

K-3型VLBIシステムを利用した木星デカメータ波放射観測

鹿島支所 第3宇宙通信研究室

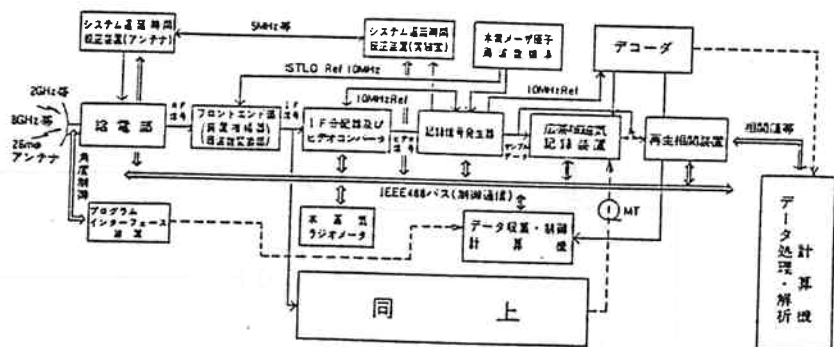
近藤哲朗、栗原則幸、金子明弘、雨谷 純

1. はじめに

木星は巨大な磁気圏を持つ惑星である。この木星から、デカメータ波帯（3～30MHz）で強い電波が放射されている。この電波は木星の極域電離層で起こっている波動粒子相互作用の結果として放射されている。地球も磁気圏を持つ惑星であるが、この地球からも同じような電波が極域から放射されている。しかし、地球から放射されている電波はキロメータ波帯（30～300kHz）であるため電離層の影響で地上から観測することができず、衛星からの観測だけが可能である。このように、磁場を持つ惑星からは電波が放射されることが一般的となっているが、これらの惑星からの電波のうち、強度および周波数から地上で観測が可能なのは木星からのデカメータ波放射のみである。この木星デカメータ波放射を観測し、その諸性質、特に発生領域と偏波特性を明らかにすることは、木星デカメータ波放射の発生メカニズムの解明だけでなく、磁場を持つ惑星の磁気圏で起きている現象の理解につながる。こうした電波の放射源および偏波特性を直接に観測する手段としては干渉計を用いる方法が有効である。そこで電波研究所で開発されたK-3型VLBI（超長基線干渉計）システムを利用した木星デカメータ波観測システムを製作し、木星デカメータ波放射の試験観測を行なった。観測は1984年5月22日から開始し、現在（1984年8月15日）までに9回の観測を行なった。そのうち木星デカメータ波放射を1回受信することができ、今回製作したシステムで木星デカメータ波放射の受信が可能であることが確認できた。

2. 木星デカメータ波放射観測システム

第1図にK-3型VLBIシステムのブロック図を示す。K-3型VLBIシステムではSバンド（2GHz帯）とXバンド（8GHz帯）の電波を受信するが、受信された電波は100MHz～520MHzの中間周波数に変換され、さらにビデオ変換器により、0～2MHzのビデオ帯域の周波数に変換される。ビデオ帯に変換された信号は記録信号発生器（フォーマッター）により、1bitサンプリングされ時刻符号も付与



第1図. K-3型VLBIシステムのブロック図

されたのち、レコーダーで記録が行なわれる。サンプリングは4MHzで行なう。

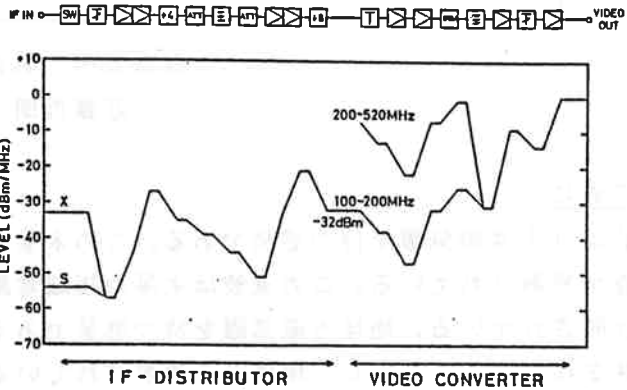
木星デカメータ波放射観測システムではビデオ変換器以降を利用している。ビデオ変換器の入力周波数範囲は100MHz~520MHzであるため、デカメータ波帯の周波数をビデオ変換器の入力周波数範囲に変換しなくてはならない。またビデオ変換器の最適入力レベル(-32dBm/MHz:第2図参照)まで増

幅しなくてはならない。そこで第3図に示される木星デカメータ波放射受信用のフロントエンド部(以下JDWフロントエンド部と書く。ここでJDWはJovian Decametric radio Wavesの略で木星デカメータ波放射のことを汎用の広帯域アンプおよびDBM(Double Balanced Mixer)を用いて製作した。以下、アンテナ部、プリアンプおよび周波数変換部、観測システムの順に述べる。

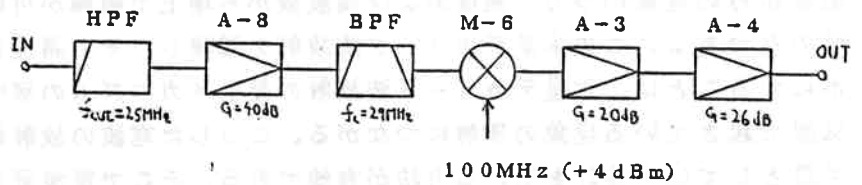
2.1 アンテナ部

アンテナは市販の4素子八木アンテナで、21MHz帯と28MHz帯の受信が可能である。

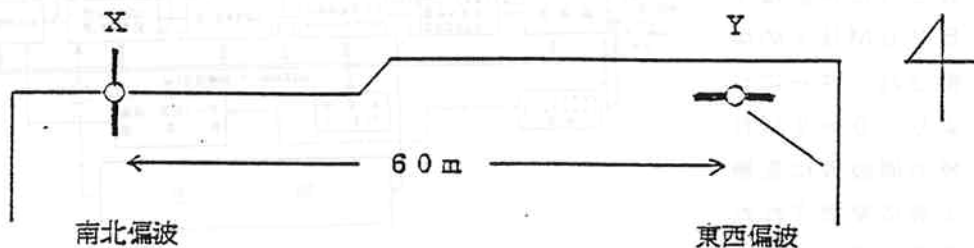
第4図に示されるように、東西方向に約60m離して2本のアンテナを設置した。それぞれのアンテナは垂直に立てられ、互いに直交する偏波を受信するように、エレメントの方向は南北方向(Xアンテナ)および東西方向(Yアンテナ)に向けている(第5図)。アンテナが正常に機能しているかどうかをチェックするため第6図に示される方法で銀河電波を受信した。第7図に受信例を示すが、XおよびYアンテナの出力レベル(ベースラインのレベルに注目する一パルス状に出ているのは通信等の混信)は両方とも銀河が南中のころに、最大となる日変化をしている。このことからアンテナは正常に機能していると言える。



