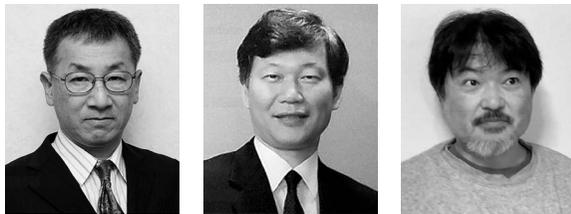


アマチュア無線技術を用いたパルサー観測



矢口徳之¹・臼居隆志¹・
横川英彰¹・吉田英人²・寺澤敏夫³・浅山信一郎⁴

〈¹ 日本流星研究会〉

〈² 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈³ 東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

〈⁴ SKA Observatory, Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK〉

これまで電波パルサーの観測は大規模な施設が必要なためアマチュアでは観測困難であると考えられてきた。ネット通販等で誰でも安価（～数千円）に入手可能なソフトウェア無線（SDR）受信機を用い、アマチュア無線家と天文学研究者がタッグを組みパルサーの受信に成功した本邦初の結果を報告する。SDRを用いたパルサー観測は、教育研究機関や科学館等での実習課題や広報普及活動にも活用できるだろう。

1. はじめに

パルサーは恒星の超新星爆発によって誕生した高密度の中性子星のうち、パルス状の電磁波（光、電波、X線など）が観測される天体である。電波領域においては、パルサー観測には数百MHz～数GHzが適しており、より高周波では周波数とともに急激に強度が低下する。

太陽以外の宇宙電波は微弱なため、宇宙電波観測には通常大型のアンテナを必要とする。日本におけるパルサー観測は、鹿島26 mならびに34 mや、臼田64 mなどの大型電波望遠鏡を使って1980年代に始められた。パルサーの検出には大口径のアンテナ、高感度な検出器および複雑な計算処理の他、観測データを保存する大容量のストレージが必要なため、長らくアマチュア電波天文学家によるパルサーの検出は極めて困難であると考えられてきた。しかし近年の情報通信技術革命はこの状況を一変した。安価で高性能な低雑音増幅器（LNA: Low-Noise-Amplifier）、USBベースの

ソフトウェア無線（SDR: Software Defined Radio）受信機の普及、及び記録容量の増大により、海外のアマチュア電波天文学家によるパルサー検出が報告されている [1-5]。

日本におけるアマチュア無線家による天体現象観測として、流星痕プラズマによる電波エコーの観測 [6] は、アマチュア無線・連続送信波のエコー受信法（HRO: Ham-band Radio Observation）を用いて広く一般に普及している [7-9]。また学部学生実習の一環としてHROを利用し流星ベクトルを求める多地点流星電波エコー観測は2004年以来実施されている [10-13]。

今回、日本のアマチュア無線家と天文学研究者との共同プロジェクトとして、月面反射通信アンテナとSDR受信機を用いたパルサー観測システムを実現し、北天で観測できる最も明るい電波パルサー（PSR B0329+54）の検出に成功したのでここに報告する。

2. 観測装置

図1に観測システムのブロック図を示す。月面反射通信とは、地上の各々の無線局が月にアンテナを向け電波を発射し、その反射を利用して行う無線通信である。月面の反射係数が非常に低く、そして往復約77万km以上の経路損失があるため、スタックした八木アンテナまたはパラボラアンテナなどの高利得かつ指向性の高いアンテナが必要となる。今回我々が観測に用いた月面反射通信設備は長野県にて運用されており、M2 Antenna Systems

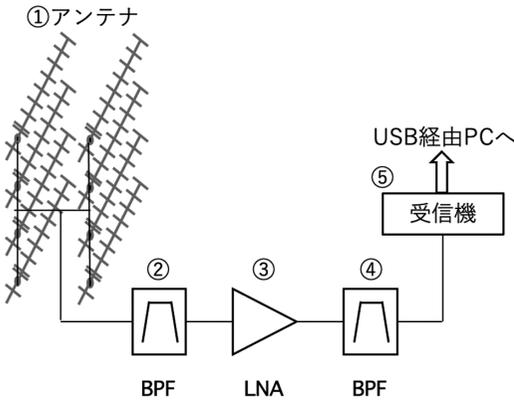


図1 観測システムブロックダイアグラム。
 ① 月面反射通信アンテナ, ② BPF (350–500 MHz), ③ LNA (Gain=23 dB, NF=0.6 dB), ④ 自作インターデジタル BPF ($f_c=418$ MHz, BW=5 MHz), ⑤ SDR 受信機 ($f_c=418$ MHz, BW=2.4 MHz).



