

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7110246号

(P7110246)

(45)発行日 令和4年8月1日(2022.8.1)

(24)登録日 令和4年7月22日(2022.7.22)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 V 1/28 (2006.01)

G 0 1 V 1/28

G 0 6 F 17/17 (2006.01)

G 0 6 F 17/17

請求項の数 6 (全31頁)

|                   |                               |          |                                       |
|-------------------|-------------------------------|----------|---------------------------------------|
| (21)出願番号          | 特願2019-570885(P2019-570885)   | (73)特許権者 | 506018363                             |
| (86)(22)出願日       | 平成30年6月13日(2018.6.13)         |          | サウジ アラビアン オイル カンパニー                   |
| (65)公表番号          | 特表2020-524286(P2020-524286 A) |          | サウジアラビア国 3 1 3 1 1 ダーラン、イースタン アベニュー 1 |
| (43)公表日           | 令和2年8月13日(2020.8.13)          | (74)代理人  | 100097320                             |
| (86)国際出願番号        | PCT/US2018/037237             |          | 弁理士 宮川 貞二                             |
| (87)国際公開番号        | WO2018/236639                 | (74)代理人  | 100215049                             |
| (87)国際公開日         | 平成30年12月27日(2018.12.27)       |          | 弁理士 石川 貴志                             |
| 審査請求日             | 令和3年6月9日(2021.6.9)            | (74)代理人  | 100131820                             |
| (31)優先権主張番号       | 62/522,525                    |          | 弁理士 金井 俊幸                             |
| (32)優先日           | 平成29年6月20日(2017.6.20)         | (74)代理人  | 100155192                             |
| (33)優先権主張国・地域又は機関 | 米国(US)                        |          | 弁理士 金子 美代子                            |
| (31)優先権主張番号       | 16/005,807                    | (74)代理人  | 100100398                             |
| (32)優先日           | 平成30年6月12日(2018.6.12)         |          | 弁理士 柴田 茂夫                             |
|                   | 最終頁に続く                        | (72)発明者  | マー , ユエ                               |
|                   |                               |          | 最終頁に続く                                |

(54)【発明の名称】 しきい値処理に基づく超解像度ラドン変換

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

コンピュータにより実施される方法であって、

重合後の地震データを受信するステップ(1002)と；

前記受信した重合後の地震データから、変換された地震データを生成するステップであって、次式に示す10ノルム正則化の最もスパースな解を解くことによって、前記重合後の地震データに超解像度ラドン変換を行うステップを備え、

## 【数 3】

$$\min \mu \|m\|_0 + \frac{1}{2} \|d - Lm\|_2^2 \quad (3).$$

10

ここで、 $\mu$  は正則化パラメータであり、 $d$  は観測データであり、 $L$  は逆線形ラドン変換であり、 $m$  はデータ近似モデルであり、且つ

次式に示す11ノルム正則化

## 【数 2】

$$\min \mu \|m\|_1 + \frac{1}{2} \|d - Lm\|_2^2 \quad (2).$$

の近似解を得るために、前記地震データに、ソフトしきい値アルゴリズムを適用するステップと；

20

続いて、前記 10 ノルム正則化を解くために、前記近似解をスタート点として使用し、前記地震データに、反復ハードしきい値アルゴリズムを適用するステップと；

しきい値条件が満たされるまで、前記ソフトしきい値アルゴリズムと前記ハードしきい値アルゴリズムとの適用を繰り返すステップと；を含む、ステップ (1004) と；

前記変換された地震データを用いて信号ドメインとノイズドメインとを分離するステップであって、定義されたミューティング機能を用いて不要なノイズを除去するステップを備える、ステップ (1006) と；

前記分離された信号ドメインとノイズドメインとを用いて、前記分離された信号ドメインとノイズドメインとに逆ラドン変換を行い、信号のみを出力するステップ (1008) と；を備える、

コンピュータにより実施される方法。

#### 【請求項 2】

前記しきい値条件は、次式に従って特定され、

#### 【数 A】

$$\frac{\|d-Lm\|_2}{\|d\|_2} < \epsilon,$$

ここで、d は観測データ、L は逆線形ラドン変換、m はデータ近似モデル、 $\epsilon$  は予め定められた小さな正の数である、

請求項 1 に記載のコンピュータにより実施される方法。

#### 【請求項 3】

前記変換された地震データを生成するステップは、複雑な信号を単純なスパイク列信号の合計に分解するステップを備える、

請求項 1 に記載のコンピュータにより実施される方法。

#### 【請求項 4】

前記複雑な信号は、超解像度ラドン変換を用いて、ラドン空間で分解され、

前記信号ドメインと前記ノイズドメインとを分離するステップは、前記地震データを前記超解像度ラドン変換を用いてラドン空間で分離した後に、前記信号ドメインと前記ノイズドメインとを最大限に分離するステップを備える、

請求項 3 に記載のコンピュータにより実施される方法。

#### 【請求項 5】

請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の方法を含む操作を行うためにコンピュータシステムによって実行可能な 1 又は複数の命令を格納する、

非一時的なコンピュータ読取可能媒体。

#### 【請求項 6】

コンピュータメモリと；

前記コンピュータメモリと相互に作動可能に結合され、請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の方法を含む操作を実行するように構成されるハードウェアプロセッサと；を備える、

コンピュータにより実施されるシステム。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【0001】

本願は、2017年6月20日に出願された米国仮特許出願第62/522,525号、及び2018年6月12日に提出された米国特許出願第16/005,807号の優先権を主張する。

#### 【背景技術】

#### 【0002】

ラドン (Radon) ベースの変換アルゴリズムは、主にノイズ除去 (表面波及び多重波 (multiples)) のために、地震データ処理で広く用いられている。基本的な

10

20

30

40

50

仮定には、信号とノイズの間の十分なディップ差又は移動差が含まれる。変換ドメイン (domain、領域) の追加のスパース (sparseness) 基準は、信号とノイズの重複を最小限に抑えるための有用な制約となる。圧縮センシング原理に基づく理論研究により、ほとんどの信号の支配的な情報は、適切な変換ドメインの信号自体よりもはるかにスパース (疎) であることがわかっている。ナイキストサンプリング理論 (Nyquist sampling theory) 等によると、スパースであるとの仮定の下では、通常必要と考えられるよりはるかに少ないデータ又は測定値から極めて高い確率で信号を再構築することができる。これは、時間 - 空間 (time-space) ドメインの地震信号を、変換ドメインの少数のゼロでないサンプルから表現でき、再構築できることを意味する。変換ドメイン内のデータのスパース表現は、不要なノイズを効率的な方法で区別し、抑制する機会を提供することができる。

10

#### 【発明の概要】

##### 【0003】

本開示は、地震データに超解像度ラドン変換を行う手法について述べる。

##### 【0004】

一実施において、重合後の地震データが受信される。変換された地震データは、受信された重合後の地震データから生成され、重合後の地震データに超解像度ラドン変換が行われる。変換された地震データを用いて、信号ドメインとノイズドメインとが分離され、定義されたミューティング機能を用いて不要なノイズが除去される。分離された信号ドメインとノイズドメインを用いて逆ラドン変換が行われ、信号のみが出力される。

20

##### 【0005】

前述の主題は、コンピュータにより実施される方法、非一時的なコンピュータ読取可能媒体、及びコンピュータにより実施されるシステムを用いて実施可能である。非一時的なコンピュータ読取可能媒体は、コンピュータにより実施される方法を実行するコンピュータ読取可能な命令を格納 (保存) する。コンピュータにより実施されるシステムは、1又は複数のコンピュータと相互運用可能に結合された1又は複数のコンピュータメモリデバイスと、命令を格納する有形の非一時的な機械読取可能媒体と、を備え、1又は複数のコンピュータによって実行されるとき、非一時的なコンピュータ読取可能媒体に格納されたコンピュータにより実施される方法/コンピュータ読取可能な命令を実行する。

##### 【0006】

本願に記載された主題における1又は複数の実施の詳細は、発明の詳細な説明、特許請求の範囲及び添付図面に記載されている。本主題の他の特徴、態様及び利点は、発明の詳細な説明、特許請求の範囲及び添付の図面から明らかになるであろう。

30

#### 【図面の簡単な説明】

##### 【0007】

本特許又は本願ファイルには、カラーで作成した少なくとも1枚のカラー図面が含まれている。カラー図面を伴う本願の公開公報のコピーは、米国特許商標庁へ申請し、必要な料金を納付することにより提供される。

##### 【0008】

【図1A】図1Aは、一実施に係る、空間ドメインでの超解像度の課題における超解像度信号例を示すグラフである。

40

##### 【0009】

【図1B】図1Bは、一実施に係る、空間ドメインでの超解像度の課題における高解像度信号の例を示すグラフである。

##### 【0010】

【図2A】図2Aは、一実施に係る、移動差が4度である合成例に対するラドン変換の比較を提供する例示のグラフである。

【図2B】図2Bは、一実施に係る、移動差が4度である合成例に対するラドン変換の比較を提供する例示のグラフである。

##### 【0011】

50

【図 3 A】図 3 A は、一実施に係る、移動差が 3 度である合成例に対するラドン変換の比較の例を示すグラフである。

【図 3 B】図 3 B は、一実施に係る、移動差が 3 度である合成例に対するラドン変換の比較の例を示すグラフである。

【0012】

【図 4 A】図 4 A は、一実施に係る、フィルタリング後の、移動差が 3 度である合成例に対するラドン変換の比較の例を示すグラフである。

【図 4 B】図 4 B は、一実施に係る、フィルタリング後の、移動差が 3 度である合成例に対するラドン変換の比較の例を示すグラフである。

【0013】

【図 5】図 5 A 乃至図 5 D は、一実施に係る、フィールドデータの例に対する標準的、高解像度、及び超解像度のラドン変換の比較の例をまとめて示すものである。

【0014】

【図 6】図 6 は、一実施に係る、重合後のデータセットの例を示すものである。

【0015】

【図 7 A】図 7 A は、一実施に係る、超解像度ラドン変換から得られたプライマリ（基数）の例を示すものである。

【0016】

【図 7 B】図 7 B は、一実施に係る、減算によって得られた多重波の例を示すものである。

【0017】

【図 8】図 8 は、一実施に係る、標準的なラドン変換から得られたプライマリの例を示すものである。

【0018】

【図 9】図 9 は、一実施に係る、減算によって得られた多重波の例を示すものである。

【0019】

【図 10】図 10 は、一実施に係る、地震データに対して超解像度ラドン変換を行うための方法の例を示すフローチャートである。

【0020】

【図 11】図 11 は、一実施に係る、本願で説明される、記述されたアルゴリズム、記述された方法、記述された機能、記述されたプロセス、記述されたフロー、及び記述された手順に関連付けられた計算機能を提供するために使用された例示的なコンピュータシステムを示すブロック図である。

【0021】

種々の図面における類似の参照番号及び記号は、同様の要素を指す。

【発明を実施するための形態】

【0022】

以下の詳細な説明は、地震データに超解像度ラドン変換を行うためのシステム、方法、及び手法について述べ、1又は複数の特定の実施の観点において開示された主題を当業者が作成し、使用できるように提示される。例えば、説明の手法を用いて、既存のアルゴリズムよりも多くの地震データのコンタミネーション（汚染）を除去できる。この手法により、垂直解像度は高まり、ノイズは最小限に抑えられ、小構造の識別及び対象ドメインにおける微妙な層序変化の識別が可能になる。このような詳細は、想定される用途の中でも、探査時の見通しや、開発プロジェクトにおける坑井の効果的配置及びジオステアリング（geo-steering）、並びに貯留層（reservoir）の特性評価にとって不可欠である。

【0023】

方法の例において、この方法への入力として、重合後の地震データを含めることができる。超解像度ラドン変換は、こうしたデータを用いて、複雑な信号を単純なスパイク列（spike-train）信号の合計に分解することができる。超解像度ラドン変換を用いて、この地震データがラドン空間で分解されると、信号ドメインとノイズドメインを最

10

20

30

40

50

大限に分離できる。ミューティング機能 (muting function、ミューティング関数) を定義して不要なノイズのいくらかを除去することができる。ラドン変換の解像度の有効性は、ラドン変換の解像度に依存する可能性がある。ノイズ (又は多重波) が除去されると、逆ラドン変換を行って信号 (又はプライマリ (プライマリ波)) のみを出力できる。

【0024】

開示された実施において様々な改変、変更、及び並べ替えを行えることは当業者には容易に明らかであり、また定義された一般的な原理は、本開示の範囲から逸脱することなく、他の実施及び用途に適用するようにしてもよい。本開示は、記載又は図示の実施に限定されることを意図してはならず、記載する原理及び特徴に整合する最も広い範囲が付与されることを意図している。

