



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

A.A. 2020-2021

*LABORATORIO DI ACQUISIZIONE  
ED ELABORAZIONE DATI GEOFISICI*

*UNITA' DIDATTICA 3a - UD3a*

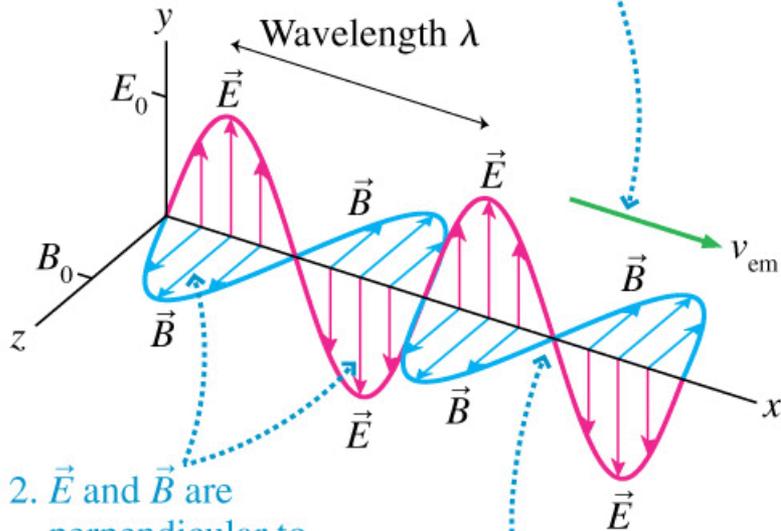
*GROUND PENETRATING RADAR - GPR*  
*Principi e Acquisizione dati*

# *SCHEMA UNITA' DIDATTICA*

- *Basi e principi fisici* (cenni sulle onde elettromagnetiche, antenne, velocità e attenuazione)
- *Strumentazione*
- *Acquisizione dati*: differenti modalità, scelta dei parametri, vantaggi e svantaggi delle diverse tecniche
- *SIMULAZIONE AL COMPUTER* (SW Geophysica)

# Onde elettromagnetiche

1. A sinusoidal wave with frequency  $f$  and wavelength  $\lambda$  travels with wave speed  $v_{em}$ .



2.  $\vec{E}$  and  $\vec{B}$  are perpendicular to each other and to the direction of travel. The fields have amplitudes  $E_0$  and  $B_0$ .

3.  $\vec{E}$  and  $\vec{B}$  are in phase. That is, they have matching crests, troughs, and zeros.

Onda piana (approssimazione valida in *far field*, ovvero sufficientemente lontano dalla sorgente) per onde che si propagano in direzione  $x$ .

$$E_x = 0; \quad E_y = E_0 \sin[2\pi(x/\lambda - ft)]; \quad E_z = 0;$$

$$B_x = 0; \quad B_y = 0; \quad B_z = B_0 \sin[2\pi(x/\lambda - ft)];$$

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E}{dt^2}$$

$$\frac{d^2 B}{dx^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 B}{dt^2}$$

Equaz. d'Onda E      Equaz. d'Onda B

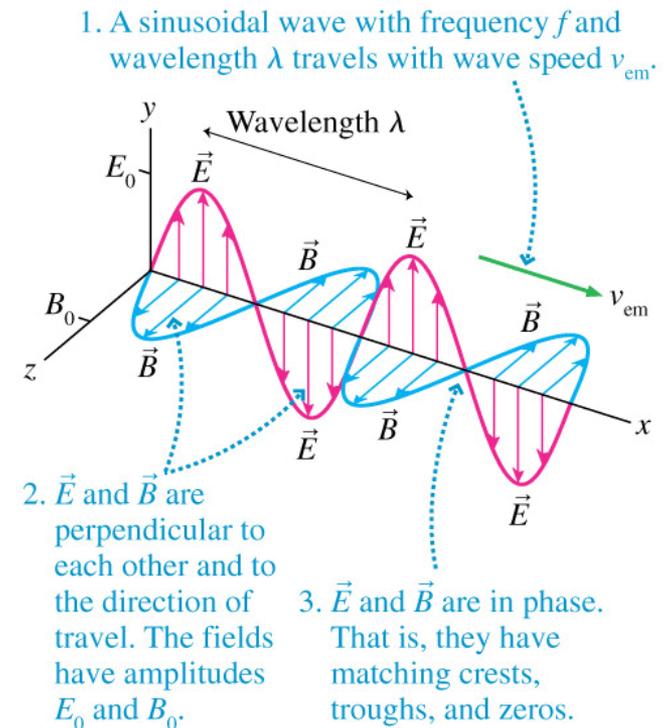
Questa trattazione puo' essere estesa a onde EM di forma qualsiasi e per qualsiasi materiale.

# Proprieta' delle onde EM

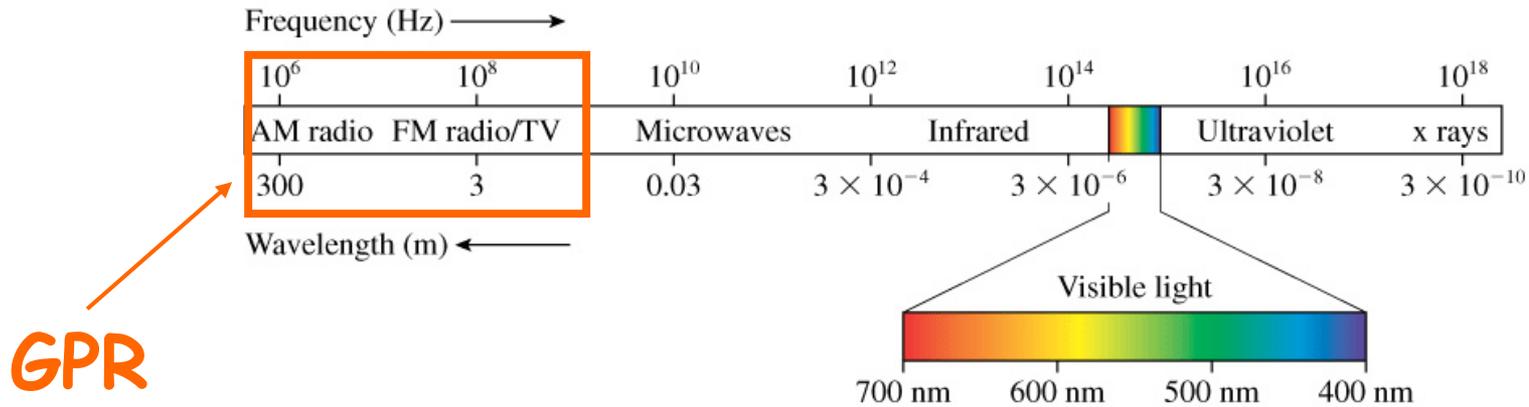
Si può dimostrare che le onde sinusoidali sono possibili soluzioni delle equazioni di Maxwell.

TUTTE le onde EM, sinusoidali o meno, soddisfano queste condizioni:

1. I campi  $\vec{E}$  and  $\vec{B}$  sono perpendicolari alla direzione di propagazione  $\underline{v}_{em}$  dell'onda. Pertanto, le onde EM sono *trasverse*.
2. I campi  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  sono perpendicolari l'un l'altro, cosicchè  $\vec{E} \times \vec{B}$  rappresenta la direzione di  $\underline{v}_{em}$ .
3. Nel vuoto l'onda EM ha una velocità pari a  $v_{em} = c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$
4. I campi sono tali per cui  $\vec{E} = c\vec{B}$  per ogni posizione dell'onda



# Velocità delle onde elettromagnetiche



$$\begin{aligned}
 v_{\text{EM wave}} &= \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \\
 &= \sqrt{\frac{(4\pi \times 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2)}{(4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2)}} \\
 &= 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \rightarrow \text{"c"} \\
 &\quad \text{(nel vuoto} \rightarrow \text{dielettrico perfetto)}
 \end{aligned}$$

# Velocità delle onde elettromagnetiche

In un mezzo NON CONDUTTIVO (e non dispersivo)

Essendo  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$  la "permeabilità magnetica relativa"

e  $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$  la "permittività elettrica relativa"

Avremo:

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_m \mu_m}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \cong \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

In un mezzo con perdite (cioè è CONDUTTIVO):

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r \mu_r}{2} \left[ \sqrt{1 + p^2} + 1 \right]}}$$

con  $p = \tan \delta = \frac{\sigma' + \omega \varepsilon''}{\omega \varepsilon' - \sigma''} \cong \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} + \frac{\sigma_{DC}}{\omega \varepsilon'}$

↑ perdite dipolari      ↑ perdite conduzione

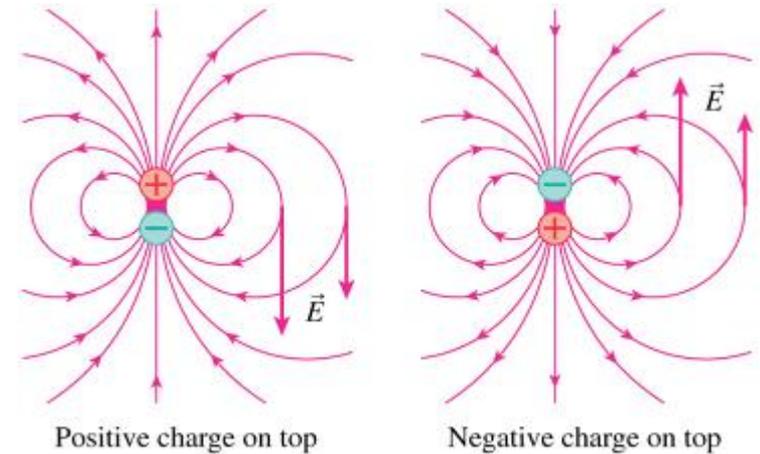
# trasmissione-ricezione delle onde EM

## ANTENNE

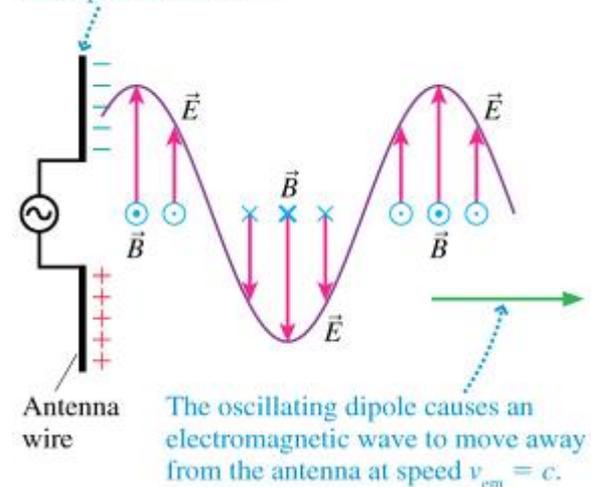
Un'onda EM può esistere indipendentemente dalla presenza di cariche e/o correnti, mentre una variazione di  $I$  (... e quindi movimento di cariche) è necessario alla **SORGENTE** dell'onda.

Il modo più semplice di generare un'onda EM è un dipolo oscillante avente un momento del dipolo  $p(t) = p_0 \cos(\omega t)$ . Il dipolo produce un campo elettrico alternato che provoca un campo magnetico. Questo dispositivo è un' **ANTENNA** dipolare.

Un altro sistema per produrre onde EM è far fluire corrente elettrica all'interno di una spira. Esistono moltissimi tipi di antenne con caratteristiche peculiari e diverse.



An oscillating voltage causes the dipole to oscillate.



# Parametri fondamentali del Ground Penetrating Radar (GPR) - CASI PIU' COMUNI

- Onde elettromagnetiche immesse nel terreno da un'antenna trasmittente (T) e captate in superficie da un'antenna ricevente (R)
- Intervallo di frequenze solitamente usato per prospezioni: tra 10 (limite di  $10^6$  Hz!) e 2500MHz (limite fenomeni di rilassamento dell'acqua)
- Sistemi Impulsivi Ultra Wide Band con larghezza di banda circa uguale alla frequenza centrale (nominale) delle antenne
- Sistemi bistatici ad offset fisso con un unico ricevitore (monocanale)
- Posizionamento e triggering a tempo, tramite odometri, GPS o sistemi ottici o laser.
- Intervallo spaziale di campionamento (distanza tra le tracce) tra 0.5 e 200 cm o oltre
- Profondità massima di investigazione estremamente variabile e inversamente proporzionale alla frequenza delle antenne utilizzate. In ogni caso fortemente dipendente dalle caratteristiche dei materiali

$$v = f\lambda$$

$$R_{\max} = \lambda / 4$$

- Risoluzione verticale direttamente proporzionale alla frequenza delle antenne utilizzate e inversamente proporzionale alla velocità dei mezzi. Ordine di grandezza: cm÷m.

