

固体惑星内部探査レーダ用 Vivaldi Antenna の広帯域化

北野 遼[†] 真鍋 武嗣[†] 伊藤 琢博[†] 西堀 俊幸[‡] 春山 純一[‡] 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, 〒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, [†] su102042@edu.osakafu-u.ac.jp,

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

あらまし 現在, 月や固体惑星探査における浅部地下の構造を調べる手段として超広帯域地中レーダが検討されている. 地中レーダは UHF 帯電波を用いて地表から数~数十 m 程度の浅い地下構造を 10 cm 程度の高分解能で測定することを目的としている. 本研究ではこの地中レーダに使用するアンテナとして balanced antipodal Vivaldi antenna の使用を提案する. Vivaldi antenna の特徴は広帯域, 鋭い指向性であり, これらの特徴は地中レーダの性能向上に繋がる. また, 平面かつ単純な構造のため, 製作がしやすく研究対象に適している. 研究では 300~900 MHz で使用できるアンテナの設計をし, FDTD 法を用いた解析を行い, リターンロスを減らすための最適設計を行った. また, 設計したアンテナを作成し, 測定実験を行った. これらの結果, 目標としていた 300~900 MHz で使用できる超広帯域 Vivaldi antenna の設計に成功した.

キーワード 地中レーダ, ヴィヴァルディアンテ, UHF, Sパラメータ, 放射パターン

Expansion of bandwidth of a Vivaldi Antenna for Ground Penetrating Radars to Explore Subsurface Structures of Solid Bodies in the Solar System

Ryo KITANO[†] Takeshi MANABE[†] Takuhiro ITO[†]

Toshiyuki NISHIBORI[‡] Junichi HARUYAMA^{/‡} and Hideaki MIYAMOTO^{††}

[†] Graduate School of 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

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

E-mail: [†] r-kitano@aero.osakafu-u.ac.jp, [†] manabe@ieee.org, [†] su102042@edu.osakafu-u.ac.jp,

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

Abstract The use of ultra-wideband ground penetrating radars is currently considered as a means of investigating subsurface structures of solid planets in future lunar or planetary exploration missions. Ground penetrating radars use UHF wave and explore surface structures with a resolution of about 10 centimeters for the purpose of resolving small scale structures. We propose to use ultra-wideband Vivaldi antennas for GPR. The characteristics of Vivaldi antennas are broad bandwidth and high directivity. Vivaldi antennas are suited to GPR because the characteristics improve GPR's performance. We have designed a balanced antipodal Vivaldi antenna operating in the frequency range between 300 MHz and 900 MHz. We have made electromagnetic field analysis of the antenna by finite-difference time domain method. We optimized a shape of the antenna to reduce the return-loss of the antenna. We measured return-loss and radiation patterns of the antennas in a radio anechoic chamber. Finally, we succeeded in designing of the Vivaldi antenna which works on the bands from 300 MHz to 900 MHz.

Keyword Grand Penetrating Radar, Vivaldi antenna, UHF, S-Parameter, Antenna-Pattern

1. はじめに

現在、月や小惑星など固体惑星の地下構造を把握する方法として超広帯域地中レーダの使用が検討されている[1][2][3]。従来の固体惑星探査の例として月周回衛星「かぐや」(SELENE)や小惑星探査機「はやぶさ」などがあげられる。かぐやは月の探査を主に目的とされた固体惑星探査衛星であり、かぐやに搭載されていた月レーダサウンダ(Lunar Radar Sounder[4])では高度100 kmの月周回軌道上からHF帯電波を用いて地下数kmに至る地層構造を観測している。このとき観測は40 m程度の距離分解能でなされている[5]。それに対し、本稿で検討する固体惑星内部探査用レーダは、地表から数m～数十m程度の浅い地下構造を高い解像度で観測することを目的としている。例えば月など惑星に着陸機を使用できる探査例では、惑星表面を走行するローバ等に搭載したレーダにより、300～900 MHzのUHF帯の電波を用い、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。このことから地中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高いことが望まれる。そのため地中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。また、衛星への搭載性の観点から省スペースである必要もある。

