Introduction générale

Migration temps après sommation

Migration temps avant sommation

Reverse Time Migration

Références

GEO1303 – Méthodes sismiques
7 - Migration en temps

Bernard Giroux
(bernard.giroux@ete.inrs.ca)

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Version 1.0.10
Automne 2019

Introduction générale

Introduction

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- La migration replace les réflexions à la position des réflecteurs et focalise les hyperboles de diffraction ;

(a) (b)

(a) (b)

Introduction

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- La migration facilite et permet de détailler l'interprétation structurale ;
- De plus, la connaissance précise de la position des structures est importante pour déterminer le positionnement des forages ;
- La distribution spatiale des vitesses est le paramètre déterminant affectant :
  - le choix d'une méthode de migration ;
  - la précision du positionnement des réflexions.

Terminologie

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Lors de la migration, on ne convertie pas nécessairement l'axe vertical de temps en profondeur ;
- Raisons :
  - incertitude dans le modèle de vitesse ;
  - comparaison directe possible avec la section non migrée ;
- On parle alors de migration en temps (*time migration*) ;
- La migration en temps est appropriée si les contrastes de vitesse latéraux sont faibles ;
  - Les contrastes latéraux sont de fait ignorés ou moyennés.
- Si les contrastes sont élevés, on doit effectuer la migration en profondeur (*depth migration*) ;
  - Les contrastes latéraux sont pris en comptes, au moins au 1er ordre.

Terminologie

Introduction générale

Migration temps après sommation

Migration temps avant sommation

Reverse Time Migration

Références

Stratégie de migration

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Il n'existe pas une seule méthode de migration applicable de façon efficace à toutes les situations ;
- Paramètres qui dictent le choix d'une stratégie :
  - réflecteurs qui s'intersectent ;
  - variations latérales de vitesse prononcées et mort terrain hétérogène ;
  - nature 3D des réflecteurs ;
  - *moveout* non hyperbolique causé par des rais courbes (modèle de vitesse complexe) ;
- Les types de stratégies sont :
  - migration en temps ou profondeur ;
  - migration avant ou après sommation ;
  - migration 2D ou 3D ;
- En pratique, la migration en temps 2D/3D après sommation demeure la plus utilisée :
  - elle est moins sensible aux erreurs de vitesse ;
  - plus rapide à réaliser (effort moindre pour évaluer le modèle de vitesse).

Stratégie de migration

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Cas	Migration
Réflecteurs inclinés	migration en temps
Pendages conflictuels avec vitesses de sommation différentes	migration avant sommation
Attitude 3D des plans de faille et dômes de sel	migration 3D
Variations latérales de vitesse prononcées et mort terrain hétérogène	migration en profondeur
moveout non hyperbolique	migration avant sommation
Structures 3D	migration 3D

Migration temps vs profondeur

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- La différence fondamentale entre la migration temps et la migration profondeur réside dans le modèle de vitesse utilisé ;
- Temps :
  - Vitesse RMS ;
  - Pas de lien direct avec la géologie (v_{rms} →Dix→ v_{int} souvent irréaliste) ;
  - L'objectif est de produire une image, et non un modèle de vitesse géologiquement valide.
- Profondeur :
  - Vitesse d'intervale ;
  - Lien directe avec la lithologie, doit être réaliste ;
  - Migration profondeur et analyse de vitesse sont intimement liées, voire imbriquées ;
  - Plus ardue, mais procure une plus grande confiance lors de l'interprétation et une meilleure précision pour le positionnement des forages.

Considérations sur les données

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Couverture spatiale :
  - Les profils sismiques doivent être assez longs pour permettre aux réflexions de se repositionner à leur position vraie ;
    - C'est une erreur fatale d'enregistrer des profils trop courts.
  - D'une façon similaire, la surface couverte par un levé 3D doit dépasser l'étendue surfacique de la cible.
- Rapport signal/bruit :
  - Un bruit élevé au temps longs se répercute sur les données plus superficielles.
- Échantillonnage spatial :
  - Le pas d'échantillonnage doit être assez serré pour bien résoudre les réflecteurs très inclinés ;
    - La migration a pour effet d'accroître le pendage.
  - On peut être obligé d'interpoler les traces à un pas plus fin.

Considérations sur les données

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Influence de la longueur du profil

avant migration

après migration

Introduction générale

Migration temps après sommation

Introduction

Migration Kirchhoff

Migration par différences finies

Migration f–k

Échantillonnage spatial et résolution

Autres considérations

Migration temps avant sommation

Reverse Time Migration

Références

Migration temps après sommation

Algorithmes de migration

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Migration après sommation : basée sur l'équation d'onde scalaire ;
- On dénombre trois grandes catégories d'algorithme :
  - basés sur la solution intégrale de l'équation d'onde scalaire (domaine t–x) ;
    - sommation des diffractions et migration Kirchhoff ;
  - basés sur l'extrapolation du champ acoustique (*wavefield extrapolation*) ;
    - domaine f–x : solutionné par différences finies ;
    - domaine f–k : Stolt, méthode du déphasage (*phase-shift*, Gazdag).
- Les qualités recherchées pour un algorithme sont :
  - prise en compte des réflecteurs très inclinés avec une précision suffisante ;
  - prise en compte des variations latérales et verticales de vitesse ;
  - implémentation optimisée.

