

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：56301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420425

研究課題名(和文)これまでの検知性能を圧倒的に上回る不発弾除去のためのレーダ技術

研究課題名(英文) More advanced GPR techniques for detecting underground unexploded ordnances and landmines

研究代表者

城戸 隆 (Kido, Takashi)

新居浜工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：70390995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地雷や不発弾探知用地中レーダの性能を向上させる目的で、ボウタイアンテナと呼ばれる広帯域アンテナの周波数特性改善を、銅箔面形状を三角形から変更することで行った。様々な銅箔面形状のアンテナの周波数特性の計算を行った結果、銅箔面形状を五角形とすることで、正三角形ボウタイアンテナに比べ周波数帯域が約81[MHz]広く、H/L値が24%高いH/L=6.7の五角形ボウタイアンテナを開発することが出来た。本アンテナは地中レーダ用アンテナとしては従来型ボウタイアンテナやヴィバルディアンテナ等の他の広帯域アンテナよりも有用であり、探査可能深度や地中イメージング性能の向上などが期待できる。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of advanced GPR techniques for detecting underground unexploded ordnances (UXOs) and landmines, wider frequency range antennas were developed by their shape deformations. After estimating several shapes of bow-tie antennas the pentagonal bow-tie antenna was 81 MHz wider operating frequency range and 24 % higher high/low operating frequency ratio than the regular triangle one. This antenna was more useful than the conventional regular triangle bow-tie antenna and the Vivaldi antenna and was expected to perform the higher detecting capability and the higher imaging quality.

研究分野：工学

キーワード：計測システム 地中レーダ 地雷 不発弾 GPR Landmine UXO

1．研究開始当初の背景

カンボジアやラオスなどかつての紛争地帯には対人地雷だけでなく不発弾（UXO）や対戦車地雷もいまだに除去されずに多くが残されたままとなり、対人地雷による被害者と同程度の被害者を不発弾が作り出している。対人地雷については我々のグループが開発した合成開口レーダ機能を有する地中レーダ、金属探知機とセンサ位置追跡システム用の画像センサを複合化したハンドヘルド地雷検知器ALISが実地雷源において大きな成果を上げ、効率的な除去の目処が立ちつつある。現在カンボジアで30個以上の実地雷を検知する実績を達成した。これは世界中で唯一、大学発の技術が実地雷検知に利用された成果である。

不発弾や対戦車地雷は対人地雷に比べより深部にあることが多く、対人地雷の検知に特化されたパルスレーダを搭載した ALIS では十分対応出来ない。パルスレーダは構成が簡単のためレーダの小型化が可能であるが、パルス幅や帯域幅が固定されるため、深度性能や分解能性能の適応範囲は十分ではない。被害の多さから不発弾除去のための十分な性能のレーダ技術の開発が望まれている。

2．研究の目的

本研究は、従来のパルス型地中レーダと比較して常識を上回る不発弾検知性能を実現する個別の不発弾の検知に深度性能及び分解能の性能の最適化が可能な超広帯域アンテナを有する連続波周波数掃引型地中レーダを開発することを目的とする。地中レーダは広い周波数範囲の電磁波を地中に送受信する必要があるため、広帯域アンテナは重要な要素となる。広帯域アンテナの周波数特性を向上させることで、地中レーダの性能を向上させることが可能である。

広帯域アンテナの周波数特性は、アンテナ形状によって決まる。よって本研究は電磁界シミュレータを用いて、広帯域アンテナであるボウタイアンテナの形状を最適化することを目的とした。

3．研究の方法

(1) 本研究では研究者がこれまで基礎的な開発を行ってきた実績に基づき、簡易な合成開口処理システムを利用することで3-5 年後に実用に供することが可能なシステムの完成を目標に掲げる。

不発弾検知のための超広帯域アンテナ技術の確立

広い帯域で整合特性、位相特性、指向特性の優れたボウタイアンテナを用い、コンパクトでありながら深さ 30cm 以下の比較的浅い対人地雷から 1m 前後の深さの不発弾や対戦車地雷の探知に対応するとともに、十分な分解能を確保できる超広帯域アンテナ技術を確立する。動作周波数の下限は 300MHz 以下、上限は 1GHz 以上を目指すため、形状やサイズの最適化を図る。

不発弾検知のための連続波掃引型レーダ技術・ハードウェア編の確立

コンパクトなシステムを実現するためハンドヘルドベクトルネットワークアナライザ（VNA）を用いて電磁波ベクトル計測を行う構成によりレーダ測定を行う不発弾検知のための連続波掃引型レーダ技術・ハードウェア編を確立する。広帯域アンテナの動作周波数に合わせて最適掃引周波数範囲を決定する。