10

【0025】

ラドン変換がフィールドデータに適用されると、信号とノイズとの間の不十分なディップ差又は移動差の結果として生じる典型的な低解像度の問題に悩まされる可能性がある。ラドン変換の解像度を上げることは非常に重要である。なぜなら、その主な用途は、地震ギャザー (gather、波形出力の集合) の混合イベントと重複イベントを、分離できる新しい変換ドメインにマッピングすることだからである。次に、望ましくない成分をミュートした後、上記データは元のドメインに戻され、目的の情報のみが保持される。線形、放物線、又は双曲線基底関数を用いて、時間オフセット (offset、補正)、周波数オフセット、又は周波数 - 波数ドメインでラドン変換を得るためのさまざまな方法を展開できる。最も一般的に使われる方法は反転 (inversion、インバージョン) である。標準的なラドン変換は、通常、例えば次式のように、モデル  $m$  にペナルティを与えるコスト関数の最小化と、最小二乗の意味での観測データと予測データとの間の不一致の最小化とに関連付けることができる。

20

【数1】

$$\min \mu \|m\|_2 + \frac{1}{2} \|d - Lm\|_2^2 \quad (1),$$

ここで、 $d$  は観測データ、 $L$  は逆線形ラドン変換、パラメータ  $\mu > 0$  はデータ近似とモデル間のトレードオフのバランスをとるものである。標準的なラドン変換の実施は、高速変換の要件を満たすが、制限されたアパーチャー (aperture、開口) と離散化 (discretization) に関連する問題を適切に処理することはできない。

30

【0026】

高解像度ラドン変換を実現するために、スパース制約を用いた逆手法を時間ドメインラドン変換に適用できる。スパース性の直接的な表現は、モデル  $m$  の  $l_0$  を最小化することである。モデル  $m$  は、ベクトル内の非ゼロ要素の数を示す。ただし、 $l_0$  ノルムは凸関数ではないため、極小値は一意ではない。スパース変換を得る一般的な手法は、(次式に示すように) モデルの  $l_0$  ノルムと  $l_2$  ノルムのデータ不一致を最小化することである。

【数2】

$$\min \mu \|m\|_1 + \frac{1}{2} \|d - Lm\|_2^2 \quad (2).$$

40

【0027】

式 (2) は、その単純さと効率のため、反復的に再重み付けされた最小二乗 (Iteratively Reweighted Least Squares、IRLS) アルゴリズムによって解くことができる。スパースラドン変換アルゴリズムは、地震処理で現在一般的に用いられている周波数ドメインで実施できる。スパースラドン変換アルゴリズムは、標準のラドン変換アルゴリズムよりも優れていると認識できるが、スパースラドン変換アルゴリズムは、長い計算時間、アーチファクトの導入、反転パラメータの設定の困難さを含む新たな問題を招く可能性がある。実施によっては、反復ラドンモデルの収縮 (

50

s h r i n k a g e ) に基づいて、時間 - 周波数ドメインでスパース時間不変ラドン変換を用いることができ、パフォーマンスが向上し、計算時間が短縮される。これら全てのスパースラドン変換アルゴリズムは、スパース基準を用いることで解像度をある程度まで高めることができることを示している。しかしながら、実際のデータではパフォーマンスを引き続き改善する必要がある。これは、制限が 1 0 ノルムから 1 1 ノルムへの実現に起因するからである。

【 0 0 2 8 】

実施によっては、超解像度の数学的理論に基づく。大まかに言えば、その課題は、合理的な仮定又は観測モデルに関する事前知識に基づいて、粗のスケール情報から細かな詳細を含む元の超解像度画像を復元する逆式として投入され得る。

10

【 0 0 2 9 】

図 1 A は、一実施に係る、空間ドメインにおける超解像度問題における超解像度信号の一例を表すグラフ 1 0 0 である。グラフ 1 0 0 は超解像度スパイクを示す。

【 0 0 3 0 】

図 1 B は、一実施に係る、空間ドメインにおける高解像度信号の一例を示すグラフ 1 0 2 である。グラフ 1 0 2 は、低周波ウェーブレット ( w a v e l e t ) を用いてスパイク ( グラフ 1 0 0 ) を畳み込むことにより得られる。

【 0 0 3 1 】

超解像度ラドン変換を得るために、データの一致する、最もスパースな表現を持つモデルを使用できる。この問題は、1 0 ノルム正則化に再定式化できる。

20

【 数 3 】

$$\min \mu \|m\|_0 + \frac{1}{2} \|d - Lm\|_2^2 \quad (3),$$

ここで、正則化パラメータ  $\mu$  は、解のスパース性とデータの近似の忠実度とのバランスを取るものである。

【 0 0 3 2 】

式 ( 3 ) を解くために採用できる 2 つの一般的なテーマは、1 ) 貪欲な追跡 ( g r e e d y p u r s u i t ) と、2 ) 凸緩和法である。一致追跡型アルゴリズムを使用する戦略等のいわゆる「貪欲な」戦略は、信号の近似の改善をもたらす 1 つ以上のコンポーネントを連続して識別することにより、スパースな解 ( s o l u t i o n ) を繰り返し改良できる。これらの戦略には、スパースラドン変換アルゴリズムを含む実際のアプリケーションで広く用いられている比較的高速な反復手順を含めることができる。この戦略は 1 0 ノルムを最小化することでスパース構造を利用するが、局所的な最適に収束し、スパースな解の濃度 ( c a r d i n a l i t y ) といった事前情報が必要になる場合がある。したがって、貪欲な戦略の性能は一般に保証されず、厳密な条件下でのみ、1 0 ノルム正則化の最もスパースな解の復元を示すことができる。

30

【 0 0 3 3 】

式 ( 3 ) を解く別の手法は、凸でない 1 0 関数を上述の凸緩和した 1 1 ノルムに置き換えて、高解像度ラドン変換のための凸最適化式 ( 2 ) を生成することである。1 1 ノルム最小化問題の古典的な解法は、ここ数年よく研究されてきている。収縮しきい値処理のアイデアに着想を得て、大規模な 1 1 最小化問題を解くための多数の高速アルゴリズムが開発された。これらの方法はいかなる事前の情報も必要としないが、最もスパースな解を完全に復元することはできない。

40

【 0 0 3 4 】

本開示において、超解像度ラドン変換は、1 0 ノルム正則化式 ( 3 ) を解くことにより、詳細なスケールでのスパイク列信号の分解に用いることができる。その方法は、貪欲な戦略と凸最適化手法の両方の優れた機能を組み合わせた、2 段階の反復収縮 / ソフト及びハードしきい値アルゴリズムである。第 1 の段階では、収縮ベースの方法を用いて 1 1 ノルム正則化式 ( 2 ) を解き、適切な初期点を生成し、解のスパース性を推定できる。次に

50

、反復ハードしきい値アルゴリズム (Iterative Hard Thresholding algorithm、IHT) を適用して、第 1 の段階で得られたウォームスタートから 10 ルム正則化式 (3) を解く。これらの 2 つの操作は、スパース表現  $m$  がデータ  $d$  に適合するまで繰り返される。

【0035】

さらに、この 2 段階アルゴリズムは、正則化パラメータ  $\mu$  の減少シーケンスを割り当てることにより、連続化手法に組み込むことができる。この実施のアプリケーション (適用) は、一連の合成及び現場の地震データセットの多重波を抑制することができる。上記の合成の例は、上記アルゴリズムが、従来の高解像度スキームで通常は検出できない小さなディップ差を用いて、重複するイベントを分離できることを明確に示している。また、フィールドデータのテストは、その方法が一般的に用いられるアルゴリズムよりも優れていることも示し得る。

10

【0036】

主な目標は、貪欲な追跡スキームと組み合わせて 11 ノルム最小化式 (2) を解くことにより、10 ノルム正則化式 (3) の最もスパースな解を得ることである。

【0037】

11 正則化式 (2) を解くための最も一般的な方法の 1 つは、反復収縮しきい値アルゴリズム (Iterative Shrinkage - Thresholding Algorithm、ISTA) である。この場合、反復ごとに順ラドン変換及び逆ラドン変換  $L^T$  及び  $L$  が行われ、その後に収縮しきい値処理演算子が続く。一般に、ポイント  $m_k$  を指定すると、収縮手順は新しいポイントを生成できる。

20

【数 4】

$$m_{k+1} = T_{\tau\mu}(m_k + \tau L^T(d - Lm_k)) \quad (4),$$

ここで、 $\tau$  は適切なステップサイズであり、 $T_{\tau\mu}$  は次式で定義される収縮しきい値処理演算子である。

【数 5】

$$T_{\tau\mu}(m)_i = \text{sign}(m_i) \times \max\{|m_i| - \tau\mu, 0\} \quad (5),$$

30

ここで、 $\text{sign}()$  は、コンポーネント (成分) の符号に応じて 1、0、又は -1 である。直観的には、この演算子  $T_{\tau\mu}$  の効果は、各コンポーネントの振幅を  $\mu$  だけ減らし、それらの負の結果を消し去ることにより、11 ノルムを減らすことである。式 (4) は、古典的な勾配法の拡張であり、様々な検討事項から独立して導き出すことができる。この収縮演算子は、高解像度ラドン変換にも使用できる。

【0038】

ISTA の利点は、シンプルであるため比較的大規模な問題の解決に適していることである。この収縮スキームの最も魅力的な特徴は、有限数の反復で非ゼロ要素と 11 正則化式 (2) の最適解の符号が得られることである。しかしながら、式 (4) で生成されるシーケンス  $\{m_k\}$  は、非常にゆっくりと解に収束する可能性がある。実際、ISTA は次式のように振る舞う。

40

【数 6】

$$F(m_k) - F(\tilde{m}) \sim O(1/k) \quad (6),$$

ここで、 $F(m) := \mu \|m\|_1 + 1/2 \|d - Lm\|_2^2$  は、式 (2) の目的関数を表し、チルダ  $m$  は最適解、 $k$  は反復回数である。

【0039】

本開示において、最初に ISTA の高速版 (FISTA) を使うことができ、これによ

50

り、I S T Aとしての単純さが維持されるだけでなく、著しく改善された複雑さの結果が共有される。 $m_0 = m_1 = 0$  及び  $t_0 = 1$  から始まる場合、F I S T Aは次の形式を取る。

【数 7】

$$\begin{cases} t_{k+1} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4t_k^2}}{2}, \\ z_k = m_k + \frac{t_{k-1} - 1}{t_k} (m_k - m_{k-1}), \\ m_{k+1} = T_{\tau\mu}(z_k + \tau L^T(d - Lz_k)) \end{cases} \quad (7).$$

【0040】

10

F I S T AとI S T Aとの間の主な違いは、収縮しきい値処理演算子  $T_{\mu}$  が以前のポイント  $m_k$  においてではなく、以前の2つのポイント  $\{m_k, m_{k-1}\}$  の特定の線形結合を用いたポイント  $z_k$  において用いられることである。I S T A及びF I S T Aの両方での主要な計算作業は明らかに同じままである。つまり、勾配部分の後に収縮しきい値処理演算子が続く。式(7)の最初の2つのステップにおけるF I S T Aの追加計算は明らかに限界である。 $\mu$  が固定の場合には、F I S T Aの収束率は次式で与えられるように、大幅に改善されることが証明できる。

【数 8】

$$F(m_k) - F(\hat{m}) \sim O(1/k^2) \quad (8).$$

20

【0041】

11 正則化式(2)の近似解チルダ  $m$  がF I S T Aから得られると、この解は次の段階のウォームスタート(warm start)として使用でき、変換ドメイン内の画像のスパースレベルに関する推定を提供できる。最初に、局所的に最適な振幅の数  $s_i$  は、チルダ  $m$  のイメージの各行で識別できる。次に、総数  $s = \sum_i s_i$  を、チルダ  $m$  のスパース推定と見なす。

【0042】

第2の段階では、反復ハードしきい値アルゴリズムを適用して、10 ノルム正則化式(3)を解くことができる。現代の追跡方法(pursuit method)の中で、反復ハードしきい値アルゴリズムは最も単純である。解のスパースレベルの事前推定がある場合、10 ノルム正則化問題の最もスパースな解を復元できる。反復を用いて、初期  $m_0$  = チルダ  $m$  とする。

30

【数 9】

$$m_{k+1} = H_s(m_k + \tau L^T(d - Lm_k)) \quad (9),$$

ここで、 $H_s$  は、ベクトル内の  $s$  最大(絶対値)要素を除くすべてをゼロに設定するハードしきい値処理演算子である。ある条件下では、式(9)の反復ハードしきい値処理法がほぼ最適な精度で  $s$  - スパースな解を復元できることを確認できる。

40

【0043】

先に述べた反復収縮及びハードしきい値アルゴリズムは、収束基準が満たされるまで繰り返すことができる。これら2つの手法の組み合わせは、10 ノルム最小化問題の最もスパースな解につながる。従来の再重み付け最小二乗(I R L S)ベースのスパースラドン変換アルゴリズムでは、再重み付けされた行列の更新により、各反復で行列の逆演算が必要になることが知られている。提案の2段階しきい値アルゴリズムは、これらの変更を必要としない。これは、縮小演算子とハードしきい値処理演算子とによってスパース性が自動的に達成されるからである。このようなシナリオでは、上記アルゴリズムはI R L Sベースのスパースラドン変換アルゴリズムと比べて計算時間を大幅に削減できる。また、貪欲な戦略は完全に異なるため、貪欲な追跡と凸最適化手法を組み合わせるという考え方も

