

Αντώνης Βαφέδης

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η χρήση υπερυπολογιστών εξαπλώνεται ραγδαία. Η ανάγκη για πιά μεγάλες ταχύτητες και όσο το δυνατό μεγαλύτερη μνήμη γίνεται πιά επιτακτική σε ορισμένους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Αυτό το κενό έρχεται να καλύψει η τελευταία γενιά των ηλεκτρονικών υπολογιστών που ονομάζονται υπερυπολογιστές.

Στην εφαρμοσμένη σεισμολογία η χρήση των υπερυπολογιστών θεωρείται αναγκαία καθώς η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων είναι χρονοβόρα και μερικές φορές αδύνατη με τους συμβατικούς υπολογιστές. Το σύνολο σχεδόν των προγραμμάτων γεωφυσικών εφαρμογών που είναι γραμμένα για τους συμβατικούς υπολογιστές είναι δυνατόν να τρέξουν σε υπερυπολογιστές αλλά η ταχύτητα δεν αυξάνεται ανάλογα με την ισχύ που έχει ο υπερυπολογιστής επειδή οι αλγόριθμοι δεν βασίζονται στην φιλοσοφία του. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη για καινούργιους αλγόριθμους οι οποίοι κάνουν χρήση όλης της ισχύος του υπερυπολογιστή.

Μία από τις κυριότερες εφαρμογές είναι η προσομοίωση της διάδοσης σεισμικών κυμάτων. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει τη διάδοση των κυμάτων. Ο αλγόριθμος βασίζεται στον πολλαπλασιασμό πινάκων κατά διαγώνιους. Η μέθοδος είναι ταχύτερη στον υπερυπολογιστή με συνέπεια τη διεύρυνση των εφαρμογών της.

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση των σεισμικών κυμάτων ενός προγράμματος πηλότου υψηλής διακριτικής ικανότητας (250 Hz) στην Βόρεια Αλμπέρτα του Καναδά.

ABSTRACT

Algorithms for finite difference methods of modelling the entire elastic waveform are implemented on the Cyber 205 supercomputer as it is configured at the University of Calgary, Canada. They are set up to handle SH and P-SV cases for sources and receivers in any geometric configuration consistent with the memory limitations of the system. A hyperbolic system of equations is modeled for a heterogeneous two-dimensional medium. A (2,2) Lax-Wendroff scheme and a (2,4) MacCormack scheme form the main basis of the current algorithms. A line source having a Gaussian time-dependence has been used to illuminate two-dimensional models. The algorithms are implemented to work on a Cyber 205 supercomputer as it is configured in Calgary, Alberta. In order to take advantage of the vector computers, the number crunching parts of the algorithm must be fully vectorized. A finite difference operator can be described in terms of matrix by vector multiplications and vector

additions. A technique of matrix by vector multiplication by diagonals is fully vectorized and proved to be very efficient. Its basic difference is that matrices are stored by diagonals instead of the most common storage by columns. Current implementations are sufficiently efficient so that fully 3-dimensional algorithms appear to be feasible.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εφαρμοσμένη σεισμολογία τα συνθετικά σειсмоγράμματα είναι χρήσιμα για τη καλύτερη κατανόηση των πραγματικών δεδομένων. Συνθετικά σειсмоγράμματα προκύπτουν από τη λύση των κυματικών διαφορικών εξισώσεων. Η χρήση αναλυτικών μεθόδων δεν είναι δυνατή στην περίπτωση που οι φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων μεταβάλλονται όχι μόνο με το βάθος αλλά και στην οριζόντια διεύθυνση.

Οι κυματικές διαφορικές εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν με τη βοήθεια προσεγγιστικών μεθόδων. Ετσι για παράδειγμα, μία τέτοια μέθοδος βασίζεται στην ανάπτυξη της λύσης σε σειρά απείρων όρων (Asymptotic Ray Theory). Οι συντελεστές ενός μικρού αριθμού μελών της σειράς συνήθως αρκούν για τη περιγραφή μίας προσεγγιστικής λύσης. Αλλη μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή μετασχηματισμών.