# IL METODO GPR E', PER MOLTI VERSI, ANALOGO ALLA SISMICA A RIFLESSIONE

**AMPIEZZA** (intensità, energia) delle riflessioni

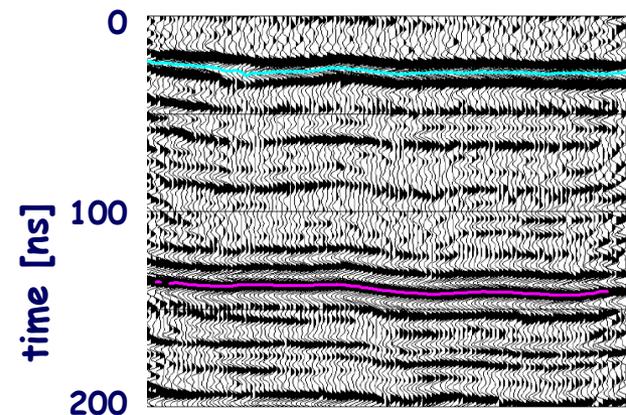
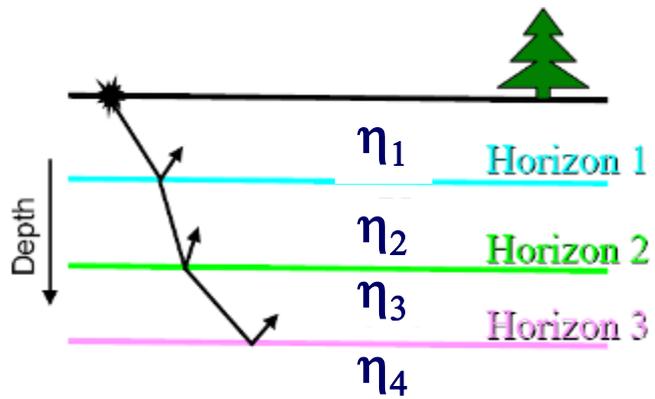
→ dipende dal contrasto di impedenza elettromagnetica ( $\eta \approx E/H$ )  
(e dal tipo/caratteristiche delle antenne, attenuazione)

**TEMPO** (profondità) delle riflessioni

→ dipende dalla conformazione geologica del sottosuolo

L'INTERPRETAZIONE si basa su ORIZZONTI intesi come:

- superfici che separano livelli diversi
- riflessioni da queste superfici



# Parametri fondamentali del Ground Penetrating Radar (GPR)

CHE COSA SI VEDE? → CONTRASTI DELLE PROPRIETA' ELETTRICITÀ NEL SOTTOSUOLO

Impedenza elettromagnetica intrinseca

$$\eta = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{-i\omega\mu}{\sigma - i\omega\epsilon}} \approx \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [ohm]$$

Coefficiente di Riflessione

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad \text{Per incidenza perpendicolare alla superficie}$$

$$R \approx \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad \text{E per mezzi a bassa conduttività}$$

# GPR- Principi

Importanza del contenuto d'acqua:

$\epsilon_w$  è 1 ordine di grandezza superiore rispetto  $\epsilon_{\text{mezzi geol}}$

$\epsilon$  condiziona la velocità di propagazione

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{In mezzi a basse perdite} \rightarrow \sigma < 1\text{mS/m}$$

$\rightarrow \epsilon$  condiziona la velocità  $\rightarrow$  RISOLUZIONE VERTICALE

Es.: Calcolare la RISOLUZIONE Vert. Per un calcare:  
 $\epsilon_r=9$ ,  $\sigma=1\text{mS/m}$ ,  $f=100\text{MHz}$

**Rmax=0.25m**

NOTA: Per lo stesso calcare, prospezione sismica  
 $v=300\text{m/s}$ ,  $f=300\text{Hz}$

**Rmax=0.25m**

MATERIAL	$\epsilon_r \rightarrow K$	$\sigma$ (mS/M)
Air	1	0
Distilled Water	80	0.01
Fresh Water	80	0.5
Sea Water	80	$3 \times 10^3$
Dry Sand	3-5	0.01
Saturated Sand	20-30	0.1-1.0
Limestone	4-8	0.5-2
Shales	5-15	1-100
Silts	5-30	1-100
Clays	5-40	2-1000
Granite	4-6	0.01-1
Dry Salt	5-6	0.01-1
Ice	3-4	0.01

# GPR- Principi

La profondità massima di investigazione dipende da molti fattori:

- **Attenuazione intrinseca del materiale ( $\alpha$ )**
- Frequenza centrale antenna
- (energia irradiata - pattern di radiazione)

Depth (m)	Center Frequency (MHz)
0.5	1000
1.0	500
2.0	200
7.0	100
10.0	50
30.0	25
50.0	10

indicativamente

L'attenuazione globale ( $\alpha t$ ) che un'onda elettromagnetica subisce dipende da:

- Perdite per spreading geometrico (divergenza sferica)
- Accoppiamento antenna-terreno
- Riflessioni parziali
- Perdite dovute a scattering (diffrazioni)
- Efficienza del sistema/ripetitività
- **ATTENUAZIONE INTRINSECA**

R  
A  
D  
A  
R  
E  
Q.

MATERIAL	$\epsilon_r \rightarrow K$	$\sigma$ (mS/M)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB/m)
Air	1	0	0.30	0
Distilled Water	80	0.01	0.033	$2 \times 10^{-3}$
Fresh Water	80	0.5	0.033	0.1
Sea Water	80	$3 \times 10^3$	.01	$10^3$
Dry Sand	3-5	0.01	0.15	0.01
Saturated Sand	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Limestone	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Shales	5-15	1-100	0.09	1-100
Silts	5-30	1-100	0.07	1-100
Clays	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granite	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Dry Salt	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Ice	3-4	0.01	0.16	0.01

# GPR- Principi

Attenuazione intrinseca del materiale:

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{\sigma}{2}$$

$\varepsilon_r$  può variare al max di un fattore 10

$\mu_r$  è  $\approx 1$  per la maggior parte dei materiali geologici

$\sigma$  può variare di **vari ordini di grandezza**

→ L'ATTENUAZIONE dipende essenzialmente dalla **CONDUTTIVITA'**

La profondità di penetrazione della radiazione EM decresce nettamente all'aumentare della conduttività.

Per materiali con  $\alpha > 30-40$  dB/m ( $\sigma \approx 100$  mS/m) la max profondità di investigazione non è superiore a 1-2 metri

L'attenuazione globale ( $\alpha$ ) è proporzionale a  $1/f$

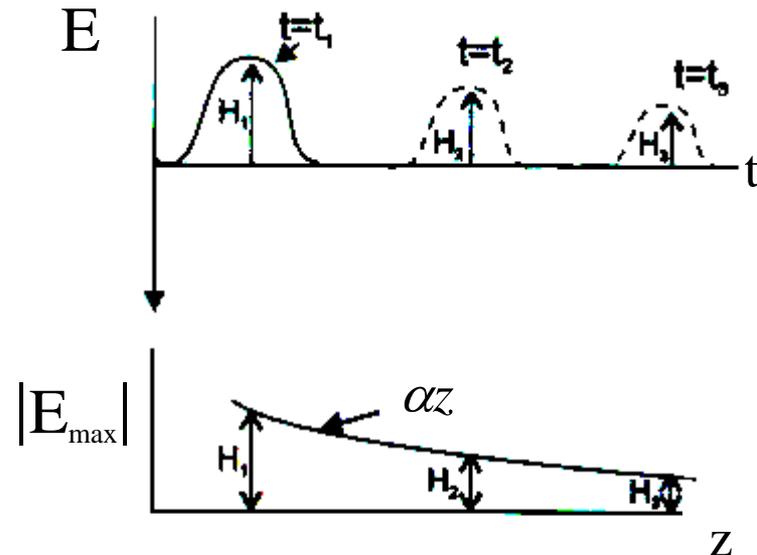
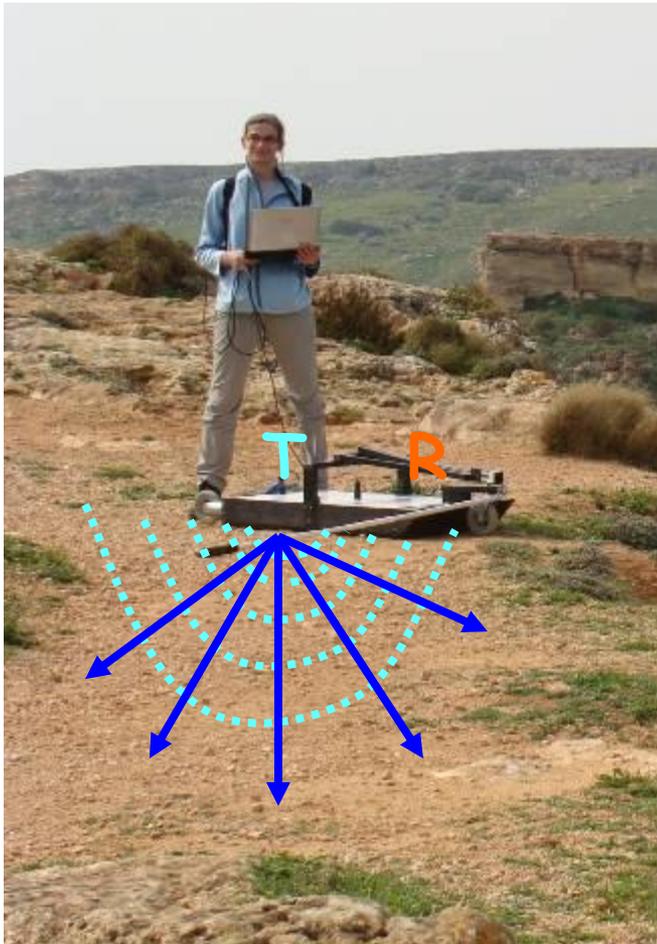


Figure 2.10: EM fields propagate as spatially damped waves when electrical losses are small. The signal amplitude decays exponentially in the direction of field translation while the field shape remains invariant.

