

宇宙デカメータ電波干渉計システムの開発とその初期成果

— 福井工業大学芦原校地における木星電波観測システム —

大 家 寛*

Development of Interferometer System for Observation of Cosmic Decameter Radio Waves and Observation Results in the Initial Phase

— Observation of Jovian decameter radio waves at Awara Campus of Fukui University of Technology —

Hiroshi Oya

An interferometer system for observation of cosmic decameter radio waves has been developed at Awara Campus of Fukui University of Technology . The system consists of two interferometer base antennas which are set with a base line length of 165m; each antenna is log-periodic Yagi with 9 elements for reception of radio waves from 20MHz to 40MHz. Using pre-amplifier of 25 dB gain at the antenna sights, the losses of cables for feeding signals along 335m routes between the points of main receivers and antenna sights are compensated. At the back-end of the main receivers which consist of three stage super-heterodyne system the phase sensitive detector for the interferometer operations is installed; all of sub- systems related to the phase detection are controlled by a highly stabilized crystal time standard.

Observations of cosmic decameter radio waves are started from November 20, 2001. Several events of Jovian decameter radio wave emissions originated from Io-A, Io-B and Non-Io-A sources have already been confirmed; the confirmation has been made by comparing the time dependent phase changes of observed radiation at 24.00675MHz with calculated phase changes that are called calculated fringes. From these results it has also been estimated that the system has capability to detect the decameter radio pulses, from the Galactic center, which are manifestation of rotating black holes (Oya and Iizima, 1999). The quest of the rotating black hole is one of the most significant purpose of the presently developed system.

* 宇宙通信工学科

1 序

波長 10 m–100 m の範囲に入る宇宙電波は宇宙デカメータ波帯電波と呼ばれている。電離層の影響により、地上波の混入や、宇宙デカメータ波帯電波の透過性の問題から、地上での観測は 18 MHz 以上になるが、定義の周波数より多少高い領域 40 MHz までが観測研究の対象となる。

発見の歴史が最も古く、そして常に地上に注いでいるデカメータ電波は、1935 年ジャンスキー (K.Jansky⁽¹⁾) によって発見された銀河デカメータ電波であるが、その他に宇宙デカメータ波帯電波の代表的な電波源は 1955 年に Burk と Franklin⁽²⁾ によって発見された木星デカメータ電波、そして、かに星雲(M1)やカシオペア A のように超新星爆発の後にみられる高速で拡張してゆく熱い磁化プラズマ中で放射される電波源がある。また、太陽の外縁プラズマ中からもタイプ II, III そして IV 型バーストとして頻繁に放射されるのは良く知られている。

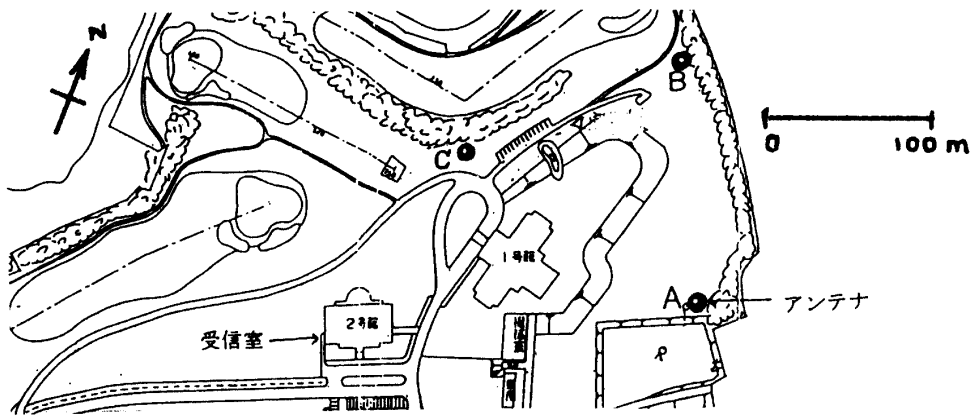
これらの良く知られた電波源に対し、1984 年以降に筆者⁽³⁾等によって銀河系中心には、従来からの認識と全く異なるコヒーレント性をもつデカメータ電波パルス群に対応する多数の源となる天体、すなわちブラックホールが発見されている。電波天文学の従来の動向は 100 MHz 以上の高い周波数に対する観測が主流である。Hewish 教授のグループ⁽⁴⁾が 80 MHz 前後の周波数でパルサーの存在を発見したのも、決して電波天文が主目的の研究ではなく、太陽風シンチレーション観測の副産物にすぎなかった。したがって 40 MHz 以下の周波数帯での研究は電波天文学の対象外の特殊な領域と言っても過言ではなかった。しかしここに新しい大きなテーマが横たわっていたことになる。まず木星デカメータ電波は、宇宙デカメータ電波の放射機構を解明するための研究として、木星が比較的近い宇宙空間に存在することから、重要なテーマとして続くが、Oya

