

固体惑星内部探査レーダ用 Vivaldi アンテナ の基礎検討と試作性能評価

北野 遼[†], 真鍋 武嗣[†], 西堀 俊幸[‡], 春山 純一[‡], 渡邊 宏弥^{††}, 宮本 英昭^{‡‡}

[†] 大阪府立大学大学院工学研究科, 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1

[‡](独) 宇宙航空研究開発機構、宇宙科学研究所, 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
/ 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

^{††} 東京大学大学院理学系研究科, 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

^{‡‡} 東京大学総合研究博物館, 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: [†]r-kitano@aero.osakafu-u.ac.jp, [†]manabe@ieee.org,

[‡]{nishibori.toshiyuki, haruyama.junichi}@jaxa.jp, ^{††}h-watanabe@um.u-tokyo.ac.jp, ^{‡‡}hm@um.u-tokyo.ac.jp

あらまし 月, 小惑星における浅部地下の構造を調べる手段として UHF 帯電波を用いた地中レーダの使用が検討されている。本研究ではこの地中レーダに使用するアンテナとしてヴィヴァルディアンテナの設計, および電磁界解析を行い, $\lambda/4$ パッチ型モノポールアンテナとの性能比較を行った。また, 解析結果を基にアンテナを試作し, 反射損 (S_{11}) および放射パターンの測定を行った。これらの結果を踏まえ, 地中レーダとして使用するために有用なアンテナのパラメータについて検討した。

キーワード レーダ, ヴィヴァルディアンテナ, アンテナパターン

Electromagnetic analysis and performance evaluation of a Vivaldi antenna for the Ground Penetrating Radar method to study subsurface-structures of solid bodies in the solar system

Ryo KITANO[†], Takeshi MANABE[†], Toshiyuki NISHIBORI[‡], Junichi HARUYAMA[‡],
Hiroki WATANABE^{††} and Hideaki MIYAMOTO^{‡‡}

[†] Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, Osaka
599-8531, Japan

[‡] Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan
/ Institute of Space and Astronautical Science Yoshinodai 3-1-1, Chuo-ku, Sagami-hara City, Kanagawa
252-5210, Japan

^{††} School of Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

^{‡‡} University Museum, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract Ground penetrating radar is a powerful sensor to explore subsurface structures on solid planets in future lunar or planetary exploration mission. This paper describes the results of preliminary design and electromagnetic-field analysis of Vivaldi antennas to be used for ground penetrating radars exploring the Moon or asteroids. Their performances are compared with those for a $\lambda/4$ -patch type monopole antenna. The radiation patterns and the return-loss characteristics were measured for prototype models. Based on the results of the analysis and the measurements, the various design parameters required for lunar and planetary ground penetrating antennas are discussed.

Keyword Radar, Vivaldi Antenna, Antenna-Pattern

1. はじめに

現在, 月や小惑星の地下構造を把握する方法として地中レーダの使用が検討されている [1] [2] [3]. 月の地中

構造については「かぐや」(SELENE) 搭載の月レーダサウンダ (Lunar Radar Sounder: LRS[4]) により高度 100 km の月周回軌道上から HF 帯電波を用いて地下数 km に至る地層構造など観測が 40 m 程度の距離分解能

でなされている [5]. 一方, LRS が月の地下の大構造を明らかにすることを目的としているのに対し, 本稿で検討する月・小惑星探査用地下レーダは, 地表から数 m ~ 数十 m 程度の浅い地下構造を, 地上を走行するローバー等に搭載したレーダにより, 20 cm 程度以内の距離分解能で把握することを目的としている. このことから地下レーダには高い分解能が必要となるため, 使用できる周波数が広いことが望まれる. そのため地下レーダのアンテナとしては広帯域なアンテナが適しており, ボウタイアンテナ, スパイラルアンテナ, TEM ホーンアンテナなどの広帯域アンテナなどがよく用いられる.