50



使える。

【 0 0 4 4 】

収縮及びハードしきい値処理の反復で特定される2つのパラメータ、つまり、正則化パラメータ $\mu$ とステップ長 $\tau$ が残っている。方法によっては、各反復でパラメータを選択する戦略が異なる。本開示では、Barzilai - Borwein法及び連続化手法 (continuation approach) を適用して、これらのパラメータを動的に更新することができる。

【 0 0 4 5 】

ステップ長 $\tau$ の場合、スムーズ関数 (smooth function) の逆Hessian (ヘッセ行列) に近似するために、最小二乗の意味において、

【数B】

$$g(m) := \frac{1}{2} \|d - Lm\|_2^2, \tau \approx \left( \frac{\nabla g(m_k) - \nabla g(m_{k-1})}{m_k - m_{k-1}} \right)^{-1},$$

であり、ここで、

【数C】

$$\tau = \arg \min_{\tau} \left\| \tau (\nabla g(m_k) - \nabla g(m_{k-1})) - (m_k - m_{k-1}) \right\|_2^2 = \frac{\langle m_k - m_{k-1}, m_k - m_{k-1} \rangle}{\langle m_k - m_{k-1}, \nabla g(m_k) - \nabla g(m_{k-1}) \rangle}.$$

である。

【 0 0 4 6 】

反復により、既に、

【数D】

$$\nabla g(m_k) = L^T (d - Lm_k)$$

及び、

【数E】

$$\nabla g(m_{k-1}) = L^T (d - Lm_{k-1})$$

を計算しているため、このステップの主要な計算作業は、比較的単純なベクトル演算のみである。パラメータ $\mu$ はIHTで同じ関数を持つため、Barzilai - Borwein法を用いてステップサイズ $\tau$ を選択することもできる。IHTの安定性制御にはさまざまな手法を用いることができる。

【 0 0 4 7 】

11正則化式(2)のパラメータ $\mu$ は、表現誤差 (representation error) とそのスパース性のトレードオフを特定する。通常、 $\mu$ の値が大きいと、よりスパースな結果になる。但し、ペナルティ関数 (penalty function) の理論は、二次正則化式(2)の解が次の11ノルム最小化式(10)に収束することを意味する。 $\mu$ がゼロとして、

【数10】

$$\min \|m\|_1, \text{ s.t. } d = Lm \quad (10),$$

したがって、 $\mu$ は正則化式(2)の精度を11ノルムに固定する。但し、 $\mu$ の値が小さい場合に式(2)を直接解くと、実際のパフォーマンスが低下する可能性がある。したがって、スパース性を直接制御しないため、正則化パラメータ $\mu$ に適切な値を事前に選択することは困難である。場合によっては、曲線を用いて、データの不一致とモデルのスパース

ス性との間の最適なトレードオフを追跡（追及）できる。

【 0 0 4 8 】

連続化手法を用いてパラメータ  $\mu$  を動的に選択できる。この手法は、減少するシーケンスを用いて一連の式（ 2 ）の解を見つけることができる。

【数 F】

$$\mu_0 > \mu_1 > \dots > \bar{\mu},$$

ここで、上線  $\mu$  は所望の精度に基づく小さな数値である。考え方は簡単である。すなわち、 $\mu_{k+1}$  に関連する新しい問題を解く場合、 $\mu_k$  を用いた現在の解をウォームスタートとして使用できる。この点は、 $\mu$  が大きい場合に式（ 2 ）を解くことが速くなり得るということである。したがって、これらの中間の解は、比較的安価に計算でき、次の問題に対する一連の便利な最初の推測を提供する。一般に、連続化戦略は、指定された小さな値上線  $\mu$  を直接適用するよりも収束の速度を上げる点で優れていることを実証できる。最初の選択  $\mu_0$  の場合、FISTA の初期値はゼロなので、反復式（ 7 ）は  $\mu_0$  が  $L^T d$  に対するしきい値処理の役割を果たすことを明らかにしている。最初の選択肢は、 $\mu_0 = 0.9 L^T d^2$  である。上線  $\mu$  は、ノイズのない場合の所望の精度に直接リンクしていることがわかる。例えば、相対誤差  $d - L m^2 / d^2$  が 1 0 % 未満のときにアルゴリズムが終了する場合、上線  $\mu = 0.01$  は上線  $\mu$  についてかなり自然な選択である。

【 0 0 4 9 】

超解像度ラドン変換の目的は、ラドンドメインでの点ごとのイベントの重ね合わせを分解することである。時間 - 空間ドメインでの異なるイベントの分離可能性は、データのサンプリングと開口に直接関係することは公知である。を 2 つのイベントのディップ差とすると、 $\tan \theta$  はサンプル内の空間ごとの時間変化の勾配となる。重複するイベントは、

【数 1 1】

$$\tan \theta \geq \frac{1}{f_{\max} \Delta t n_x} \quad (11),$$

であれば分離できる。

ここで、 $f_{\max}$  は対象の最大周波数、 $t$  は時間サンプルレート、 $n_x$  は空間サンプルの数である。提案の超解像度ラドン変換の性能は、合成例の手段によって実証できる。

【 0 0 5 0 】

図 2 A 及び図 2 B は、一実施に係る、移動差が 4 度である合成例におけるラドン変換の比較を提供する例としてのグラフ 2 0 0 a 1 乃至 2 0 0 a 3、2 0 0 b 1 乃至 2 0 0 b 4、2 0 0 c 1 乃至 2 0 0 c 4、及び 2 0 0 d 1 乃至 2 0 0 d 4 を示す。グラフ 2 0 0 a 1 は理想的なラドン変換を示す。グラフ 2 0 0 a 2 は、グラフ 2 0 0 a 1 の線 2 5 7 a の振幅を示す。グラフ 2 0 0 a 3 は線形イベントを示す。グラフ 2 0 0 b 1 は標準的なラドン変換を示す。グラフ 2 0 0 b 2 は、グラフ 2 0 0 b 1 のライン 2 5 7 b の振幅である。グラフ 2 0 0 b 3 は、標準的なラドン変換からの再構成を示す。グラフ 2 0 0 b 4 は、1 % のデータ残差を示す。グラフ 2 0 0 c 1 は、高解像度ラドン変換を示す。グラフ 2 0 0 c 2 は、グラフ 2 0 0 c 1 の線 2 5 7 c の振幅を示す。グラフ 2 0 0 c 3 は、高解像度ラドン変換からの再構成である。グラフ 2 0 0 c 4 は 1 0 % のデータ残差である。グラフ 2 0 0 d 1 は超解像度（ラドン変換）である。グラフ 2 0 0 d 2 は、グラフ 2 0 0 d 1 の線 2 5 7 d の振幅を示す。グラフ 2 0 0 d 3 は、超解像度ラドン変換からの再構成である。グラフ 2 0 0 c 4 は 1 % のデータ残差である。

【 0 0 5 1 】

図 2 A の一行目（グラフ 2 0 0 a 1 乃至 2 0 0 a 3 を示す）では、ラドンドメインで 1 5 ヘルツ（Hz）の主周波数を持つグラフ 2 0 0 a 1 の中の 4 つのリッカーウェーブレット（Ricker wavelet）は、線形逆ラドン変換によってグラフ 2 0 0 a 3 の 4 つの線形イベントを生成する。グラフ 2 0 0 a 2 は、ラドン空間におけるグラフ 2 0 0

a 1 の線 2 5 7 a の振幅を示し、時間インデックスは線 2 5 7 a に等しい。図 2 A に示すように、グラフ 2 0 0 a 1 におけるラドンドメインの右側の 2 つのウェーブレットは近接しているため、グラフ 2 0 0 a 3 の中央の重複イベントは 4 度のディップ差のみを有する。オフセットの制限された開口範囲では、グラフ 2 0 0 a 3 の時間 - 空間ドメインで強い干渉パターンを示す。上記実験では、標準解像度、高解像度及び超解像度のラドン変換を比較できる。さまざまな方法から得られたモデルは、図 2 A 及び図 2 B の最初の ( 左 ) 列に掲げられている。図 2 A 及び図 2 B では、時間インデックスとして用いられる線 2 5 7 a 乃至 2 5 7 d の振幅がそれぞれ第 2 ( 次の ) 列に示される。再構築されたイベントを 3 列目に、データの残差を 4 列目に示す。グラフ 2 0 0 b 1 は、共役勾配法 ( c o n j u g a t e g r a d i e n t m e t h o d ) によって得られた標準的なラドン変換の結果である。

10

#### 【 0 0 5 2 】

グラフ 2 0 0 b 4 ではデータの残差  $d - L m 2 / d 2$  は 1 % 未満であるが、標準的なラドン変換における不鮮明化効果 ( s m e a r i n g e f f e c t s 、スミアリング効果 ) がグラフ 2 0 0 b 1 に示される。その結果、グラフ 2 0 0 b 2 では右側の 2 つのウェーブレットを分離できない。グラフ 2 0 0 c 1 ( 図 2 B ) は、15 回の反復で I S T A から得られた高解像度ラドン変換結果を表示する。グラフ 2 0 0 c 1 の 2 つの重複するイベントがラドンドメインの異なるゾーンに分離されることは明らかである。グラフ 2 0 0 c 3 の復元画像は、グラフ 2 0 0 c 4 に示すように 1 0 % のデータ残差を持つモデルに類似している。この結果を初期ステップとして、グラフ 2 0 0 d 1 の超解像度ラドン変換とグラフ 2 0 0 d 2 の真の振幅を 3 つのハードしきい値処理反復で得られる。各ハードしきい値処理反復の後に 5 つの収縮反復が続く。この結果は上記モデルとほぼ同じである。さらに、グラフ 2 0 0 d 3 の再構成画像は正確であり、グラフ 2 0 0 d 4 に示されるように、1 % 未満のデータ残差である。

20

#### 【 0 0 5 3 】

図 3 A 及び図 3 B は、一実施に係る、移動差が 3 度である合成例におけるラドン変換の比較を示した例のグラフ 3 0 0 a 1 乃至 3 0 0 a 3 、3 0 0 b 1 乃至 3 0 0 b 4 、3 0 0 c 1 乃至 3 0 0 c 4 、及び 3 0 0 d 1 乃至 3 0 0 d 4 を示す。グラフ 3 0 0 a 1 は理想的なラドン変換を示す。グラフ 3 0 0 a 2 は、グラフ 3 0 0 a 1 の線 3 5 7 a の振幅を示す。グラフ 3 0 0 a 3 は 4 つの線形イベントを示す。グラフ 3 0 0 b 1 は標準的なラドン変換を示す。グラフ 3 0 0 b 2 は、グラフ 3 0 0 b 1 の線 3 5 7 b の振幅を示す。グラフ 3 0 0 b 3 は、標準的なラドン変換からの再構成を示す。グラフ 3 0 0 b 4 は、1 % のデータ残差を示す。グラフ 3 0 0 c 1 ( 図 3 B ) は高解像度ラドン変換を示す。グラフ 3 0 0 c 2 は、グラフ 3 0 0 c 1 の線 3 5 7 c の振幅を示す。グラフ 3 0 0 c 3 は、高解像度ラドン変換からの再構成を示す。グラフ 3 0 0 c 4 は、1 0 % のデータ残差を示す。グラフ 3 0 0 d 1 は超解像度 ( ラドン変換 ) を示す。グラフ 3 0 0 d 2 は、グラフ 3 0 0 d 1 の線 3 5 7 d の振幅を示す。グラフ 3 0 0 d 3 は、超解像度ラドン変換からの再構成を示す。グラフ 3 0 0 d 4 は 1 % のデータ残差を示す。

30

#### 【 0 0 5 4 】

第 2 の実験では、ラドンドメインの右側にある 2 つのリッカーウェーブレットをグラフ 3 0 0 a 1 において近づけることができるため、それらが生成するイベントはグラフ 3 0 0 a 3 のように 3 度のディップ差しかない。分離可能条件 ( 式 ( 1 1 ) ) は成り立たない。グラフ 3 0 0 b 1 乃至 3 0 0 b 4 、3 0 0 c 1 乃至 3 0 0 c 4 、及び 3 0 0 d 1 乃至 3 0 0 d 4 は、それぞれ、標準的なラドン変換、高解像度ラドン変換、及び超解像度ラドン変換によって得られた結果を、図 2 A 及び図 2 B のグラフと同じ順序で示す。

40

#### 【 0 0 5 5 】

図示の方法はどれも干渉イベントを分離できないが、データにバンドパスフィルタを加えて支配的な周波数を 3 0 H z に上げることで問題を解決でき、その結果、式 ( 1 1 ) が成り立つことになる。標準的なラドン変換、高解像度ラドン変換、及び超解像度ラドン変換によって得られた結果を、図 2 A 及び図 2 B のグラフと同じ順序で、図 4 A 及び図 4 B

