

令和2年度学内公募研究（萌芽型）
〔研究論文〕

飯舘惑星電波望遠鏡用広帯域ログペリオディックアンテナの開発

北 元¹⁾, 三澤 浩昭²⁾

Development of wide-band log-periodic dipole array antenna for Iitate Planetary Radio Telescope

Hajime KITA¹⁾, Hiroaki MISAWA²⁾

Abstract

Low-frequency radio emissions from the sun and planets are of great use for space weather and exoplanet exploration. We developed 80 ~ 160MHz log-periodic dipole array antenna (LPDA) for Iitate Planetary Radio Telescope (IPRT). First, we measure the SWR of the previously made LPDA, which is designed as SWR is less than 5, and the main beam is not split into two directions. LPDA was mounted on the 2.4 m × 2.4 m plane reflector outside a building, and SWR was measured using a cable analyzer. We confirmed that the SWR was as large as the designed value. Next, we made a new design of LPDA using Altair FEKO. The optimization goal was set that SWR is less than 3 and antenna gain is larger than 6.8 dBi. The generic algorithm installed on FEKO was used to optimize four parameters (the length of the first element, the distance between the first and second elements, the ratio between the first and second element length, and the distance between the first element and the plane reflector). We successfully found the solution that the SWR of the newly design LPDA is less than 3 and the antenna gain is 6.9-7.4 dBi between 80-160 MHz.

1 はじめに

太陽系の天体からは様々な波長で電磁波を放射しており、地上から観測することができ、粒子加速等を理解するために必要不可欠である。

太陽の表面ではプラズマ爆発現象が頻繁に起こっており、爆発に伴って電磁波が放射される。電磁波は様々な波長で観測可能であるが、30 ~ 300MHzの帯域で受信できる太陽電波は、太陽から飛来する高エネルギーの粒子（Solar Energetic Particles, SEP）と密接に関係している [1]。SEPは、地球周辺の有人宇宙活動だけでなく、人工衛星の機能障

1) 東北工業大学情報通信工学科

Department of Information and Communication Engineering, Tohoku Institute of Technology

2) 東北大学大学院理学研究科

Graduate School of Science, Tohoku University

害や航空機乗務員の被曝などの原因となるため、その予報は宇宙天気にとって非常に重要な課題である。低周波帯における太陽電波モニタは即時警報システムの構築などにも有用であり、今後の宙空災害予防の観点からも重要である。

地球や木星のように磁場を持つ惑星からは須らくオーロラがみられる。オーロラは磁気圏で加速された粒子が大気と衝突することで引き起こされる発光現象である。この加速された粒子からは電波が放射され、オーロラ電波と呼ばれている。オーロラ電波の周波数は磁場強度に比例しているため、低周波帯の方がより固有磁場の弱い惑星まで観測することができる。オーロラ電波は太陽系内の惑星だけでなく、太陽系外の惑星からも放射されていると考えられており、低周波の観測は今後の太陽系外惑星の探査の鍵となることが想定される。これまで光学観測により多数の系外惑星が発見されている。磁場は主星（太陽）の放射線から惑星本体を守る役割があり、磁場の検出は系外惑星の特性を知る上で極めて重要である。磁場を持つ天体は極域からオーロラに関連した電磁波が放射されており、この電波を検出することが惑星の磁場を検出することにつながる。これまでも多くの観測がなされてきたが、検出例は限られている [2]。世界には大型の電波望遠鏡が数多く存在しているが、その多くはマシンタイムが限られている。自由度の高い望遠鏡で長期間観測することが必要であり、本研究で低周波帯の観測が可能となれば新たな系外惑星電波の発見につながる可能性がある。

以上のことから、低周波帯で太陽電波・惑星電波観測が可能になることで、宇宙天気や系外惑星探査に貢献することができる。そこで、東北大学で保有している飯館惑星電波望遠鏡 (Iitate Planetary Radio Telescope: IPRT) の受信性能を低周波側へ拡張することを目的とし、給電部に取り付ける 80~160MHz 帯のアンテナの開発を行った。本研究では、既存のアンテナの特性を測定し、新たに性能を向上されたアンテナを設計した。

