータまで送信信号の逆経路を進行し、TR管を通して受信部に接続される。受信部のブロックを第6図に示す。

受信機のミキサにはバランストタイプミキサを使用し、信号対雑音比の改善を画った。受信RF信号(5330 MHz)はミキサで局発信号(5360 MHz)

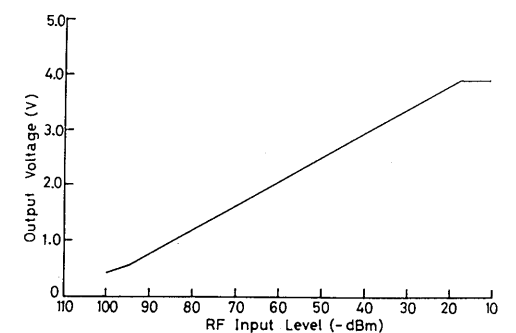
と混合検波され、30 MHz のIF信号に変換される。IF信号はプリアンプを通ったあと、対数増幅器で増幅される。対数増幅器のダイナミックレンジは80 dB 以上で、そのうちの70 dB の範囲で偏差を±0.5 dB以内に抑えている(第7図参照)。IF信号は対数増幅器の後段の検波器でビデオ信号に変換され、ビデオミキサより4V_{o-p}のビデオ信号として出力される。ビデオ信号は、負極性に反転したBトリガと混合され、ミックスビデオ信号として伝送ケーブルを経てレーダ信号処理装置に送られる。

(b) 伝送系

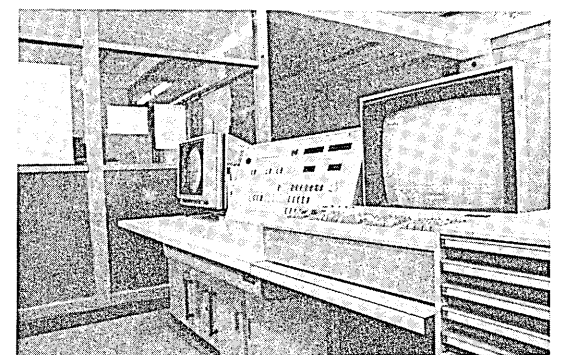
伝送系はレーダ系とデータ処理系とをつなぐもので、ビデオ信号は同軸ケーブル、制御信号等は専用信号線を通して送られる。伝送路が長いと信号にハムがあることがあるので、これを除去するためにハム信号だけを伝送し、次に述べるデータ処理系の信号処理装置でハム信号とビデオ信号をかけ合わせ、ハムを相殺している。伝送ケーブルの長さは約1 km である。

(c) 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)、カラーグラフィックディスプレイ装置(CGD)、磁気テープ装置(MT)、ハードコピー装置等から構成され、26 mφ アンテナ庁舎内に設置されている。データ処理系の一部の写真を第8図に



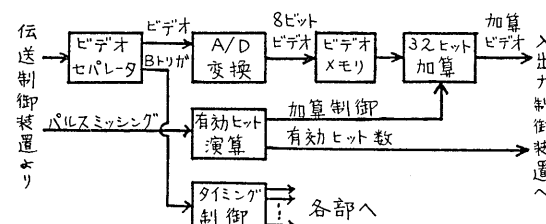
第7図 対数増幅器の特性



第8図 データ処理系の一部。左より、モニター用PPI装置、操作制御卓、カラーグラフィックディスプレイ装置

示す。

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、そのブロックを第9図に示す。ミックスビデオ信号は、ビデオ分離部でビデオとトリガに分離される。A/D変換部では、ビデオ信号をクロックレート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A/D変換する。こ



第9図 信号処理装置ブロック図

のA/D変換された信号は、ビデオメモリ部で単位距離毎に32ビット分記憶され、32ビット加算部で加算される。入出力制御装置へは加算ビデオをそのまま出力し、モニタ用PPI装置へはデジタル的に振幅方向を6ビットシフトさせ1/32の平均化を行って出力している。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ビットの中で有効なヒットの数を算出する。タイミング制御部は、ビデオトリガ等が発生させ、信号処理装置の各回路へ送りこんでいる。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を用いて、中央処理装置で次の演算を行い、平均化ビデオを得ている。

$$\frac{\text{加算ビデオ}}{\text{有効ヒット数}} = \text{平均化ビデオ} \cdots (1)$$

この信号は、さら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。

3. 機能

降雨強度分布測定装置は、高仰角衛星電波伝搬路上およびその周辺の降雨等の気象状況を把握するために、コンピュータを用いてアンテナの制御を行い、以下に示す4モードのデータ取得する機能を有する。