Généralités

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Pour une section *zero-offset* :

- La position vraie est CD ;
- La position sur la section *zero offset* est $C'D'$;
- La migration est le processus par lequel on replace $C'D'$ à CD.

Déplacements

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Convention : l'axe de temps de la section migrée est noté τ ;

- Le pendage sur la section *zero-offset* est $\frac{\Delta t}{\Delta x}$.

Déplacements

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Pour un milieu à vitesse v constante :

- Le déplacement horizontal vaut

$$d_x = \frac{v^2 t}{4} \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{1}$$

- Le déplacement vertical (temps) vaut

$$d_t = t \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v \Delta t}{2 \Delta x} \right)^2} \right] \tag{2}$$

- Le pendage apparent vaut

$$\frac{\Delta \tau}{\Delta x'} = \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v \Delta t}{2 \Delta x} \right)^2}} \tag{3}$$

Chun and Jacewitz (1981)

Observations

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- $\frac{\Delta\tau}{\Delta x'} > \frac{\Delta t}{\Delta x}$;
- d_x augmente avec le temps t de l'événement ;
- d_x est fonction de v^2 : une surestimation de 20% sur v se traduit par une erreur de positionnement de 44% ;
- d_t augmente aussi avec le temps t de l'événement et la vitesse ;
- Plus le pendage du réflecteur est prononcé, plus grands seront d_x et d_t.

Migration Kirchhoff – Principes

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Une source ponctuelle génère une onde qui apparaît comme une hyperbole sur une section à déport nul (*zero-offset*) ;
- Un réflecteur peut être perçu comme un ensemble de points qui agissent selon le principe des sources secondaires de Huygens ;
- Une section à déport nul consisterait en une superposition de plusieurs hyperboles ;

Sommation des diffractions

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Partant de l'idée qu'une section à déport nul (x–t) consiste en une superposition de plusieurs hyperboles :

- On peut chercher dans le plan x–t l'énergie qui résulterait pour une source ponctuelle situé en un point particulier A dans le plan x–z ;
- Cette recherche se fait en sommant les amplitudes du plan x–t qui se trouvent le long de l'hyperbole associée au point A dans le plan x–z ;
- Le résultat de la sommation est affecté au point A ;
- On recommence ensuite le processus pour le point voisin dans le plan x–z, et ainsi de suite.

Sommation des diffractions

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- La forme de l'hyperbole est fonction de la vitesse ;
- Pour un milieu stratifié, on utilise v_{rms} ;
- L'hyperbole est alors décrite par

$$t^2 = \tau^2 + \frac{4x^2}{v_{rms}^2}. \tag{4}$$

Corrections

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- L'amplitude à A est plus grande qu'à B : facteur d'oblicité ;
- L'amplitude à B est plus grande qu'à C : divergence géométrique ;
- Interférence constructive & destructive : facteur de forme de l'ondelette.

Corrections & sommation Kirchhoff

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- L'image de sortie au point (x_0, z), $P_{out}(x_0, z = v\tau/2, t = 0)$, est obtenue par la sommation suivante (sur une fenêtre spatiale donnée) appelée sommation Kirchhoff

$$P_{out} = \frac{\Delta x}{2} \sum_x \left[\frac{\cos\theta}{\sqrt{v_{rms} r}} \rho(t) * P_{in} \right], \tag{5}$$

  où
  - $\cos\theta$ corrige l'oblicité ;
  - $(\sqrt{v_{rms} r})^{-1}$ corrige la divergence géométrique ($(v_{rms} r)^{-1}$ en 3D) ;
  - $\rho(t)$ est un facteur de forme de l'ondelette qui permet de maintenir la phase et l'amplitude le long de l'hyperbole. Ce terme peut être sorti de la sommation.
- La stratégie de migration reposant sur la sommation Kirchhoff est nommée *migration Kirchhoff*.

Choix de la fenêtre de sommation

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- En théorie, les hyperboles de diffraction s'étendent à l'infini ;
- En raison de la longueur finie de la section sismique, ces hyperboles sont tronquées ;
- L'étendue sur laquelle se fait la sommation est la fenêtre de sommation (*migration aperture*) ;
- Plus la fenêtre est large, plus les calculs sont longs ;
  - peut-on la réduire pour accélérer la migration ?
- En réduisant trop la fenêtre, on élimine les événements très inclinés ;
- La fenêtre optimale est définie par $2 \times d_x$ (voir éq. 1) pour le réflecteur le plus incliné (d'intérêt) de la section sismique.

Choix de la fenêtre de sommation

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Choix de la fenêtre de sommation

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Choix de la fenêtre de sommation

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- En utilisant une fenêtre longue, on additionne le bruit présent aux temps longs aux amplitudes plus précoces. L'effet est plus marqué pour les données présentant de faibles rapports signal/bruit;
- Il y a souvent un compromis à faire entre la résolution des réflecteurs très inclinés et la réduction de l'effet du bruit (il est parfois possible d'utiliser une fenêtre variable dans le temps);
- La plupart des logiciels permettent de spécifier un seuil aux valeurs de pendage à migrer : on limite ainsi le temps de calcul et on réduit l'effet du bruit au temps longs.