と Iijima (5) により銀河系中心にパルス群の存在が発見されたことによって、デカメータ電波を手段に用い、回転するブラックホールを解明するといった、ある意味で電波天文学の歴史に新しいページを加える重要なテーマとなりつつある。

これらのデカメータ電波の観測研究は、いまのところ世界でも限られたグループによってのみ進められてきた。我国では東北大学理学部(後に大学院理学研究科)はじめ、2, 3 の大学で進められてきている。2000 年以降福井工業大学でもこのデカメータ電波の観測研究に参加することになった。すなわち、2000 年には学内特別研究がみとめられ、宇宙デカメータ観測設備の開発が開始され 1 点のアンテナによる観測点が設置されたが、2001 年には特別研究“我々の銀河ならびにアンドロメダ星雲中心より到来するデカメータ電波パルス群の究明——超巨大ブラックホールの探査”の第一年度が始まり、第 2 点の観測点が設置され、デカメータ観測の基本である干渉計観測に着手された。本論文は、この段階において開発された観測システムの現状と得られつつあるデータについてまず木星デカメータ電波についてその概況を報告する。

2. 観測システム

観測システムは 2001 年 11 月現在、165 m の間隔をもって設置された 2 基のクロス八木アンテナを中心に展開されている(第 1 図参照)。図中 A 点は 2000 年度に設置され、C 点は 2001 年度に設置された。電波源方位を確定するために、もう一基線を必要とするが、これは 2002 年度、B

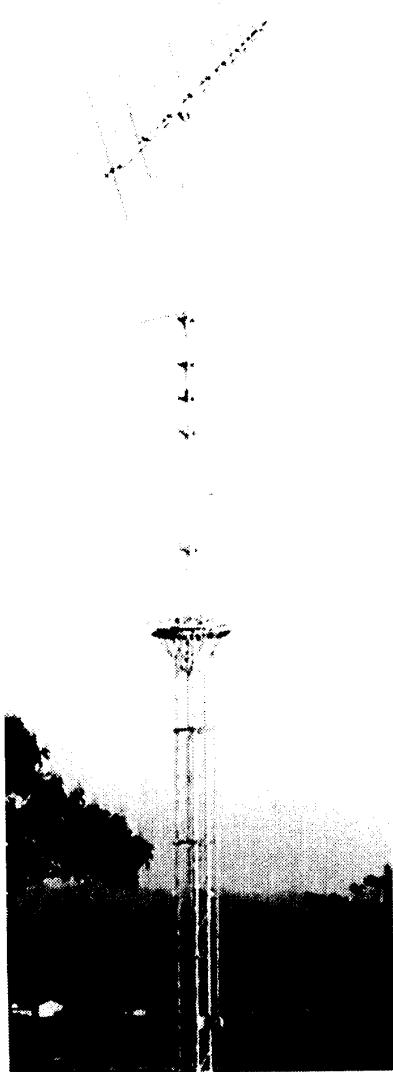


第1図 福井工業大学芦原校地に設置されたデカメータ電波干渉計配置図

点(図1参照)に設置する計画として進行中である。

2. 1 アンテナシステム

受信点では9素子のログペリオディックアンテナを15 m 高のタワーに設置している。このログペリオディックアンテナは20 MHz~40 MHz の帯域をカバーする広帯域特性をもつが、その利得はアンテナ利得計算の基準となるダイポール特性そのものであり、方位角 θ に対し $\cos\theta$ 特性を示す。すなわち、干渉計システムの要素としての役割をもつもので、一基のアンテナでは方位の決定は不可能で、方位正南方向、仰角 60° に固定されている。(第2図参照)