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帯で動作する比帯域1の超広帯域Vivaldi antenna[6]について検討した。Vivaldi antennaの特徴としては非常に広い帯域幅を持ち、ボウタイアンテナ等に比べて強い指向性を持つ。これらの特徴は地中レーダの性能を向上させるので、地中レーダに適したアンテナと言える。加えて形状が薄型軽量の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。また、構造も基板の両面に金属を張っただけの単純な構造になっているため製作も容易である。本稿では、先ず、Vivaldi antennaの一種である、balanced antipodal Vivaldi antenna[7]を設計し、FDTD法[8]により電磁界解析を行った。解析ではSパラメータと放射パターンを算出した。また、アンテナの導体形状を徐々に変化させることで導体の形状とSパラメータの関係について調べた。それらの結果を基に300 MHz～900 MHz付近の帯域で動作するVivaldi antennaの最適化を行った。その後、最適化により定まった形状のアンテナを製作し、京都大学宇治キャンパス生存圏研究所の電波暗室によりアンテナのSパラメータ、及び放射パターンの測定を行った。これらの解析及び実験から目的である300～900 MHzで動作する超広帯域Vivaldi antennaの設計を行っ

た。

2. Vivaldi antenna 形状

当初、Vivaldi antennaとは誘電体である基板の片面に導体を張り、その導体をテーパ上のスロットにしたtapered slotアンテナにしたものであった[9]。これを誘電体の両面に導体を配置したantipodal構造にし、同軸ケーブルなどの不平衡給電線とのインピーダンス整合をとるためのバランの構造をマイクロストリップ線路からツインライン線路への変換部としてアンテナの構造に組み込んだものがantipodal Vivaldi antennaである[6]。そしてこのアンテナの特徴として基板の両面に滑らかな端面の導体を持ち、導体が指数関数的な広がりを持つことで、特定の周波数のみで共振するという現象は起きず、優れた広帯域特性を持つ。本研究ではFig. 1のようにアンテナ形状を決定するパラメータを置いた。

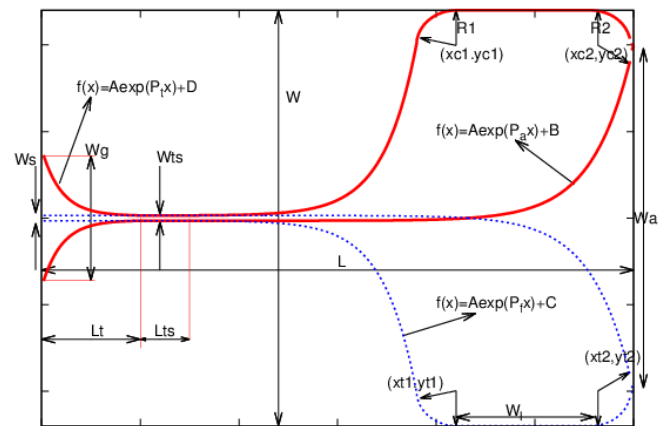


Fig.1 balanced antipodal Vivaldi antenna 形状

3. Vivaldi antenna の設計解析

本研究では300～900 MHzで使用できるVivaldi antennaの設計を行った。設計条件として基板誘電体には比誘電率9.8のRogers社製のセラミック熱硬化性ポリマー複合材(ceramic thermoset polymer composite) TMM-10i®を用い、基板の厚さd=3.17 mm、サイズは長さL=387.29 mm、基板の幅W=352.08 mmとしている。文献[10]では誘電体基板として比誘電率4.8のFR-4を用いたが、今回はさらなる小型化をはかるためより高い誘電率の基盤を用いた。加えて300～900 MHzの帯域内でS₁₁が-10 dB以下となることとしている。そしてこの条件を満たすようにアンテナ形状の最適化を行った。最適化ではFig. 1に示すようにアンテナの形状をそれぞれ独立したパラメータとして置いた。そして導体形状を決定する給電部幅W_g、給電部長さL_t、ツインライン幅W_{ts}、ツインライン長さL_{ts}、導体下部指数関数部P_b、導体上部指数関数部P_a、給電部指数関数部P_t、導体側部長さW_lをそれぞれ一つずつ変化させながらS₁₁を比較することでそれぞれの形状が与える周