50

のグラフに示す。

#### 【 0 0 5 6 】

図 4 A 及び図 4 B は、一実施に係る、フィルタリング後の、移動差が 3 度である合成例におけるラドン変換の比較を示した例のグラフ 4 0 0 a 1 乃至 4 0 0 a 3、4 0 0 b 1 乃至 4 0 0 b 4、4 0 0 c 1 乃至 4 0 0 c 4、及び 4 0 0 d 1 乃至 4 0 0 d 4 を示す。グラフ 4 0 0 a 1 は理想的なラドン変換を示す。グラフ 4 0 0 a 2 は、グラフ 4 0 0 a 1 の線 4 5 7 a の振幅を示す。グラフ 4 0 0 a 3 は 4 つの線形イベントを示す。グラフ 4 0 0 b 1 は、標準的なラドン変換を示す。グラフ 4 0 0 b 2 は、グラフ 4 0 0 b 1 の線 4 5 7 b の振幅を示す。グラフ 4 0 0 b 3 は、標準的なラドン変換からの再構成を示す。グラフ 4 0 0 b 4 は 1 % のデータ残差を示す。グラフ 4 0 0 c 1 (図 4 B) は、高解像度ラドン変換を示す。グラフ 4 0 0 c 2 は、グラフ 4 0 0 c 1 の線 4 5 7 c の振幅を示す。グラフ 4 0 0 c 3 は、高解像度ラドン変換からの再構成を示す。グラフ 4 0 0 c 4 は 1 0 % のデータ残差を示す。グラフ 4 0 0 d 1 は超解像度 (ラドン変換) を示す。グラフ 4 0 0 d 2 は、グラフ 4 0 0 d 1 の線 4 5 7 d の振幅を示す。グラフ 4 0 0 d 3 は、超解像度ラドン変換からの再構成を示す。グラフ 4 0 0 c 4 は 1 % のデータ残差を示す。

10

#### 【 0 0 5 7 】

標準的なラドン変換では、グラフ 4 0 0 b 1 のラドン空間で 2 つの閉じたイベントを特定できなかった。しかし、収縮プロセスによって返された初期グラフ 4 0 0 c 1 では、グラフ 4 0 0 d 1 の超解像度ラドン変換は、グラフ 4 0 0 d 4 に示すように、1 % 未満のデータ残差でラドン空間の真のスパース信号を復元する。

20

#### 【 0 0 5 8 】

図 5 A 乃至図 5 D は、一実施に係る、フィールドデータの例に関する標準的、高解像度、及び超解像度ラドン変換の比較例を示す。例えば、図 5 A 乃至図 5 D は、重合後データ 5 0 0 a、標準的なラドン変換 5 0 0 b、高解像度ラドン変換 5 0 0 c、及び超解像度ラドン変換 5 0 0 d を含む。

#### 【 0 0 5 9 】

図 5 A 乃至図 5 D は、共役勾配法を用いた標準的なラドン変換 5 0 0 b、高解像度ラドン変換 5 0 0 c、及び超解像度ラドン変換 5 0 0 d によって計算された同じ重合データ 5 0 0 a のラドン変換間の比較を示す。図 5 A 乃至図 5 D に見られるように、標準的なラドン変換は、開口が制限されたラドンドメインの典型的なテール (tail) とアーチファクトを示す。収縮段階から返された高解像度ラドン変換は、よりクリーンな結果 5 0 0 c を示す。このアーチファクトは、スパイク状の超解像度ラドン変換でほとんど消失した。特に、時間インデックス (指数) が約 3 0 0 乃至 4 0 0 の部分では、弱いイベントは標準的なラドン変換で強い干渉パターンを示す。しかし、それらは分離され、超解像度ラドン変換の異なるスパイクに強化された。達成された超解像度ラドン変換には多くの用途があるが、おそらく多重波の除去が最も重要な一つであろう。

30

#### 【 0 0 6 0 】

図 6 は、一実施に係る、例としての重合後のデータセット 6 0 0 を示す。図 6 は、一実施に係る、実データセットの重合部分を含んでいる。線 6 0 2 及び 6 0 4 は、重合後のデータセット 6 0 0 の重要な領域を示す。浅い部分のイベントは非常に強く、線 6 0 2 において 2 . 3 秒から大きな移動差が現れることに留意すべきである。線 6 0 4 は平らな層に重なるいくつかのディップ (チルト、傾斜) 層を示している。このデータの浅い部分を平坦化した後、2 . 3 秒後に現れるすべての平坦なイベントは多重波であると仮定するのが妥当である。時間ドメインアルゴリズムの柔軟性により、ラドン変換スペースは 2 . 3 秒未満のみ計算できる。この実験では、例えば、入力データを、それぞれ 5 0 トレース × 6 0 1 時間サンプルを持つ 6 3 個の垂直スライスにカットできる。その他のトレースと時間サンプルを持つその他のスライスを使用でき、標準的なラドン変換と超解像度ラドン変換をそれぞれ、各スライスに適用できる。移動差はオフセットと共に減少するため、狭いウィンドウはプライマリから多重波を分離するのが難しくなる。ラドン空間で同じ自動ミュージーティングを適用して多重波を除去できる。このフィルタ処理された空間から逆ラドン変

40

50

換アルゴリズムを実行して、プライマリを復元できる。

【0061】

図7Aは、一実施に係る、超解像度ラドン変換から得られた例示のプライマリ700aを示す。図7Bは、一実施に係る、減算により得られた例示の多重波700bを示す。例えば、図7A及び図7Bは、多重波700bからプライマリ700aを分離する際の超解像度ラドン変換の性能を示す。矢印702a及び矢印702bは、データの重要な部分を示す。

【0062】

図8は、一実施に係る、標準的なラドン変換から得られた例示のプライマリ800を示す。図9は、一実施に係る、減算により得られた例示の多重波900を示す。比較として、図8及び図9は、標準的なラドン変換を使用したプライマリと多重波の同じ部分を示す。矢印802及び矢印902は、データの重要部分を示す。(矢印902で示す)傾斜プライマリの漏れは、図9の多重波と、(矢印802で示す)図8のプライマリの中に残った不要な平坦イベントと見ることができる。比較として、これらのアーチファクトは、(それぞれ矢印702a及び矢印702bで示す)図7A及び図7Bの超解像度ラドン変換では観察されなかった。

【0063】

結論として、本開示は、超解像度ラドン変換を用いて、10ノルム最適化問題を解くことにより、詳細なスケールでスパイク列信号を復元することについて述べている。上記アルゴリズムは、貪欲な戦略と凸最適化手法の両方の優れた特徴を組み合わせる。提案の方法では、反復で収縮演算子とハードしきい値演算子とを交互に適用することにより、ラドンドメインで最もスパースなモデルが自動的に達成される。基本的な2つのステージアルゴリズムを連続化手法に埋め込み、値が減少するシーケンスを正則化パラメータ $\mu$ に割り当てることにより、アルゴリズムは、速度とスパース信号を復元する能力との両面で最先端の能力を発揮できる。

【0064】

この超解像度ラドン変換は、元の信号を正しく再構成するだけでなく、小さな移動差でノイズから信号を分離する興味深い新たな手法を提供する。本開示に示す実施例から、解像度を著しく高めることができ、プライマリを多重波から分離する上で超解像度ラドン変換の性能は、標準的なラドン変換の性能を上回る。

【0065】

図10は、一実施に係る、地震データに超解像度ラドン変換を行うための例示の方法1000を示すフローチャートである。提示内容を明確にするために、以下、その他の図の文脈で、方法1000を一般的に説明する。しかしながら、方法1000は、例えば、任意の適切なシステム、環境、ソフトウェア及びハードウェア、又は、システム、環境、ソフトウェア及びハードウェアの適切な組み合わせによって実行できることは言うまでもない。実施によっては、方法1000のさまざまなステップを、並行して、組み合わせて、ループで、又は任意の順序で実行することができる。

【0066】

ステップ1002では、重合後の地震データが受信される。例えば、重合後のデータは、図5Aに関連して説明した重合後のデータ500aであってもよい。ステップ1002から、方法1000はステップ1004に進む。

【0067】

ステップ1004では、重合後の地震データに超解像度ラドン変換を行うことを含み、受信された重合後の地震データから変換された地震データ生成される。一例として、生成された変換済み地震データは、図5B乃至図5Dに関連して説明したように、それぞれ、標準的なラドン変換500b、高解像度ラドン変換500c、又は超解像度ラドン変換500dであってもよい。ステップ1004から、方法1000はステップ1006に進む。

【0068】

実施によっては、変換された地震データを生成するステップは：ソフトしきい値アルゴ

10

20

30

40

50

リズムを地震データに適用するステップ；続いて、地震データにハードしきい値アルゴリズムを適用するステップ；しきい値条件が満たされるまで、ソフトしきい値アルゴリズムとハードしきい値アルゴリズムの適用を繰り返すステップ；及び、超解像度ラドンドメインを出力するステップ；を含む。例えば、次式に従ってしきい値条件を特定できる。

【数 1 2】

$$\frac{\|d-Lm\|_2}{\|d\|_2} < \epsilon \quad (12),$$

ここで、 $d$  は観測データ、 $L$  は逆線形ラドン変換、 $m$  はデータ近似モデル、 $\epsilon$  は予め定められた小さな正の数である。実施によっては、変換された地震データを生成するステップは、複雑な信号のそれぞれを一連の単純なスパイク列信号に分解するステップを含む。

【0 0 6 9】

ステップ 1 0 0 6 では、ある定義されたミュートイング機能を用いて不要なノイズを除去するなど、変換された地震データを用いて信号ドメインとノイズドメインとが分離される。例えば、ミュートイング機能を定義し、これを用いて不要なノイズを除去するなどにより、信号ドメインとノイズドメインとを分離できる。ステップ 1 0 0 6 から、方法 1 0 0 0 はステップ 1 0 0 8 に進む。

【0 0 7 0】

ステップ 1 0 0 8 では、分離された信号ドメイン及びノイズドメインを用いて逆ラドン変換が実行され、信号のみが出力される。例えば、I S T A を使用できる。ここで、式 (4) を用いて説明したように、反復ごとに順ラドン変換及び逆ラドン変換  $L^T$  及び  $L$  が行われ、その後に、収縮しきい値演算子が続く。ステップ 1 0 0 8 から方法 1 0 0 0 は停止する。ステップ 1 0 0 8 の後、方法 1 0 0 0 は停止する。

【0 0 7 1】

図 1 1 は、一実施に係る、本願で説明されるような記述されたアルゴリズム、方法、機能、プロセス、フロー、及び手順に関連付けられた計算機能を提供するために使用された例示的なコンピュータシステム 1 1 0 0 を示すブロック図である。図示されたコンピュータ 1 1 0 2 は、サーバ、デスクトップコンピュータ、ラップトップ/ノートブックコンピュータ、無線データポート、スマートフォン、パーソナルデータアシスタント (PDA)、タブレットコンピューティングデバイス、これらのデバイスのうちの 1 つ若しくは複数のプロセッサ、又は任意の他の適切な処理デバイスといった任意のコンピューティングデバイスを包含することを意図しており、該コンピューティングデバイスの物理インスタンス又は仮想インスタンス (又はその両方) を含む。加えて、コンピュータ 1 1 0 2 は、キーパッド、キーボード、タッチスクリーン、又はユーザ情報を受け入れ可能な他のデバイスといった入力デバイスと、コンピュータ 1 1 0 2 の動作に関連付けられた情報を伝達する出力デバイスとを含むコンピュータを包含していてもよく、デジタルデータ、視覚情報、または音声情報 (若しくは情報の組み合わせ)、又はグラフィカルユーザインタフェース (GUI) を含む。

【0 0 7 2】

コンピュータ 1 1 0 2 は、クライアント、ネットワークコンポーネント、サーバ、データベースあるいは他の持続性のもの、又は本願に説明された主題を実行するためのコンピュータシステムの任意の他のコンポーネント (又は役割の組み合わせ) としての役割を果たすことができる。例示のコンピュータ 1 1 0 2 は、ネットワーク 1 1 3 0 と通信可能に結合される。いくつかの実施では、コンピュータ 1 1 0 2 の 1 又は複数のコンポーネントは、クラウドコンピューティングベースの、ローカルな、グローバルな、又は他の環境 (又は環境の組み合わせ) を含む環境内で動作するように構成できる。

【0 0 7 3】

高レベルでは、コンピュータ 1 1 0 2 は、説明された主題に関連付けられたデータ及び情報を受け、送出し、処理し、保存し、又は管理するように動作可能な電子的計算デバイスである。いくつかの実施によれば、コンピュータ 1 1 0 2 は、アプリケーションサーバ

、電子メールサーバ、ウェブサーバ、キャッシングサーバ、ストリーミングデータサーバ、又は他のサーバ（又はサーバの組み合わせ）を含んでいても、或いは通信可能に結合されていてもよい。

【0074】

コンピュータ1102は、（例えば、別のコンピュータ602上で動作する）クライアントアプリケーションからネットワーク1130を介してリクエストを受けることができ、受信したリクエストを適切なソフトウェアアプリケーションを用いて処理することによって受信したリクエストに回答することができる。加えて、リクエストは、コンピュータ1102へ、（例えば、コマンドコンソールから又は他の適切なアクセス方法によって）内部ユーザ、外部ユーザ又はサードパーティ、他の自動化されたアプリケーション、更には、その他の適切なエンティティ、個人、システム、又はコンピュータから送信されるようにしてもよい。

