

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04173

研究課題名（和文）等価定理を利用した時間領域逆散乱解法の開発

研究課題名（英文）Development of Time Domain Inverse Scattering Approach Based on the Field Equivalence Principle

研究代表者

森山 敏文（MORIYAMA, Toshifumi）

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20452873

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、入射波の情報を使わず、更に電界のみを利用した逆問題解法について検討を行った。具体的には、観測曲面で観測した電界を利用して内部等価問題を考え、逆問題を解く方法を考え、2次元の場合の数値計算で提案方法の妥当性の確認を行った。さらに、等価問題を実現するために観測局面上の全電界を密に計測する必要があるが、補間を利用して疎に観測しても逆問題を解けることを示した。更に、3次元での検討も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究では、電波で物体の比誘電率分布などを求める方法を検討した。これは、レーダーのように物体の反射率を計測する方法と違い、物体の物理量を直接計測するものである。学術的に非常に重要な研究である。また、逆散乱問題を解くときにアンテナのモデル化を必要としないので、非常に計算を行いやすい。よって、提案する方法が医療やインフラのモニタリングなどに適用しやすくなる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we considered an inverse scattering problem that uses only the electric field without using the information of the incident wave. Specifically, we developed a method to solve the inverse scattering problem by considering the initial-boundary value problem using the electric field obtained on the observed curved surface, and confirmed the validity of the proposed method by numerical calculation in the case of two dimensions. Furthermore, it is necessary to measure the total electric field closely on the observation process, but it was shown that the inverse problem can be solved even if the observation is sparse using interpolation. Furthermore, we also conducted a three-dimensional study.

研究分野：計測工学

キーワード：逆散乱問題 等価定理 補間 イメージング

1. 研究開始当初の背景

生体内の映像化，地中埋設物探査，非破壊検査等，様々な目的で不可視情報の可視化技術の開発が，強く望まれている．電波を利用したセンシング技術では，レーダの原理に基づいた方法がある．この方法では，レーダ信号の反射エコーから合成開口処理などのイメージング技術により異常物体の存在の有無及び位置を知ることができる．しかし，その画像は物体の反射率分布を表す二次量である．反射率は，入射角や散乱角，又は偏波に依存し，測定条件を変えると反射率も変化するため，ターゲットの大まかな形状しか解らない．もう一つの電波によるセンシング技術に，逆散乱解析に基づくイメージング法がある．この手法では，一次量である対象領域の材料の特性を表す媒質の電気定数(比誘電率，導電率など)の空間的分布を映像化できる．これは，入射角や散乱角，又は偏波より変化しない一次量のため，測定状況が変わってもターゲットの形状と内部分布を知ることができ，更に材料や生体組織の特定も容易に行える．これは，逆散乱問題の大きな利点である．また，画像の分解能についても，二つの手法で違いがある．レーダの分解能は，電波の帯域に比例する．しかし，逆散乱問題の分解能は，電波の帯域に依存せず，実験で波長の 20 分の 1 を実現した例があり，この点でもレーダより優れている．

逆散乱問題は解の一意性は保障されているが，計測誤差や外部雑音が解に与える影響が大きい‘不適切(ill-posed)問題’である．逆散乱問題の計算の流れは図 1 のようになる．アンテナ近傍に逆問題の解析対象があるような問題では，入射波が近傍界となるため，順問題を解くときに，アンテナを精密にモデル化して電磁波を数値的に解く必要がある．そして，逆問題の計算精度は，アンテナのモデル化に依存する．しかし高精度に逆問題を解くために，1) 数値計算でのアンテナのモデル化が複雑で困難，2) 大きい数値計算資源(メモリなど)が必要・計算時間が長い，などの問題があった．また，測定環境に関して，3) 電波暗室などの高価な電磁界計測環境が必要なることも問題となる．そのため，これらの問題を解決する技術が必要であった．