波数特性への影響を検討し、 S_{11} が -10 dB以下となるように形状を決定していった。

3.1. W_g による周波数特性への影響

マイクロストリップ W_g の長さを変えて比較した。解析結果(Fig. 2)を見ると550 MHz付近では W_g の長さが短くなれば S_{11} が大きくなり、長くなるほど小さくなっている。逆に800 MHz付近では W_g の長さが短くなるほど S_{11} が小さくなり、長くなるほど大きくなるのが分かる。

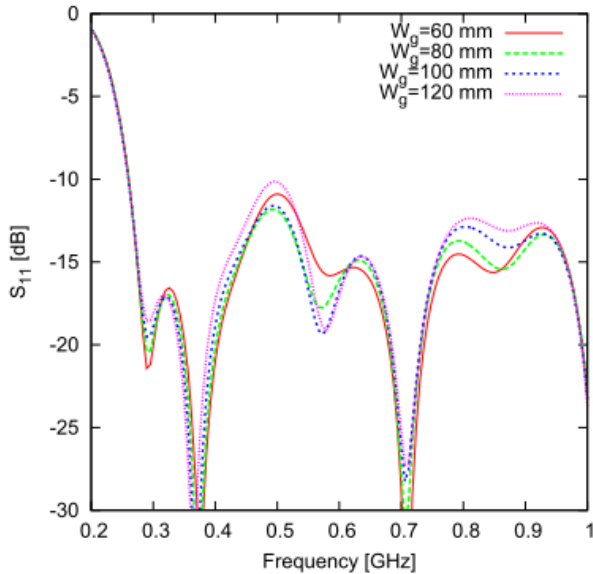


Fig. 2 : W_g による S_{11} 比較

3.2. W_{ts} による周波数特性への影響

ツインライン幅 W_{ts} の幅をインピーダンス 50Ω になるように計算したもの($W_{ts}=4.66$ mm)と給電部幅($W_t=3.06$ mm)と同じになるようにしたもの($W_{ts}=3.06$ mm)を比較した。解析結果よりFig. 3を見ると共振によりできる波の位置が50 MHzほど $W_{ts}=4.66$ mmにし

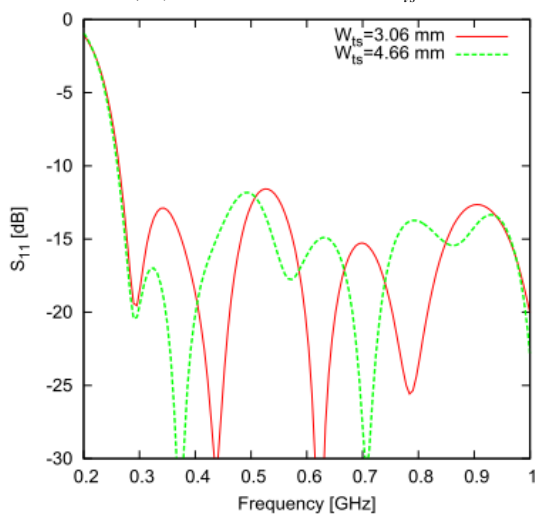


Fig. 3 : W_{ts} による S_{11} 比較

たときの方が低い周波数で出ているが、500 MHz付近で S_{11} が最大となり、ほぼ変わらない値を取った。しか

し、 $W_{ts}=4.66$ mmに比べて $W_{ts}=3.06$ mmとしたとき、350MHz付近で S_{11} が大きくなる結果となった。

3.3. P_a による周波数特性への影響

導体上部指数曲線の係数 P_a を変化させることで指数曲線を変化させ比較した。その結果、 $0.02 < P_a < 0.023$ の範囲では S_{11} は大きくは変わらなかったが、この範囲外では大きく S_{11} が増えた。また、 $0.02 < P_a < 0.023$ の範囲では300 MHz付近では P_a が大きくなるほど S_{11} が大きくなり、逆に600 MHz以上では P_a を大きくした方が S_{11} が下がる結果となった。