# Ground Penetrating Radar, GPR, Georadar, Ground Probing Radar



# Schema di funzionamento del GPR



*IL METODO GPR E', PER MOLTI  
VERSI, ANALOGO ALLA SISMICA A  
RIFLESSIONE, MA...*

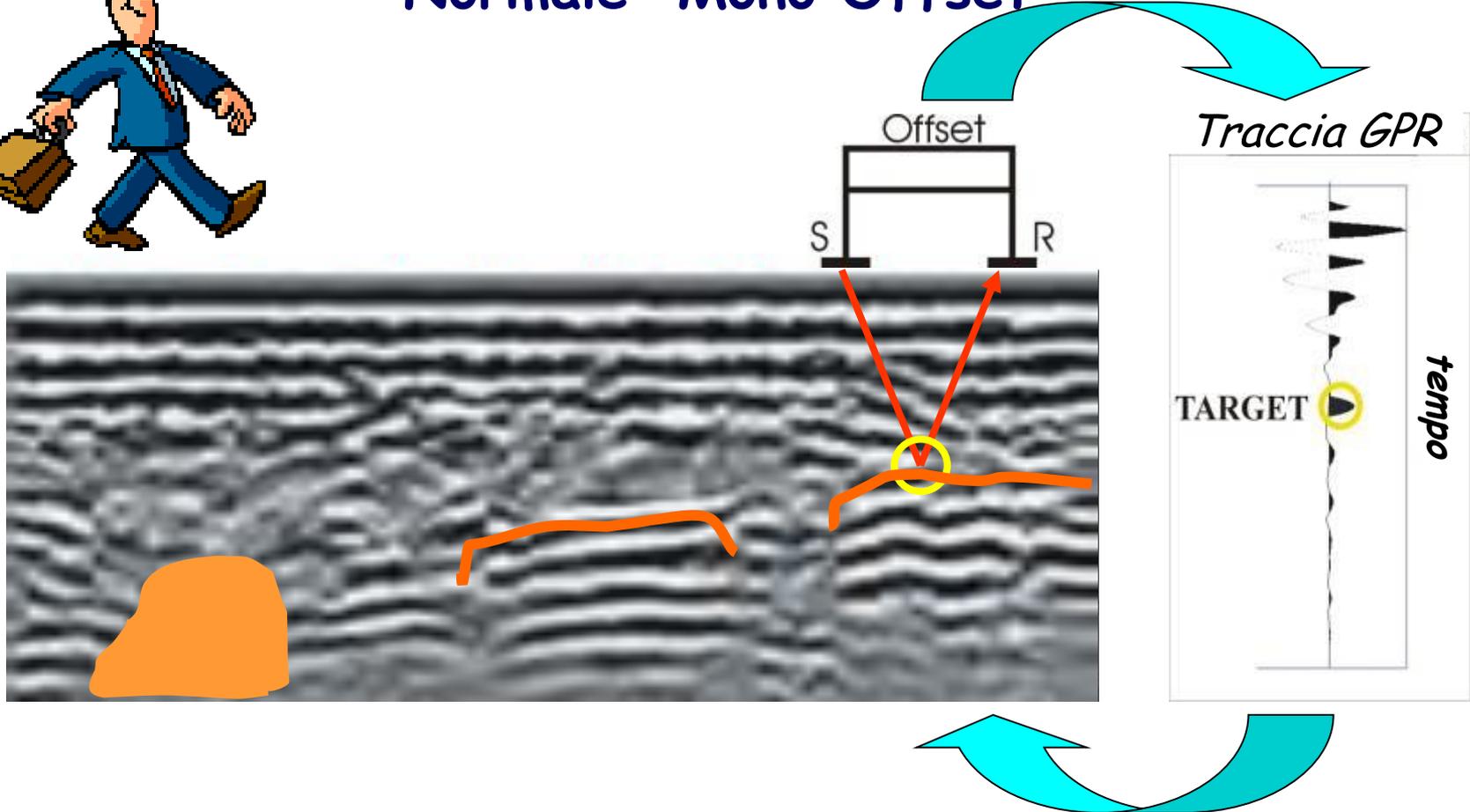
La **MAGGIORE DIFFERENZA** STA  
NELLA "SORGENTE" (T)

Caso **SISMICO**: Non direttiva  
(Monopolo)

Caso **EM**: **DIPOLARE, DIRETTIVA**,  $E$   
ed  $M \rightarrow$  il campo d'onda registrato è  
**FUNZIONE DELL'ORIENTAZIONE** di  
 $T$  ed  $R$  rispetto ai target

**Trasmissione** e **Ricezione** (in superficie) di onde EM  
di diversa natura  $\rightarrow$  **USO DELLE RIFLESSIONI** per  
ricavare informazioni sul sottosuolo

# Schema di funzionamento del GPR "Normale" Mono Offset



*Si utilizzano le RIFLESSIONI delle onde EM  
Causate da variazioni dei parametri EM nel sottosuolo*

# GPR → Campi di applicazione

## Geologia

### *Geological:*

Detection of natural cavities and fissures  
 Subsidence mapping  
 Mapping sand body geometry  
 Mapping of superficial deposits  
 Soil stratigraphy mapping  
 Glacial geological investigations  
 Mineral exploration and resource evaluation  
 Peat thickness mapping and resource evaluation  
 Permafrost investigations  
 Location of ice wedges  
 Fracture mapping in rock salt  
 Location of faults, dykes, coal seams, etc.  
 Geological structure mapping  
 Lake and riverbed sediment mapping

## Ambiente

### *Environmental:*

Contaminant plume mapping  
 Mapping and monitoring pollutants within groundwater  
 Landfill investigations  
 Location of buried fuel tanks and oil drums  
 Location of gas leaks  
 Groundwater investigations

## Glaciologia

### *Glaciological:*

Ice thickness mapping  
 Determination of internal glacier structures  
 Ice movement studies  
 Detection of concealed surface and basal glacier crevasses  
 Mapping water conduits within glaciers  
 Determination of thickness and type of sea and lake ice  
 Sub-glacial mass balance determination  
 Snow stratigraphy mapping

## Ingegneria

### *Engineering and construction:*

Road pavement analysis  
 Void detection  
 Location of reinforcement (rebars) in concrete  
 Location of public utilities (pipes, cables, etc.)  
 Testing integrity of building materials  
 Concrete testing

## Archeologia

### *Archaeology:*

Location of buried structures  
 Detection and mapping of Roman Roads, etc.  
 Location of post-holes, etc.  
 Pre-excavation mapping  
 Detection of voids (crypts, etc.)  
 Location of graves

## Perizie...

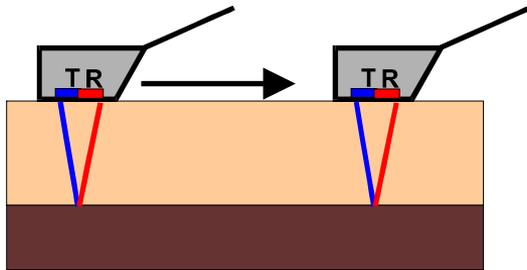
### *Forensic science:*

Location of buried targets (e.g. bodies and bullion)

# Acquisizione dati GPR (Monocomponente)

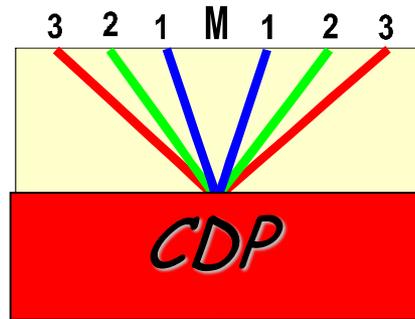
UD3

**SINGLE FOLD  
(SF)**



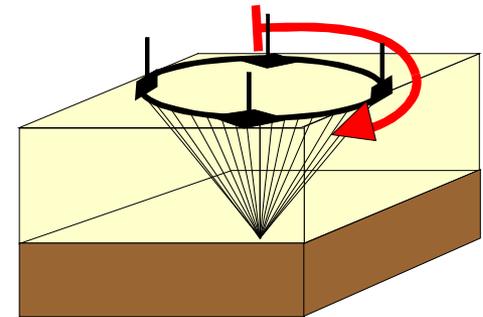
*Azimuth e Offset  
costanti*

**MULTI FOLD (MF)**



*Azimuth costante  
Offset variabile*

**AZIMUTHAL  
MULTI FOLD (MA)**



*Azimuth e Offset  
Variabili  
(modi TE e TM)*

**Acquisizione standard  
METODO**

**NORMALMENTE USATO**

# GPR in POZZO

## *Limiti e vincoli del GPR da superficie*

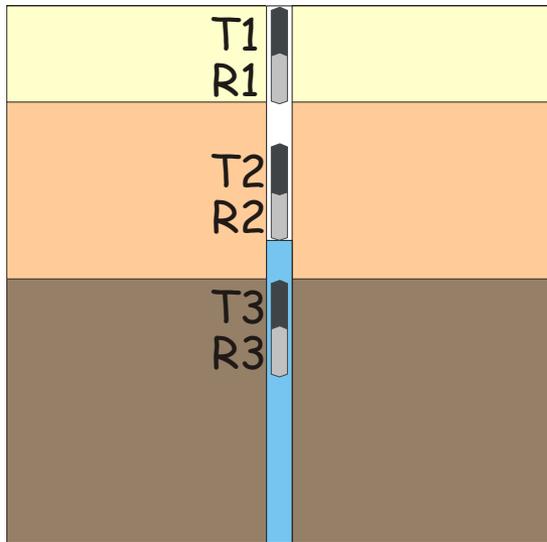
1. Limitata massima profondità di indagine raggiungibile (con terreni ad alta conduttività in superficie)
2. Buon dettaglio su singole discontinuità, ma scarse informazioni sulle caratteristiche "globali" dei materiali  
limiti di imaging per:
  - fratture molto sottili (Contrasto proprietà elettromagnetiche molto piccolo → piccolo coefficiente di riflessione)
  - discontinuità verticali/subverticali

