

## ミリ秒パルサーのタイミング観測

平尾 淳一・河島 信樹・藤本 真克\*  
松田 浩\*・平林 久・宮地 竹史\*・  
御子柴 廣\*・小島 正宣\*\*・丸山 一夫\*\*

(1989年1月10日受理)

## Timing Observations of Millisecond Pulsars

By

J. HIRAO, N. KAWASHIMA, M. FUJIMOTO,  
H. MATSUDA, S. HIRABAYASHI, T. MIYACHI,  
H. MIKOSHIBA, M. KOJIMA and K. MARUYAMA

**Abstract:** Since the discovery of the millisecond pulsar in 1982, Six millisecond pulsars are known to exist. They have extremely small period derivatives and several distinct characteristics. Some of them seem to be useful as time standard. Making use of the timing stabilities, an attempt to detect the cosmic background gravitational radiations has been made elsewhere. We have been considering to make such observations using the deep space tracking telescope in Usuda. Recently we detected the pulse from PSR 1937+21, which is the most promising object for the timing observations. We also estimate the dispersion measure which is in agreement with the previous observations. we are designing a timing equipment to be used in regular observations in the near future.

**Key words:** millisecond pulsar, timing observation, gravitational background radiations, frequency standard

---

\* 国立天文台

\*\* 名大空電研究所

## 概 要

1982年に周期1.6ミリ秒のパルサーが発見されて以来[1], 現在まで周期約10ミリ秒以下のパルサーは6個発見されている。これらのパルサーは減速率が従来のパルサーにくらべて著しく小さいなど際だった性質をしめし, パルサーの進化論にとっても興味深いものがある。また特に周期の安定性に注目し, 背景重力波検出の試み[2][3]もなされている。宇宙科学研究所においても臼田の深宇宙探査用64mアンテナを利用したパルサー観測の可能性を検討し準備を進めてきたが, タイミング観測の対象として最も有力なミリ秒パルサー PSR 1937+21 のパルス成分の検出およびディスパージョンの確認をおこなった。今後, タイミング観測のための機器開発を行い定期的なタイミング観測を続けていきたい。

**重要語:** ミリ秒パルサー, タイミング観測, 背景重力波, 周波数標準

## 1. はじめに

1982年の1.6ミリ秒パルサーの発見[1]をきっかけに, PrincetonやBerkeleyなどのグループがAreciboの300m望遠鏡などをつかって現在までに6個のいわゆるミリ秒パルサーがみついている。表1にその主なパラメータを示す。ここでDMはディスパージョンメジャーを表す。またFlux DensityとPulse Widthはそれぞれ示された受信周波数でのピーク強度およびパルス幅である。

このうちPSR 1821-24とPSR 1937+21以外は連星系をなしている。これらのパルサーは高速回転であり, かつ減速率が多くのパルサーの平均的な値 $10^{-15}$ より3桁以上小さいという著しい性質を持っている。また周期の決定精度からもわかるように非常に安定した回転を示している。この安定性を利用していくつかの応用が考えられ実際に興味深い観測結果がえられている。[9][11]

パルサーの周期安定性をそのまま周波数標準と比較してみると興味深い。ミリ秒パルサー PSR 1937+21 のタイミング観測において, パルスの到着時刻の決定精度は300nsがえられている。考えている時間スケールを $\tau$ (s)とすれば, 周期(周波数)の決定精度は $300 \times 10^{-9}/\tau$ となる。現在までのところ $\tau$ は $2.2 \times 10^7$ sまで達成されているが図1, 2からわかるように, 観測の基準としている地上の原子時計のゆらぎが見え始めている。したがって, これ以上の時間スケールでパルサーの周期がどこまで安定であるかは不明だが, これと同等の安定度をもつパルサーを複数個観測すれば, すなわち実際に他のミリ秒パルサーについても同等の観測データが出そろえば,  $10^7 \sim 10^8$ s以上の時間スケールで, 原子時計を上回る安定な時刻標準「パルサー時刻系」の実現が期待できる。

このような規則正しいパルスが宇宙空間を伝搬してくる間に重力波が存在すればその周波数でパルス周期が変調を受ける。[12]このことから図1, 2はそのまま宇宙に存在する超

