



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

A.A. 2021-2022

*LABORATORIO DI ACQUISIZIONE
ED ELABORAZIONE DATI GEOFISICI*

UNITA' DIDATTICA 3B - UD3B

*ELABORAZIONE DATI
GROUND PENETRATING RADAR*

SCHEMA UNITA' DIDATTICA

Analisi (procedura temporanea/reversibile) ed
elaborazione (procedura definitiva/irreversibile) dei dati

1. Conversione dati
2. Editing e Geometrizzazione
3. Drift removal (zero time correction)
4. Analisi spettrale e filtraggi
5. Rimozione delle componenti di rumore coerente (*background*)
6. Analisi e recupero di ampiezza (gain)
7. Analisi di velocità (dati *multifold*)
8. Correzione di NMO e *Stack* (dati *multifold*)
9. Conversione in profondità/migrazione

Elaborazione dati GPR

NON SONO POSSIBILI STANDARD DI ELABORAZIONE

Valutare caso per caso se vi sono problematiche particolari ed eventualmente quali strategie adottare per risolverle.

L'UNICA PROCEDURA SEMPRE NECESSARIA e' legata all'ATTENUAZIONE dell'onda elettromagnetica

→ **RECUPERO DELL'AMPIEZZA (Gain)**

Fasi tipiche di elaborazione (processing flow)

1. **Conversione dati**
2. **Editing e Geometrizzazione**
3. **Drift removal (zero time correction)**
4. **Analisi spettrale e filtraggi**
5. **Rimozione delle componenti di rumore coerente (*background*)**
6. **Analisi e recupero di ampiezza (*gain*)**
7. **Analisi di velocità (dati *multifold*)**
8. **Correzione di NMO e *Stack* (dati *multifold*)**
9. **Conversione in profondità/migrazione**

1) CONVERSIONE → I dati vengono acquisiti in formati diversi a seconda delle strumentazioni utilizzate (dati binari privi o con header di traccia, formato seg2, formati proprietari).

Spesso vengono convertiti in formato SEG-Y che è lo standard per l'acquisizione sismica a riflessione e che consente di utilizzare tutti i software originariamente sviluppati per la sismica di esplorazione petrolifera.

SEG-Y FORMAT:

Header di file (committente, località, tipo di antenna, operatore,...)

Header di traccia (offset, posizione T ed R, n° T,...)

DATO (matrice $N_{\text{campioni}} \times M_{\text{tracce}}$)

2) GEOMETRIZZAZIONE ed EDITING → Ai dati vengono assegnati valori nelle header che definiscono in maniera univoca le caratteristiche GEOMETRICHE utilizzate (posizione antenne trasmettenti e riceventi, offset, intervallo tra le tracce, ...)

Elaborazione dati GPR

2) L' EDITING prevede il Quality Control dei dati e l'individuazione di eventuali problemi legati a malfunzionamento o a rumori, soprattutto sistematici (coerenti), ma anche eventuali spike o tracce aventi ampiezza anomala. Algoritmi specifici, di solito nel dominio del tempo, possono venir applicati (muting, despiking, applicazione di soglie, filtri nel dominio del tempo/medie mobili,...)

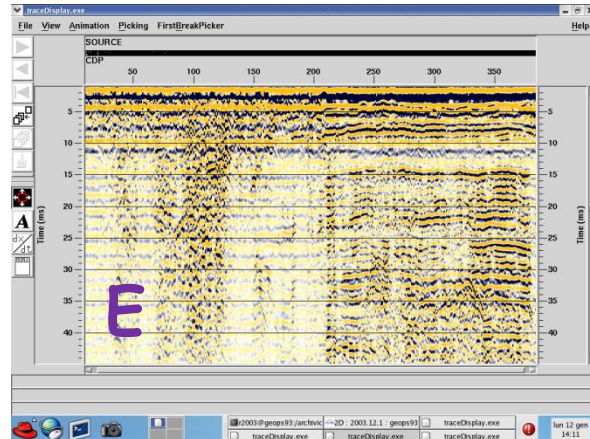
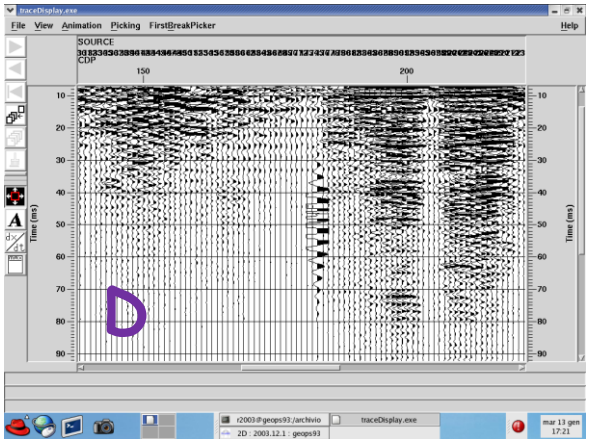
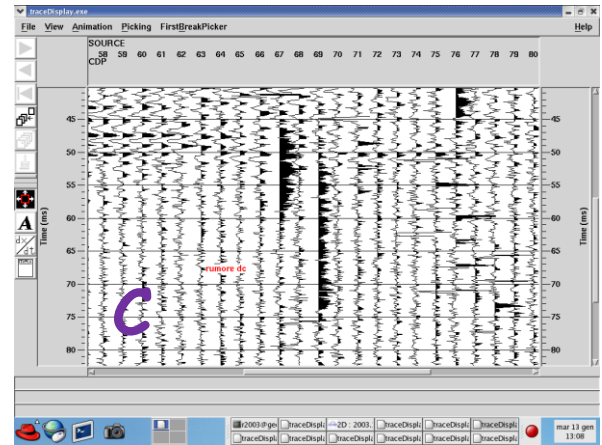
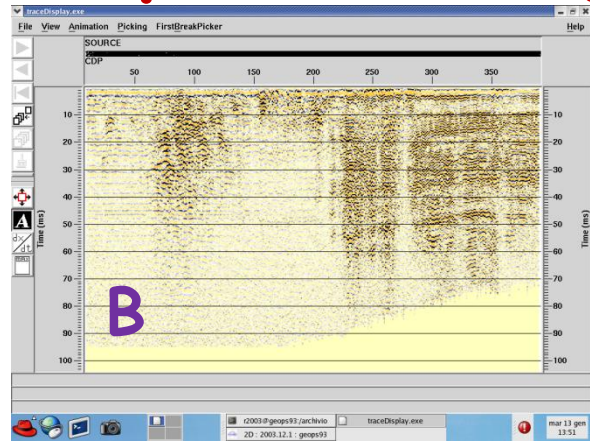
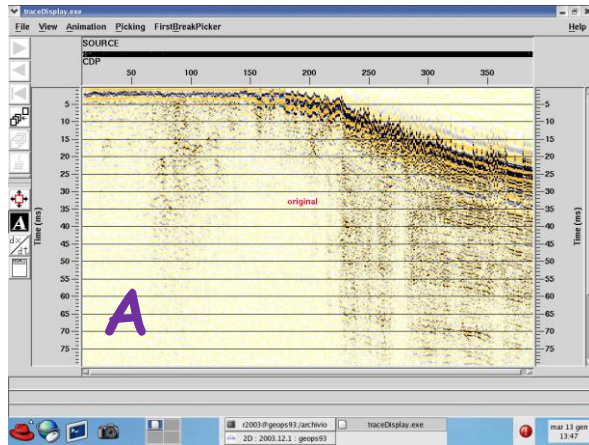
3) DRIFT REMOVAL (Zero time correction) Ci può essere un problema di timing (sincronizzazione) tra tempo di energizzazione (attivazione antenna T) e tempo di inizio ricezione (attivazione antenna R). Essendo noto l'OFFSET (x), fisso o variabile, è SEMPRE possibile spostare (*static correction*) i campioni registrati nella corretta posizione temporale:

$$\frac{x}{c} = t_{aw}$$

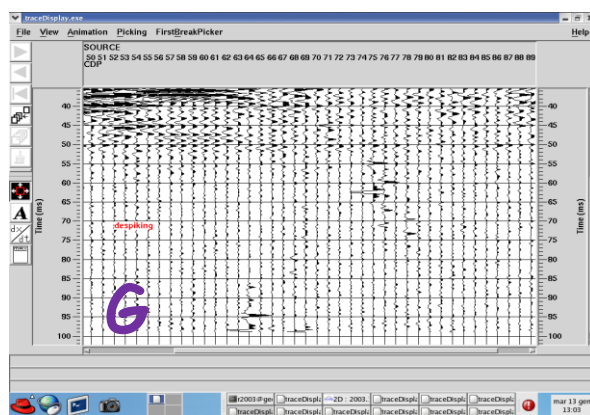
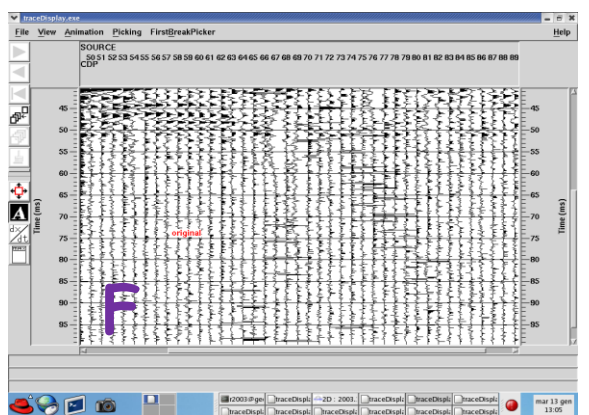
E' consigliabile introdurre volutamente uno sfasamento negativo dell'antenna R
 → inizio registrazione PRIMA dell'attivazione di T

- 1) Si è sicuri di non aver troncato i dati
- 2) Si dispone di una zona dove SICURAMENTE non ci sono segnali primari → SOLO rumore ambientale che può così essere valutato.

Esempi di editing



- A) Variazione tempo primi arrivi;
- B) Flattening
- C) Rumore DC e spikes
- D) Traccia con ampiezza anomala
- E) Rumori coerenti (ringing)
- F) Spikes
- G) De-spiking



4) ANALISI SPETTRALE - FILTRAGGI Si analizzano i dati in domini trasformati (trasformata di Fourier - FT, FFT)

Molto utili:

Spettro di Ampiezza → Esprime l'ampiezza delle diverse componenti in f entro una finestra lunga t e larga N tracce → evidenzia variazioni temporali

Spettro f_x → esprime la variazione del contenuto in frequenza tra tracce diverse → Evidenzia variazioni laterali

DEFINIZIONE DI FILTRI in FREQUENZA

1) ANALISI DEL CONTENUTO IN FREQUENZA in PORZIONI DIVERSE DEI PROFILI (ad es. prima dell'onda d'aria; sull'onda d'aria/di terra; prime riflessioni, riflessioni profonde, zone a scattering elevato, zone con rumore coerente, parte finale delle tracce) → STIMA dell'INTERVALLO DI FREQUENZA legato al SEGNALE PRIMARIO.

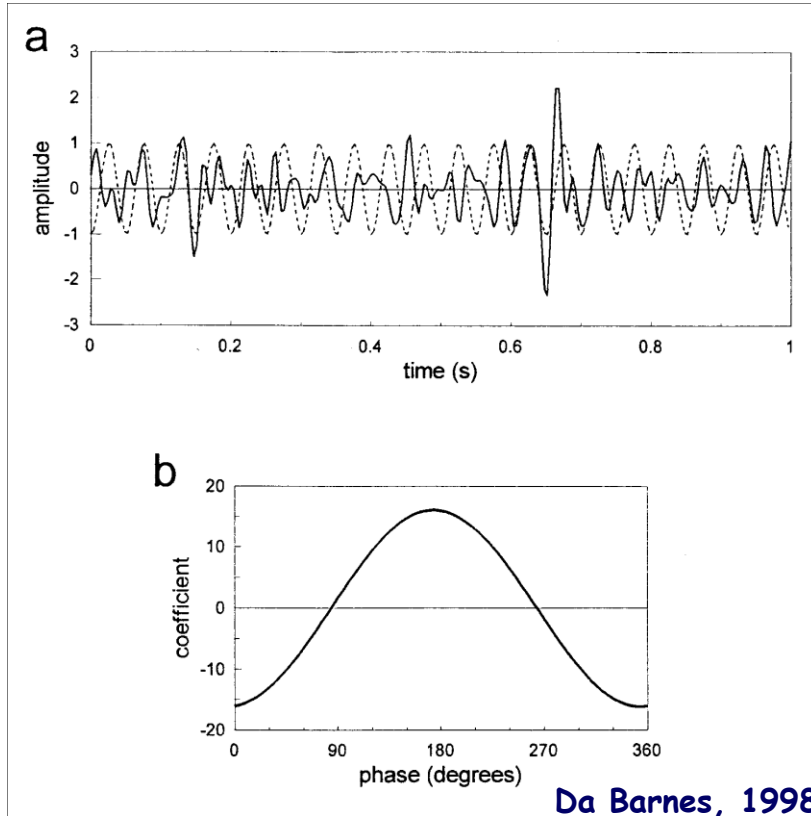
2) SCAN DI FILTRAGGIO

→ PROGETTAZIONE DEL FILTRO, eventualmente time/space variant

ATTENZIONE FENOMENI DI GIBBS → Forma trapezoidale con raccordo più graduale verso le alte f

4. Analisi spettrale

TRASFORMATA DI FOURIER (FT) Considerazioni pratiche e applicative



- (a) (Seismic) trace compared with a 20 Hz cosine wave with 175° of phase.
- (b) Correlation coefficients (unnormalized) for the seismic trace and the cosine wave as a function of the phase of the cosine, determined every 5° . The largest coefficient is 16.1 at 175° ; these are the approximate Fourier amplitude and phase for this trace at 20 Hz.

MAX coefficiente di correlazione
(per ogni frequenza) \rightarrow **AMPIEZZA**

BEST angolo di fase \rightarrow **FASE**

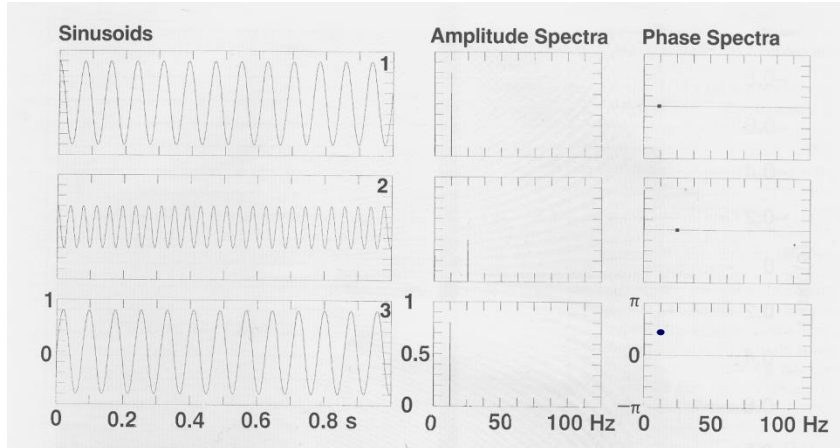
Quindi la FT determina il massimo coefficiente di correlazione e l'angolo di fase ad esso associato in una traccia sismica per tutte le frequenze

4. Analisi spettrale

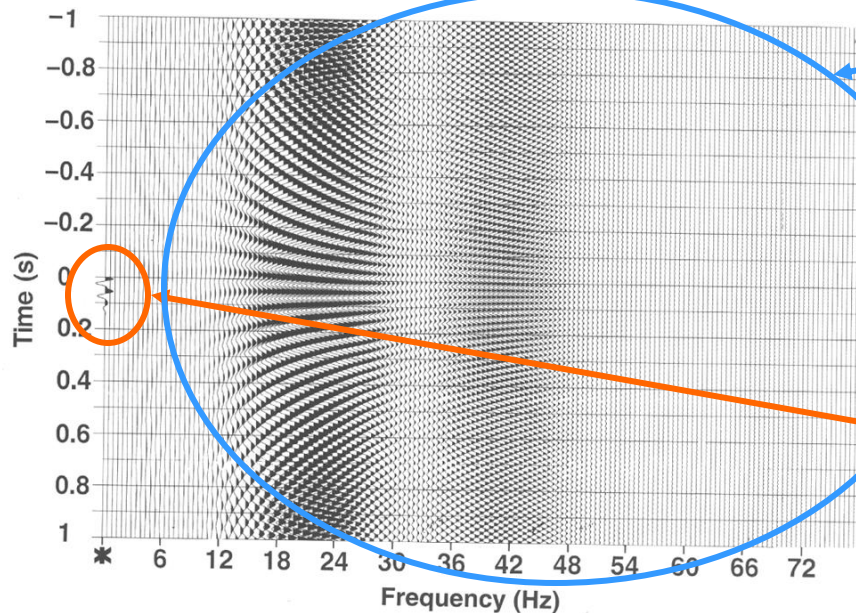
TRASFORMATA DI FOURIER (FT)