Per superare alcuni di questi limiti → GPR in POZZO

# GPR in POZZO

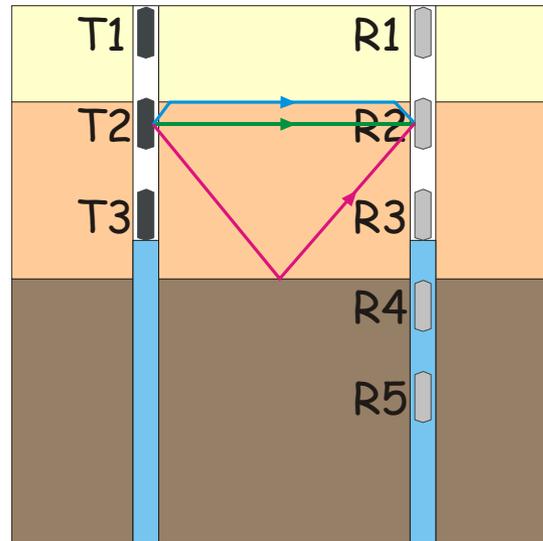
## Metodi di acquisizione dati in pozzo

### Riflessione



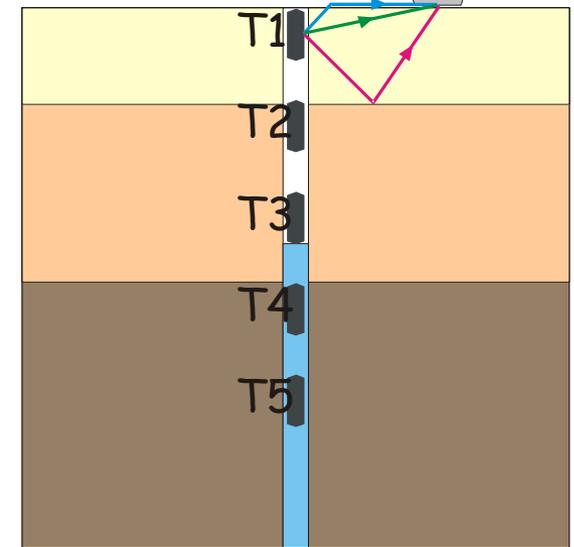
*T e R nello stesso pozzo*

### Tomografia



*T e R in pozzi diversi*

### Vertical Radar Profiling - VRP



*T in pozzo  
R sulla superficie  
(o viceversa)*

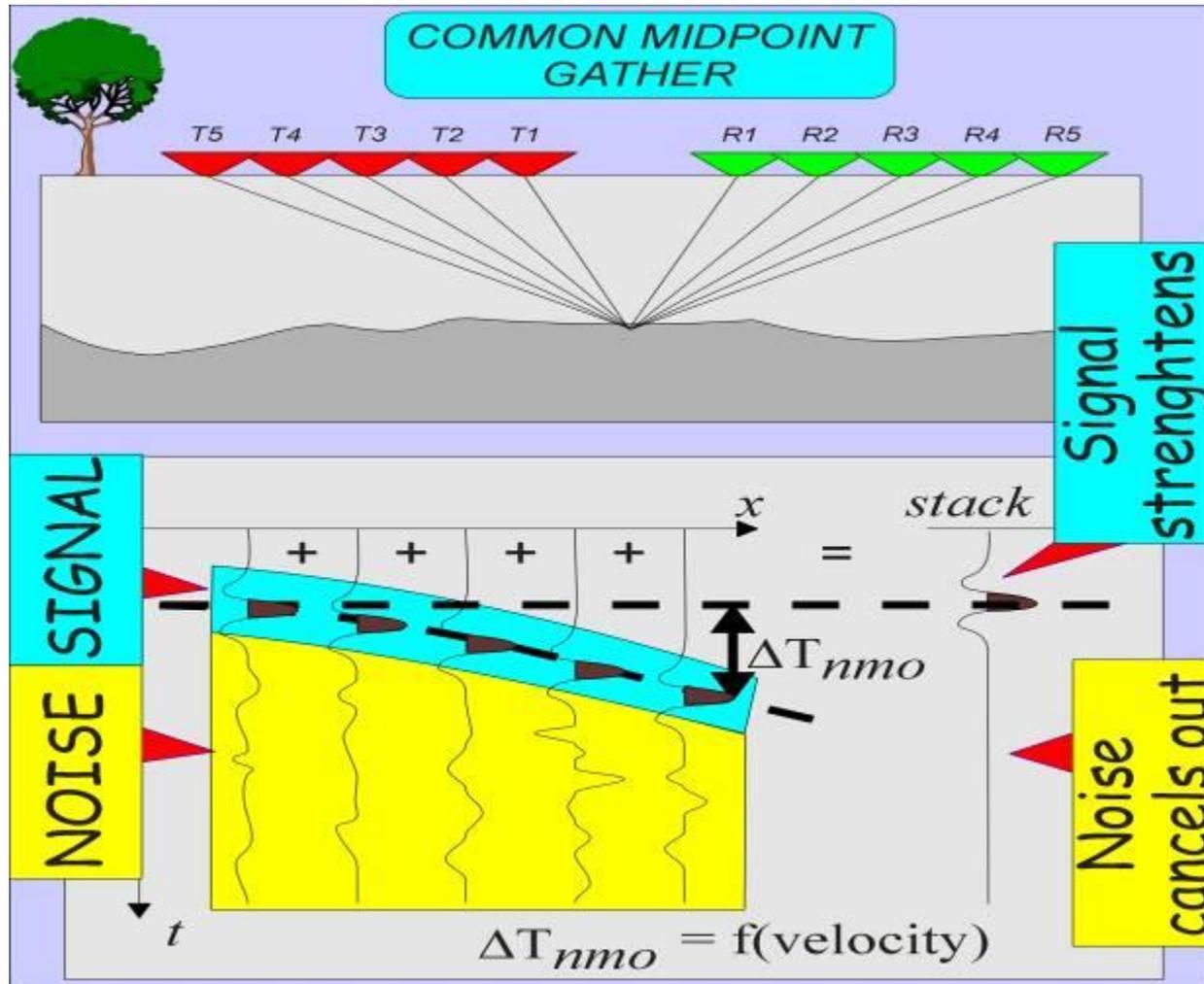
# GPR in POZZO

## *Misure in pozzo: Tomografia*



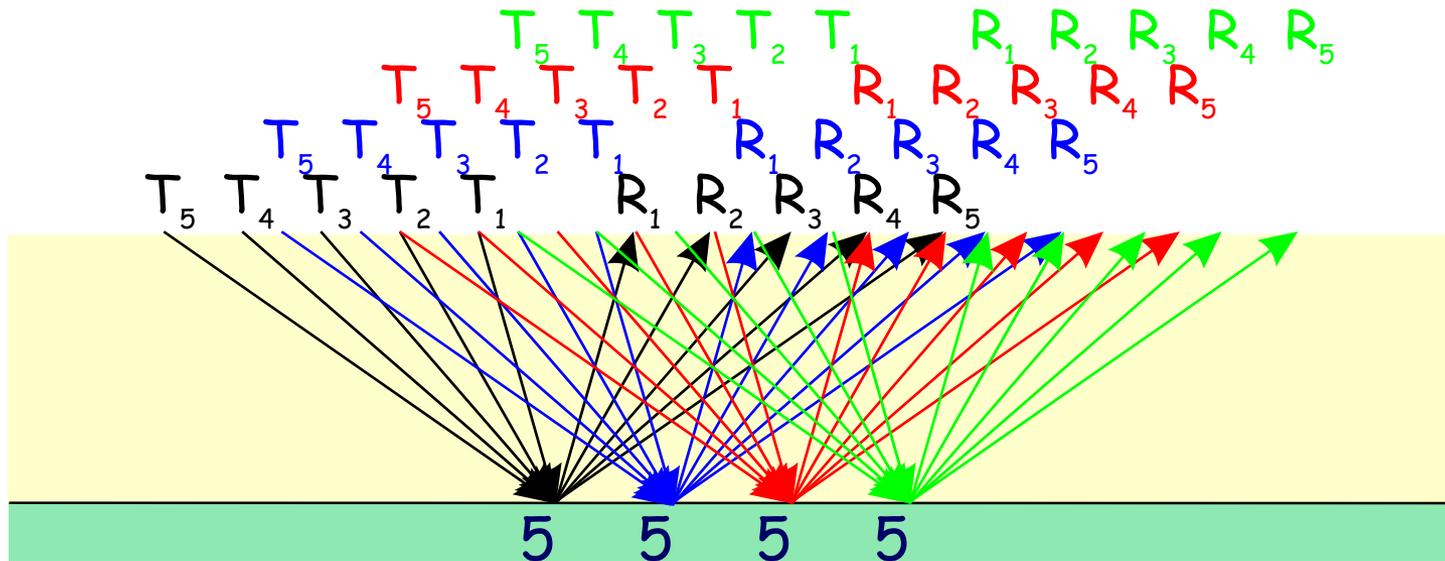
# GPR "MULTIFOLD"

## Correzione di NMO e Stack dei dati



# GPR "MULTIFOLD"

## Metodi di acquisizione dati GPR Multi-Fold Serie di **Common MidPoint Gather (CMP)**



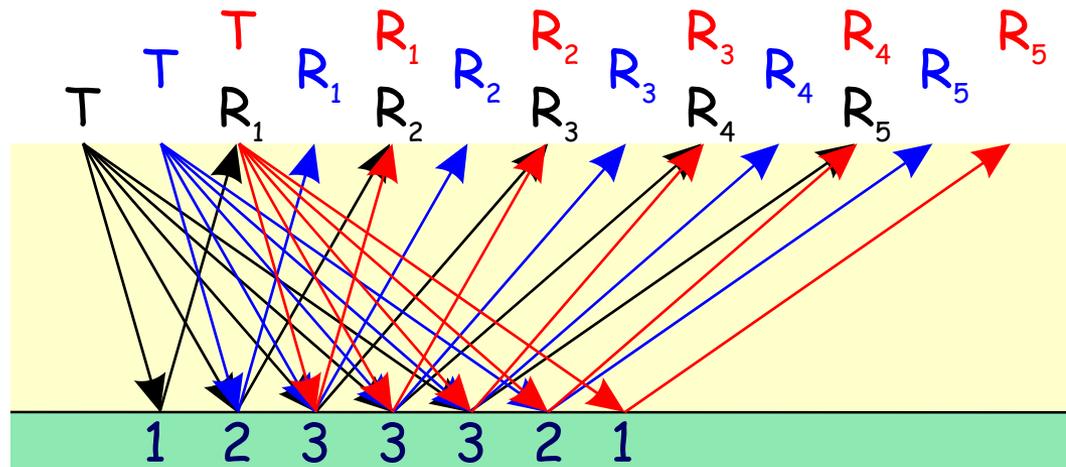
Copertura MAX virtualmente illimitata e costante

Massimo tempo di acquisizione ed accuratezza

# GPR "MULTIFOLD"

## Metodi di acquisizione dati GPR Multi-Fold

### Serie di Common Shot Gather



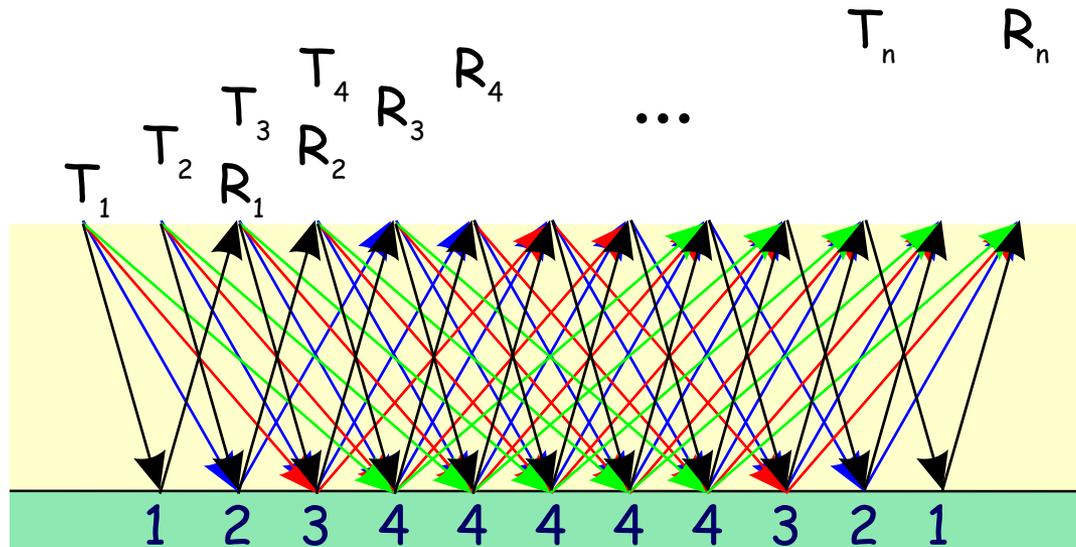
Copertura MAX per  $\Delta \text{shot} = \Delta \text{offset} / 2$

Medio tempo di acquisizione ed accuratezza

# GPR "MULTIFOLD"

## Metodi di acquisizione dati GPR Multi-Fold

### Serie di **Common Offset Gather**



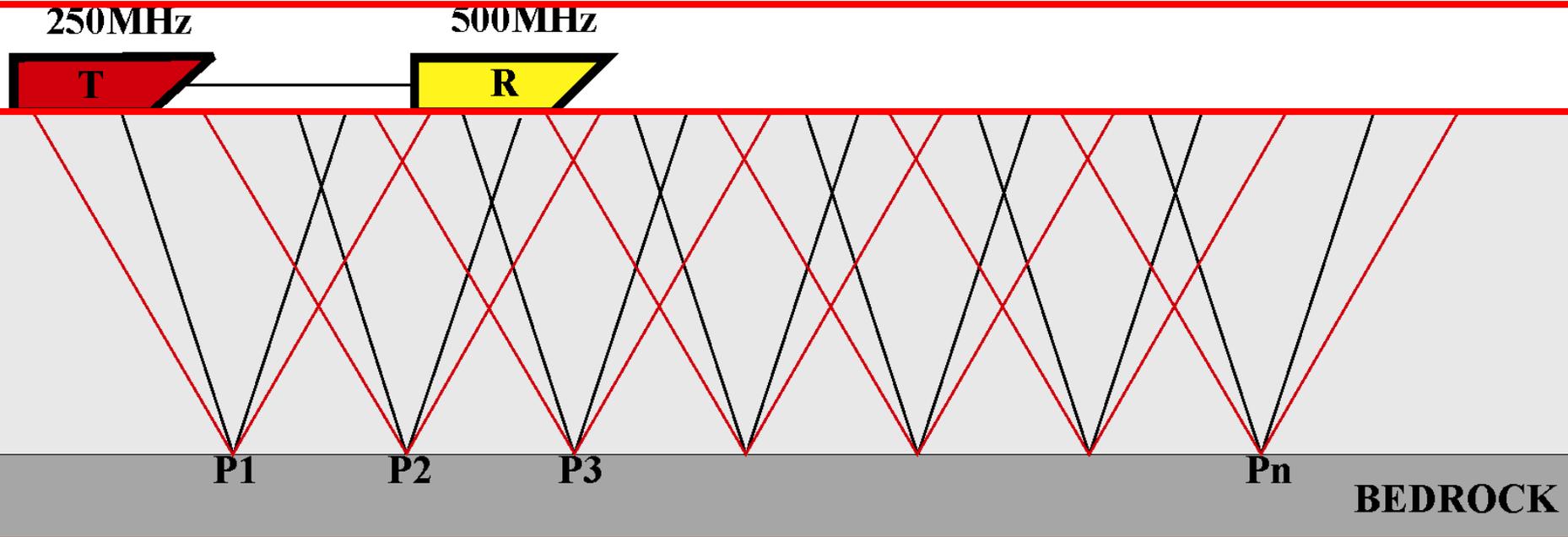
Copertura  $MAX=N(COG)$

Minimo tempo di acquisizione ed accuratezza

# GPR "MULTIFOLD"

## Metodi di acquisizione dati GPR *multifold*

Acquisizione serie di "common offset"