Η προσομείωση της διάδοσης σεισμικών κυμάτων γίνεται με μεγάλη ακρίβεια με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρήση υπολογιστή με αρκετά μεγάλη μνήμη και είναι πολύ χρονοβόρα, πράγμα που τη κάνει ασύμφωνη σε ένα συμβατικό υπολογιστή. Αυτός είναι ο κυριώτερος λόγος που η παραπάνω μέθοδος δεν βρήκε τόσο μεγάλη απήχηση στην εφαρμοσμένη σεισμολογία μέχρι σήμερα.

Με τη νέα γενιά των παράλληλων και "vector" υπολογιστών που είναι πιο γρήγοροι και έχουν μεγαλύτερες μνήμες, η προσομείωση γίνεται εφικτή. Η προσομείωση των σεισμικών κυμάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών βοηθά στην επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων ενός πειράματος σεισμικής ανάκλασης, στην ερμηνεία πολύπλοκων πραγματικών δεδομένων, στην κατανόηση πολύπλοκων σεισμικών φαινομένων κτ.

ΛΙΓΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΥΠΕΡΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

Οι υπερυπολογιστές είναι γρήγορες μηχανές (της τάξης των δεκάδων MFLOP). Αποτελούνται από περισσότερους τους ενός επεξεργαστές οι οποίοι κάνουν τις πράξεις συγχρόνως σε ομάδες αριθμών (VECTORS). Για να επωφεληθούμε τις δυνατότητες ενός υπερυπολογιστή θα πρέπει να δούμε σε ποιά σημεία διαφέρει από ένα συμβατικό υπολογιστή. Ετσι ενώ σε ένα συμβατικό υπολογιστή οι οδηγίες των αριθμητικών πράξεων αναφέρονται σε μεμονωμένους αριθμούς, σε ένα υπερυπολογιστή οι οδηγίες αναφέρονται σε ομάδες αριθμών οι οποίοι βρίσκονται σε διαδοχικές περιοχές της μνήμης (VECTORS).

Η βασική διαφορά στην αρχιτεκτονική των δύο μηχανών φαίνεται από το παρακάτω παράδειγμα: Εστω ότι έχουμε ένα πλυντήριο και ένα στεγνωτήριο και θέλουμε να καθαρίσουμε πέντε (5) ομάδες ρούχων. Κάθε πλύσιμο ή στέγνωμα διαρκεί μισή ώρα. Αν αφού πλύνουμε πρώτα όλες τις ομάδες των ρούχων, βάλουμε μετά σε λειτουργία το στεγνωτήριο, τότε θα χρειαστούμε συνολικά πέντε (5) ώρες. Αν όμως αφού κάνουμε το πλυντήριο της πρώτης

ομάδας, βάλουμε αυτά τα ρούχα στο στεγνωτήριο και συγχρόνως ξεκινήσουμε τη λύση της δεύτερης ομάδας κοκ, τότε ο ολικός χρόνος μειώνεται στις τρεις (3) ώρες. Τη πρώτη τεχνική χρησιμοποιεί ο συμβατικός υπολογιστής ενώ τη δεύτερη ο "vector" υπολογιστής.

Η ταχύτητα του υπερυπολογιστή αυξάνεται ακόμη περισσότερο με τη χρήση περισσότερων του ενός επεξεργαστών. Για να πετύχουμε υψηλές πραγματικές ταχύτητες είναι απαραίτητο να κάνουμε χρήση της "vector" αρχιτεκτονικής. Αυτό επιτυγχάνεται όταν:

- 1) η εφαρμογή επιτρέπει να γίνονται πράξεις κατά ομάδες (vectorized) και
- 2) τα προγράμματα είναι γραμμένα με "vectorized" κωδικούς.