10

【0075】

コンピュータ1102の各コンポーネントは、システムバス1103を用いて通信できる。いくつかの実施では、コンピュータ1102のコンポーネントのいずれか又は全ては、ハードウェア又はソフトウェアの両方（又はハードウェア及びソフトウェアの組み合わせ）が、アプリケーションプログラミングインタフェース（API）1112又はサービスレイヤ1113（又は、API1112及びサービスレイヤ1113の組み合わせ）を用いて、システムバス1103を介して、互いに又はインタフェース1104（又は両方の組み合わせ）とインタフェース接続することができる。API1112は、ルーチン、データ構造、及びオブジェクトクラスの仕様を含むことができる。API1112は、コンピュータ言語に依存しないか又は依存するかのいずれかであり、また完全なインタフェース、単一の関数、又は一組のAPIを指していてもよい。サービスレイヤ1113は、コンピュータ1102へソフトウェアサービスを、又はコンピュータ1102に通信可能に結合された他のコンポーネントを（図示されているかどうかに関わらず）提供する。コンピュータ1102の機能は、このサービスレイヤを用いて全てのサービスコンシューマにアクセス可能であってもよい。サービスレイヤ1113によって提供されたサービスといったソフトウェアサービスは、定義済みのインタフェースを介して再利用可能な定義済み機能を提供する。例えば、インタフェースは、JAV A（登録商標）、C++、又は、拡張マークアップ言語（XML）フォーマット若しくは他の適切なフォーマットでデータを提供する他の適切な言語で書かれたソフトウェアであり得る。コンピュータ1102の統合コンポーネントとして図示される一方で、代替の実施は、API1112又はサービスレイヤ1113を、コンピュータ1102の他のコンポーネント又はコンピュータ1102に通信可能に結合された他のコンポーネントに（図示されているかどうかに関わらず）関連してスタンドアロンコンポーネントとして例示することができる。さらには、API1112又はサービスレイヤ1113のいずれか又は全ての部分は、本願の範囲から逸脱することなく、別のソフトウェアモジュール、エンタープライズアプリケーション、又はハードウェアモジュールの子モジュール又はサブモジュールとして実施されるようにしてもよい。

20

30

【0076】

コンピュータ1102は、インタフェース1104を含む。図11には単一のインタフェース1104として図示されているが、2つ又はそれより多くのインタフェース1104を、コンピュータ1102の特定のニーズ、要望、又は特定の実施に従って使用することができる。インタフェース1104は、分散環境においてネットワーク1130に（図示されているかどうかに関わらず）接続される他のシステムと通信するために、コンピュータ1102によって使用される。一般にインタフェース1104は、ソフトウェア又はハードウェア（又はソフトウェア及びハードウェアの組み合わせ）でエンコードされたロジックを含み、またネットワーク1130と通信するように動作可能である。より具体的には、インタフェース1104は、ネットワーク1130又はインタフェースのハードウェアが図示のコンピュータ1102の内側及び外側において物理信号を通信するように動

40

50

作可能であるように、通信に関連付けられた 1 又は複数の通信プロトコルをサポートするソフトウェアを含むことができる。

【0077】

コンピュータ 1102 は、プロセッサ 1105 を含む。図 11 においては単一のプロセッサ 1105 として示されるが、2 又はそれより多くのプロセッサを、コンピュータ 1102 の特定のニーズ、要望、又は特定の実施に従って使用することができる。一般に、プロセッサ 1105 は、命令を実行し、また、本願に記載されるように、コンピュータ 1102 の動作、及び任意のアルゴリズム、方法、機能、プロセス、フロー、若しくは手順を実行するためにデータを処理する。

【0078】

また、コンピュータ 1102 は、コンピュータ 1102 又はネットワーク 1130 に（図示されているかどうかに関わらず）接続可能な他のコンポーネント（又はこの両方の組み合わせ）のためのデータを保持することができるデータベース 1106 を含む。例えば、データベース 1106 は、インメモリの、従来型の、又は他のタイプのデータベースであることができ、該データベースは、本願に整合するデータを格納する。いくつかの実施では、データベース 1106 は、説明された機能及びコンピュータ 1102 の特定のニーズ、要望、又は特定の実施に従う、2 以上の異なるデータベースタイプの組み合わせ（例えば、インメモリと従来型とのハイブリッド型データベース）であり得る。図 11 において単一のデータベース 1106 として示されるが、（同じタイプ又はタイプの組み合わせの）2 以上のデータベースは、説明された機能及びコンピュータ 1102 の特定のニーズ、要望、又は特定の実施に従って、使用できる。データベース 1106 は、コンピュータ 1102 の不可欠な構成要素として示されるが、代替の実施では、データベース 1106 は、コンピュータ 1102 の外部にあってもよい。

【0079】

また、コンピュータ 1102 は、ネットワーク 630 に（図示されているかどうかに関わらず）接続できるコンピュータ 1102 又は他のコンポーネント（又は両方の組み合わせ）のためのデータを保持可能なメモリ 1107 を含む。例えば、メモリ 1107 は、ランダムアクセスメモリ（RAM）、読み取り専用メモリ（ROM）、光学的なもの、磁気的なもの等であることができ、本願に整合するデータを格納する。いくつかの実施では、メモリ 1107 は、説明された機能及びコンピュータ 1102 の特定のニーズ、要望又は特定の実施に従う、2 又はより多くの異なるタイプのメモリの組み合わせ（例えば、RAM と磁気記憶装置との組み合わせ）であることができる。図 11 には単一のメモリ 1107 として示されるが、（同じタイプ又はタイプの組み合わせの）2 以上のメモリ 1107 が、説明された機能及びコンピュータ 1102 の特定のニーズ、要望、又は特定の実施に従って使用できる。メモリ 1107 は、コンピュータ 1102 の不可欠な構成要素として示されるが、代替の実施では、メモリ 1107 はコンピュータ 1102 の外部にあってもよい。

【0080】

アプリケーション 1108 は、コンピュータ 1102 の特定のニーズ、要望、又は特定の実施に従う機能を、特に本願において説明された機能に関して提供するアルゴリズムソフトウェアエンジンである。例えば、アプリケーション 1108 は、1 又は複数のコンポーネント、モジュール、又はアプリケーションとして働くことができる。さらに、単一のアプリケーション 1108 として示されているが、アプリケーション 1108 は、コンピュータ 1102 上において複数のアプリケーション 1108 として実施されていてもよい。加えて、コンピュータ 1102 と一体として図示されているが、代替の実施では、アプリケーション 1108 は、コンピュータ 1102 の外部にあってもよい。

【0081】

また、コンピュータ 1102 は、電源 1114 を含むことができる。電源 1114 は、ユーザによる交換可能又はユーザによる交換不可能に構成できる充電式又は非充電式バッテリーを含むことができる。いくつかの実施では、電源 1114 は、（再充電、スタンバイ

10

20

30

40

50



、又は別の電力管理の機能を含む)電力変換又は管理回路を含むことができる。いくつかの実施では、電源 1 1 1 4 は、コンピュータ 1 1 0 2 を壁のソケットや別の電源に接続できる電源プラグを含み、これにより例えばコンピュータ 1 1 0 2 に電力を供給したり充電式バッテリーを再充電したりすることができる。

#### 【0082】

任意の数のコンピュータ 1 1 0 2 が、このコンピュータ 1 1 0 2 を含むコンピュータシステムに関連付けられ、又は該コンピュータシステムの外部にあり、各コンピュータ 1 1 0 2 はネットワーク 1 1 3 0 を介して通信する。さらに、用語「クライアント」、「ユーザ」、又は他の適切な用語は、本願の範囲から逸脱することなく、必要に応じて、交換可能に使用される。さらに、本願では、多くのユーザが 1 台のコンピュータ 1 1 0 2 を使用

10

#### 【0083】

いくつかの実施では、既述された方法論は、コンピュータにより実施されるコントローラ、データベース、又はコンピュータにより実施される他のシステムに、メッセージ、命令、又は他の通信を送って、コンピュータにより実施される操作又は他の機能の操作をコンピュータにより実施されるシステムの制御を動的に開始し、コンピュータにより実施される操作又は他の機能の操作をコンピュータにより実施されるシステムを制御し、又はコンピュータにより実施される操作又は他の機能/操作を別のコンピュータにより実施されるシステムに実行させるように構成することができる。例えば、データ、操作、出力、又は GUI とのインタラクション(対話、相互作用)に基づく操作が送信されて、コンピュータ、データベース、ネットワーク、又はコンピュータに基づく他のシステムに関連付けられた操作に、記憶効率の操作、データ検索の操作、又はこの開示に整合する他の操作を実行させることができる。別の例では、図示された GUI (例えば、図 1 A - 1 B、図 2 A - 2 B、図 3 A - 3 B、図 4 A - 4 B、図 5 A - 5 d、図 6、図 7 A - 7 B、及び図 8 - 9) とインタラクションすると、自動的に、一又は複数の命令が GUI から送信されて、データのためのリクエスト、データの保存、データの分析、又は本願に整合する他の操作がトリガされるようになる。

20

#### 【0084】

場合によっては、送信された命令により、計算機器又は他の機器という現実世界の有形品に関する制御、動作、修正、強化、又は他の動作が生じ得る。例えば、説示された GUI は、コンピュータデータベースの磁気/光学ディスクドライブの速度を遅く若しくは速くしたり、コンピューティングシステムを起動若しくは停止したり、ネットワーク接続にわたって許可されるデータ帯域幅をネットワークインタフェースデバイスに無効化させ、調整させ、若しくは増加させたり、あるいは、記述された方法論に関連付けられたコンピューティングシステムに関する若しくは記述された方法論に関連付けられた該コンピューティングシステムとのインタラクションの結果、動作、特定、若しくは分析の通知として(機械的アラーム/発光デバイスといった)可聴/可視アラームを発したりする。

30

#### 【0085】

実施によっては、先の方法論の出力を使って、炭化水素の生産、分析、及び回収に関連する、又は本開示に沿った他の目的のための、具体的な実体面での機器に、動的に影響を及ぼす、指示する、制御する又は、それらを管理することができる。例えば、進行中の掘削作業から受信したリアルタイムデータを、先の方法論を用いてなされる分析に入れ込むことができる。地震データに対する先の超解像度ラドン変換の出力は、さまざまな目的に使える。例えば、先の方法論で生成された結果に応じて、掘削軌道を変更したり、ドリル速度を加減したり、ドリルを停止したり、(視覚、聴覚、又は音声アラームで)アラームを有効/無効にしたりして、(例えば、停止、再起動、加速、又は減少させるように)製油所やポンプの操作に影響を及ぼすことができる。他の例としては、小さな構造の識別と、対象ドメインの微妙な層序の変化とに基づいて、ジオステアリング及び掘進方向スタッフへの警告(視覚、聴覚、音声アラームなど)を含めることができる。実施によっては、

40

50

先の方法論は、本開示と整合する炭化水素関連の、又はその他の有形である実体面での機器を制御し、影響を及ぼし、又は使用するための動的なコンピュータにより実施される制御システムの一部として統合できる。

【 0 0 8 6 】

本主題で説明する実施は、１つ以上の特徴を単独で又は組み合わせて含むことができる。

【 0 0 8 7 】

例えば、コンピュータにより実施される方法の第１の実施において、この第１の実施は、重合後の地震データを受信するステップと；重合後の地震データに超解像度ラドン変換を行うステップを含め、受信した重合後の地震データから、変換された地震データを作成するステップと；変換された地震データを用いて、定義されたミューティング機能を用いて不要なノイズを除去するステップを含めて、信号ドメインとノイズドメインとを分離するステップと；分離された信号及びノイズドメインを用いて、分離された信号及びノイズドメインに逆ラドン変換を行うステップと；信号のみを出力するステップと；を含む。

10

【 0 0 8 8 】

先に述べた実施及び他の実施はそれぞれ、以下の態様のうちの１又は複数を、任意に単独又は組み合わせて含むことができる。

【 0 0 8 9 】

第１の態様では、一般的な実施及び以下のいずれの態様とも組み合わせ可能であり、変換された地震データを作成するステップは：地震データにソフトしきい値アルゴリズムを適用するステップと；地震データにハードしきい値アルゴリズムを適用するステップと；しきい値条件が満たされるまで、ソフトしきい値アルゴリズムとハードしきい値アルゴリズムとの適用を繰り返すステップと；超解像度ラドンドメインを出力するステップと；を含む。

20

【 0 0 9 0 】

第２の態様では、先の態様又は以下の態様のいずれかと組み合わせ可能であり、しきい値条件は次式に従って特定される。

【数 A】

$$\frac{\|d-Lm\|_2}{\|d\|_2} < \epsilon,$$

30

ここで、 $d$  は観測データ、 $L$  は逆線形ラドン変換、 $m$  はデータ近似モデル、 $\epsilon$  は所定の小さな正の数である。

【 0 0 9 1 】

第３の態様では、先の態様又は以下の態様のいずれかと組み合わせ可能であり、変換された地震データを生成するステップは、複雑な各信号を一連の単純なスパイク列信号に分解するステップを含む。