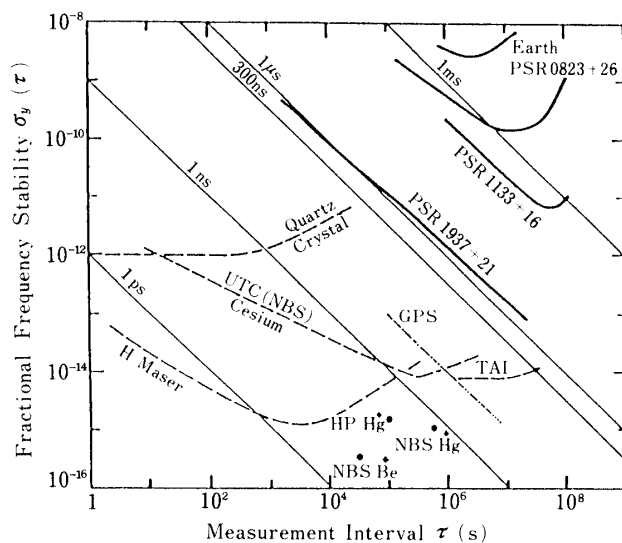


図1 (文献[2]より引用)

周波数の安定度を観測の時間スケールの関数としてプロットしてある。太線がパルサーのタイミング観測による。最新のPSR 1937+21のデータはほぼ300 nsの線上にある。各種原子時計および現在実験されている新しい原子時計の安定度も示してある。GPSによる時刻あわせの精度もあわせてプロットしてある。

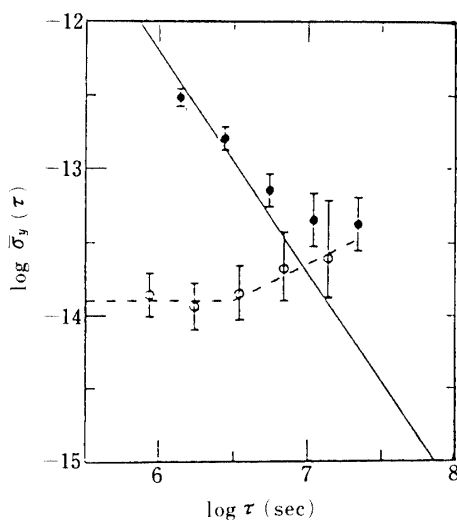


図2 (文献[3]より引用)

PSR 1937+21の最新のタイミング観測データ。黒丸がUTCを基準としたパルサーのタイミング観測データ、白丸はUTCと他の原子時計の比較データを示す。 $\tau < 10^7$  sで安定度は300 nsの白色位相雑音で与えられている。 $10^7$  s付近ではパルサーのデータが原子時計のゆらぎをこえている。これはディスパージョンのゆらぎによるものと考えられている。

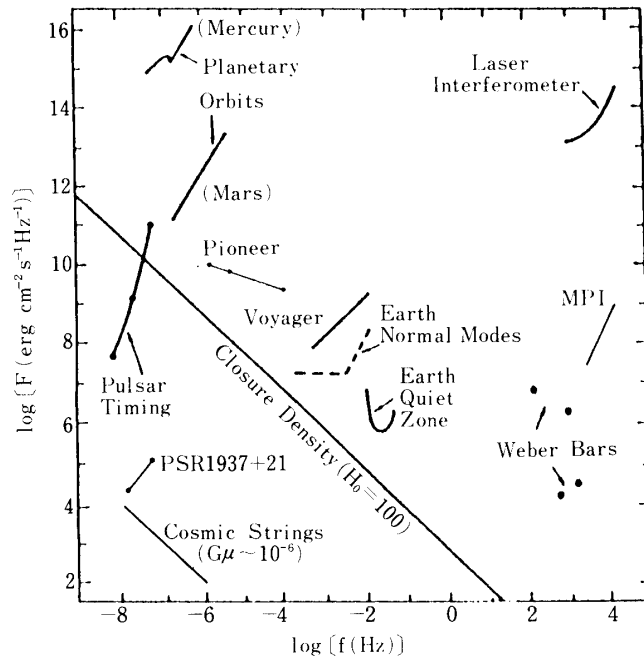


図3 (文献[13]より引用)

