

全波形サンプリング処理方式を応用した 電磁波レーダ法のアレイアンテナ化に関する基礎的検討

愛媛大学大学院 学生員 ○松本大史, 伊賀達郎
愛媛大学大学院 正会員 岡崎慎一郎, 中畑和之

1. はじめに

コンクリート構造物の検査方法として, 補強鉄筋等の介在物の位置を非破壊的に推定する電磁波レーダ法¹⁾がある. この手法は, 電気的な特性インピーダンスが異なる材料の界面で電磁波が散乱することに着目し, 受信波形から介在物の位置を推定するものである. 現行の電磁波レーダ法の映像化は, 装置の設置面から垂直方向に電磁波を照射し, 鉄筋からの反射波の到達時間から鉄筋像を出力する方法である. 本研究では, 超音波アレイ映像化で用いられている全波形サンプリング処理 (Full waveforms sampling and processing: FSAP) 方式²⁾による映像化手法を電磁波レーダ法に応用し, 多チャンネルのアレイアンテナを適用するための基礎的検討を行う. ここでは, 参照波形を用いたデコンボリューション処理によって受信波形を処理し, 分解能の向上を試みる. 本手法の有効性を検証するために, 電磁界有限積分法³⁾で計算された波形を FSAP 方式による映像化に入力し, 鉄筋の再構成シミュレーションを行う.

2. FSAP 方式による映像化手法

ここでは, 送・受信アンテナの配置パターンを変化させることにより, 送受の組み合わせを変化させて波形を取得する. このとき, 各組み合わせの電磁波の受信波形をコンピュータに記憶させる. 例として, 送信アンテナを1箇所, 受信アンテナを3箇所に設置した時の FSAP 方式による電磁波の送受信を図-1に示す. アンテナ番号1で送信した電磁波は鉄筋で散乱し, その電磁波を番号2, 3, 4の受信アンテナで受信する. この時, 送信 i および受信 j で送受信した信号を $e_{ij}(t)$ とすれば, e_{12} , e_{13} , e_{14} の3つが波形記憶マトリクスに保存される. 次に送信アンテナを変更し, 同様に各アンテナで電磁波を受信する. この作業を繰り返して, 波形記憶マトリクスを埋めていく. なお, 現行の装置では同一のアンテナで電磁波を送受信することは困難であるため, ここでは, 波形記憶マトリクスの対角成分は映像化に用いない.

波形記憶マトリクスから必要な波形を取り出し, コンピュータにおいて適当な遅延 (ディレイ) 操作を行い, 映像化したい領域の1画素にビームが集束する

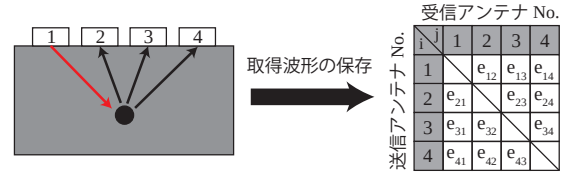


図-1 FSAP 技術の基本原則

ように波形を合成する. いま, 映像化したい断面を x_1 - x_2 とし, x_1 方向の画素番号を k , x_2 方向の画素番号を l とする. 画素 (k, l) への集束ビームを $F(k, l : t)$ と表すことにすれば,

$$F(k, l : t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e_{ij}(t + \Delta t_{ij}(k, l)) \quad (1)$$

のように書ける. ここで, Δt_{ij} はディレイである. 映像化のためには, $F(k, l : t)$ から基本伝搬時間 (画素からアンテナ配列の中心位置までの路程に相当する伝搬時間) $t = T_{kl}^0$ の振幅を抽出する. その振幅の値を $R(k, l)$ とすると,

$$R(k, l) = F(k, l : T_{kl}^0) \quad (2)$$

で表される. この振幅値を画素毎にプロットすることで, 鉄筋の映像化を行う.