【 0 0 9 2 】

非一時的なコンピュータ読取可能媒体の第２の実施において、この第２の実施は、重合後の地震データを受信すること；重合後の地震データに超解像度ラドン変換を行うことを含み、受信した重合後の地震データから変換された地震データを生成すること；変換された地震データを用いて、ある定義されたミューティング機能を用いて不要なノイズを除去することを含み、信号ドメインとノイズドメインとを分離すること；及び、分離された信号ドメイン及びノイズドメインを用いて、分離された信号ドメイン及びノイズドメインに逆ラドン変換を行い、信号のみを出力すること；を含む。

40

【 0 0 9 3 】

先の実施及び他の実施はそれぞれ、以下の特徴のうちの１又は複数を任意に単独又は組み合わせて含むことができる。

【 0 0 9 4 】

第１の態様では、一般的な実施及び以下の態様のいずれかと組み合わせ可能であり、変換された地震データを生成することは、地震データにソフトしきい値アルゴリズムを適用

50

すること；続いて、地震データにハードしきい値アルゴリズムを適用すること；しきい値条件が満たされるまで、ソフトしきい値アルゴリズムとハードしきい値アルゴリズムの適用を繰り返すこと；及び、超解像度ラドンドメインを出力すること；を含む。

【 0 0 9 5 】

第 2 の態様では、先の態様又は以下の態様のいずれかと組み合わせ可能であり、しきい値条件は次の式に従って特定される。

【数 A】

$$\frac{\|d-Lm\|_2}{\|d\|_2} < \epsilon,$$

ここで、d は観測データ、L は逆線形ラドン変換、m はデータ近似モデル、 $\epsilon$  は予め定めた小さな正の数である。

【 0 0 9 6 】

第 3 の態様では、先の態様又は以下の態様のいずれかと組み合わせ可能であり、変換された地震データを生成することは、複雑な各信号を単純なスパイク列信号のセットに分解することを含む。

【 0 0 9 7 】

コンピュータにより実施されるシステムの第 3 の実施において、この第 3 の実施は、変換された地震データを作成することが：地震データにソフトしきい値アルゴリズムを適用すること；地震データにハードしきい値アルゴリズムを適用すること；しきい値条件が満たされるまで、ソフトしきい値アルゴリズムとハードしきい値アルゴリズムの適用を繰り返すこと；及び、超解像度ラドンドメインを出力すること；を含む。

【 0 0 9 8 】

先の実施及び他の実施はそれぞれ、以下の特徴のうちの 1 又は複数を任意に単独又は組み合わせて含むことができる。

【 0 0 9 9 】

第 1 の態様では、一般的な実施及び以下の態様のいずれかと組み合わせ可能であり、変換された地震データを作成することは、地震データにソフトしきい値アルゴリズムを適用すること；地震データにハードしきい値アルゴリズムを適用すること；しきい値条件が満たされるまで、ソフトしきい値アルゴリズムとハードしきい値アルゴリズムの適用を繰り返すこと；及び、超解像度ラドンドメインを出力すること；を含む。

【 0 1 0 0 】

第 2 の態様では、先の態様又は以下の態様のいずれかと組み合わせ可能なしきい値条件は次式に従って特定される。

【数 A】

$$\frac{\|d-Lm\|_2}{\|d\|_2} < \epsilon,$$

ここで、d は観測データ、L は逆線形ラドン変換、m はデータ近似モデル、 $\epsilon$  は予め定めた小さな正の数である。

【 0 1 0 1 】

第 3 の態様では、先の態様又は以下の態様のいずれかと組み合わせ可能であり、変換された地震データを生成することは、複雑な各信号を一連の単純なスパイク列信号に分解することを含む。

【 0 1 0 2 】

本明細書で記述された主題及び機能的な操作の実施は、デジタル電子回路、有形に具体化されたコンピュータのソフトウェア又はファームウェア、コンピュータハードウェアに、又はそれらの一又は複数の組み合わせで実施でき、これらデジタル電子回路、ソフトウェア、ファームウェア、及びコンピュータハードウェアは、本明細書に開示される構造及びそれらの構造的な同等物を含む。記述された主題におけるソフトウェアの実施は、一又

10

20

30

40

50

は複数のコンピュータプログラム、つまり、コンピュータプログラム命令の一又は複数のモジュールとして実施されることができ、コンピュータプログラム命令は、コンピュータ若しくはコンピュータにより実施されるシステムによる実行のために、有形の非一時的なコンピュータ読取可能媒体上にエンコードされ、又はコンピュータ若しくはコンピュータにより実施されるシステムの動作を制御する。代替的に又は追加的に、プログラム命令は、人工的に生成された伝播信号、例えば、マシン生成の電氣的、光学的、又は電磁氣的な信号にエンコードされ、この信号は、コンピュータ又はコンピュータにより実施されるシステムによる実行のために受振器装置への送信用の情報をエンコードするために生成される。コンピュータ記憶媒体は、機械により読取可能な記憶装置、機械により読取可能な記憶基板、ランダム若しくはシリアルアクセスのメモリデバイス、又はコンピュータ記憶媒体の組み合わせであり得る。一又は複数のコンピュータを構成することは、一又は複数のコンピュータがハードウェア、ファームウェア、又はソフトウェア（又はハードウェア、ファームウェア、及びソフトウェアの組み合わせ）をインストールし、一又は複数のコンピュータがソフトウェアを実行するときに特定の計算操作が実行されることを意味する。

【0103】

「リアル-タイム」、「リアルタイム」、「リアル（ファースト）タイム（RFT）」、「ほぼリアルタイム（NRT）」、「準リアルタイム」、又は（当業者が理解する）類似の用語は、個々が、実質的に同時に動作及び応答が生じることを知覚するように、該動作及び応答が時間的に近接していることを意味する。例えば、データにアクセスするための個々の動作に続くデータの表示（又は表示の開始）に対する応答の時間差は、1ミリ秒（ms）未満、1秒（s）未満、又は5s未満であり得る。要求されたデータが、即時に表示（又は表示開始）される必要はないが、記述されたコンピューティングシステムの処理制限と、データを例えば収集し、正確に評価し、分析し、処理し、格納し、又は送信するために必要な時間とを考慮して、意図的な遅延なしに表示（又は表示開始）される。

【0104】

用語「データ処理装置」、「コンピュータ」、又は「電子コンピュータデバイス」（又は当業者によって理解される同等の用語）は、データ処理ハードウェアを指し、あらゆる種類の装置、デバイス、及びマシンを包含し、これらの種類は、データを処理するためのものであり、例示として、プログラマブルプロセッサ、コンピュータ、又は複数のプロセッサ若しくはコンピュータを含む。コンピュータは、例えば、中央処理装置（CPU）、フィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）、又は特定用途向け集積回路（ASIC）を包含する専用ロジック回路であるか、又はこれらを更に含むことができる。いくつかの実施では、コンピュータ若しくはコンピュータにより実施されるシステム、又は専用ロジック回路（又はコンピュータ若しくはコンピュータにより実施されるシステムと専用ロジック回路との組み合わせ）は、ハードウェア系又はソフトウェア系（又はソフトウェア系及びハードウェア系の両方の基づく組み合わせ）であることができる。コンピュータは、オプションとして、コンピュータプログラムの実行環境を生成するコード、例えば、プロセッサファームウェア、プロトコルスタック、データベース管理システム、オペレーティングシステム、又は実行環境の組み合わせを構成するコードを含むことができる。本願は、あるタイプのオペレーティングシステムを持つコンピュータ又はコンピュータにより実施されるシステムの使用を想定しており、オペレーティングシステムは、例えば、LINUX、UNIX（登録商標）、WINDOWS（登録商標）、MACOS、ANDROID（登録商標）、又はIOSである。

【0105】

コンピュータプログラムは、プログラム、ソフトウェア、ソフトウェアアプリケーション、ユニット、モジュール、ソフトウェアモジュール、スクリプト、コード、又は他のコンポーネントとして参照され又は記述されるものであって、コンパイル言語若しくはインタープリタ言語を含むプログラミング言語、又は宣言型若しくは手続き型の言語の形式で記載でき、またコンピュータプログラムは、コンピューティング環境で使用するための任意の形式で展開でき、例えばスタンドアロンプログラム、モジュール、コンポーネント、

10

20

30

40

50

又はサブルーチンとして含む。コンピュータプログラムは、ファイルシステム内のファイルに対応できるが、必ずしも対応する必要はない。プログラムは、他のプログラム又はデータを保持するファイルの一部、例えばマークアップ言語ドキュメントに格納された一又は複数のスクリプトに保存でき、該他のプログラムは、問題のプログラム専用の単一ファイル内に、或いは複数の連携したファイル、例えば一又は複数のモジュール、サブプログラム、又はコードの一部に格納できる。コンピュータプログラムは、一又は複数のコンピュータ上に展開でき、該コンピュータは、一のサイトに位置し、又は複数のサイトに分散されて配置され、これらは通信ネットワークによって相互接続される。

【 0 1 0 6 】

様々な図面に例示されたプログラムの部分は、ユニット又はモジュールといった個々のコンポーネントとして例示でき、個々のコンポーネントは、様々なオブジェクト、方法、又は他のプロセスを用いて、説明された特徴及び機能を実施しているが、プログラムは、それらの代わりに、いくつかのサブユニット、サブモジュール、サードパーティのサービス、コンポーネント、ライブラリ、及び他のコンポーネントを、必要に応じて含むことができる。逆に、必要に応じて、様々なコンポーネントの機能及び特徴は、単一のコンポーネントに組み合わせることができる。計算上の特定を為すために使用されたしきい値は、静的に、動的に、又は静的と動的との両方で特定できる。

【 0 1 0 7 】

説明された方法、プロセス、又は論理フローは、本願と整合する機能の一又は複数の例示を表したものであって、説示された又は図示された実施に本願を限定することを意図したものではなく、説示された原理及び特徴に整合する最も広い範囲が与えられるべきである。説示された方法、プロセス、又は論理フローは、一又は複数のプログラム可能なコンピュータによって実行でき、該コンピュータは、入力データを操作して出力データを生成することによって機能を実行する一又は複数のコンピュータプログラムを実行する。方法、プロセス、又は論理フローは、特定用途のロジック回路、例えばCPU、FPGA、又はASICとして実行でき、またコンピュータも、特定用途のロジック回路、例えばCPU、FPGA、又はASICとして実施できる。

【 0 1 0 8 】

コンピュータプログラムの実行のためのコンピュータは、汎用又は特定用途のマイクロプロセッサ、これらの両方、又は別のタイプのCPUに基づくことができる。一般的には、CPUは、メモリから命令及びデータを受け取り、メモリに書き込む。コンピュータの重要な要素は、命令を行い又は実行するためのCPU、及び命令及びデータを保存するための一又は複数のメモリデバイスである。一般に、コンピュータは、データを保存するための一又は複数の大容量記憶装置、例えば磁気、光磁気ディスク、又は光ディスクを含み、或いはこれらの大容量記憶装置に動作可能に結合され、データを受信し、転送し、又はこの両方を行う。しかし、コンピュータは、そのようなデバイスを持つ必要はない。さらには、コンピュータは、別のデバイス、例えば携帯電話、携帯情報端末(PDA)、モバイルオーディオ若しくはビデオプレーヤー、ゲームコンソール、全地球測位システム(GPS)受信機、又はポータブルメモリストレージデバイスに組み込まれることができる。

【 0 1 0 9 】

コンピュータプログラム命令及びデータを格納するための非一時的なコンピュータ読取可能媒体は、例示として半導体メモリデバイス、磁気デバイス、及び光学メモリデバイスを含む、あらゆる形態の永続的/非永続的又は揮発性/不揮発性のメモリ、媒体、及びメモリデバイスを含むことができる。あらゆる形態のメモリデバイスは：半導体メモリデバイス、例えばランダムアクセスメモリ(RAM)、読み取り専用メモリ(ROM)、相変化メモリ(PRAM)、スタティックランダムアクセスメモリ(SRAM)、ダイナミックランダムアクセスメモリ(DRAM)、消去可能プログラマブルリードオンリーメモリ(EPROM)、電氣的消去可能プログラマブル読み取り専用メモリ(EEPROM)、及びフラッシュメモリデバイスと；磁気デバイス、例えば、テープ、カートリッジ、カセット、内部/リムーバブルディスクと；光磁気ディスクと；光学メモリデバイス、例えば

10

20

30

40

50

、デジタルバーサタイル/ビデオディスク(DVD)、コンパクトディスク(CD)ROM、DVD+/R、DVD-RAM、DVD-ROM、高精細/密度(HD)-DVD、及びBLU-RAY/BLU-RAYDISC(BD)、及び他の光学メモリテクノロジーと；を含む。メモリは、様々なオブジェクト又はデータを格納でき、オブジェクト又はデータは、キャッシュ、クラス、フレームワーク、アプリケーション、モジュール、バックアップデータ、ジョブ、Webページ、Webページテンプレート、データ構造、データベーステーブル、動的情報を格納するリポジトリ、又は他の適切な情報を包含しており、他の適切な情報は、任意のパラメータ、任意の変数、任意のアルゴリズム、任意の命令、任意のルール、任意の制約、又は任意の参照を含む。さらに、メモリは、ログ、ポリシー、セキュリティ又はアクセスのデータ、レポートファイルといった他の適切なデータを含むことができる。プロセッサ及びメモリは、特定用途ロジック回路によって補完され又は組み込むことができる。