# GPR "MULTIFOLD"

## Perche' il GPR "MULTI-FOLD"



# GPR "MULTIFOLD"

## Importanza della stima della velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica

- 1) Stacking (somma in fase)
- 2) Conversione in profondità → corretta profondità e geometria degli oggetti
- 3) Migrazione/imaging → corretta forma degli oggetti (+ uso come parametro necessario in altri algoritmi ad es. correzione per la divergenza sferica)
- 4) Informazioni aggiuntive sui materiali e contenuto in fluidi

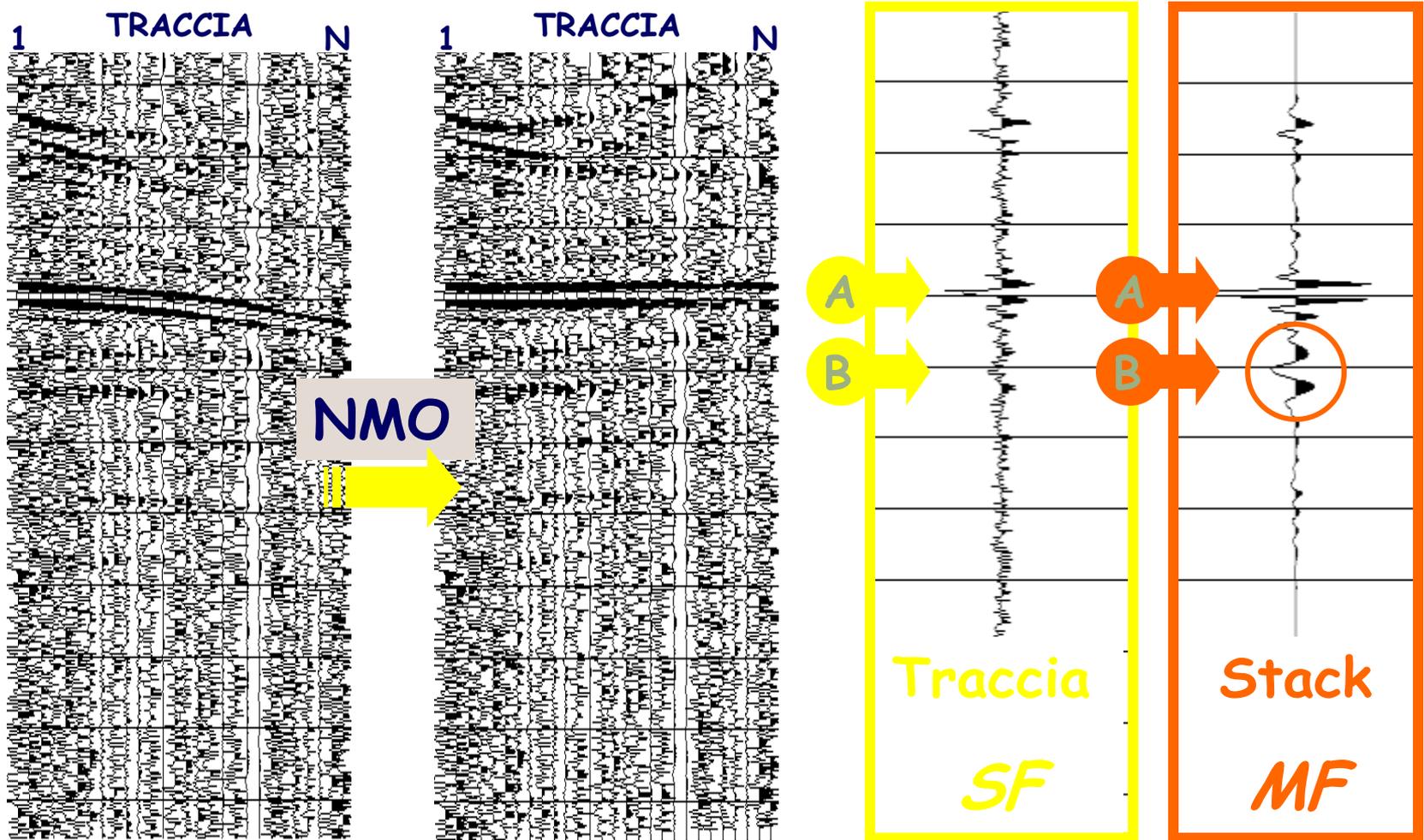
Con GPR "single Fold" è possibile stimare la velocità dell' onda EM SOLO mediante le IPERBOLI DI DIFFRAZIONE

### LIMITAZIONI:

- Effettiva presenza delle iperboli (specie con antenne a bassa f),
- Difficoltà nel valutare variazioni laterali,
- Problemi nel fitting legati a interferenze tra eventi diversi.

# GPR "MULTIFOLD"

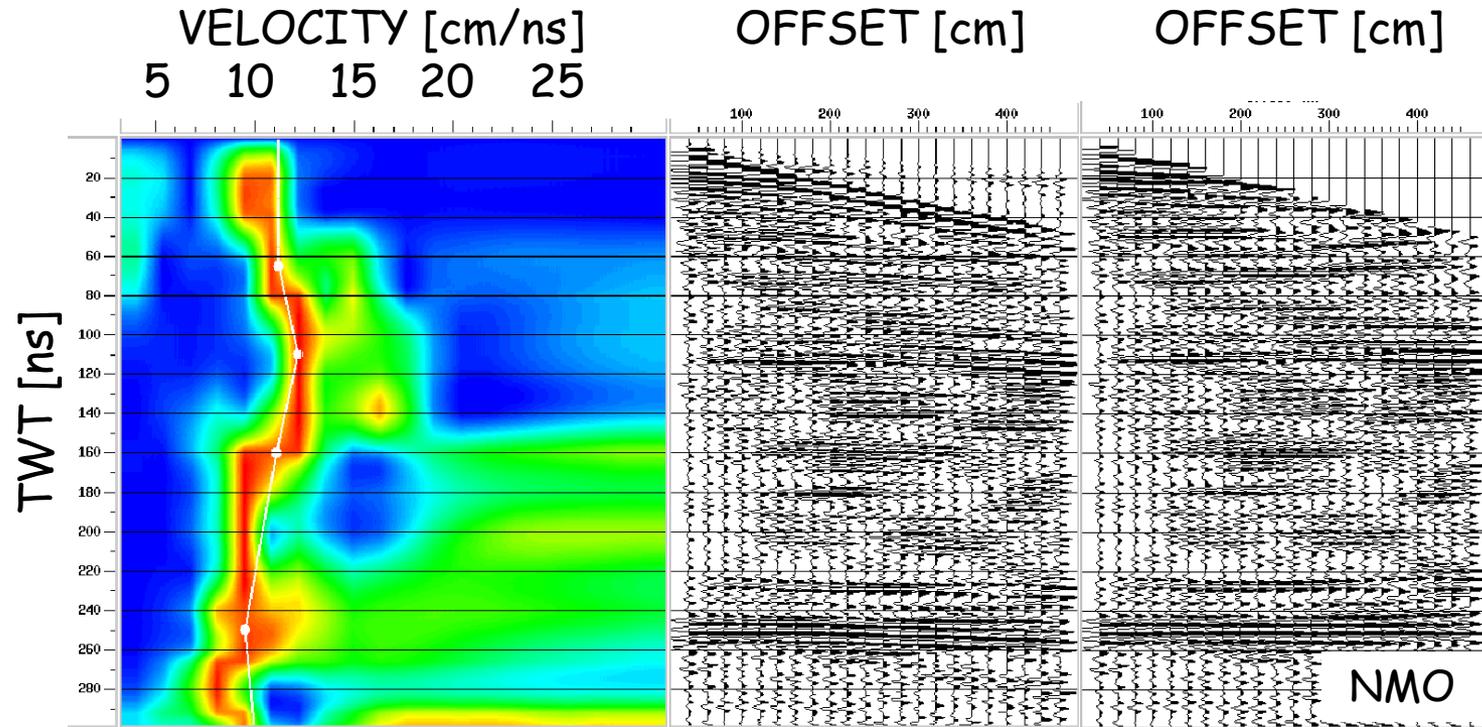
## Correzione di NMO e Stack dei dati



Incremento teorico Segnale/Rumore =  $\sqrt{N}$

# GPR "MULTIFOLD"

## Examples of Semblance VELOCITY analysis



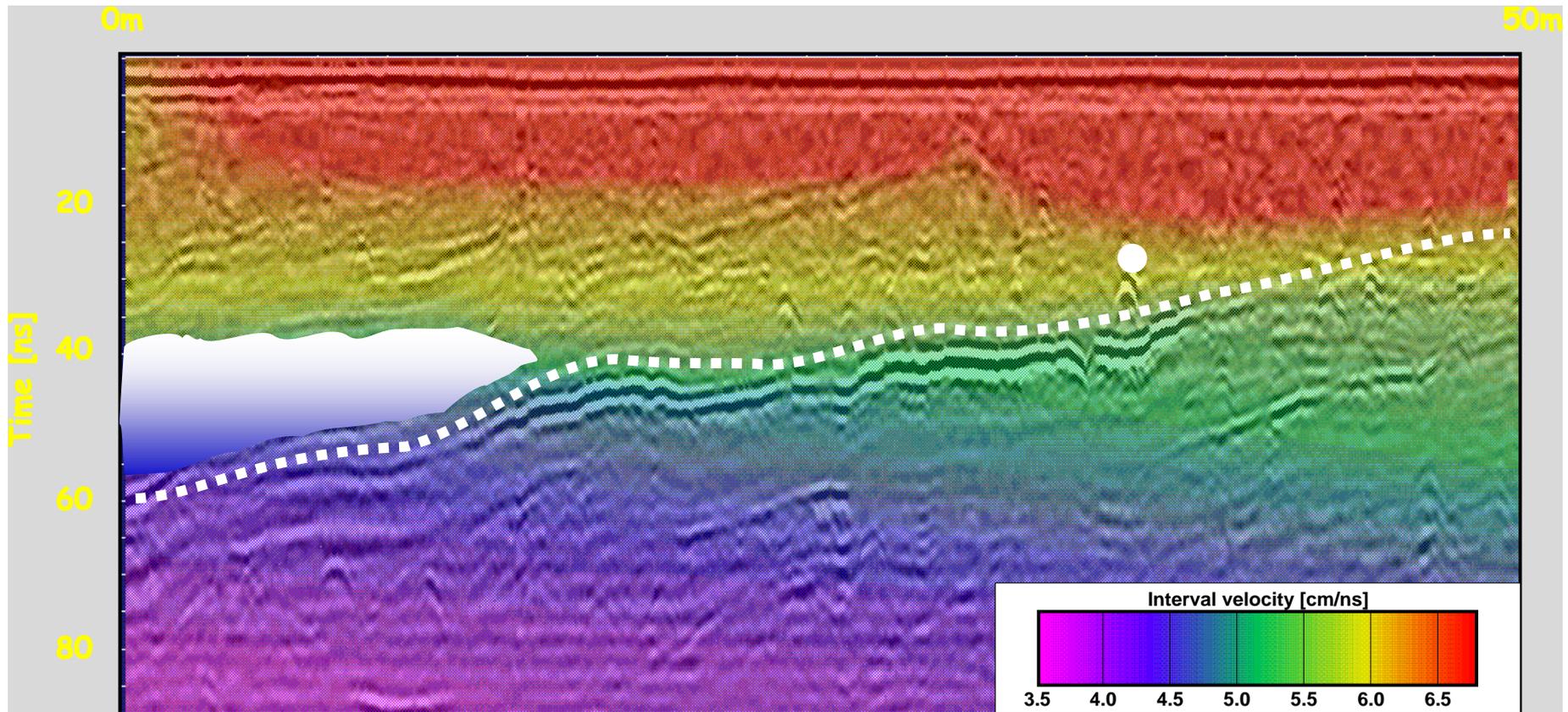
Velocity dependence from layer dips and  
 Presence of LATERAL and VERTICAL variations  
*inhomogeneous materials*