Η ομαδοποίηση (vectorization) είναι η αρχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε όλα τα επίπεδα προγραμματισμού. Είναι σχεδόν απίθανο ήδη υπάρχοντα προγράμματα να είναι "vectorized", έτσι η ταχύτητα στον υπερυπολογιστή δεν αυξάνεται (σε μερικές περιπτώσεις μπορεί και να μειωθεί). Αρα είναι απαραίτητο να βρεθούν νέοι αλγόριθμοι και να γραφτούν προγράμματα τα οποία βασίζονται στην "vector" αρχιτεκτονική.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Η κυματική εξίσωση η οποία περιγράφει τη διάδοση διαμήκων (P) και εγκάρσιων (SV) κυμάτων σε δύο διαστάσεις είναι ισοδύναμη με ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων το οποίο αποτελείται από τις βασικές εξισώσεις της κίνησης και τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων. Οι άγνωστες ποσότητες του συστήματος είναι οι ταχύτητες των υλικών σημείων στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση και οι συνιστώσες της τάσης. Η πυκνότητα και οι συντελεστές Lamé χρησιμοποιούνται για τη περιγραφή των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων. Συστήματα διαφορικών εξισώσεων λύνονται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών οι άγνωστες μεταβλητές υπολογίζονται σε διακριτά σημεία ενός ορθογώνιου πλέγματος σαν συνάρτηση του χρόνου. Τύποι υψηλής ακρίβειας βασίζονται στην προιατορία των μεταβλητών και στις φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων για το προσδιορισμό των τιμών των αγνώστων στην επόμενη χρονική στιγμή (Vafidis, 1988).

Η ομαδοποίηση (vectorization) των πράξεων στον αλγόριθμο των πεπερασμένων διαφορών πραγματοποιήθηκε επειδή α. κάθε μεταβλητή μπορεί να παραταχθεί με ένα διδιάστατο πίνακα και β. ο πολλαπλασιασμός πινάκων είναι "vectorized" όταν γίνεται κατά διαγώνιους.

Εκτός από το σχεδιασμό του αλγόριθμου έγιναν προσπάθειες για τη χρήση "vector" εντολών. Ο αλγόριθμος αυξάνει την ταχύτητα της μεθόδου περίπου πενήντα φορές.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Για τη δημιουργία συνθετικών σειсмоγραμμάτων θα πρέπει να ορισθούν οι φυσικές ιδιότητες (πυκνότητα κλπ) σε όλα τα σημεία του πλέγματος. Στο πρόγραμμα της προσομοίωσης, τα γεώφωνα και η πηγή είναι δυνατόν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος. Οι φυσικές ιδιότητες είναι δυνατόν να μεταβάλλονται στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Σε ένα πείραμα σεισμικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν δύο πηγάδια για την μελέτη στρωμάτων με βαριά πετρέλαια τα οποία έχουν υποστεί την επίδραση υψηλής πίεσης υπερκορεσμένων ατμών (σχήμα 1). Ο ατμός θερμαίνει το στρώμα με αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους του πετρελαίου και την τελική άντλησή του. Είναι δύσκολο να περιγραφεί θεωρητικά η πραγματική μορφή της θερμής ζώνης. Η σεισμική τομογραφία δίνει μια καλή εικόνα της ανάπτυξης της ζώνης, καθώς η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία στα κοιτάσματα βαριών πετρελαίων.

Στο πείραμα το ένα πηγάδι περιέχει τη πηγή και το άλλο, 24 γεώφωνα. Σαν πρώτη προσέγγιση, θεωρούμε ότι η θερμή ζώνη είναι ελλειπτικού σχήματος με ταχύτητα 1.8 km/sec. Παρόμοιο πείραμα έγινε στην Β. Αλμπέρτα του Καναδά. Εδώ παρουσιάσουμε αποτελέσματα από την προσομείωση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Η επίδραση της θερμής ζώνης παρουσιάζεται στο σχήμα 2 όπου εκτός από χρονικές καθυστερήσεις της τάξης των 2-3 msecς στις πρώτες αφίξεις, εμφανίζονται και αλλαγές στα πλάτη των απευθείας (1 και 4) και των ανακλώμενων (2 και 3) κυμάτων.

Σε ένα άλλο πείραμα (σχήμα 3) έχουν υπολογιστεί συνθετικά σεισμογράμματα της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας των υλικών σημείων πριν (σχήμα 4) και μετά (σχήμα 5) την επίδραση του ατμού. Επιπρόσθετες αφίξεις εμφανίζονται στο σχήμα 5 λόγω ανακλάσεων στα όρια της θερμής ζώνης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Προγράμματα προσομείωσης της διάδοσης σεισμικών κυμάτων κατάλληλα για υπερυπολογιστές μειώνουν δραστικά τους χρόνους υπολογισμού. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα χάρις στην μεγάλη μνήμη αλλά και στην ταχύτητα των υπερυπολογιστών.