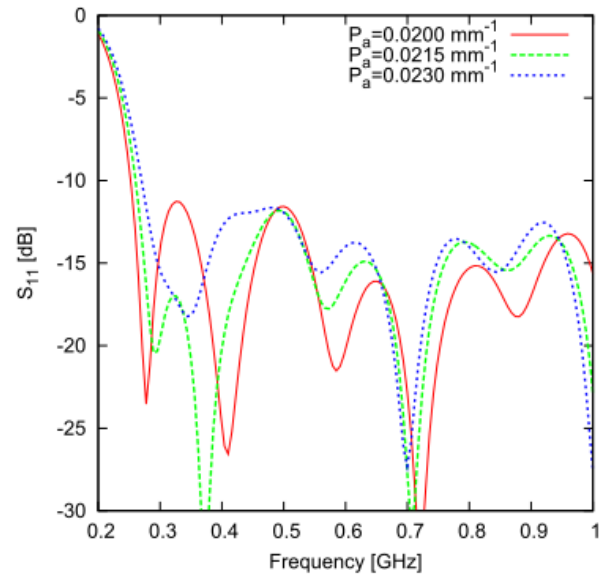


Fig. 4 : P_a による S_{11} 比較

3.4. P_f による周波数特性への影響

導体下部指数曲線の係数 P_f を変化させることで指数曲線を変化させ比較した。その結果、 S_{11} は P_f の値に

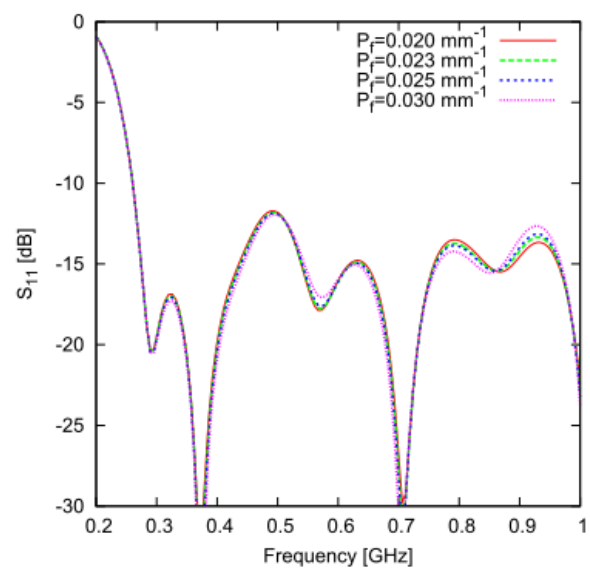


Fig. 5 : P_f による S_{11} 比較

よらずほぼ一定という結果となった。

3.5. P_f による周波数特性への影響

給電部指数曲線の係数 P_f を変化させることで指数曲線を変化させ比較した。その結果、 P_f と同じく S_{11} は P_f の値によらずほぼ一定という結果となった。

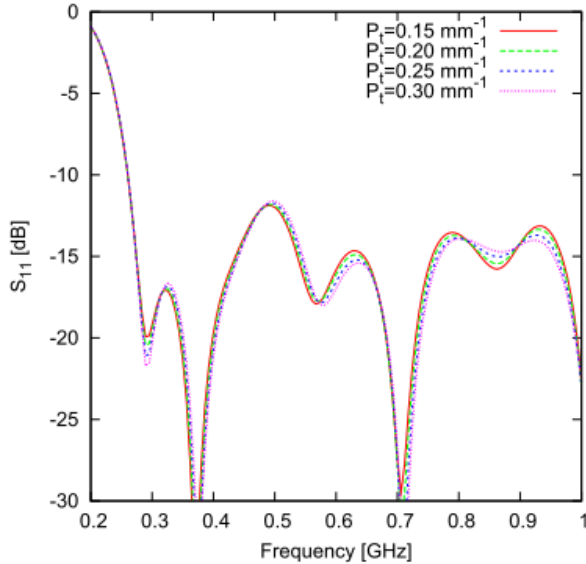


Fig. 6 : P_f による S_{11} 比較

3.6. L_t による周波数特性への影響

給電部から始まるマイクロストリップラインの長さ L_t を変化させて比較した。Fig. 7を見ると、500 MHz, 800 MHz付近では L_t の長さが短いほど S_{11} が大きくなり、逆に 900 MHz付近では L_t の長さが長いほど S_{11} が大きくなる結果となった。