Erreurs sur la vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- a Vitesse vraie : 2500 m/s ;
- b Migration recherchée ;
- c Kirchhoff 2500 m/s ;
- d Kirchhoff 5% plus lent ;
- e Kirchhoff 10% plus lent ;
- f Kirchhoff 20% plus lent ;

Erreurs sur la vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- a Vitesse vraie : 2500 m/s ;
- b Migration recherchée ;
- c Kirchhoff 2500 m/s ;
- d Kirchhoff 5% plus rapide ;
- e Kirchhoff 10% plus rapide ;
- f Kirchhoff 20% plus rapide ;

Erreurs sur la vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- a Vitesse vraie : 2500 m/s ;
- b Migration recherchée ;
- c Kirchhoff 2500 m/s ;
- d Kirchhoff 5% plus lent ;
- e Kirchhoff 10% plus lent ;
- f Kirchhoff 20% plus lent ;

Erreurs sur la vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- a Vitesse vraie : 2500 m/s ;
- b Migration recherchée ;
- c Kirchhoff 2500 m/s ;
- d Kirchhoff 5% plus rapide ;
- e Kirchhoff 10% plus rapide ;
- f Kirchhoff 20% plus rapide ;

Erreurs sur la vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Une analogie importante

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Un modèle analogue à la section déport nul (*zero offset*) et très utile en migration est celui du réflecteur explosif (*exploding reflector*) ;
- Limites :
  - ne peut considérer des variations latérales de vitesse ;
  - périodicité fausse pour les réflexions multiples ;
  - polarité de l'ondelette fausse dans certains cas.

Concept de base

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Soient la compressibilité $P = P(x, z, t)$ et l'équation de l'onde P

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) P(x, z, t) = 0, \tag{6}$$

  et $P = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$, avec ϵ la déformation ;
- Les sismogrammes enregistrés à la surface correspondent à $P(x, 0, t)$;
- Le modèle de réflectivité recherché correspond à $P(x, z, 0)$;
- Le processus permettant d'obtenir $P(x, z, t = 0)$ à partir de $P(x, z = 0, t)$ est la migration.

Concept de base

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- On peut faire la transformée de Fourier de la variable temps t ;
- En l'absence de variation latérale de vitesse, on peut aussi transformer la variable spatiale x :

$$P(k_x, z, \omega) = \iint P(x, z, t) \exp(ik_x x - i\omega t) dx\, dt. \tag{7}$$

avec k_x le nombre d'onde et ω la fréquence angulaire ;

- En appliquant (6) à (7), on a

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} P(k_x, z, \omega) + \left(\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \right) P(k_x, z, \omega) = 0. \tag{8}$$

Concept de base

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Une solution de (8) est

$$P(k_x, z, \omega) = \underbrace{P(k_x, z = 0, \omega)}_{\text{T.F. du profil } \textit{zero-offset}} \exp\left[-i\sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2}\, z\right]. \tag{9}$$

- Pour un onde plane, on peut montrer que

$$k_x^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{v^2} \quad \rightarrow \quad k_z = \frac{\omega}{v}\sqrt{1 - \left(\frac{v k_x}{\omega}\right)^2}, \tag{10}$$

et (9) peut alors s'écrire

$$P(k_x, z, \omega) = P(k_x, z = 0, \omega) \exp(-i k_z z), \tag{11}$$

i.e. on peut connaître le champ qui serait mesuré à un z arbitraire.

- L'équation (11) est à la base de l'idée d'extrapolation du champ acoustique (*wavefield extrapolation*).

Concept de base

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Champ acoustique pour récepteurs « déplacés » en profondeur.

(a) Ensemble des événements a à f
(b) Idem après application d'un retard pour repositionner au point source vrai.

Migration par DF - Principes

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Partant du concept de réflecteur explosif, si on image P à $t = 0$ pour tout les x, z , les événements seront localisés à la position des réflecteurs (*imaging principle*);
- Ici, l'idée est d'extrapoler le plan x–t obtenu à z=0 pour plusieurs incréments de z (*downward continuation*) et de garder la portion pour t=0.

- La section originale, non migrée est le plan x–t ;
- La section migrée est le plan x–z.

Migration par DF - Étapes

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

1. On part avec l'équation scalaire

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2(x,z)}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0. \tag{12}$$

2. On assume une vitesse constante et on applique la transformée de Fourier 3D (selon x, z et t). On prend la solution pour une onde plane avec le terme solution

$$k_z = \mp\sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2}. \tag{13}$$

3. On veut utiliser l'analogie du réflecteur explosif : on garde le terme se déplacant vers le haut et on remplace v par $v/2$ pour obtenir

$$k_z = \frac{2\omega}{v}\sqrt{1 - \left(\frac{vk_x}{2\omega}\right)^2}. \tag{14}$$

L'équation (14) porte le nom de relation de dispersion.

Migration par DF - Étapes

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

4. Il faut s'affranchir de la racine carrée pour obtenir une équation différentielle. Une approximation possible : série de Taylor pour obtenir

$$k_z = \frac{2\omega}{v}\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{vk_x}{2\omega}\right)^2\right]. \tag{15}$$

Cette approximation ne permet pas de repositionner des pendages $> 35°$ (d'autres approximations sont maintenant utilisées).

5. On remplace $-ik_zP$ par $\partial P/\partial z$, ce qui permet d'écrire

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -i\left(\frac{2\omega}{v} - \frac{vk_x^2}{4\omega}\right)P. \tag{16}$$

En théorie, v doit être constant, mais en pratique on obtient des résultats OK avec $v(x,z)$ si les variations sont lisses.