図2 月面反射通信アンテナ。

社製八木アンテナ (432-9WLA: 420–440 MHz [14]) を8本スタックしたものである (図2)。

現代社会は携帯電話、無線LANなど電波を使ったサービスがあふれており、街の光で星空が見えにくくなってしまいうように、我々が利用する電波が宇宙からの微弱な信号を覆い隠してしまう [15]. そのためまず最初に、観測地点においてRFI (Radio Frequency Interference) モニタリング観測を行った。図3に400–440 MHz帯におけるRFI測定結果を示す。415 MHz以下および420 MHz以上の帯域ではRFI信号が大きいことが判明したため、アンテナの仕様周波数帯域外ではあるが、418 MHzを観測周波数として採用することとした。

432-9WLAのゲインは19.44 dBiであり、8本結合なので+9.03 dB ($=10 \log_{10}8$) となり合計理論値は28.47 dBiである。しかし我々のパルサー観測ではRFIを避けるために、アンテナの仕様周波数帯域外の418 MHzでの受信を行うこと、またケーブルやアンテナ合成ロス、スタック間隔によって実際のゲインは23 dBi程度となっている。水平方向4本で垂直方向2本にスタックしており、実測によるビームサイズは水平方向 \sim 4度、垂直方向 \sim 11度である。アンテナ実効面積 A_e はそのアンテナの利得を G_a 、波長 λ として公式 $A_e = \lambda^2 G_a / 4\pi$ [16] から、ゲイン23 dBiの場合には 8.1 m^2 となる。

この月面反射通信アンテナによって試験観測を行ったところ、アンテナに隣接する移動体基地局からの700–1000 MHz帯域の大きな信号がLNAを飽和させ観測ができないことが判明した。初段のLNA前の損失はそのままの雑音指数 (Noise Figure: NF) の悪化になるため、アンテナ入力から初段アンプまでの損失はできる限り小さくする必要がある。所有しているフィルタの中でこの目的を満たすものを検討したところ、コメット社トリプレクサCFX-4310のMIDバンド (350–500 MHz) が、挿入損失0.25 dBと最も低損失であったため、これをアンテナとLNAの間にBPF

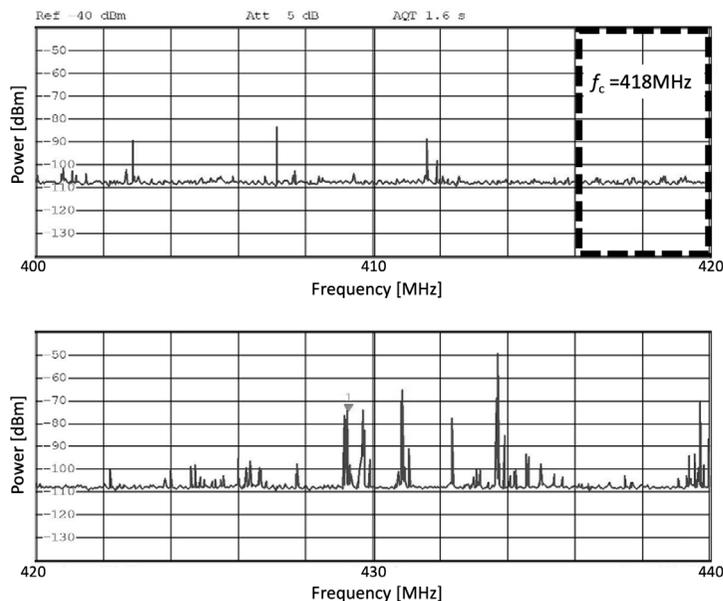


図3 400-440 MHz帯でのRFI測定結果.

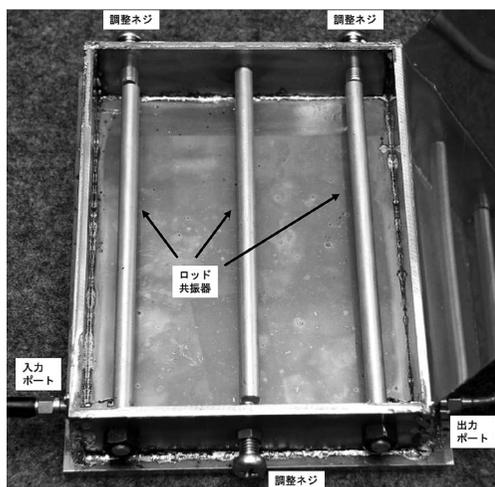


図4 インターデジタルBPFの内部写真.