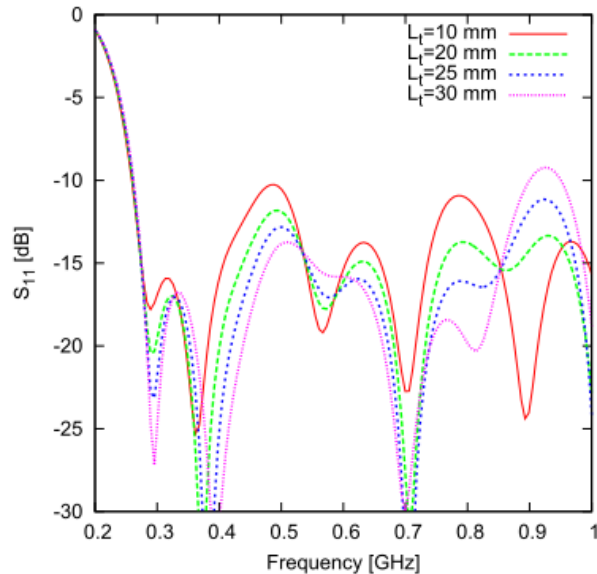


Fig. 7 : L_t による S_{11} 比較

3.7. L_{ts} による周波数特性への影響

ツインラインの長さ L_{ts} を変化させて比較した。Fig. 8を見るとFig. 7とほぼ同様の傾向が得られた。つまり 500 MHz, 800 MHz付近では L_{ts} の長さが短いほど S_{11} が大きくなり、逆に 900 MHz付近では L_{ts} の長さが長いほど

S_{11} が大きくなるということである。

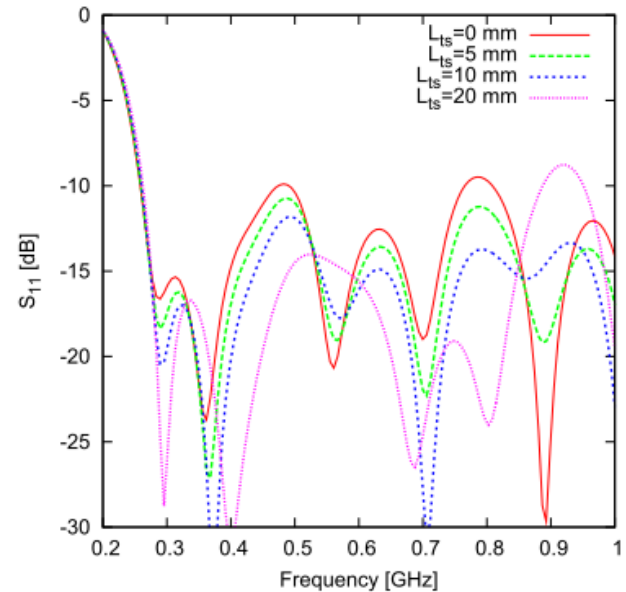
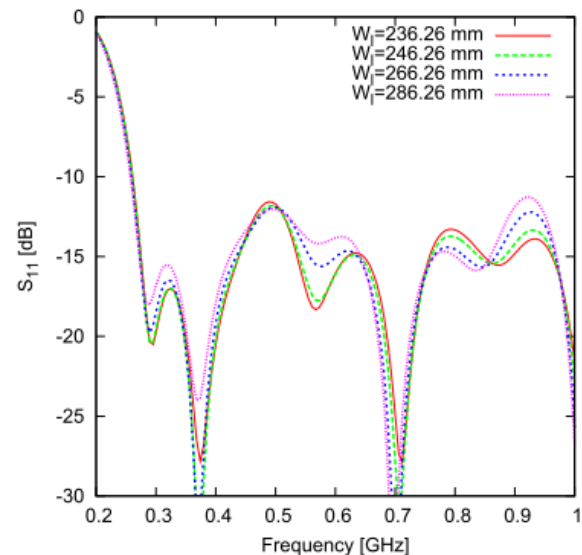