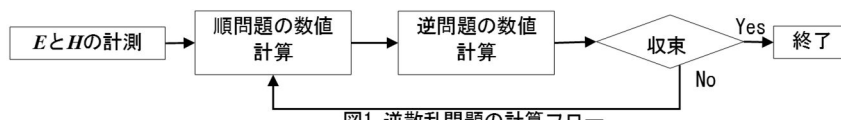


図1 逆散乱問題の計算フロー

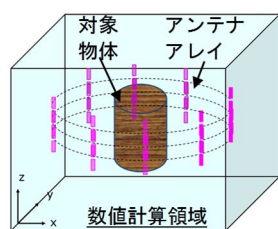


図2(a) オリジナルの問題

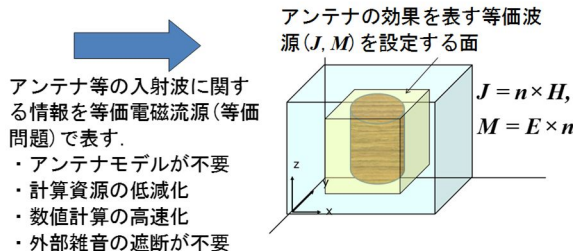


図2(b) 等価問題

2. 研究の目的

逆問題の計算法には，周波数領域と時間領域の二通りある．時間領域法はパルスを送受信することを想定するため，一度の観測で多数の周波数成分のデータを取得する利点があり，不適切問題でも周波数領域の解法よりも安定的に問題を解ける．時間領域での 1), 2) と 3) の問題の 1) と 2) の問題の解決策として，計測で解析対象の周囲で全電磁界(入射波 + 散乱界)を電界(E)と磁界(H)をプローブで観測できれば，順・逆問題でアンテナの効果を等価電磁流源(J, M)に置き換えて計算することができる．その結果，アンテナのモデル化を省略でき，つまりアンテナ等の入射波の情報を利用しなくても逆散乱問題を解ける(図 2)．そして，計算負荷を低減でき，且つ外部雑音も入射波の一部となり雑音の遮断が必要なくなり，3) の問題も解決できる．よって，実際の逆散乱問題に適用するには，等価定理に関する計測技術と計算技術をどのように実現するかが問題となる．

本研究の目的は，従来のアンテナ近傍での時間領域の計測データを用いた逆散乱問題で，1) 数値計算でのアンテナのモデル化が必要，2) 大きい数値計算資源が必要・計算時間が長い，3) 電波暗室などの電磁界計測環境が必要，などの問題を解決し，3次元の実問題に応用することである．そのために，独自性のある逆問題で利用する等価原理を図 3 で説明する．ここで，図 3(a)のオリジナル問題における Primary source は，アンテナを表す．この時の入射波と散乱波は，観測曲線(Observation surface: 2次元問題)あるいは観測曲面(3次元問題)上で観測する．そして，図 3(b)に示すように観測した電磁波から等価電磁流源を求める(この時の単位法線ベクトル n は，内側である)．その結果，外部からの雑音や多重反射もこの等価電磁流源に含まれてしまい，逆問題に影響しなくなる．この等価電磁流源を用いることにより，図 3(b)の等価問

題では、アンテナをモデル化する必要が無くなり、観測曲線の内側の電磁界はオリジナル問題と同じになる。但し、観測曲線の内部のターゲットはオリジナル問題と同じである必要がある。そして、外側の電磁界は零となる。もし、ターゲットが異なるならば、観測曲線内の電磁界は、オリジナル問題と同じにならない。また、外側の電磁界も零にならない。そこで、外部の電磁界が零になるように内部の物体分布を変えていく最小化問題を設定して、逆問題が計算できる(図3(d))。実際の3次元の場合では、実験で電磁界プローブでの全電磁界の計測(この研究では、最終的に、電界の計測のみを行う方法を検討する)が必要となる。従来、このような電磁界の時間領域の計測の研究は、殆ど行われていない。そこで、この研究では、1) “アンテナのモデル化を必要としない3次元での時間領域逆散乱問題解法の開発”と2) “電磁界プローブによる電磁界計測方法の開発”と、これを簡略するための図3(c)の境界値問題の考え方を利用した電界のみを観測する電界プローブでの計測方法の開発を目的として研究を行う。本研究で提案する逆解析法は