不発弾検知に最適化されたレーダデータ処理技術・アルゴリズム編の確立

アンテナ特性や地面及び不発弾などのターゲットの反射特性により周波数軸で平坦でないレーダデータから最適化された周波数窓処理により、最も明瞭で分解能の高いレーダ画像が得られる不発弾検知に最適化されたレーダデータ処理技術・アルゴリズム編を確立する。適応型周波数フィルタとハニングフィルタ等の単純な周波数フィルタとについて比較を行う。

不発弾検知に最適化された連続波掃引型レーダ技術の統合

アンテナを含めたハードウェアとアルゴリズムからなる不発弾検知に最適化された連続波掃引型レーダ技術を統合し、アンテナ位置のトラッキング機能を組み込む。最終的にカンボジアにて評価試験を行い、不発弾検知性能の検証を行う。日本には少ない鉄分の

多いラテライト土壌での不発弾検知性能の評価が重要である。

4. 研究成果

(1) 地中探査レーダ用広帯域アンテナ

地中探査レーダ用アンテナは、一般的に地表面からの反射や、地表面とアンテナ間の多重反射が少なくなるように、その形状他接地条件について検討し設計を行う。また、レーダシステムの性能や運用性との関係より、小型で広帯域な特性が必須である。アンテナには線形アンテナ(ダイポールアンテナ)のような狭帯域アンテナとアンテナ銅箔面が二等辺三角形のボウタイアンテナのような広帯域アンテナがある。前述の通り、地中レーダは広い周波数の電波を使用するため、広帯域アンテナを使用する。広帯域アンテナにはボウタイアンテナやヴィバルディアンテナ等、多くの種類がある。ボウタイアンテナはアンテナ給電点からアンテナ先端に向けて徐々に広げていき、アンテナ先端で起こる反射を弱め、共振を弱めることで狭帯域アンテナに比べ広い周波数で効率の良い電磁波の放射を行うことができる。

(2) 地中探査レーダ用アンテナの改良環境

比較対象の従来形ボウタイアンテナとシミュレーション環境を図1に示す。図1中のボウタイアンテナを2つ作成し、図1の右のように1[m]間隔で対向するように設置した。またアンテナ以外の計算空間を空気と同じ比誘電率1に設定しシミュレーションを行った。

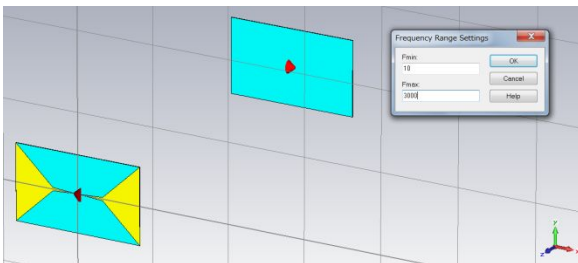


図1 周波数範囲設定とシミュレーション環境

(3) 従来アンテナとボウタイアンテナの改良のため

の評価方法

本研究では広帯域アンテナであるボウタイアンテナの S21 周波数特性の改善を目標とした。従来型の図2のボウタイアンテナを基に電磁界シミュレーション内で図3 ($L=164[\text{mm}]$ 、 $\theta=60[^\circ]$ 、 $\text{GAP}=3[\text{mm}]$ 、ポートインピーダンス $200[\Omega]$)のように構築した。