Fig. 8 : L_{ts} による S_{11} 比較

3.8. W_l による周波数特性への影響

導体側部の長さ W_l を変化させて比較した。Fig. 9を見ると 700 MHzより低い帯域では W_l の長さが長いほど S_{11} が大きく、逆に 800 MHz付近では W_l が短いほど S_{11} が大きくなる結果となった。



3.9. 超広帯域 Vivaldi antenna の設計

本研究では節 3.1 ~ 3.8 の解析結果により 300~900 MHzで使用できる Vivaldi antennaの設計を行った。以下が設計した Vivaldi antennaのパラメータ (Table. 1), 及び S_{11} (Fig. 10)である (d : 基盤厚さ, ϵ_r : 基盤の比誘電率)。Fig. 10 から分かるように、本研究で設計した Vivaldi antennaは 250 MHz以降で S_{11} が -10 dBを超えないところがないように設計できた。これで本研究に必要とされる 600 MHzの帯域幅を持つアンテナの設計が

解析上では出来たこととなる。また、アンテナ形状の中でも給電部長さ L_t 、ツインライン幅 W_{ts} 、ツインライン長さ L_{ts} 、導体上部指数関数部 P_a は周波数特性に与える影響が大きく、設計上で重要なパラメータとなることが分かった。

Table. 1 : 設計した Vivaldi antenna のパラメータ

L	387.29 mm	W	352.08 mm
W_a	293.41 mm	D	3.17 mm
ϵ_r	9.8	W_s	3.06 mm
W_{ts}	4.66 mm	W_g	80 mm
L_t	20 mm	L_{ts}	10 mm
W_l	246.26 mm	R	29.34 mm
P_t	-0.2 mm^{-1}	P_f	0.023 mm^{-1}
P_a	0.0215 mm^{-1}		

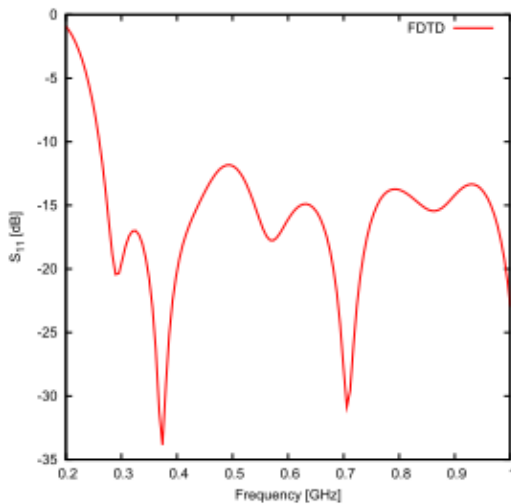


Fig. 10 : 設計した Vivaldi antenna の S_{11}

4. Vivaldi antenna の周波数特性の測定

設計したアンテナ (Table. 1) を 2 枚制作し、 S_{11} の測定を行った。アンテナの材料には比誘電率 9.8 の Rogers 社製のセラミック熱硬化性ポリマー複合材 (ceramic thermoset polymer composite) TMM-10i® を用いた。導体部はその表面に接着されている銅 (厚さ 70 μm) をエッチングすることにより作成した (Fig. 11)。



Fig. 11 : 制作した Vivaldi antenna (左:表面, 右:裏面)