3. 波形処理手法

FSAP 方式では, すべての原波形を保存しているため, 後処理で波形処理や波形合成が可能となる. 電磁波レーダ装置で受信した電磁波には, 実際にはアンテナや装置の周波数特性, 装置の電気回路のノイズ等も含まれる. 従って, 受信した電磁波をそのまま鉄筋の再構成に用いると分解能が低下する恐れがある. ここでは, 下記に示すように, 鉄筋からの散乱成分のみを抽出する波形処理を行う. 信号 $e_{ij}(t)$ をフーリエ変換し周波数域で表現したものは

$$e_{ij}(\omega) = \beta(\omega)\alpha(\omega)P_i(\omega)P_j(\omega)C_{ij}(\omega)A_{ij}(\omega) \quad (3)$$

と表すことができる. ここで, β はアンテナの帯域特性や計測後の電気回路の影響等を表す関数である. α は減衰を表す関数, P_i と P_j は送信経路および受信経路における電磁波の伝搬時間の関数, C_{ij} は電磁波

キーワード : 全波形サンプリング処理方式, 鉄筋再構成, 電磁波レーダ法, 多チャンネルアレイ

連絡先 〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3, E-mail: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp

ビームの回折, A_{ij} は鉄筋からのアンテナ j に向かう散乱成分を表している. いま, 平板導体から距離 D の位置にアンテナを設置し, この導体に向けて電磁波を送信する. このときの受信波を参照波とすれば,

$$e^{\text{ref}}(\omega) = \beta(\omega)\alpha'(\omega) \exp(2ikD)C'_{ij}(\omega)R(\omega) \quad (4)$$

と表される. ここで, k は波数, R は導体での平面波の反射率である. 式 (3) と (4) から, 散乱成分は,

$$A_{ij}(\omega) = \frac{e_{ij}(\omega)}{e^{\text{ref}}(\omega)} \exp(2ikD)R(\omega) \frac{\alpha'(\omega)C'_{ij}(\omega)}{\alpha(\omega)C_{ij}(\omega)} \quad (5)$$

のように求まる. ここで, 減衰 α は計測時には通常明らかである. ビームの回折 C_{ij} も理論的に求めることができるが, ここでは, これらをまとめて $S(\omega) = \alpha'(\omega)C'_{ij}(\omega)/\alpha(\omega)C_{ij}(\omega)$ と置き, S を平滑化フィルタ⁴⁾に相当するものとして扱う. ここでは, フィルタ関数として次式を用いた.

$$S(\omega) = 2^{-\left|\frac{|\omega|-\omega_0}{a}\right|^2} \quad (6)$$

ここで ω_0 はフィルタの中心周波数, a は半値幅である. 式 (5) の左辺をフーリエ変換し, 時刻歴応答 $A_{ij}(t)$ にしたものを波形記憶マトリックスの $e_{ij}(t)$ と置き換え, 式 (2) を実行することで内部鉄筋の映像化を行う.

4. コンクリート中の鉄筋の映像化

EMFIT³⁾ で計算された TE モードの電磁波の波形を用いて, FSAP 方式による鉄筋の映像化シミュレーションを行った. 数値モデルを図-2 の上部に示す. モデルの大きさは高さ 280mm, 幅 400mm で, 表面から深さ 90mm と 210mm の位置に直径 20mm の鉄筋を設置した. ここでは, セメントおよび骨材の誘電率 $\varepsilon = 43.83 \times 10^{-12}\text{F/m}$, 透磁率 $\mu = 1.257 \times 10^{-6}\text{H/m}$, 電気伝導率 $\rho = 0.001\text{S/m}$ は同じものを用いた. EMFIT による電磁波伝搬の計算例を図-2 の下部