(Band Pass Filter)として挿入し、観測帯域外の信号を抑制した。LNAはネット通販等で安価に入手できるSPF5189Zで、ゲイン~23 dBおよびNF~0.6 dBである。

さて、アンテナからの受信信号はLNAの後、BPFに入れるが、RFI対策のために、SDR受信機前のBPFの特性は非常に重要となるので、高

性能なインターデジタルBPFを自作した。BPFはオンライン設計ツール [17] を用い、中心周波数 (f_c) = 418 MHz, 帯域幅 (BW) = 5 MHzで設計した。図4に自作したフィルタの内部写真を示す。底面は銅板で、横板として真鍮板 (4 mm厚) をホットプレートを用いてはんだ付けして接合している。共振器部のロッドはアルミ棒を用いており、M8の雄ネジ加工を施し側板にねじ込んで固定している。また微調整のためにロッドの対面に調整ネジを導入している。高周波回路をケースに収めるとバラック実験の性能が再現しないことはよくあるので、上蓋はねじ止め等ではなくアルミ板をクランプで締め付けることにし、容易に蓋を開けて再調整等が行いやすい設計としている。図5にネットワークアナライザで測定したBPFの電力通過特性を示す。図5で確認できるように、中心周波数での挿入損失が1 dB, 3 dB帯域幅5 MHzと非常に狭帯域かつ急峻なスカート特性のBPFを実現することができた。

BPFの次に接続するSDR受信機として、RTL-SDR Blog V3 [18] を使用した。さらにgqrx [19]

表1 受信機雑音温度算出結果.

	ゲイン [dB]	NF [dB]	単体雑音温度 [K]	積算雑音温度 [K]
ケーブル損失	-0.10	0.10	7.0	7.0
BPF	-0.25	0.26	17.8	25.2
LNA	23.00	0.60	43.0	71.8
BPF	-1.00	1.03	77.7	72.2
SDR	—	12.0	3200.0	94.1
Total=				94.1 [K]

という GUI 付きの SDR ソフトウェアを用い、2.4 MHz でサンプリングし周波数帯域 418 ± 1.2 MHz の電圧データを単精度浮動小数点複素数 (実部・虚部がそれぞれ 32 ビット = 4 バイト、すなわち 1 複素数あたり 64 ビット = 8 バイト) によりハードディスクに書き出している。データの
高次処理の方法については後述する。

この受信機の雑音は 94.1 K 程度と見積もられ

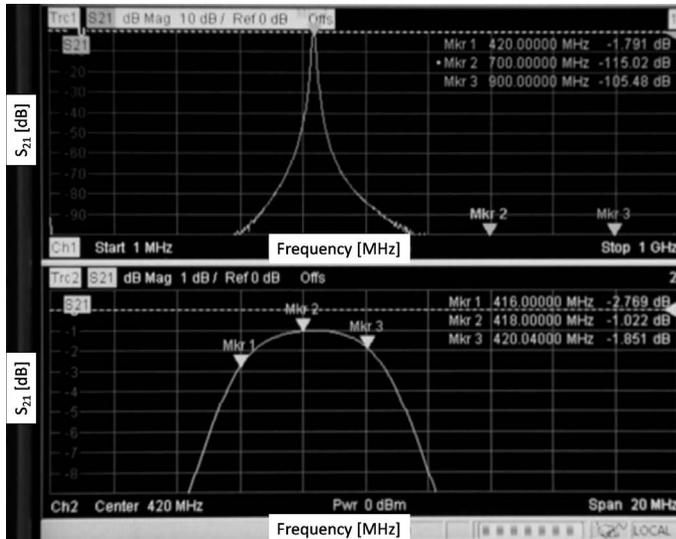


図5 インターデジタルBPFの測定結果. 上段は広帯域 (1 MHz-1 GHz), 下段は狭帯域 (410-430 MHz) での透過特性.