電波測定実験は京都大学宇治キャンパス生存圏研究所マイクロ波送受信実験棟の電波暗室で行った。Fig. 12

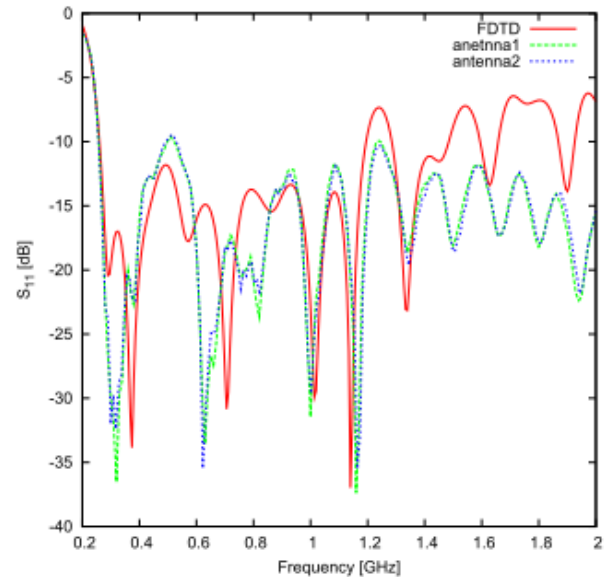
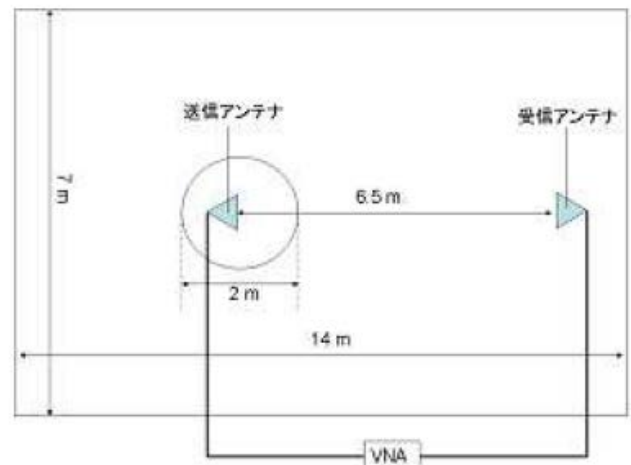


Fig. 12 : S_{11} 測定結果

に Vivaldi antenna の測定結果 (antenna1, antenna2) と解析結果 (FDTD) の比較を示す。グラフから 0.1 GHz ~ 1 GHz 付近までは測定結果と解析結果でほぼ同値の良好な結果が得られた。また、1 GHz 以降では測定と解析では異なる値を取っているが、これは解析ではセルサイズを 1 GHz の波長の 1/10 にしていたため、1 GHz 以降の周波数帯では正確に計算がされていなかったためである。実際は 1 GHz 以降も S_{11} が -10 dB を下回る結果となった。つまり、本研究で設計した Vivaldi antenna は 300 MHz ~ 2 GHz 程度までは使用できる非常に広帯域なアンテナとして設計できたこととなる。

5. 放射パタンの測定



作成したアンテナ 2 つを送受信アンテナとして使い、同軸ケーブルを用いてベクトルネットワークアナライザと繋げ、 S_{21} を測定することにより放射パタンの測定を行った。測定は送信用アンテナを回転台の上に乗せ、放射方向を測定受信アンテナを設置し、回転台を 3° ずつ動かし 360° 行った (Fig. 13)。

Fig. 15～Fig. 17 に 300 MHz～900 MHz の放射パタンの測定結果と解析結果の比較を示す。Fig. 17 より 900 MHz のパターンは解析結果と測定結果で近似な良好な結果が得られた。Fig. 16 ではやや測定結果のほうが利得が下がったがパターンは似た形となっておりアンテナ測定としては十分近い値と言える。Fig. 15 では特に H-plane で解析と測定では異なるパターンを出した。この原因の一つとしては元々低い周波数では利得が低い上に測定した電波暗室が本来 GHz 以上で使用すべき環境であったため、MHz 帯の周波数では電波が周囲の壁で吸収されず、反射が起こってしまったためと考えられる。また、アンテナに接続している同軸ケーブルからも放射が見られたため、それを受信した影響も考えられる。これらの原因で 300 MHz ではあまり正確な測定結果が得られなかったが 600 MHz 以上の周波数