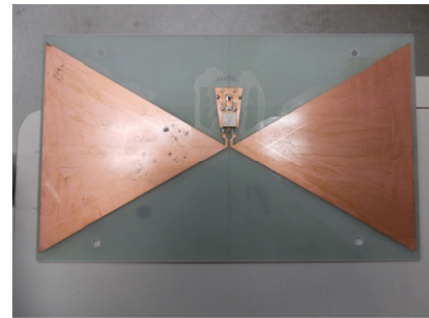


図2 従来型ボウタイアンテナ写真

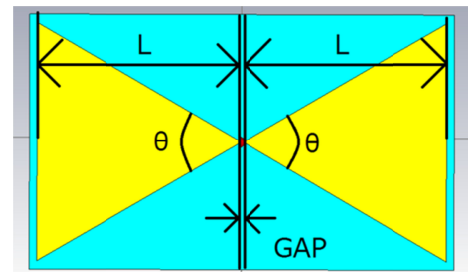


図3 設計したボウタイアンテナ

一般的にはアンテナの評価を行う際には s11 で評価を行うが、本研究ではアンテナの s21 周波数特性を評価する際に、s21 周波数特性の最大値から 6[dB]低下する周波数範囲を周波数帯域として評価した。これは 1 アンテナ当たり最大値から 3[dB]低下する周波数帯域(以降-3dB 周波数帯域)に相当する。また地中レーダは高い周波数の電磁波だけでなく、低い周波数の電磁波も使用するために、使用するアンテナの上限周波数と下限周波数も重要となる。よって本研究では、アンテナを評価する際、周波数帯域幅だけでなく、上限周波数と下限周波数の比(H/L 値)でも評価を行った。また、アンテナの位相特性から、アンテナ間の電波の遅延時間である群遅延を評価し比較を行った。

(4) ボウタイアンテナの改良手法

初めに改良型アンテナとして図4で示したアンテナ銅箔面が三角形のボウタイアンテナのアンテナ給電点部のアンテナ銅箔面の開き角のみを変えて繰り返しシミュレーションを行った。次にアンテナ銅箔面の形状を変更し繰り返しシミュレーションを行った結果、ボウタイアンテナのアンテナ銅箔面を正三角形より図4に示した五角形とした方がより良いS21周波数特性が得られたので、アンテナ銅箔面が五角形ボウタイアンテナをシミュレータ内で設計し、アンテナ給電点に対するアンテナ銅箔面の開き角や、アンテナ銅箔面の開き角が変わるまでの距離Xといったパラメータを変更し繰り返しシミュレーションを行い、s21周波数特性を算出しながら特性改善を図った。

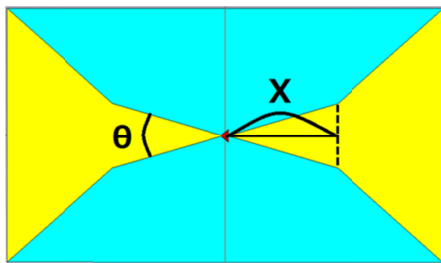


図4 五角形ボウタイアンテナパターン

(5) ボウタイアンテナの改良結果

最初に、図3で示した三角形ボウタイアンテナのアンテナ給電点部のアンテナ銅箔面の開き角()変更のシミュレーションを行った。図5に示されるように従来モデルの開き角である60[°]付近でH/L値が最大(約5.4)となることが分かった。この結果からアンテナ給電点部のアンテナ銅箔面の開き角を変更する方法では、既存のボウタイアンテナの周波数特性を向上させることは限界であると判断した。

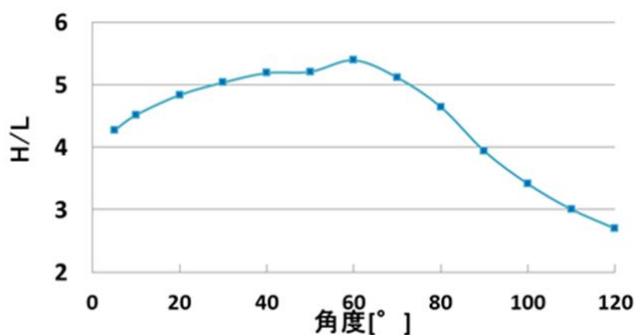


図5 正三角形アンテナのH/L値の開角依存性

次に、図4で示した五角形ボウタイアンテナのアンテナ給電点部のアンテナ銅箔面の開き角()を変更し繰り返しシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図6、図7及び表1に示す。図6、図7及び表1からアンテナ給電点部のアンテナ銅箔面の開き角度を7[°]とすることで、H/L値約6.1となることが分かった。従来モデルのボウタイアンテナのH/L値5.4と比較すると、H/L値が約13[%]向上していることが確認できた。この結果から、アンテナ給電点部のアンテナ銅箔面の開き角を7[°]とし、その他のパラメータを変更することで、更に性能向上させることが出来るのではないかと想定した。