10

#### 【0110】

ユーザとのインタラクションを提供するために、本明細書で記載された主題の実施は、ユーザに情報を表示するためのディスプレイデバイス、例えば陰極線管(CRT)、液晶ディスプレイ(LCD)、発光ダイオード(LED)又はプラズマモニターと、ユーザがコンピュータに入力を提供するキーボード及びポインティングデバイス、例えばマウス、トラックボール、トラックパッドとを有するコンピュータ上で実施できる。入力が、タブレットコンピュータの感圧性表面、静電容量式若しくは電気式のセンシングを使用したマルチタッチスクリーンといった、タッチスクリーンを用いてコンピュータに提供することもできる。他のタイプのデバイスが、ユーザとインタラクションするために使用できる。例えば、ユーザに提供されるフィードバックは、(視覚、聴覚、触覚、又は複数のフィードバックタイプの組み合わせといった)あらゆる形態の感覚のフィードバックであることができる。ユーザからの入力は、音響入力、音声入力、触覚入力を包含する、あらゆる形式で受信できる。さらに、コンピュータは、ユーザによって使用されるクライアントコンピュータティングデバイスからのドキュメントを受信し及び該ドキュメントをクライアントコンピュータティングデバイスに送信することによって(例えば、Webブラウザから受け取りクエストに応答してユーザのモバイルコンピュータティングデバイス上においてWebブラウザにWebページを送ることにより)ユーザとインタラクションできる。

20

#### 【0111】

用語「グラフィカルユーザインタフェース」又は「GUI」は、単数又は複数で使用して、一又は複数のグラフィカルユーザインタフェース及び特定のグラフィカルユーザインタフェースのディスプレイの各々を説明できる。したがって、GUIは、Webブラウザ、タッチスクリーン、又はコマンドラインインタフェース(CLI)を含むが、これらに限定されることなく、任意のグラフィカルユーザインタフェースを提示することができ、コマンドラインインタフェースは、情報を処理すると共に情報の結果をユーザに効率的に提示する。一般的に、GUIは、いくつかのユーザインタフェース(UI)要素、例えばインタラクティブフィールド、プルダウンリスト、ボタンを含むことができ、これらのうちのいくつか又は全ては、Webブラウザに関連付けられる。これら及び他のUI要素は、Webブラウザの機能に関連付けられまたWebブラウザの機能を表すことができる。

30

40

#### 【0112】

本明細書で記述された主題の実施は、バックエンドコンポーネントを例えばデータサーバとして含むコンピュータティングシステム、ミドルウェアコンポーネントを、例えばアプリケーションサーバとして含むコンピュータティングシステム、フロントエンドコンポーネントを、例えばクライアントコンピュータとして含むコンピュータティングシステム、及び、一又は複数のこのようなバックエンド、ミドルウェア、又はフロントエンドコンポーネントの任意の組み合わせを含むコンピュータティングシステムにおいて実施でき、クライアントコンピュータは、ユーザが本明細書において記述される主題の実施とインタラクションできるグラフィカルユーザインタフェース又はWebブラウザを有する。システムのコンポーネントは、有線又は無線のデジタルデータ通信(又はデータ通信の組み合わせ)、

50

例えば通信ネットワークの任意の形式又は媒体によって相互接続されることができる。通信ネットワークの例示は、ローカルエリアネットワーク（LAN）、無線アクセスネットワーク（RAN）、メトロポリタンエリアネットワーク（MAN）、広域ネットワーク（WAN）、マイクロ波アクセスの世界的な相互運用性（WIMAX）、例えば802.11a/b/g/n又は802.20（又は802.11xと802.20の組み合わせ、又は本願に整合する他のプロトコル）を用いる無線ローカルエリア（WLAN）、インターネットの全て若しくは一部、別の通信ネットワーク、又は通信ネットワークの組み合わせを含む。通信ネットワークは、例えば、インターネットプロトコル（IP）パケット、フレームリレーフレーム、非同期転送モード（ATM）セル、音声、ビデオ、データ、又はネットワークノード間の他の情報と通信できる。

10

#### 【0113】

コンピューティングシステムは、クライアント及びサーバを含むことができる。クライアント及びサーバは、一般的には、互いに離れており、また典型的には、通信ネットワークを介してインタラクションする。クライアント及びサーバの関係は、それぞれのコンピュータ上で動作すると共に互にクライアント・サーバ関係にあるコンピュータプログラムのおかげで生じる。

#### 【0114】

本明細書は多くの特定の実施の詳細を含む一方で、これらは、任意の発明概念の範囲又は請求される得る範囲の制限として解釈されるべきではなく、むしろ、特定の発明概念の特定の実施固有の特徴の説明として解釈されるべきである。個別の実施の観点で本明細書において説明された機能は、組み合わせて又は単一の実施で、実現できる。逆に、単一の実施の観点で既述された様々な特徴は、複数の実施で、個別に、又は任意のサブコンビネーションで実施されることもできる。さらには、既述の特徴は特定の組み合わせで動作するものとして説示され、最初はそのようなものとして請求されているが、一又は複数の特徴は、請求された組み合わせから場合によっては削除され、またサブコンビネーション又はサブコンビネーションの変形であり得る。

20

#### 【0115】

主題の特定の実施が説明された。記載された実施の置換、変更、及び他の実施は、当業者には明らかである以下の請求の範囲内である。操作は特許請求の範囲に又は特定の順序で図面に描かれている一方で、これは、望ましい結果を達成するために、示された特定の順序で又は順番でそのような操作が実行されること又は全ての図示された操作が実行される（いくつかの操作は随意的と見なされる）ことを要求するものとして理解されるべきではない。ある状況では、マルチタスク又は並列処理（又はマルチタスク及び並列処理の組み合わせ）を行うことが有利であり、適切と思われる場合に実行される。

30

#### 【0116】

さらに、既述の実施における様々なシステムモジュール及びコンポーネントの分離又は統合が、全ての実施においてそのような分離又は統合を必要とするものとして理解されるべきではない。また、記載されたプログラムコンポーネント及びシステムは、一般的には、単一のソフトウェア製品に統合でき、又は複数のソフトウェア製品にパッケージ化できることが理解されるべきである。

40

#### 【0117】

これに従って、既述の例示的な実施は、本願を定義し又は制約しない。他の変更、置換、及び変更も、本開示の範囲及び精神から逸脱することなく可能である。

#### 【0118】

さらには、請求された任意の実施は、少なくとも、コンピュータにより実施される方法、非一時的なコンピュータ読取可能媒体、及びコンピュータシステムに適用可能であると考えられ、非一時的なコンピュータ読取可能媒体は、コンピュータにより実施される方法を実行するコンピュータにより読取可能な命令を格納し、またコンピュータシステムは、ハードウェアプロセッサに相互に動作可能に結合されたコンピュータメモリを含み、ハードウェアプロセッサは、非一時的なコンピュータ読取可能媒体に格納されたコンピュータ

50

により実施される方法又は命令を実行するように構成される。

以下、本発明の実施の態様の例を列挙する。

〔第1の局面〕

コンピュータにより実施される方法であって、

重合後の地震データを受信するステップと；

前記受信した重合後の地震データから、変換された地震データを生成するステップであって、前記重合後の地震データに超解像度ラドン変換を行うステップを備える、ステップと；

前記変換された地震データを用いて信号ドメインとノイズドメインとを分離するステップであって、定義されたミューティング機能を用いて不要なノイズを除去するステップを備える、ステップと；

前記分離された信号ドメインとノイズドメインとを用いて、前記分離された信号ドメインとノイズドメインとに逆ラドン変換を行い、信号のみを出力するステップと；を備える、コンピュータにより実施される方法。

〔第2の局面〕

前記変換された地震データを作成するステップは：

前記地震データに、ソフトしきい値アルゴリズムを適用するステップと；

続いて、前記地震データに、ハードしきい値アルゴリズムを適用するステップと；

しきい値条件が満たされるまで、前記ソフトしきい値アルゴリズムと前記ハードしきい値アルゴリズムとの適用を繰り返すステップと；

超解像度ラドンドメインを出力するステップと；を備える、

第1の局面に記載のコンピュータにより実施される方法。

〔第3の局面〕

前記しきい値条件は、次式に従って特定され、

【数 A】

$$\frac{\|d-Lm\|_2}{\|d\|_2} < \epsilon,$$

ここで、dは観測データ、Lは逆線形ラドン変換、mはデータ近似モデル、 $\epsilon$ は予め定められた小さな正の数である、

第2の局面に記載のコンピュータにより実施される方法。

〔第4の局面〕

前記変換された地震データを生成するステップは、複雑な各信号を一連の単純なスパイク列信号に分解するステップを備える、

第1の局面に記載のコンピュータにより実施される方法。

〔第5の局面〕

所定の操作を行うためにコンピュータシステムによって実行可能な1又は複数の命令を格納する非一時的なコンピュータ読取可能媒体であって、前記操作は：

重合後の地震データを受信する操作と；

前記受信した重合後の地震データから変換された地震データを生成する操作であって、前記重合後の地震データに超解像度ラドン変換を行う操作を含む、操作と；

前記変換された地震データを用いて信号ドメインとノイズドメインとを分離する操作であって、定義されたミューティング機能を用いて不要なノイズを除去する操作を含む、操作と；

前記分離された信号ドメインとノイズドメインとを用いて、前記分離された信号ドメインとノイズドメインに逆ラドン変換を行い、信号のみを出力する操作と；を備える、

非一時的なコンピュータ読取可能媒体。

〔第6の局面〕

前記変換された地震データを生成する操作は：

前記地震データに、ソフトしきい値アルゴリズムを適用する操作と；

10

20

30

40

50



続いて、前記地震データに、ハードしきい値アルゴリズムを適用する操作と；  
しきい値条件が満たされるまで、前記ソフトしきい値アルゴリズムと前記ハードしきい  
値アルゴリズムとの適用を繰り返す操作と；

超解像ラドンドメインを出力する操作と；を備える、  
第5の局面に記載の非一時的なコンピュータ読取可能媒体。

〔第7の局面〕

前記しきい値条件は、次式に従って特定され、

【数A】

$$\frac{\|d-Lm\|_2}{\|d\|_2} < \epsilon,$$

10

ここで、dは観測データ、Lは逆線形ラドン変換、mはデータ近似モデル、 $\epsilon$ は予め定  
められた小さな正の数である、

第6の局面に記載の非一時的なコンピュータ読取可能媒体。

〔第8の局面〕

前記変換された地震データを作成する操作は、複雑な各信号を一連の単純なスパイク列  
信号に分解する操作を備える、

第5の局面に記載の非一時的なコンピュータ読取可能媒体。

〔第9の局面〕

コンピュータにより実施されるシステムであって；

20

コンピュータメモリと；

前記コンピュータメモリと相互に作動可能に結合され、所定の操作を実行するように構  
成されるハードウェアプロセッサであって、前記操作は；

重合後の地震データを受信する操作と；

前記受信した重合後の地震データから、変換された地震データを生成する操作であって  
、前記重合後の地震データに超解像度ラドン変換を行う操作を含む、操作と；

前記変換された地震データを用いて信号ドメインとノイズドメインとを分離する操作で  
あって、定義されたミューティング機能を用いて不要なノイズを除去することを含む、操  
作と；

前記分離された信号ドメインとノイズドメインとを用いて、前記分離された信号ドメイ  
ンとノイズドメインとに逆ラドン変換を行い、信号のみを出力する操作と；を備える、前  
記ハードウェアプロセッサと；を備える、前記ハードウェアプロセッサと；を備える、  
コンピュータにより実施されるシステム。