P_mモード

各衛星と鹿児島地上局を結ぶ伝搬路上のZ因子を測定し、さらに雨量強度を算出する。

観測範囲	300m ~ 20km
観測距離間隔	250m
データ取得間隔	1分
記録	Z因子; MT 雨量強度; MT, CGD

P_aモード

各衛星と副局間の伝搬路上のZ因子を測定し、雨量強度を算出する。

観測範囲	300m ~ 20km
観測距離間隔	250m
データ取得間隔	1シーケンス
記録	P _m モードと同じ

CAPPIモード (Constant Altitude Plan Position Indicator)

一定高度平面内におけるZ因子分布を測定する。

観測範囲	半径50km以上
観測分解能	500m

観測高度	任意の2高度 (たとえば2, 4 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, ラインプリンタ

RHIモード (Range Height Indicator)

特定の方角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: 15kmまで 半径: 50km以上
観測分解能	高さ方向, 半径方向ともに500m
データ取得間隔	1シーケンス (通常12分, 1分でも可)
記録	CAPPIモードと同じ

これらの4モードの概略を第10図に示す。

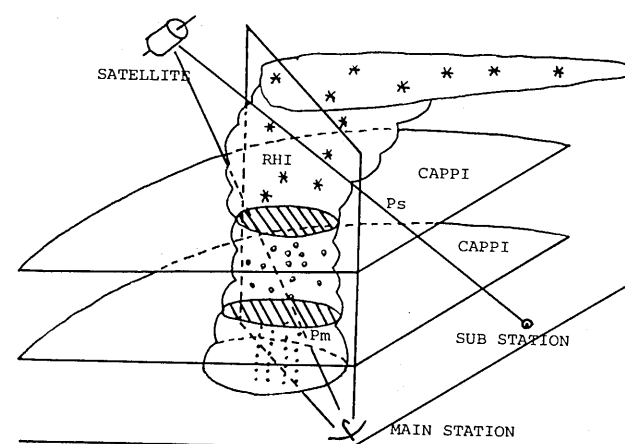
なお、CAPPIモードおよびRHIモードデータではZ因子を降雨量に換算し、10段階に分類してカラーグラフィックディスプレイ装置(CGD)に表示するとともにMTに記録している。降雨強度と段階識別数字の対応は第2表の通りである。

4. データ収集方式

CAPPIモードデータは、第11図に示すように、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、方位角方向約2.8度、水平距離1kmで囲まれる領域である。第12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り、仰角ステップ間隔(ステップ数40)はテーブルとして記憶されている。

第2表 10段階識別

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

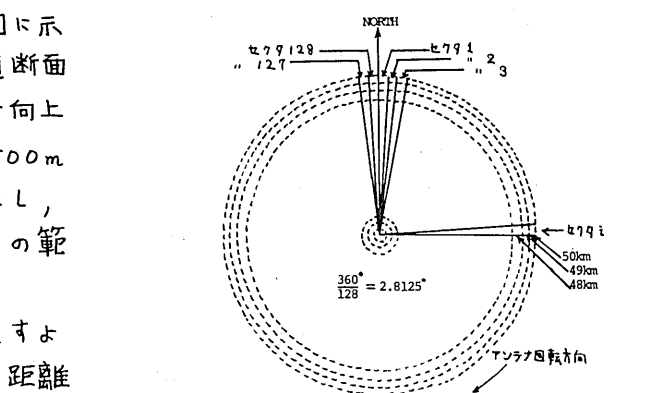


第10図 各種モードの概略図

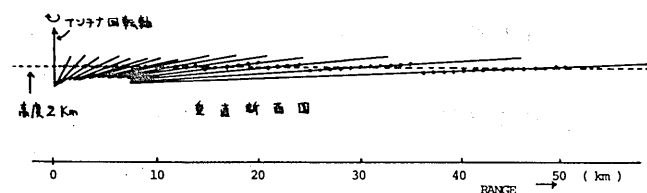
RHIモードデータは、第13図に示すように、指定方位角方向の垂直断面において、40ステップの仰角方向上で、アンテナを中心とする半径500m毎の同心円上の空間を収集単位とし、これをアンテナから半径50kmの範囲で収集する。