Considerazioni pratiche e applicative

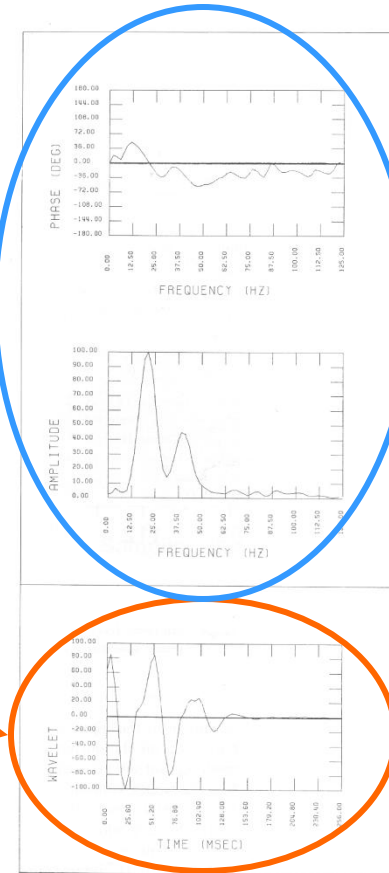
Per segnali monofrequenza



Per segnali multifrequenza



=



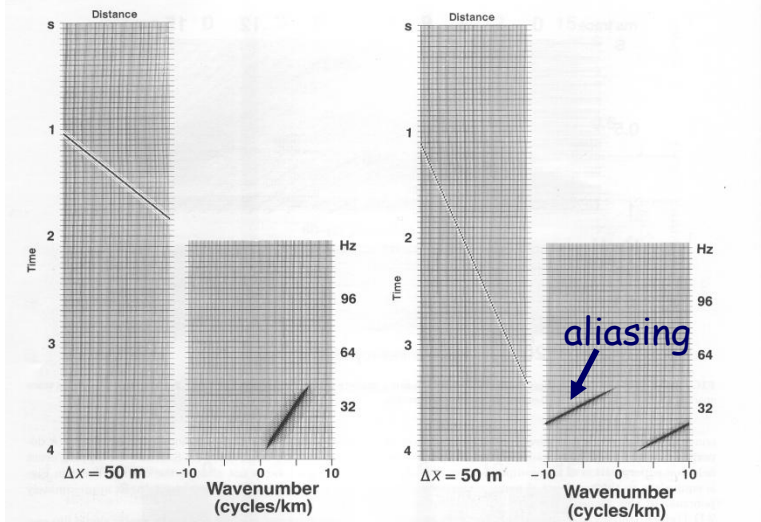
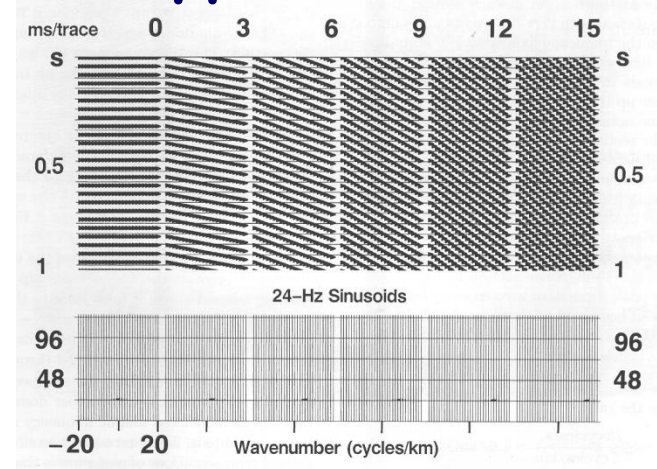
Quindi: la FT esprime il contenuto in frequenza e fase di una sequenza temporale di cui è una rappresentazione analogica alternativa

4. Analisi spettrale

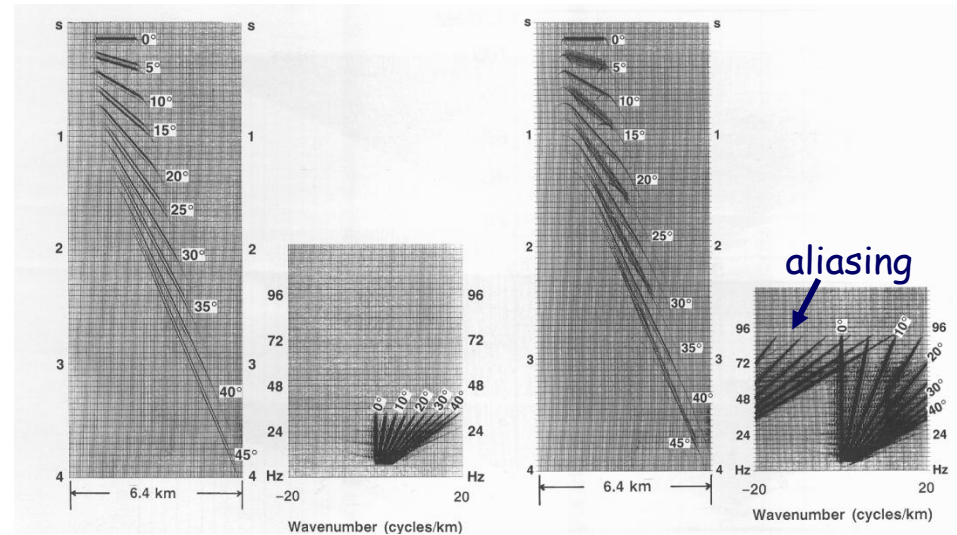
TRASFORMATA DI FOURIER (FT)

Considerazioni pratiche e applicative

Per segnali monofrequenza
e k =numero d'onda=cost

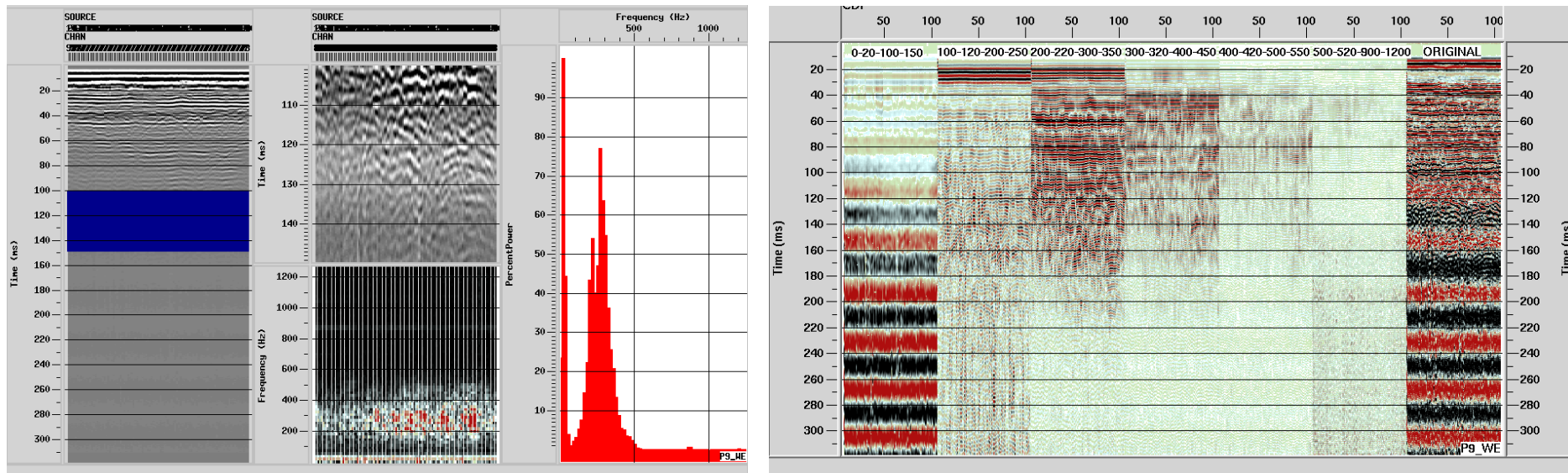


Per segnali multi frequenza
e k =numero d'onda costante



Per segnali multi frequenza
e k =numero d'onda=variabile

4. Analisi spettrale/Scan di filtraggio UD3B



Lo scan di filtraggio va impostato inizialmente su intervalli (di solito di larghezza costante) che coprono un ampio range di frequenze.

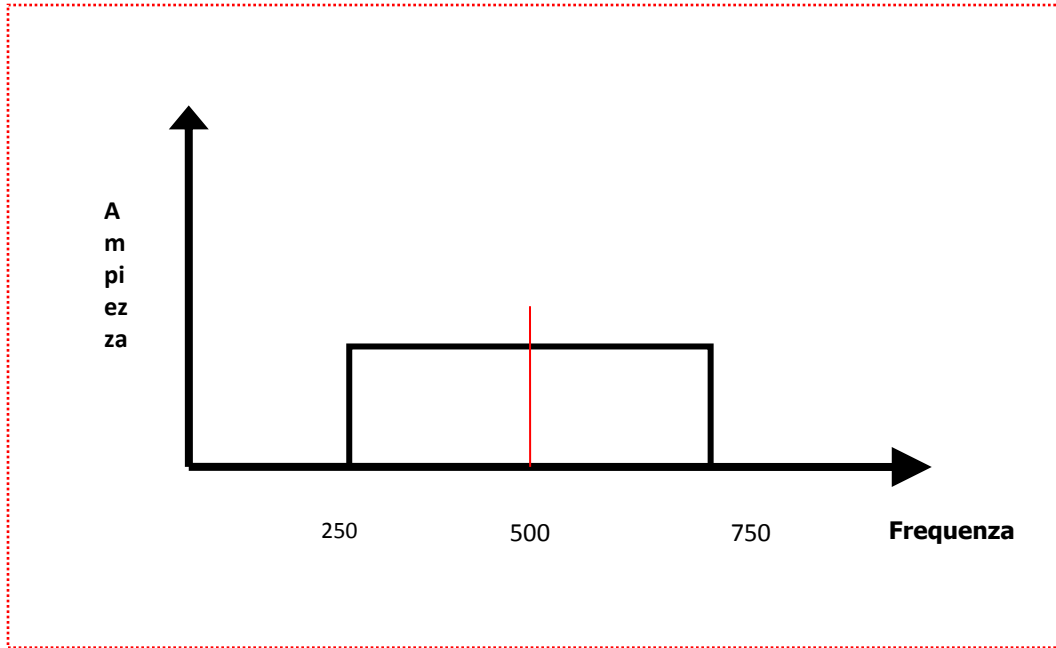
Successivamente l'analisi può essere concentrata su porzioni spettrali più piccole.

Importanza della fase del filtro (i dati GPR solitamente NON sono a fase minima)

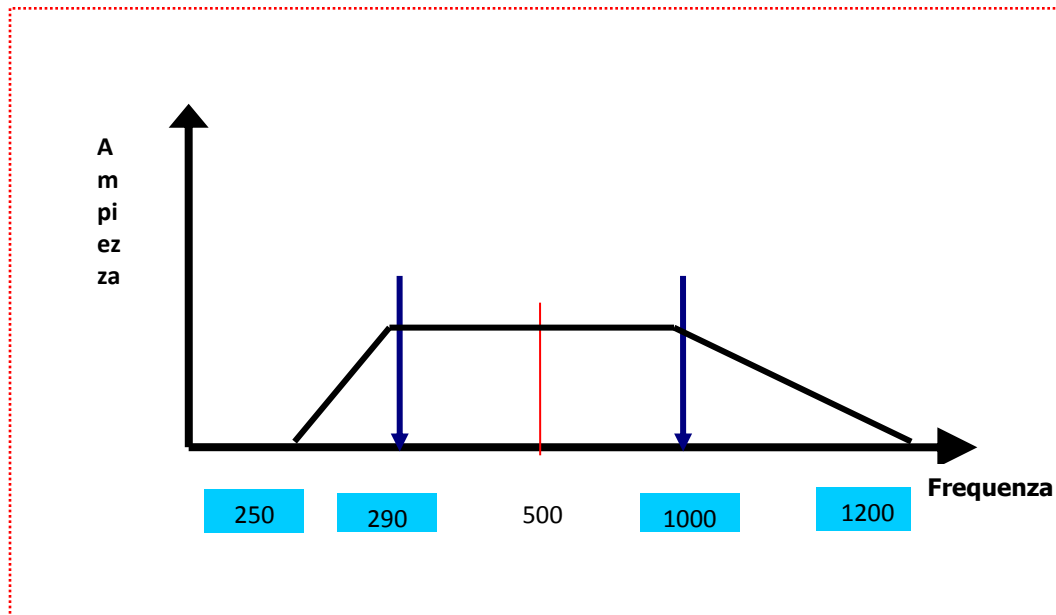
Importanza del tapering → funzione di trasferimento del filtro

Possono essere progettati basati su parametri DIVERSI dalla frequenza o su più parametri (FILTRI fK, τ_p , ...)

4. Analisi spettrale - Funzione di trasferimento ^{UD3B}



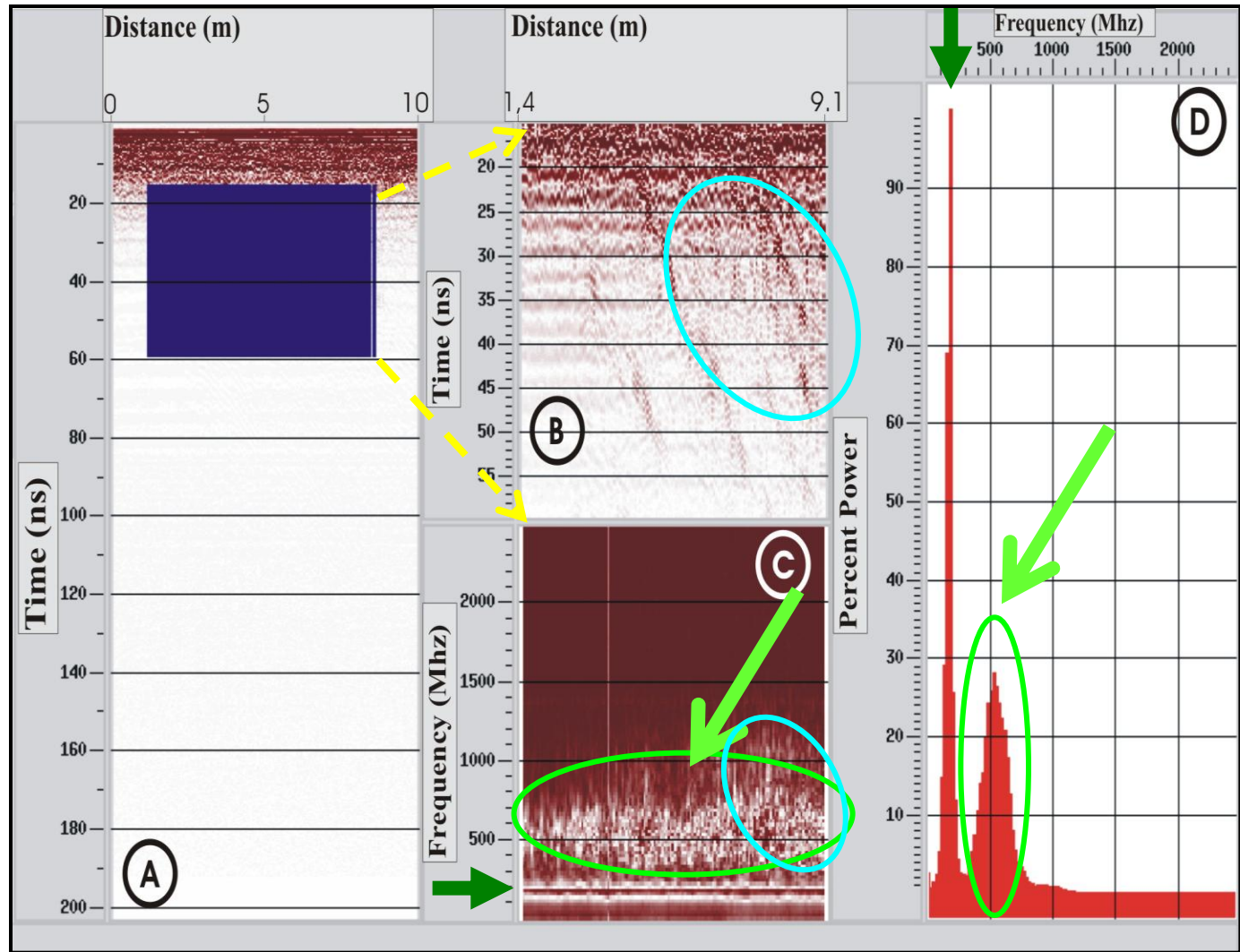
BOXCAR
Centrata a 500MHz



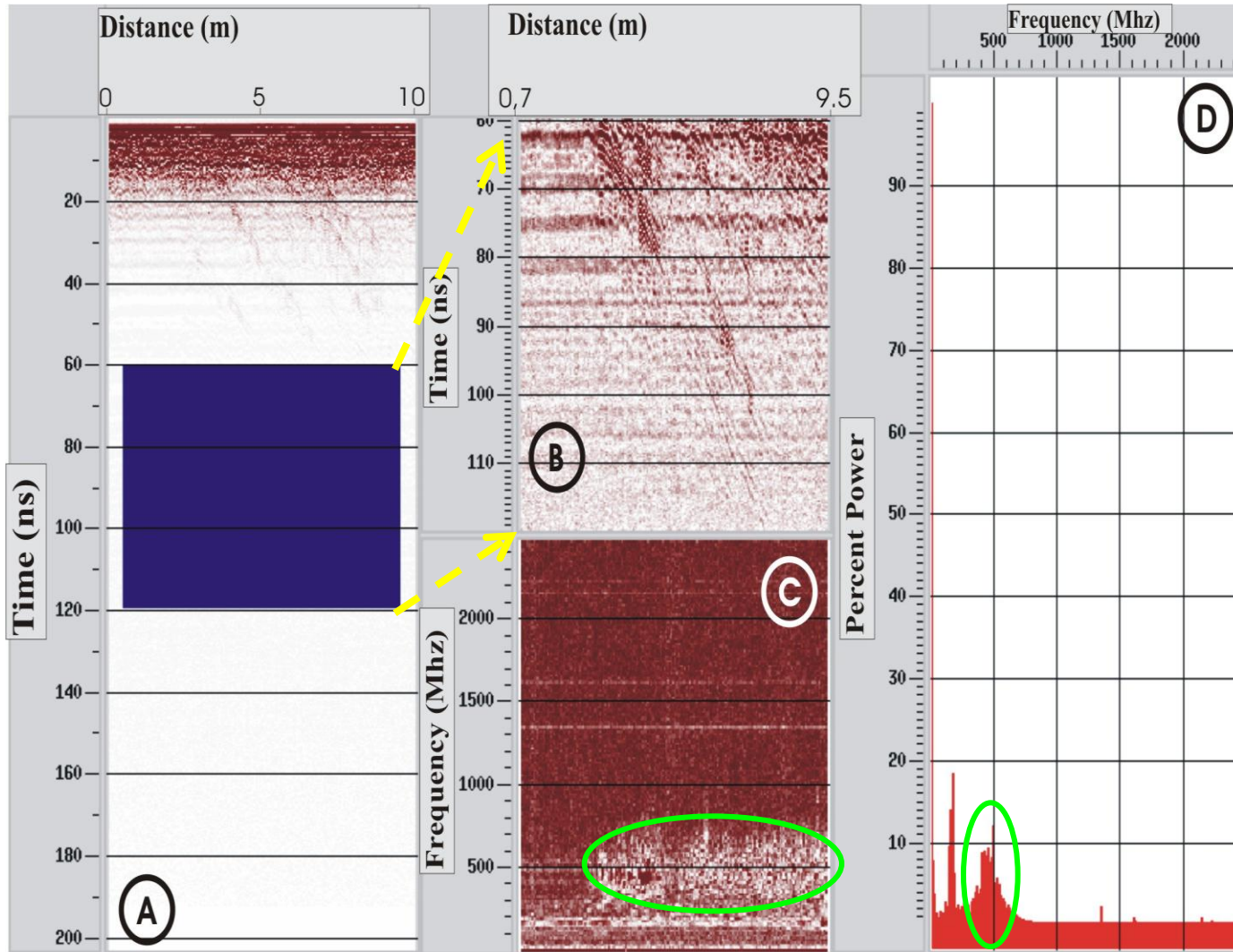
Funzione a
"trapezio scaleno"
Centrata a 500MHz

