

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420335

研究課題名(和文) 状態遷移確率モデルを用いたレーダ信号処理法の構築とその探査・診断技術への応用

研究課題名(英文) Radar signal processing using a state transition model and its application to target detection and nondestructive evaluation

研究代表者

西本 昌彦 (NISHIMOTO, Masahiko)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：60198520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：電磁波レーダはコンクリート構造物の非破壊検査や地中埋設物の探査・識別・同定など、センシング手法として幅広い応用が期待されているが、その性能はまだ十分とは言えない。本研究は、超広帯域レーダを用いたセンシング技術の性能向上を目的として、新しいレーダ信号処理法の開発を行ったものである。その結果、識別・同定・診断の性能向上に適した信号処理法を構築することができた。また、構造物深層部のデータ取得のため、挿入型のセンシングアンテナの開発も併せて行い、良好な性能のアンテナを設計・製作した。

研究成果の概要(英文)：UWB (Ultra Wideband) radar is one of the most useful sensors for nondestructive evaluation of concrete structures and for subsurface sensing. Although the UWB radar sensor has great potential for these applications, its reliability is still not sufficient when it is applied to accurate evaluation of the corrosion state of the reinforced concrete structures and accurate classification or identification of shallowly buried objects. In this study, we have developed new signal processing techniques for improving evaluation, classification, and identification performance of the UWB radar sensors. Furthermore, we have also developed an insertion-type UWB sensing antenna that is available for collecting radar data from deep part of concrete structures.

研究分野：波動信号処理工学

キーワード：地中レーダ レーダ信号処理 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

高度成長期に建設されたコンクリート構造物の多くが、現在耐用年数を迎えている。また、最近建設されたコンクリート構造物についても、大規模地震などの自然災害による損傷や施工時の不良工事や材料そのもの起因する劣化などにより、耐用年数を迎える前に倒壊する危険性もある。このため、コンクリート構造物の安全性を確保し信頼性を向上させる上で「構造物の点検・診断」が重要課題であり、構造物を傷つけることなく構造物内部に発生している劣化や変状を定量的に評価できる非破壊検査技術の研究開発が切望されている。弾性波や打音を用いる検査手法に比べ、電磁波レーダは非接触で検査が可能で、検査技師が特別な技術を習得することなく、安全かつ簡便に使用可能な検査・診断法である。しかし、現在のレーダではコンクリート中の鉄筋のおよその位置は検出できるが、鉄筋径の推定はもちろん、はく離、腐食、亀裂などの劣化箇所の検出・識別に対しては難しいのが現状である。

一方、紛争地域の未処理地雷は紛争終了後も一般市民の安全を脅かすと同時に、その国の経済的復興の重い足かせとなっている。このため、人道的地雷除去は世界的な問題であり、日本には地雷探査・除去に関する技術的な国際貢献が求められている。地中レーダ型地雷探知器は金属地雷だけでなくプラスチック地雷も探知可能であるが、地中や地表面の様々な物体（小石、砲弾片など）からの不要反射のため、地雷と地雷以外の物体の区別が非常に難しい。このため、現在、地雷探査用地中レーダに要求されているのは、地雷と地雷以外の物体を識別するための「高い識別能力」である。しかし、地表面の粗さ、土壌の損失や不均質性の影響に伴うイメージング解像度の悪さのために識別精度は非常に低い。これが地雷の除去処理効率を下げ大きな要因であるが、これに関しては、未だ国内外でも有効な手法が確立されていない。

以上のように、電磁波レーダは非破壊検査技術や地雷除去などに大きく貢献できるポテンシャルを有しているが、その能力はまだ十分引き出されてはいないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者がこれまで開発してきた各種レーダ信号処理法をベースに、超広帯域センシングレーダに用いる高精度のレーダ信号処理法の構築を行っている。具体的な内容は以下のとおりである。