P_mモードデータは、第14図に示すように、与えられた仰角、方位角、距離のサンプル点においてデータを収集する。これらのサンプル点の値はテーブルとして記憶されている。

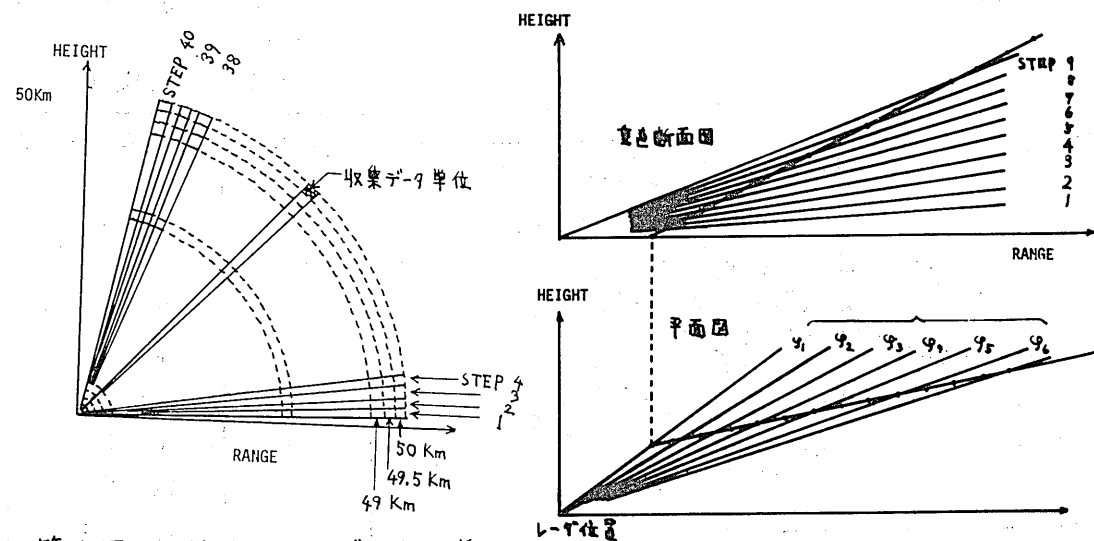
P_mモードデータは、指定衛星方向の仰角でアンテナを回転させつつ、指定衛星方向の方位角に達した時にデータを収集するものである。



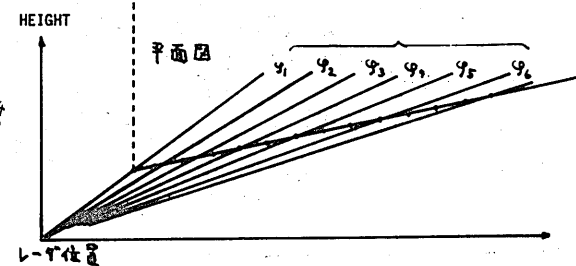
第11図 CAPPIモードデータ収集範囲および収集単位(平面内)