4. Analisi spettrale/Scan di filtraggio UD3B

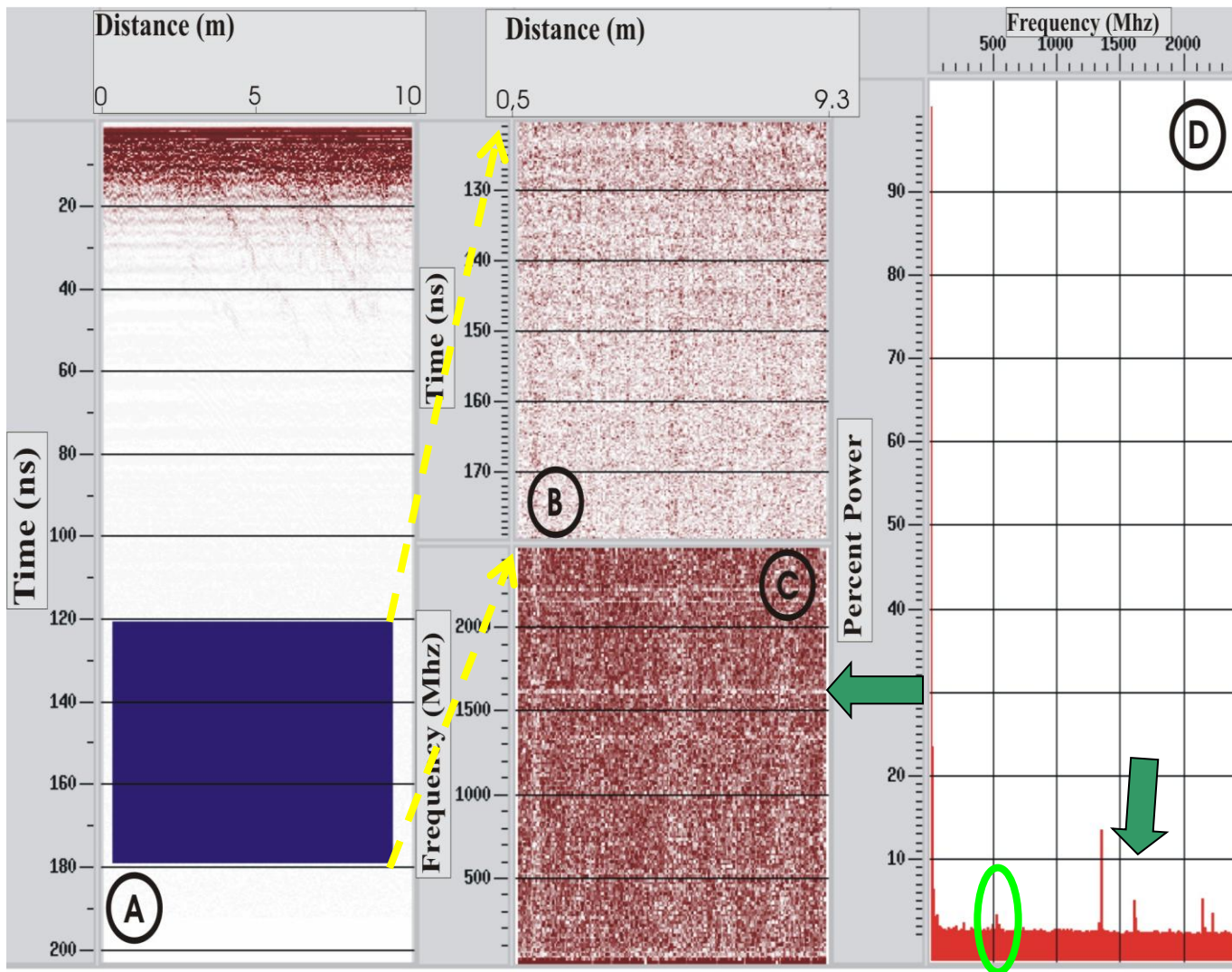
- A → sezione tx
- B → dettaglio di A
- C → spettro f-x
- D → spettro A(f)



4. Analisi spettrale/Scan di filtraggio



4. Analisi spettrale/Scan di filtraggio



5. Recupero di ampiezza (gain)

Automatic Gain Control (AGC) Algoritmi su finestre temporali mobili con lunghezza definita dell'analista. All'interno di ogni finestra viene calcolato il valore medio di ampiezza dei campioni. Questo valore viene poi utilizzato come valore di normalizzazione di ampiezza all'interno della finestra.

$$\text{Ad esempio } g(t)_{IST} = \frac{\text{fixed RMS value}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|} \quad \text{oppure} \quad g(t)_{RMS} = \frac{\text{fixed RMS value}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}}$$

x_i è l'ampiezza dell'iesimo campione di una traccia e N è il numero di campioni all'interno della finestra di calcolo.

L'algoritmo è di facile utilizzo, ma fortemente dipendente dalla lunghezza della finestra temporale scelta: se essa infatti è lunga come tutta la traccia lascia i dati così come sono senza apportare nessun recupero d'ampiezza; viceversa se è troppo corta si rischia di amplificare anche il rumore. In ogni caso si effettua una **equalizzazione dei vari segnali (e rumori) presenti perdendo la possibilità di discriminarli sulla base dell'ampiezza di riflessione.**

Un altro approccio per effettuare il recupero di ampiezza è quello di costruire la curva di decadimento delle ampiezze in funzione del tempo, basandosi sui valori dei dati registrati. L'inverso di tali curve di decadimento costituisce la curva di guadagno che potrà essere applicate al dato.

BUON COMPROMESSO E VERSATILITA' DI IMPIEGO

Utilizzo di funzioni matematiche (crescenti nel tempo) da applicare ai dati.

Tipicamente curve del tipo $g(t) = AxBtxe^{Ct}$ (Curve ABC)

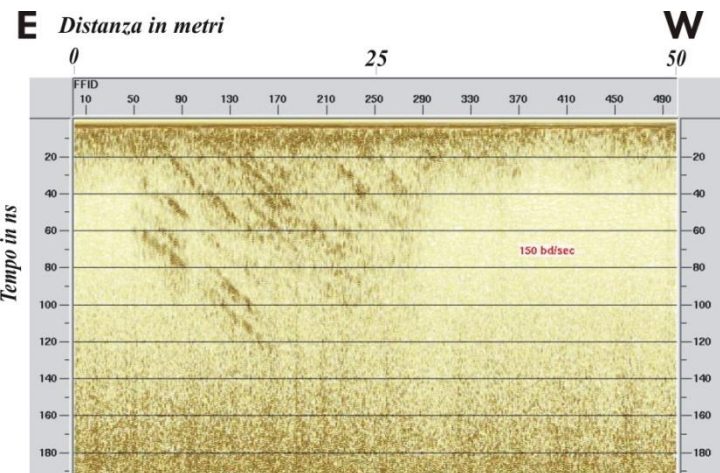
FACILE UTILIZZO, MA ALGORITMO SCOLLEGATO DAL DATO/NON TIENE CONTO DI VARIAZIONI LATERALI

5. Recupero di ampiezza (gain)

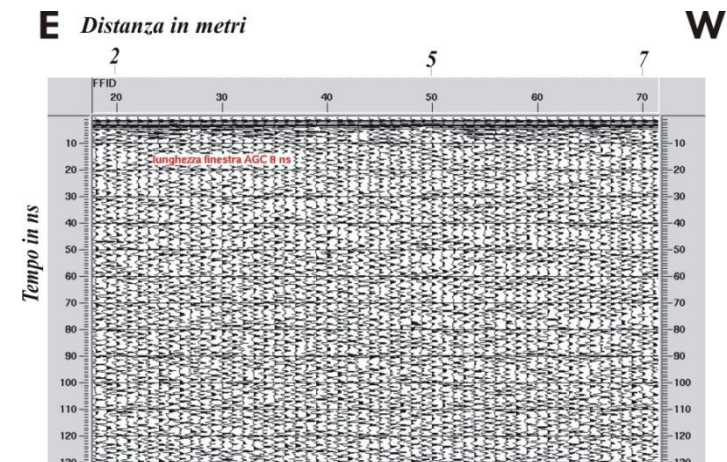
Approccio "true amplitude": si cercano di eliminare analiticamente TUTTI i fattori che concorrono all'attenuazione (Divergenza sferica, attenuazione intrinseca, riflessioni parziali) → ampiezza delle riflessioni dipendente **SOLAMENTE** dai parametri EM del sottosuolo.

MOLTO DIFFICILE DA OTTENERE/RICHIEDE CONOSCENZA ACCURATA DI VELOCITA', ATTENUAZIONE INTRINSECA,...

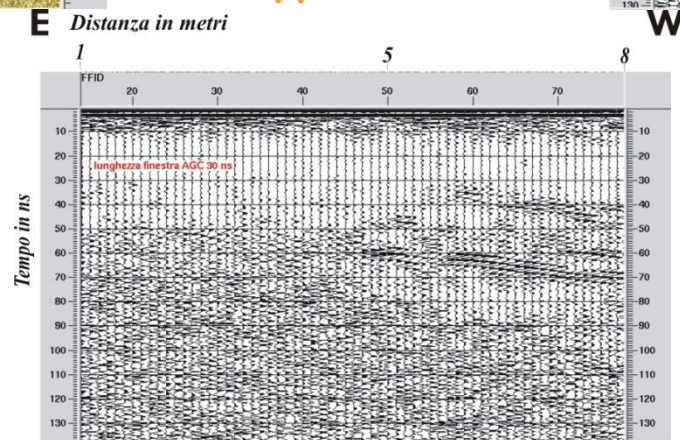
POSSIBILI ERRORI



Funzione che sovrastima l'ampiezza in profondità

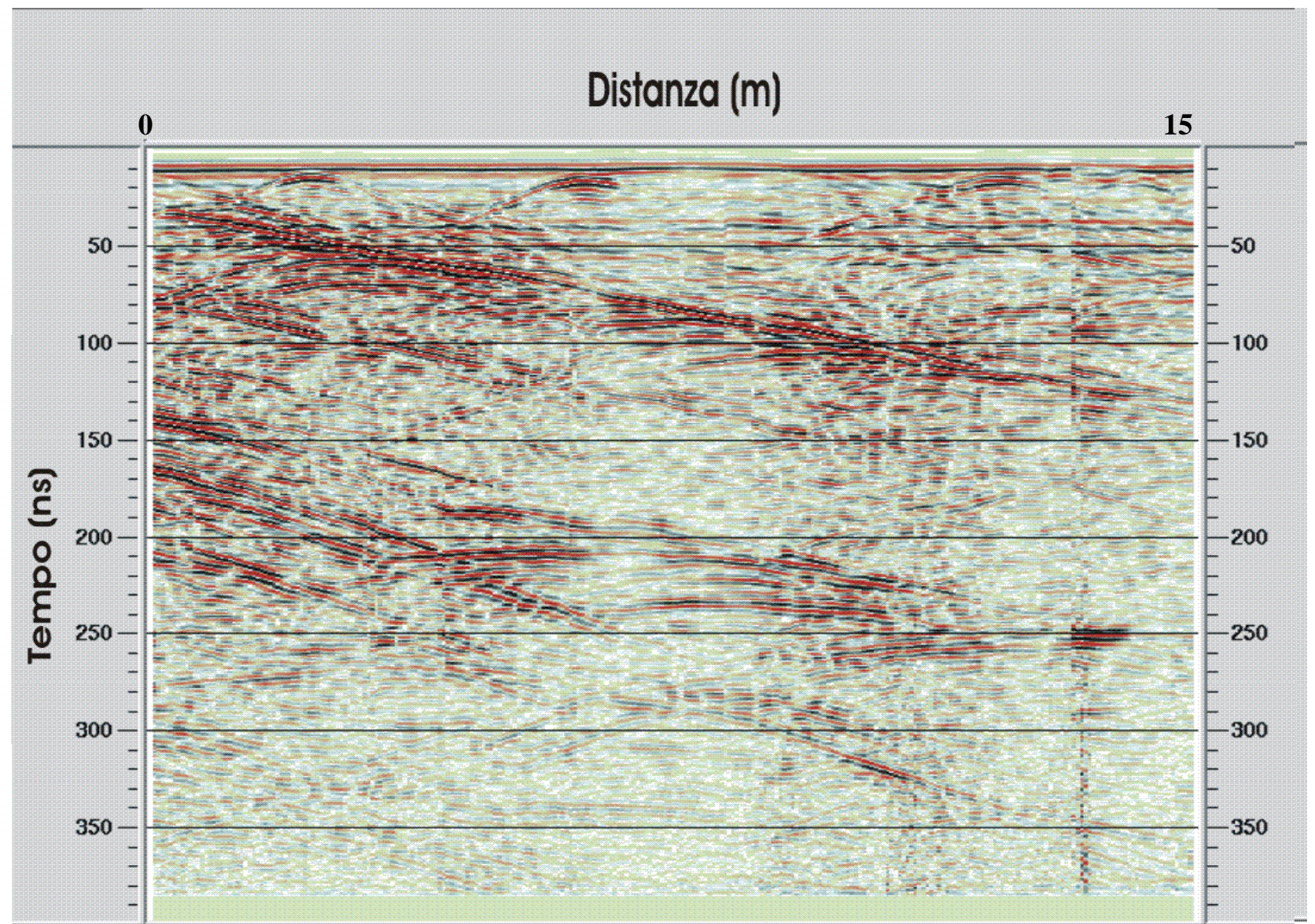


AGC con finestra troppo CORTA



5. Recupero di ampiezza (gain)

CORREZIONE PER LA DIVERGENZA SFERICA + dB/ns=COST



6. Rimozione rumori coerenti (background)^{UD3B}

Un rumore **COERENTE** è caratterizzato dalla sua regolarità/ripetitività/prevedibilità/ricorsività → **COERENZA**

Il rumore **INCOERENTE** o **CASUALE** è del tutto **RANDOM** ovvero **NON** prevedibile.

Spesso i dati **GPR** contengono rumori di origine strumentale

1. Componenti **DC** (o a bassissima frequenza → $< 1/10 f_c$)
2. **RINGING** → riverberazioni tra gli estremi dell'antenna ricevente che, ad intervalli di tempo regolari, diventa trasmittente secondaria. → presenza di rumori con frequenze simili a quelle del segnale e tempi di registrazione **COSTANTI**.

STRATEGIE DI RIMOZIONE (di base):

1. Filtri taglia basso nel dominio delle f

(Oppure, se rumore **REALMENTE DC**, calcolo del valore medio di ogni traccia e sottrazione di questo valore da **TUTTI** i campioni)

2. Filtraggi nel dominio del tempo basati sull'Ampiezza

Si calcola il valore medio entro finestre mobili estese "n" tracce ed "m" campioni e si sottrae tale valore dal campione "centrale" della finestra.