- (1) 対象領域内における入射波を推定するために送受信アンテナの形状を具体的に考慮した数値シミュレーションを行う必要がない(計算の簡略化, 数値計算資源の低減)。
- (2) 高速で逆問題の解を得ることができる(計算の高速化)。
- (3) 送信アンテナや送信源を用意せずに、携帯電波やデジタル放送の電波を逆散乱問題の入射波として利用できる(計測の簡略化)。

などの際立った特徴がある。特に、特徴(3)は、アンテナのモデル化が必要でないため、様々な野外の電磁波(携帯電話の電磁波など)を逆散乱問題の入射波として利用できる。これまでの計測方法では、野外の電磁波は外部雑音(不要電磁波)であり、これらを極力避けるために高価な電波暗室を用意して計測環境を整える必要があった。しかし、今回提案する方法では電磁波の計測で当たり前の電波暗室を必要とせず、逆に外部雑音を逆問題の入射波として利用でき、今までの計測の常識を変えるチャレンジな方法である。

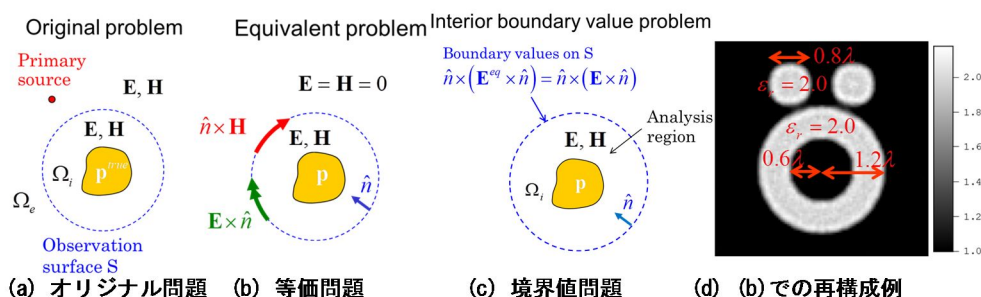


図3 この研究での重要なアイデアと計算結果例

3. 研究の方法

上記の逆問題を実際に行うためには、以下の4つを検討する必要がある。

- (1) 観測曲線上での電磁界を離散的に配置した電磁界プローブで計測する必要がある。受信位置の数は多いほど良いが、計測の簡素化の視点から、どの程度受信点を減らせるかを検討する。
- (2) 計測状況においては十分な数の受信点を配置することができないような場合もありうる。そのような場合にも対処できるように、仮想的な受信点での電磁波データを実際の受信点のデータから補間することになる。その際どのような補間が適しているかを検討する。
- (3) この新しい逆散乱解析法は観測曲面上の電界と磁界の両方の接線成分を計測することを前提にしているが、計測の手間を減らすためには電界の接線成分のみの計測が好ましい。そこで、図3(c)に示すような境界値問題で電界だけを利用して、逆散乱問題を解く方法も検討する。
- (4) (1), (2), (3)を考慮した逆散乱解析プログラムの開発

以上のような観点から、プローブや観測間隔、補間方法などの計測方法、更に提案手法の3次元での数値シミュレーションなどでの有効性の検討を計画した。

4. 研究成果

(1), (2)と(3)を検討するために、2次元の場合であるが、図3(c)に示す境界(点線)で観測した電界で等価問題を計算することを試みた。等価問題を解くには、時刻 $t = 0$ から時刻 $t = T$ まで観測曲面 $\partial\Omega$ 上(図3(c)に示す境界(点線))の電界を連続的に計測する必要がある。実際の等価問題は、FDTD法などによって解くため、セルサイズに対応し、1/10 又は 1/20 間隔で電界を計測する必要がある。しかし、これを実現するのは不可能である。そこで、1/2 程度の間隔で粗く電界を観測し、その間を補間して与える。今回の検討では、計算が簡単で精度が高