But also ... Azimuthal variations

*anisotropic materials*

# GPR "MULTIFOLD"

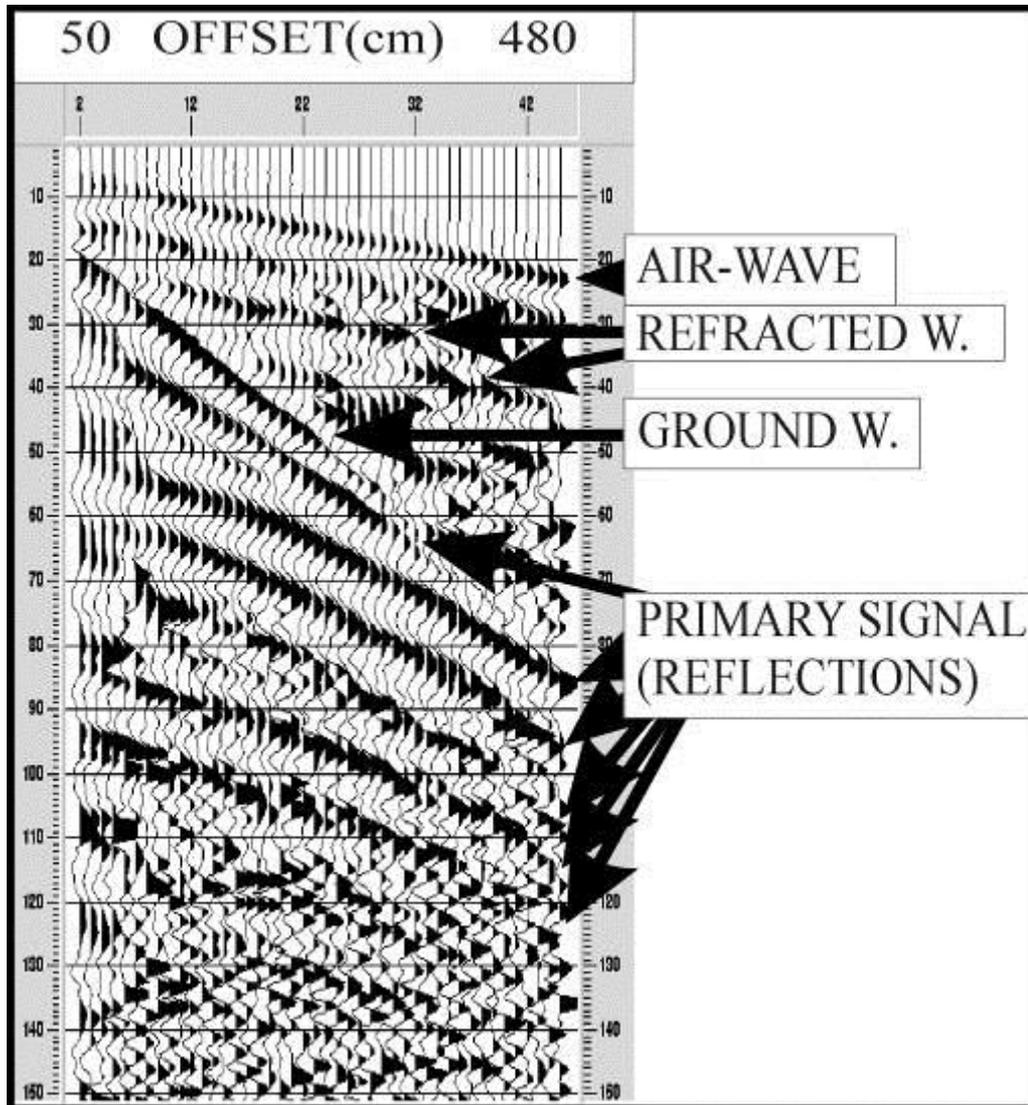
## *Ricostruzione 2D del campo di velocità'* *Conversione in profondita' ed informazioni aggiuntive*



*Interpretazione "guidata" e piu' semplice ed accurata*

# GPR "MULTIFOLD"

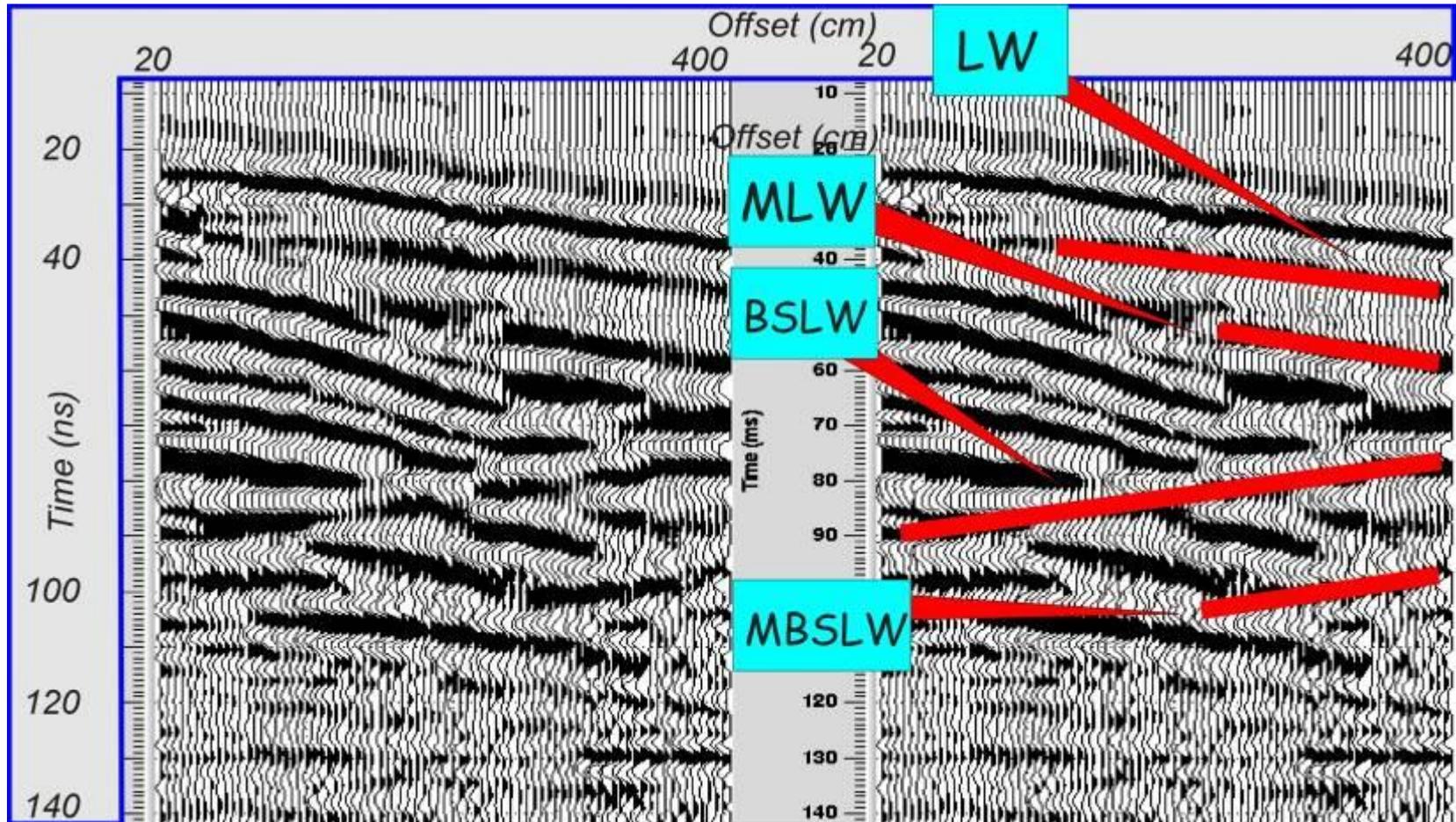
## Analisi dei dati Multi-Fold



Il SEGNALE ed i RUMORI anche COERENTI  
 Possono essere discriminati e rimossi SOLO su dati MULTI-FOLD

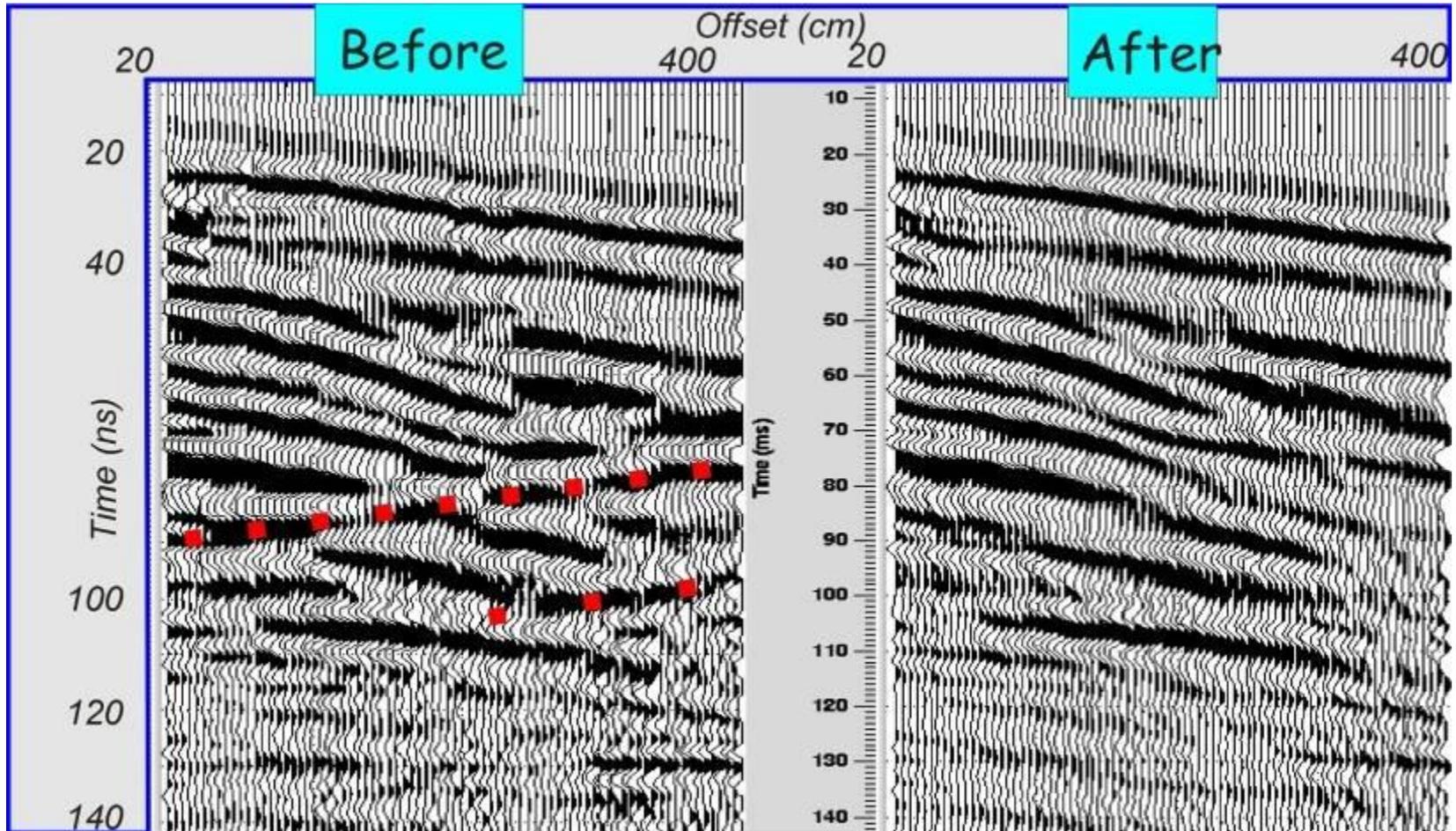
# GPR "MULTIFOLD"