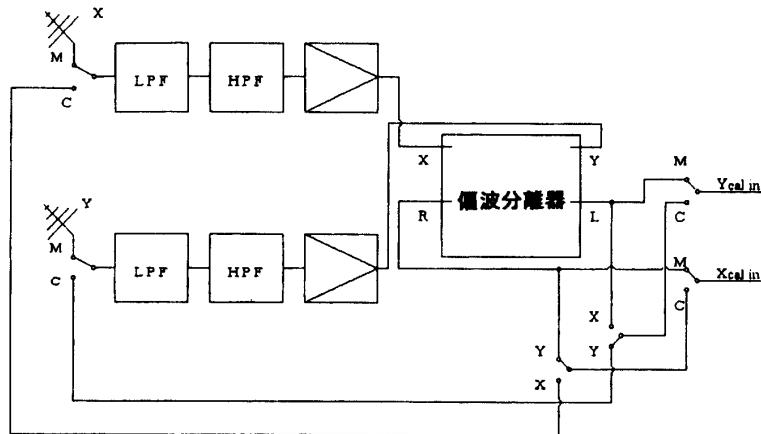
2. 2 前置増幅部

主受信器は各アンテナよりケーブル長 335 m の点(第1図中 2 号館)に設置されている。ケーブルは工作性等を重視した結果 5D2V を採用したため、その減衰は20 MHz で -10 dB, 40 MHz では -20 dB の減衰をこうむる。木星デカメータ電波受信を対象とする場合、観測の限界値は背景となる銀河デカメータ電波の混入である。銀河電波のログペリオディックアンテナ出力電圧は -110 dBm (20 MHz), -115 dBm (40MHz)である。前置増幅器のの入力段セット雑音は -135 dBm となっているが後に述べる主受信機の入力段雑音レベルは -115 dbm となっている。そうした点を考慮し、前置増幅部の利得は長期安定性を保つため 25dB と設定しているが、ケーブル減衰を考慮したうえでの十分な設定となっている。

第2図 芦原校地に設立された広帯域ログ・ペリオディック・デカメータクロスアンテナ

前置増幅器の校正には受信ケーブルを使用する。すなわち第3図に示すように M-C (Measure-Calibration 切換)リレーと、X-Y (X-Y System 切換)リレーを観測室より制御して、校正を実施するシステムと反対側のシステムの受信ケーブルから、信号を送って校正を実施する。

なお、最大 25 dB の増幅器モジュール (R&K 社 A-11) は 18 MHz～300 MHz の広帯域仕様となっていて、混入雑音を制限する目的から帯域フィルターを設計し 20 MHz～40 MHz 帯での観測に焦点をおいている。



第3図 アンテナ塔に搭載された前置増幅部のブロック図

2. 3 主受信機

主受信機には市販の広帯域受信機 RDM 5 4 5 採用している。これは 3 段スーパーヘテロダイン方式で、第 1 中間周波帯は中心周波数 70.455 MHz, 帯域 100KHz, また第 2 中間周波帯は中心周波数 455KHz, 帯域幅 10KHz, そして第 3 中間周波帯は中心周波数 20.5kHz, 帯域幅は、4.5kHz, 2.4kHz および 1kHz を選択可能としている。初段雑音レベル -115 dBm で、受信機は 20 dB の ATT を備え 110 dB のダイナミックレンジをもっているが、最大 130 dB の利得を -110 dBm の銀河電波レベルに対し 600 mV_{PP} までの出力として得ることが出来る。