い補間法である Zero padding を使用した。この検討では、2次元 FDTD を利用して計測値を得る。但し、観測局面上 $\partial\Omega$ の電界値を疎に得る。そのデータを観測値として、FDTD のタイムステップ毎の観測局面上 $\partial\Omega$ の全てのセル上の電界値を補間して求める。このデータを等価散乱問題を解くときに利用する。数値シミュレーションの計算では、2次元問題(TMz)を仮定した。印加電流源は、

$$\mathbf{J}_n = \frac{d^3}{dt^3} \exp[-\alpha^2(t-\tau)^2] \delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_n) \hat{z} \quad (1)$$

であり、 \mathbf{r}_n は n 番目の波源の位置を表す。計算では、 $\tau = 132 \Delta t$ 、 $\alpha = 5.6/\Delta t$ とした。この時の最高周波数の波長は、式(1)のパルスの周波数成分の最大成分から 5%に低下した高周波側の周波数とした。FDTD の計算パラメータは、セルサイズ $\Delta = \Delta x = \Delta y = \lambda/10\sqrt{4} = 0.05\lambda$ 、時間ステップ $\Delta t = 0.98(\Delta x/c\sqrt{2})$ である。また、FDTD の解析空間は $180\Delta \times 180\Delta$ 、計測を行う時間 T は $800 \Delta t$ とした。ターゲットの状況は、図 4 に示す。式(1)の波源は、原点を中心にした $5\lambda \times 5\lambda$ の矩形境界上に 12 個配置した。また、 $3\lambda \times 3\lambda$ の矩形境界上で、内部領域 Ω_i の等価問題を計算するための電界の計測を行った。二つのターゲットを自由空間中に配置し、其々の比誘電率は $\epsilon_r = 2$ とした。ターゲット 1 は、解析領域の $(0.25\lambda, 0.75\lambda)$ に配置し、サイズは $2.00\lambda \times 1.00\lambda$ とした。ターゲット 2 は、解析領域の $(-0.75\lambda, -0.75\lambda)$ に配置し、サイズは $1.00\lambda \times 1.00\lambda$ とした。

最初に、図 4 にある波源での 350 タイムステップでの観測線上の電界値を、4 個置き (0.2 : 青線)、8 個置き (0.4 : 緑線)、16 個置き (0.8 : ピンク線) で観測し、Zero padding で補間した波形を図 5 示す。オリジナルの波形を赤線で示すが、0.2 と 0.4 毎に観測し補間した電界分布は、ほぼオリジナルの電界分布と同じになった。但し、波形が急激に変化する場所では、若干の差異が生じている。

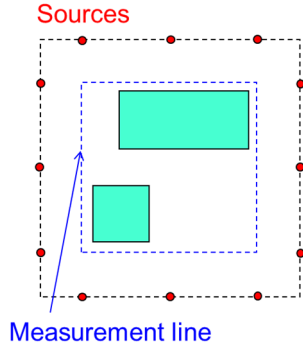


図 4 計算モデル

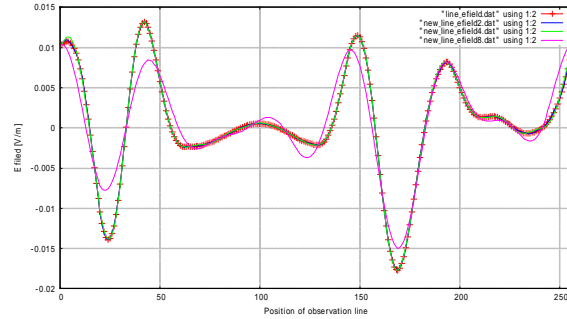


図 5 補間による電界分布

更に、0.2 と 0.4 毎に観測し補間した電界分布を用いて、式(2)で表される Ω_i 内のエネルギーをタイムステップ毎に計算した結果を図 6 に示す。

$$Q(\mathbf{p}) \equiv \int_{\Omega_i} \left[\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r(\mathbf{r}) |\mathbf{E}^{eq}(\mathbf{r}, T)|^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r(\mathbf{r}) |\mathbf{H}^{eq}(\mathbf{r}, T)|^2 \right] d\mathbf{r} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \int_{\Omega_i} \left[\epsilon_r(\mathbf{r}) |\mathbf{E}^{eq}(\mathbf{r}, T)|^2 + \mu_r(\mathbf{r}) |\eta \mathbf{H}^{eq}(\mathbf{r}, T)|^2 \right] d\mathbf{r} \quad (2)$$