計を行った。その結果、目的であった 300～900 MHz で使用できる Vivaldi antenna の設計を行うことができた。また、アンテナの設計解析に伴いアンテナ形状と周波数特性との関係を検討し、本研究で設定した Vivaldi antenna の形状 (Fig. 1) の中でも特に給電部長さ L_t 、ツイライン幅 W_{ts} 、ツイライン長さ L_{ts} 、導体上部指数関部 P_a の 4 パラメータは周波数特性に強く影響することが分かった。制作したアンテナの S_{11} の測定結果より本アンテナは 1 GHz 以降も使用できる非常に広帯域なアンテナであるということが判明した。今後はレーダ本体と組み合わせた測定実験を実施し、固体惑星内部探査レーダの実用化に向けた研究を行う必要がある。

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:10.1029/2005.
- [2] H. Miyamoto, J. Haruyama, S. Rokugawa, et al., "Acquisition of Ground Penetrating 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 nearside 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] E. Gazit, "Improved design of the Vivaldi antenna," *IEEE Proc.* vol. 135, Pt. H, no. 2, pp. 89-92, April 1988.
- [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] 宇野 亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, Feb 1998.
- [9] P. J. Gibson, "The Vivaldi aerial," *Proc. 9th European Microwave Conference*, Brighton, U. K., June 1979.
- [10] 北野 遼, 真鍋武嗣, 西堀俊之, 渡辺宏弥, 宮本英昭, 春山純一, "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," *信学技報*, WPT2010-25, March 7, 2011.

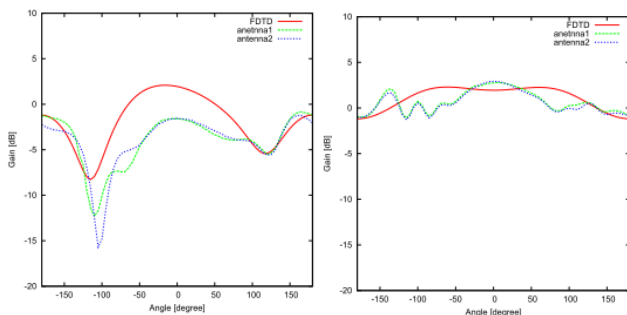


Fig. 15: 放射パターン 300 MHz (左: E-plane, 右: H-plane)

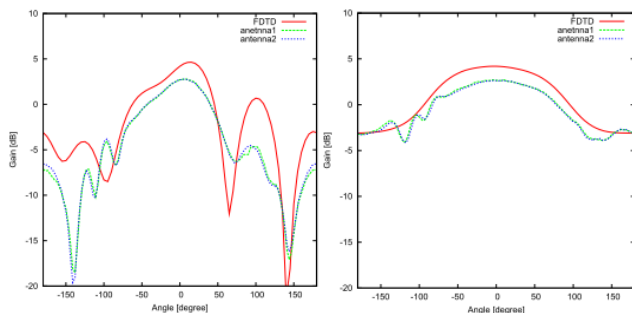


Fig. 16: 放射パターン 600 MHz (左: E-plane, 右: H-plane)

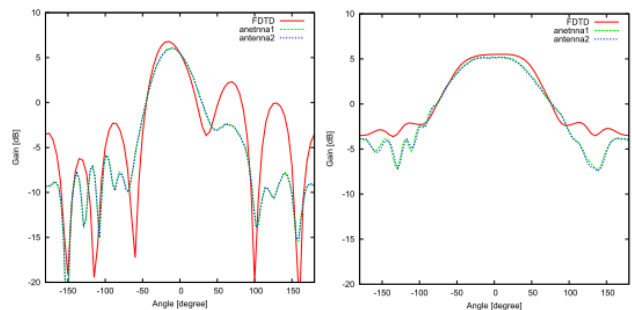


Fig. 17: 放射パターン 900 MHz (左: E-plane, 右: H-plane)

帯では良好な結果が得られ、ほぼ設計したアンテナの性能が確認できた。

6. まとめ

本研究ではUHF帯の超広帯域Vivaldi antennaの最適設