2. 4 干渉計測

A 及び C 点間の電波の干渉作用に関わる位相計測を実施する為のシステムの回路図を第4図に示す。A, 及び C アンテナ系で受信された R 成分出力は Buffer 回路を経て、アナログ乗算器 534KD に入る。ここでは、A 系からの入力電圧 E_A , 及び C 系からの入力電圧 E_C をそれぞれ以下のように表す。すなわち

$$E_A = E_{A0} \cos(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_A + \theta_A) \quad \dots\dots(1)$$

及び

$$E_C = E_{C0} \cos(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_C + \theta_C) \quad \dots\dots(2)$$

であるが E_{A0} , E_{C0} は A 及び C 各入力信号の振幅であり、また \mathbf{r}_A , θ_A 及び \mathbf{r}_C , θ_C をそれぞれ A, 及び C に対するアンテナの、基準点からの距離ベクトル及び機器のもつ位相差とし、観測対象から到来する信号の角周波数及び波数ベクトルを、それぞれ、 ω 及び \mathbf{k} とする。したがって乗

算器からの出力信号は

$$E_{\text{out}} = g(t) + \frac{1}{2} E_{A0} \cdot E_{C0} \cdot \cos[k \cdot (r_A - r_C) + \theta_A - \theta_C] \cdots \cdots (3)$$

をうる。ただし

$$g(t) = \frac{1}{2} E_{A0} \cdot E_{C0} \cos[2\omega t + k \cdot (r_A + r_C) + \theta_A + \theta_C] \cdots \cdots (4)$$

である。

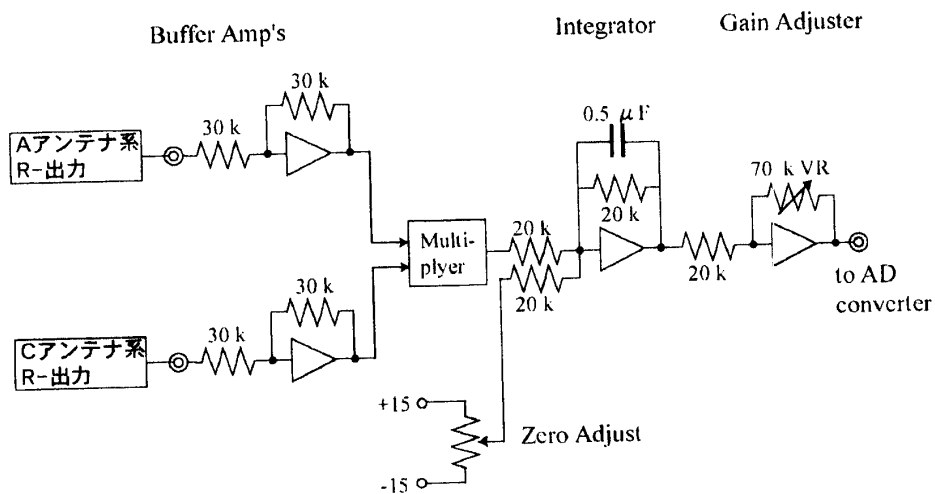
この出力信号は積分器を通し

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} E_{\text{out}} dt \cdots \cdots (5)$$

を求める。 T を天空を電波源が移動する時に位相変化を示す特性時間となる、1 分程度に対し充分速い変化を追従出来る特性時間ととれば良く、(5)式から $g(t)$ の積分は消え

$$I(t) = \frac{1}{2} E_{A0} \cdot E_{C0} \cos[k \cdot (r_A - r_C) + \theta_A - \theta_C] \cdots \cdots (6)$$