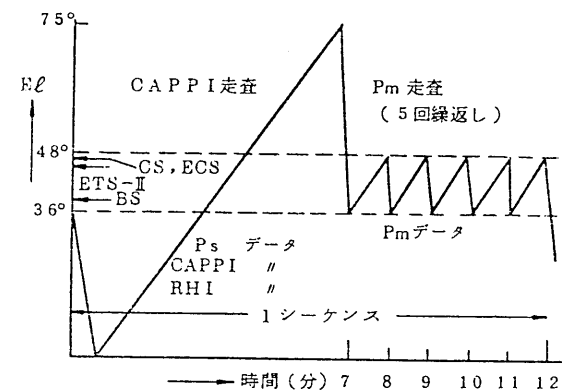
第12図 高度2 km に対するCAPPIモードデータ収集方式



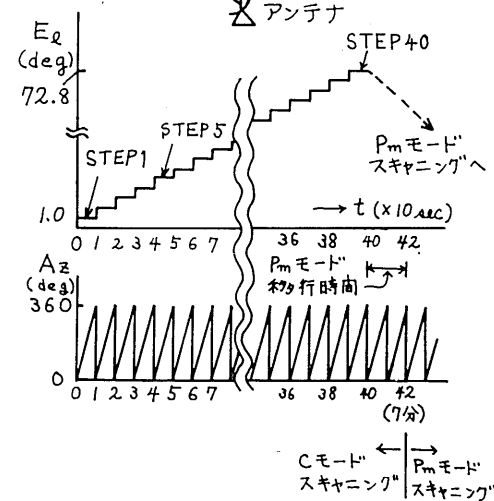
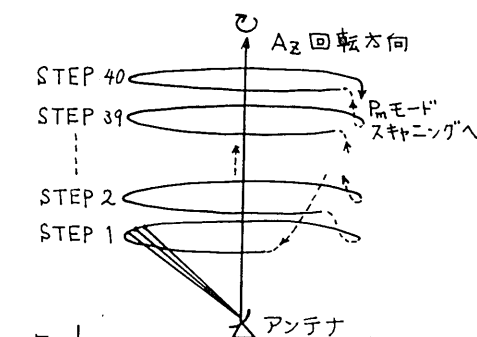
第13図 RHIモードデータ収集範囲および収集単位(垂直断面)



第14図 P_mモードデータ収集方式



第15図 定常運用時の仰角変化



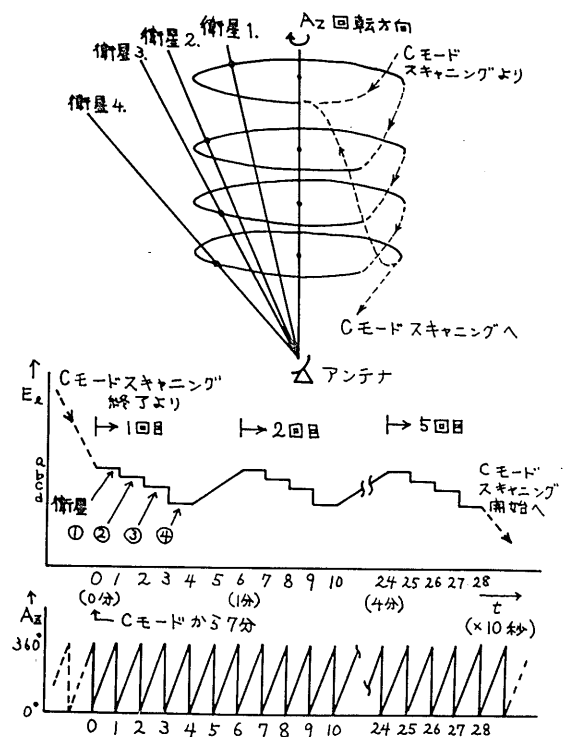
第16図 Cモードスキャン' アンテナ駆動図

5. システムの運用

降雨強度分布測定装置の運用方式には、以下に示す二種類の方法がある。

(a) 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で回転させつつ仰角を0度から約80度まで変化させて、P_m、CAPPIおよびRHIモードのデータを取得する。これをCモードスキャン'と呼ぶ。残りの5分間でP_mモードの観測を行い、1分毎



第17図 P_mモードスキャン' アンテナ駆動図

の P_m モードデータを取得する。 P_m モードにおいては最大四衛星まで指定できる。定常運用時の1シーケンスにおけるアンテナの仰角変化を第15図に、Cモードスキヤニングにおけるアンテナの動きを第16図に、 P_m モードデータ収集時のアンテナの動きを第17図に示す。Cモードスキヤニングの仰角変化は、CAPPモードデータ収集時のものと同じである。従って、CモードスキヤニングでRHIモードデータを収集する場合の仰角変化は、ステップ番号30~40でRHIモードデータに必要なものと異なるので、これらについてはデータの補間を行っている。

(b) 特殊運用

特殊運用には、手動特殊運用とプログラム特殊運用とがある。手動特殊運用は P_m モード、 P_n モード、Cモード、Rモードおよび停止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。プログラム特殊運用は、 P_m モードスキヤニングの繰返し回数を任意の回数(5~999)に設定できるほかは、定常運用観測モードと同一である。