(1) 鉄筋コンクリートの腐食や劣化状態の推定、埋設ターゲットの識別・同定に適した特徴量を提案する。

(2) 計測データの系列情報を利用した高精度の信号処理法を構築する。

一方、コンクリート中を電磁波が伝搬する距離には限界があり、構造物深層部での検査が困難であるという問題点がある。実用上の

適用限界は深さ 200mm 程度で、コンクリートの深層部の検査への適用は難しい。このため、深層部のデータを取得する方法の開発が必要となる。この目的のため、本研究では、以下についても検討を行っている。

(3) コンクリートにあけた検査用の細穴に挿入する挿入型センシングアンテナを設計・製作し、その特性評価を行う。

3. 研究の方法

(1) コンクリート中の腐食部分や埋設ターゲットからのレーダ応答は、表面からの強い反射応答や媒質の不均質によって乱されるため、ターゲットの特徴抽出は容易ではない。本研究では、まず研究代表者がこれまで提案してきた Matching Pursuits の手法を改良し、対象物からの応答波形を精度よく分離する。次に、識別・同定・診断のための有力な特徴量として、散乱システムのパラメトリックモデルから求められる振幅パラメータ及び位相パラメータを提案し、その有効性を数値シミュレーションと実測値を用いて確認する。

(2) 散乱システムのパラメータは初期応答から推定しているため、得られた特徴量は散乱中心近傍のターゲット情報しか有していない。このため、マルチアスペクト計測（多方向での計測）によって得られたデータを用いることにより、識別・同定性能の向上を図る。マルチアスペクト計測を行うことにより、計測データ数が増えるのみならず、データの系列情報、すなわち、アスペクト角が変化することによって特徴量がどのように推移していくかを調べることができ、識別・同定のための有効な情報となる。系列情報の処理法として、ここでは音声認識で広く使われている隠れマルコフモデル (hidden Markov model: HMM) を採用する。

(3) 構造物深層部のデータを取得するための挿入型センシングアンテナは、広帯域アンテナであるディスコーンアンテナをベースにして、電磁界解析シミュレータにより設計を行い、その特性と有用性を確認する。また、設計したアンテナを試作し、特性を測定することにより、設計の妥当性を確認する。

4. 研究成果

(1) レーダ計測システムは入射パルスを入力、レーダ応答を出力とする散乱システムとして表現することができる。この散乱システムの応答は伝達関数によって特徴付けられるため、計測した散乱応答から伝達関数を推定できれば、散乱現象の性質やターゲットの情報を得ることができる。さらに、伝達関数の特性をよく反映するパラメータを推定できれば、そのパラメータをターゲット識別・同定・診断のための特徴量として用いることができる。そこで、高周波漸近理論に基づき、散乱伝達関数を振幅、位相、時間推移

の3つのパラメータを用いてパラメトリック表現した。これらのうち、波形変化に大きく関与するパラメータである ϕ がこのシステムの特徴をよく反映することになり、識別・同定のための特徴量として有効に機能する。一例として、図1に位相特徴量であるパラメータ ϕ を変化させたときの波形を示す。出力波形はパラメータ ϕ に対して敏感に変化しており、特徴量として有効であることが確認できる。実際、数値シミュレーション及び実測値を用いて検証したところ、従来から用いられている相関値に比べ、優れた性能を持つ特徴量であることが確認された。