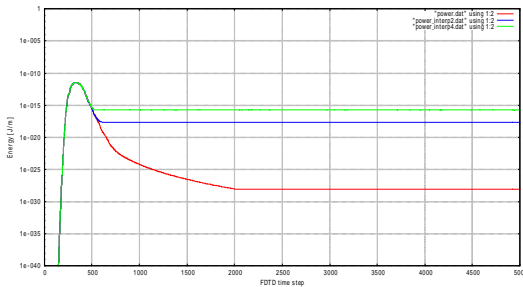


図 6 タイムステップ毎のエネルギー

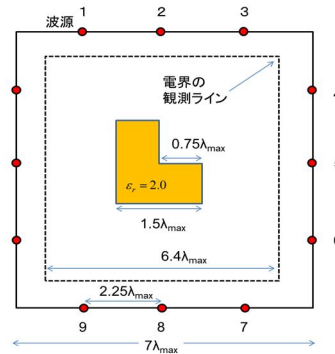


図 7 逆散乱問題の計算モデル

この時の等価問題を解くときのターゲットは真のターゲットを与えており、時刻 $t = T$ 以降は 0

になる．赤線がオリジナル，青線と緑線が 0.2 と 0.4 毎に観測し補間したデータから求めたエネルギーである．数値計算のため赤線のエネルギーはゼロにならないが，かなり小さくなる．一方，補間したデータを用いた求めたエネルギーは，赤線に比べて大きい．これは図 5 に示したように補間した電界分布が完全にオリジナルの波形と一致しないため，その差異がエネルギーとして内部領域 Ω_i に残ったためである．これにより，Zero padding で補間を利用することによりプローブで計測する電界を減らせることが確認できた．

さらに，(4)の検討として補間した電界値を利用して逆散乱問題を解くことを行った．FDTD の解析空間は $220\Delta \times 220\Delta$ ，計測を行う時間 T は $1000\Delta t$ とした．式(14)の波源は，原点を中心にした $7\lambda \times 7\lambda$ の矩形境界上に 12 個配置した．また， $6.4\lambda \times 6.4\lambda$ の矩形境界上で，内部領域 Ω_i の等価問題を計算するための電界の計測を行った．再構成のターゲット（L 字状の筒状ターゲット）を自由空間中の再構成領域の中心の配置し，その比誘電率は $\epsilon_r = 2$ とした．ターゲットの状況は，図 7 に示す．観測線上の電界値を，FDTD の Yee セルの 4 個置き(0.2 : 青線)，8 個置き(0.4 : 緑線)，16 個置き(0.8 : ピンク線)で観測し，Zero padding で補間した．図 8(a)に 0.2 毎の間隔で計測した電界の観測値からの再構成図を示す．再構成は，勾配法を利用して反復計算により行った．この結果は，80 反復目の再構成図である．平滑化フィルターなどを利用していないため，最大比誘電率の平らな部分で凸凹しているが，L 字状の筒状ターゲットの形状を確認できる．更に，0.4，0.8 の間隔で計測し，補間したデータからの再構成した結果を図 8(b),(c)に示す．0.8 では，L 字状の形状を確認できない．以上から，観測の間隔を 0.4 程度までは取ることができることを確認できた．