重力波にたいする実験的上限. PULSAR TIMING とあるのはミリ秒パルサー発見以前のタイミング観測による. PSR 1937+21 によるデータは, すでに COSMIC STRING 理論にも制限を与えつつある. VOYAGER, PIONEER とあるのは惑星探査機のドップラートラッキングによるマックスプランク研究所のレーザー干渉計の最新データも示してある. (MPL)

低周波の重力波の強度の上限を与えていることになる. これをバンド幅当りのエネルギーフラックス密度であらわしたものが図3である. 図中 PULSAR TIMING とあるのはミリ秒パルサー発見前のタイミング観測によるものである. また PIONEER 10, VOYAGER とあるのは惑星探査機のドップラートラッキングによる上限である. マックスプランク研究所のレーザー干渉計のデータもあわせてプロットした. PSR 1937+21 による上限は  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  Hz の付近でいわゆる closure density (重力波だけで宇宙を閉じさせるのに要するエネルギー密度) より 5~7 桁近く小さい値をしめし, cosmic string 理論[14]にも制限を与えつつある.

## 2. 臼田における予備観測

わが国においてもこうした興味深い観測に参加すべく, 臼田の 64 m アンテナを利用して予備観測を行い, タイミング観測にもっとも有力な PSR 1937+21 のパルス成分の確認をした. 信号の処理のおおまかな様子を図4に示す. 感度  $\Gamma$ , 雑音温度  $T_A$  のアンテナで受信された周波数  $\nu$  の信号は IF 周波数に変換され, 帯域幅  $\Delta\nu$  に帯域制限された後 2 乗検波され, 時定数  $\tau$  で積分される. ここでパルスの検出にとって重要なパラメータはピーク

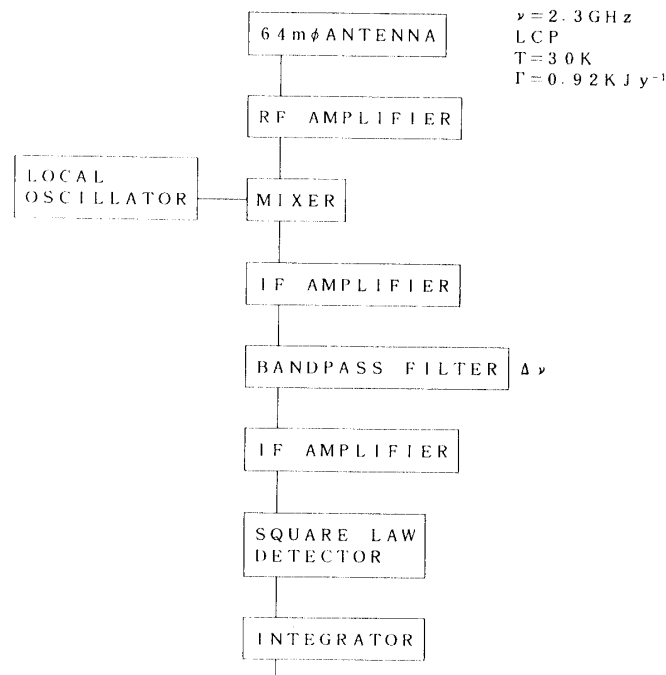


図4 パルサー受信システムのブロック図。システム雑音温度  $T$ 、感度  $\Gamma$ 、受信周波数  $\nu$  は臼田のシステムで決まっている。PSR 1937+21 (ピーク強度  $100 \text{ mJy}$ , パルス幅  $40 \mu\text{s}$ ,  $\text{DM} = 71 \text{ pccm}^{-3}$ ) の受信のために最適化できるパラメータは  $\tau$  と  $\Delta\nu$  である。

強度, パルス幅およびディスパージョンメジャー DM である。すなわち受信系はある一定の雑音をもっているため S/N をかせぐためには帯域を広げる必要があるが, 一方パルサーの電波は星間空間のプラズマによるディスパージョンをもつため帯域を広げすぎるとパルスがひろがってしまい雑音に埋もれてしまう。パルスの検出のためにはディスパージョンによる広がりがパルス幅より小さくしなければならないが, ミリ秒パルサーの場合パルス幅が小さいため帯域を広くとることができない。ここにミリ秒パルサーの検出の難しさがある。