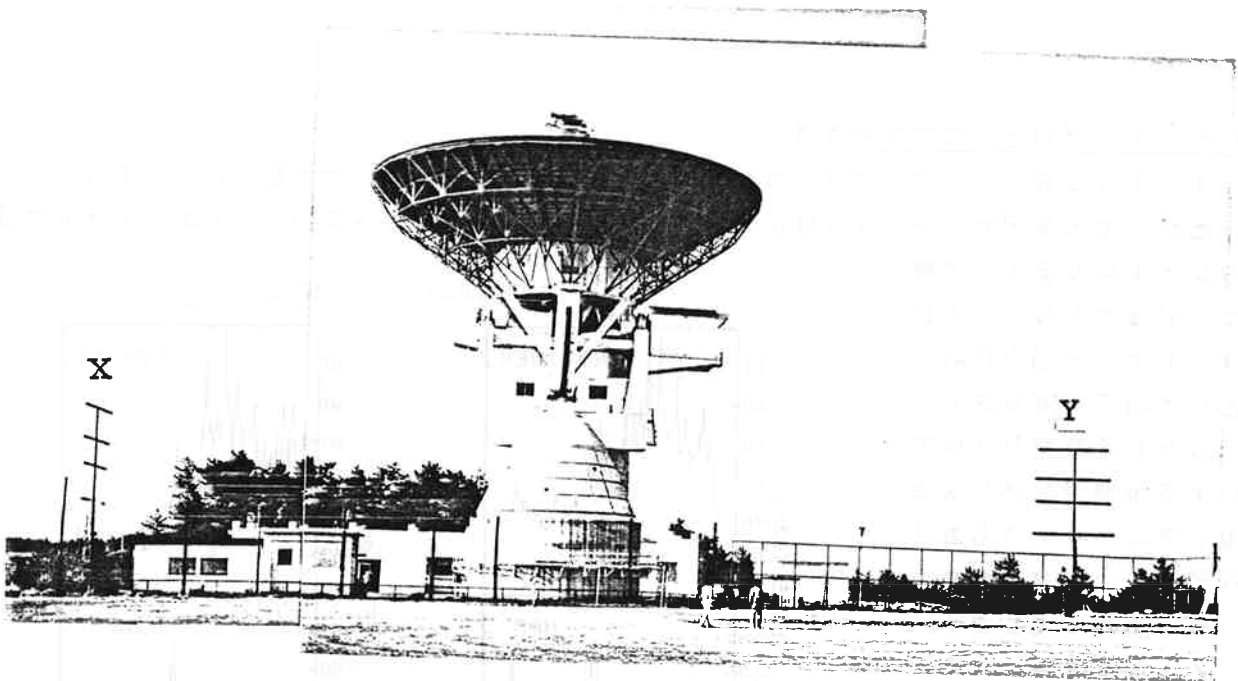
第2図. K-3バックエンド部のレベルダイアグラム



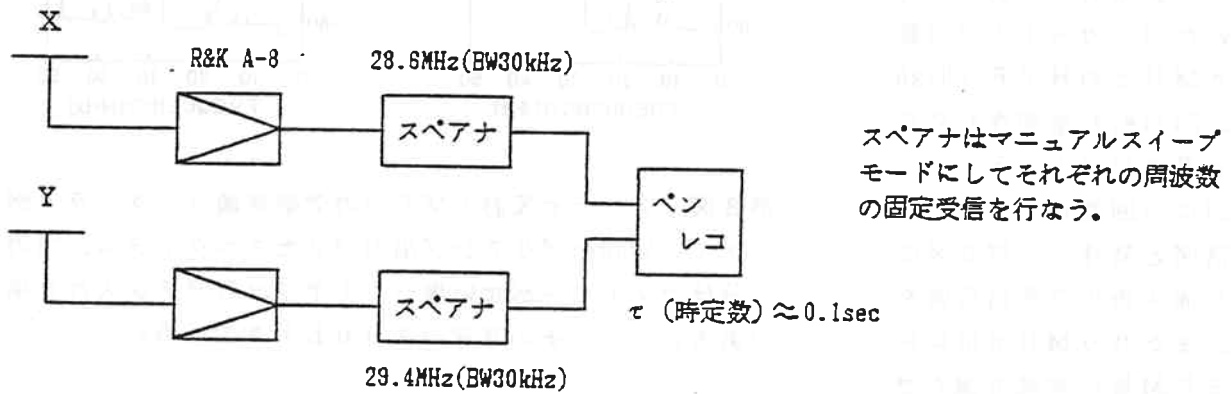
第3図. デカメータ波帯フロントエンド部



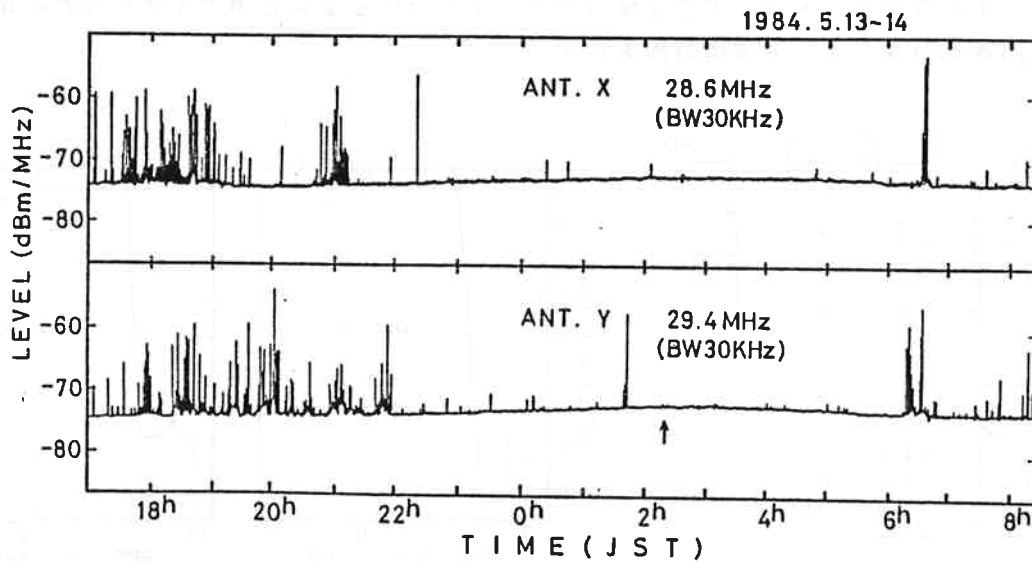
第4図. アンテナ配置



第5図 . アンテナX (左) とアンテナY (右)



第6図 . アンテナ機能チェック用セットアップ

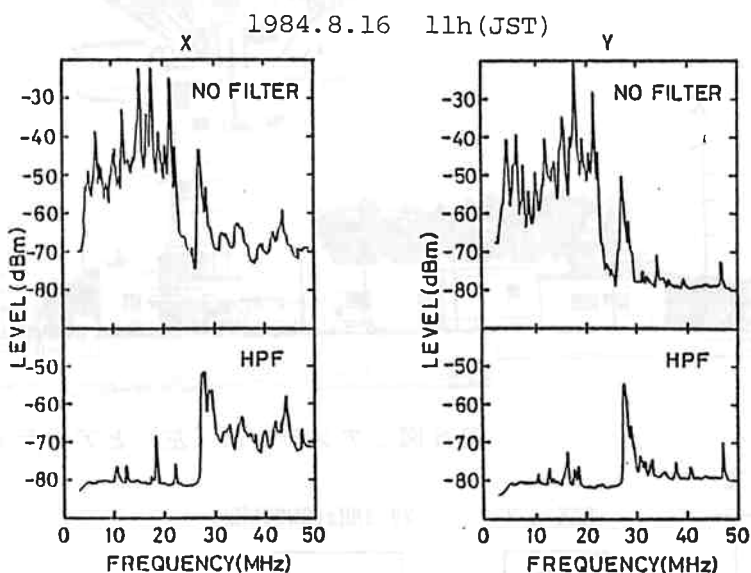


第7図 . 銀河受信例 (矢印の時刻で銀河が南中する)