30

〔第10の局面〕

前記変換された地震データを生成する操作は；

前記地震データに、ソフトしきい値アルゴリズムを適用する操作と；

続いて、前記地震データにハードしきい値アルゴリズムを適用する操作と；

しきい値条件が満たされるまで、前記ソフトしきい値アルゴリズムと前記ハードしきい  
値アルゴリズムとの適用を繰り返す操作と；

超解像度ラドンドメインを出力する操作と；を備える、

40

第9の局面に記載のコンピュータにより実施されるシステム。

〔第11の局面〕

前記しきい値条件は、次式に従って特定され、

【数A】

$$\frac{\|d-Lm\|_2}{\|d\|_2} < \epsilon,$$

ここで、dは観測データ、Lは逆線形ラドン変換、mはデータ近似モデル、 $\epsilon$ は予め定  
めた小さな正の数である、

第10の局面に記載のコンピュータにより実施されるシステム。

50

〔 第 1 2 の局面 〕

前記変換された地震データを生成する操作は、複雑な各信号を一連の単純なスパイク列信号に分解する操作を備える、

第 9 の局面に記載のコンピュータにより実施されるシステム。

**【符号の説明】****【 0 1 1 9 】**

1 1 0 0    コンピュータシステム

1 1 0 2    コンピュータ

1 1 0 5    プロセッサ

1 1 0 7    メモリ

10

20

30

40

50

【図面】  
【図 1 A】

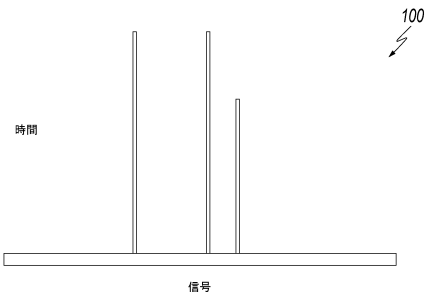


FIG. 1A

【図 1 B】

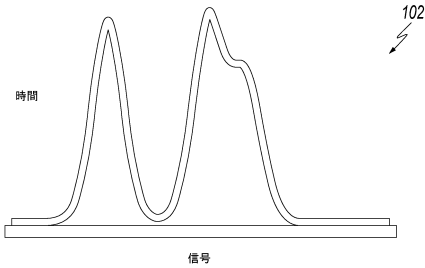


FIG. 1B

10

【図 2 A】

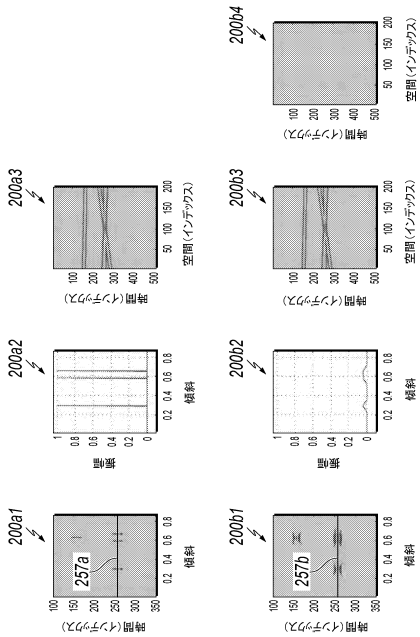


FIG. 2A

【図 2 B】

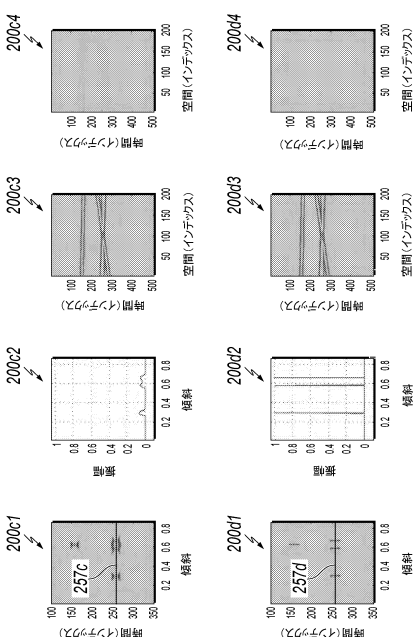


FIG. 2B

20

30

40

50

【図 3 A】

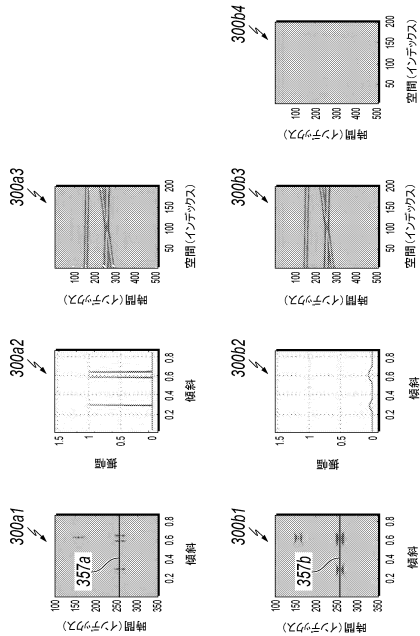


FIG. 3A

【図 3 B】

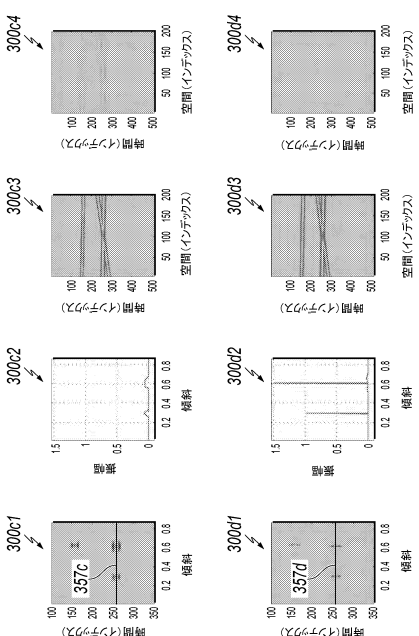


FIG. 3B

【図 4 A】

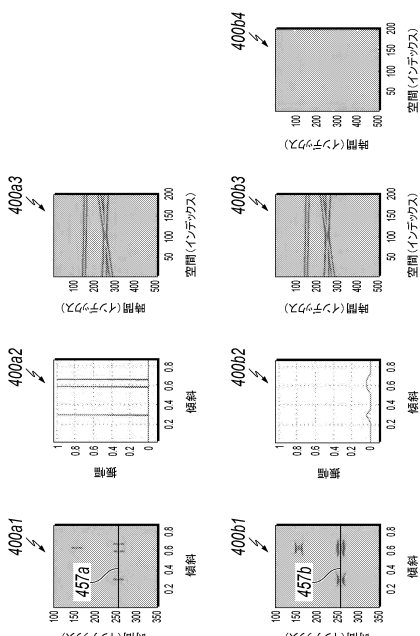


FIG. 4A

【図 4 B】

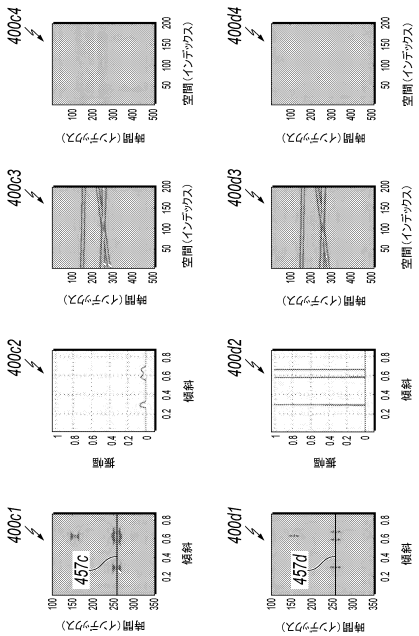


FIG. 4B

10

20

30

40

50

【図 5】

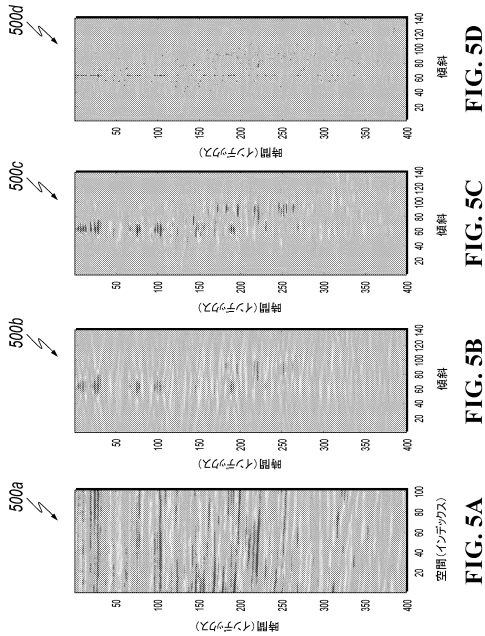


FIG. 5D

FIG. 5C

FIG. 5B

FIG. 5A

【図 6】

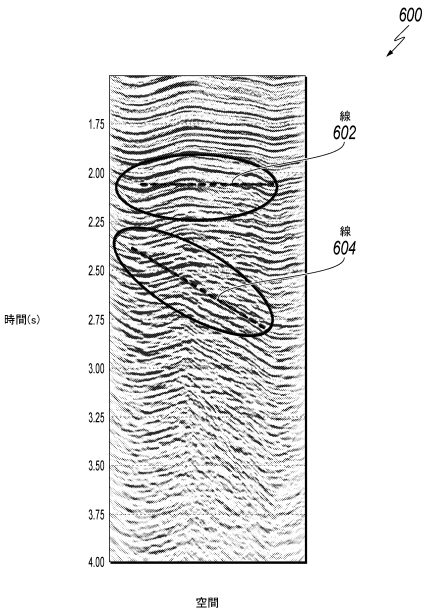


FIG. 6

【図 7 A】

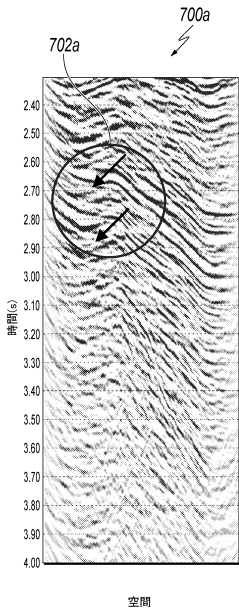


FIG. 7A

【図 7 B】

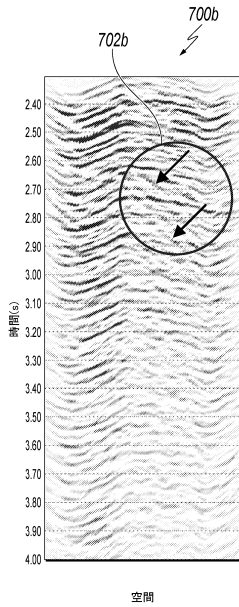


FIG. 7B

10

20

30

40

50

【図 8】

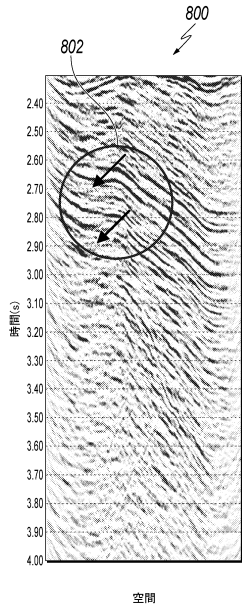


FIG. 8

【図 9】

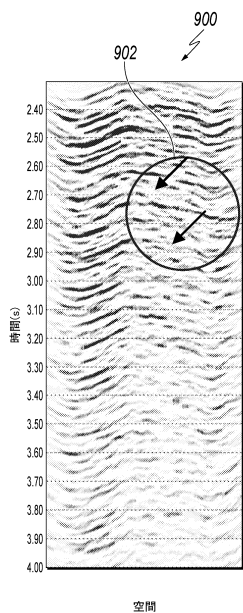


FIG. 9

【図 10】

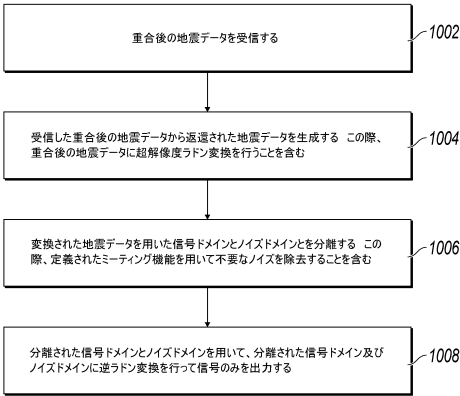


FIG. 10

【図 11】

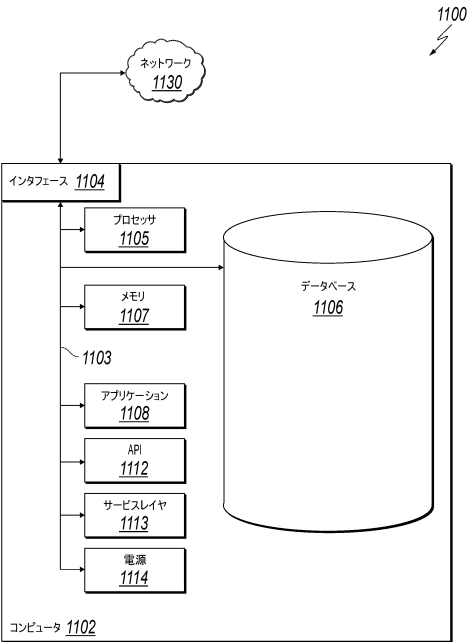


FIG. 11

10

20

30

40

50

## フロントページの続き

## (33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

中華人民共和国 ベイジン 1 0 0 0 0 4 ワンジン イースト ロード ナンバー 4 ワンジン ケチ  
ヤング ビルディング エー , 6 エフ

## (72)発明者 ルオ , イー

サウジアラビア王国 ダーラン 3 1 3 1 1 , ピー . オー . ボックス 0 8 4 1 7

審査官 野田 華代

## (56)参考文献

米国特許第 6 6 3 6 8 1 0 ( US , B 1 )

欧州特許出願公開第 2 6 3 9 6 0 0 ( EP , A 2 )

米国特許出願公開第 2 0 1 7 / 0 0 5 3 4 0 2 ( US , A 1 )

特開 2 0 1 6 - 2 0 7 6 5 1 ( JP , A )

国際公開第 2 0 1 6 / 7 5 5 5 0 ( WO , A 1 )

## (58)調査した分野 (Int.Cl. , DB 名)

G 0 1 V 1 / 0 0 - 1 5 / 0 0 ; 9 9 / 0 0

G 0 6 F 1 7 / 1 7