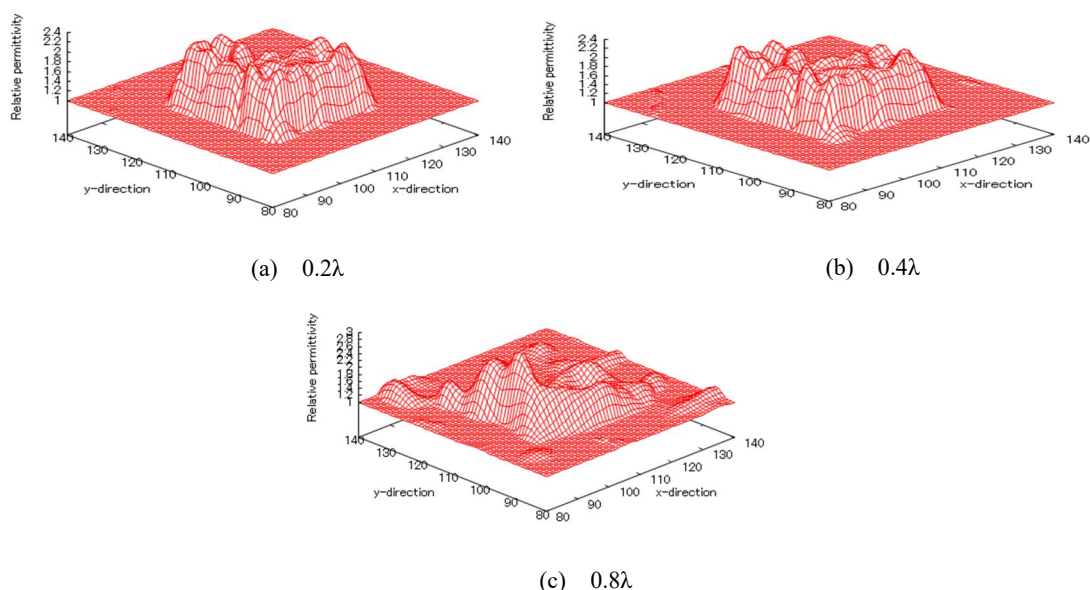


図 8 比誘電率の再構成図

以上から，電界のみを利用し，さらに補間を利用し計測の手間も低減した提案方法で逆問題を解けることを確認した．

その他に，ここで述べた内容を現実の問題で検討できるように 3 次元の問題への適用することも試みた．3 次元 FDTD を用い，電界のみによる境界値問題を解くことで等価問題を計算できることを確かめた．また，購入したベクトルネットワークアナライザとプローブとしてダイポールアンテナを用い，電界の計測の計測も試みた．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 森山 敏文	4. 巻 139 巻 2 号
2. 論文標題 初期乳がん検出に向けたマイクロ波マンモグラフィ装置の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会誌	6. 最初と最後の頁 98-101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjournal.139.98	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 森山敏文・MA HAIYANG
2. 発表標題 補間した計測値を用いたエネルギー汎関数による逆散乱問題
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告宇宙航行エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森山敏文・森根凜太郎・HAIYANG MA・田中俊幸・竹中 隆
2. 発表標題 補間した観測電界データを用いた入射波の情報を使わないエネルギー汎関数による円筒ターゲットの再構成
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森根凜太郎, 田中俊幸, 森山敏文
2. 発表標題 エネルギー汎関数を利用したGAによる逆散乱解析-2次元の場合-
3. 学会等名 電子情報通信学会九州支部学生会講演会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Toshifumi Moriyama, Zhi Qi Meng, Takashi Takenaka
2 . 発表標題 An Inverse Scattering Method Using Time-reversed Fields with Edge-preserving Regularization
3 . 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Toshifumi Moriyama, Toshiyuki Tanaka, Takashi Takenaka
2 . 発表標題 Inverse scattering approach by using cost functional consisting the approximated stored energy with no information on incident field - Two dimensional case -
3 . 学会等名 International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Toshifumi Moriyama, Toshiyuki Tanaka, and Takashi Takenaka
2 . 発表標題 Microwave Imaging by Using Time Reversal Fields
3 . 学会等名 12th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Toshifumi MORIYAMA; Toshiyuki TANAKA; Takashi TAKENAKA
2 . 発表標題 Inverse scattering approach by using cost functional consisting the approximated stored energy with no information on incident field
3 . 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 森山敏文・森根凜太郎・鷲見敏郎
2. 発表標題 補間した計測値によるエネルギー汎関数を用いた勾配法での逆散乱アルゴリズム
3. 学会等名 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap:森山敏文(長崎大学) https://researchmap.jp/read0147500 長崎大学大学院工学研究科 森山敏文研究室 http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/labs/emlab/moriyama/index.htm
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------