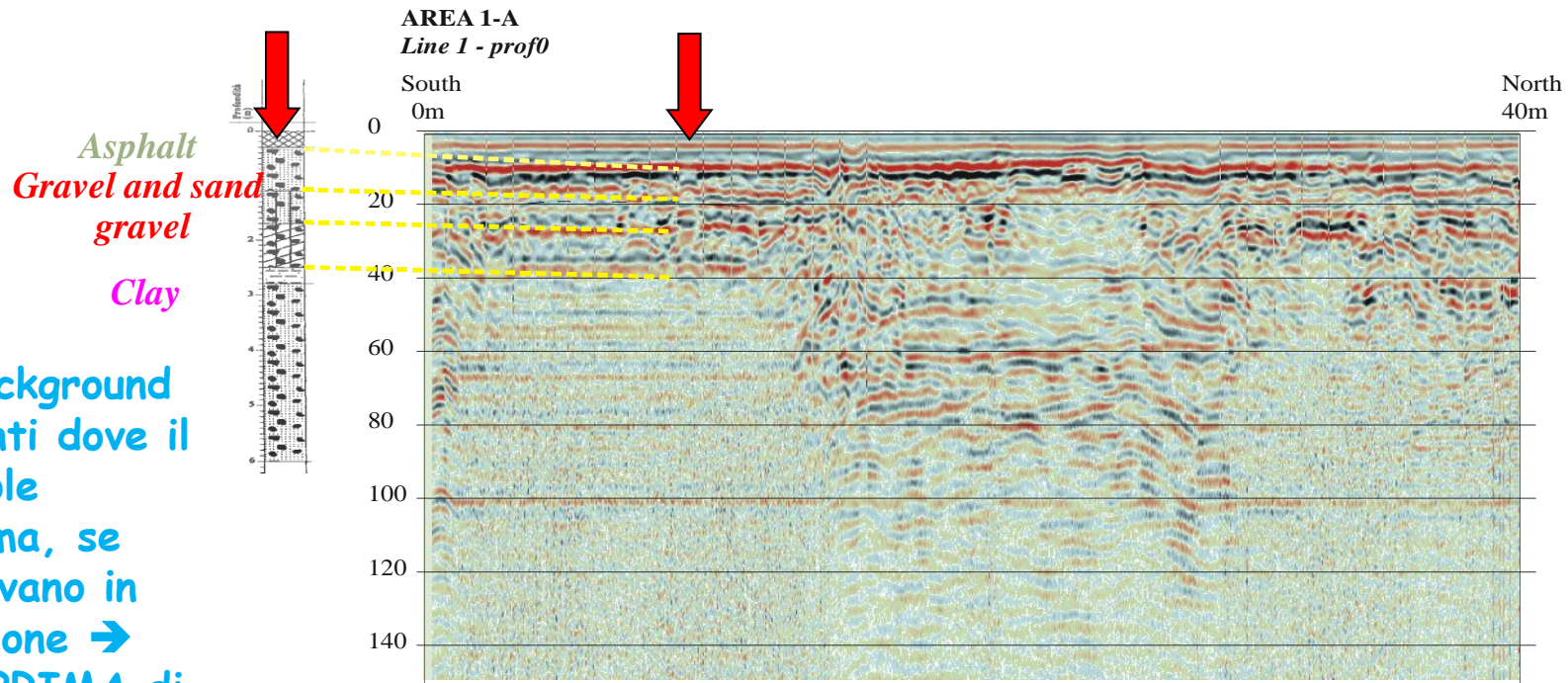
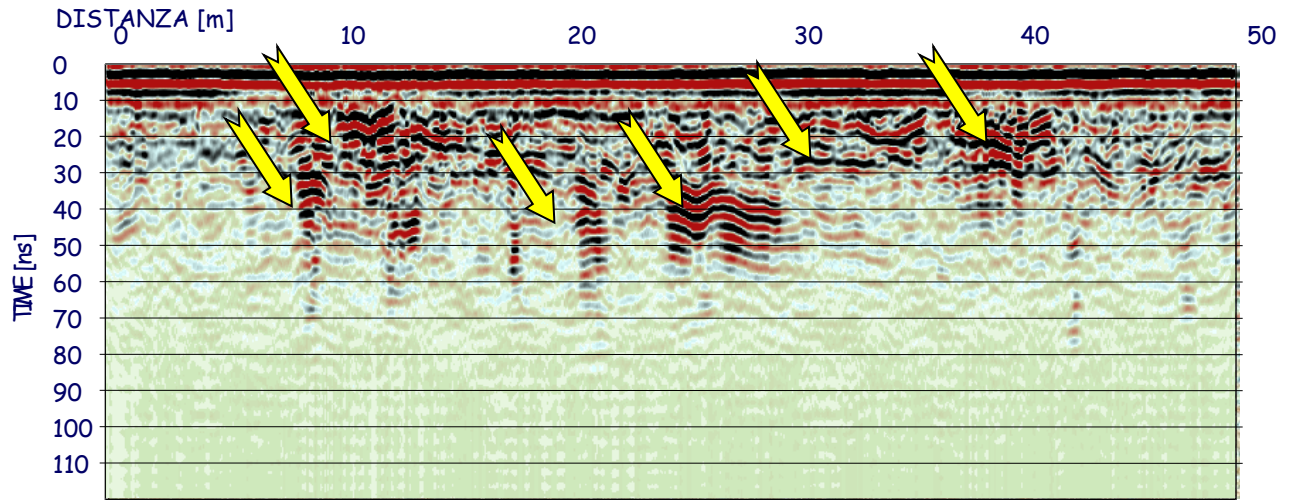
L'operazione si ripete per **TUTTI** i campioni.

PARAMETRI FONDAMENTALI:

- **NUMERO DI TRACCE** → Se troppo limitato rimozione erronea di segnali (sub)orizzontali, se troppo lungo inefficace
- **NUMERO DI CAMPIONI** → E' sufficiente un unico campione per rumori perfettamente coerenti, ma nella realtà è preferibile usare 3-9 campioni → media rispetto a t
- **COMPORAMENTO AI BORDI** → riduzione progressiva delle dimensioni finestra
 - → Estensione speculare profilo oltre limiti laterali ed inferiore

6. Rimozione rumori coerenti (background) ^{UD3B}

Sezione GPR dopo
L'attenuazione del
Rumore di background



I rumori di background sono più evidenti dove il segnale è debole (basso S/N), ma, se presenti si trovano in TUTTA la sezione → vanno rimossi PRIMA di variarne l'ampiezza (gain)

7. Analisi di Velocità su dati GPR

Ci sono varie tecniche proposte, le più accurate richiedono dati Multi Offset.

I risultati dipendono da:

- *Rapporto segnale/rumore;*
- *Presenza di riflessioni/diffrazioni;*
- *Contrasti delle proprietà elettromagnetiche.*

Misure di superficie

Dati Common Offset

- 1) **A- fitting di iperboli di diffrazione**
B- Hough transform
- 2) Calcolo diretto da dati indipendenti
- 3) Migration Velocity Scan
- 4) Analisi delle riflessioni dalla superficie

Misure in pozzo

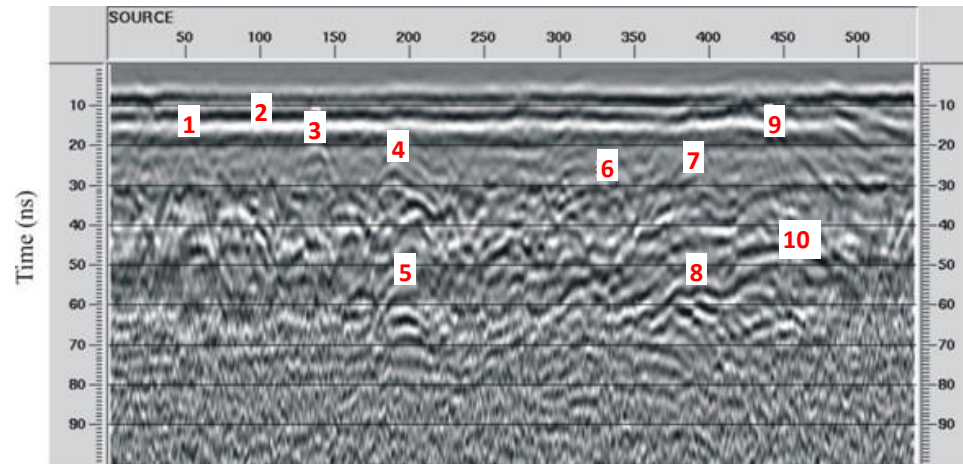
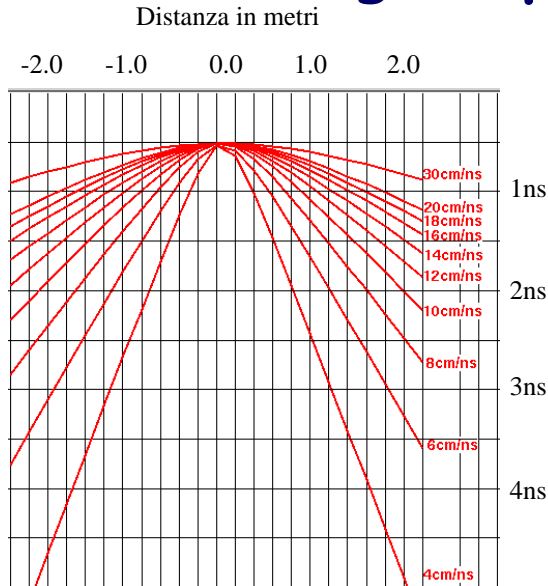
- 1) Profili a Offset costanti (Direct wave)
- 2) Profili ad Offset variabile (Tomography)
- 3) Vertical Radar Profiling (VRP)

Dati Multi Offset

- 1) Uso delle Ground Wave
- 2) Uso delle Rifrazioni
- 3) Uso delle Riflessioni
 - **Semblance/altre misure di coerenza**
 - **Fitting di iperboli di riflessione**
 - **CVG (Orizzontalizzazione del NMO)**
 - CVS (miglior risultato di stack)
 - Migrazioni Pre-stack → Common Image Gather
 - Common Reflection Surface (CRS)
 - Analisi della dispersione
 - Brewster angle Metodi misti (combinazione di alcuni dei precedenti)

7. Analisi di Velocità su dati GPR - SF

SF - Fitting di iperboli di diffrazione



Metodo rapido e semplice, ma:

- Effettiva presenza di diffrazioni (meglio se sovrapposte);
- Problemi per fenomeni di interferenza (con riflessioni o altre diffrazioni);
- Spesso non si tratta di diffrazioni pure, ma di riflessioni con fenomeni di diffrazione verso uno o entrambi i lati → possibili valutazioni erranee.

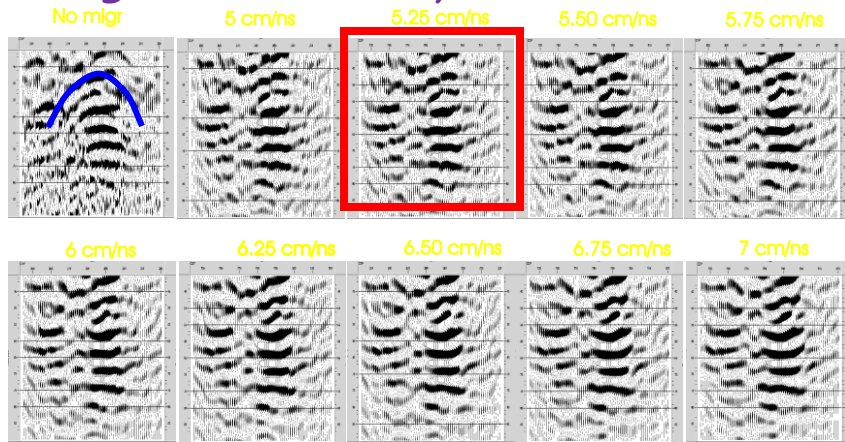
SF - "Migration Velocity Scan"

Si migra il profilo con velocità via via diverse e si valuta per quali valori si ha la migliore migrazione per ogni evento diffratto.

→ Soggettività/indeterminazione

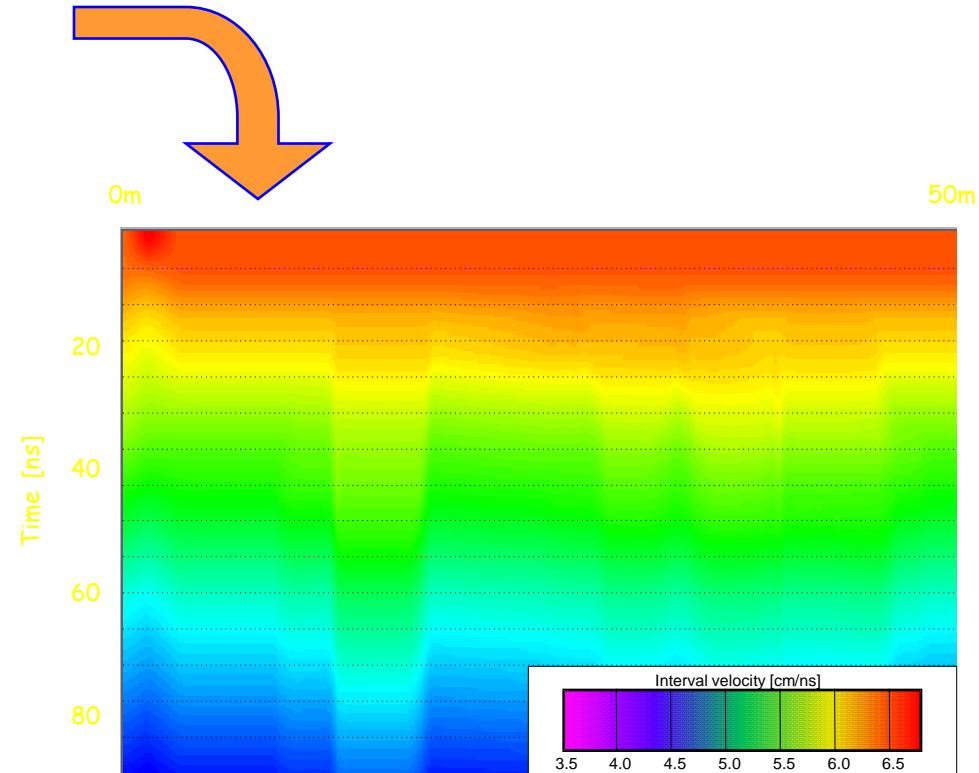
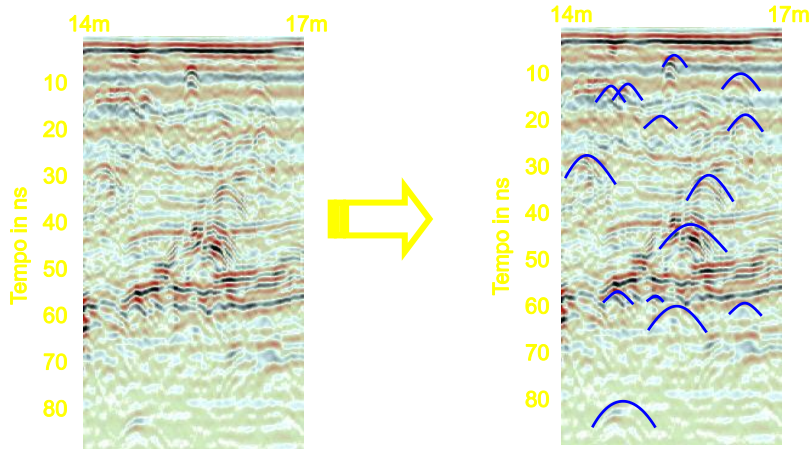
7. Analisi di Velocità su dati GPR - SF

Migration Velocity Scan



Analisi iperboli di diffrazione:

- Fitting diretto
- Fitting automatizzato (Hough Transform)



7. Analisi di Velocità su dati GPR

Correzioni dinamiche: che *velocità*?