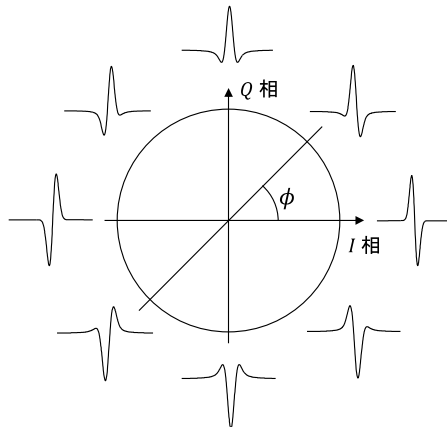


図1 位相特徴量 に対する波形変化

(2) 上記は、ある一つの観測点において計測されたレーダ応答信号からの特徴量抽出であるが、マルチアスペクト計測によって得られたデータを用いれば、計測データ数が増えるのみならず、データの系列情報（特徴量の推移）を利用することができ、識別・同定のための有効な情報となる。HMM による系列情報処理の流れは次の通りである。まず、ターゲットからのレーダ応答をある角度範囲にわたって細かく計測する。一般に、レーダ応答は角度依存性を持つため、計測されたレーダ応答の系列データは観測位置が変化するにはがって次第に変化をしていくが、ごく狭い範囲ではあまり変化しない。このようなデータの変化しない範囲を1つのセクタとし、観測範囲を N 個のセクタに分割する。ある角度範囲にわたって実際に計測した点数を M とすれば、要素数 M のデータの系列が得られたことになる。この系列の第一番目の要素は N 個のセクタのどれかに属しており、要素番号の増加とともにセクタを移動することになる。このセクタを「状態」と考えれば、この系列データは状態遷移のサンプルと見なすことができ、図2のマルコフモデルで表現できる。但し、 S_i は状態、 a_{ij} は状態遷移状態 i から状態 j への状態遷移確率である。識別器や診断器の構成は、ターゲット毎に教師サンプルを準備し学習させればよい。学習が進行するにしたがって、セクタ幅や状態遷移確率は最適化されていく。実際の識別では、

計測されたサンプルデータを学習後の状態遷移モデルに入力し、ベイズ決定則に基づいて決定すればよい。計算機シミュレーションにより、本手法の有効性を確認しているため、今後は実際の実測データを用いた実用性の検証を行う予定である。

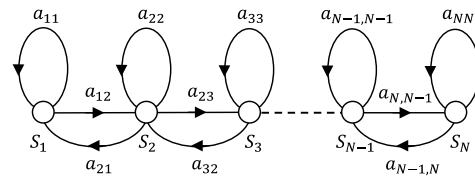


図2 観測系列データ処理に用いる N 状態マルコフモデル

(3) 最後に挿入型センシングアンテナの設計・製作結果について述べる。このアンテナを使用する場合、検査対象物に穿孔しなければならないため、小型かつ高性能のアンテナでなければならない。ここでは、以下の2点を要求仕様として設定した。

- (i) 使用周波数が 2GHz ~ 6GHz であること
- (ii) アンテナの直径は 20mm 以内であること

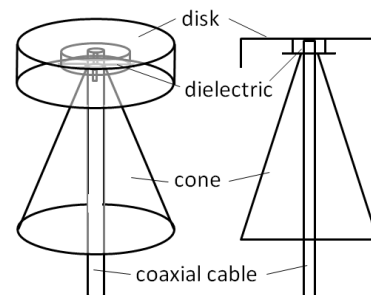


図3 設計した挿入型センシングアンテナ

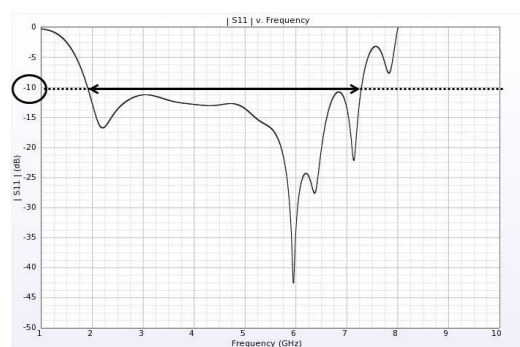


図4 挿入型センシングアンテナのリターンロス

図3に設計したアンテナの構造を示す。ディスクとコーンにより構成されており、ディスク及びコーンの裾の直径は 20mm、コーンの裾からディスク上面までの高さは 42mm である。コーンの先端部分とディスクの接点部分が給電点で、この部分の間隔がアンテナの特性

に大きく影響する。このため、この部分の間隔を正確に保持するため、誘電体を装荷している。誘電体はアクリルを用い、その他の部分(コーン及びディスク)は金属板で製作する。実際の設計は、FDTD法によるシミュレーションにより行った。図4に、開発したアンテナのリターンロスを示す。この結果より、開発したアンテナは1.9GHzから7.3GHzの帯域においてリターンロスが-10dBを下回っており、要求仕様(i)を満たしていることがわかる。また、アンテナのサイズも直径20mmであり、要求仕様(ii)も満たしている。この設計結果を基に、実際にアンテナを作成し特性評価を行ったところ、シミュレーション結果とほぼ同様の特性が得られた。このアンテナを実際にコンクリートの細穴に挿入したときの特性の変化を明らかにする必要があるが、これについては今後の課題である。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計6件)