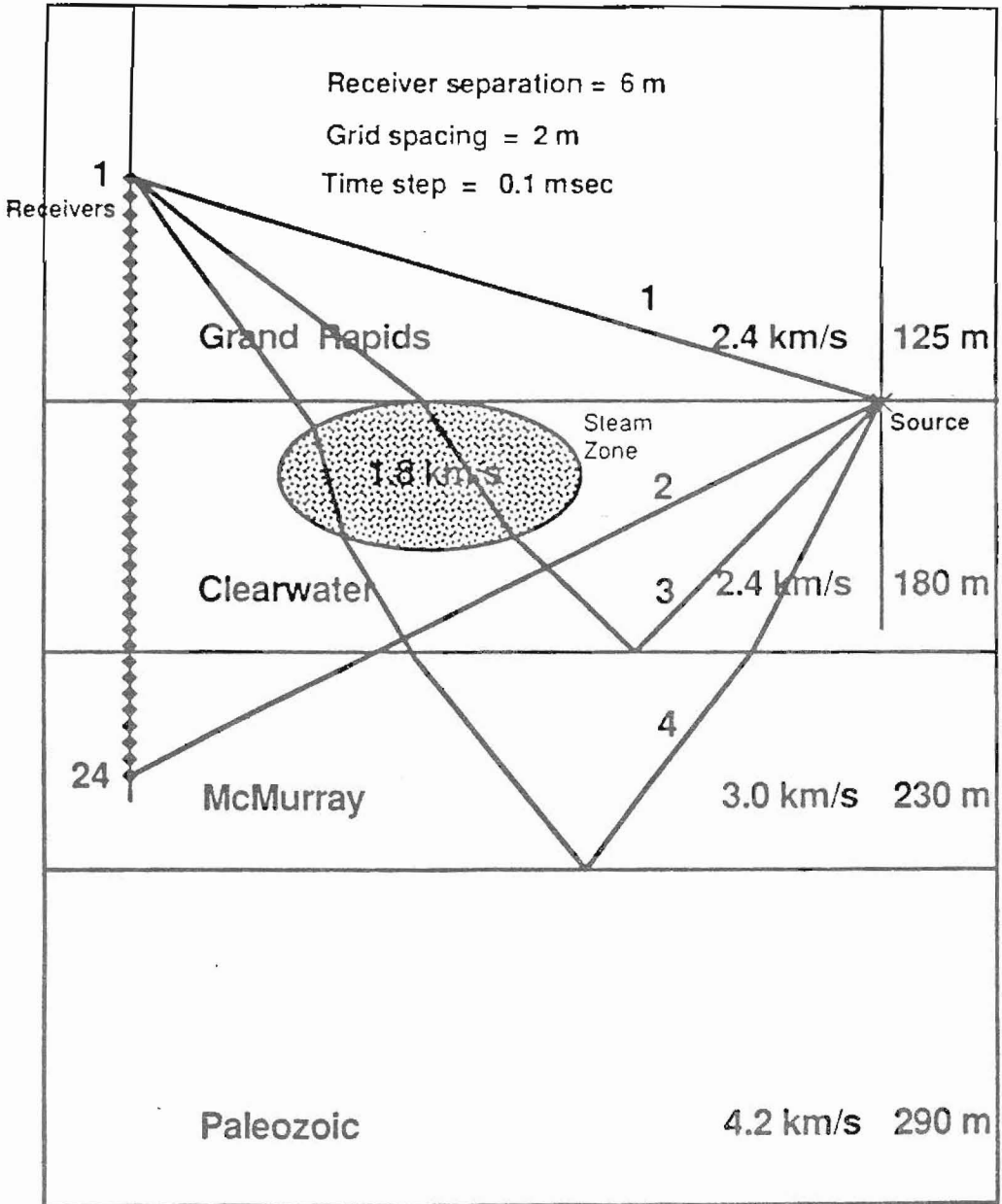
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