ディスパージョンによる広がりは

$$\delta t = \frac{e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 c m_e} \frac{\Delta\nu}{\nu^3} \cdot \text{DM}$$

とあらわされる。臼田での受信周波数  $\nu = 2.3 \text{ GHz}$ , PSR 1937+21 のディスパージョンメジャー  $\text{DM} = 71 \text{ pc cm}^{-3}$  より  $\delta t / [\mu\text{s}] = 50 \times \Delta\nu / [\text{MHz}]$  となるが, これがパルス幅  $40 \mu\text{s}$  より小さいとして  $\Delta\nu < 1 \text{ MHz}$  となる。また当然  $\tau < 40 \mu\text{s}$  が必要である。これより  $\Delta\nu = 1 \text{ MHz}$ ,  $\tau = 40 \mu\text{s}$  とし, 臼田のアンテナ感度  $0.9 \text{ K Jy}^{-1}$  とするとアンテナ雑音  $T_A = 30 \text{ K}$  に相当する電波強度は

表1

| PULSAR     | RA(1950)  | DEC(1950)    | Period              | dP/dt                                  |
|------------|---|--------------|---------------------|--|
| PSR1620-26 | 16 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup> 34 <sup>s</sup> | -26° 24' 58" | 11.0757508061ms     | 8.2×10 <sup>-19</sup> ss <sup>-1</sup> |
| PSR1821-24 | 18 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup> 27 <sup>s</sup> | -24° 53' 51" | 3.0543144932(6)ms   | 1.6×10 <sup>-18</sup> ss <sup>-1</sup> |
| PSR1855+09 | 18 55 14  | +09 39 13    | 5.362100452367(10)  | 1.7×10 <sup>-20</sup>                  |
| PSR1937+21 | 19 37 29  | +21 28 01    | 1.55780644887275(3) | 1.1×10 <sup>-19</sup>                  |
| PSR1953+29 | 19 53 27  | +29 00 44    | 6.133166488729(9)   | 3.0×10 <sup>-20</sup>                  |
| PSR1957+20 | 19 57 10  | +20 40       | 1.60740171(3)       |  |

| PULSAR     | DM                      | Flux Density | Pulse Width       | Ref       |
|------------|-------------------------|--------------|-------------------|-----------|
| PSR1620-26 | 62.9cm <sup>-3</sup> pc | 15mJy        | 1000μs(430MHz)    | [15]      |
| PSR1821-24 | 120cm <sup>-3</sup> pc  | 6+ 3mJy      | 200+200μs(1.4GHz) | [4]       |
| PSR1855+09 | 13.3                    | 180+ 50      | 500+600 (1.4)     | [5]       |
| PSR1937+21 | 71.0                    | 100          | 43 (2.4)          | [3][6]    |
| PSR1953+29 | 105                     |              | 600+900 (1.4)     | [7][8][9] |
| PSR1957+20 | 29.1                    | 25           | 50 (430MHz)       | [10]      |

これまでに発見されているミリ秒パルサー。赤経、赤緯、パルス周期、減速率、ディスパージョンメジャー、ピークの電波強度、ピークの幅および主たる文献をあげた。電波強度、ピーク幅はそれぞれ示された受信周波数での値である。他の周波数においても観測されている。数値が2つ記されているのはピークが2つあるものである。電波強度は変動が大きく与えられている値はひとつの目安である。

$$\Delta S = \frac{1}{\Gamma} \frac{T_A}{\sqrt{\Delta\nu\tau}} = 5 \text{ Jy} \gg 100 \text{ mJy}$$

となってしまう。この問題を解決する方法は2つある。ひとつは信号の周期性を利用してアベレージをする方法、もうひとつはフィルターバンクによって信号をいくつかの周波数帯に分け、各バンドでディスパージョンによる遅れを補正したし合わせる方法である。

