

スパースモデリングを用いた地中レーダ探査における反射係数分布の推定

JR 東日本コンサルタンツ（株） 正会員 ○杉浦 翔太, 青山 貴洋, 野上 雄太

1. はじめに

近年、大規模データが取得されるようになっており、このようなデータから重要な情報を効率的に抽出することが求められている。地中レーダ探査においては、計測画像がノイズなどの不要信号により不明瞭となることや、地中構造を直接的に表現していないなどの理由から、目標物の検出判断には専門知識や経験が必要となる場合がある。この問題に対して反射係数分布の推定を行うことで、信号が明瞭となり解釈性が向上する可能性がある。本報では、スパースモデリングによる反射係数分布の推定を試みた。

2. 地中レーダ探査における反射係数分布

地中レーダ探査とは、物理探査手法の一つであり、電磁波の送受信信号を画像化して地中構造を把握する探査手法である。計測により得られる受信信号は、送信信号と反射係数分布の畳み込みで表現される。加えて、実際の計測では観測ノイズが付与されるため、受信信号は下式となる。

$$E_{obs} = r * E_0 + n \tag{1}$$

ここで、 E_{obs} ：受信信号、 E_0 ：送信信号、 r ：反射係数分布、 n ：観測ノイズである。この反射係数分布 r をスパースに推定することができれば、反射境界がより明確となり埋設物判断などが容易になることが期待される。

3. 反射係数分布の推定モデル

膨大な情報から重要な情報を抽出する有効な手法として L_1 正則化がある。正則化とは、過学習を防ぐために用いられる手法の一つであり、モデルの精度を維持しつつ、説明変数の数を最小限に抑えることができる。特に、LASSO は広く用いられており、信号処理や機械学習などの分野で広く研究されている。また、観測ノイズが付与されている場合でも、フィルタなどによるノイズ低減処理をすることなく元信号復元の可能性があるといった利点もある。

今、与えられた観測情報 y から未知量 x を推定する問題を考える。両者は観測行列 Φ で与えられるような線形変換で記述される観測モデルとする。

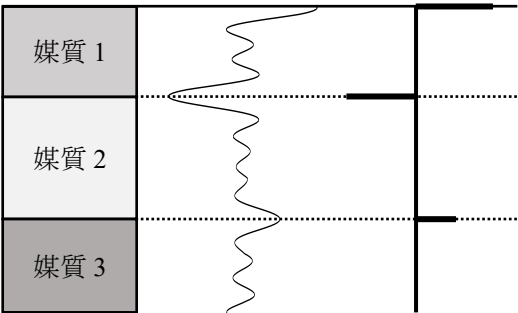
$$y = \Phi x \tag{2}$$

この時、LASSO は以下の最小化問題に帰着する。

$$\underset{x}{\text{minimize}} \left\{ \frac{1}{2} \|\Phi x - y\|_2^2 + \lambda \|x\|_1 \right\} \tag{3}$$

ここで、 λ ：正則化パラメータである。推定解のスパース性は正則化パラメータ λ により大きく変動するため、これを適当に調整することでスパース解を得ることが可能となる。

今回、反射係数分布推定に LASSO を適用することで、スパース性を有した反射係数分布の推定を試みた。反射係数分布の推定フローを図2に示す。ここで、観測行列：送信信号で定義される巡回行列で



層構成 受信信号 反射係数分布
図1 受信信号と反射係数のイメージ

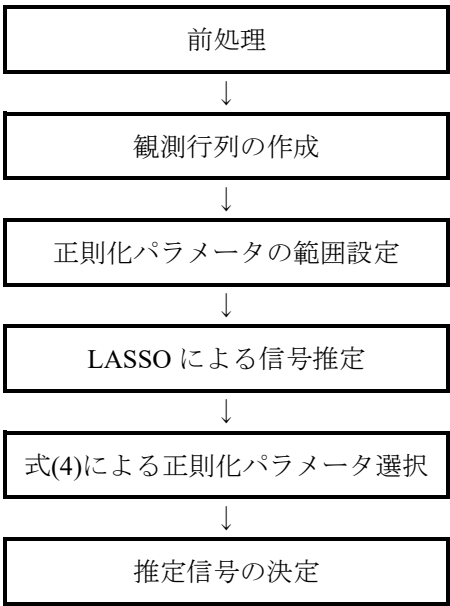


図2 推定フロー

キーワード スパースモデリング, LASSO, 信号処理, レーダ

連絡先 〒141-0011 東京都品川区西品川 1-1-1 技術本部 特殊解析室 TEL:03-5435-7625

ある。また、本検討では、観測行列は線形時不変システムを仮定し、電波の減衰は考慮しないものとした。正則化パラメータの選択方法については、次章で説明する。

4. 正則化パラメータの選択

前章で説明したように、正則化パラメータ λ の選択は推定される信号に大きく影響する。一般に、パラメータ選択は交差検証によって得られた MSE や RMSE などの誤差が最小になるケースを選択する場合が多いようである。しかし、推定解の誤差とスパース性はトレードオフの関係にあり、誤差のみを考慮して選択した場合、推定結果が過適合となり解のスパース性が失われることが懸念される。そこで、本検討では以下に示す評価関数（以後、提案式と称す）によりパラメータを選択することとした。

$$J(\lambda_i) = w_1 \left(1 - \frac{\text{MSE}_{\lambda_i}}{\max(\text{MSE}_{\lambda})} \right) + w_2 \left(1 - \frac{\|x_{\lambda_i}\|_0}{\max(\|x_{\lambda}\|_0)} \right) \quad (4)$$

