

早期警報用地震計の処理手法の開発について

下野五月(三菱電機ソフトウェア株式会社)、杉本賢司(同)

1. はじめに

早期警報用地震計(地震発生直後の即時的な被害推定により被害を未然に防ぐ地震計)(以下「本地震計」という。)では、震源推定等の目的のため、リアルタイムに P 波検知を行う必要がある。現行の地震計での P 波検知では、STA/LTA 法と呼ばれる振幅の急激な立ち上がりを検知する仕組みや、レベルトリガ法と呼ばれる振幅の閾値超過判定の仕組みが使われていることが多い。

STA/LTA 法は、2011 年東北地方太平洋沖地震に観測された多くの記録で顕在化したように、地震動の振幅の立ち上がりが緩慢な海溝型巨大地震では、地震動の初動検知タイミングが手動検測より遅れる、あるいは検知できないといった欠点がある。また、レベルトリガ法では、検知することはできても、初動検知タイミングの遅れを改善することは困難である。また、STA/LTA 法は、地震計設置位置のバックグラウンドノイズが大きいと LTA が上昇し P 波検知の S/N が悪くなる、突発的なノイズに P 波が重なると正確な P 波到達タイミングを検知できなくなる、という欠点がある。

本発表では、前記 STA/LTA 法やレベルトリガ法の欠点を改善する P 波検知の方法(以下「P 波検知手法」という。)を開発したので、その概要と計算例を紹介する。また、そのベースとなるフレームワークを用いて、S 波を選択的に検知する方法(以下「S 波検知手法」という。)と地震動の終息を判定する方法(以下「地震終息判定手法」という。)とノイズ識別の方法(以下「ノイズ識別手法」という。)も開発したので、併せて紹介する。

2 節では、本研究の出発点とした SDAR モデルについて概略を説明する。3 節では、SDAR モデルを利用して入力時系列の周波数特性を近似する方法(RFT 法)を説明する。4 節から 7 節では、それぞれ RFT 法を利用して P 波検知、S 波検知、地震終息判定、ノイズ識別を行う手法を説明する。8 節では、地震計への実装について説明する。9 節では研究の今後の方針について説明する。

2. SDAR モデルについて

P 波検知手法、地震終息判定手法、S 波検知手法及びノイズ識別手法は、非定常 AR モデルを用いてリアルタイムで周波数特性を近似する方法を基礎としている。

(Yamanishi et al. 2002)⁽¹⁾では、異常検知及び変化点検知のため、時系列における通常の AR モデルに対して、AR 係数を時間変化(変化速度を忘却係数 r で特徴づける)させることによる非定常 AR モデルであるところの SDAR(Sequentially Discounting AR)モデルを提案している。以下にその概略を示す。

数式 2-1 及び数式 2-2 は入力時系列の M 次 AR モデルによるモデル化である。

$$x(l) = z(l) + \mu(l) \quad \text{数式 2-1}$$

$$z'(l) = \sum_{m=1}^M \phi_m(l-m) \times z(l-m) + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2(l)) \quad \text{数式 2-2}$$

ここで、 l はサンプリングの連番によるインデックス(以下同様)、 $x(l)$ は入力時系列、 $\mu(l)$ は $x(l)$ の平均の時系列、 $z(l)$ は $x(l)$ から $\mu(l)$ を除いた時系列、 $\phi_m(l)$ は AR 係数、 $z'(l)$ は AR モデルによる $z(l)$ の推定値である。 ϵ はその推定誤差であり、ガウス分布 $N(0, \sigma^2(l))$ を仮定する。但し、通常の AR モデルでは定

常性を前提とするため、 $\mu(l)$ 及び $\phi_m(l)$ は一定値であるが、SDAR モデルは、AR モデルを非定常に拡張したものであり、 $z(l)$ の平均 $\mu(l)$ 及び共分散関数 $C_m(l)$ をそれぞれ数式 2-3 及び数式 2-4 で平滑化近似する($m = 0, \dots, M$)。

$$\mu(l) = (1 - r) \times \mu(l - 1) + r \times x(l) \quad \text{数式 2-3}$$

$$C_m(l) = (1 - r) \times C_m(l - 1) + r \times (x(l) - \mu(l)) \times (x(l - m) - \mu(l)) \quad \text{数式 2-4}$$

ここで、 r は忘却係数と呼ばれ AR モデルが「過去を忘れる」ために必要な時間を設定するパラメータであり、平滑化のための 1 次 Butterworth ローパスフィルタのパラメータに対応する。