をうる。一方この(6)式は干渉計出力の理論計算式でもあり、 k を対象電波源と設定することによって、受信信号の干渉縞を予測することが出来る

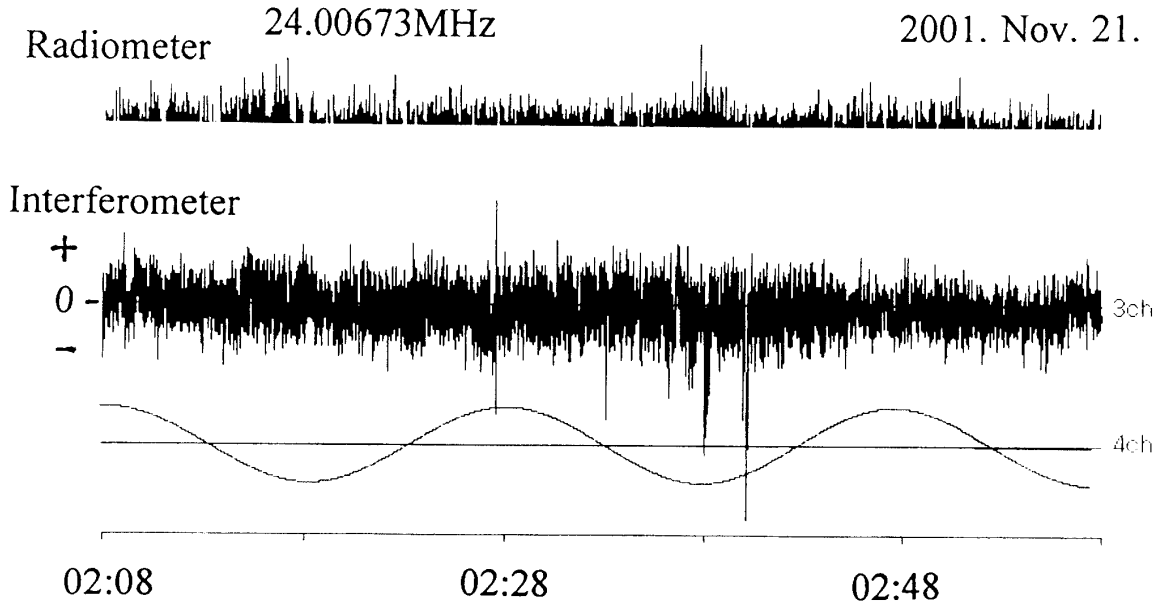


第4図 掛算型位相検出器の回路図

3. 初期観測結果 - 理論フリンジとの対比

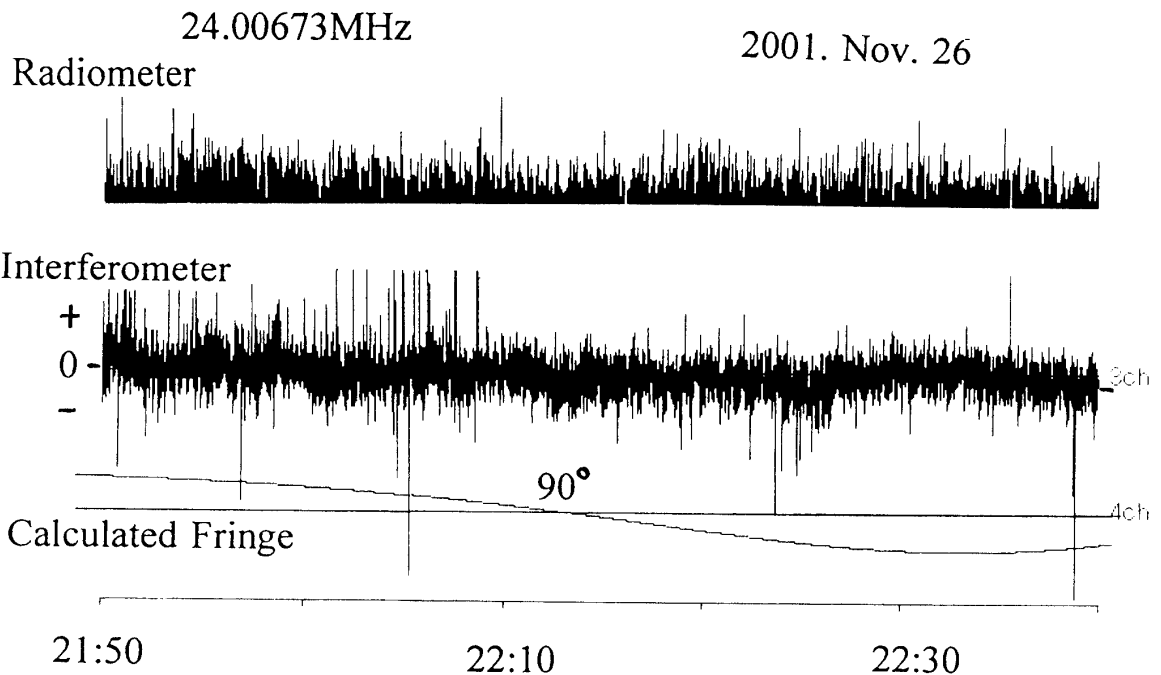
システムの構築が完成した後この干渉計を用いた観測は2001年11月20日22:00より、まず観測周波数を24.00673 MHzに設定し開始した。第5図(a)及び(b)に11月27日の1週間にわたって観測されたデータから代表として2例を示す。この代表例ではいずれも木星起源のデカメータ電波を受信した結果を示す。この結果には、それぞれ、対応する時刻に示す理論フリンジ(干渉縞)を前節(6)式によって求めた結果として示す。この干渉計の場合、A及びCの各アンテナに対応する受信系統のもつ絶対的な位相差 θ_A 及び θ_C は校正されていない。したがって、(6)式で示さ