白田においてはこれらの方法をつかって、図5に示したシステムで受信した。アンテナで受信した2280 MHz左旋円偏波は400 MHzの1Fに変換し、中心周波数が500 kHzずつことなる4チャンネルのバンドパスフィルター（バンド幅500 kHz）を通過後2乗検波し、 $\tau=60\mu\text{s}$ で積分する。こうしてえられた信号は2チャンネル毎にアナログ遅延素子をつかって遅延時間の補正をおこないたいしあわせる。たいし合わされた2チャンネルの信号はデジタルアベレージャーでコヒーレントに4096回平均されたのちパーソナルコンピュータにとりこまれ、フロッピーディスクに記録される。この操作でえられた約2時間分のデータをオフラインで処理する。

オフライン処理ではまず2つのチャンネル間のディスパージョンの補正をおこなう。次に地球の軌道運動によるドップラーシフトの除去をおこなう。観測の間パルサーの周期は一定とみなしていたが、2時間の間にはドップラーシフトの大きさが $10^{-6}$ 程度変化するため取り込まれたデータ間の位相を補正してやらなければならない。こうした後に2時間分

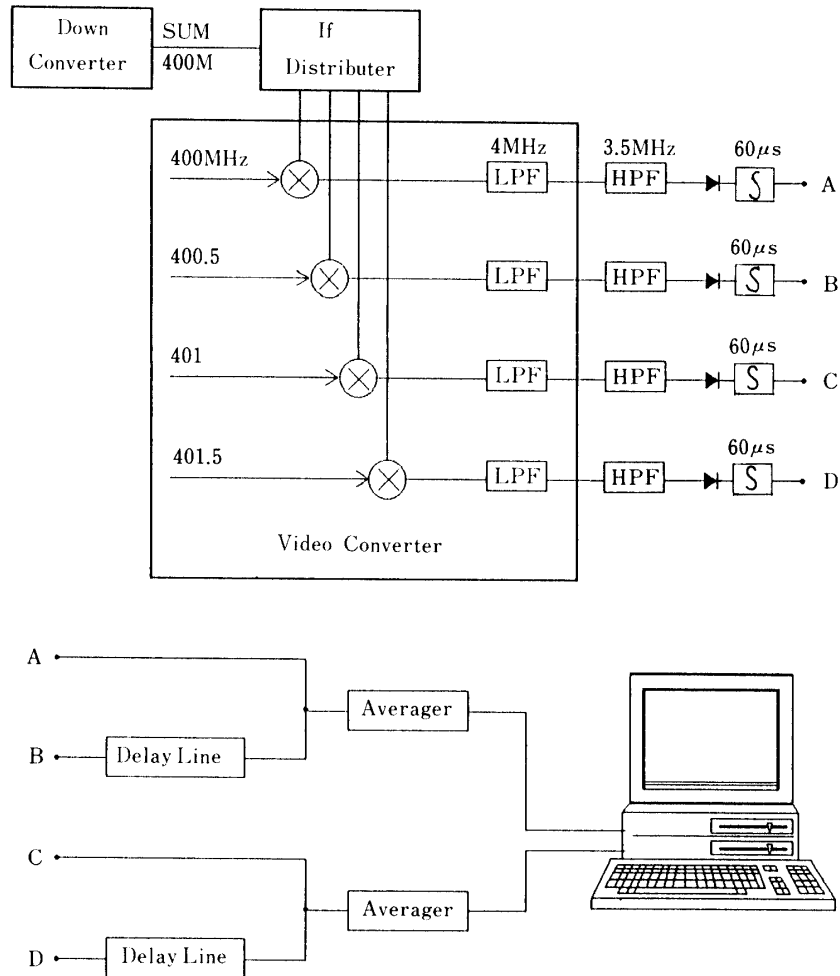


図5 臼田における予備観測で使用したシステム。2280 MHzの左円偏波を1880 MHzの局発と混合して400 MHzの信号をとりだし、VLBI用のK-3のフィルターバンクを使って4チャンネルで2乗検波する。積分時間は $60\mu\text{s}$ である。1チャンネルおきにアナログ遅延線で遅延補正をしたのち2チャンネルずつたし合わせ、アベレージャーであらかじめ計算された周期に同期して平均をとる。4096回の平均波形はマイクロコンピュータにとりこまれ、フロッピーディスクに記録される。記録された2チャンネルのデータは観測期間のドップラーシフトの変化とディスプレイに遅延を補正し、約2時間分の全データの平均をとる。