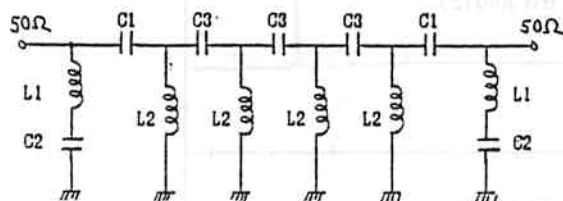
2.2 プリアンプおよび周波数変換部

ゲイン40 dBのプリアンプ出力で銀河レベルが約 -70 dBm/MHzで受信されている(第7図)。したがって木星デカメータ波放射を受信するためには、少なくとも銀河レベルがビデオ変換器の入力レベルになるまで増幅をしなくてはならず、JDWフロントエンド部全体のゲインとして約70 dB必要である。しかし30 MHz以下のいわゆる短波帯には非常に強い通信電波がたくさんあり(第8図)そのままの増幅ではアンプが飽和してしまう。当初、21 MHz帯の木星デカメータ波放射の受信も予定していたが、カットオフ周波数25 MHzのHPF(High Pass Filter)を製作し28 MHz帯の受信のみとした。

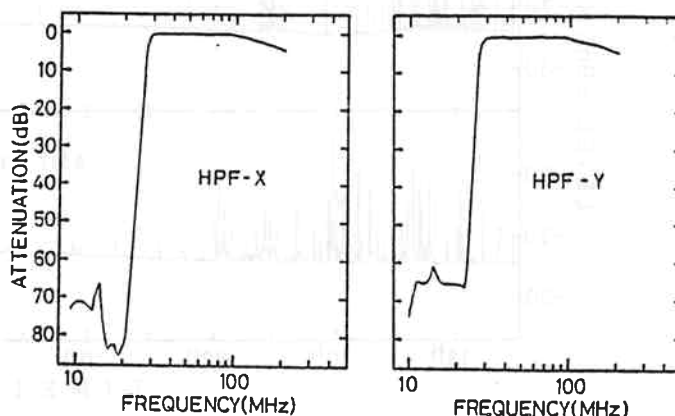
第9図に今回製作したHPFの回路図と特性を、第8図にHPF挿入後の受信信号例を示す。また80 MHz帯に存在するFM放送電波も強力であるため(第10図参照)、混変調および30 MHz以上の放送電波でのアンプの飽和をなくするため第11図に示されるBPF(Band Pass Filter)も挿入している。ただし、このBPFの高域の減衰特性が悪く、JDWフロントエンド部全体のゲインを十分にとることができなかった。第12図および第1表にJDWフロントエンド部の特性を示す。



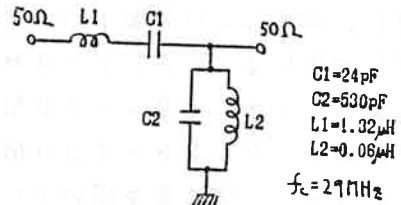
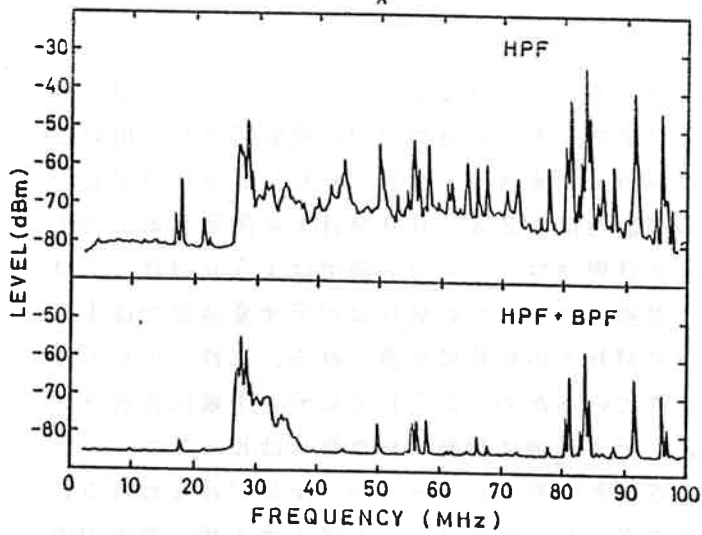
第8図. アンテナXおよびYでの受信電波スペクトラム例。
ゲイン40dBのプリアンプ出力で見たスペクトラム。図の上半分はフィルターがない場合、下半分はHPFを入れた場合である。スペアナのBWは100kHzである。



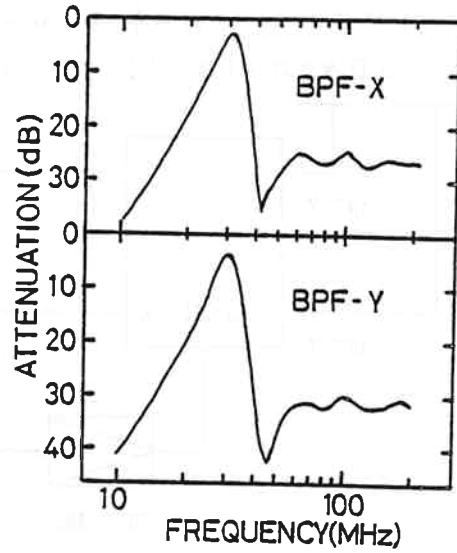
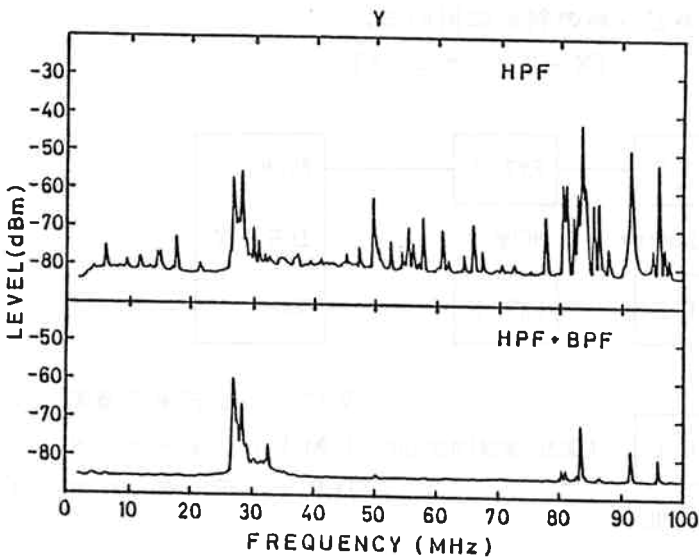
C1=79.2pF
C2=119pF
C3=83.5pF
L1=0.53μH (T68-8 に9回巻)
L2=0.16μH (T25-8 に5回巻)
*T68-8, T25-8 はアミダンのトロイダルコアの品名



第9図. HPFの回路図と特性

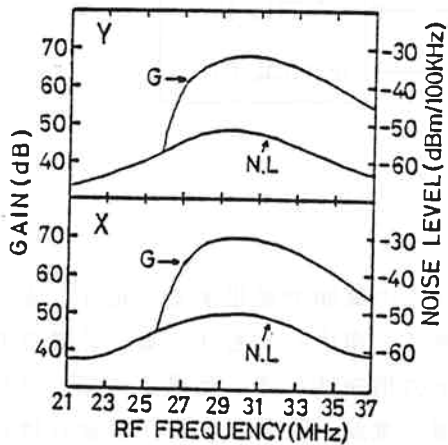


* L1: 1mm φエナメル線を10mm直径で21回巻
 L2: 1mm φエナメル線を10mm直径で1回巻
 (L1,L2ともに空心コイル)



第10図 . 100MHzまでの受信電波スペクトラム例とBPFの効果。第8図と同様にゲイン40dBのプリアンプ出力である。

第11図 . BPFの回路図と特性



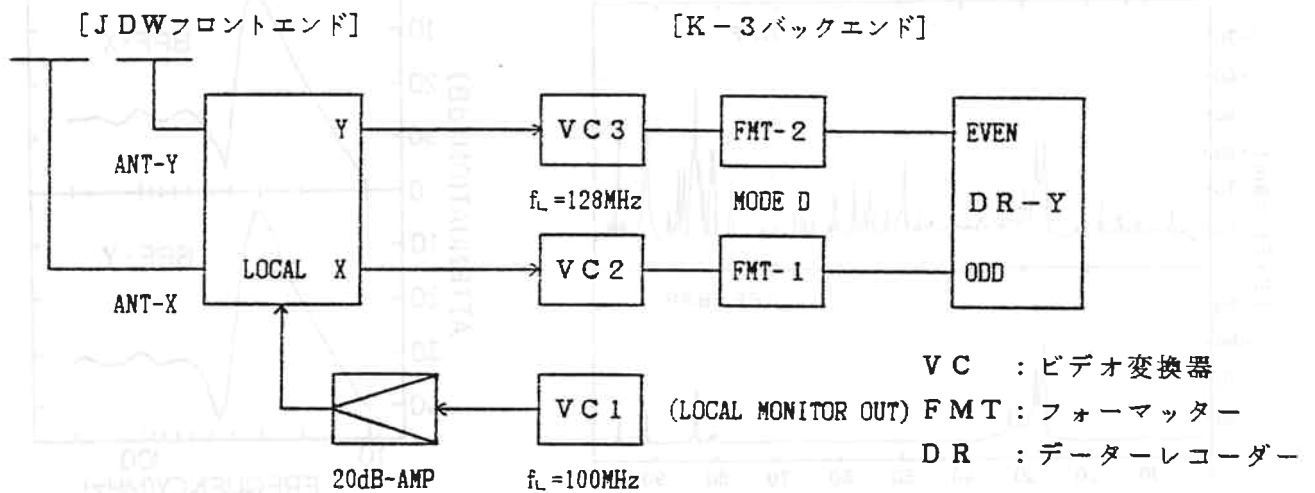
第1表 . フロントエンド部諸元

受信周波数	28 ~ 30 MHz
ゲイン	70 dB
NF	4 dB

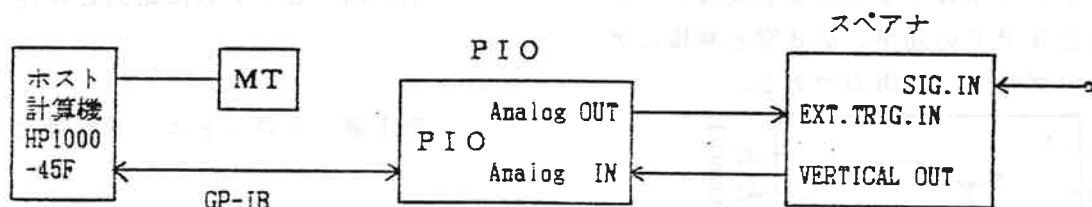
第12図 . フロントエンド部の特性

2.3 観測システム

観測にはK-3ビデオ変換器を3台用いている。その内1台はJDWフロントエンド部へのローカル信号源として用い、残りの2台をXおよびYアンテナからの出力の受信器として用いる(第13図)。ローカル信号源用のビデオ変換器のローカル周波数は100.00MHzに設定し、受信器として用いる2台のビデオ変換器のローカル周波数は128.00MHzに設定する。つまり受信しようとしている28~30MHzの信号はJDWフロントエンド部では100MHzのローカル周波数により128~130MHzの信号に変換される。この信号はビデオ変換器では128MHzのローカル周波数を用いてビデオ帯の0~2MHzの信号に変換される。これらのビデオ変換器の原振はすべて水素メーザ発振器から供給されているため、こうしてビデオ帯域に変換された後もコヒーレンス(可干渉性)は保たれている。ビデオ帯域に変換された信号はK-3フォーマッターで1bitサンプリングされ時刻符号も付与されたのち、レコーダーで記録が行なわれる。また、ビデオ信号をスペクトラムアナライザーでモニターし、スペクトラムアナライザーの出力の計算機への取り込みも同時に行なう。計算機に取り込んだデータはダイナミックスペクトラムの形で出力し、木星デカメータ波放射が受かっていたかどうかの判定に用いる。



JDWフロントエンドとK-3バックエンドの接続



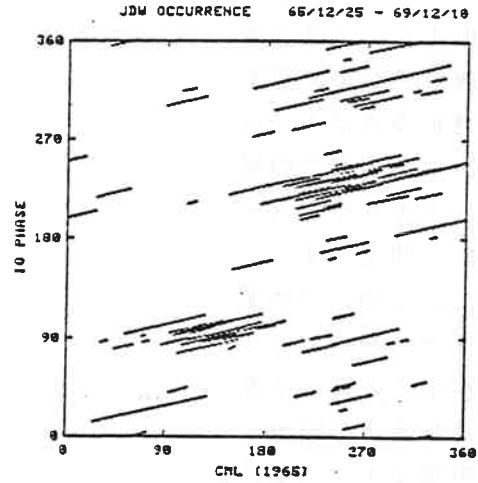
計算機とスペアナの接続

第13図. 観測システム

3. 観測

木星は約12年の公転周期を持ち、その間に赤緯は $\pm 23^\circ$ の範囲で変化する。現在、赤緯はもっとも下がった状態(1984.6において赤緯は -23°)であり、南中しても(鹿島:北緯 36° において)高度は 31° にしかならない。天頂向きのアンテナの指向性を考えた場合には、良い観測条件とは言えない。そこで木星デカメータ波放射のうち、強い電波が放射されるイオ依存性の電

波源のみを観測することにした。第14図は平磯支所リオメータデータ中に見られた木星デカメータ波放射を横軸に木星の中央子午線経度（地球から見て木星面の中央の体系Ⅲと呼ばれる木星の磁場で定義された経度でCML = Central Meridian Longitude と呼ぶ）、縦軸にイオ衛星の位相角（衛星の位置を表わす角度で地球から見て木星の裏側にある場合を0°として、衛星の公転方向に360°までの値をとる）をとって表わしたものであるが、ある決まったイオの位相角とCMLの領域に現象が多く出現していることが分かる。⁽¹⁾これがイオ依存性の木星デカメータ波放射と呼ばれるものであるが、この放射の起こる時刻は木星の自転周期とイオ衛星の公転周期および木星と地球の位置関係から予測することができる。そこで、この予測された時刻を中心として180分の観測を行なうことにした。木星デカメータ波放射はバースト的に数分から数10分継続する現象なので、180分という観測時間は観測時間としては十分な時間である。ただし、昼間は通信の混信の影響が大きいので、夜間だけの観測とした。したがって観測可能なシーズンは夜中に木星が南中する衝（今年は6月30日だった）の前後数ヶ月に限定されてしまう。第2表に今シーズンのイオ依存性木星デカメータ波放射の出現予報時刻を示す。観測は表中○印で示した9回行なっている。



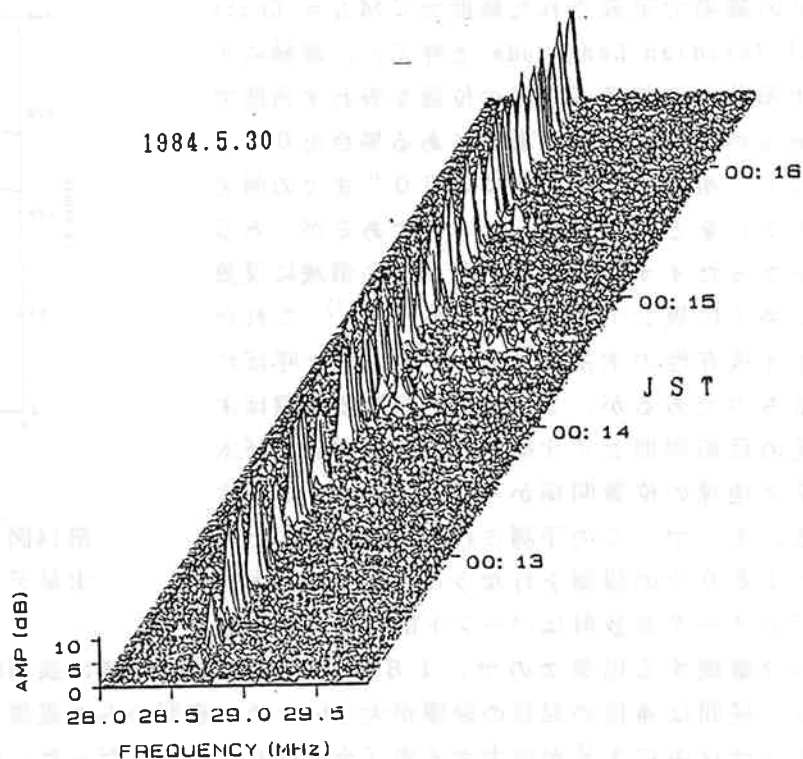
第14図．平磯リオメータデータ中に見られた木星デカメータ波放射現象

第2表．木星デカメータ波放射の出現予報時刻（イオ依存性電波源）

CML(65)		136.46		247.13			
IO-PHASE		68.0 - 103.0		213.0 - 248.0			
予報時刻(JST)		ZESJ					
YYYY MM DD	HHMM	CML65	IO-PHASE	DE	ESJ	JIKAKU	ELE
1984/ 5/ 5	452	136.48	79.38	-1.94	-48.90	18.08	26.88 E
1984/ 5/12	535	136.49	70.09	-1.93	-42.68	35.80	20.51 E
○ 1984/ 5/22	2336	136.49	98.44	-1.92	-33.20	-42.76	17.08 E
○ 1984/ 5/27	553	247.15	246.05	-1.92	-29.46	56.06	9.53 M
1984/ 5/28	2134	247.15	222.76	-1.92	-28.01	-66.76	2.68 M
○ 1984/ 5/30	017	136.50	89.42	-1.92	-27.03	-24.75	24.77 E
○ 1984/ 6/ 4	2216	247.15	213.82	-1.92	-21.85	-48.66	13.81 M
○ 1984/ 6/ 6	059	136.50	80.49	-1.92	-20.88	-6.64	28.66 E
○ 1984/ 6/13	141	136.50	71.64	-1.92	-14.73	11.56	27.95 E
1984/ 6/23	1941	136.50	100.55	-1.92	-5.36	-66.33	2.78 E
1984/ 6/30	2023	136.50	91.79	-1.92	.77	-47.96	13.98 E
○ 1984/ 7/ 5	240	247.15	239.58	-1.92	4.48	51.10	12.18 M
○ 1984/ 7/ 7	21 5	136.49	83.03	-1.92	6.89	-29.57	22.68 E
1984/ 7/12	323	247.15	230.81	-1.92	10.60	69.51	.53 M
○ 1984/ 7/14	2147	136.49	74.25	-1.92	13.01	-11.17	27.72 E
1984/ 8/ 5	2249	247.14	241.75	-1.91	32.24	28.41	22.95 M
1984/ 8/ 8	1715	136.46	85.08	-1.91	34.67	-52.33	11.30 E
1984/ 8/12	2333	247.13	232.65	-1.90	38.40	46.64	14.49 M
1984/ 8/15	1758	136.46	75.93	-1.90	40.83	-34.13	20.61 E
1984/ 8/20	016	247.13	223.43	-1.89	44.57	64.80	3.54 M
1984/ 9/ 6	19 4	247.12	241.95	-1.86	60.28	4.44	28.26 M
1984/ 9/13	1949	247.12	232.32	-1.84	66.52	22.27	24.94 M
1984/ 9/14	2233	136.42	98.86	-1.84	67.52	64.22	3.89 E
1984/ 9/16	1415	136.42	75.39	-1.84	68.99	-58.67	7.42 E
1984/ 9/20	2034	247.11	222.57	-1.83	72.80	40.01	17.85 M

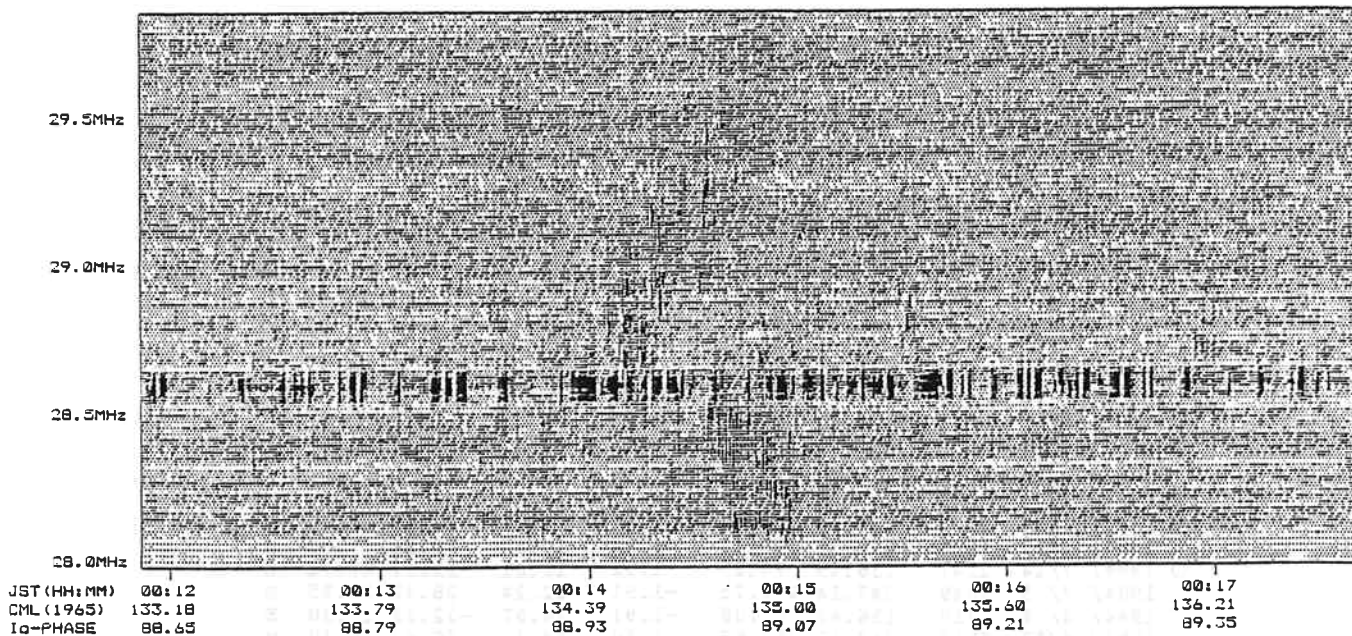
4. 木星デカメータ波放射受信例と相関処理結果

木星デカメータ波放射受信の判定にはダイナミックスペクトラムを用いた。ビデオ帯のモニター信号のスペアナ出力を計算機に取り込んでいるが、取り込んだデータをダイナミックスペクトラムの形で出力し、木星デカメータ波放射受信の判定を行なう。判定条件は①一般の通信に比べて広帯域の現象であり、②少なくとも一分間の継続時間を示す、の二つとした。この二つの条件は短波帯での通信および空電と区別するための条件である。第2表の○印で示された9観測中①②の条件に合致する現象はわずか1例であった。その1例は5月30日の観測中に見られた現象であるが、そのビデオ帯のモニター出力で見たダイナミックスペクトラムを第15図および第16図に示す。第15図は3次元的に表

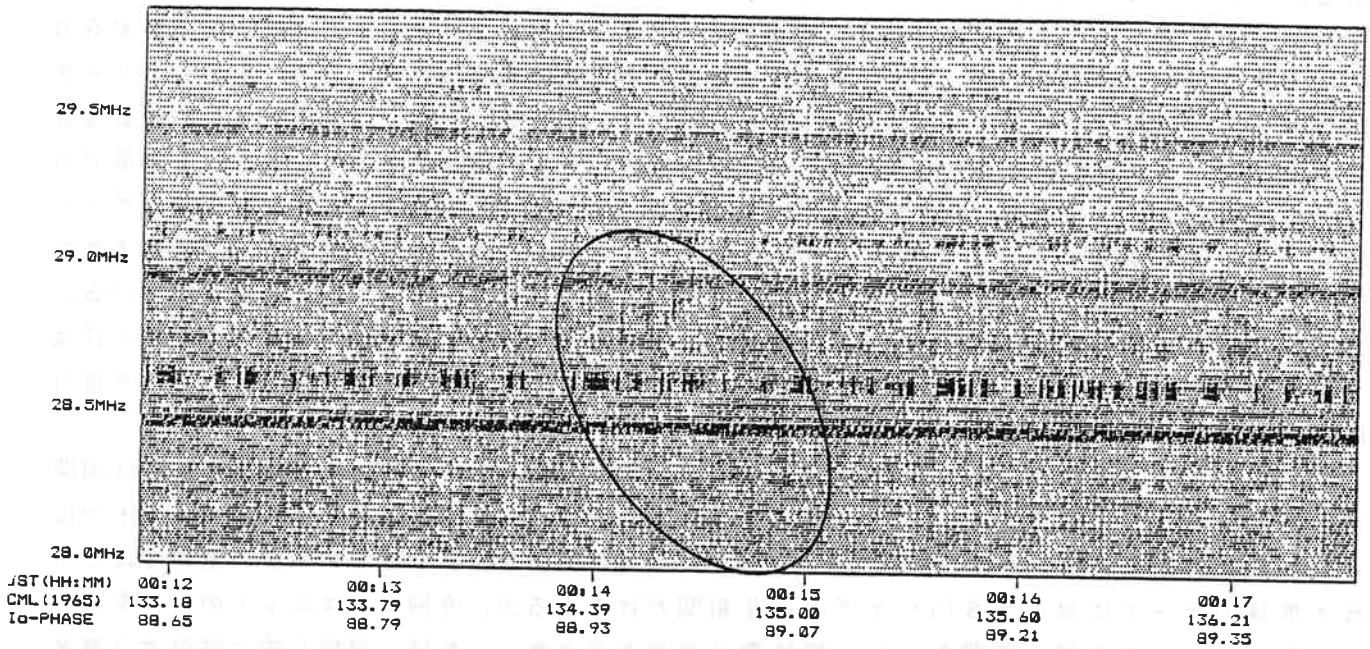


第15図. ダイナミックスペクトラム (3次元表示)

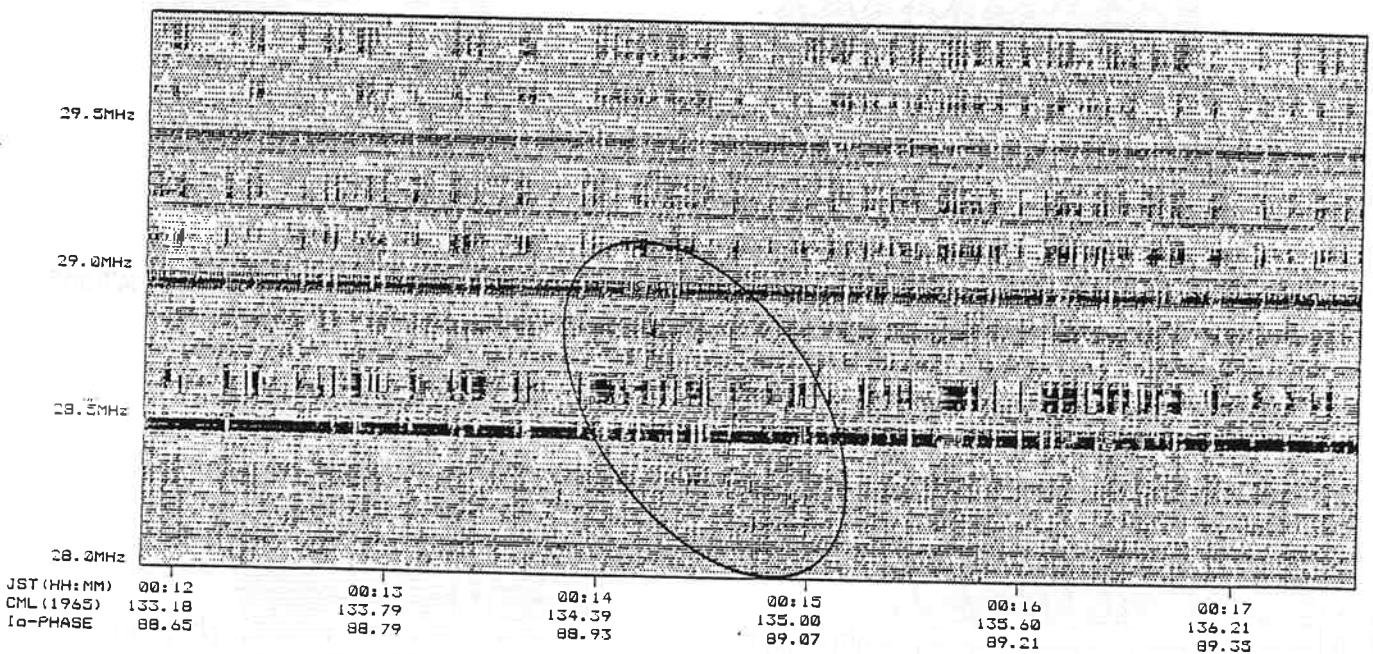
1984. 5.30 DYNAMIC SPECTRUM (VIDEO MONITOR -- ANTENNA Y)



第16図. ダイナミックスペクトラム (2次元表示)。0 h 14 m から 15 m にかけて現象が見られる。



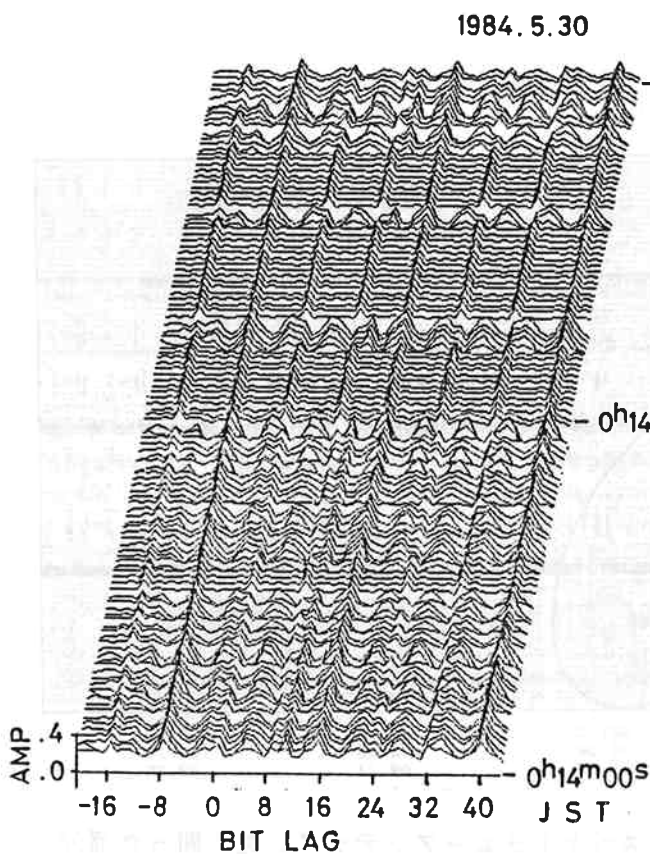
第17図 . 1bitサンプリング後のダイナミックスペクトラム—アンテナX。丸く囲った部分に現象が見られる。



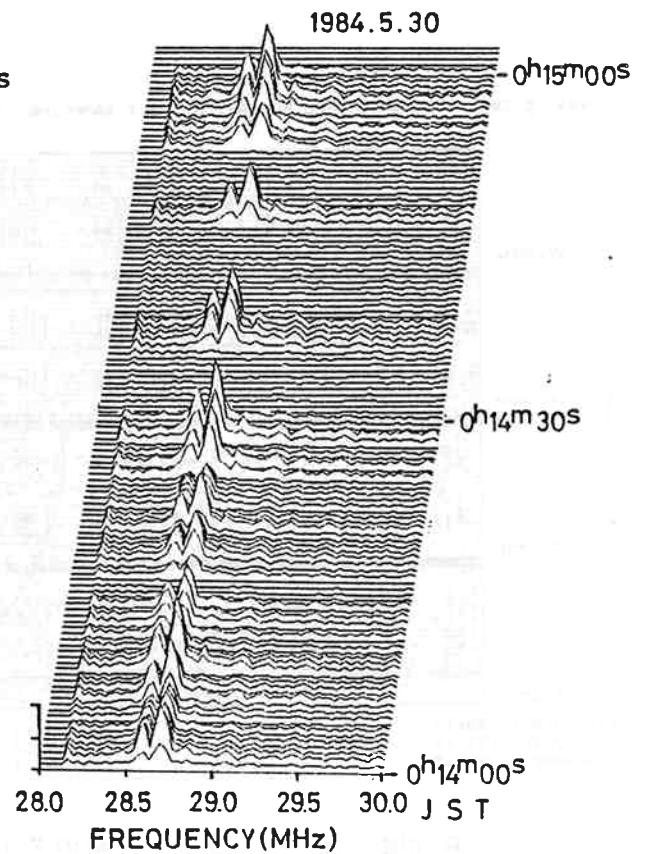
第18図 . 1bitサンプリング後のダイナミックスペクトラム—アンテナY。丸く囲った部分に現象が見られる。

示したダイナミックスペクトラムであり、第16図は2次元で表示したダイナミックスペクトラムである。スペアナはバンド幅30KHz、掃引2MHz/500mssecで使用している。受信強度などを定量的に評価するには3次元表示が適するが、ダイナミックスペクトラムの構造を把握するには2次元表示が適している。28.6MHz付近にある強い電波は通信である。木星デカメータ波放射らしき現象は0h14mから0h15mにかけて、2~3dB程度レベルが上昇している現象である。バックグラウンドレベルに対して2~3dB程度のレベルの増加は地上で受信される木星デカメータ波放射としては妥当な強度である。⁽¹⁾ 第17図および第18図に1bitサンプリング後のダイナミックスペクトラムを示す。このデータはレコーダーに記録された信号を再生し、符号化されたデータの復調を行なうデコーダ部のデータ出力をスペアナでモニターすることによって得ている。0h14mから0h15mにかけてS/Nは劣化しているが(1bitサンプリングによりS/Nは $2/\pi$ に劣化する⁽²⁾)、アンテナX(第17図)、アンテナY(第18図)ともに木星デカメータ波放射らしき現象が再現されている(丸く囲った部分)。

アンテナXおよびアンテナYで取得したデータの相関処理はK-3型再生相関処理装置(相関器)で行なった。相関器は1クレートが8ユニットで構成されており、それぞれのユニットでは8bitラグの相互相関をとることができる。通常の測地目的のVLBI観測データの処理では2MHz帯域のデータに対して8bitラグの相互相関だけをとるが、今回は8ユニットのラグを連結し、64bitラグの相互相関をとり、周波数分解能を高めた。これは、測地目的で受信する電波(準星からの2GHz帯および8GHz帯の電波)は白色雑音であるために、その相互相関関数を求めるのに8bitラグで十分であるが、木星デカメータ波放射は2MHz帯域に比べると狭帯域の



第19図 . 64 bit lag 相互相関関数

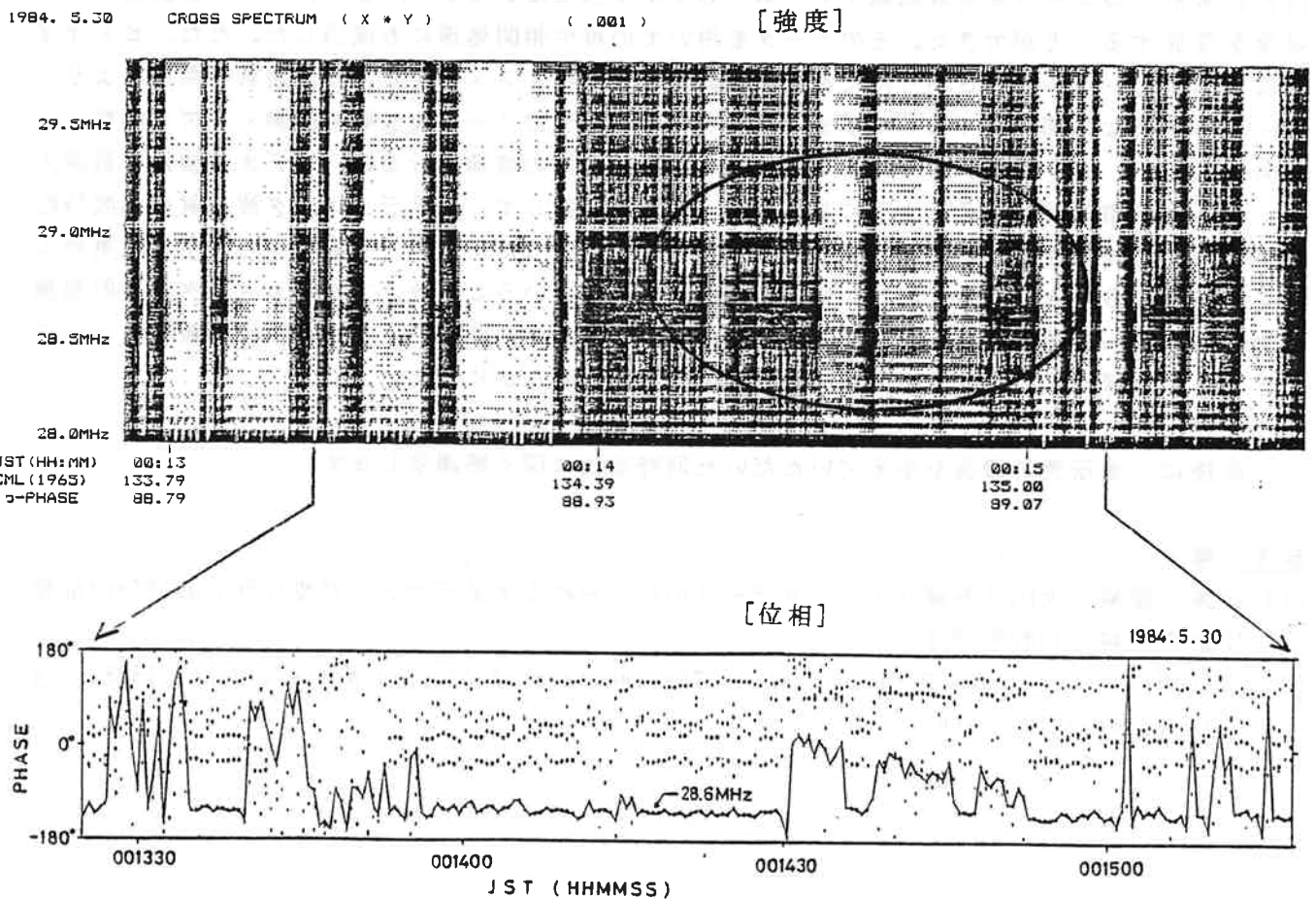


第20図 . クロススペクトラム (3次元表示)

現象であることが多いため相互相関関数を求めるのに8 bit ラグ以上必要となるためである。第19図に、データ区間として0 h 14 mから0 h 15 mまでをとった64 bit ラグの相互相関関数を示す。相関器での積分単位は500 msecとした。

相関強度に約20%のバイアス分が見られるが、これはビデオ変換器の入力レベルが適正レベルに達していなかったためと思われる。1bitサンプリング後のデータの0と1の数に不平衡が生じれば、相関器からの出力で0と1の数が等しい状態を相関係数0と定義するため不平衡分が相関関数のバイアス分となる。ビデオ変換器への入力レベルが小さかった場合は、1bitサンプリング時に不感帯（データの1、0の判定ができない領域）に多くデータが集中し、0と1の数に不平衡を生じ、その不平衡分が相関関数のバイアスとなったと考えられる。

また第19図で通信波成分以外に8 bit 周期の成分が見られるが（例えば0h14m30sから35s にかけて）、これもビデオ変換器への入力レベルが小さすぎたためと思われる。符号化したデータには8 bit に対して1 bit の奇数パリティがつけ加えられているが、すべて0のデータの場合はパリティビットは必ず1となる。レコーダーでの再生が完全であれば、パリティビットを取り除いた後のデータはすべて0のデータとして再生される筈であるが、実際には再生系の等価器（equalizer）の特性および再生時のレコーダーのワウ等で、パリティビットがデータ中に漏れ込んできたと考えられる。



第21図 . クロススペクトラムの強度（上半分の図）と位相（下半分の図）。丸く囲った部分にレベルの増加が見られる。位相は28.6MHz の成分のみ実線で示している。

これらのバイアス分は変化していないという仮定のもとに、通信もなく木星デカメータ波放射らしき現象もない時間帯のデータを用いて相関関数からバイアス分を差し引いた。その後、フーリエ変換を行なってクロススペクトラムを求めた。第20図にクロススペクトラムの強度を3次元表示で示す。第21図にはクロススペクトラムの強度の2次元表示と位相の変化を示している。3次元表示データではわかりにくいのが、2次元表示(第21図の上半分)で0h14mから0h15mにかけて、通信のない部分でレベルが強くなっているのがわかる(丸く囲った部分)。クロススペクトルの位相データ(第21図の下半分)でも、0h14m30sから0h15m00sにかけての通信のない部分で、通信のある部分とは別の安定した位相を示し、この部分で相関が得られたことを示している。

直行した偏波を受信したデータ間で相関が得られたということは、偏波成分の存在を意味し、木星デカメータ波放射は円偏波成分が多いということと矛盾しない。木星デカメータ波放射が受信されているところで(0h14m30sから0h15m00sにかけて)位相が300度/分のドリフトを示しているが、これは木星の日周運動に起因するフリンジレート(約6度/分)に比べて50倍も大きな量である。したがって、この位相の変化は偏波面の回転を表わしているものと思われる。

5. おわりに

今回製作したJDWフロントエンド部およびK-3型VLBIシステムのビデオ変換器以降を用いた木星デカメータ波放射観測システムでわずか1例ではあるが、木星デカメータ波放射らしき現象を受信することができた。そのデータを用いての再生相関処理にも成功した。ただ、ビデオ変換器への入力レベルが小さかったため相関関数に大きなバイアスが生じたり、通信の混信により、データの有効な区間が短くなってしまった。今年の木星デカメータ波放射の観測シーズンは終わりを向かえるが、来シーズンまでにJDWフロントエンド部の整備を行ない、ビデオ変換器の最適入力レベルまで増幅が行なえるようにし、数多くの観測を通じて、木星デカメータ波放射の偏波特性を明らかにしていきたい。また、60mと短い基線ではあったが、データ取得から再生相関処理まで完全にVLBIと同じ方式で行ない、相関が得られたということは、木星デカメータ波放射観測に対してもK-3型VLBIシステムが有効であることを示したといえる。今後は偏波特性のみにとどまらず基線を長くして、電波源の放射域そのものを明らかにしたい。

最後に、本研究の機会を与えていただいた河野室長に深く感謝致します。

参考文献

- (1). 近藤、磯崎、大内「平磯リオメータデータ中に見られる木星デカメータ波放射」第278回研究談話会資料、1982年8月。
- (2). Van Vleck, J.H. and D. Middleton; "The Spectrum of Clipped Noise", Proc. IEEE, 54, No.1, pp.2-19, 1966.