Migration par DF - Étapes

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

6. Il faut appliquer un retard pour repositionner les événements à la bonne profondeur. P est relié au champ acoustique retardé Q par

$$Q = P\exp(-i\omega\tau) \quad \text{avec} \quad \tau = 2\int_0^z \frac{dz}{\bar{v}(z)}. \tag{17}$$

où $\bar{v}(z)$ est la moyenne latérale de $v(x,z)$. On dérive par rapport à z

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = \left(\frac{\partial}{\partial z} - i\frac{2\omega}{\bar{v}(z)}\right) P\exp(-i\omega\tau). \tag{18}$$

Finalement, on insère (17) et (18) dans (16) pour obtenir

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = \underbrace{i\frac{vk_x^2}{4\omega}Q}_{\text{diffraction}} + \underbrace{i2\omega\left[\frac{1}{\bar{v}(z)} - \frac{1}{v}\right]Q}_{\text{lentille mince}}. \tag{19}$$

Migration par DF - Étapes

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

6. (suite) En absence de variations latérales de v, le terme lentille mince disparaît. En prenant la T.F. inverse du terme de diffraction, on a

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial z \partial t} = \frac{v}{4} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}. \tag{20}$$

Si on effectue le prolongement vers le bas (*downward continuation*) en utilisant τ plutôt que z, on obtient une section migrée avec un axe vertical selon τ : on a une migration en temps. Le changement de variable change (20) pour

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial \tau \partial t} = \frac{v^2}{8} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}. \tag{21}$$

7. La dernière étape consiste à discrétiser (21). Plusieurs variantes existent, fonctions de l'approximation de la relation de dispersion choisie ou des critères de stabilité retenus.

Migration par DF - Discrétisation

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- La discrétisation par différences finies peut être formulée en schéma implicite ou en schéma explicite.
- Le schéma implicite
  - est toujours stable ;
  - permet de considérer des variations latérales et verticales de vitesse ;
  - est sensible au bruit numérique causé par la discrétisation des opérateurs différentiels (problème de dispersion) ;
  - ne permet pas d'atteindre la précision théorique lors de la restitution des pendages.
- Le schéma explicite
  - doit être stabilisé en utilisant un pas de discrétisation verticale fin ;
  - n'est pas sujet au problème de dispersion ;
  - est généralement plus rapide ;
  - peut être adapté pour accroître la précision des pendages.

Migration f-k – Théorie

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- L'équation (11)

$$P(k_x, z, \omega) = P(k_x, z = 0, \omega) \exp(-ik_z z)$$

nous dit que le champ à une profondeur z est le champ mesuré en surface déphasé de k_z.

- Comment utiliser (11) pour migrer la section ?
- En prenant la transformée inverse de (11), on obtient

$$P(x, z, t) = \iint P(k_x, 0, \omega) e^{(-ik_z z)} e^{(-ik_x x + i\omega t)} dk_x \, d\omega. \qquad (22)$$

- Considérons maintenant le concept de réflecteur explosif ;
- Le nombre d'onde dans la direction verticale devient

$$k_z = \frac{2\omega}{v} \sqrt{1 - \left(\frac{v k_x}{2\omega}\right)^2}.$$

Méthode du déphasage (*phase shift*, Gazdag)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Selon l'idée de réflecteur explosif, si on image le champ acoustique à $t = 0$, les événements seront localisés à la position des réflecteurs (*imaging principle*) ;
- L'équation (22) est alors

$$P(x, z, 0) = \iint P(k_x, 0, \omega) \exp(-ik_x x - ik_z z) dk_x \, d\omega. \qquad (23)$$

- Avec cette formulation, on peut seulement considérer des profils de vitesse verticaux ;
  - On peut considérer des variations latérales en «étirant» la section sismique localement selon x, en appliquant la migration, et en comprimant finalement la section migrée.

Méthode du déphasage (*phase shift*, Gazdag)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Les étapes sont :

1. On part de la section déport nul et on applique la T.F. 2D ;
2. Pour chaque ω, on extrapole $P(k_x, z, \omega)$ à z avec un déphasage $\exp(-ik_z\Delta z)$ pour obtenir $P(k_x, z + \Delta z, \omega)$ à $z + \Delta z$
   - $\exp(-ik_z\Delta z)$ est mis à jour à chaque Δz pour tenir compte de la bonne vitesse ;
3. À chaque profondeur, on somme sur les fréquences pour obtenir $P(k_x, z, t = 0)$;
4. On répète 2 et 3 pour chaque profondeur ;
5. On fait la T.F. inverse selon x pour obtenir $P(x, z, t = 0)$.

Algorithme de Stolt

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Si le milieu est de vitesse homogène, il est possible d'optimiser la formulation ;
- Partant de la relation (10) ($\omega = \frac{v}{2}\sqrt{k_x^2 + k_z^2}$), en gardant k_x constant et en dérivant par rapport à k_z :

$$d\omega = \frac{v}{2}\frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}dk_z. \tag{24}$$

- En insérant (24) dans (23), on trouve

$$P(x, z, t = 0) = \iint \underbrace{\left(\frac{v}{2}\frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}\right)}_{S} P(k_x, 0, \frac{v}{2}\sqrt{k_x^2 + k_z^2}) \exp(-ik_x x - ik_z z) dk_x\, dk_z, \tag{25}$$

avec S le facteur d'échelle corrigeant l'oblicité.