Multi-Fold: identificazione di rumori coerenti



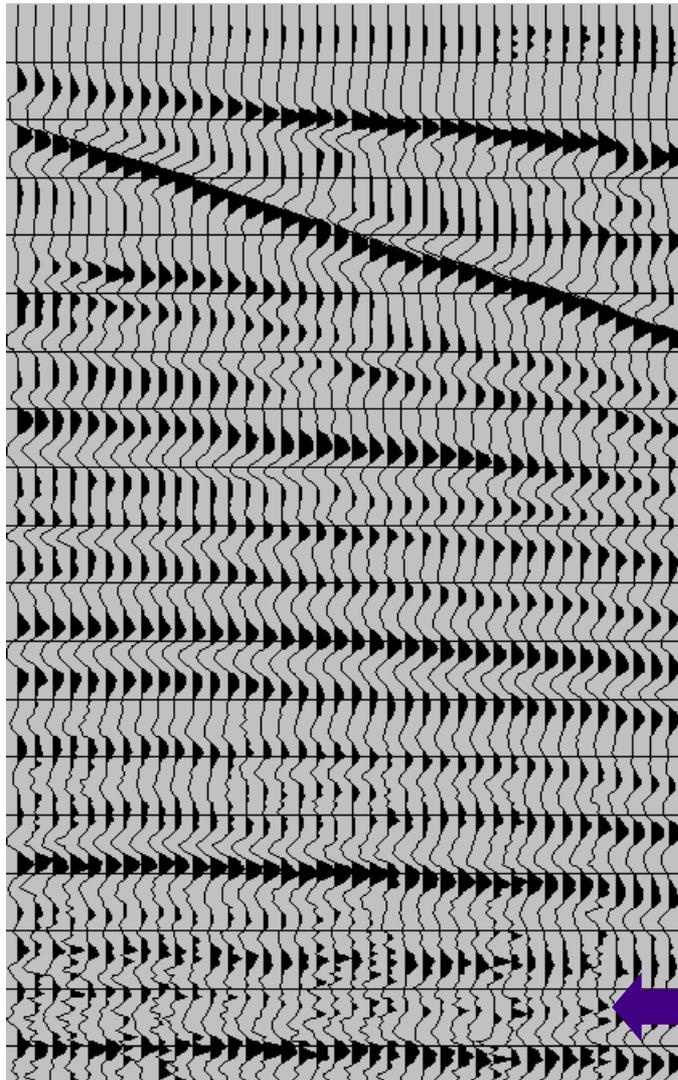
# GPR "MULTIFOLD"

Multi-Fold: rimozione di rumori coerenti



# GPR "MULTIFOLD"

Common  
Midpoint  
Gather  
(CMP)



Rumore a B e A frequenza

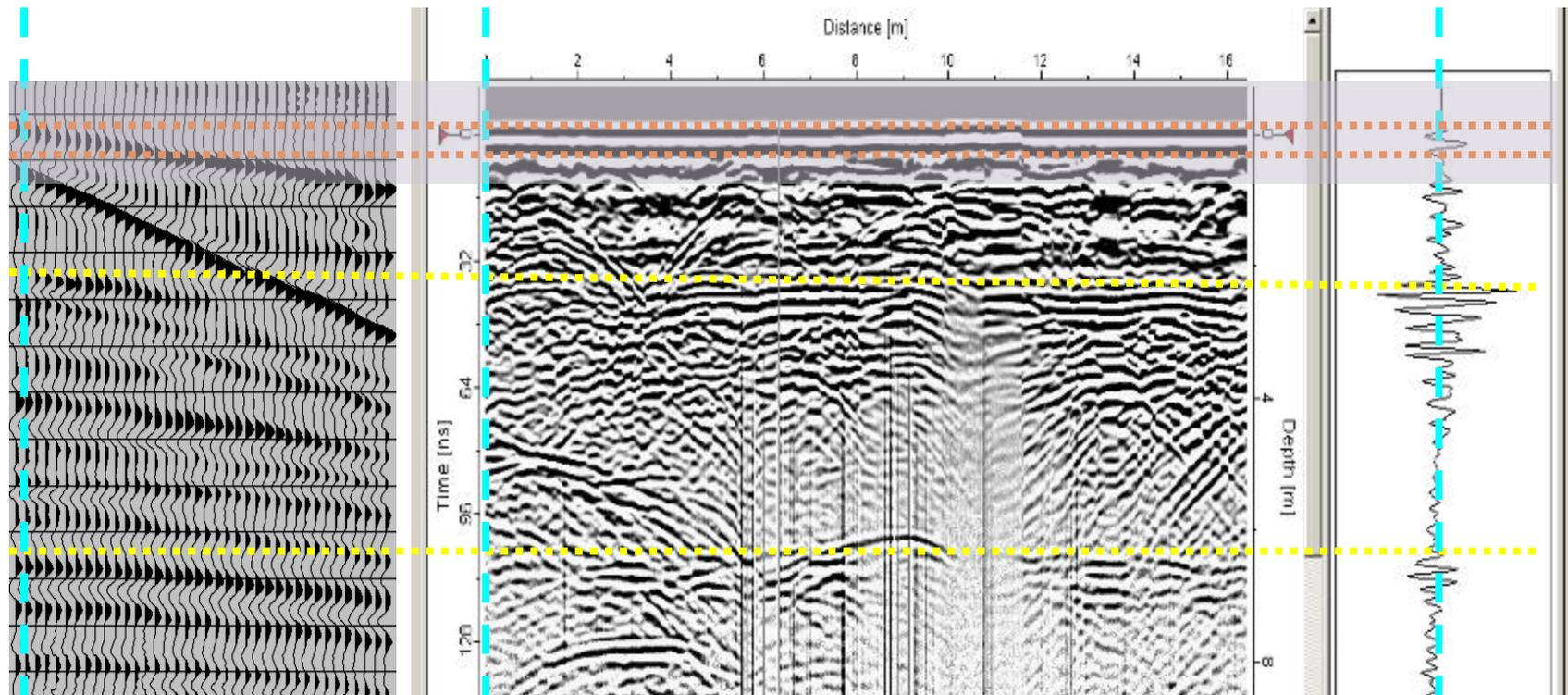
Onda d'aria ( $v=30\text{cm/ns}$ )  
Air wave

Onda di terra ( $v=1^\circ$  strato)  
Ground Wave

Segnale Utile:  
RIFLESSIONI

Rumori incoerenti → casuali

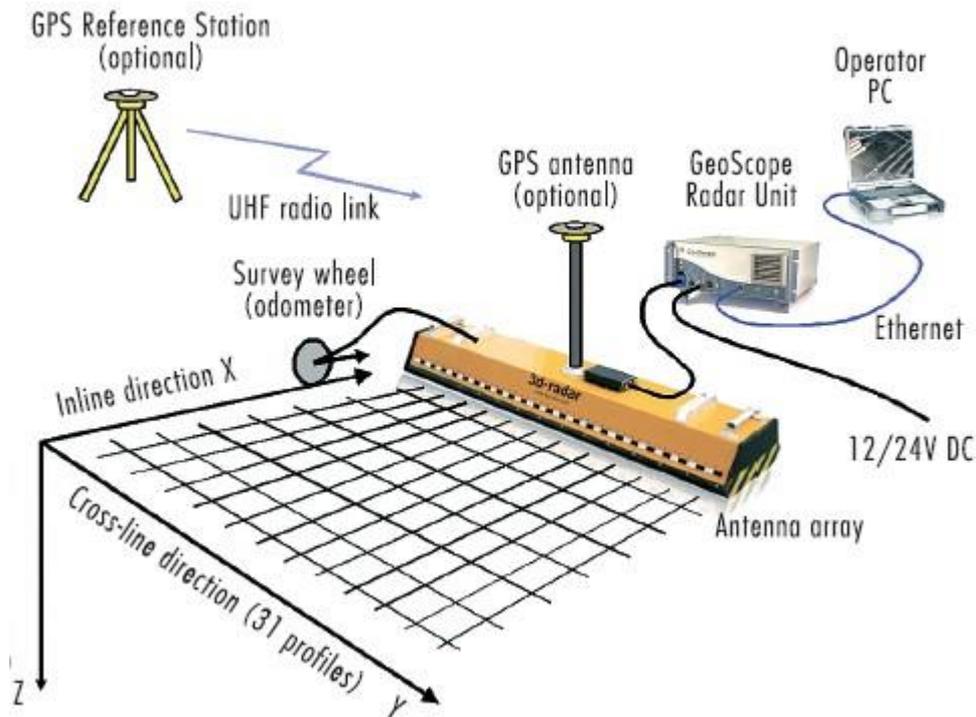
# GPR "MULTIFOLD"



Acquisizioni single-fold (Common Offset)  
e multi-fold (Multi Offset)

Onda d'aria, Onda di terra, **riflessioni**, diffrazioni, rumori coerenti, rumori incoerenti, onde laterali

# GPR "MULTIARRAY"



**E' possibile acquisire SERIE di profili single-fold  
Possono essere Common Offset, a Offset variabile ad Azimuth variabile**

## VANTAGGI:

**Minor tempo di acquisizione**

**Maggiore copertura (soprattutto x-line) → Ridondanza dei dati**

## SVANTAGGI:

**Costi maggiori**

**Logistica piu' complessa e limiti maggiori (accessibilità)**

# ACQUISIZIONE DATI GPR

Parametri fondamentali per l'acquisizione dei dati GPR

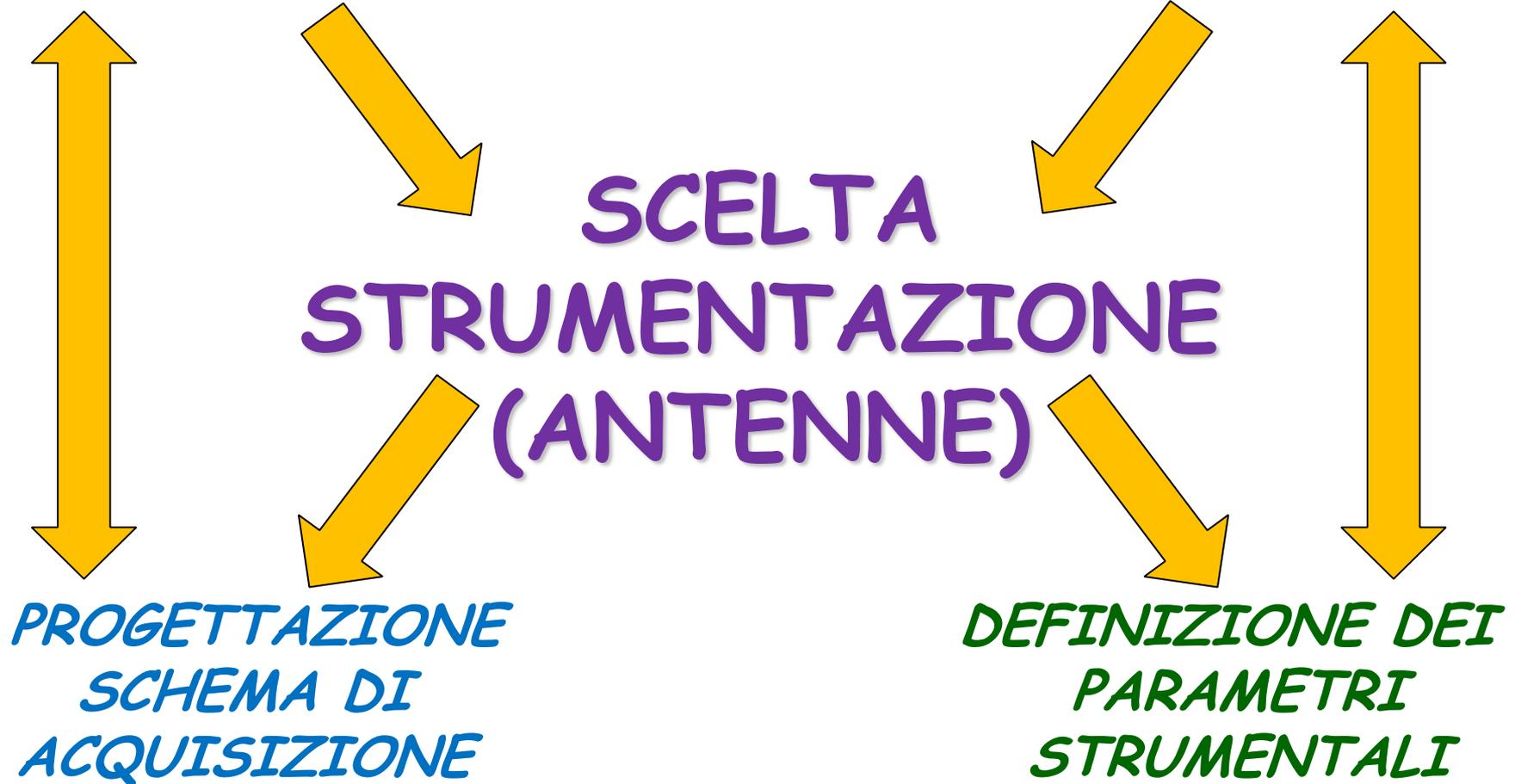
1. Frequenza e tipologia antenne
2. Lunghezza delle tracce/numero di campioni per traccia/intervallo di campionamento
3. Intervallo fra le tracce
4. Intervallo fra i profili
5. Direzione dei profili

