

微動データに含まれる非白色ノイズが位相速度の推定精度に及ぼす影響について

東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 正会員 ○盛川 仁・川連裕保

1. はじめに 微動のアレイ観測記録から表面波の位相速度を求める手法には、空間自己相関 (SPAC) 法 [1] や周波数-波数スペクトル (F-K) 法 [2], Centerless Circular Array (CCA) 法 [3] など種々の手法が提案されている。これらの手法では微動の観測記録に何らかのノイズが含まれていても安定して位相速度を推定できるように、解析の過程でノイズ成分が除去されるような工夫が行われている。ただし、ここで言うノイズとは、一般には各観測点ごとに独立な白色雑音であることを暗黙の仮定としている。

ところが実際の観測では、アレイのなかのある特定の観測点のみが交通振動の影響を大きく受けていたり、特定の観測装置の不調に伴うサーキットノイズが含まれている場合がある。このような場合、従来はその記録を全部捨ててしまうか、状態のよい部分を時刻歴波形から目視で判断して選択的に利用する、といった方法が用いられてきた。

しかし、目視では気がつかない程度のノイズを含む場合には、そのことに気づかずに解析を行ってしまう場合も考えられ、特に短周期領域では小さなノイズでも位相速度の推定に大きな影響を与えることが考えられる。白色ではないノイズが位相速度の推定精度にどのような影響を与えるか、を知ることは、微動探査結果の信頼性を評価する上でも重要である。そこで、本研究では、あまり良い結果が得られないことがわかっている微動観測記録に対して SPAC 法と CCA 法を適用し、位相速度を推定する。そのうえで、妥当と思われる位相速度を得るために考える解析法とその数学的妥当性について考察する。

2. 解析手法 SPAC 法は微動が水平方向に伝わる表面波のみから構成され、時空間的にスペクトルが一定であるという仮定のもとで成立する。また、微動の基本モードが卓越していることを前提とし、正三角形の頂点と外接円の中心の 4 点での観測を行うことで位相速度を求めることができる。すなわち、微動の空間自己相関係数は、

$$\rho_{\text{SPAC}} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \frac{\Re[S_{0j}(\omega)]}{\sqrt{\text{Pow}[x_0(t)]\text{Pow}[x_j(t)]}} \quad (1)$$

によって求められ、左辺が位相速度を引数とする第 1 種 0 次ベッセル関数になることを利用して位相速度を求める。ここで、添字の 0 はアレイの重心位置を、 j は頂点の観測点を表し、 $S_{0j}(\omega)$ はアレイの中心点と頂点での微動記録のクロススペクトル、 $\Re[\cdot]$ は複素数の実部を表す。また、 $x_j(t)$ は中心点または頂点での微動の時刻歴波形で、 $\text{Pow}[\cdot]$ は時刻歴波形のパワースペクトルを表す。

一方、CCA 法では、SPAC 法と同様にして正三角形のアレイを構成した場合、アレイの中心における観測は不要である。各観測記録の相加平均と $\exp[i\theta]$ の重み付き平均を θ を観測点の方向角、 $i = \sqrt{-1}$ として、

$$d_0(t) = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 x_j(t), \quad d_1(t) = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 x_j(t) \exp(i\theta) \quad (2)$$

と求める。ここで、 $d_0(t)$ 、 $d_1(t)$ は、それぞれ θ に関する微動記録の 0 次、1 次のフーリエ係数に相当する。CCA 法による微動の相関を表すパラメータは、

$$\rho_{\text{CCA}}(\omega) = \frac{\text{Pow}[d_0(t)]}{\text{Pow}[d_1(t)]} \quad (3)$$

によって求められ、左辺が第 1 種の 0 次と 1 次のベッセル関数のパワー比となることを用いて位相速度が得られる。

3. 観測の概要 SPAC 法と CCA 法を用いた解析には、台湾北部の新竹市周辺で行われた微動観測で得られた結果を用いる。観測は 2007 年 9 月に合計 11 箇所半径 2.5 ~ 10m 程度の正三角形アレイを用いてで行なわれた。センサーにはフォースバランス型加速度計を、記録にはサンプリング周波数 800 [Hz]、量子化 24 bit の A/D コンバータおよび、ゲイン 100 倍のアナログ増幅器、カットオフ周波数 30 [Hz] のアナログローパスフィルタを内蔵したデジタルレコーダを用いた。また、各観測点の記録は GPS を用いた時計によって自動的に校正され、記録の同時性はサンプリング周波数に対して十分な精度を有している。以下では、内湖国民中学校における半径 2.25m のアレイで得られた結果について述べる。

図 1 にアレイを構成する 4 地点で得られた上下動 (UD)

keywords: 空間自己相関 (SPAC) 法, Centerless Circular Array (CCA) 法, アレイ観測, 微動探査, 非白色ノイズ
 連絡先: 〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 盛川仁
 Tel: 045-924-5607, Fax: 045-924-5601