ここで、MSE：交差検証によって得られる平均二乗誤差、 $\|\cdot\|_0$ ： L_0 ノルムで非ゼロ要素の数、 w_1 , w_2 ：各項の重みである。この重み w_1 , w_2 を調整した後、 J が最大となる場合のパラメータ λ_i を選択することで、誤差が小さく、スパース性を有した解を得ることができる。

5. 反射係数分布の推定結果

本章では、実計測データに対して 3 章、4 章で説明した手法を用いた反射係数分布の推定結果について報告する。図 3、図 4 はそれぞれ鋼管と空洞に対して反射係数分布の推定を行った結果であり、(a)が計測画像、(b)が MSE のみで評価したケース、(c)が提案式により評価したケースである。また、図中の+印が反射係数の推定位置である。まず、各図(a)と(b), (c)を比較すると、反射係数分布を推定することで明らかに信号がスパースになっている。次に、各図(b)と(c)を比較すると、提案式を用いて評価することで更にスパースな推定結果が得られている。また、MSE のみで評価したケースでは画像全体に推定信号が確認できるが、提案式での評価結果を見ると、地表面付近および埋設物といった主要な反射位置のみで推定信号が確認できる。

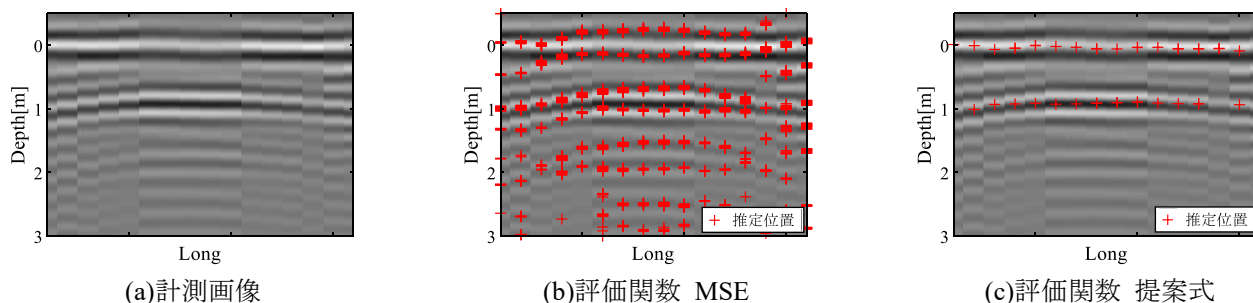


図 3 反射係数分布の推定結果（鋼管 GL-1.0m）

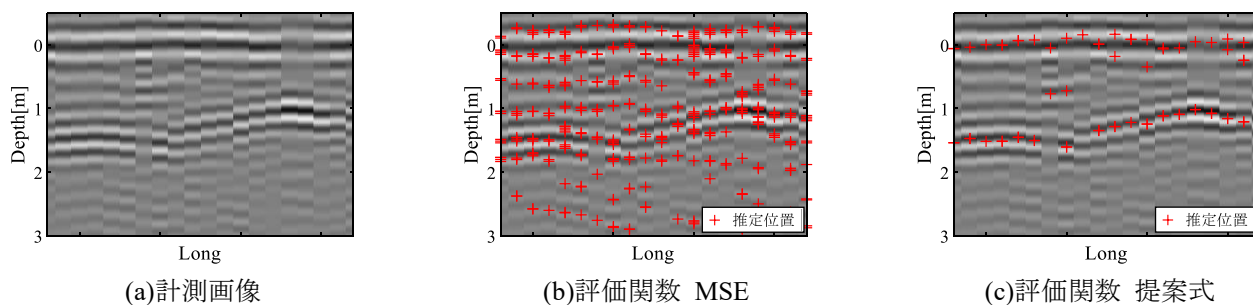


図 4 反射係数分布の推定結果（空洞 GL-1.0, 1.5m）

6. まとめ

本検討では、スパースモデリングによる反射係数分布の推定を試み、正則化パラメータ選択時の評価関数について検討した。その結果、MSE に加えて L_0 ノルムを考慮してパラメータ選択することで、スパースな反射係数分布の推定および推定信号のスパース性向上が確認できた。

参考文献

永原正章, スパースモデリング 基礎から動的システムへの応用, コロナ社, 2017.