本研究ではこの条件を満たすアンテナとして 300 MHz ~ 900 MHz 付近の UHF 帯で動作するヴィヴァルディアンテナ [6] について検討した. ヴィヴァルディアンテナの特徴としては非常に広い帯域幅を持ち, ダイポールアンテナに比べて強い指向性を持つ. 加えて形状が平面構造であることから, 着陸機に搭載するスペースの確保がしやすいという利点もある. 本稿では, 先ず, ヴィヴァルディアンテナの一種である, バランスド・アンチポードル・ヴィヴァルディアンテナ [7] を UHF 帯で設計し, 設計したアンテナについて, 有限要素法による電磁界解析により, S パラメータおよび放射パターンについてシミュレーションを行った. さらに, 製作したアンテナとベクトルネットワークアナライザを用いて, 電波暗室内で S パラメータ, 放射パターンの測定実験を実施した. これによりヴィヴァルディアンテナの地下レーダとしての有用性と地下レーダに必要なパラメータの検討を行う.

2. ヴィヴァルディアンテナの設計

通常, 地球上で使う地下レーダは VHF 帯を使用していることが多い. 地球上では大地は水分を含んでおり, 大地の比誘電率はその水分率に大きく左右される. もちろん水分の多い地層で使用する場合は減衰が大きく, 探知距離は悪くなる [8]. しかし, 現在月には水がないとされているので, 地球上よりはるかに減衰が少ないと考えられる. 距離分解能をよりよくするために使用周波数を高くしても, 地下レーダの目的である地下数メートルから十数メートル程度の深さまで調べることは可能と考えられる. そこで我々は帯域幅を広げるために 300 MHz ~ 800 MHz 付近の UHF 帯を使用したヴィヴァルディアンテナ (balanced antipodal Vivaldi antenna) を設計した. ヴィヴァルディアンテナの構成は誘電体を基板とし, その両面に張り付けられた導体板により滑らかな曲

線状の開口を形成する [9]. 導体開口の指数関数的な曲線状とすることにより, 特定の周波数で共振するという現象は起きず, 優れた広帯域特性を実現することができる. 給電部分は同軸ケーブルのインピーダンスと整合させるために不平衡のマイクロストリップ線路としている.

3. 地下レーダ用アンテナの解析

アンテナの解析は有限要素法を用いた HFSS (3 次元高周波電磁界シミュレータ) を用いて S パラメータ S_{11} とアンテナパターンを算出した. 本研究では形状の異なる 3 種類のヴィヴァルディアンテナ (type0, type1, type2) を設計し, それに加えて $\lambda/4$ パッチ型モノポールアンテナの解析を行った. なお, アンテナの基板は FR-4 を仮定し, 比誘電率は 4.8 とし, 導体部は完全導体とした.



図 1 type0



図 2 type1

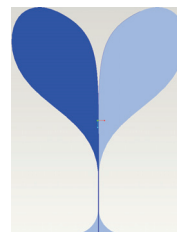


図 3 type2



図 4 $\lambda/4$ パッチ型モノポールアンテナ

表 1 type0 パラメータ

長さ	226.8 mm
開口部長さ	85.6 mm
幅	125.6 mm
基板厚さ	1 mm
導体厚さ	0.1 mm
ストリップライン幅	1.8 mm

表 2 type1 パラメータ

長さ	452.2 mm
開口部長さ	171.2 mm
幅	251.2 mm
基板厚さ	1 mm
導体厚さ	0.1 mm
ストリップライン幅	1.8 mm

表3 type2 パラメータ

長さ	457.4 mm
開口部長さ	175.4 mm
幅	260.6 mm
基板厚さ	1 mm
導体厚さ	0.1 mm
ストリップライン幅	1.8 mm

表4 λ/4パッチ型モノポールアンテナ パラメータ

長さ	500.0 mm
幅	500.0 mm
基板厚さ	1 mm
導体厚さ	0.1 mm
ストリップライン幅	1.8 mm

アンテナの特性はアンテナサイズに比例した関係を持つ。そのことから type0 のアンテナ形状を変えずに大きさを拡大したものが type1 である。type2 は type1 の導体形状を改良したものである。これらのアンテナを解析した結果得られた S パラメータ S_{11} を次に示す。