のデータを平均し、さらにチャンネル間でたしあわせる。

このようにしてえられた波形を図6, 7に示した。図6-1はパーソナルコンピュータにとりこまれた4096パルスの平均波形、図6-2, 6-3はそれぞれオフライン処理中の $4096 \times 10$ パルス、 $4096 \times 100$ パルスの平均波形である。図7はコンピュータ上で2チャンネルをたし

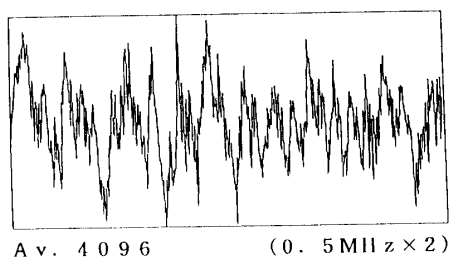


図6-1

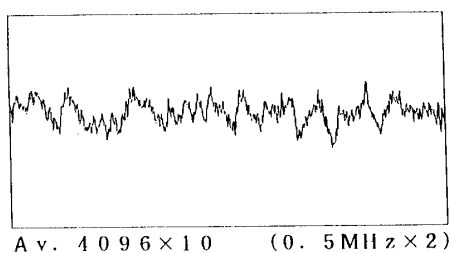


図6-2

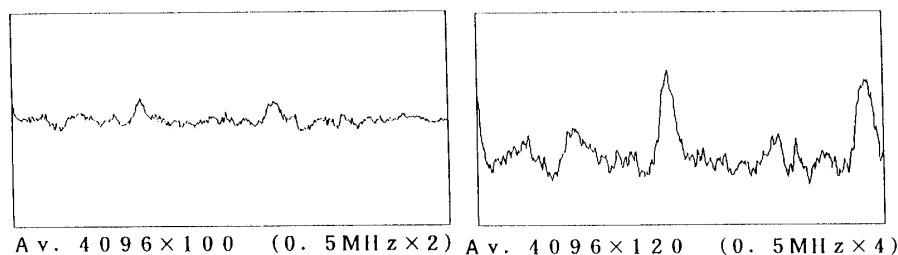


図6 白田での観測波形。図6-1；バンド幅500 kHzのデータ2チャンネル分をたし合わせリアルタイムで4096回平均をとったもの。図6-2, 3；さらにオフライン処理で平均回数を4096×10, 4096×100としたもの。図6-4；スケールをかえてパルスを見やすくした。

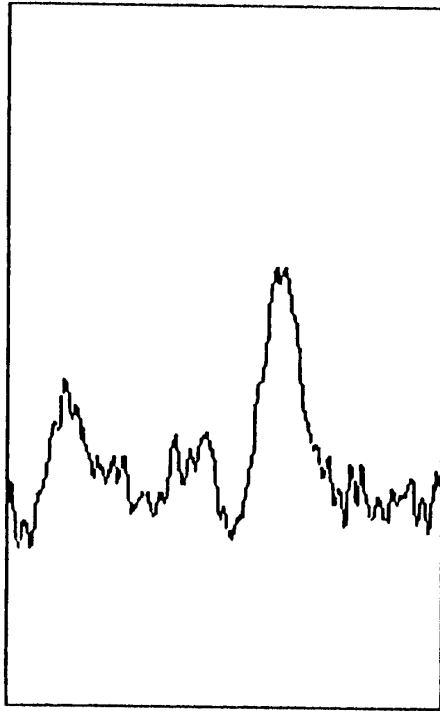
あわせ、2時間分の全チャンネルのデータ4096×200パルスを平均したものである。また図には示していないがコンピュータに入力された2つのチャンネル間での位相差からDM~70が確認された。

最終的にえられたパルス波形は100 $\mu$ s以上に広がっているがこれはオンラインでの4096パルスの平均中のドップラーシフトによるもの(20 $\mu$ s), オンライン処理でのドップラー補正誤差(60 $\mu$ s), 1チャンネルの帯域内での遅延偏差(25 $\mu$ s), 不適当なアナログ遅延素子の遅延時間によるもの(15 $\mu$ s), 積分フィルタの時定数によるもの(60 $\mu$ s)が考えられる。