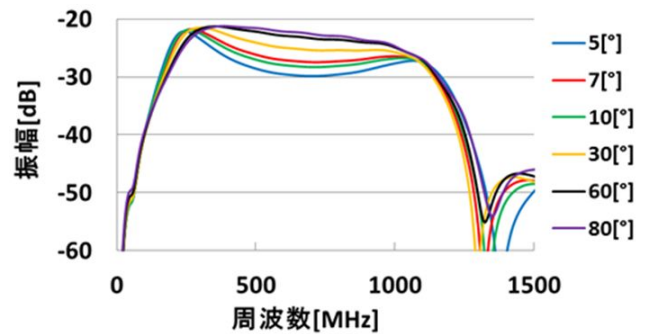


図6 五角形アンテナのS21周波数特性

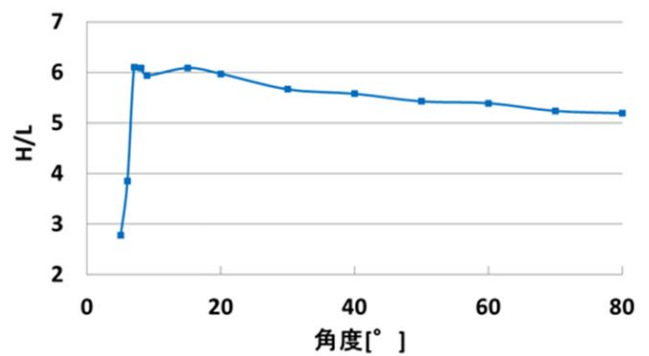


図7 五角形アンテナのH/L値の開角依存性

表1 五角形アンテナの周波数特性及びH/L値

[deg]	下限周波数[MHz]	上限周波数[MHz]	H/L	周波数帯域[MHz]
5	168.5	467.5	2.8	299.0
7	180.4	1101.4	6.1	920.9
10	174.5	584.1	3.3	409.6
30	192.4	1089.4	5.7	897.0
60	204.4	1101.4	5.4	897.0
80	213.3	1107.3	5.2	894.0

最終的に、図4で示した五角形ボウタイアンテナのアンテナ給電点部のアンテナ銅箔面の開き角()を7[°]とし、アンテナ給電点からアンテナ銅箔面の開き角が変わるまでの距離Xを繰り返し変更しシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図8、図9及び表2に示す。図8、図9及び表2より、アンテナ給電点からアンテナ銅箔面の開き角が変わるまでの距離Xが6[cm]としたときに、H/L値が約6.7で最大となることを確認することができた。このシミュレーション結果と従来モデルの正三角形ボウタイアンテナのH/L値5.4を比べると、H/L値が約24[%]向上していることが判明した。

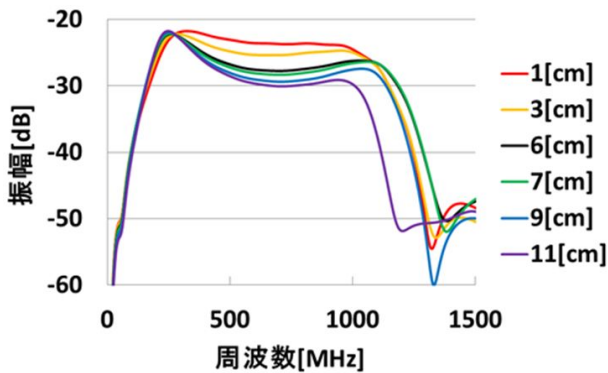


図8 五角形アンテナのS21周波数特性

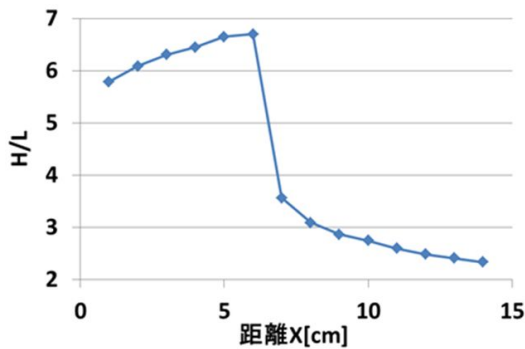


図9 五角形アンテナのH/L値の形状依存性

表2 五角形アンテナの周波数特性及びH/L値

X[cm]	下限周波数[MHz]	上限周波数[MHz]	H/L	周波数帯域[MHz]
1	192.4	1113.3	5.8	920.9
3	177.4	1119.3	6.3	941.9
5	171.5	1140.2	6.7	968.8
6	171.5	1149.2	6.7	977.7
7	171.5	611.0	3.6	439.5
9	171.5	491.4	2.9	319.9
11	174.5	452.5	2.6	278.1

更に、一番良いH/L値が得られたパラメータ(θ=7[°]、X=6[cm])の五角形ボウタイアンテナと正三角形ボウタイアンテナの群遅延特性を図10に、また周波数帯域内の最長遅延時間と最低遅延時間と平均遅延時間を表3に示す。計算結果より、五角形ボウタイアンテナは正三角形ボウタイアンテナに比べ、遅延時間のばらつきが大きいことが判明した。