次に、AR 係数 $\phi_m(l)$ 及び推定誤算の分散 $\sigma^2(l)$ は通常の AR モデルと同様に $\sigma^2(l)$ を最小化する最尤推定法(Yule-Walker 方程式)で計算する。次に、入力時系列の予測値 $z'(l)$ と実測値 $z(l)$ との乖離の程度を評価することで異常検知を行い、その異常が続くことをもって変化点検知を行う。

3. SDAR モデルでリアルタイムに周波数特性を近似する手法について

本研究では、(Yamanishi et a. 2002)⁽¹⁾による SDAR モデルを利用するが、異常検知の仕組みとして、SDAR モデルによる予測値自体を用いるのではなく、そのバックグラウンドにある時系列の周波数スペクトルの変化を利用することとした。つまり、通常の AR モデルではよく知られているようにパワースペクトル $P(l, f)$ を数式 3-1 で計算し、その変化を評価することで P 波検知等の異常を検知する仕組みを開発した。以降では、これを「リアルタイムフーリエ変換(RFT)」と呼ぶこととする。

$$P(l, f) = \sigma^2(l) \times \left| 1 - \sum_{m=1}^M \phi_m(l) \times \exp\left(-2\pi i m' \frac{f}{fs}\right) \right|^{-2} \quad \text{数式 3-1}$$

このように、周波数スペクトルを直接取り扱うことにより、より結果説明性と汎用性が高い変化点検知の定式化が行える可能性がある。また、以下に示すように既往の STA/LTA 法との親和性が高い定式化を行うことも可能となる。RFT は FFT を自然に平滑化して近似するが、AR 係数の次数 M はいくつまでのピークを捉えて近似するかを指定するパラメータである。

4. P 波検知手法について

P 波検知の手法は、従来の STA/LTA 法を周波数空間に拡張する手法とした。つまり、STA は、忘却係数 r が大きくウィンドウサイズが小さな RFT によるパワースペクトル $PS_{UD}(l, f)$ (以下「新 STA」という。)に、LTA については忘却係数 r が小さくウィンドウサイズが大きな RFT によるパワースペクトル $PL_{UD}(l, f)$ (以下「新 LTA」という。)にそれぞれ拡張した。数式 4-1 は、「新 STA/新 LTA」の指標として、両パワースペクトルの比の最大値で P 波検知指標値 $TIp(l)$ を定義したものである。ここで、パワースペクトルは両者とも同一波形データの上下成分から計算したものである。

$$TIp(l) = \max_f \frac{PS_{UD}(l, f)}{PL_{UD}(l, f)} \quad \text{数式 4-1}$$

このとき、数式 4-2 に示すように $TIp(l)$ が予め決められた閾値 ETL を超過したタイミングを P 波検知とする(P 波検知後に $TIp(l)$ を過去に遡ることでより正確な P 波の到達タイミングが推定可能)。

$$TIp(l) \geq ETL \quad \text{数式 4-2}$$

以上説明したP波検知手順の例を図 4-1に示す。

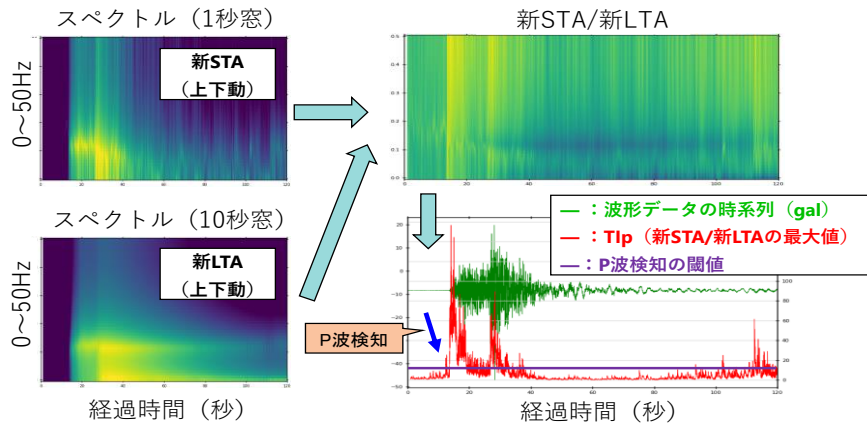


図 4-1 P 波検知の概要図(2004 年中越地震・K-NET 喜多方観測点の上下動)

これより、P 波初動部、S 波初動部の到達タイミングで $Tlp(l)$ が大きくなり、P 波が検知可能であることがわかる。もう一つの例として、2011 年東北地方太平洋沖地震の場合の例を図 4-2 に示す。