M. Nishimoto, Parametric Representation of an Early-time Radar Response for Target Identification, Proceedings of the 2015 Korea-Japan EMT/EMC/BE Joint Conference (KJJC 2015), 4-pages, 2015. 査読無
<http://www.ieice.org/cs/emcj/kjcc2015/program.html>

M. Nishimoto, Parametric Representation of Radar Target Responses, Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2015), 3 pages, 2015. 査読有
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7447533

M. Nishimoto, Parametric Model of a Scattering System for Radar Target Identification, Proceedings of the Intl. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA2015), 4 pages, 2015. 査読有
DOI: 10.1109/ICEAA.2015.7297219

M. Nishimoto and D. Yoshida, Discrimination of Buried Objects Using GPR Responses, Proceedings of the Intl. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP2014), 2 pages, 2014. 査読有
DOI: 10.1109/ISANP.2014.7026693

M. Nishimoto and D. Yoshida, Radar Signal Processing for Target Identification Using Ground Penetrating Radars, Proceedings of the 10th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory, pp.65-68, 2014. 査読無

M. Nishimoto, Correction Formulae for Soil Roughness Parameters Estimated from a Surface Profile, Proceedings of the 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR 2013), TU2.R4.2, 3-pages, 2013. 査読有
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6705027>

〔学会発表〕(計8件)

西本 昌彦, 中 良弘, “損失誘電体層で覆われた導体円柱による電磁波散乱”, 2016年電子情報通信学会総合大会, C-1-18, 2016年3月18日, 九州大学(福岡県福岡市)。

西本 昌彦, “状態遷移モデルに基づいたレーダ信号処理とそのターゲット識別への応用”, 電子情報通信学会研究技術報告, EMT2015-66, pp.115-118, 2016年10月30日, ANA ホリデイ・インリゾート宮崎(宮崎市)。

小野木 哲大, 西本 昌彦, “コンクリート内部検査用UWBアンテナの開発”, 平成27年度(第68回)電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 2015年9月26日, 福岡大(福岡県福岡市)。

西本 昌彦, “散乱システムのパラメトリックモデル”, 2015年電子情報通信学会総合大会, C-1-17, 2015年3月10日, 立命館大学(滋賀県草津市)。

西本 昌彦, “地中レーダによる埋設物の識別に関する実験的検討(III) - 散乱システムのモデルパラメータの推定 - ”, 電気学会電磁界理論研資, EMT-14-140, 2014年11月20日, 中沢ヴィレッジ(群馬県草津町)。

西本 昌彦, “地中埋設物の識別・同定のための特徴量について”, 2014年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-1-17, 2014年9月23日, 徳島大学(徳島県徳島市)。

西本 昌彦, 太田 亘, 吉田 大祐, 田邊 将之, 中 良弘, “地中レーダによる埋設物の識別に関する実験的検討(II) - 識別のための特徴量の検討 - ”, 電気学会電磁界理論研資, EMT-13-153, 2013年11月15日, 星野リゾート(青森県三沢市)。

吉田 大祐, 西本 昌彦, 太田 亘, 田邊 将之, “地中レーダによる埋設物の識別に関する実験的検討(I) - ターゲットテンプレートの作成とその有効性 - ”, 電気学会電磁界理論研資, EMT-13-106, 2013年7月19日, 稚内総合文化センター(北海道稚内市)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西本 昌彦 (NISHIMOTO Masahiko)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：60198520

(3) 連携研究者

緒方 公一 (OGATA Kohichi)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：10264277

福迫 武 (FUKUSAKO Takeshi)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：90295121

中 良弘 (NAKA Yoshihiro)
九州保健福祉大学・薬学部薬学科・准教授
研究者番号：30305007