Definizioni di velocità nell'analisi dei GPR (e sismici)

Velocità intervallare V_i = velocità di propagazione dell'onda sismica nell'
i-esimo strato

Velocità Root Mean Square (RMS) V_{rms} = velocità di propagazione
quadratica media dell'onda sismica in una serie di strati

Velocità di stack V_s = velocità che introdotta nella correzione di NMO
consente di ottenere la somma in fase ottimale degli arrivi riflessi

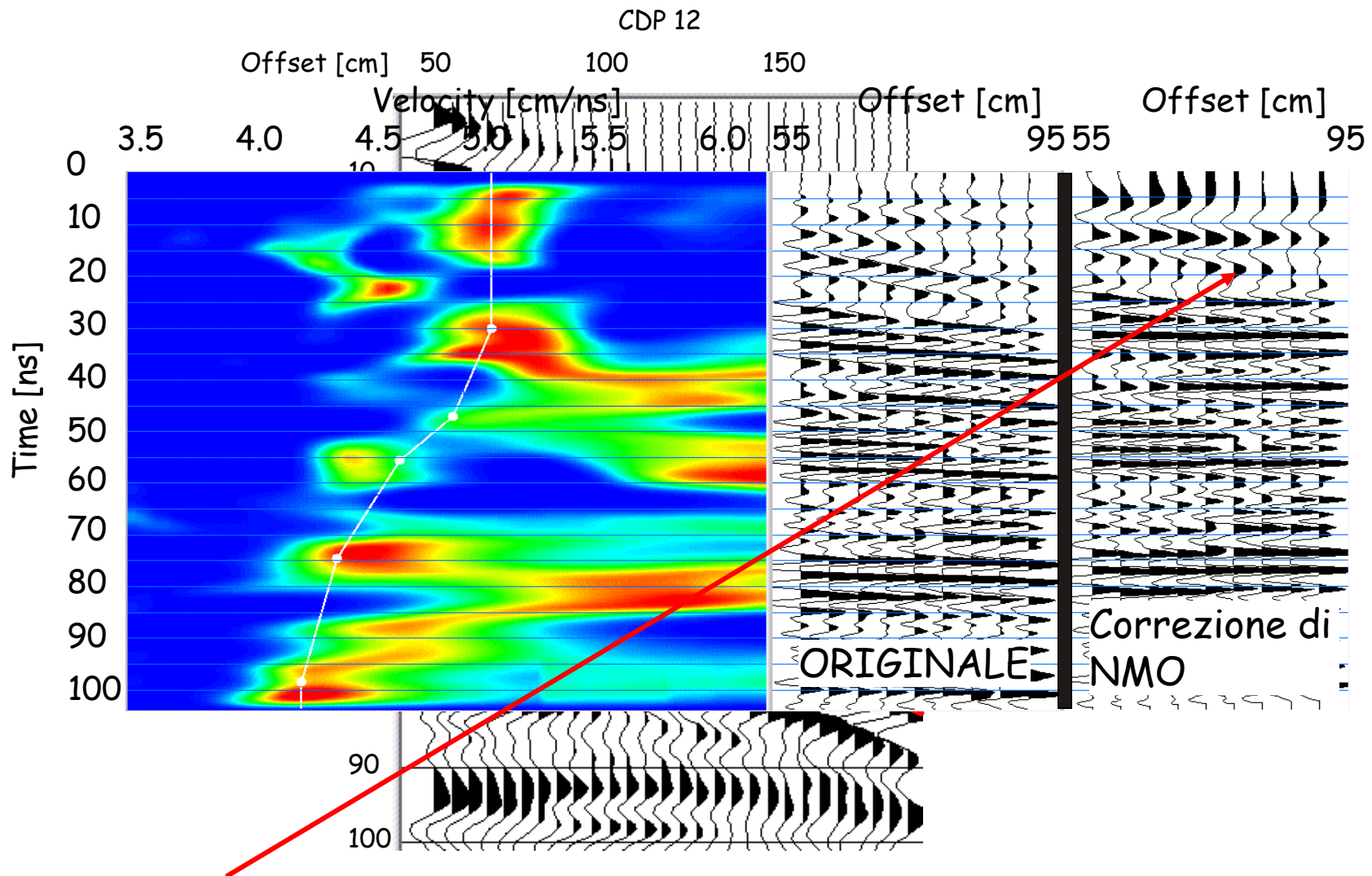
Velocità NMO V_{nmo} = velocità che entra nella definizione analitica del
ritardo di NMO

Velocità di migrazione V_m = velocità utilizzata per ricostruire la
corretta posizione spaziale degli eventi riflessi

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i v_i t_i^2}{\sum_i t_i}} \quad \text{con} \quad v_i = \sqrt{\frac{v_n^2 t_n - v_{n-1}^2 t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}}$$

7. Analisi di Velocità su dati GPR - MF

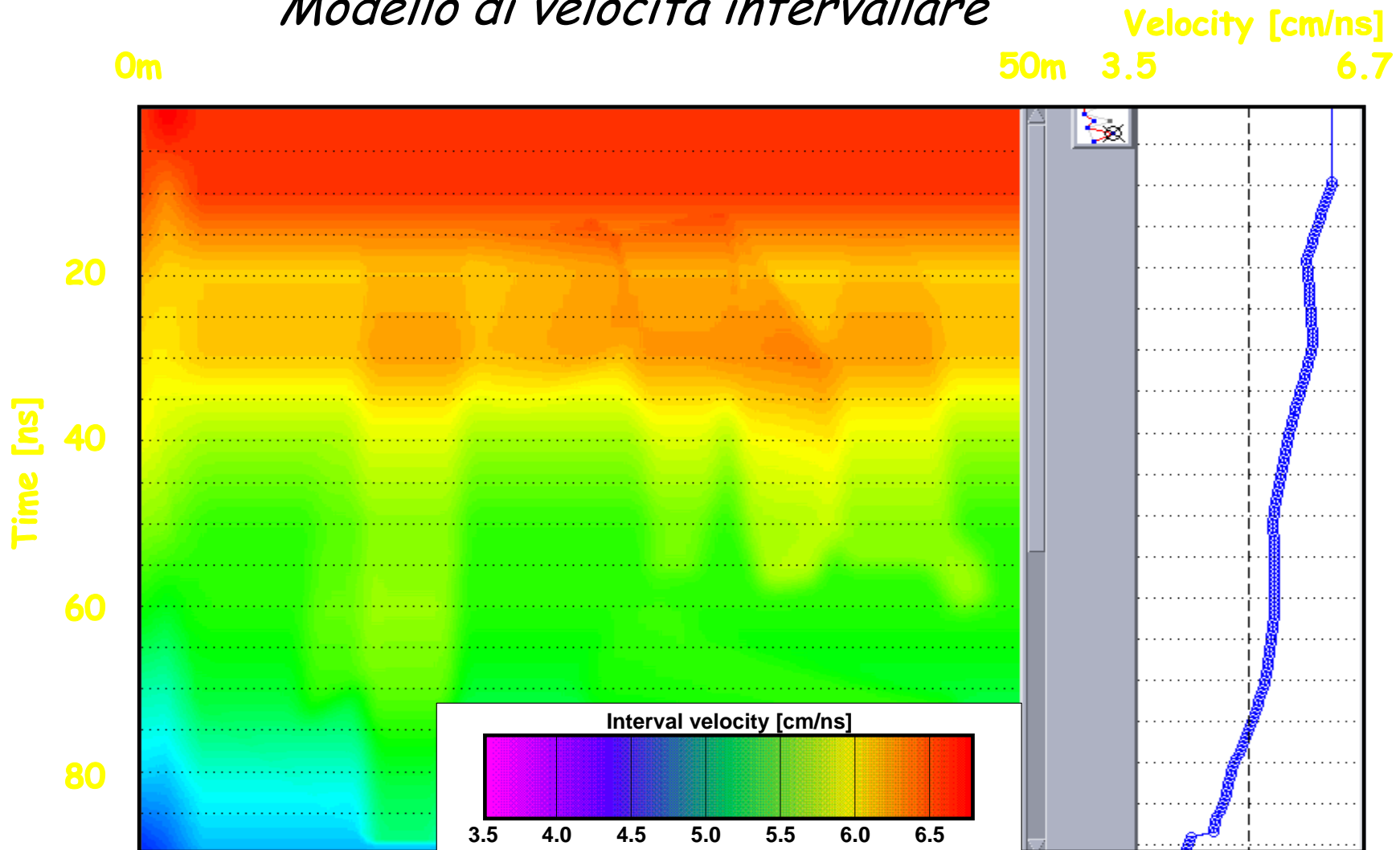
CMP ~~Diagramma~~ Velocità analysis



Stiramento dell'onda (stretching) soprattutto per piccoli tempi di arrivo, basse velocità e grandi offset

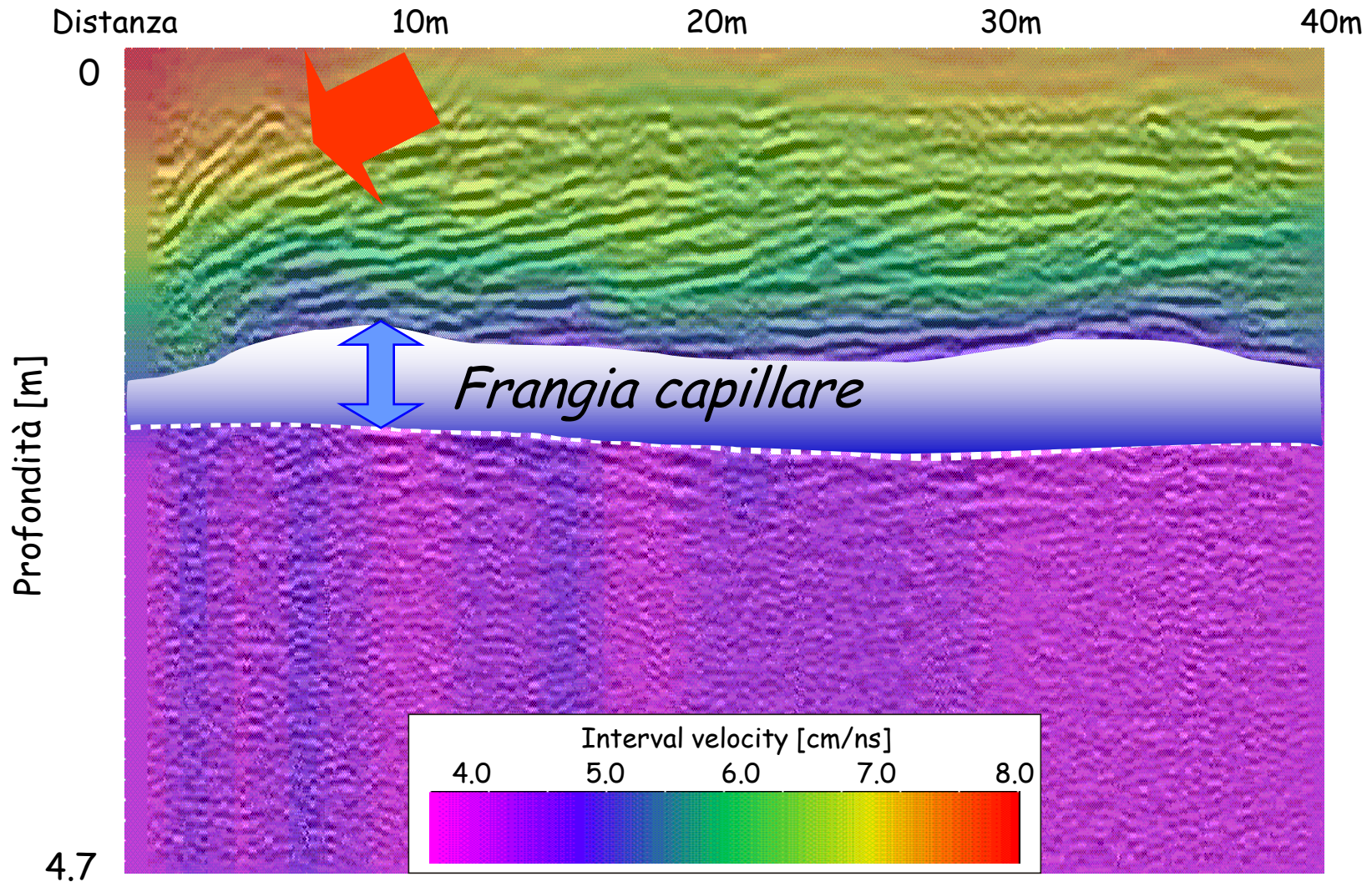
7. Analisi di Velocità su dati GPR - SF

Modello di velocità intervallare



7. Analisi di Velocità su dati GPR - SF

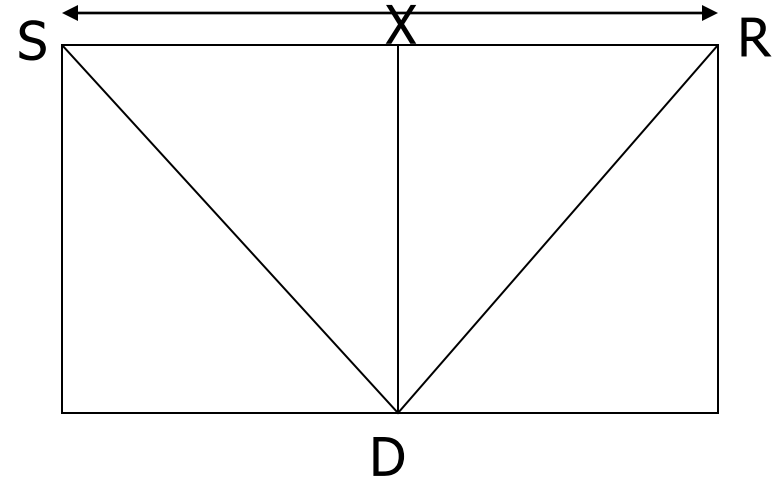
Utilizzo della velocità INTERVALLARE



8. Correzione di Normal Move Out - NMO

Velocita' di NMO e stack

Caso di riflettore singolo orizzontale



$$t_x = \frac{\overline{SD}}{V_0} + \frac{\overline{DR}}{V_0} = 2 \frac{\overline{SD}}{V_0} = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{V_0^2}}$$

$$\Delta T_{nmo} = t_x - t_0 = t_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{V_{nmo} t_0} \right)^2} - 1 \right]$$

8. Correzione di Normal Move Out - NMO

$$t_x^2 = c_0 + c_1x^2 + c_2x^4 + c_3x^6 + K$$

$$c_0 = t_0^2$$

$$c_1 = \frac{1}{V_{rms}^2}$$

$$V_{nmo} = V_{rms} \quad se \quad x \ll h$$

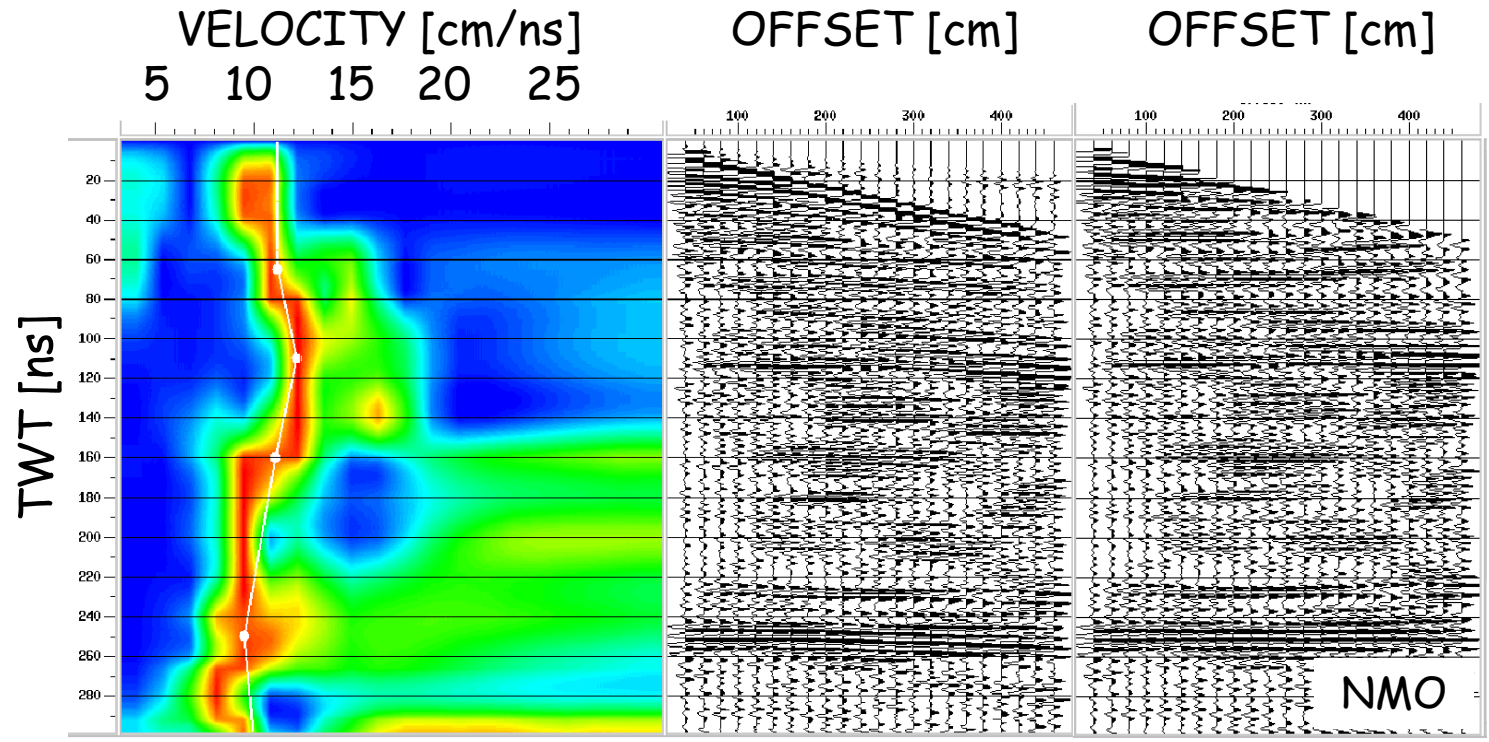
Velocita' di NMO e stack

Caso di riflettori multipli orizzontali

1 strato orizz.	V mezzo superiore
+ strati orizz.	V_{RMS} (Small spread approx.)
1 strato inclinato	V mezzo/ $\cos\alpha$
+ strati POCO incl.	V_{RMS} (Small spread + small dip approx.)
+ strati MOLTO incl..	Funzione complessa

Nel caso generale la V_{NMO} Dipende dalla situazione geologica

8. Correzione di Normal Move Out - NMO



Velocity dependence from layer dips and Presence of LATERAL and VERTICAL variations