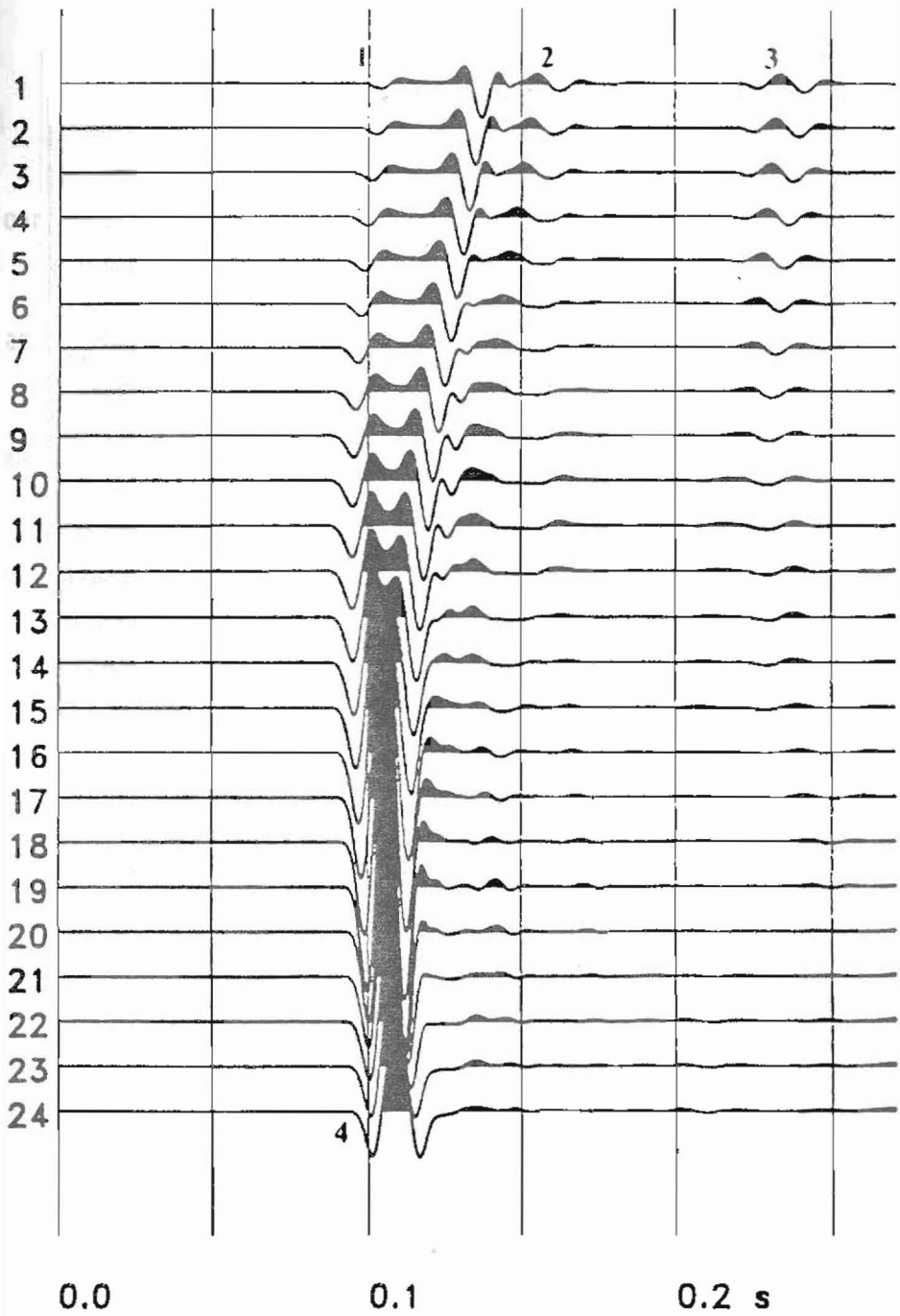
- Vafidis, A., Supercomputer finite difference algorithms for seismic wave propagation, 1988, Ph.D. thesis, Univ. of Alberta, Edmonton, Canada.