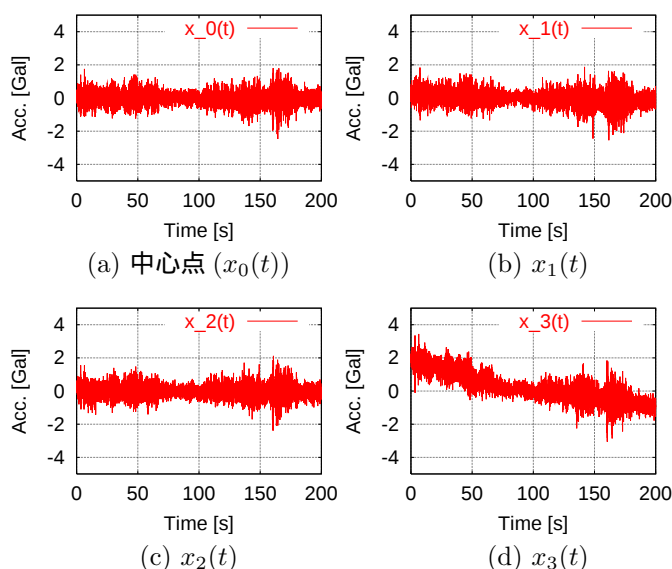


図 1: 内湖国民中學校のアレイ観測によって得られた微動の上下動成分の時刻歴波形

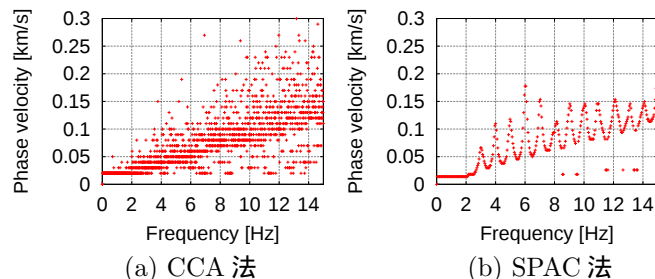


図 2: 位相速度の推定結果

成分の時刻歴波形を示す。この図からわかるように、 $x_3(t)$ の記録は、長周期の大きなドリフトが含まれており、長周期領域での波形の相関が非常に悪いことが予想される。これはフォースバランス型のセンサーは温度特性が悪く、同じ温度のもとでもセンサーごとにドリフトの特性が異なるため、このような記録になったものと考えられる。

4. 位相速度の推定結果 図 2 に CCA 法および SPAC 法による位相速度の推定結果を示す。いずれの手法でも図 1 の $x_3(t)$ のような状態の悪い波形を含めて θ 方向に平均を取るため、アレイ全体で見たときに相関が低くなってしまふ。その結果、物理的にあり得ない位相速度の値が得られており、正しい推定が行われていない。

式 (2) と式 (1) を比較すると SPAC 法は相関をとってから方位平均をするのに対して、CCA 法は相関をとってから平均を取る、というアルゴリズムになっていることがわかる。従って、CCA 法ではすべての記録を用いて解析しなくてはならないが、SPAC 法の場合は必ずしも、すべての記録を使わずに方位平均をとることが可能である。微動が種々の方向から等方的に伝播してきていれば、方位によらず ρ_{SPAC} は同じになるはずであり、この仮定は短周期

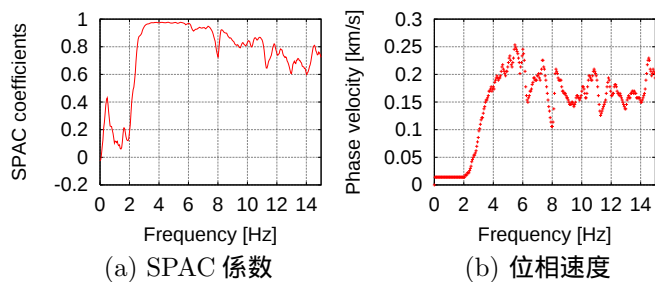


図 3: $x_3(t)$ を用いないで式 (1) を適用して求めた SPAC 係数と位相速度

領域の微動については成立する可能性が高い。

実際、図 1 の記録から求められる式 (1) の右辺の各項は $S_{01}(\omega)$ と $S_{02}(\omega)$ はほぼ同じであるが、 $S_{03}(\omega)$ は大きく異なっている。そこで、式 (1) の計算から $S_{03}(\omega)$ を取り除いて ρ_{SPAC} を求めると、図 3(a) のようになる。この図を見ると長周期領域で高い相関を示しており、それをもとに求められた位相速度は図 3(b) のように物理的に妥当と考えられる値となっている。

5. まとめ 特定の観測点の記録に白色でないような大きなノイズが含まれるような記録に対して SPAC 法および CCA 法を適用し、位相速度を推定した。その結果、微動の到来について等方が仮定できるような場合には、SPAC 法を用いることによって位相速度を推定できる可能性があることを示した。これは、解析プロセスのどの段階で微動の相関の平均をとるか、ということと深く関連しており、SPAC 法は状態の悪い記録を用いないことで他の記録を有効に活用できる可能性を意味している。

しかし、微動が等方的に到来していることをどのようにして確認するかといった本質的な問題を含んでおり、この点について実用的な判定法の開発を行う必要がある。また、どのようなノイズ成分に対して位相速度の推定誤差が大きくなるのか、を調べるために、数値シミュレーションを用いて得られた疑似微動データに種々のノイズを付加して位相速度を推定し、正解と比較することで安定して位相速度を求めうる条件やノイズの許容範囲について検討する必要があると考えている。

参考文献

- [1] Aki, K., "Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors," *Bull. Earthq. Res. Inst.*, University of Tokyo, **35**, 415–456, 1957.
- [2] Capon, J., "High-resolution frequency-wave number spectrum analysis," *Proc. IEEE*, **57**, 1408–1419, 1969.
- [3] 長郁夫・多田卓・篠崎祐三：極小アレイによる新しい微動探索法 — 浅部地盤平均 S 波速度の簡便推定, 物理探査, 2009.