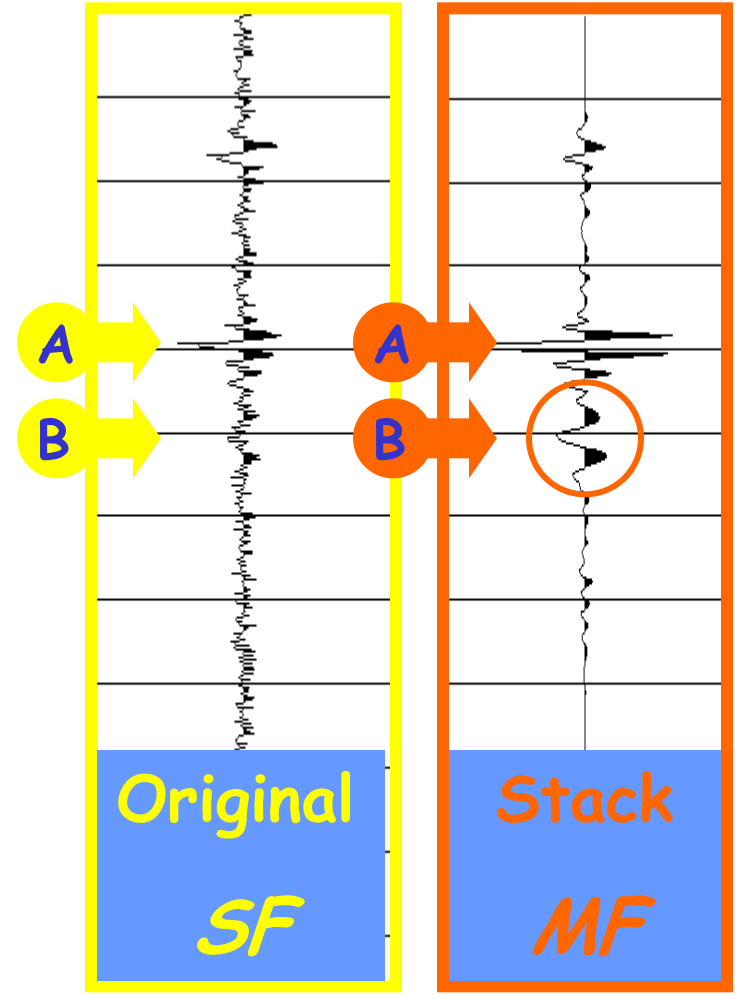
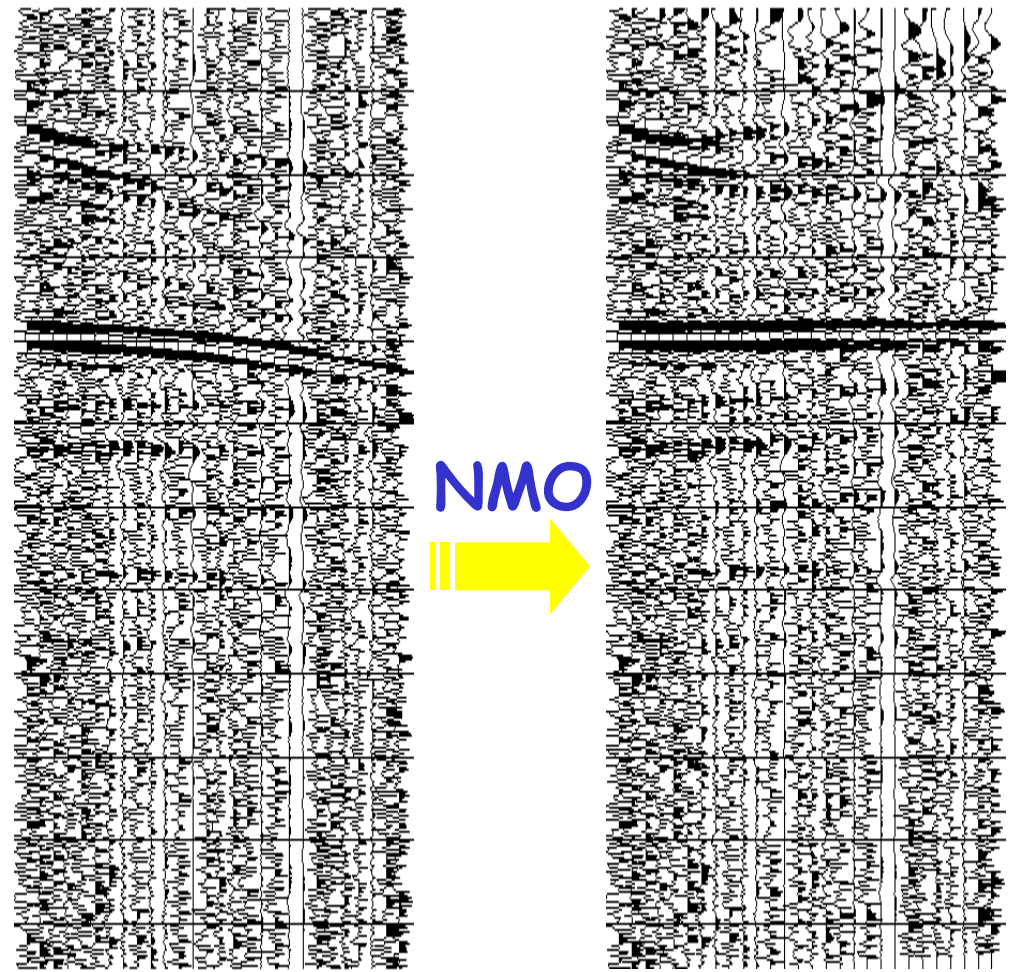
inhomogeneous materials

But also ... Azimuthal variations

anisotropic materials

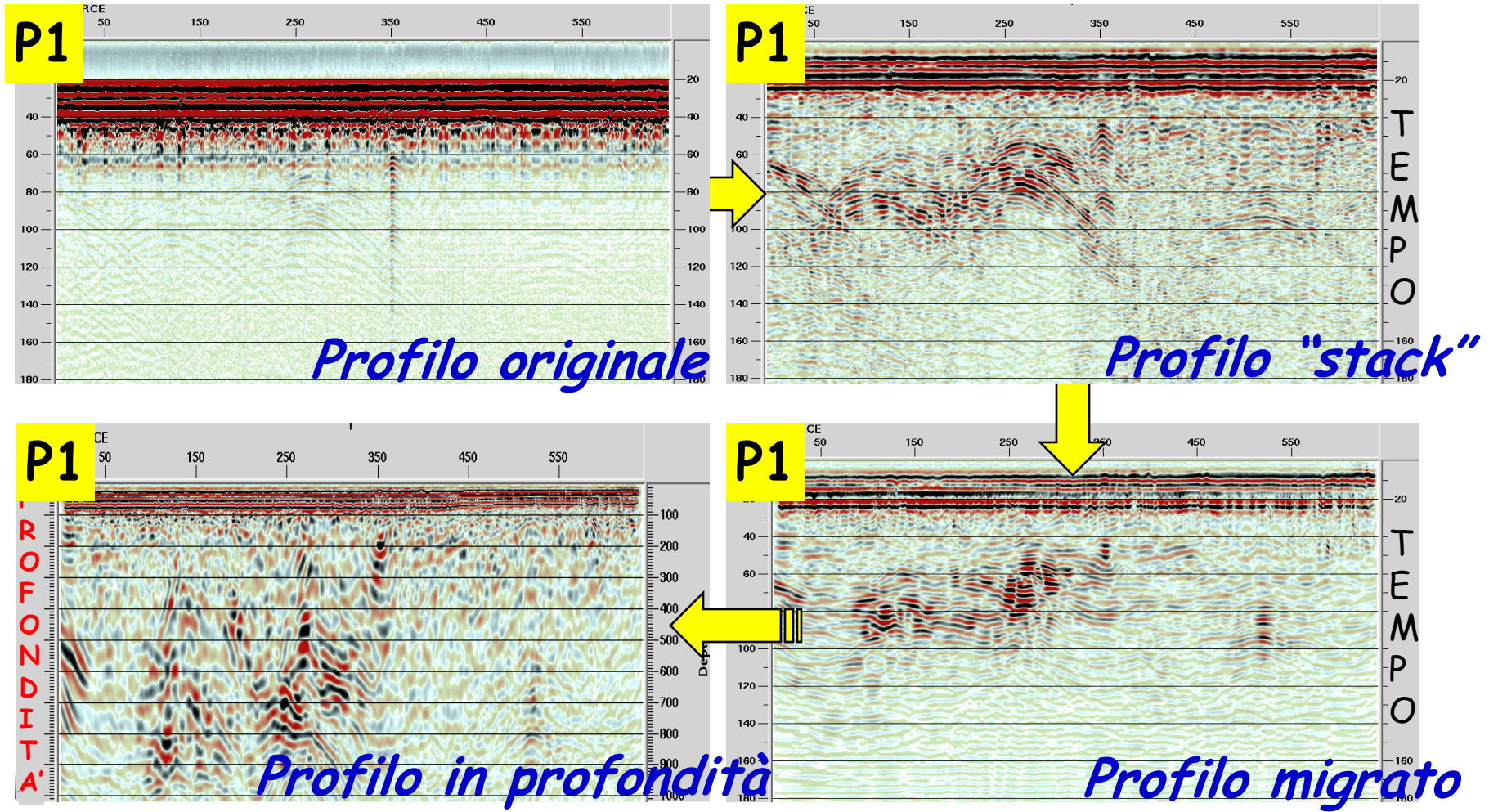
8. NMO e Stack

Rimozione del rumore → incremento S/N



Incremento teorico $S/N = \sqrt{n}$

8. Stack e 9. Migrazione



9. Migrazione

La **MIGRAZIONE** permette di ottenere la corretta ricostruzione geometrica del sottosuolo → Forme, profondità, limiti → **IMAGING**

MIGRAZIONE

$P(x, z=0, t) \rightarrow P(x, z, t=0)$

Dal campo d'onda registrato in superficie ($z=0$) si ricostruisce la riflettività nel sottosuolo ($t=0$)

Diffrazioni da un semi-piano

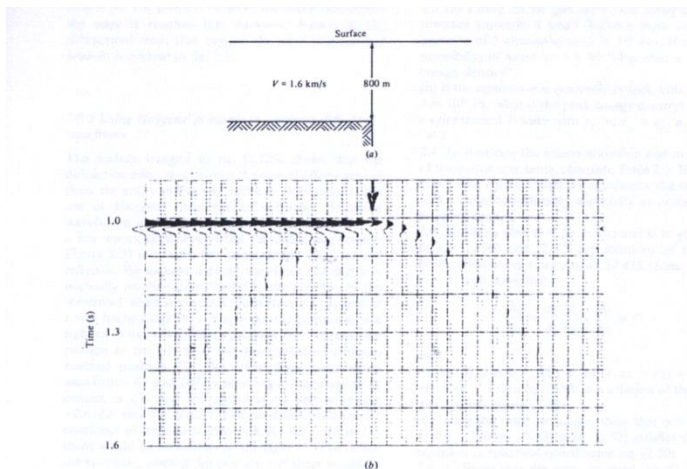
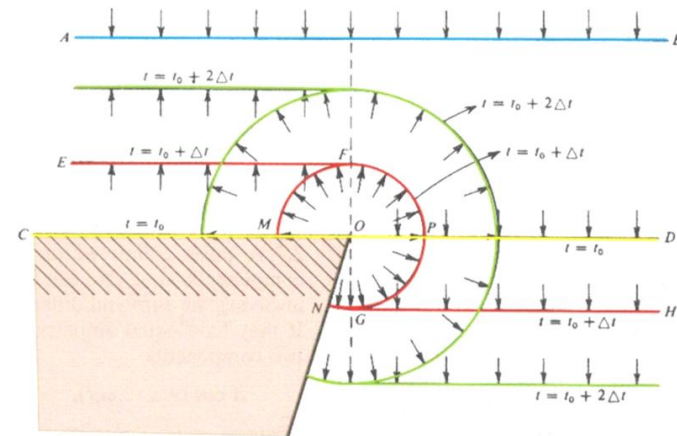


Fig. 2.32 Seismic response of a half-plane. (After Trolley, 1970.) (a) Model and (b) computed seismic record for coincident sources and geophones. The arrowhead indicates the location of the edge of the half-plane.

Diffrazioni da un piano fagliato



Il fronte dell'onda diffratta al tempo $t_0 + \Delta t$ sarà l'arco di cerchio MFPGN centrato in O, punto di diffrazione. L'onda diffratta che verrà registrata sarà MFP. Anche all'interno dello strato inferiore avremo un fronte d'onda sferico con raggio inversamente proporzionale alla velocità dello strato.

9. Migrazione

Esistono moltissimi algoritmi di migrazione che si basano su approcci ed approssimazioni diversi:

Migrazione alle differenze finite (phase shift)

Migrazione f-k (Stolt)

Wave equation (Kirchhoff)

Possibilità di applicazione:

2D, 3D

Pre-stack, Post-stack

tempo, profondità

Approssimazione 2D → La sezione da migrare NON contiene energia proveniente al di fuori del piano della sezione stessa

Approssimazione ZERO OFFSET → Le antenne T e R sono coincidenti

Situazioni piu' complesse per variazioni verticali e soprattutto LATERALI di velocità (molto comuni nel caso GPR)

Se velocità di migrazione $>$ di quella corretta → SOVRAMIGRAZIONE (SMILES) 

Se velocità di migrazione $<$ di quella corretta → Non completa FOCALIZZAZIONE energia diffratta e parziale imaging riflettori



9. Migrazione

2 problemi fondamentali:

Riflettori pendenti

- Variazioni laterali di velocità

Gli effetti di queste due diverse situazioni possono alterare anche pesantemente la corretta interpretazione dei dati.

Mentre per i riflettori pendenti (e conflicting dip) si hanno buoni risultati con la migrazione (in particolare 3D) anche in TEMPO, le variazioni laterali di velocità producono effetti correggibili attraverso l'applicazione della migrazione in PROFONDITA'.

9. Migrazione

Un riflettore inclinato sarà collocato in una posizione diversa rispetto alla sua posizione reale; saranno diversi anche la sua lunghezza e pendenza.

In figura, per semplicità, si considerano i raggi riflessi prodotti da una sorgente e registrati da un ricevitore ubicati nella stessa posizione (T1R1 in A, T2R2 in B)

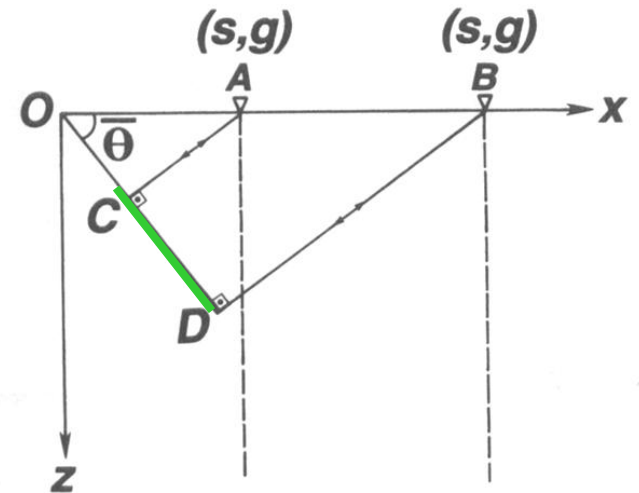
PRIMA

$$\tan \theta = \frac{\overline{BD'}}{\overline{OB}}$$

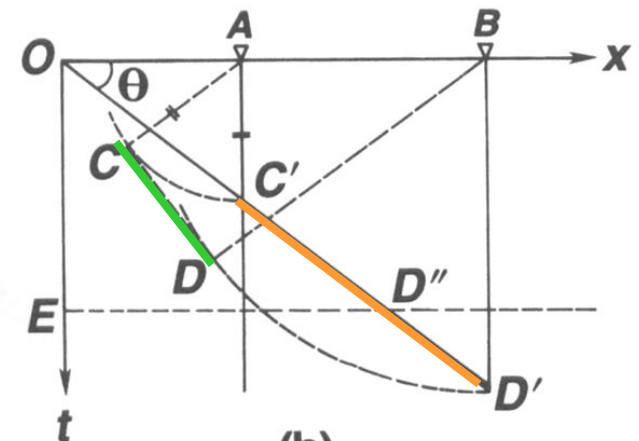
DOPO

$$\sin \bar{\theta} = \frac{\overline{BD}}{\overline{OB}}$$

$$\tan \theta = \sin \bar{\theta}$$



(a)

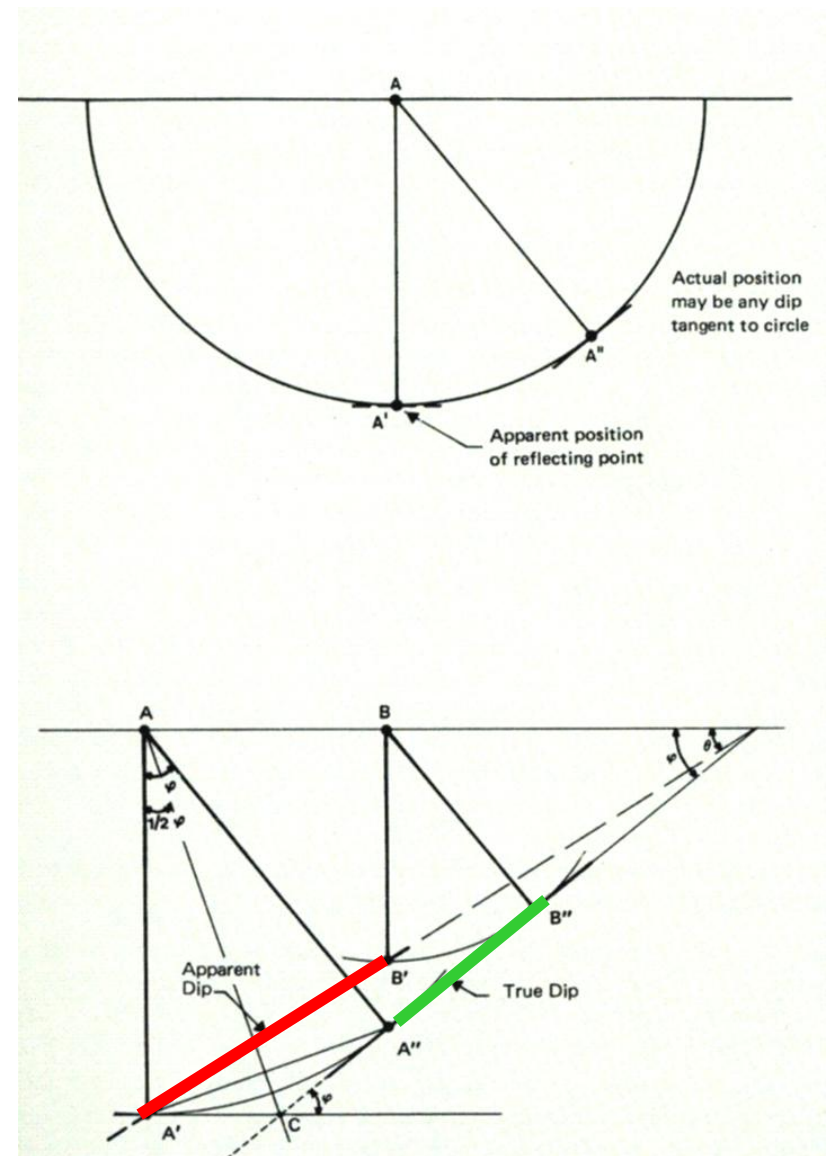


(b)