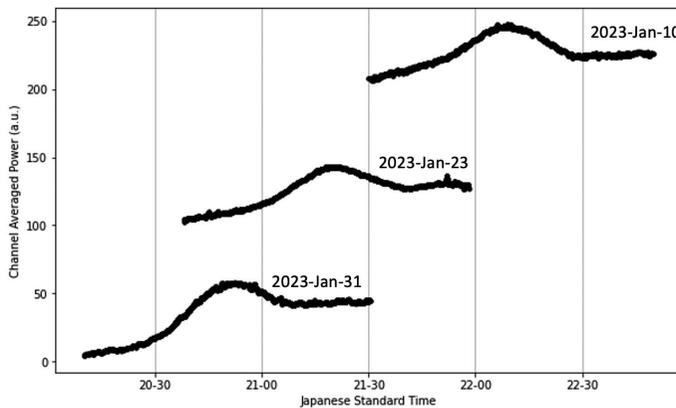


図6 TauAの待受観測結果. 縦軸は電圧自乗値を任意目盛りで示す. グラフが重ならないようにシフトしてあり、縦軸の絶対値は意味がない.

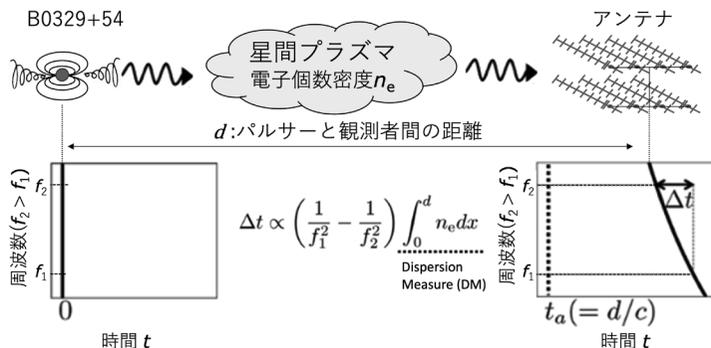


図7 星間プラズマ中のパルサー信号の伝搬の概略図. 時刻 $t_a (=d/c)$ は, 真空中の光速 c の群速度を持つ電波が観測者に到着する時刻. 周波数が低いほど観測者に到着する時刻が遅れることになる. 異なる2つの周波数 f_1 と f_2 の時間差 Δt から DM が得られる.

ている. 表1にその算出根拠を示す. LNAの利得が200倍 (23 dB = 10 log₁₀200) なので, LNA以降の雑音の増加分は1/200しか影響していない. ところで, 実際の観測に現れる雑音レベルの推定には上の受信機雑音94.1 Kだけでなく, 大気雑音1.2 K, 宇宙背景放射2.7 K, 銀河面放射23.3 K, それにアンテナ後方やサイドローブから入ってくる地面等からの雑音~15 Kの寄与を加えなければならぬ. これらを合計した~143 Kはシステム雑音温度 T_{sys} と呼ばれ, 後程パルサーの検出感度計算に用いる.

ここで銀河面放射 T_{gal} (主に宇宙線電子成分からのシンクロトロン放射) の推定には, $T_{gal} = T_{408} (0.408/\nu_{GHz})^{2.75}$ を用い, $T_{408} = 17.1[K]$ にて, 観測周波数 $\nu_{GHz} = 418$ MHzにおける値を算出した [20]. また大気放射の寄与は, CASA (Common Astronomy Software Applications) [21] に実装されている ATM (Atmospheric Transmission at Microwaves) コード [22] を用いて算出した.

3. 性能評価試験

システム検証観測として, まず太陽電波(サンノイズ)観測を行った. 観測後, 記録された生電圧データを検波して電圧自乗値を作り, その1秒平均値の時系列データから太陽面に向けたとき

外したときのレベル変化が10倍程度と期待通りの応答が得られることを確認した. 次に, 非常に強い電波天体おうし座A電波源 (TauA) の待ち受け観測, すなわち, 南に向けたアンテナの仰角をTauAの南中高度に固定しておき, TauAが通り過ぎる間の連続観測を行った. ここで, 我々の月面反射通信装置のビームサイズは水平方向に~4度くらいのため, 観測は南中予想時刻を中心として1時間半程度行った. データ処理は太陽と同様に行い, 処理結果の電圧自乗値1秒平均値の変化を図6に示す. 予想時刻に強度ピークが検出され, そのピーク時刻は1日あたり約4分早まっていった (地球の年周運動効果). 図6にその結果を示す. これにより, TauA検出が確認された.