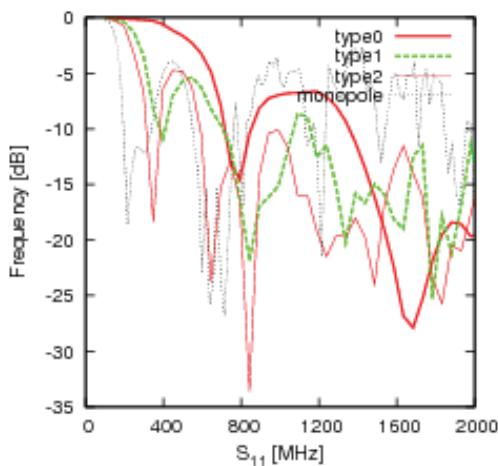


図5 S パラメータ S_{11}

本研究では 800 MHz 付近を使用したアンテナの設計を行っている。図5を見るとヴィヴァルディ type0 では 800 MHz で S_{11} の値は下がっているが、他のアンテナに比べて S_{11} の値が大きく 800 MHz 付近の周波数を使うアンテナとしてはあまり適していない。type0 のアンテナサイズを拡大した type1 では 700 MHz 付近で S_{11} が -10 dB を下回り、1.1 GHz で -10 dB を超えた。S パラメータ S_{11} の値として、アンテナでは通常 -10 dB 以下となることが望ましい。そのことから type1 では帯域幅は 400MHz 程度確保できていることになる。それに対して type2 では S_{11} の値が 600 MHz 付近で -10 dB より低くなり、その後 1 GHz 以上にわたって -10 dB を下回っており、非常に広い帯域が確保できることがわかる。対

して λ/4 パッチ型モノポールアンテナではところどころ S_{11} の値が良く落ち込んでいるところもあるが、ヴィヴァルディアンテナに比べてその帯域性は広いとは言えない。この結果から、本研究では性能の良かったヴィヴァルディアンテナ type2 の製作、測定実験を行った。

4. 地中レーダ用アンテナの特性測定

試作アンテナはガラスエポキシ基板 FR-4(比誘電率 4.4~4.8) をアンテナの基板サイズに切断し、銅シートを導体形状にカットングして基板に貼り付けた。給電部には BNC コネクタをハンダで接着してある。アンテナ実験は製作したアンテナとベクトルネットワークアナライザを用いて S パラメータ S_{11} を、スペクトラムアナライザとシンセサイズド信号発生器を用いてアンテナパターンの測定を行った。また、実験は京大生存圏研究所の電波暗室内(図6)で行った。

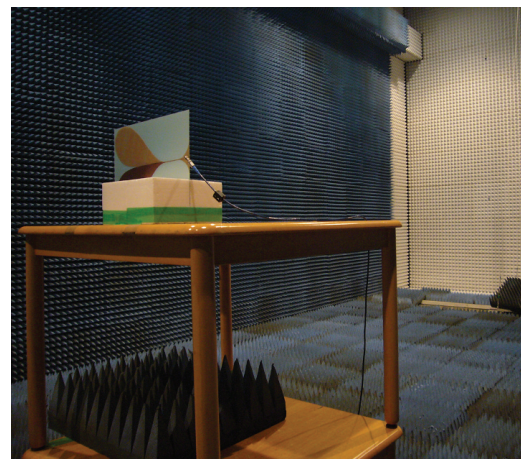


図6 電波暗室

この実験により得られた結果を次に示す。まずヴィヴァルディアンテナの S パラメータ S_{11} を解析により得られた結果と比較してみる。図7を見ると、全体的に解析に比べて反射損の dB 値の絶対値が大きくなっていることがわかる。結果に違いが出た大きな理由としていくつかの原因が考えられる。ひとつは基板の誘電率が解析とは違っていた可能性である。アンテナの基板は FR-4 を使用しており、比誘電率は 4.4 ~ 4.8 とされているが、解析ではこの比誘電率を 4.8 とし算出している。また、解析では給電部分の反射を考えていなかったが、製作したアンテナではこの給電部分で反射が起こっている可能性もある。そのほかにも測定に使用したネットワークアナライザなどの測定器による影響や、ケーブルによる影響も考えられる。