9. Migrazione

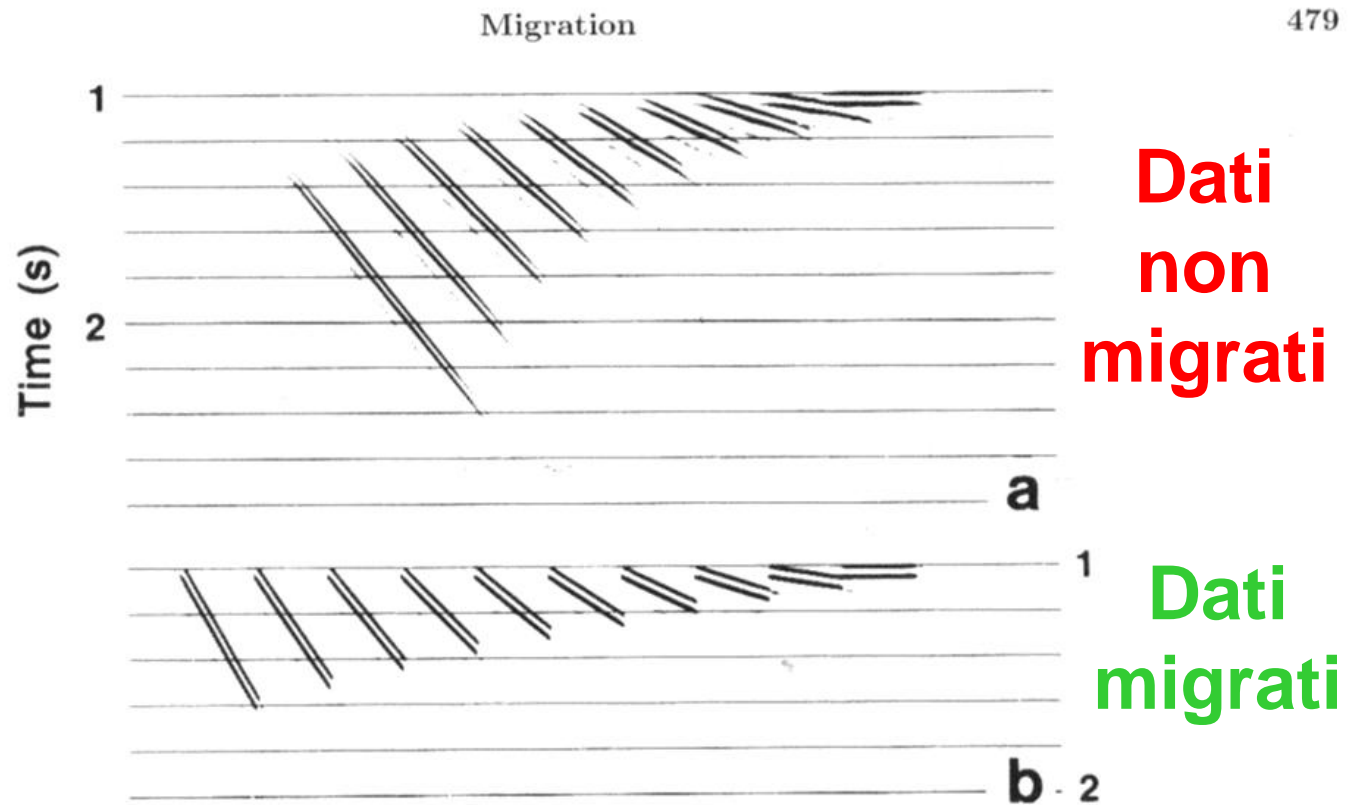
Quindi la migrazione:

1. Ricostruisce la **CORRETTA** pendenza dei riflettori (> di quella apparente)
2. Sposta i riflettori verso la superficie
3. Accorcia i riflettori
4. Focalizza l'energia delle iperboli di diffrazione nel punto (zona) che ha prodotto la diffrazione stessa



9. Migrazione

Esempio sintetico da modello con riflettori inclinati da 0 a 45° con *step* di 5°



Da Yimaz, 2001

9. Migrazione

Nel caso GPR importanza basilare della migrazione perché:

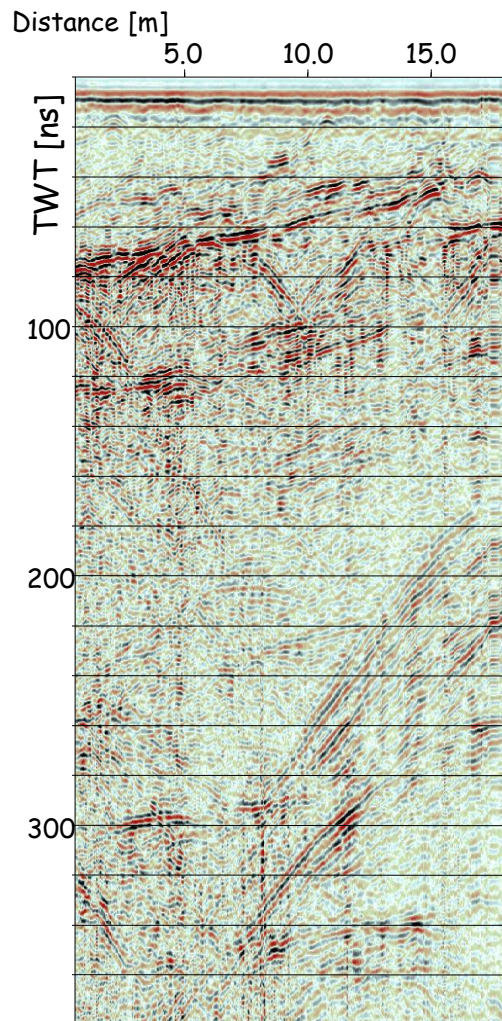
- STRUTTURE COMPLESSE con variazioni di inclinazione
- Variazioni verticali e laterali di velocità
- Scattering spesso presente (soprattutto per antenne ad alta frequenza → numerosi oggetti aventi dimensioni dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda dominante.

Tuttavia le iperboli di diffrazione costituiscono un ausilio in fase di interpretazione
→ utilizzo integrato di sezione NON MIGRATA e MIGRATA.

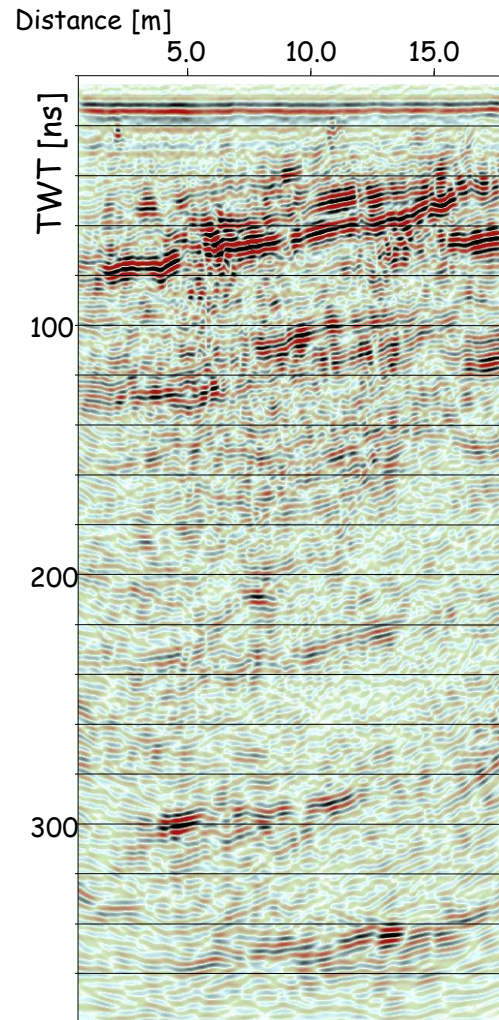
Problemi specifici legati a:

- DIFFICOLTA' NEL RICOSTRUIRE CORRETTAMENTE E CON SUFFICIENTE DETTAGLIO IL CAMPO DI VELOCITA' DELL'ONDA ELETTROMAGNETICA
- INTERFERENZA TRA DIFFRAZIONI DIVERSE E DIFFRAZIONI CON RIFLESSIONI
- EFFETTI DI BORDO (SOPRATTUTTO BOTTOM) MARCATI A CAUSA DELLA LIMITATA ESTENSIONE TEMPORALE DEI PROFILI (RISPETTO ALLA SISMICA)
- PRESENZA DI DIFFRAZIONI LEGATE A PROPAGAZIONI DI SEGNALI IN ARIA (SPECIE, MA NON SOLO, CON ANTENNE NON SCHERMATE)
- ARTEFATTI ED IMPRECISIONI DOVUTI ALLA TOPOGRAFIA, SPECIE SE MARCATA → LAYER STRIPPING E/O TOPOGRAPHIC MIGRATION (Lehmann e Green, 2000)