Algorithme de Stolt

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Les étapes sont :

- On part de la section déport nul et on applique la T.F. 2D ;
- On calcule les valeurs de k_z pour chaque ω (éq. (10)) ;
- On met à l'échelle avec S ;
- On pose $t = 0$;
- On applique la T.F. 2D inverse pour obtenir $P(x, z, t = 0)$.

$$P(x,z=0,t) \longrightarrow \text{2D } FFT \longrightarrow P(k_x,z=0,\omega) \longrightarrow \textit{passe de } \omega \textit{ à } k_z \longrightarrow \times S \longrightarrow P(k_x,k_z,t=0) \longrightarrow \text{2D } FFT^{-1}\ P(x,z,t=0)$$

Algorithme de Stolt modifié

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Stolt a modifié son algorithme pour tenir compte de gradients verticaux de vitesse ;
- Il s'agit de transformer l'axe de temps pour tenir compte de la vitesse RMS :

$$T(t) = \frac{1}{c}\left[2\int_o^t dt'\, v_{rms}^2(t')t'\right]^{1/2} \tag{26}$$

où c est une vitesse de référence arbitraire pour converser un axe vertical temporel ;

- On peut alors passer de $P(x,z,t)$ à $P(x,d,T)$, ce qui donne l'équation acoustique suivante :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + W\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{2}{c}\frac{\partial^2 P}{\partial d \partial T}, \tag{27}$$

où W est une fonction de la vitesse des variables spatiales.

Algorithme de Stolt modifié

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Les étapes sont :

- On part de la section déport nul et on applique l'éq. (26) ;
- On applique la T.F. 2D ;
- On calcule les valeurs de k_d pour chaque ω_T, avec

$$k_d = \left(1 - \frac{1}{W}\right)\frac{\omega_T}{c} - \frac{1}{W}\sqrt{\frac{\omega_t^2}{c^2} - Wk_x^2}; \tag{28}$$

- On pose $T = 0$ pour obtenir

$$P(k_x, k_d, T = 0) = \left[\frac{c}{2 - W}\left(1 - W + \frac{1}{K}\right)\right] P\left\{k_x, 0, \left[\frac{ck_d}{2 - W}(1 - W + K)\right]\right\} \tag{29}$$

avec $K = \left[1 + (2 - W)\frac{k_x^2}{k_d^2}\right]^{-1/2}$.

- On applique la T.F. 2D inverse pour obtenir $P(x, d, T = 0)$.
- On fait la transformation inverse de (26).

Algorithme de Stolt modifié

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Le terme W est le facteur d'élongation (*stretch factor*), qu'on va en pratique fixer à une valeur scalaire entre 0 et 2.
- Pour un milieu à v constante, $W = 1$ est optimal ;
- Si on a un gradient de vitesse donnée, $W = 1$ n'est plus optimal ; plus le gradient est fort, plus on s'éloigne de 1 ;
- Le choix de W peut être fait avec un modèle synthétique, par comparaison avec un autre algorithme.

Algorithme de Stolt modifié

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Exemple : gradient linéaire de 2000 m/s à 4000 m/s
- Réponse recherchée : algorithme *Phase-shift*
- Les traits plein définissent la région où la précision voulue est atteinte ;
- W=0.6 donne la meilleure correspondance

Algorithme de Stolt modifié

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Algorithme de Stolt modifié

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Observations

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Avec la migration f–k, l'axe vertical τ est égal à $2z/v$;
- En réalité, la transformation dans le domaine f–k est de ω–k_x vers ω_τ–k_x plutôt que vers k_z–k_x, avec

$$\omega_\tau = \omega\sqrt{1 - \left(\frac{vk_x}{2\omega}\right)^2}. \tag{30}$$

- Pour k_x constant, $\omega_\tau < \omega$, i.e. la migration décale la bande de fréquences vers les basses fréquences ;
- Le décalage augmente en fonction du pendage.

Méthode du déphasage – choix de Δz

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- En raison de la bande passante finie des données sismiques, il n'est pas nécessaire d'utiliser un incrément très fin ;
- En général, on utilise un pas équivalent à la demie ou la pleine période dominante du signal ;
- L'utilisation d'un pas plus grand n'entraîne pas un mauvais positionnement, mais génère des discontinuités le long des réflecteurs.

  - (b) migration recherchée ;
  - (c) 20 ms ;
  - (d) 40 ms ;
  - (e) 60 ms ;
  - (f) 80 ms.

Artefacts dûs à la périodicité

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- La transformée de Fourier discrète entraîne la périodicité du domaine traité ;
- Pour réduire cet effet, on ajoute des zéros aux extrémités du domaine.

- (c) = (b) avec un gain 100 plus élevé.

Résolution des réflecteurs inclinés

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- La capacité d'imager des réflecteurs inclinés dépend
  - du contenu fréquentiel de l'ondelette ;
  - de la distance entre chaque géophone ;
  - du pendage du réflecteur ;
- Ces paramètres sont liés.