6. レーダの較正¹⁾

本装置で用いる周波数(5GHz帯)では大気や降雨による減衰は無視できるので、レーダ方程式は次のように書ける²⁾。

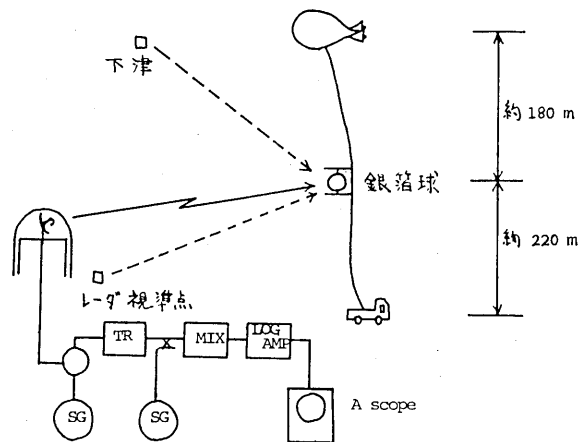
$$\bar{P}_r = C F \frac{Z}{r^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\bar{P}_r$ は受信電力の平均値、Cはレーダの諸元により決まる定数、Fは理論と実測のズレ(導波管系損失を含む)、Zはレーダ反射因子(Z因子)である。また、Z因子(単位 mm^6/m^3)と降雨強度R(単位 mm/h)との間には、平均的な降雨に対して経験的に次の関係があることが知られている^{2), 3), 4)}

$$Z = 200 R^{1.6} \dots\dots\dots (3)$$

(2)式と(3)式を使ってレーダ受信電力 $\bar{P}_r$ から降雨強度Rを求めるには、F値を正確に求めておかねばならない。

Fは導波管系損失 F_1 と(2)式を導く際に行った種々の近似によるズレを表わす F_2 とに分けることができる。すなわち



第18図 F_1 値測定実験の概略図

$$F = F_1 \cdot F_2 \dots\dots\dots (4)$$

そこで、 F_1 、 F_2 を別々に測定した。

(a) F_1 の較正

散乱体が1個の場合には、レーダ方程式は次のようになる。

$$\bar{P}_r = \frac{C' \sigma}{r^2} F_1 \dots\dots\dots (5)$$

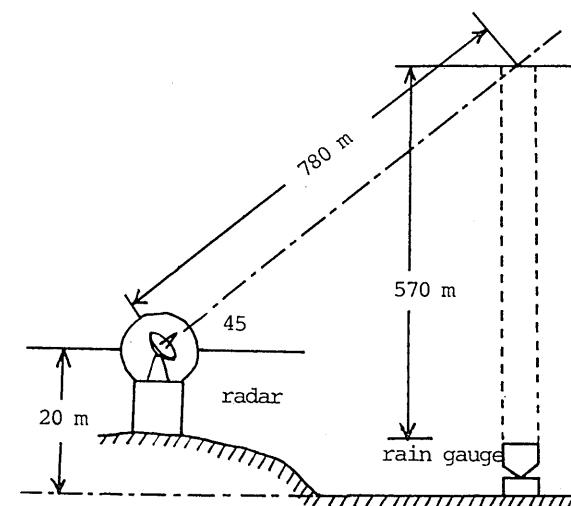
ここで σ は散乱体の後方散乱断面積である。

F_1 を(5)式を用いて求めるために、カイツーンに銀箔球を吊り下げてそのエコー強度を測定した。測定の概要を第18図に示す。銀箔球の直径は60cm、レーダとの距離 r は約1.6kmである。金属球の後方散乱断面積はMie散乱を用いて計算できる。それによると、60cmの直径の金属球の後方散乱断面積は、0.1dB以内で幾何学的断面積に一致する。 C' はシステムの諸元により定まる定数で既知、 σ は上述の理由で既知、 r はトランシットを用いた三角測量で求め、 $\bar{P}_r$ はAスコープを用いて受信信号強度と基準信号発生器(SG)よりの信号とを比較して求めたので、これらより(5)式から F_1 が求まる。この測定により F_1 として-6.3dBを得たが、これは導波管系等より求めた損失(-6.38dB)ともよく一致する。