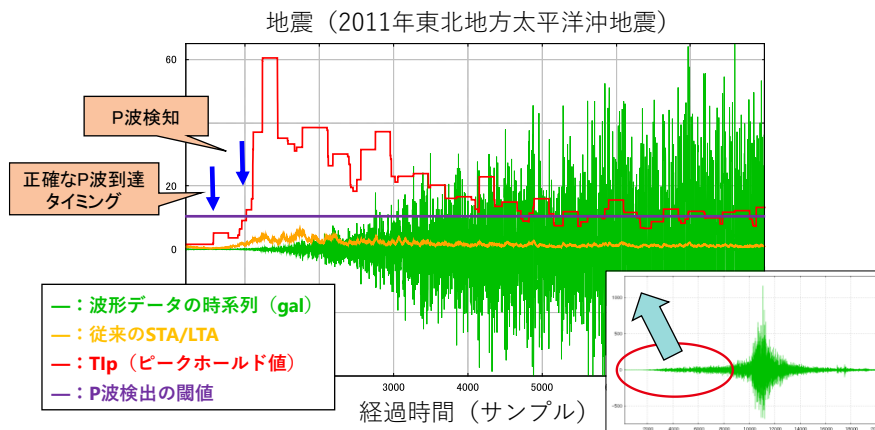


図 4-2 P 波検知の概要図(2011 年東北地方太平洋沖地震・K-NET 日立観測点の上下動)

従来の STA/LTA 法では全ての周波数を含んだ振幅のみから STA と LTA を計算するため両者の増加率が同程度となり STA/LTA が大きくなっていないが、 $Tla(l)$ の場合は、周波数の変化も見ているため P 波到達タイミングで急激に大きくなることわかる。尚、ここでは STA と LTA の時間変化スケールを RFT の場合と同程度となるようにパラメータを設定している。

5. S 波検知手法について

S 波は P 波に比べてより上下動よりも水平動が卓越することに着目し、数式 4-1 の分子を地震動の水平成分から計算するものに変更して S 波を選択的に検知できる手法を開発した。

6. 地震終息判定手法について

$PS_{UD}(l, f)$ が P 波検知前の $PL_{UD}(l, f)$ に戻ることをもって地震の終息を判定する手法を開発した。

7. ノイズ識別手法について

大振幅のパルス性ノイズについて、 δ 関数のフーリエ変換が一定値関数になることに着目し、RFT で推定したパワースペクトルが平坦(一定値関数)に近いことをもってノイズと識別する方法を開発した。

高周波の雑振動のノイズについて、列車振動や交通振動で典型的にみられるように高周波成分が卓越することに着目し、RFT 法で推定したパワースペクトルの卓越周波数が予め決められた閾値よりも大きくなることをもってノイズと識別する方法を開発した。また、卓越周波数の大きさと V/H (振幅の上下動と水平動の比)を組み合わせる方法も検討している。

8. 地震計への実装について

以上述べた手法は現行の地震計で使われている STA/LTA 法の枠組みとは大きく違わないので、計算方法を部分的に変更すれば導入可能と考えられる。

また、現在使われている一般的な Windows PC (CPU: Core i5 3.4GHz、メモリ: 16GB) で試験したところ、130 秒程度の 100Hz サンプリングの地震波形を全サンプル処理するのにかかる時間は、AR 次数が 10 次で 1 秒、AR 次数が 100 次でも 15 秒程度となり、特段計算負荷が高くなることはないと考えられる。

9. 今後について

本手法は、高い検知性能とリアルタイム性を両立しており、また、Deep Neural Network などの AI のようにブラックボックスとなる要素がないため結果説明性の高い手法といえる。

また、従来の STA/LTA 法の拡張のため現行の地震防災システムに実装がしやすい、といえる。今後は具体的な地震防災システムへの導入を念頭に置いた検討を行う予定である。

本手法は、地震波形の時系列を少数のパラメータ(フーリエスペクトルを表現する特性根)の時系列で近似でき、次元が小さい自然な特徴量を抽出できるため、機械学習と相性が良く、将来的には機械学習を行う方法へ発展できる可能性がある。

また、前記の実装例では P 波検知や S 波検知などでフーリエスペクトルそのものを用いたが、RFT 法近似したスペクトルのピーク (AR モデルの特性根を利用) だけを利用して P 波検知指標値 $TIp(l)$ や S 波検知指標値 $TIs(l)$ を定義することで、より計算負荷を下げることも検討している。

また、RFT ではリアルタイムでフーリエスペクトルが得られるので、それを用いてマグニチュードや震源距離を推定することも可能であり、現在検討中である。

尚、以上説明した P 波検知の仕組みは、単に入力時系列の周波数特性の急激な変化を捉えるものなので、地震波にかかわらず、一般的な異常検知の仕組みとして応用可能である。

【参考文献】

- (1) Yamanishi, K., Takeuchi, J. A Unifying Framework for Detecting Outliers and Change Points from Non-Stationary Time Series Data. KDD '02: Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. 2002, p. 676-681.