Illustration

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- En haut, traces (sinusoïdes) espacées de 25 m ;
- En bas, spectres f–k ;
- Pendage positif défini dans le cadrant de droite.

Illustration

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Signal : [6-42] Hz.

Section de référence - hyperbole

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Migrée – Kirchhoff

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Migrée – Différences finies (explicite)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Migrée – Déphasage

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Section de référence - réflecteurs

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Migrée – Kirchhoff

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Migrée – Différences finies (explicite)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Migrée – Déphasage

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration f–k
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

Effet du bruit

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Problème plus important dans la portion profonde (*smearing*);
- Apparition de “sourires” causés par des pics.

Longueur du profil

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Les événements profonds ne sont pas résolus sur les lignes plus courtes.

Longueur du profil

Introduction générale
Migration temps après sommation
Introduction
Migration Kirchhoff
Migration par différences finies
Migration $f-k$
Échantillonnage spatial et résolution
Autres considérations
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Pour des profils courts :
  - Les réflecteurs n'ont pas de «place» pour se repositionner ;
    - on allonge le profil avec des traces remplies de zéros.
  - Des effets de bord contaminent la section migrée ;
  - La meilleure solution consiste à enregistrer des profils plus longs...

(a) (b) (c)

Introduction générale

Migration temps après sommation

Migration temps avant sommation

Introduction

Principe

Sommation de la surface de diffraction

En pratique

Exemples

Migration f–k avant sommation

Migration et analyse de vitesse

Reverse Time Migration

Références

Migration temps avant sommation

Introduction

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- La migration avant sommation est la solution rigoureuse au problème des réflecteurs conflictuels ;
- L'alternative pratique et moins couteuse en temps de calcul est d'appliquer les corrections NMO et DMO, de sommer les PMC et *ensuite* de faire la migration ;
  - *Cette approche montre ses limites en présence de contrastes de vitesse laréraux.*
- Par ailleurs, en appliquant la migration sur chacun des regroupement PMC après corrections NMO et DMO, mais *avant* la sommation :
  - On peut améliorer le modèle de vitesse en refaisant l'analyse ;
  - Les PMC migrés peuvent être utilisés pour faire l'analyse de la variation des amplitudes en fct du déport (AVO) ;
  - On améliore la qualité de la migration.

Principe

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- Le temps de parcours est

$$t = \sqrt{\frac{\tau^2}{4} + \frac{(x-y+h)^2}{v^2}} + \sqrt{\frac{\tau^2}{4} + \frac{(x-y-h)^2}{v^2}} \tag{31}$$

Principe

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- Les données d'entrée sont fonction de (y, h, t) :
  - y le point milieu ;
  - h le (demi) déport ;
  - t le temps.
- L'objectif est de transformer les données vers le référentiel $(x, h = 0, \tau)$:
  - x la position horizontale «vraie» ;
  - τ la position verticale «vraie».

Principe

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- Les points (y, h, t) pour lesquels x et τ sont constants forment une surface pyramidale (éq. (31));
- L'idée de la migration est de faire la sommation des valeurs se trouvant sur cette surface dite de «diffraction», pour assigner le résultat au point (x, τ) dans le nouveau référentiel.

Sommation de la surface de diffraction

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- En pratique, le nombre de données est fini et la surface pyramidale doit être en quelque sorte «échantillonnée» ;
- De façon générale, il est préférable de comprimer la surface en une courbe passant à $y = 0$, décrite par

$$t = \sqrt{\tau^2 + \frac{4h^2}{v^2}}. \tag{32}$$

- On passe ainsi au référentiel $(x, h, \sqrt{\tau^2 + 4h^2/v^2})$;
  - ceci permet de faire une analyse de vitesse et de raffiner le modèle de vitesse ;
- En faisant ensuite une correction NMO, en sommant selon h et en assignant le résultat au sommet de l'hyperbole (32), on se trouve à correspondre au point $(x, h = 0, \tau)$.

Sommation de la surface de diffraction

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- Plusieurs méthodes sont possibles pour comprimer la surface pyramidale en une courbe passant à $y = 0$;
- On peut considérer les courbes correspondant à h constant;

Sommation de la surface de diffraction

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- On peut considérer les courbes correspondant à t constant ;

Séquence de traitement type

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- La migration d'une section à déport nul (*zero-offset*, ou d'une section corrigée par DMO) est équivalente à une migration avant sommation des données à déports non nuls ;
- Comme on l'a dit, il peut être plus avantageux dans la pratique de faire la DMO et de migrer les données ainsi corrigées,
  - cela permet de mettre à jour le modèle de vitesse ;
- L'algorithme type est donnée à la page suivante.