れる理論値との比較はその時間変動成分が一致すること, いいかえれば, 電波源位置 $\mathbf{k} = \mathbf{k}(t)$ が時間変動を示すことを反映し, $\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_C)$ がもたらす時間変動による $\cos[\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_C)]$ 成分との一致が期待される。



第5図 (a) 2001年11月21日2時8分より2時58分までの観測

Radiometer チャンネルに電波バースト強度 Interferometer チャンネルに干渉計出力、Calculated Fringe チャンネルに理論的干渉計出力を示す。木星 Non-Io-A 電波源からのデカメータ電波放射が受信されている



第5図 (b) 2001年11月26日の観測例 第5図 (a) と同じフォーマットで示す

第5図(a)に示されるラジオメーターのチャンネルには 24.00673 MHz で観測されたバースト電波が銀河雑音レベルを越えて出現する様相が示されているが、下の干渉計 (Interferometer) のチャンネルにはこれに対応するバーストが、天空での木星の位置に応じ関数 $\cos[k \cdot (r_A - r_C)]$ で変調されて、出現している。すなわちこの結果は観測されている電波バーストが木星の電波源から放射されていることを示している。

第5図 (b) の例は 11 月 26 日 21:50 から 22:40 までの観測結果であるが、24.00673 MHz のラジオメーターのチャンネルからも判明するように銀河雑音レベルをはるかに越すバースト群が観測されている。この時刻帯では $\cos[k \cdot (r_A - r_C)]$ の時間変動は周期 1 時間半を越すゆっくりした状態にあるが、位相角点 90° の時刻を境にそれ以前では $\cos[k \cdot (r_A - r_C)]$ が正であることに対応し干渉計出力の大部分は正方向のバーストを示し、また 90° の時刻以降は $\cos[k \cdot (r_A - r_C)]$ が負の値を示すのに対応しバーストの大部分が負値を示していて、これもまた、例外的に混入する雑音電波を除けば、電波源位置が木星にあることを示している。