Profilo	N° tracce	Intervallo tra le tracce (cm)	Lunghezza profilo (m)	N° stack verticali	Offset (cm)	N° campioni per traccia	Intervallo di campionamento (ns)
P0	1121	25	280	16	70	512	0.398
P1	383	25	95.75	16	70	1024	0.398
P2	770	2.5	192	16	30	1024	0.797
P3	724	5	36.15	16	70	512	0.398
P4	699	5	34.9	16	70	512	0.398
P5	577	5	28.8	16	70	512	0.398
P6	539	5	29.9	16	70	512	0.398

# ACQUISIZIONE DATI GPR: scelta dei parametri

**LOGISTICA  
DELLA ZONA  
DI ACQUISIZIONE**

**DIMENSIONI  
E PROFONDITA'  
DEL TARGET**



# ACQUISIZIONE DATI GPR

## 1. Frequenza e tipologia antenne



### SCHERMATE

- *Evitano la registrazione di rumori ambientali*
- *Limitano la registrazione di riflessioni in aria*
- *Meno maneggevoli delle antenne unshielded*
- *Offset fisso*



## TIPO DI ANTENNE

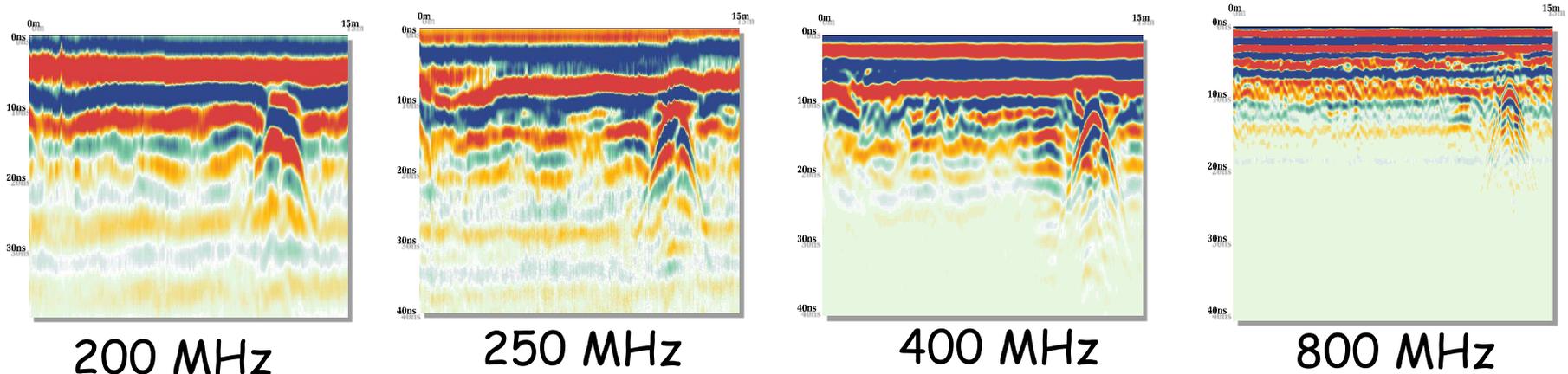
### NON SCHERMATE

- *Registrano rumori ambientali (es. telefonini)*
- *Registrano riflessioni in aria → non utilizzabili in ambiente "urbano"*
- *Molto maneggevoli*
- *Offset e configurazione variabile*



# ACQUISIZIONE DATI GPR

## 1. Frequenza e tipologia antenne



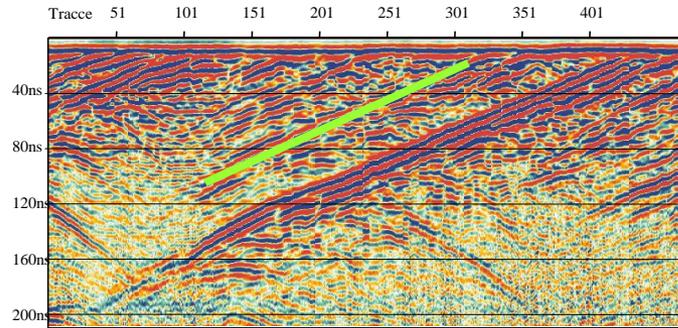
- **Profondità massima di investigazione estremamente variabile inversamente proporzionale alla frequenza delle antenne utilizzate e fortemente dipendente dalle caratteristiche dei materiali**
- **Risoluzione verticale direttamente proporzionale alla frequenza delle antenne utilizzate e inversamente proporzionale alla velocità dei mezzi. Ordine di grandezza: cm÷m.**

$$v = f\lambda$$

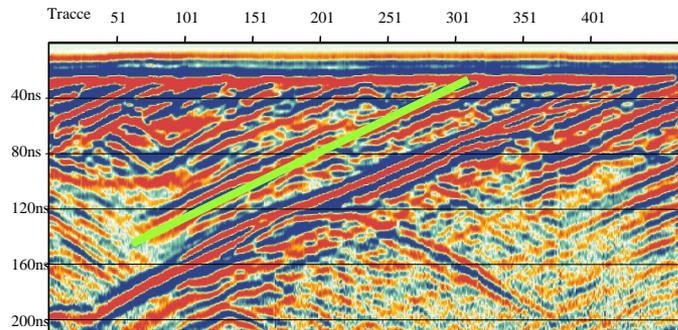
$$R_{\max} = \lambda / 4$$

# ACQUISIZIONE DATI GPR

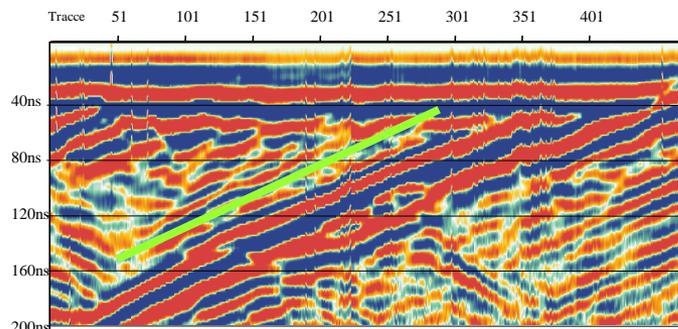
## 1. Frequenza e tipologia antenne



**200 MHz**



**100 MHz**



**50 MHz**

Scelta antenne condizionata anche da questioni "logistiche":

- < frequenza centrale → > dimensioni
- < frequenza centrale → > offset  
(per evitare near field)
- antenne schermate → > ingombro

Attualmente esistono sistemi "MULTICANALE" che utilizzano contemporaneamente piu' set di antenne a diversa frequenza centrale → informazioni complementari e ridondanza dei dati → maggiore precisione e controllo dei risultati

# ACQUISIZIONE DATI GPR

## 2. Lunghezza delle tracce/numero di campioni per traccia/intervallo di campionamento

Essendo i dati digitalizzati, cioè **DISCRETIZZATI** la scelta del campionamento  $\Delta t$ , del numero di campioni della traccia  $N$  e di conseguenza della sua lunghezza temporale  $T$ , cioè:  $T=N\Delta t$  condiziona i risultati:

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  $f_s = \frac{1}{\Delta t} = f$  di campionamento

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

### IN PRATICA:

1. la f di campionamento deve essere sufficientemente **ELEVATA** (in funzione della f del segnale immesso)
2. L'intervallo di campionamento sufficientemente **PICCOLO** per avere una  $f_N$  superiore alla max frequenza di interesse
3. La lunghezza temporale della traccia deve essere sufficiente per registrare segnali fino alla profondità di interesse - sempre che ce ne sia!  
(e campionare correttamente le frequenze di interesse)

# ACQUISIZIONE DATI GPR

## 3. Intervallo fra le tracce

< è l'intervallo fra le tracce → > risulta la risoluzione laterale, ma...

Dipendenza dai parametri del materiale (es. velocità)

Dipendenza dai parametri delle antenne (direzionalità along across track, pattern di radiazione)

**DETECTABILITY:** possibilità di identificare un oggetto

Come minimo, per essere identificato un oggetto deve essere visualizzato su 2 tracce contigue → nella progettazione del rilievo, l'intervallo fra le tracce < **Dimensione target piu' piccolo/2**

Il "triggering" dello strumento è automatico → è facile incrementare in numero di tracce per unità di spazio (attenzione alla quantità finale dei dati!)

## 4. Intervallo fra i profili

Un target per essere individuato (facilmente) deve essere presente su almeno 2 profili adiacenti → nella progettazione del rilievo, l'intervallo fra i profili < **Dimensione target piu' piccolo/2**

# ACQUISIZIONE DATI GPR

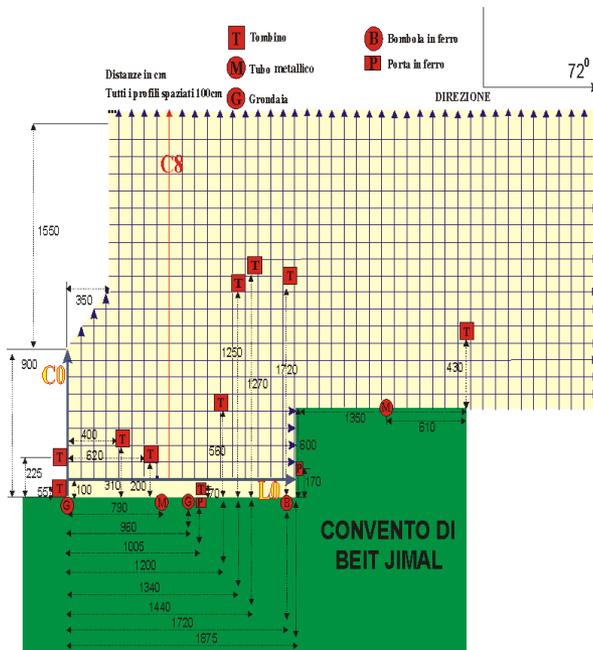
## 5. Direzione dei profili

E' **SEMPRE** opportuno effettuare più profili adiacenti → correlazione dei dati, validazione reciproca

Normalmente i dati vengono acquisiti secondo profili paralleli entro **GRIGLIATI**.

Se direzione delle strutture **NOTA** → effettuare i profili perpendicolarmente alle strutture

Se direzione delle strutture **NON NOTA** e/o strutture con direzione **VARIABILI** → effettuare i profili secondo 2 direzioni perpendicolari



### Considerare vincoli logistici:

- Oggetti metallici,
- Tipo e condizioni superficie
- Ostacoli
- Pendenza → se possibile privilegiare acquisizione **LUNGO** isopse
- Possibilità di acquisire profili con lunghezza sufficiente:  
se troppo corti → poco significativi

# Applicazione del GPR: Potenzialità e Limiti



- Costi enormemente più bassi se comparati allo scavo
- Non invasivo/Non distruttivo
- Possibilità di indagini di dettaglio
- Ricostruzioni 2D e 3D
- Possibili, in alcuni casi informazioni quantitative (stima porosità, determinazione volumi,...)



- Limiti ed errori di interpretazione
- Limiti di risoluzione
- Limiti di penetrazione (materiali conduttivi/acqua)
- Risposta fortemente dipendente dal sito/dai target
- Uso impossibile per indagini al di sotto di corpi metallici (attenzione anche alle reti elettrosaldate), in presenza di acqua salmastra o salata, se suoli argillosi o siltosi

# DOMANDE?