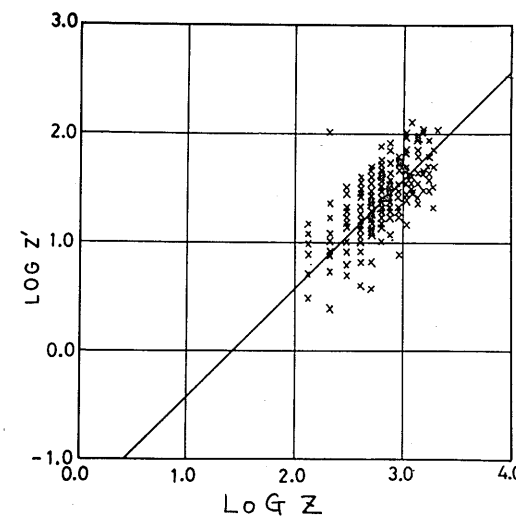
(b) F_2 の較正

降雨のように散乱体が多数の場合には他の補正項 F_2 が必要となるが、これ

は実測で求めねばならない。そこで、地上に設置した即応型雨量計より降雨強度Rを求め、雨量計の真上に相当する地点からのレーダ受信電力と比較して F_2 を算出した。第19図に実験の概要



第19図 F_2 値測定実験の概略図



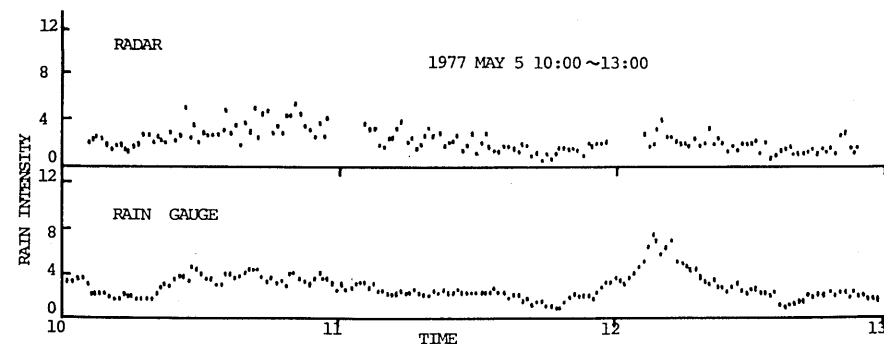
第20図 レーダより求めた Z' と雨量計より求めた Z

を示す。第20図は雨量計およびレーダより求めたZ因子(補正前)である。この図より F_z として -14.1 dBという値を得た。第21図にレーダデータより補正を行って求めた降雨強度と、雨量計のデータを示す。

この F_z の中には原因のはっきりしているものが二つある。すなわち、本装置では対数増幅器を通した後で受信電力の平均を行っているが、レーダ方程式では受信電力の平均値を取っているために生じる -2.5 dB³⁾が F_z の中に含まれている。また、その後の測定により、TR管の立下り特性のために第3表に示すだけ受信電力が低下する。 F_z の較正にはレーダから測って750 m地点の受信電力データを用いたために、 F_z に -1.8 dBが含まれる。結局、 F_z の中で未知の部分は

$$-14.1 - (-2.5 - 1.8) = -8.8 \text{ dB} \dots (6)$$

となった。



第21図 レーダより算出した雨量と、地上雨量計の雨量

第3表 TR管の放電による損失

距離 (km)	損失 (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

7. おわりに

本装置の特徴は何と云ってもその多機能モードのデータ収集にある。ここではハードを中心に話を進めたが、データについては本報告の他の場所で述べられることになっている。データ解析に必要なF値の較正についても述べたが、今後の問題として、Z-R関係に $Z = 200 R^{1.6}$ を用いたことが良いかどうかということが残されている。

なお、本装置を昭和53年度中に改造

レドプラー機能を付加することになっている。これにより、雨滴粒度分布を推定することが可能となり、本装置は名実ともに世界有数の降雨レーダとなるものと期待される。

参考文献

- 1) 阿波加, 小池, 藤田, 篠塚, 小園, 早坂, 青山, 田中; "降雨強度分布測定装置の較正", 電波研季報, vol. 23, No. 125, 1977.
- 2) Skolnik; Radar Handbook, Chapt. 24, McGraw-Hill, 1970.
- 3) 小平信彦, 立平良三; 気象研究ノート, 気象レーダ特集号, No. 112, 1972.
- 4) CCIR Rep. 563, 1976 および CCIR Rep. 569, 1976.