性能検証試験中に, 約1秒周期の非常に大きなRFIが存在することが判明した. このRFIはアンテナの近郊の畑に設置された防獣用電気柵での絶縁不良による放電に起因することが突き止められた [23]. 畑に入るための絶縁フックの部分でスパークしている箇所が見つかったので, ジャンパーを作ってバイパスすることでRFI発生を抑制することができた. しかし電気柵は広範囲に設置されており完全に発生を止めることはできていないため, 電気柵からのRFIはデータ解析の際にマスク処理することで対応している. また観測日に

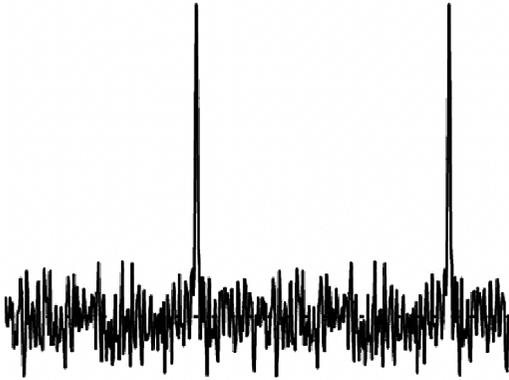


図8 2023年3月11日の観測データからPRESTOで検出したB0329+54のパルス信号。1周期を2回繰り返して表示しているので2本のピークが見えている。得られたパルス周期は714.5794 msであった。

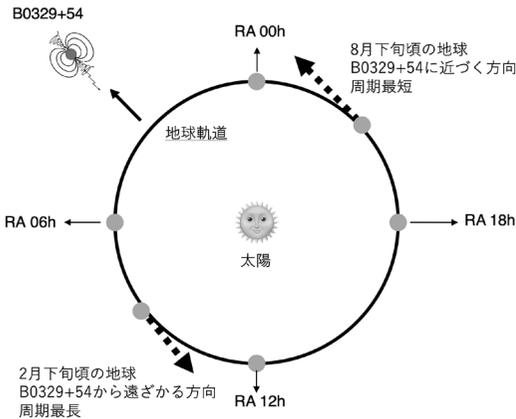


図9 B0329+54と地球および太陽の位置関係の季節変化。2月から3月ころは地球の公転運動がパルサーから遠ざかる向きなので、ドップラー効果により「赤方偏移」を受けパルス周期が延びる。遠ざかる方向は2月25日にB0329+54と正反対となり観測されるパルス周期の極大を迎える。

よってRFIの頻度や強度は変動しており、人間活動に起因する60 Hzとその高調波ノイズ、ならびに低周波から高周波まで続く連続的なRFIが混入し、天体信号が検出できない日もある。RFIに關しては更なる調査と対策が必要である。

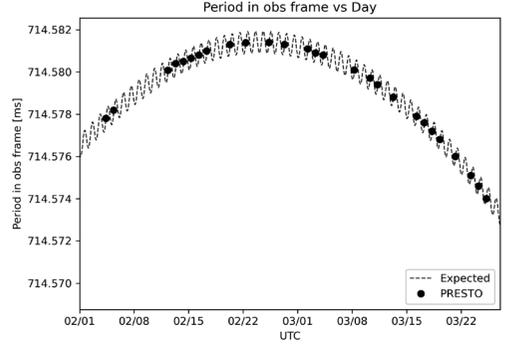


図10 B0329+54のパルス周期の変化。観測値を●で、予想値を破線で示す。観測はほぼ毎日行ったが、RFIが酷くパルスが検出できない日もあり、●が抜けている。

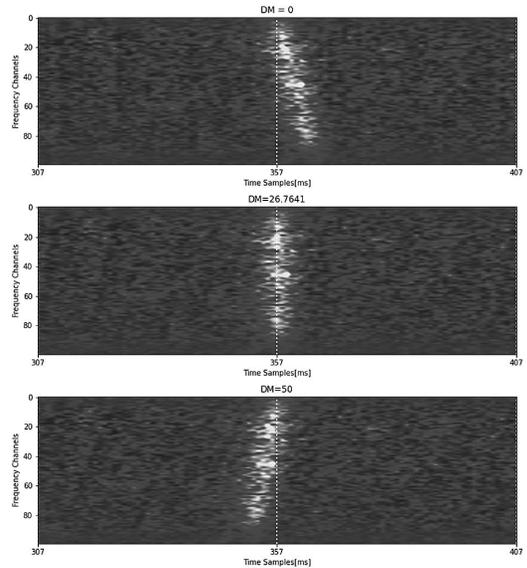


図11 B0329+54のDMの確認。2023/03/10以降でパルスが明瞭に検出された10日分の積分結果で、最上段DM=0（過少）、中段DM=26.7641（正解）、最下段DM=50（過大）と、解析に用いたDM値を変えている。中段では周波数ごとのパルスのピーク（図の白い部分）が縦に整列しているが、最上段では周波数が低いほど遅れがみられる。一方、最下段では補正し過ぎで、周波数が低いほど到着時刻の進みが見られる。