Séquence de traitement type

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

1. Effectuer l'analyse de vitesse sur les données en point miroir commun (PMC) en quelques sections espacées ;
2. Appliquer la correction NMO ;
3. Classer les données en regroupement déport commun (RDC) et effectuer la DMO ;
4. Effectuer la migration des RDC *en utilisant un algorithme de migration à déport nul*, avec le modèle de vitesse (1) ;
5. Reclasser les données en PMC et appliquer la correction NMO inverse avec le modèle de vitesse (1) ;
6. Refaire l'analyse de vitesse avec des PMC à intervalles plus serrés pour obtenir un modèle de vitesse «optimal» ;
7. Appliquer la correction NMO avec le modèle de vitesse (6) ;
8. Sommer les données et faire la migration inverse en utilisant le modèle de vitesse utilisé en (4) ;
9. Finalement, refaire la migration en utilisant le modèle de vitesse optimal.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données initiales classées en section à déport commun :
a) h=78.5 m, b) h=1078.5 m, c) 2078.5 m.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données précédentes après correction DMO.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données précédentes après migration avec le modèle de vitesse initial.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données corrigées DMO et migrées (déport nul), reclassées en PMC.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données précédentes après NMO inverse.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Modèle de vitesse initial (gauche) et optimal (droite)

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données précédentes après NMO utilisant le modèle de vitesse optimal.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données sommées après migration avec le modèle de vitesse initial.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Résultat de la migration inverse avec le modèle de vitesse initial.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données précédente après migration avec le modèle de vitesse optimal.

Exemple 1 – Dôme de sel

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Données corrigées DMO et migrées *après* sommation seulement (modèle de vitesse optimal).

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Section NMO sommée

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Portion sommée avec vitesses constantes, sans DMO

80% 85% 90% 95% 100%

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Portion sommée avec vitesses constantes, sans DMO

105% 110% 115% 120% 125%

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Spectre de vitesse, avant DMO

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Spectre de vitesse, avant DMO

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Spectre de vitesse, après DMO

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Portion sommée avec vitesses constantes, avec DMO

80% 85% 90% 95% 100%

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Portion sommée avec vitesses constantes, avec DMO

105% 110% 115% 120% 125%

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Portions de section à déport commun, après DMO

Déport = 500 m 1500 m 2500m

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Portions de section à déport commun, après DMO et migration

Déport = 500 m 1500 m 2500m

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

G : CMP DMO + migration ; D : Spectre de vitesse après DMO

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

G : CMP DMO + migration + NMO inverse ; D : Spectre de vitesse après DMO

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

G : CMP DMO + migration + NMO inverse + nouvelle NMO ;
D : Spectre de vitesse après DMO

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Nouveau modèle (optimal) de sommation

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Section sommée après NMO + DMO + migration avant sommation

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Section précédente après migration inverse

Exemple 2 – Failles (pendages conflictuels)

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Section précédente après migration avec modèle optimal

Migration f–k avant sommation

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- Le point de départ est la transformée de Fourier 3D des données classées en point milieu y, déport h et temps t, $P(y,h,z=0,t)$

$$P(k_y,k_h,0,\omega) = \iiint P(y,h,0,t)e^{(ik_y y+ik_h h-i\omega t)}\,dk_y\,dk_h\,d\omega. \tag{33}$$

- On extrapole le champ à z par

$$P(k_y,k_h,z,\omega) = P(k_y,k_h,0,\omega)\exp(-ik_z z). \tag{34}$$

- Le nombre d'onde k_z est donnée par

$$k_z = \frac{\omega}{v}DSR(Y,H), \tag{35}$$

où

$$DSR(Y,H) = \sqrt{1-(Y+H)^2} + \sqrt{1-(Y-H)^2} \tag{36}$$

et

$$Y = \frac{vk_y}{2\omega} \qquad H = \frac{vk_h}{2\omega}. \tag{37}$$

Migration f–k avant sommation

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- La transformée inverse donne

$$P(y,h,z,t) = \iiint P(k_y,k_h,0,\omega)e^{-ik_z z}e^{(-ik_y y - ik_h h + i\omega t)}\, dk_y\, dk_h\, d\omega. \tag{38}$$

- On cherche le champ à $t = 0$ (*imaging principle*)

$$P(y,h,z,0) = \iiint P(k_y,k_h,0,\omega)e^{(-ik_y y - ik_h h - ik_z z)}\, dk_y\, dk_h\, d\omega. \tag{39}$$

- Si v est constant, Stolt (1978) a montré que

$$\omega = \frac{v}{2k_z}\sqrt{\left(k_z^2 + k_y^2\right)\left(k_z^2 + k_h^2\right)} \tag{40}$$

et que

$$d\omega = \frac{v}{2}\frac{k_z^2 - k_y^2 k_h^2}{\sqrt{\left(k_z^2 + k_y^2\right)\left(k_z^2 + k_h^2\right)}}dk_z. \tag{41}$$

Migration f–k avant sommation

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- Si on insère (40) et (41) dans (39), on trouve

$$P(y,h,z,0) = \iiint \left[\frac{v}{2} \frac{k_z^2 - k_y^2 k_h^2}{\sqrt{\left(k_z^2 + k_y^2\right)\left(k_z^2 + k_h^2\right)}} \right] \times P\left(k_y, k_h, 0, \frac{v}{2k_z}\sqrt{\left(k_z^2 + k_y^2\right)\left(k_z^2 + k_h^2\right)}\right) \times \exp\left((-ik_y y - ik_h h - ik_z z)\right) dk_y\, dk_h\, dk_z. \quad (42)$$

- La section déport nul est obtenue en sommant sur k_h avec $h = 0$.
- Cette expression est à la base d'algorithmes rapides pouvant être utilisée pour faire une analyse de vitesse.

Migration et analyse de vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- On peut utiliser la migration avant sommation de la même façon qu'on utilise la correction NMO pour calculer le spectre de vitesse.
- Pour construire le spectre de vitesse :
  - migrer le CMP à vitesse constante pour plusieurs valeurs de vitesse ;
  - pour chaque migration, garder la trace à déport nul et les joindre pour constituer le spectre.