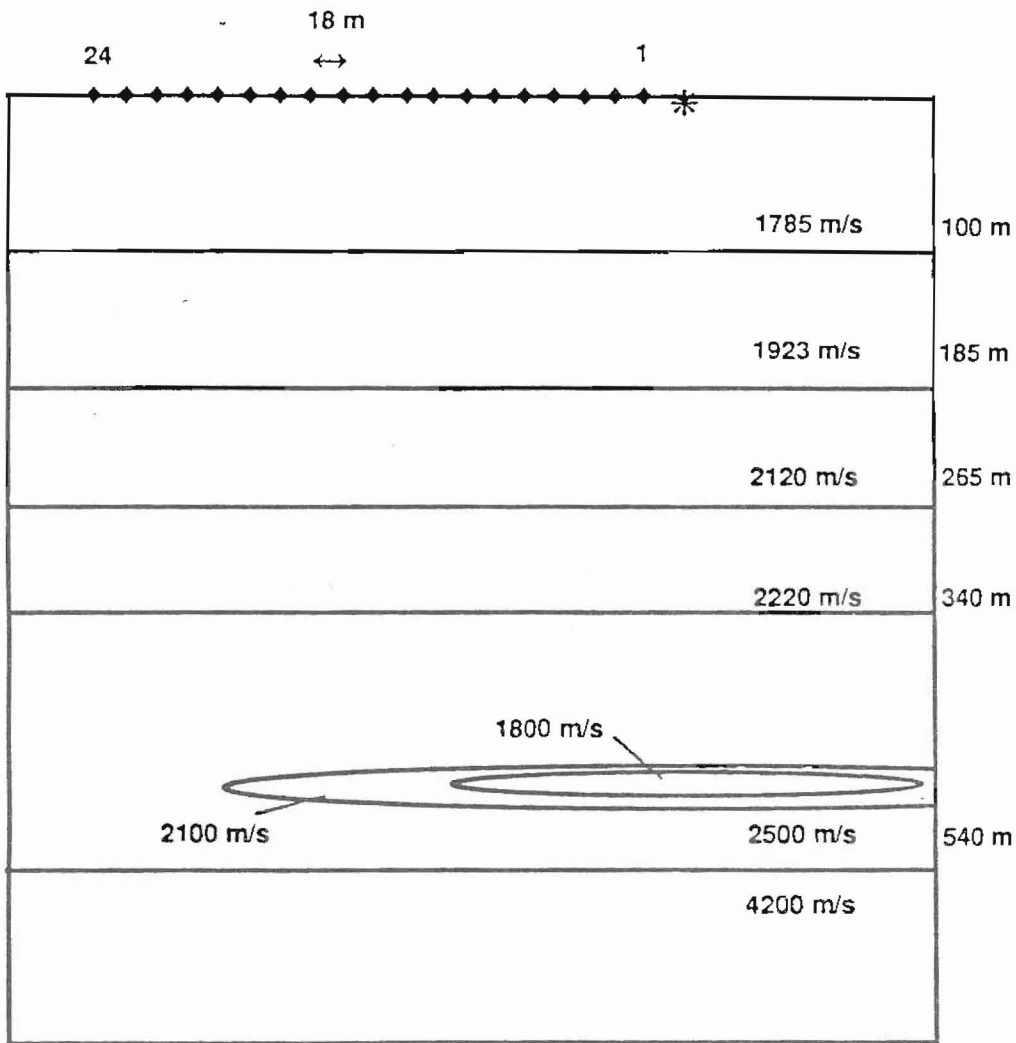
ΣΧΗΜΑΤΑ

1. Γεωμετρία πειράματος σεισμικής τομογραφίας.
2. Τα συνθετικά σεισμογράμματα προκύπτουν από την αφαίρεση των αντίστοιχων σεισμογραμμάτων πριν και μετά την επίδραση των υπερκορεσμένων ατμών.
3. Γεωμετρία πειράματος με οριζόντια διάταξη γεωφώνων.
4. Συνθετικά σεισμογράμματα της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας των υλικών σημείων πριν από την επίδραση των υπερκορεσμένων ατμών.
5. Συνθετικά σεισμογράμματα της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας των υλικών σημείων μετά την επίδραση των υπερκορεσμένων ατμών.

Model geometry







Model parameters

$h = 6\text{ m}$

$k = 0.5\text{ ms}$