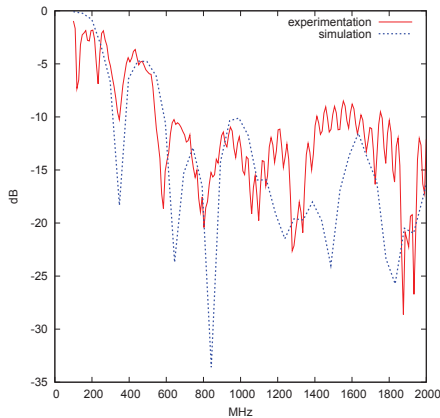


図7 ヴィヴァルディアンテナ測定結果

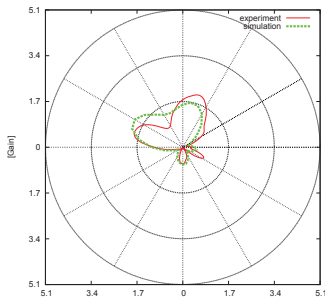


図8 500MHz Eplane

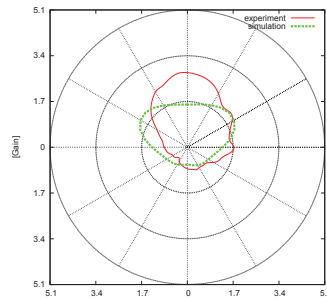


図9 500MHz Hplane

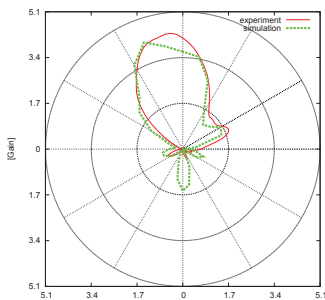


図10 700MHz Eplane

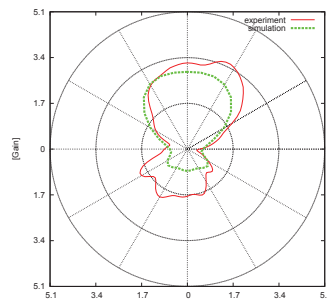


図11 700MHz Hplane

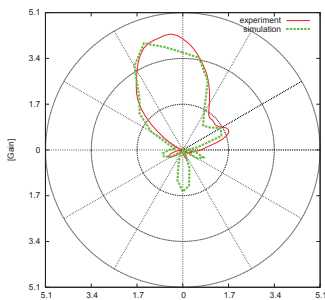


図12 900MHz Eplane

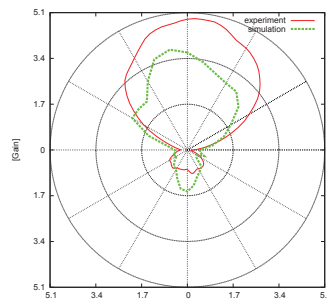


図13 900MHz Hplane

次にアンテナパターンの測定結果について示す。図8～図13を見ると、電界面のアンテナパターンはビーム幅が狭いのに対して、磁界面では広がったビーム幅を持つことがわかる。これはアンテナの指向性は実効開口部長さに比例した関係を持つので、電界面の実効開口部長さは表3の開口部長さとほぼ一致するのに対して、磁界面の実効開口部長さはほぼ誘電体の厚さと考えてよいので磁界面では電界面に比べて指向性ほど鋭くないことがわかる。今回の測定及び解析ではアンテナパターンが縦じて左右対称でなかった。この原因として考えられるのはストリップラインが表と裏で形状が異なるため、電圧に位相差が生まれたためと考えられる。そのため、実際に使用するに当たってはアンテナの設置方向が重要になってくる。もしくは導体形状を変化させてアンテナ正面に最も強く電波を放出するようにする必要性が出てくる。また、比較のために $\lambda/4$ パッチ型モノポールアンテナのアンテナパターンの解析結果も次に示す。 $\lambda/4$ パッチ