4. パルサー（B0329+54）観測

TauA 検出の確認後に、北天で一番明るいパル

サー B0329+54の観測を行った。一般にパルサーの検出感度は次式で表される [24] :

$$SNR = \frac{S_p A_e \sqrt{n_p t_{int} \Delta f}}{2k_b T_{sys}} \sqrt{\frac{P-W}{W}}$$

上式に現れるパラメタの意味と、B0329+54の場合の値は次のようである:

S_p : パルサーの平均フラックス = 1.5 Jy

(400 MHz 帯の値)

A_e : アンテナ実効面積 = 8.2 m²

n_p : 観測する偏波の数 = 1

t_{int} : 観測総積分時間 [s]

Δf : 観測帯域幅 = 2.4 × 10⁶ Hz

P : パルス周期 = 714.52 ms

W : 観測パルスの半値幅 = 6.6 ms

k_b : ボルツマン定数 = 1.38 × 10⁻²³ J/K

T_{sys} : システム雑音温度 = 143.4 K

(S_p, P, W は [25] による.)

これより、観測総積分時間 $t_{int}=1000$ 秒とすれば SNR~16程度が期待される。実際の観測では星間空間シンチレーションなどに起因するパルサー強度変動やRFIがあるため、マージン込みでSNR>10が必要であると言われており、本システムはこの要件を満たしている。

図7に示すように、パルサーから発せられた信号は星間空間を伝搬する際、周波数の逆自乗と星間空間プラズマ内自由電子密度の視線方向積分値の積に比例した遅延を受けている [26]。パルサーの検出にはこの遅延の補正が必要であり、群遅延補正 (De-dispersion) 手続きと呼ばれる。電子密度の視線方向積分量は Dispersion Measure (DM) とよばれ、距離 1 pc に渡って電子密度が 1 cm⁻³ である場合の積分量 3.09 × 10¹⁸ cm⁻² を単位 (cm⁻³ pc) として測る習慣がある。この単位により、B0329+54 の DM は 26.7641 cm⁻³ pc となることが知られている。

群遅延補正後、さらに信号を周期ごとに分割し

畳み込む (Folding) ことで、パルス部分を足し合わせて鋭くし、ノイズ部分は打ち消し合わせて小さくする処理が必要で、国際標準のソフトウェア PRESTO [27] を用いた。まず、観測データから 1 ms ごとのパワースペクトラムを作り、さらにソフトウェアパッケージ YOUR [28] を用いて PSRFITS 形式に変換してから PRESTO に渡す。その処理結果の一例を図8に示す。図8に得られたパルスは本物であろうか? B0329+54 の本来のパルス周期は 714.52 ms ほどなのだが、地球の運動によるドップラー効果を受け、観測される周期はゆっくりとした季節変化 (公転運動による) と日変化 (自転運動による) を示す (図9)。2月初めから3月中旬に渡って観測されたパルス周期の日変化を示したのが図10であり、観測値 (●) は破線で示した予想値とよく一致しており、パルスが本物であることの証拠となっている。

さらに図11には、解析で用いる DM 値をわざと狂わせて解析を行った結果を正しい結果 (中段) と比べてある。これらの結果はパルサーの特徴を捉えており、得られたパルスはパルサーのものであることを支持している。以上のことからアマチュア無線設備を用いたパルサー観測に本邦で初めて成功したことを確認した。

5. おわりに

今回のパルサー検出は、情報通信技術全般の発展により実現したものである。長野、東京、イギリスと地理的に離れたメンバーが、一度も対面することなくオンライン会議のみで観測システム検討やRFI対応などのトラブルシューティングを行い、1日あたり数十GBに達する観測データをクラウドストレージで共有し、試験観測開始から2ヵ月ほどでパルサー検出まで漕ぎ着けた。このようなことは、アマチュア無線家に電波天文学が紹介された時代 [29] では考えられなかったことで感慨深い。