### 3. 今後の課題

今回の観測はあくまで既存のシステムによる予備観測であり、えられた波形をみてもわかるように最適な状態で観測をしたわけではない。今後本格的な観測にむけてディスパージョン除去システム(ディ・ディスパーザー)、時刻装置およびこれにともなう解析ソフト





Av. 4096 × 200 (0.5 MHz × 4)

図7 バンド幅 500 kHz のデータ 4 チャンネルを 4096 × 200 回平均した波形。観測に要した時間は約 100 分である。メインのパルスから位相が 180° 離れたところにもう 1 つのピークが確認できる。パルスが広がっているのは主としてドップラーシフトの変化による。

ウェアの開発が必要である。

はじめに示したタイミング観測のためには受信局におけるパルス到着時刻  $T$  からパルサーの基準系における固有時  $t$  に変換しなければならない。この中には受信局の局内時計から UTC への変換、分散によるおくれ、相対論的な効果、受信局での到着時刻から太陽系重心での到着時刻への変換がふくまれる。こうしてえられた到着時刻  $t$  の関数としてパルサーの回転位相  $\phi$  をあらわし、観測にフィットして正確な周期および減速率を求め、観測された到着時刻のモデルからのずれを評価することができるのである。

$$\phi(t) = \phi_0 + \nu_{rot} t + \frac{1}{2} \dot{\nu}_{rot} t^2$$

#### 4. 将来の展望

Arecibo の 300 m 望遠鏡による PSR 1937+21 の観測はすでに 4 年以上続けられており、他のパルサーについても発見以来継続的に観測が続けられている。わが国においても

早急に観測体制を整えることが望まれる。タイミング観測を行う観測所が増えることによって、時刻標準としてのミリ秒パルサーにも現実味を帯びてくるだろう。

また、より精度の高い今後の観測にはディスパージョンの除去が重要になってくる。パルサーからの電波強度は周波数と共に急速に弱まるので高い周波数での観測は積分時間を要するが、来年度から臼田に設置される X バンドでの観測が可能になればディスパージョンの変動に左右されないタイミング観測に役にたつかも知れない。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] D. C. Backer, S. R. Kulkarni, C. Heiles, M. M. Davis and W. M. Goss : Nature **300** (1982), 615.
- [ 2 ] M. M. Davis, J. H. Taylor, J. M. Weisberg and D. C. Backer : Nature **315** (1985), 547.
- [ 3 ] L. A. Rawley, J. H. Taylor, M. M. Davis and D. W. Allan : Science **238** (1987), 761.
- [ 4 ] A. G. Lyne, A. Brinklow, J. Middleditch, S. R. Kulkarni, D. C. Backer and T. R. Clifton : Nature **328** (1987), 399.
- [ 5 ] D. J. Segelstein, L. A. Rawley, D. R. Stinebring, A. S. Fruchter and J. H. Taylor : Nature **322** (1986), 714.
- [ 6 ] D. R. Stinebring : Nature **302** (1983), 690.
- [ 7 ] V. Boriakoff, R. Buccheri and F. Fauci : Nature **304** (1983), 417.
- [ 8 ] L. A. Rawley, J. H. Taylor and M. M. Davis : Nature **319** (1986), 383.
- [ 9 ] L. A. Rawley, J. H. Taylor and M. M. Davis : Astrophys. J. **326** (1988), 947.
- [ 10 ] A. S. Fruchter, D. R. Stinebring and J. H. Taylor : Nature **333** (1988), 237.
- [ 11 ] J. M. Cordes, A. Pidwerbetsky and R. V. E. Lovelace : Astrophys. J. **310** (1986), 737, J. M. Cordes : Astrophys. J. **311** (1986), 183.
- [ 12 ] B. Bertotti, B. J. Carr and M. J. Rees : Mon. Not. astr. Soc. **203** (1983), 945.
- [ 13 ] R. W. Romani and J. H. Taylor : Astrophys. J. **265** (1983), L 35.
- [ 14 ] C. J. Hogan and M. J. Rees : Nature **311** (1984), 109.
- [ 15 ] A. G. Lyne, J. D. Biggs, A. Brinklow, M. Ashwarth and J. McKenna : Nature **332** (1988), 45.