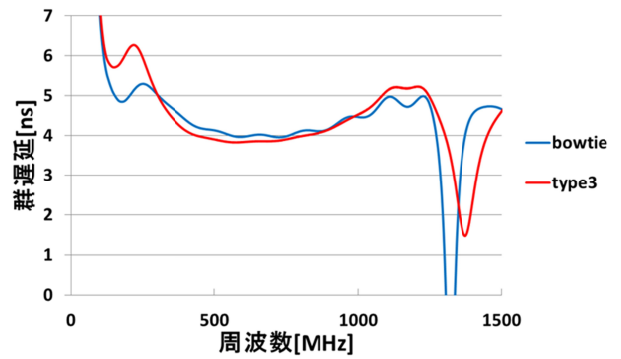


図10 ボウタイアンテナの群遅延特性

表3 ボウタイアンテナの周波数帯域内での遅延時間

	最短遅延[ns]	最長遅延[ns]	平均遅延[ns]
五角形	3.83	6.27	4.44
正三角形	3.95	5.30	4.36

(6) 各種広帯域アンテナの比較

各アンテナのH/L値の計算結果を下記に示す。

- ・ダイポールアンテナ: H/L = 2.8
- ・ヴィバルディアンテナ: H/L = 5.8
- ・ボウタイアンテナ(正三角形): H/L = 5.4
- ・五角形ボウタイアンテナ: H/L = 6.7

上記の計算結果から、アンテナ給電点に対する銅箔面の開き角θを7[°]、開き角が変わるまでの距離Xを6[cm]で設計した五角形ボウタイアンテナは従来型ボウタイアンテナや他の種類のアンテナに比べて高いH/L値を得られるため、広い範囲の周波数の電磁波を使用可能であるので、地中レーダ用アンテナとしては従来型ボウタイアンテナやヴィバルディアンテナ等の他の広帯域アンテナよりも有用であり、探査可能

深度や地中イメージング性能の向上などが期待できる。だが、電波を送受信する際の遅延時間のばらつきが大きいため、地中イメージングに影響を及ぼす可能性がある。群遅延特性の改善が今後の課題として挙げられる。

(7) 結論

本研究では地中レーダの性能を向上させるという目的で、電磁界シミュレータを用いてポウタイアンテナと呼ばれる広帯域アンテナの周波数特性改善を行った。ポウタイアンテナの給電点部の銅箔面開き角を変更することで、銅箔面が正三角形の従来のポウタイアンテナに比べ、より良い周波数帯域特性を持ち、H/L値がより高いポウタイアンテナの銅箔面形状の検討を行ったが、正三角形の形状が最適な形状であることが分かった。よって銅箔面開き角を変更するのではなく、銅箔面形状を三角形から変更することでの周波数特性改善を行った。様々な銅箔面形状のアンテナの周波数特性の計算を行った結果、銅箔面形状を五角形とすることで、正三角形よりも良い周波数帯域特性と高いH/L値を得た。最終的に正三角形ポウタイアンテナに比べ周波数帯域が約81[MHz]広く、H/L値が24%高いH/L=6.7の五角形ポウタイアンテナを開発することが出来た。

<引用文献>

M. Sato, J. Fujiwara, T. Kido and K. Takahashi, "ALIS Evaluation Tests in Croatia and Cambodia", Proc. of SPIE Defense, Security, and Sensing 2009: Sensor Technologies, 7303, 73031B-1, 2009

T. Kido Y. Yokota, F. Kawahara, and M. Sato, "Wide Band Stepped-Frequency Ground Penetrating Radar", Proc. of IGARSS 2011: 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, MO3-T06.2, 55, 2011

5 . 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

河端洋人、城戸 隆、佐藤源之、電磁界シミュレータを用いた広帯域アンテナの周波数特性改善 (1)、平成 27 年度電気関係学会四国支部連合大会 (高知工科大学) 第7分野 計測(1)、(2015.9)

河端洋人、城戸 隆、佐藤源之、電磁界シミュレータを用いた広帯域アンテナの周波数特性改善、平成 28 年電気学会全国大会 (東北大学) A103-C1 : 計測技術 計測基礎、(2016.3)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

城戸 隆 (Kido Takashi)

新居浜工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授
研究者番号 : 7 0 3 9 0 9 9 5

(2) 連携研究者

佐藤 源之 (Sato Motoyuki)

東北大学・東北アジア研究センター・教授
研究者番号 : 4 0 1 7 8 7 7 8

(3) 研究協力者

河端 洋人 (Kawabata Hiroto)

新居浜工業高等専門学校・電子工学専攻・専攻科 2 年生