一方で技術の進歩により、最近ではアマチュア無

線コミュニティも様変わりしてきており、SDR受信機のように無線装置の高度化およびパッケージ化が進み、自作で無線機を組み立てて運用する技術的内容の楽しみから無線通信そのものを楽しむという方向にシフトしてきている。今回のパルサー検出例のように、システムを自分たちで検討し必要なものは自作することで、「こんな事もできるんだ!」というアマチュア無線家の原点に立ち返った楽しみや喜びを若い世代にも繋げられればという期待を新たにしている。

今後広報教育活動の題材としていくために、組立てや取り扱いが容易なアンテナでのパルサー検出や、観測および解析ソフトのパッケージ化に取り組む予定である。

参考文献

[1] McKnight, R., & van Graas, F., 2022, Proceedings of International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 856
 [2] <http://neutronstar.joataman.net> (2023.4.13)
 [3] <http://iw5bhy.altervista.org> (2023.4.13)
 [4] <https://www.qsl.net/oe5jfl/pulsar/pulsar.htm> (2023.4.13)
 [5] Herrmann, W., 2020, Journal of the Society of Amateur Radio Astronomers, 60
 [6] McKinley, D. W. R., 1961, Meteor Science and Engineering, (McGraw-Hill, New York)
 [7] Maegawa, K., 1999, WGN, Journal of the International Meteor Organization, 27, 64
 [8] RMG編集委員会, 中村卓司監修, 2002, 流星電波観測ガイドブック, CQハンドブックシリーズ (CQ出版)
 [9] 白居隆志, 2010, アマチュア無線の設備を用いた流星電波観測, JARLNEWS 2010年 夏号 (日本アマチュア無線連盟)
 [10] 寺澤敏夫他, 2006, 第25回生存圏シンポジウム第10回生存圏波動分科会
 [11] Yoshida, H., et al., 2012, Asteroids, Comets, Meteors, 6187
 [12] 吉田英人他, 2017a, 日本天文学会2017年春季年会
 [13] 吉田英人他, 2017b, 2017年度日本物理学会第72回年次大会
 [14] <https://www.m2inc.com/FG4329WL> (2023.4.13)
 [15] <https://prc.nao.ac.jp/freqras/images/Freq.pdf> (2023.4.13)
 [16] 藤本京平, 2007, 入門電波応用 第2版 (共立出版)

[17] https://www.changpuak.ch/electronics/interdigital_bandpass_filter_designer.php (2023.4.13)
 [18] <https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2018/02/RTL-SDR-Blog-V3-Datasheet.pdf> (2023.4.13)
 [19] <https://gqrx.dk/> (2023.4.13)
 [20] Braun, R., et al., 2019, arXiv preprint arXiv:1912.12699
 [21] McMullin, J. P., et al., 2007, 376, 127
 [22] Pardo, J. R., et al., 2001, IEEE Trans. Antennas Propagation, 49, 1683
 [23] <https://www.gb.nrao.edu/IPG/Fence.shtml> (2023.4.13)
 [24] Lorimer, D. R., & Kramer, M., 2005, Handbook of Pulsar Astronomy, 4 (Cambridge University Press)
 [25] Kramer, M., et al., 2003, Astron. Astrophys., 407, 655
 [26] 木坂将大, 2014, 日本物理学会誌, 69, 600
 [27] Ransom, S., 2011, Astrophysics Source Code Library
 [28] Aggarwal, K., et al., 2020, Journal of Open Source Software, 5, 2750
 [29] 平林 久, 1987, アマチュアにもできる電波天文, HAM Journal, 第49号 (CQ出版)

Japanese Amateur Pulsar Observations

Noriyuki YAGUCHI¹, Takashi USUI¹,
 Hideaki YOKOKAWA¹, Hideto YOSHIDA²
 Toshio TERASAWA³, Shin'ichiro ASAYAMA⁴

¹*Nippon Meteor Society, Japan*

²*The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

³*The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa city, Chiba 277-8563, Japan*

⁴*SKA Observatory (SKAO), Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK*

Abstract: Recent advancement in Information and communications technology (ICT) has enabled amateur radio astronomers to observe pulsars. We detected the brightest radio pulsar visible in the northern sky (PSR B0329+54) using an Earth-Moon-Earth (EME) communication system with an SDR receiver as a collaborative activity between the amateur radio and radio astronomy communities in Japan. Pulsar observation with SDR could be useful for outreach activities.