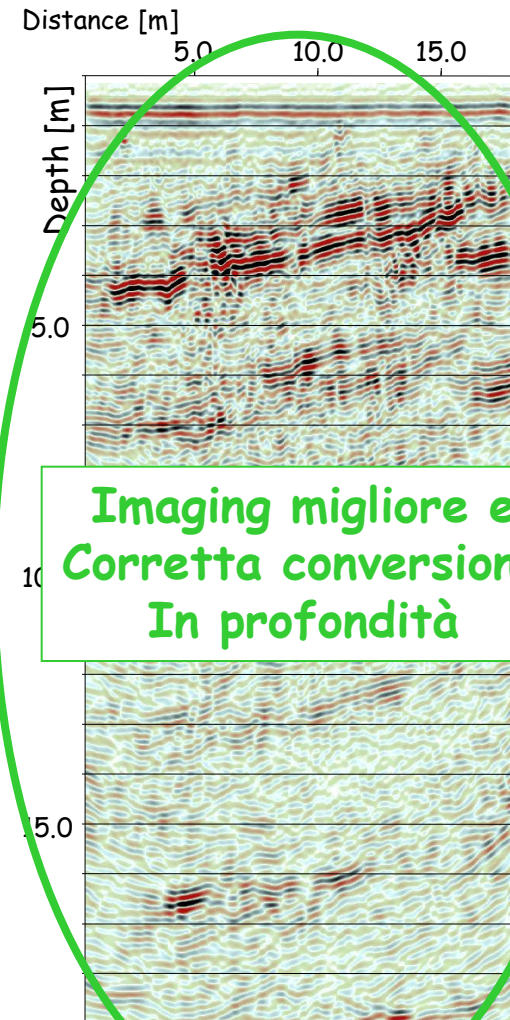
9. Migrazione: esempi di applicazione



Stack section

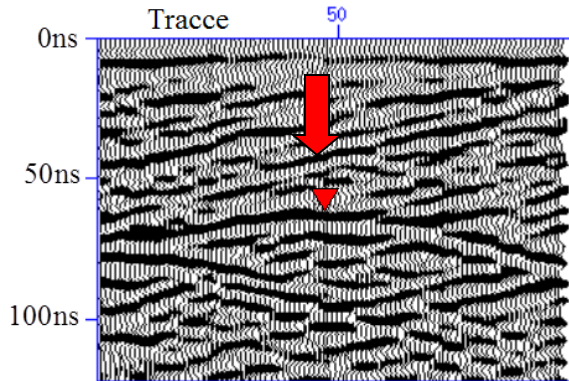


Pre stack
time migrated section

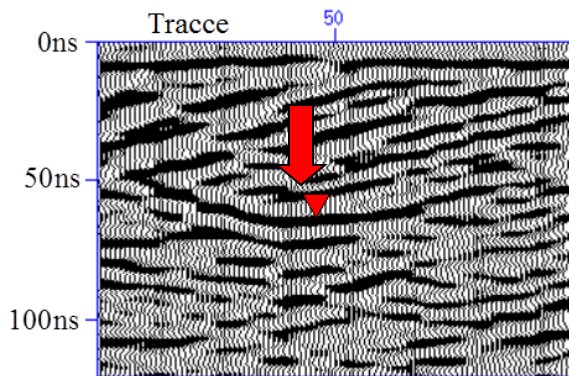


Pre stack
depth migrated section

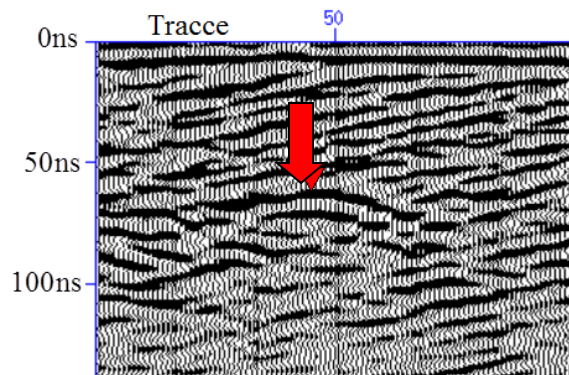
9. Migrazione: esempi di applicazione



**ESEMPIO DI
MIGRAZIONE IPERBOLE
DI DIFFRAZIONE**



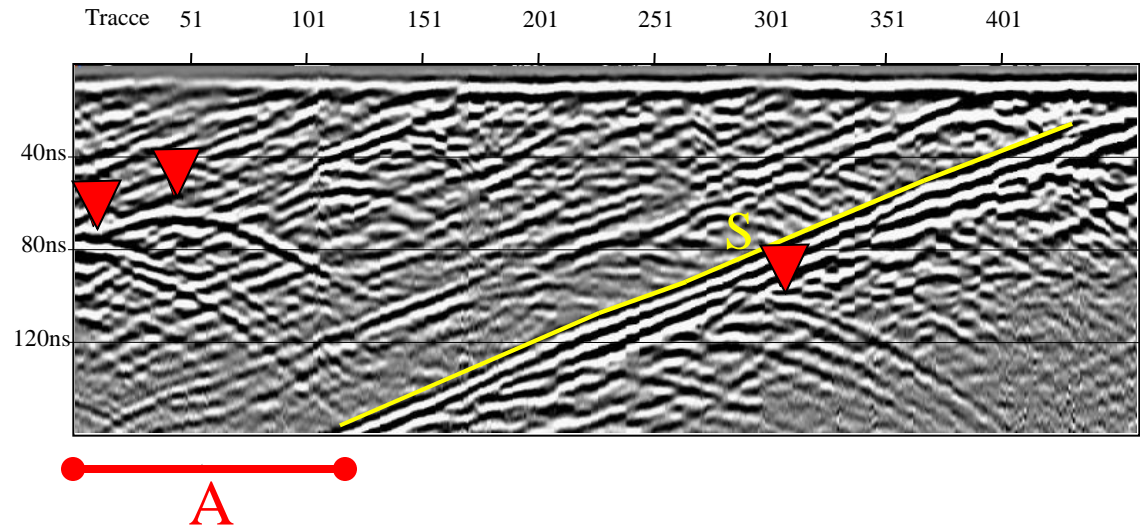
- SOVRAMIGRATA



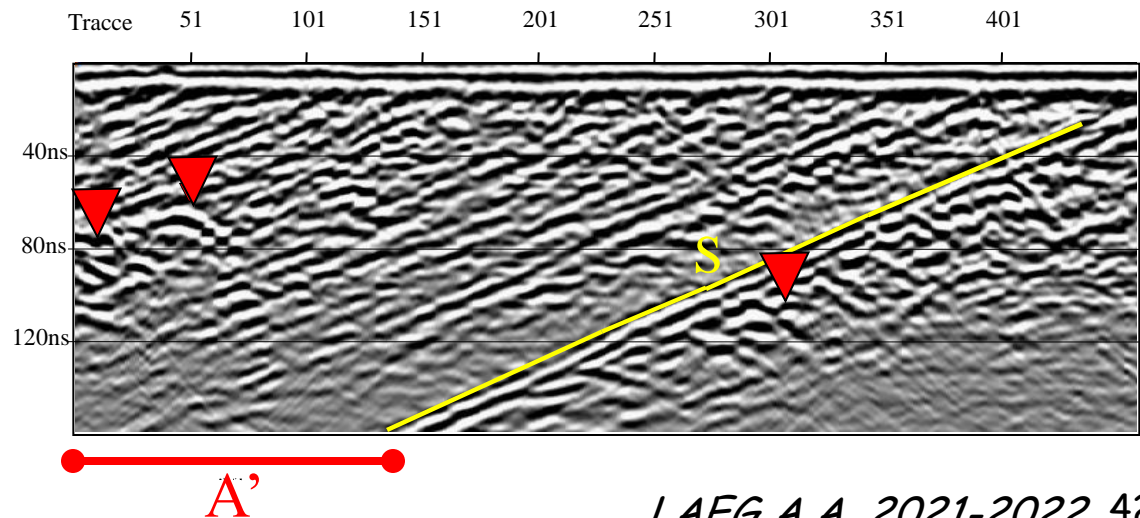
**- MIGRATA
CORRETTAMENTE**

9. Migrazione: esempi di applicazione

NON MIGRATA



MIGRATA



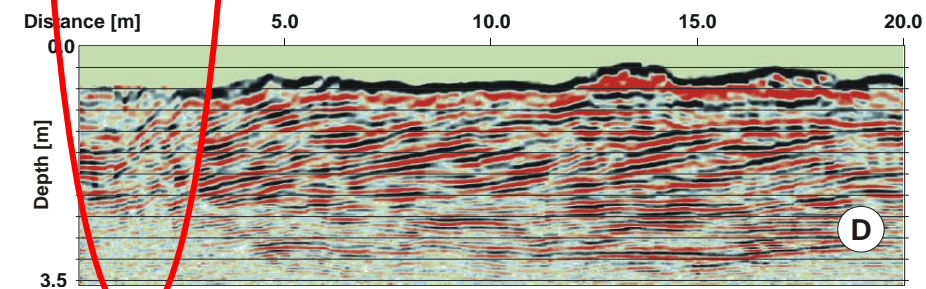
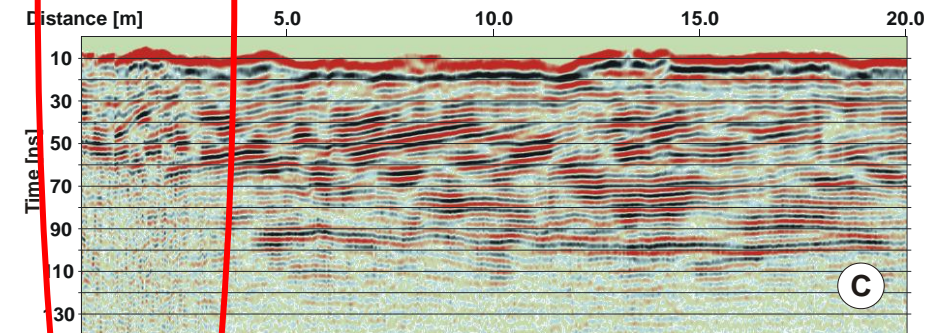
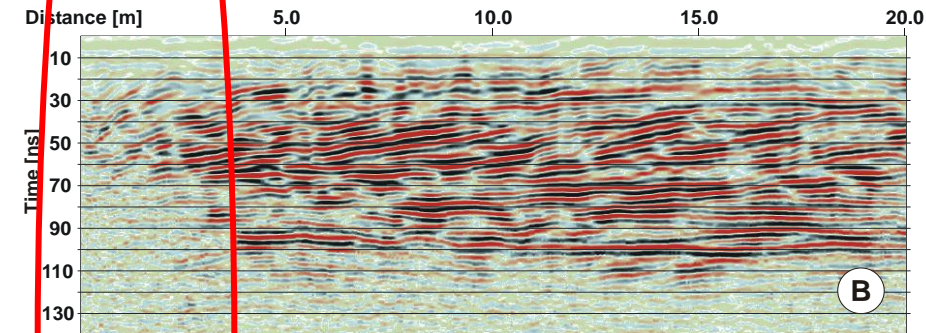
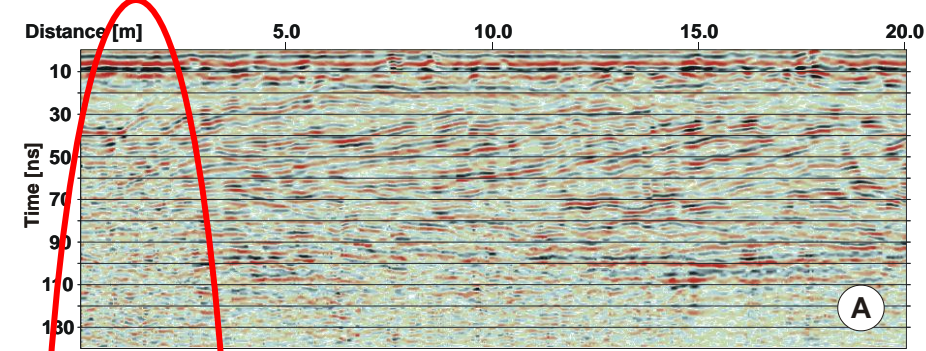
9. Migrazione: esempi di applicazione

Single Fold

MF → stack

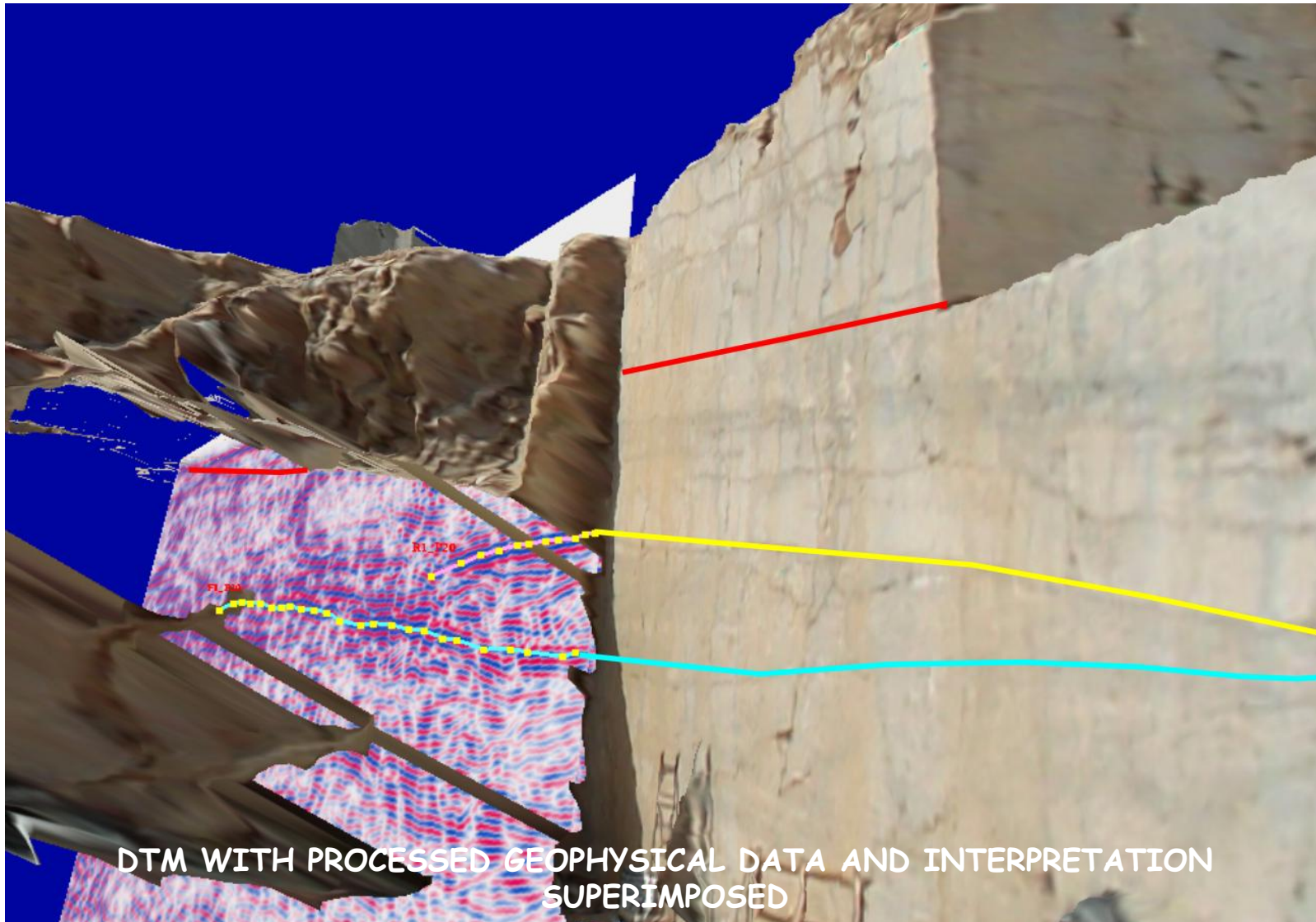
MF → Migrazione in tempo

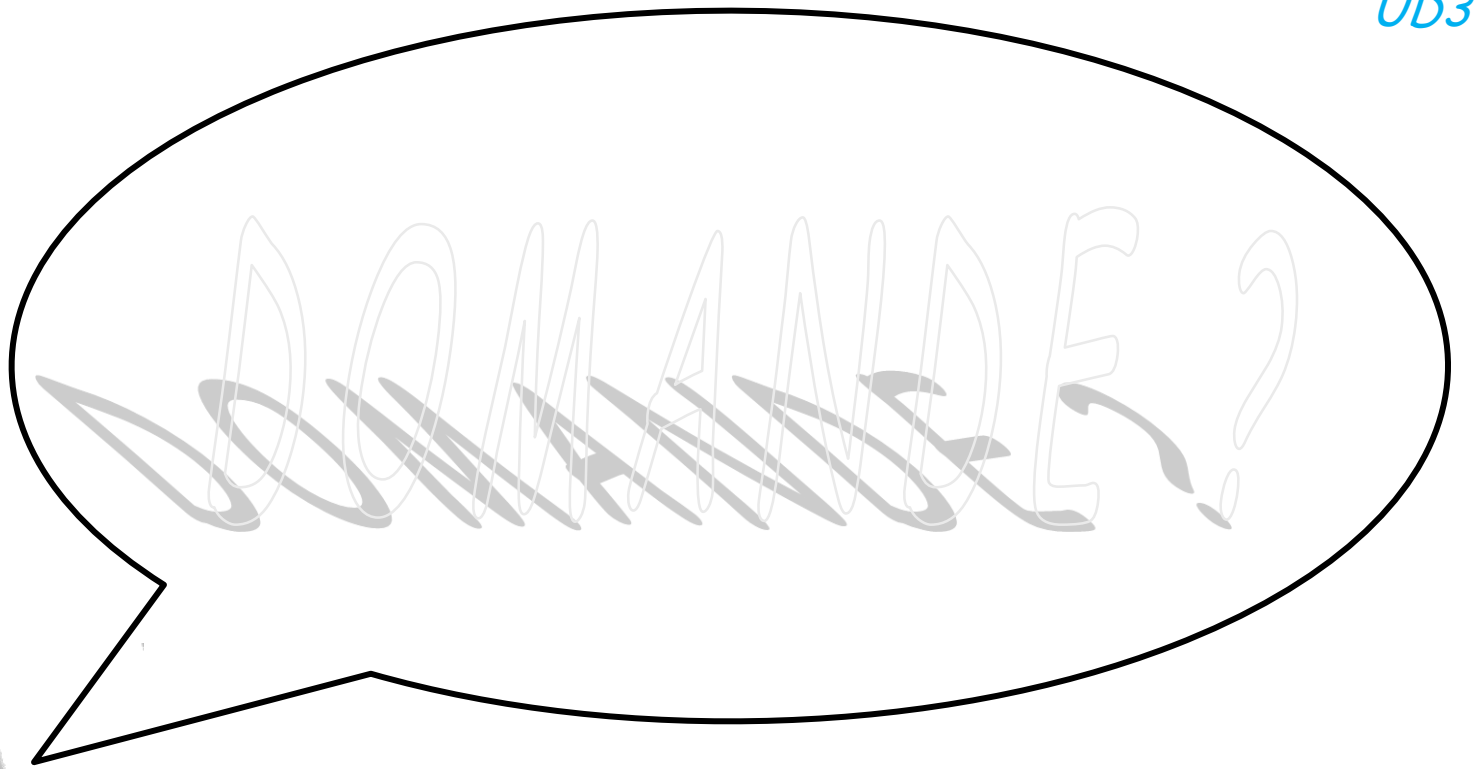
MF → Migrazione in profondità



Interpretazione e ricostruzione dettagliata delle strutture nel sottosuolo

ACQUISIZIONE → ELABORAZIONE/ANALISI/INTERPRETAZIONE





APPROFONDIMENTI

TRASFORMATA DI FOURIER (FT)

trattazione continua

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-i\omega t) dt \quad = \text{FT } x(t) \text{ con } x(t) \text{ funzione continua nella variabile } (t)$$

$$\text{SE } (t) = \text{tempo} \rightarrow \omega = 2\pi f$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad = \text{FT}^{-1}$$

$X(\omega)$ Nel caso generale è una variabile complessa che può essere espressa nella forma:

$$X(\omega) = A(\omega) \exp[i\varphi(\omega)]$$

$$A(\omega) = \text{spettro di ampiezza} = A(\omega) = \sqrt{X_r^2(\omega) + X_i^2(\omega)}$$

$$\varphi(\omega) = \text{spettro di fase} = \varphi(\omega) = \tan^{-1} X_i(\omega) / X_r(\omega)$$

$$X_r(\omega), X_i(\omega) = \text{parti Reale e Immaginaria della FT } X(\omega)$$

Da cui $X(\omega) = X_r(\omega) + iX_i(\omega)$ e, confrontando e considerando la notazione di Eulero per i complessi:

$$X_r(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega)$$

$$X_i(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega)$$

APPROFONDIMENTI

TRASFORMATA DI FOURIER (FT)

trattazione discreta

Una funzione discreta è una SERIE. Nel caso GPR/sismico consideriamo serie temporali ottenute digitalizzando funzioni continue (analogiche) secondo intervalli di tempo Δt costanti

Quando viene digitalizzata la funzione continua assume la forma: $x(t) \rightarrow x(T)$

Con $T = n\Delta t$

$$x(T) = \sum_k x_k \delta(t - k\Delta t) \quad k = 0,1,2,\dots$$

$\delta(t - k\Delta t)$ È la funzione chiamata "Delta di Dirac" e Δt è l'intervallo di campionamento

La FT in questo caso sarà: $X(\Omega) = \sum_k x_k \exp(-i\omega k\Delta t) \quad k = 0,1,2,\dots$

Se introduciamo una nuova variabile $z \rightarrow z = \exp(-i\omega\Delta t)$ avremo che:

$$X(z) = \sum_k x_k z^k = x_0 + x_1 z + x_2 z^2 + \dots$$

Il polinomio $X(z)$ è la z-trasformata della funzione originaria, ovvero della serie temporale $x(t)$

In piu' dimensioni

Per un generico campo d'onda in 2D (nel caso sismico t e x) $p(x,t)$ la sua FT sarà:

$$P(k_x \omega) = \iint p(x,t) \exp(ik_x x - i\omega t) dx dt \quad \text{E la FT}^{-1}:$$

$$p(x,t) = \iint P(k_x \omega) \exp(-ik_x x + i\omega t) dk_x d\omega$$

APPROFONDIMENTI

SHORT TIME FT

Nella STFT uno spettro tempo-frequenza viene calcolato all'interno di una predefinita finestra temporale che viene traslata nel tempo (Cohen, 1995).

Definire una certa lunghezza della finestra fissa la RISOLUZIONE in frequenza che si può ottenere.

Abbiamo già visto che:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-i\omega t) dt = \text{FT } x(t) \text{ con } x(t) \text{ funzione continua nella variabile } (t)$$

Se applicata ad un segnale sismico si ottiene il contenuto GLOBALE in frequenza (in cui le ampiezze max. hanno peso maggiore).

Per un segnale NON STAZIONARIO → variazione temporale → suddivisione del segnale in finestre (windowing) → FT su ogni finestra → STFT → contenuto in f LOCALE

La STFT si ottiene tramite prodotto scalare tra il segnale $f(t)$ ed una finestra che si sposta nel tempo $\varphi(\tau)$, ovvero:

$$STFT(\omega, \tau) = \langle f(t), \phi(t - \tau) e^{i\omega t} \rangle = \int f(t) \bar{\phi}(t - \tau) e^{-i\omega t} dt,$$

In cui la funzione finestra ϕ è centrata al tempo $t = \tau$ e $\bar{\phi}$ è il complesso coniugato di ϕ

Nel caso DISCRETO la scelta del campionamento Δt , del numero di campioni della finestra di analisi N e di conseguenza della sua lunghezza temporale T , condiziona la RISOLUZIONE:

f di Nyquist $f_{\max} = f_N = \frac{1}{2\Delta t} = \frac{N}{2T}$

Risoluzione in f $\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{f_s}{N}$ Con $f_s = \frac{1}{\Delta t} = \text{f di campionamento}$ Cioè: $T = n\Delta t$

$$f_{\min} = \frac{2}{N\Delta t} = \frac{2}{T}$$

APPROFONDIMENTI

SHORT TIME FT

La STFT è stata introdotta da A. Gabor nel 1940, per cui l'equazione:

$$S_f(\omega, \tau) = \int f(t) \bar{\varphi}(t - \tau) \exp(-i\omega t) dt$$

viene anche chiamata Trasformata di Gabor.

$\phi(t)$ è una funzione "finestra" scelta opportunamente e l'espressione:

$$g(t) = \varphi(t - \tau) \exp(-i\omega t)$$

Rappresenta le "funzioni di Gabor"

È richiesto inoltre che: $\int |g(t)|^2 dt = 1$ Principio di globalità

Lo Spettrogramma quindi è pari a: $|S_f(\omega, \tau)|^2$

SHORT TIME FT

La risoluzione dell'analisi è infatti limitata dal principio di indeterminazione o disuguaglianza di Heisenberg:

$$\Delta\omega \Delta t \geq \frac{1}{2}$$

Ovvero: una finestra di analisi lunga fornisce migliore risoluzione in f , ma scarsa in t ; viceversa una finestra corta buona risoluzione in t , ma scarsa in f .

In altre parole: un segnale **NON** può essere rappresentato su un piano tempo-frequenza come un punto, si può unicamente dire che la sua posizione è all'interno di un rettangolo.

RIASSUMENDO:

- La FT non è adatta per segnali non stazionari, cioè tempo varianti (come nel caso sismico o GPR)
- La FT fornisce una perfetta risoluzione in frequenza, ma una "globalità" nel tempo, ovvero non fornisce alcuna informazione **COME/DOVE** varia nel tempo il segnale sotto esame.
- La STFT è una soluzione adatta per l'analisi di segnali tempo-varianti, ma ha limiti di risoluzione in t ed f non superabili