4. 成果の検討

本研究の成果により、その源が木星にあることを実証しつつ観測することが可能になったことが示されるが。ここではその確かさについて検討する。

表 1. 木星デカメータ電波出現予報

月日	JST	木星電波源
11 月 20 日	00:00 - 00:40	Io-C
	06:20 - 08:00	Non Io-A
	20:00 - 20:40	Non Io-C
	23:20 - 01:40	Io-B
11 月 21 日	02:00 - 04:20	Non Io-A
	04:40 - 06:20	Non Io-C
	22:00 - 00:00	Non Io-A
11 月 22 日	00:00 - 02:20	Non Io-C
	20:20 - 22:00	Non Io-C
11 月 23 日	03:40 - 06:00	Non Io-A
	06:20 - 08:00	Non Io-C
11 月 24 日	00:00 - 01:40	Non Io-A
	02:00 - 04:00	Non Io-C
	20:00 - 21:40	Non Io-A
	22:00 - 23:00	Non Io-C
11 月 25 日	05:20 - 07:40	Io-A
11 月 26 日	01:20 - 03:20	Non Io-A
	03:40 - 05:40	Non Io-C
	21:00 - 22:00	Non Io-A
	22:20 - 23:20	Io-A
	23:40 - 01:20	Io-C
11 月 27 日	07:00 - 08:00	Non Io-A

表 1 は今回の初期観測の対象となった 11 月 20 日から 27 日の 1 週間について、木星デカメータ電波の主として出現する電波源の予報を示したものである。ここには今後の研究対象となる Non Io-B 電波源については省略しているが、電波源について従来の研究成果にもとづいて得られた、木星デカメータ電波源出現時刻を ± 20 分の精度で示している。既に充分知られていることは木星デカメータ電波のエネルギー源が衛星イオ(Io)と木星の磁場との相互作用によってもたらされる Io-関連電波と、太陽風や木星磁気圏の自転によってもたらされる非 Io 関連電波源、すなわち Non-Io 電波源とに区別されている。A, B 及び C の記号は、木星の中央子午線経度(CML)にして $90^\circ \sim 180^\circ$ に位置する B 電波源、同じく $200^\circ \sim 280^\circ$ に位置する A 電波源、そして $280^\circ \sim 360^\circ$ に位置する C 電波源に対応している。前節で取り上げた図 5 (a)に示される 11 月 21 日 02:08~02:58 (JST) の観測結果は、したがって Non Io-A からの

放射に対応し第5図(b)に示される結果は主としてIo-A電波源からの放射を受信していることになる。これらの電波放射が木星に起源をもつことはまた、東北大学で運用している100km級デカメータ電波干渉計の結果からも確認されている。ここでは、そのデータを掲げることは割愛する。

5. 結論

芦原校地に2点間165mのベースラインをもって開設された宇宙デカメーター電波干渉計は、各点に9素子クロス・ログペリアンテナを配し20MHzから40MHzを受信する能力を備えている。実現している前置増幅器入力段雑音は雑音指数2dBをえて、-135dBmが実現され、-110dBmから-115dBmを示す銀河電波をはじめ、其れを凌駕する木星デカメーター電波を十分受信することが可能となっている。

2001年11月20日より宇宙デカメーター電波受信を開始した。当初は24.00673MHzから、観測に入ったが、予報される木星電波源からの放射を捕らえることが確認された。この確認は165m干渉計出力と木星電波源に対する理論位相変化との対比によって行われた。またそれぞれの結果は、東北大学の運用する100km級デカメーター電波干渉計のデーターとの一致によっても、検証された。銀河電波を十分なレベルで観測していることはまたデーター解析をすすめることによって、今後銀河中心からのブラックホール起源のパルス群の観測も可能であることを示している。

参考文献

- (1) Jansky.K.G.,Electrical disturbances apparently extraterrestrial origin, Proc. IRE,**21**, 1387-1398,1935
- (2) Burke B.F. and K.L.Franklin, Radio emission from Jupiter, Nature, **175**,1074, 1955
- (3) Oya H.,M.Iizima, and A.Morioka, Possible detection of a pulsar of decameter radio waves in the direction of the Galactic center, J. Geomag. Geoelectr.,**41**,331-369, 1989
- (4) Hewish A., S.J. Bell, J. D., H.,Pilkington,P. F. Scott and R. A. Collins, Observation of a rapidly pulsating radio source, Nature, **217**,709, 1968
- (5) Oya H., and M. Iizima, Clusters of super massive black holes in the central region of our Galaxy observed by decameter radio wave pulses: discovery of 24 super massive black holes and their motions, Tohoku Geophys. Journ.(Sci. Rep. Tohoku Univ.,Ser. 5),**35** ,1-78, 1999.

(平成13年12月6日受理)