2 IPRT

IPRT は福島県飯館村にある 31m × 33m の矩形型パラボラアンテナである。図 1 は飯



図 1 飯館惑星電波望遠鏡の外観。2面のパラボラアンテナの2カ所の直焦点部分にアンテナと受信機が取り付けられている。

館惑星電波望遠鏡の外観であり、2面のパラボラアンテナの2か所の直焦点部分にアンテナと受信機が設置してある。主焦点には2.4m × 2.4mの平面リフレクタが設置されており、この上に観測用のアンテナが配置されている。裏側には増幅器が入った恒温槽が設置されている。設計時には、平面リフレクタでの反射を考慮する必要がある。

現在、150 ~ 500MHz帯の太陽電波観測用の受信装置や300MHz帯の惑星電波観測用受信装置が搭載されており、定常的に観測を行っている。世界にはインドのGMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) や欧州のLOFAR (LOW Frequency ARray) といった低周波帯の大型望遠鏡が多数存在するが、これらの施設はマシンタイムが限られており太陽・惑星の占有望遠鏡として使用することは困難である。加えて、既存のプロジェクトがあるため、自由な開発環境がない。一方、飯館惑星電波望遠鏡は東北大学によって運営されている、世界的にも例の無い太陽・惑星観測に特化した望遠鏡である。さらに、開発も自由に行うことが可能であるため、新たな低周波の受信系の試作が可能である。この観測周波数を低周波領域に伸ばしていくことでさらなる研究の発展が見込めることから、新たな低周波受信用のアンテナを設計し、今後の低周波観測に利用する。

3 広帯域アンテナの設計

3.1 ログペリオディックアンテナ

本研究では広帯域アンテナの一つであるログペリオディックアンテナを給電部に使用する。ログペリオディックアンテナの外観を図2に示す。ログペリオディックアンテナは隣り合う素子の長さ、素子の距離の比が一定となる構造を持ち、 $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{l_0}{l_1} = \frac{l_1}{l_2} = \tau$ となるように素子が配置されている。

アンテナの設計にはモーメント法を用いる。モーメント法は線状アンテナで発生する電磁界を効率よく計算することができる手法であり、アンテナの放射パターンなどの特性を計算することができる。アンテナ設計時に考慮した特性は以下の2点である。

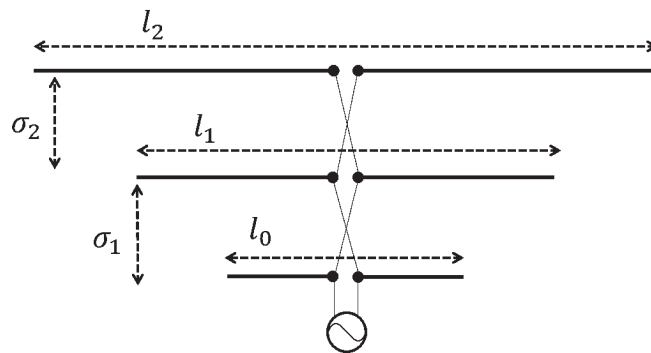


図2 ログペリオディックアンテナの概略図。

1つ目として、アンテナのメインビームの形状が重要である。放物面で反射された電波は焦点に集まる。この時、焦点位置のアンテナが反射してきた電波を効率よく受信できるように指向性を最適化する必要がある。具体的には今回設計するアンテナのビームの形が二山に分離しないように素子を配置する。ビームパターンが二山に分離していると感度が低下するだけでなく、天体以外のシグナルを受信しやすくなる。

2つ目はSWR (Standing Wave Ratio) をある基準値以下にすることである。SWRは、電波をアンテナで受信した時どれくらいの効率で電気信号を後段の受信系に伝送することができるかを表す計測値である。市販されているアンテナの多くはSWRが2～3以下(電力伝送効率89～75%以上)に設計されていることから、今回はこの値を参考にする。

この2つの特性を満たすように σ_1, l_0, τ の値と、平面リフレクタから一番短い素子までの距離 d_0 を調整する。

3.2 既存のアンテナの測定

先に、これまでに制作したアンテナの特性を計測した。本研究ではより最適化されたアンテナを開発することが目標であるため、以前作成したアンテナの特性計測により、新しい設計の下限値を定める。

このアンテナはアンテナ解析ソフトMMANAで設計されたもので、80～160MHzでメインビームが割れず、SWRが5以下になるように設計してある。各素子は直径1cmのアルミパイプを使用しており、塩ビパイプのブームに接続している。設計時のビーム幅は～60度であり、アンテナゲインは～6.8dBiであった。SWRの計測は東北大学理学研究科合同研究棟の屋上で行った。ここには実際のパラボラアンテナの焦点面を模した2m×2mの平面リフレクタが設置されている。ここに試作したアンテナを天頂方向に向けて固定し、ケーブルアナライザでSWRを計測した。実験の様子及び測定結果を図3に示す。SWRの大きさはMMANAで設計した結果と概ね一致しており、80～160MHzで概ね5以下であることがわかった。

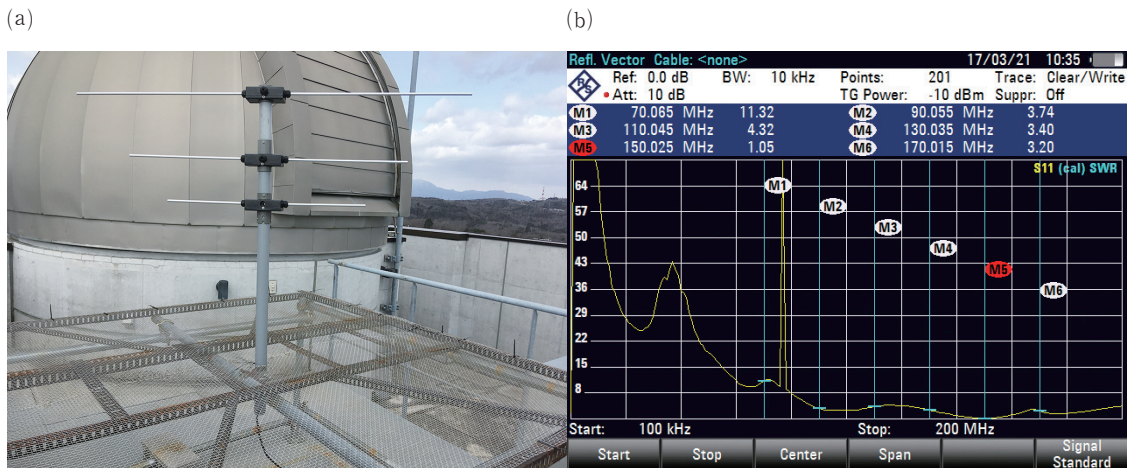


図3 (a)東北大学理学研究科合同研究棟屋上における計測の様子。中央に見えるのが3素子ログペリアンテナであり、2m×2mの平面リフレクタ上に設置されている。

(b)ケーブルアナライザで計測された、80MHz～180MHz付近のSWRの様子。M1～M6の値はそれぞれの周波数でのSWRを示している。この結果から、目的の帯域内でSWRが概ね5以下であり、概ね3～4程度であることがわかる。

3.3 新たなアンテナの設計

前回試作したアンテナをさらに改良するため、新たなアンテナを設計した。解析にはAltair社のアンテナ解析ソフトFEKOを使用した。FEKOは電磁界シミュレーションソフトウェアであり、アンテナ解析の他、高周波RFデバイスの設計やレーダーの解析など

様々な用途に用いられる。今回の設計では片方の偏波のみを受信するアンテナを設計したが、将来的に両偏波を観測することを考慮する必要がある。市販されている両偏波用アンテナの設計を参考にして、上下のラインに各エレメントを交互に配置し、給電するような設計とした (図4)。材質は直径1 cmの完全導体を仮定したが、この周波数帯では材質の違いは影響しないと考えられる。最適化の際は4つのパラメータ (d_0, σ_1, l_0, τ) に着目した。Generic Algorithmを用いて、SWRが3以下、アンテナゲインが6.8dBi以上、メインビームが割れないという条件で設計した。

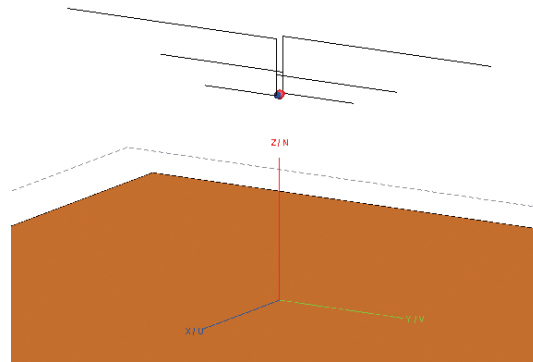


図4 設計したアンテナの3次元モデル。給電点は最下部の素子部にあり、そこから上下に伸びている2本のラインから各素子に交互に給電する。茶色の部分は平面リフレクタである。

設計の結果を図5に示す。SWRは目標帯域内で3以下となることが確認できた。また、ゲインは7.4～6.9dBiであり、目標値を大きく上回ることができた。これは前回試作したアンテナの性能を上回っており、目的を達成することができた。

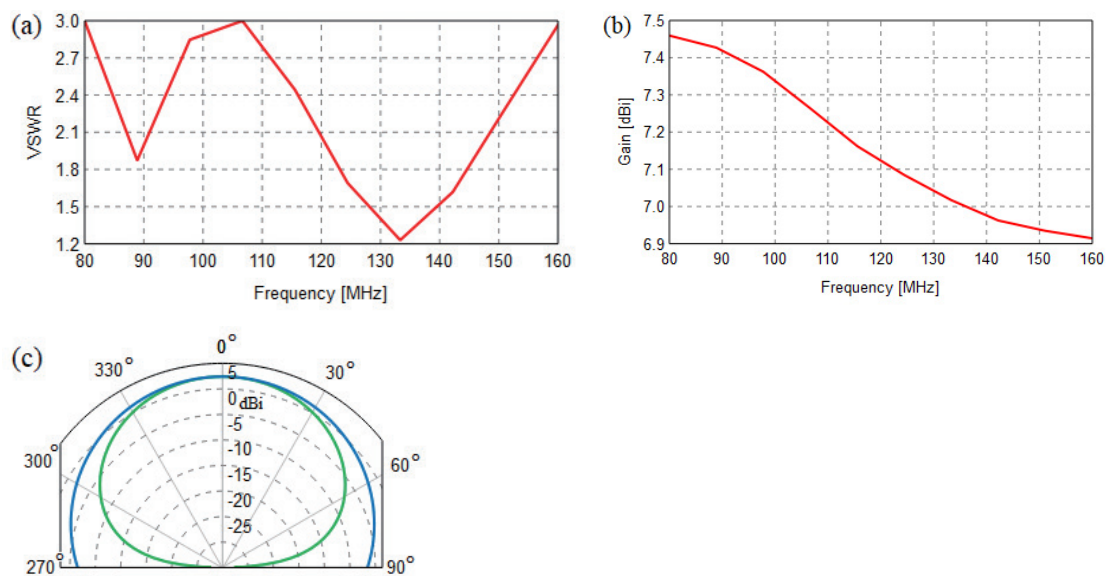


図5 80～160MHzにおける(a)SWR, (b)アンテナゲインの計算結果。(c)80MHzにおける平行 (緑)・垂直 (青) 方向のビームパターン。

4 まとめと今後の展望

本研究により、新たな広帯域アンテナを設計し、SWR・アンテナゲイン共に改善することができた。本年度はアンテナを試作して特性を計測するまではできなかったが、次年度以降に実施予定である。

東北大学・国立天文台を中心としたグループでは、次世代の低周波 VLBI 観測ネットワークの構築に関する議論を進めている。超長基線電波干渉法 (VLBI) とは、離れた場所にある複数台のアンテナを結合することで超高空間分解能の画像を作る技術のことである。東北大学のアンテナは低周波の観測に特化しているが、ここに低周波の新たなバンドを開通させることでオーストラリアやヨーロッパの低周波数帯の大型電波観測装置と結合させることが可能となり、革新的な観測施設となる。現在、国立天文台・東北大学のグループでは、次世代電波干渉計 SKA (Square Kilometre Array) と日本の電波望遠鏡を用いた VLBI (超長基線電波干渉法) を検討している。この計画では、数十～数百 MHz 帯での超高分解能を用いて系外惑星等の観測をすることを目指している。計画の第一段階は SKA のプリカーサーである、オーストラリアの Murchison Widefield Array (MWA) やインドの GMRT との干渉実験である。本研究をさらに発展させて百 MHz 帯の観測が可能となれば、干渉実験の幅が広がり、次世代の観測技術の発展につながると考えられる。

参考文献

- [1] Miteva R, Samwel SW, Krupar V. 2017. Solar energetic particles and radio burst emission. *J. Space Weather Space Clim.* 7: A37
- [2] Turner, J. D., et al. 2021, *A&A*, 645, A59