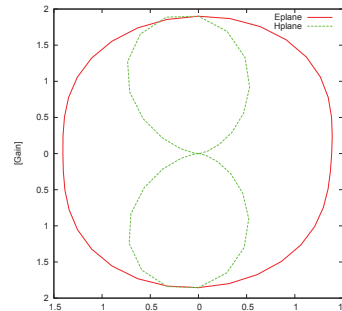


図14 $\lambda/4$ パッチ型モノポールアンテナ アンテナパターン

型モノポールアンテナではヴィヴァルディアンテナに比べて対象性が良い代わりに指向性が8の字を描くようになっている。これは地中レーダとして使用する場合、地中以外の方向にも電波を出すことになるので電力ロスになってしまう。そのため、 $\lambda/4$ パッチ型モノポールアンテナを使用する場合はアンテナ周りにシールドなどを施すことが望ましいと考えられる。

5. 結論

地中レーダにおいて距離分解能を上げるためにはレーダ変調波の周波数変位幅を広げる必要があるため、広帯域アンテナが必要である。広い帯域幅を確保するためには高い周波数の使用が一般的である。しかしながら、1 GHz以上の周波数では地下での減衰、反射が大きく地中レーダにはあまり使用は適さない。そこで本研究では1 GHz以下の帯域を使用して広い帯域幅を確保できるア

ンテナの検証を行った。アンテナにはヴィヴァルディアンテナを採用し、その結果 1 GHz 以下で 400 MHz 程度の帯域幅が確保できた。また、 $\lambda/4$ パッチ型モノポールアンテナにおいても 200 MHz 程度の帯域幅が確保できることから、地中レーダ用アンテナにも使用できると考えられる。ヴィヴァルディアンテナの方が帯域幅や指向性の結果から見て地中レーダのアンテナとしては適していると考えられるが、実際にレーダとして使用する際は大きさや設置場所などの条件があるので一概にはどちらが良いとは言えない。これらのことを踏まえ、今後はヴィヴァルディアンテナ type2 の最適化、及び周囲の環境や、設置条件を含めた研究を進めたいと考えている。

文献

- [1] H. Miyamoto, J. Haruyama, T. Kobayashi, K. Suzuki, T. Okada, T. Nishibori, A.P. Showman, R. Lorenz, K. Mogi, D.A. Crown, J.A.P. Rodriguez, R. Okugawa, T. Tokunaga, and K. Masumoto, "Mapping the structure and depth of lava tubes using ground penetrating radar," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, L21316, doi:10.1029/2005GL024159, 2005.
- [2] H. Miyamoto, J. Haruyama, S. Rokugawa, et al., "Acquisition of Ground Penetration Radar data to detect lava tubes: Preliminary results on the Komoriana cave at Fuji volcano in Japan," *Bull. Eng. Geol. Env.*, vol. 62, pp. 281-288, 2003.
- [3] R. E. Grimm, E. Heggy, S. Clifford, C. Dinwiddie, R. McGinnis, and D. Farrel, "Absorption and scattering in ground-penetrating radar: Analysis of the Bishop Tuff," *J. Geophys. Res.*, vol. 111, E06S02, 15, 2006.
- [4] T. Ono, A. Kumamoto, H. Nakagawa, Y. Yamaguchi, S. Oshigami, A. Yamaji, T. Kobayashi, Y. Kasahara, and H. Oya, "Lunar Radar Sounder observation of subsurface layers under the near-side maria of the Moon," *Science*, vol. 323, no. 5916, pp. 909-912, Feb. 2009.
- [5] T. Kobayashi, J. H. Kim, S. R. Lee, H. Araki, and T. Ono, "Simultaneous observation of lunar radar sounder and laser altimeter of Kaguya for lunar regolith layer thickness estimate," *IEEE Geosci. Remote Sensing Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 435-439, July 2010.
- [6] P. J. Gibson, "The Vivaldi aerial," *Proc. 9th European Microwave Conference*, Brighton, U. K., June 1979.
- [7] J. D. S. Langley, P. S. Hall, and P. Newham, "Balanced antipodal Vivaldi antenna for wide bandwidth phased arrays," *IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagat.*, vol. 143, no. 2, pp. 97-102, Apr. 1996.
- [8] 佐藤源之, "地中レーダによる地下のイメージング," *信学論 C*. vol. J85-C, no. 7, pp. 520-530, July 2002.
- [9] E. Gazit, "Improved design of the Vivaldi antenna," *IEEE Proc.* vol. 135, Pt. H, no. 2, pp. 89-92, April 1988.