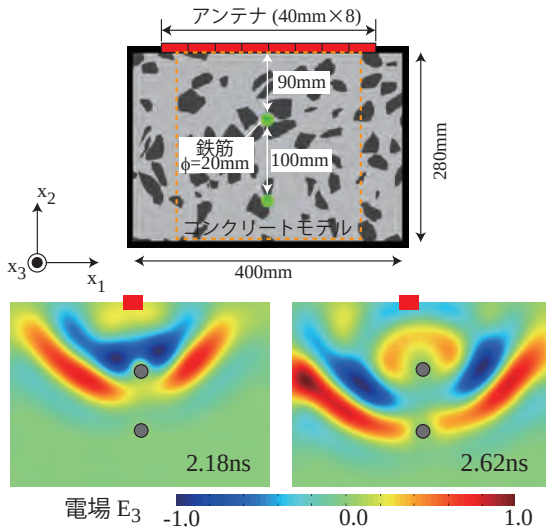


図-2 数値モデルとコンクリート中を伝搬する電磁波のスナップショット

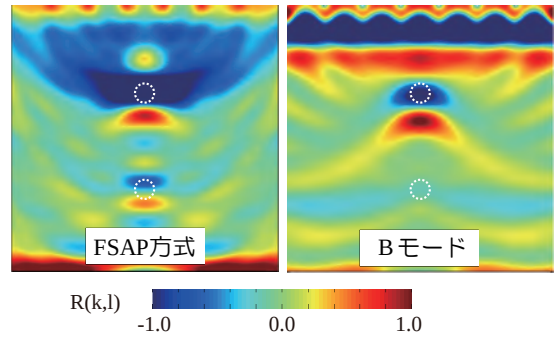


図-3 鉄筋の映像化結果(左: FSAP, 右: B モード)

に示す. これは幅 40mm の送信アンテナをモデルの上部のある一点に設置し, そこから放射された電磁波 (送信波の中心周波数は 1.0GHz) の E_3 成分を可視化したものである. 電磁波はコンクリート内部に円筒状に伝搬し, 鉄筋で散乱することがわかる.

このアンテナをモデルの上部で移動させ, 合計で $8 \times 8 - 8 = 56$ パターンの波形の組み合わせを取得する. ここで, 参照波として, 平板導体から 490mm 離れた位置で取得した電磁波の反射波形を利用した. 平滑化フィルタのパラメータは, $\omega_0 = 1.5\text{GHz}$, $a = 0.7\text{GHz}$ と設定した. 映像化範囲は, 図-2 のモデル図の点線で囲む部分とした. FSAP 方式による鉄筋の映像化結果を図-3 の左側に示す. 比較のため図-3 の右側には, 一般的な電磁波レーダ法で用いられている B モードの映像化の結果も示している. 双方とも, 上部の鉄筋に関しては強い反応が見られる. 一方, 下部の鉄筋に関しては, FSAP 方式による映像化では鉄筋による反応が見られるが, B モード像では鉄筋が検出できていないことがわかる. これは, FSAP 方式では複数の送・受信パターンで波形を計測しているため, 深部の鉄筋からのシグナルも計測できるパターンがあり, これが有効に作用しているためである.

5. 結言

本研究では, コンクリート中の鉄筋の位置と形状を高精度に推定するために, FSAP 方式を用いた電磁波映像化に関する検討を行った. 一般的な映像化手法である B モードに比べて, FSAP 方式による映像化では深さ方向に複数存在する鉄筋が鮮明に分離できることがわかった.

参考文献

- 1) 魚本健人, 加藤佳考: コンクリート構造診断工学, オーム社, pp.75-77, 2008.
- 2) 中畑和之, 平田正憲, 廣瀬壮一: 全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成, 非破壊検査, Vol.59, No.6, pp.277-283, 2010.
- 3) K. Nakahata et al., Simulation of ultrasonic and electromagnetic wave propagation for nondestructive testing of concrete using image-based FIT, *Journal of Computational Science and Technology*, Vol.6, No.1, pp.28-37, 2012.
- 4) 井口尚之: マイクロ波地中レーダの研究, 東京工業大学卒業論文, 2002.3