Migration et analyse de vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

(a) CMP
(b) spectre de vitesse par migration
(c) spectre de vitesse par NMO

(a) CMP migré, v trop faible
(b) CMP migré, v OK
(c) CMP migré, v trop élevée

Migration et analyse de vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

- Dans le cas précédent, les spectres de vitesse sont équivalents parce que le réflecteur est plat ;
- Les spectres de vitesse vont différer en présence de réflecteurs inclinés ;
  - en théorie, la vitesse de migration est la vitesse du milieu, indépendante du pendage ;
  - pour résoudre ce champ de vitesse, il faut pouvoir compter sur des CMP voisins.
- Une façon de procéder consiste à migrer les données avant sommation à vitesse constante avec plusieurs valeurs de v, et construire autant des panneaux qui permettront de choisir la bonne vitesse.

Migration et analyse de vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Partant de $P(y,h,t)$, faire NMO + DMO + NMO^{-1} pour plusieurs v, et créer un cube de spectres de vitesse $P(y,v_{DMO},t_0)$

Migration et analyse de vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Appliquer l'algorithme de Stolt avant sommation sur $P(y, v_{DMO}, t_0)$ pour obtenir un cube $P(y, \tau, v_{mig})$

Migration et analyse de vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Pointer les vitesses sur les *time slices*

Migration et analyse de vitesse

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Introduction
Principe
Sommation de la surface de diffraction
En pratique
Exemples
Migration f–k avant sommation
Migration et analyse de vitesse
Reverse Time Migration
Références

Regrouper les profils pointés et les interpoler

Reverse Time Migration

Reverse Time Migration

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Une limitation importante des techniques d'extrapolation du champ acoustique est que l'onde est plane et se propage vers le haut ;
  - C'est la raison pour laquelle ces méthodes ne peuvent repositionner précisément les réflecteurs à forts pendages.
- La méthode de migration à rebours (trad. libre de *Reverse Time Migration*, RTM) tient compte de la propagation de l'onde sismique dans toutes les directions.
- Bien qu'initialement proposée en 1983 par Baysal et Kosloff, la RTM gagne en popularité seulement depuis peu car exigeante au plan du temps de calcul (en particulier en 3D).

RTM – Principe

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- L'hypothèse de travail de la RTM est que le champ acoustique P est nul pour $t > t_{max}$, où t_{max} correspond au temps à la fin de l'enregistrement ;
  - autrement dit, après t_{max}, toute l'énergie se propage sous la ligne sismique, où il n'y a plus de réflecteurs.

- À $t_{max} + \Delta t$, $P(x, z) = 0$.
- À t_{max}, P est non nul seulement à $z = 0$.
- L'idée est de «propager» progressivement P sur le domaine (x, z) à $t_{max} - \Delta t$, $t_{max} - 2\Delta t$, $t_{max} - 3\Delta t$, jusqu'à $t = 0$.

RTM – Principe

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Dans leur papier de 1983, Baysal et Kosloff utilisent l'équation d'une onde se propageant vers le haut, soit

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right]^{1/2} P = \frac{1}{v(x,z)} \frac{\partial P}{\partial t}. \tag{43}$$

- Pour modéliser à rebours, on calcule d'abord le terme de gauche, que l'on multiplie par $v(x,z)$;
  - Baysal et Kosloff passent par le domaine de Fourier, ce qui donne

$$\begin{aligned} v\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right]^{1/2} P &= v\mathcal{F}^{-1}\left\{i\,k_z\left[1 + (k_x/k_z)^2\right]^{1/2} \mathcal{F}(P)\right\} \\ &= \frac{\partial P}{\partial t}. \end{aligned}$$

Cette expression est évaluée au temps t, en utilisant les valeurs à $z = 0$ comme condition aux frontières.

RTM – Principe

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- La dérivée temporelle est approximée par une différence finie centrale, tel que

$$\frac{P(x,z,t+\Delta t) - P(x,z,t-\Delta t)}{2\Delta t} = \dot{P}(x,z,t).$$

- Connaissant $P(x,z,t+\Delta t)$ et $\dot{P}(x,z,t)$, on peut ainsi obtenir $P(x,z,t-\Delta t)$ et donc remonter dans le temps de façon itérative.
- Le choix de Δt doit assurer la stabilité du système.
- Évidemment, on n'est pas restreint à l'équation acoustique, et on peut utiliser d'autres opérateurs pour résoudre les dérivées.

Exemple – RTM après sommation

Introduction générale

Migration temps après sommation

Migration temps avant sommation

Reverse Time Migration

Références

Références

Références

Introduction générale
Migration temps après sommation
Migration temps avant sommation
Reverse Time Migration
Références

- Baysal, E., Kosloff, D. D., and Sherwood, J. W. C. (1983). Reverse time migration. *Geophysics*, 48(11) :1514–1524
- Chun, J. H. and Jacewitz, C. A. (1981). Fundamentals of frequency domain migration. *Geophysics*, 46(5) :717–733
- Stolt, R. H. (1978). Migration by Fourier transform. *Geophysics*, 43(1) :23–48
- Yilmaz, O. (2001). *Seismic data Analysis*. Number 10 in Investigations in Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma