

機関番号：12605

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760251

研究課題名 (和文)

ごく浅い領域を高解像度で検出するための電磁波アクティブレーダ用アンテナの開発

研究課題名 (英文)

A development of active radar antenna to detect quite shallow structures

研究代表者

有馬 卓司 (ARIMA TAKUJI)

東京農工大学・大学院工学研究院・講師

研究者番号：20361743

研究成果の概要 (和文)：

ごく浅い領域を電磁波アクティブレーダを用いて高解像度で検出する要素技術として必要な、送信アンテナと受信アンテナの直接結合を極端にすくなくする技術を実現した。その手法として、金属を周期的に配置する EBG 構造を送受信アンテナ間に組み込んだ。シミュレーションをした結果、最大で 35dB 以上結合を改善できる事が分かった。また、実際の目的である埋設物探査シミュレーションを行いその有効性を示した。一部実験を行いその有効性を実験的にも確認した。

研究成果の概要 (英文)：

In this study, we developed active radar antenna including periodic structure built by conductor to reduce direct electromagnetic coupling between transmitter antenna and receiving antenna. Form the simulation results; the coupling was reduced more than 35dB. Furthermore, the effectiveness of proposed antenna structure was also confirmed for detecting shallow object. The effectiveness is also confirmed by experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：アクティブレーダ，メタマテリアル，アンテナ，数値解析

1. 研究開始当初の背景

電磁波を用いた、不可視媒質検出用アクティブレーダ (図 1) は、レントゲンでは検出できないごく早期の癌を、高精度で検出する可能性や建物の柱などに建材が適切に使われているかなどを非侵襲で検出できる可能性が指摘され再注目されている技術である。電磁波を用いたアクティブレーダでは、図 1 の

ように送信アンテナと受信アンテナを並べ、送信アンテナから発した電波が、媒質にあたり、その反射波を受信アンテナで受信する。これをアンテナを移動しながら開口合成することで、媒質中の構造を推測できる。研究代表者らはこの技術についてこれまで研究を行い、いくつかの成果を挙げてきた。深い領域 (30cm 以上) を見る際は、送信電波の

出力を上げれば問題ない。しかし浅い領域をターゲットとする際は、図 1 に示すように、媒質中の構造からの反射電波(図 1 中の①)と、送信アンテナから直接受信アンテナに向かう電波 (図 1 中の②) が、重なって受信される。このため、構造からの反射が、送信アンテナの直接波と重なってしまい、構造からの反射を識別できない。そこでこれまでは、この直接波の影響を減らすため、送信アンテナと受信アンテナそれぞれにキャビティと呼ばれる金属カバーをつける。しかしこれは十分ではなく、さらにキャビティ内での不要な多重反射による虚像が出来ることも報告されている。この欠点を補うために、キャビティの中にフェライトで出来た電波吸収体を入れる試みもあるが、フェライトは非常に重く、またその効果も高くないことが報告されている。このような背景より、浅い領域を検出できるレーダ用アンテナの開発が望まれている。

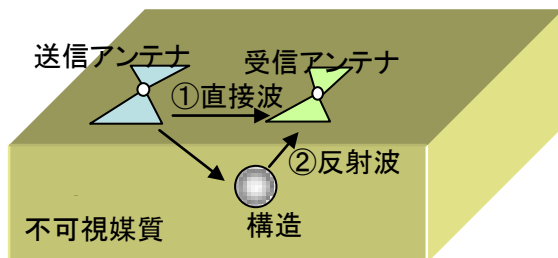


図1 アクティブレー

2. 研究の目的

本研究では、メタマテリアル技術をこの問題に適用し、これら問題の解決のための一連の研究を行い、浅い領域に対して有効なアクティブレーダを開発する事を目的とする。メタマテリアル技術とは、従来からある通常の媒質や材料を用いながらも特殊な構造を作ることによって、従来では得られなかった電気特性が実現できるものである。特に EBG 構造 (Electro Magnetic Band-gap: 金属を周期的に並べ、作成する、ある周波数で非常にインピーダンスが高い媒質になる) は、その高インピーダンス特性より電波領域で絶縁体として働くことが報告されている。また、構造によっては金属のみの構造でありながら電波吸収体として働くことが報告されている。また、メタマテリアル技術の一つである電磁波クロウキング(cloaking)技術は、構造を工夫する事により反射をまったくなくすることが、シミュレーション上で確認されている。本研究では、アクティブレーダの送受信アンテナの間にこれらの EBG 技術を用い、送受信アンテナの結合を低減させる。さらに、キャビティの内部に電波吸収材料として EBG 構造を用い、アンテナとキャビティの間で起こる不要な反射を低減させる技術を確立し、浅い

領域をターゲットとした電磁波アクティブレーダ用アンテナの開発を行う事を目的とする。一般的に電磁波アクティブレーダでは、送信波にパルスが用いられる。一方、EBG 技術はある周波数に対して有効である。そこで、広帯域な周波数成分を含むパルスに対しても有効な EBG 構造の開発を行う事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、下記(1)~(3)を用いて研究を行った。

(1) 本研究に適した EBG 構造の開発

EBG 構造はこれまで様々な形・構造が提案されている。しかし、本研究は EBG を動作させる方向に特徴がありこれまでと同じ形状ではうまく動作するとは考えられない。そこで、本研究の用途に適した EBG の開発を行う。これまでに提案されている EBG は、その真上にアンテナを置く事を想定している。本研究では、真上ではなく水平方向に配置する。そのため新たな設計をする必要があると考える。

(2) FDTD 法を用いた数値解析

本研究で対象とする EBG 構造を組み込んだアクティブレーダ用アンテナの開発を行うために本研究ではスーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーションを積極的に行い効率的な開発を目指した。この解析には FDTD 法を用いた。FDTD 法とは Finite Difference Time Domain の略であり時間領域でマクスウエルの方程式 (微分形)

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$$

を差分化して解析する手法である。

また、本研究で検討している構造は分子構造を模擬しているために、周期構造になる。FDTD 法では一般に有限の空間を解析するために、大きな周木構造の解析には工夫が必要である。そこで本研究では、周期構造中において、電磁界はつぎの Bloch の境界条件

$$\mathbf{E}(\mathbf{r} + \mathbf{a}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}} \mathbf{E}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r} + \mathbf{a}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}} \mathbf{H}(\mathbf{r})$$

を満たすことに注目した。ここで、 \mathbf{r} は位置ベクトル、 \mathbf{a} 格子ベクトル、 \mathbf{k} は波数ベクトルを表す。すなわち、計算領域を周期構造の一つの単位セルとし、その側壁に Bloch の境界条件に適用することで、無限周期構造中の電磁界を計算することができる。具体的には、はじめに Bloch の波数ベクトル \mathbf{k} を設定し、解析領域内に x, y, z 各方向に微小ダイポールアンテナを用いて、ガウスパルスを励振する。そして、解析領域内に設けた観測点に

より定常状態になった後の電界を記録する。この記録した電界の時間変化をフーリエ変換すると、設定した波数ベクトルに対応する固有周波数がピークとして検出される。この作業を \mathbf{k} に沿って繰り返すことで、周期構造と電波の入射波による誘電率の関係を示すチャート（バンド構造と呼ばれる）を求めることができる。下記に図2の格子構造のバンド構造解析結果（図3）を示す。このバンド構造のうち、伝搬モードが観測されない周波数領域をバンドギャップといい、電磁波が伝搬しない領域である。本研究では、このバンドギャップを如何に制御するかがポイントとなる。

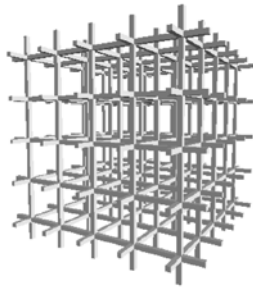


図2 金属ワイヤによる格子構造

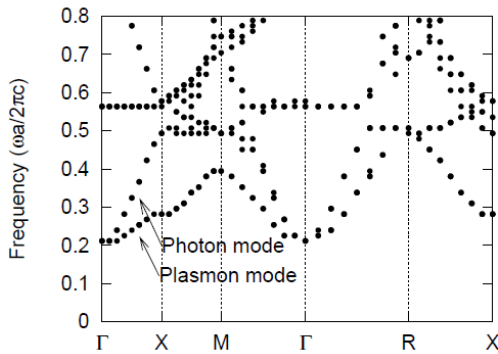


図3 格子構造のバンド構造

(3) 送受信アンテナの検討

アクティブレーダに必要な送受信アンテナは、広帯域のパルスを放射出来る事である。しかし本研究では、EBGを用いる。EBGの特性はある周波数帯域でのみ有効である。そこで、本研究では、EBGが有効な範囲に限定した周波数成分のみを放射するアンテナの開発が必要になる。また、EBGはある特定の方向の電界に対してのみ有効である。そのためおのずとアンテナの形状も制限される。本研究ではパッチアンテナを送受信に用いる予定である。

4. 研究成果

(1) EBG 構造

本研究で提案する EBG 構造を図4に示す。この構造において、地板およびパッチは完全導体とし、基板は誘電体で満たされているとした。また、それぞれのパラメータは $\epsilon_r = 1.06$, $W = 12 \text{ mm}$, $g = 4 \text{ mm}$, and $h = 12 \text{ mm}$ とした。上述した周期 FDTD 法を用いて、この構造の分散関係を計算した結果を図5に示す。

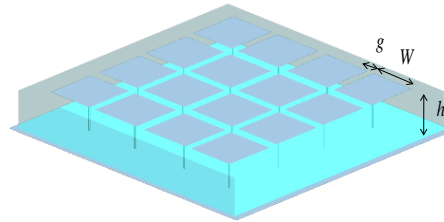


図4 EBG構造

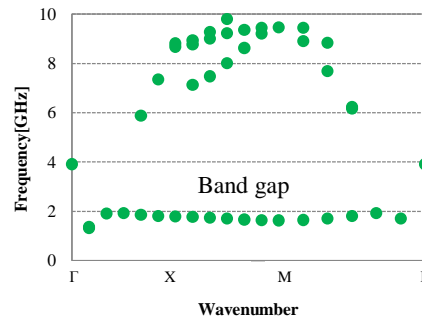


図5 分散関係図

この結果より提案する構造は 2GHz から 4GHz において、いわゆるバンドギャップが出来ている事が分かる。バンドギャップにおいて、電磁波は伝搬しないので、この周波数帯において電波を遮断し電磁波の絶縁体として動作させられる事が分かる。

(2) 送受信アンテナ

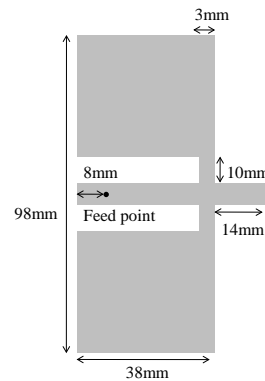


図6 送受信パッチアンテナ

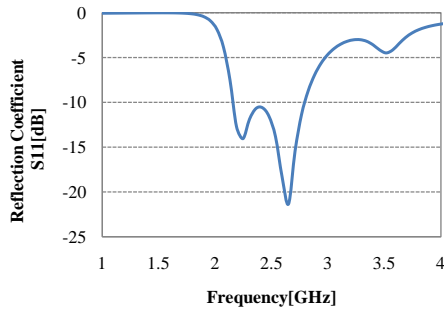


図7 アンテナの反射係数特性

図6に設計した送受信アンテナを示す。このアンテナはパッチアンテナであり、図6はパッチの形状を示している。基板とパッチの距離および基板の誘電率はEBG構造と同じである。図7にこのアンテナの反射係数を示す。アンテナの反射係数は図5に示したEBGの作動周波数である2GHzから4GHzに一致している事が分かる。以上より、本研究で設計したアンテナを用いる事で、EBG構造のバンドギャップを有効に利用できる事が分かる。

(3) EBG構造を組み込んだアクティブレーダアンテナの設計

以上の検討より、EBG構造と送受信アンテナの設計が出来た。ここでは、実際にEBG構造と送受信アンテナを組み込んだアクティブレーダアンテナの設計を行った。図8に提案するアクティブレーダアンテナの構造を示す。

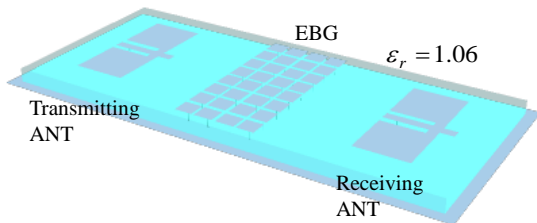


図8 提案するアクティブレーダアンテナ

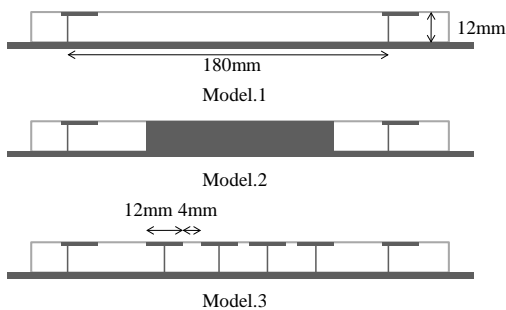


図9 アクティブレーダアンテナを側面から見た図

この構造のように、送受信アンテナの間にEBG構造を組み込む構造とした。本アンテナ

の優位性を示すために、EBG構造を配置している部位を図9中のmodel1, model2にそれぞれ示すように空気で埋めたもの、金属で埋めたものそれぞれと比較した。Model3は提案する構造である。比較は、送信アンテナから放射された電磁波が受信アンテナでどれほど受信されるかを調べた。その結果を図10に示す。図9に示すそれぞれのモデルにおいて、送信アンテナからパルスを送信し、受信アンテナにどれほど電圧が発生するかを示している。このシミュレーションでは、埋設物はないので、受信アンテナに一切電圧が発生しないのが良いといえる。

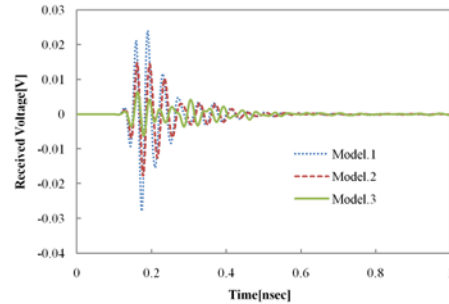


図10 アンテナの反射係数特性

図10より、我々が提案するアンテナは金属で埋めるよりも大幅に受信電圧を抑制する事が出来ている。

次に、EBGの列の数を調べてその特性を調べた。その結果を図11に示す。この図において縦軸は送信アンテナと受信アンテナの結合度を示すS21 [dB]である。横軸は周波数である。

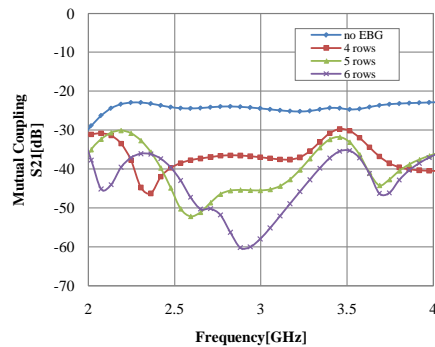


図11 EBG構造の列の数と遮断特性

この結果より EBG 構造の動作周波数である2GHzから4GHzにおいてEBG構造を6列とすると大幅な減衰が見られた。これより提案するアンテナにおいてEBG構造を6列並べた構造とする。

(4) 提案するアクティブレーダアンテナを用いたイメージング

最後に提案したアンテナ構造を用いたイメージングをシミュレーションにより行った。

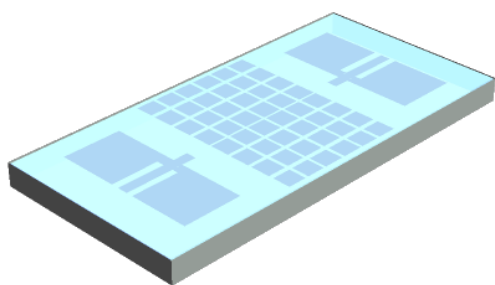


図12 最終的なアクティブレーダアンテナの構成図

最終的なアクティブレーダアンテナの構成を図12に示す。このアクティブレーダアンテナを用いて実際に埋設物のイメージングをシミュレーションにより行った。

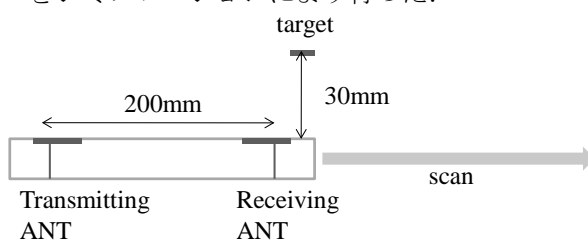
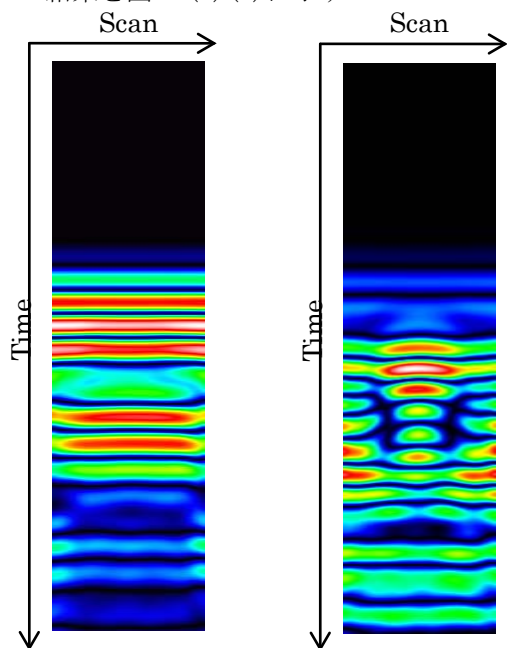


図13埋設物探査シミュレーション

このシミュレーションにおいては、アンテナから3cmと非常に浅い領域においてある埋設物を検出する事を主な目的とした。スキャンは水平方向に20cm移動させた(図13)。なお、今回のシミュレーションではその特性を知ることが目的のため空間は真空であるとした。また、スキャンは1cm間隔で行った。その結果を図14(a)(b)に示す。



(a) With PEC (b) With EBG
図14埋設物探査シミュレーション結果

図14(a)は図12に示す、アクティブレーダアンテナのEBGの部位を金属で埋めたもの、図14(b)は図12の通りのものである。この結果において横軸はスキャン方向であり、縦軸は時間である。スキャンする場所により埋設物からの反射が異なりスキャン方向に絵を重ねると埋設物が検出できるものである。図14(a)の結果は送信アンテナからの直接波が強く受信アンテナにより受信され、埋設物からの反射と重なって埋設物が観測できていない。一方、EBG構造を組み込んだアンテナによる図14(b)の結果は、直接波が大幅に軽減されている事より、埋設物が識別できている。この事より提案するアンテナは浅い領域にある埋設物の探査に有用である事が分かる。

(5) 成果のまとめ

本研究においては、浅い領域を高精度に検出できるアクティブレーダ用アンテナの開発を行った。特に送信アンテナと受信アンテナの直接結合を低減する技術について研究をおこなった。要素技術として、本研究に適した電磁波を遮断できるEBG構造の開発、本研究に適した送受信アンテナの開発、最終的なアクティブレーダ用アンテナの開発を行った。EBG構造においては、本研究に必要な水平方向の電磁波の遮断が実現できた。送受信アンテナにおいては、EBG構造の動作領域と合致する周波数特性のアンテナを設計できた。アクティブレーダ用アンテナの開発においては、EBG構造を6列とする事で最大35dB以上直接結合を低減できる事が分かった。最後に実際に浅い領域にある埋設物の検出を行った。提案するアンテナを用いたイメージングにおいては埋設物を良好に識別できた。一方比較対象とした、送受信アンテナ間を金属で仕切ったモデルでは埋設物をうまく識別できなかった。

以上より、本研究の目的は十分達成できたと考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1. Takuji ARIMA and Toru UNO, "Low electromagnetic coupling bistatic subsurface radar using ebg structures" Proc. 2010 International Workshop on Antenna Technology, PS2.28, 2010.3 査読有, 4ページ

2. Amin Gul Hanif, Yujiro Kushiya, Toru Uno, Takuji Arima, "FDFD and FDTD

Methods for Band Diagram Analysis of 2-Dimensional Periodic Structure” IEICE Trans.B,Vol.E93-B,No.10,pp.2670-2672,Oct. 2010.10, 査読有, 3 ページ

3. Takuji Arima, Soichi Watanabe, Kanako Wake and Toru Uno, "An fdtd analysis of induced current in pec wire which touched semi-infinite ground plane by using surface impedance boundary condition", Proc. 2010 IEEE AP-S Internatinal Symposium, APS.2010.5561088, pp.1-4, 2010.7, 査読有, 4 ページ

4. Amin Gul Hanif, Takuji Arima and Toru Uno, "FDFD and FDTD Analysis of Photonic Crystals and Loss Effect on Propagation Modes", Proc. 2010 Internatinal Symposium on Anennas and Propagations, pp.167-170, 2010.7, 査読有, 4 ページ

〔学会発表〕 (計 3 件)

1. 武藤知之, 有馬卓司, 宇野 亨 "EBG 構造を用いたレーダ用アンテナに関する研究", 2011 年 電子情報通信学会 総合大会 (東京都)

2. Amin Gul HANIF, 有馬卓司, 宇野 亨 "Comparison of FDFD and FDTD Methods for 2-Dimensional Periodic Structure Analysis" 2010 年電子情報通信学会通信総合大会 2010 年 3 月 18 日 東北大学 (宮城県)

3. 榎山祐次郎, 有馬卓司, 宇野 亨 "格子構造型メタマテリアルによる疑似表面プラズモンの発生", 2010 年電子情報通信学会通信総合大会 2010 年 3 月 18 日 東北大学 (宮城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有馬 卓司 (ARIMA TAKUJI)

東京農工大学・大学院工学研究院・講師

研究者番号：20361743